



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

**CONFIABILIDADE METROLÓGICA EM**  
**TERMOGRAFIA APLICADA EM SISTEMAS ELÉTRICOS**

**GUILHERME GONÇALVES DIAS TEIXEIRA**

**Belo Horizonte, 24 de Fevereiro de 2012**

**Guilherme Gonçalves Dias Teixeira**

**CONFIABILIDADE METROLÓGICA EM  
TERMOGRAFIA APLICADA EM SISTEMAS ELÉTRICOS**

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

Área de concentração: Calor e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Roberto Márcio de Andrade

Universidade Federal de Minas

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

*Aos meus pais, avós e amigos*

*Nestes últimos dois anos, convivi entre pessoas maravilhosas, que contribuíram imensamente com o meu trabalho e, particularmente, para meu crescimento como pessoa. Por isso, não poderia deixar de agradecê-las neste momento.*

*a Deus por todas as oportunidades, conquistas e sonhos;*

*aos meus pais, Israel e Ana, que muitas vezes abdicaram seus sonhos para que eu pudesse viver os meus. E a minha querida irmã, Fabiana, cuja inocência me emociona;*

*a minha namorada, Luciana, pelo apoio incondicional;*

*aos meus avós Pedro e Regina, que me acolheram como seu filho; e aos meus tios, em especial, ao Marcelo, por me receber como irmão;*

*ao meu orientador e amigo, Roberto Márcio de Andrade, pela sabedoria, confiança e o espírito científico com que me guiou ao longo deste trabalho;*

*ao prof. Márcio Fonte Boa pelos conselhos e admirável curiosidade; ao prof. Rudolf Huebner pelas valorosas referências que constituem a base deste trabalho; e ao prof. Claysson Vimieiro pelos conselhos e apoio;*

*aos amigos Flávio Calado, Fernanda Batista e Rafael Batista que me acolheram com sua calorosa amizade;*

*aos amigos Selson, Eduardo, Rafael Ferreira e Nilton Jr. Pelo auxílio na condução dos ensaios e dos momentos de descontração;*

*aos amigos Bruno, Júlia, Luiz Guilherme, Leonardo e Rafael pelo apoio, dedicação e o espírito juvenil;*

*ao Engº Henrique Diniz, gerente do P&D 235, que concebeu a infraestrutura necessária para a realização deste projeto e nunca me deixou esquecer um congresso (!);*

*ao Engº Nilton Soares, pelo apreço, dedicação e por encurtar as distâncias entre o laboratório e a realidade;*

*ao inspetor Wagner, pelas valiosas informações e condução das inspeções termográficas;*

*a Companhia Energética de Minas Gerais, Cemig, e Agência Nacional de Energia Elétrica, Aneel, por fomentar esta pesquisa;*

*e aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG;*

*A todos vocês, a minha mais profunda gratidão.*

## SUMÁRIO

<b>SÍMBOLOS</b> .....	<b>ii</b>
<b>CONSTANTES</b> .....	<b>iii</b>
<b>SUBSCRITO</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABREVIACÕES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>x</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1 ENSAIOS TÉRMICOS NÃO-DESTRUTIVOS.....	4
2.2 RADIAÇÃO TÉRMICA.....	14
2.2.1 <i>A Lei de Planck</i> .....	15
2.2.2 <i>Lei de Stefan-Boltzmann</i> .....	17
2.2.3 <i>As propriedades das superfícies reais</i> .....	17
2.2.4 <i>A absortividade, a refletividade e a transmissividade</i> .....	19
2.3 RADIAÇÃO INFRAVERMELHA.....	22
2.4 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA SEM CONTATO.....	23
2.4.1 <i>Transmissão e emissão atmosférica</i> .....	26
2.4.2 <i>Transmissão e emissão da óptica</i> .....	28
2.4.3 <i>Campo de visão</i> .....	29
2.4.4 <i>O modelo matemático da medição</i> .....	31
2.5 INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	36
2.5.1 <i>O Método GUM</i> .....	37
2.5.2 <i>O Método de Monte Carlo</i> .....	45
2.5.3 <i>Comparação GUM x Monte Carlo</i> .....	49
2.5.4 <i>Fontes de Incerteza de medição na termografia</i> .....	50
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>58</b>

3.1.1	<i>Conector paralelo à compressão “H”</i> .....	58
3.1.2	<i>Conector cunha de alumínio</i> .....	59
3.1.3	<i>Amostras</i> .....	59
3.1.4	<i>Ensaios</i> .....	62
3.1.5	<i>Inspeção Termográfica</i> .....	65
3.2	<b>ANÁLISE DA INCERTEZA</b> .....	67
3.2.1	<i>Incertezas em termografia pelo método GUM</i> .....	67
3.2.2	<i>Incertezas em termografia pelo MMC</i> .....	70
3.3	<b>SOFTWARE IMT</b> .....	74
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>76</b>
4.1	<b>MODELO DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO TERMOVISOR</b> .....	76
4.2	<b>ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS INTRÍNSECAS</b> .....	81
4.3	<b>INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA</b> .....	86
4.4	<b>DIAGNÓSTICOS DE FALHAS EM CONEXÕES ELÉTRICAS</b> .....	98
4.5	<b>INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA</b> .....	112
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>124</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>127</b>
<b>A.</b>	<b>ANEXO</b> .....	<b>i</b>
<b>B.</b>	<b>ANEXO</b> .....	<b>xiv</b>

## SÍMBOLOS

$\Delta T_{ref}$	Delta-T	$K$
$h_{conv}$	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$W/m^2K$
$h_{rad}$	Coeficiente de transferência de calor por radiação	$W/m^2K$
$D^*$	Detectividade normalizada	$W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$
$I_\lambda$	Intensidade radiação espectral	
$\dot{Q}$	Geração ou dissipação de calor	$W$
$S_k(\lambda)$	Sensibilidade espectral relativa	
$X$	Variável aleatória de entrada	
$d_{sup}$	Diferença superior das extremidades dos intervalos de abrangência	
$d_{inf}$	Diferença inferior das extremidades dos intervalos de abrangência	
$g_x$	Função de densidade de probabilidade	
$s^2$	Variância experimental	
$u_c$	Incerteza padrão combinada	
$\hat{x}$	Valor médio	
$\varepsilon-T_{ref}$	Correlação emissividade temperatura refletida	
$\mu_x$	Valor esperado	
$R_{CC}$	Resistência elétrica medida em corrente contínua	$\mu\Omega$
$B$	Constante de calibração do termovisor	$K$
$Cal$	Variável de calibração	
$E$	Emitância espectral	$W/m^2 \cdot \mu m$
$G$	Irradiância	$W/m^2 \cdot \mu m$
$J$	Radiosidade	$W/m^2 \cdot \mu m$
$R$	Constante de calibração do termovisor	$K$
$N(\xi, \sigma^2(\xi))$	Distribuição Normal	
$R(a_-, a_+)$	Distribuição Uniforme	
$R, F$	Constante de calibração do termovisor	ad.
$S$	Sinal digital adimensional	

$T$	Temperatura	$K$
$U$	Incerteza expandida	$K$
$Y$	Variável aleatória de saída	
$c$	Coefficiente de sensibilidade	
$d$	Distância termovisor -objeto m	$m$
$r$	Coefficiente de correlação	
$s(\hat{x})$	Desvio padrão (experimental)	
$u$	Incerteza da variável de entrada	
$\alpha$	Absortividade	
$\delta$	Tolerância numérica	
$\varepsilon$	Emissividade	
$\lambda$	Comprimento de onda	$m$
$\rho$	Refletividade	
$\sigma$	Desvio padrão	
$\tau$	Transmissividade	
$\theta, \phi$	Deslocamento angular	$rad$

### CONSTANTES

$\sigma$	Stefan-Boltzman	$5,670 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$
$h$	Planck	$6,6256 \times 10^{-34} Js$
$k$	Boltzmann	$1,3805 \times 10^{-23} J/Ks$
$C_1$	Primeira constante da radiação	$3,742 \cdot 10^8 W \cdot \mu m^4 / m^2 ]$
$C_2$	Segunda constante da radiação.	$1,439 \cdot 10^4 \mu m \cdot K$
$C_3$	Terceira constante da radiação	$2897,8 \mu m \cdot K$
$c_o$	Velocidade da luz	$2,998 \times 10^8 m/s$

### SUBSCRITO

$ob$	Referente ao objeto
$\lambda$	Referente à dependência espectral

$\theta$	Referente à dependência direcional
<i>ref</i>	Referente à fonte externa de radiação (por exemplo, $T_{ref}$ temperatura refletida)
<i>atm</i>	Referente à atmosférica
<i>op</i>	Referente à óptica
<i>amb</i>	Referente ao ambiente
<i>s</i>	Referente à superficial
<i>pref1</i>	Referente ao ponto de referência 1 (na medição de temperatura)
<i>i</i>	Referente enésimo valor

## ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> (Função de Distribuição Acumulada)
CIPM	<i>Comité International des Poids e Mesures</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
DRT	<i>Digital Temperature Resolution</i> (Resolução Digital da Temperatura)
FOV	<i>Field of View</i> (Campo de Visão)
FPA	<i>Focal Plane Array</i>
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> (Guia para Expressão da Incerteza de Medição)
HFOV	<i>Horizontal Fiel of View</i> (Campo de Visão na Direção Horizontal)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IFCC	<i>International Clinical Chemistry</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
IMT	Incerteza de Medição Termográfica
ISO	<i>Organization for Standardization</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
IUPAP	<i>International Union of Pure and Applied Physics</i>
ME	<i>Minimum Error</i> (Mínimo Erro)
MMC	Método de Monte Carlo

MRTD	<i>Minimum Resolvable Temperature Difference</i>
MSR	<i>Measurement Spatial Resolution</i> (Resolução Espacial da Medição)
MT	<i>Modulated Thermography</i> (Termografia Modulada)
NDTE	<i>Non Destructive Thermal Evaluation</i> (Ensaio Térmico Não Destrutivo)
NETA	<i>International Electrical Testing Association</i>
NETD	<i>Noise Equivalent Temperature Difference</i>
NGE	<i>Noise Generated Error</i> (Erro Gerado por Ruído)
OIML	<i>International Organization of Legal Metrology</i> (Organização Internacional de Metrologia Legal)
PDF	<i>Probability Density Function</i> (Função de Densidade de Probabilidade)
PPT	<i>Pulsed Phase Thermography</i> (Termografia Pulsada por Fase)
PT	<i>Pulsed Thermography</i> (Termografia Pulsada)
RE	Repetitividade
SLDV	<i>Scanning Laser Doppler Vibrometer</i>
SRF	<i>Slit Response Function</i>
STRF	<i>Slit Temperature Response Function</i>
TAG 4	<i>ISO Technical Advisory on Group on Metrology</i>
TS	<i>Temperature Stability</i> (Estabilidade de Temperatura)
TSA	<i>Thermoelastic Stress Analysis</i>
MU	<i>Measurement Uniformity</i> (Uniformidade da medição)
VFOV	<i>Vertical Field of View</i> (Campo de Visão na Direção Vertical)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Espectro Eletromagnético. ....	14
Figura 2.2- a) Emitância espectral do corpo negro, b) Lei de Wien. ....	16
Figura 2.3 – Irradiância espectral sobre meio semitransparente. ....	19
Figura 2.4 – Refletividade e absortividade espectral de algumas superfícies opacas. ...	20
Figura 2.5 – a) Matriz FPA de 1024x786 pixels. b) Estrutura de um elemento detector (microbolômetro) c) Imagem ampliada 4000 vezes de um microbolômetro. ....	25
Figura 2.6 – Modelos de termovisores a) “Thermovision 780” (1980) b) “Thermovision 782” (1985) e c) modelo portátil “Thermovision 450”(1988) de fabricação AGEMA;d) “Flir i50” e e) “Flir SC660” de fabricação FLIR (dias atuais). ....	26
Figura 2.7 – Transmissão atmosférica para altitude de até 2 km em função do comprimento de onda. FONTE – Rogalski e Chrzanowski (2002). ....	27
Figura 2.8 – Transmitância de alguns materiais empregados em lentes infravermelhas. ....	29
Figura 2.9 – Campo de visão FOV e IFOV. ....	30
Figura 2.10 – Diagrama de medição. ....	31
Figura 2.11 – Exemplo de característica de calibração $S = fT$ . ....	35
Figura 2.12 – Processo de medição da radiação. ....	36
Figura 2.13 – Distribuição normal (Tipo A). ....	39
Figura 2.14 – Distribuição uniforme (Tipo B). ....	40
Figura 2.15 – Esquema de propagação de incertezas em uma medição indireta para N grandezas de entrada e uma grandeza de saída. ....	42
Figura 2.16 – Distribuição normal da incerteza de medição admitida pelo GUM. ....	43
Figura 2.17 – Propagação de distribuição de probabilidades ....	46
Figura 2.18 – Densidade de probabilidade e probabilidade acumulada de Y ....	48
Figura 2.19 – <i>Slit Response Function</i> .FONTE – Chrzanowski (2010). ....	54
Figura 2.20 – Determinação do MSR. ....	55
Figura 3.1 – a) Conector paralelo a compressão “H”, b) Conexão elétrica. ....	58
Figura 3.2 – a) Conector cunha de alumínio, b) Conexão elétrica. ....	59
Figura 3.3 – a) Encapsulamento aberto, b) Conexão cunha encapsulada. ....	59
Figura 3.4 – a) Cabo coberto por camada de fita isolante, b) Conexão cunha defeituosa .....	60

Figura 3.5 – a) Conexão CH1 pintada com quatro faixas de cores, b) Conexão CH3 com metade pintada em tinta preta, c) Conexão CH3 pintada com tinta de refratário, e d) Conexão CC1 com metade pintada em tinta preta. ....	61
Figura 3.6 – Montagem para ensaios das conexões, a)CH1 e CH2, b) CC1 e CC2.....	62
Figura 3.7 – a) Bancada de testes e montagem para ensaio da conexão cunha encapsulada, b)Aparelhagem para ensaio da conexão.....	62
Figura 3.8 – Ilustração do posicionamento do termovisor. ....	63
Figura 3.9 – Imagens da subestação Adelaide, a) para-raios, b) banco de capacitores série.....	66
Figura 3.10 – Distribuição Uniforme, $Ra-, a +$ , de dados gerados aleatoriamente.....	72
Figura 3.11 - Distribuição Normal, $N\xi, \sigma 2\xi$ , de dados gerados aleatoriamente, .....	73
Figura 3.12 – Fluxograma de uso do IMT.....	75
Figura 4.1 – Bancada experimental para obtenção das constantes R, B. ....	76
Figura 4.2 – Pontos de medição. ....	77
Figura 4.3 – Ajuste da curva na faixa de medição de 293,15 K a 393,15 K. ....	78
Figura 4.4 – Erro relativo do modelo de medição ajustado.....	79
Figura 4.5 – Comportamento do modelo matemático com a variação da emissividade, a)Temperatura,b) Níveis de sinal.....	79
Figura 4.6 – Transmissividade atmosférica em relação à distância, a) distância de até 100 metros, b) distância de até 1000m. ....	80
Figura 4.7 – NETD calculado para termovisor SC660.....	81
Figura 4.8 – Estimativa do mínimo erro.....	82
Figura 4.9 – Ensaio para determinação do MSR.....	83
Figura 4.10 – Slit Temperature Response Functions.....	83
Figura 4.11 – Termogramas em diferentes pontos do campo de visão do termovisor, a) centro e arestas b) superior direita, c)superior esquerda, d)inferior direita e, e) inferior direita. ....	84
Figura 4.12 – Sensibilidade da medição para um campo de visão uniforme. ....	85
Figura 4.13 –Termograma da conexão CH2. ....	87
Figura 4.14 – Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para $T_{ob} = 518K$ . ....	88
Figura 4.15 – Termograma da conexão CC2,.....	89
Figura 4.16 - Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para $T_{ob} = 361K$ . ....	90

Figura 4.17 – Termograma da conexão CH3 .....	90
Figura 4.18 - Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para $T_{ob} = 343K$ , com $\varepsilon-T_{ref}$ não-correlacionados. ....	92
Figura 4.19 - Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para $T_{ob} = 343K$ , com $\varepsilon-T_{ref}$ correlacionados. ....	92
Figura 4.20 –Termograma da conexão CH1. ....	93
Figura 4.21 - Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para $T_{ob} = 318K$ . ....	94
Figura 4.22 – Contribuição das fontes de incerteza. a) Conexão CH2, b) Conexão CC2, c) Conexão CH3 e d) Conexão CH1, e) Conexão CH3 ( $\varepsilon-T_{ref}$ , correlacionados).....	95
Figura 4.23 – Comparação entre o comprimento percentual dos intervalos de abrangência GUM e MMC em relação às temperaturas medidas. ....	96
Figura 4.24 – Evolução da incerteza de medição em relação às temperaturas medidas, a) Ensaio na conexão CH1, b) Ensaio na conexão CH3, e c) Ensaio nas conexões CC1 e CC2.....	97
Figura 4.25 – Evolução temperatura em relação à corrente em conexões tipo H. Medições em baixa emissividade. ....	99
Figura 4.26 – Evolução temperatura em relação à corrente em conexões tipo H. Medições em alta emissividade. ....	100
Figura 4.27 – Evolução da resistência em relação à corrente em conexões tipo H.....	101
Figura 4.28 – Evolução temperatura em relação à corrente em conexões tipo cunha. Medições em alta e baixa emissividade.....	102
Figura 4.29 – Medições de temperatura em conexões tipo cunha, a) baixa emissividade, b) alta emissividade. ....	103
Figura 4.30 – Medições de temperatura em conexões tipo cunha, com e sem encapsulamento. ....	104
Figura 4.31 – Evolução da resistência em relação à corrente em conexões tipo cunha. ....	105
Figura 4.32 – Evolução da resistência em relação à corrente na amostra CH3. Comparação entre resultados teóricos e experimentais. ....	108
Figura 4.33 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais da variação da temperatura na amostra CH3. ....	109
Figura 4.34 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais. Evolução da resistência em relação à corrente na amostra CH1. ....	109

Figura 4.35 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais da variação da temperatura na amostra CH1. ....	110
Figura 4.36 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais, a) amostra CC1, b) amostra CC2 .Evolução da resistência em relação à corrente. ....	111
Figura 4.37 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais da variação da temperatura, a) amostra CC1, b) amostra CC2. ....	111
Figura 4.38 - Chaves seccionadoras. ....	112
Figura 4.39 – Diagnóstico de anomalia nos cabos de derivação das chaves seccionadoras (À direita).À esquerda, imagem no visível. ....	113
Figura 4.40 - Contribuição das fontes de incerteza. Pontos de medição a) Tp1, b) Tp2, c) Tpref1 e d) Tpref2. ....	116
Figura 4.41 – Distribuições de probabilidade ( $\epsilon=0,75$ ) - GUM e MMC, a) Tp1, b)Tp2, c)Tpref1, d) Tpref2, e) $\Delta T_{pref1}$ e d) $\Delta T_{pref2}$ ....	117
Figura 4.42 – Medição de temperatura nos pontos de anomalia com $\epsilon=0,30$ . ....	118
Figura 4.43 - Contribuição das fontes de incerteza. Pontos de medição a) Tp1 , b) Tp2, c) Tpref1 e d) Tpref2. ....	120
Figura 4.44 – Aumento percentual, a) Temperatura medida, b) Incerteza de medição e c) Intervalo de abrangência ....	121
Figura 4.45 – Distribuições de probabilidade ( $\epsilon=0,45$ ) - GUM e MMC, a) Tp1, b)Tp2, c)Tpref1, d) Tpref2, e) $\Delta T_{pref1}$ e d) $\Delta T_{pref2}$ ....	123
Figura B.1 - Interface gráfica do IMT. ....	xiv
Figura B.2 – Gráficos de saída. ....	xv

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Subdivisão do espectro infravermelho .....	23
Tabela 3.1 – Descrição das amostras.....	60
Tabela 3.2- Ensaio realizados em laboratório.....	65
Tabela 3.3 - Critérios e de ações sugeridas pela NETA MTS-1997.....	66
Tabela 3.4 – Coeficientes de sensibilidade de ordem superior. ....	68
Tabela 3.5 – Desvios padrão das fontes de incerteza. ....	70
Tabela 3.6 – Fontes de incerteza assumidas pelo GUM.....	70
Tabela 3.7 – Fontes de incerteza assumidas pelo MMC. ....	71
Tabela 4.1– Constantes ajustadas. ....	78
Tabela 4.2 – Resolução Digital de Temperatura. ....	82
Tabela 4.3 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.1 do Anexo A ).....	87
Tabela 4.4 – Incerteza de medição pelo método GUM e MMC.....	88
Tabela 4.5 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.2 do Anexo A ).....	89
Tabela 4.6 - Incerteza de medição pelos métodos GUM e MMC. ....	89
Tabela 4.7 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.3 e Tabela A.4 do Anexo A ).....	90
Tabela 4.8 - Incerteza de medição pelos métodos GUM e MMC para $\varepsilon$ e $T_{ref}$ não-correlacionadas. ....	91
Tabela 4.9 - Incerteza de medição pelos métodos GUM e MMC para $\varepsilon$ e $T_{ref}$ correlacionadas. ....	91
Tabela 4.10 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.5 do Anexo A ).....	93
Tabela 4.11 - Incerteza de medição pelos métodos GUM e MMC. ....	93
Tabela 4.12 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.6 à Tabela A.13 do Anexo A ).....	113
Tabela 4.13 – Resultados das medições nos pontos $T_{p1}$ , $T_{pref1}$ e cálculo do $\Delta T_{pref1}(\varepsilon=0,75)$ . ....	114
Tabela 4.14 – Resultados das medições nos pontos $T_{p2}$ , $T_{pref2}$ e cálculo do $\Delta T_{pref2}(\varepsilon=0,75)$ . ....	114

Tabela 4.15 – Resultados das medições nos pontos Tp1, Tpref1 e cálculo do $\Delta T_{pref1}(\epsilon=0,30)$ . .....	119
Tabela 4.16 – Resultados das medições nos pontos Tp2, Tpref2 e cálculo do $\Delta T_{pref2}(\epsilon=0,30)$ . .....	119
Tabela A.1 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CH2 (Capítulo 4, Seção 4.3). .....	i
Tabela A.2 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CC2 (Capítulo 4, Seção 4.3). .....	ii
Tabela A.3 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CH3, não correlacionada (Capítulo 4, Seção 4.3). .....	iii
Tabela A.4 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CH3 correlacionada (Capítulo 4, Seção 4.3). .....	iv
Tabela A.5– Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CH1 (Capítulo 4, Seção 4.3). .....	v
Tabela A.6– Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tp1( $\epsilon=0,75$ ) .....	vi
Tabela A.7 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tpref1( $\epsilon=0,75$ ) .....	vii
Tabela A.8– Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tp2( $\epsilon=0,75$ ). .....	viii
Tabela A.9 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tpref2( $\epsilon=0,75$ ). .....	ix
Tabela A.10 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tp1( $\epsilon=0,30$ ). .....	x
Tabela A.11 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tpref1( $\epsilon=0,30$ ). .....	xi
Tabela A.12 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tp2( $\epsilon=0,30$ ). .....	xii
Tabela A.13 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tpref2( $\epsilon=0,30$ ). .....	xiii

## RESUMO

O diagnóstico de anomalias térmicas em dispositivos elétricos de indústrias e empresas de energia é fundamental para a manutenção de suas plantas produtivas e a garantia do fornecimento de energia. Neste contexto, a termografia é uma técnica de inspeção não destrutiva amplamente empregada no diagnóstico de anomalias térmicas. Não há necessidade de intervenção em sua operação, o que prove segurança aos operadores e alto rendimento ao setor de manutenção. Porém, na maioria das vezes a termografia tem sido abordada apenas como uma ferramenta qualitativa em diagnósticos de anomalias térmicas limitando a confiabilidade dos resultados e a potencialidade da técnica. Neste trabalho, foi investigada a incerteza de medição da termografia quando aplicada no diagnóstico de anomalias em conexões elétricas usadas em sistemas de distribuição urbana. A incerteza de medição foi calculada pelos métodos GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) e Método de Monte Carlo (MMC) com o uso do software IMT – Incerteza de Medição Termográfica, desenvolvido em ambiente MatLab®. Os estudos foram realizados no LabTermo, Laboratório de Termometria da Escola de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Nos ensaios foram utilizadas conexões elétricas tipicamente empregadas em sistemas de distribuição urbanas. As amostras foram fornecidas pela Companhia Energética de Minas Gerais, Cemig, tendo sido confeccionadas nas dependências da empresa. Em algumas das amostras foram introduzidos defeitos, de forma a reproduzir a deterioração de conexões defeituosas. A fim de validar a metodologia, também foi realizada uma inspeção termográfica em uma subestação da concessionária, onde puderam ser feitas medições de temperatura sobre dispositivos com alta tendência de falhas. Os resultados demonstram a necessidade de se abordar a incerteza de medição como forma de assegurar a qualidade da termografia aplicada ao diagnóstico de anomalias em conexões elétricas.

## ABSTRACT

The diagnosis of thermal anomalies in electrical devices power and utility companies is crucial for the maintenance of their plants and power plants and supply systems. In this context, thermography is a nondestructive inspection technique widely used for the diagnosis of thermal anomalies without intervene on its operation providing security for operators and high-yield for the of maintenance sector. However, thermography has been addressed only as a qualitative tool for diagnosis of thermal anomalies, limiting the reliability of results and the potentiability of this technique. In this study, we investigated the measurement uncertainty of thermography in the diagnosis of abnormalities in electrical connections used in urban energy supply systems. The measurement uncertainty was calculated by GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) and Monte Carlo methods by using the IMT software - Measurement Uncertainty Thermographic developed in MatLab ®. The studies were conducted in LabTermo, Thermometry Laboratory School of Mechanical Engineering, Universidade Federal de Minas Gerais. Tests were performed in electrical connections typically used in urban energy supply systems. The samples were supplied by Companhia Energetica de Minas Gerais, Cemig.. In some of the samples were introduced defects during its assembly to reproduce the deterioration of faulty connections. In order to validate the methodology, was also carried out a thermographic inspection at a substation where temperature measurements were taken on devices with a tendency to failure. The results shows the need to address the measurement uncertainty as a way to ensure the quality and reliability of thermography apply to diagnosis of anomalies in electrical connections.

## 1 INTRODUÇÃO

O futuro reserva à produção industrial brasileira uma oportunidade singular de crescimento apoiada no consumo interno e na expansão para novos mercados. Conseqüentemente, a demanda nacional por energia elétrica tem aumentando a cada ano, e, com ela, a necessidade de se superar desafios do setor elétrico, como obsolescência de equipamentos, diminuição do número de interrupções no fornecimento de energia, expansão dos parques geradores e abastecimento de energia de qualidade a um custo operacional viável. Não obstante, medidas que visam solucionar os problemas existentes atingem todos os níveis de organização das empresas fornecedoras de energia, exigindo novos investimentos em capacitação profissional e inovação tecnológica. Neste contexto, a manutenção centrada na confiabilidade de uma companhia é um dos pilares que sustenta a capacidade das empresas em prover serviços de qualidade aos seus clientes, atendendo às expectativas do mercado e reduzindo seus custos de produção (SOUZA; TUMA, 2009). Neste sentido, a política de manutenção praticada pelas empresas do setor elétrico necessita de meios confiáveis de diagnóstico de anomalias que possam prover subsídios para que o gestor de ativos adote ações técnico-econômicas mais seguras e efetivas.

Neste aspecto, a termografia se destaca como uma das técnicas mais importantes no diagnóstico de anomalias em dispositivos elétricos. Geralmente, o sobreaquecimento de um equipamento em níveis anormais para sua operação é o primeiro indicativo de defeito. Com a termografia é possível realizar medições da temperatura superficial de componentes sem contato físico com a instalação (segurança), verificar equipamentos em pleno funcionamento (sem interferência na produção) e inspecionar grandes superfícies em pouco tempo (alto rendimento), identificando com enorme sucesso possíveis pontos de falhas nos sistemas de distribuição de energia elétrica (ARAÚJO *et al.*, 2008; KORENDO; FLORKOWSKI, 2001).

Entretanto, à obtenção do perfil térmico de equipamentos e dispositivos elétricos está associada um nível de dúvida ou incerteza, que poderá ser quantificada, monitorada e, ainda que reduzida, jamais eliminada. A incerteza se deve aos mais diversos fatores presentes no instante da medição que conduzem o operador a um resultado limitado acerca da grandeza medida. Conseqüentemente, o resultado de uma medição provê

apenas uma informação incompleta sobre o mensurando, e esta informação apenas pode ser utilizada se for possível quantificar quão incompleta ela é (FERRERO; SALICONE, 2006).

Apesar dos diversos fatores que podem afetar a qualidade dos resultados obtidos pela aplicação da termografia, a análise da incerteza de medição e dos fatores que a influenciam não é realizada pelas empresas que dispõem de termovisor. Não obstante, a compra de um termovisor representa investimento de elevado custo; contudo, muitas vezes o equipamento subutilizado devido à realização de análises apenas qualitativas dos resultados fornecidos.

A garantia de atendimento às tolerâncias requeridas e a comparação efetiva de resultados apenas podem ser feitas se for atribuída às medições seu grau de incerteza. Assim, visando contribuir para a melhoria da qualidade das medições termográficas e o emprego do termovisor na indústria e setor de serviços, este trabalho emprega os métodos analítico, GUM, e numérico, Método de Monte Carlo (MMC), para avaliar a incerteza de medição em termografia aplicada ao setor elétrico. O estudo foi desenvolvido com base no modelo matemático de medição de temperatura de um termovisor comercial, que relaciona a excitação proporcional à radiação recebida pela câmera à temperatura do objeto, e uma série de ensaios realizados em conexões elétricas utilizadas em sistemas de distribuição urbana e subestações.

A metodologia empregada baseia-se nas publicações da comissão *Joint Committee for Guides in Metrology, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (JCGM 100, 2008), conhecido como GUM que estabelece o método analítico para a avaliação da incerteza de medição, e o *Supplement 1 to the 'Guide to the expression of uncertainty in measurement— Propagation of distribution using a Monte Carlo method* (JCGM 101, 2008) que apresenta o Método de Monte Carlo como método alternativo ao para análise de incerteza. O objetivo geral deste trabalho é demonstrar a importância de se quantificar a incerteza de medição no processo de inspeção termográfica como meio de garantir a qualidade e a confiabilidade dos resultados. Como objetivos específicos, têm-se:

- A obtenção do modelo matemático de medição indireta de temperatura de um termovisor, assim como, o desenvolvimento de um software para análise das medições realizadas;

- Estimativa das fontes de incerteza intrínsecas do termovisor; e cálculo da incerteza de medição pelo GUM;
- Implementação do MMC e análise comparativa com o GUM;
- Cálculo da incerteza de medição de temperatura de uma inspeção termográfica em uma subestação de energia.

O trabalho foi dividido em cinco capítulos desenvolvem gradativamente a discussão a sobre o tema. No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica da literatura onde são apresentadas as principais referências que abordam as aplicações da termografia infravermelha no diagnóstico de anomalias elétricas. São apresentadas também referências que versam sobre a qualidade da medição e dos parâmetros de caracterização do instrumento, uma breve revisão dos conceitos de radiação infravermelha, da medição de temperatura sem contato e a descrição dos métodos GUM e MMC utilizados para calcular a incerteza de medição.

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada nos experimentos realizados no Laboratório de Termometria da Escola de Engenharia da UFMG, e durante a inspeção termográfica à Subestação Adelaide, de propriedade da Companhia Energética de Minas Gerais, Cemig. O capítulo também apresenta a abordagem adotada para o cálculo da incerteza de medição.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios em laboratório para levantamento do modelo matemático do termovisor e suas incertezas intrínsecas. Também são discutidas as incertezas de medição nos ensaios em conexões elétricas, e uma comparação entre os resultados experimentais e teóricos sobre a evolução da temperatura nos conectores. Por fim, são apresentados os resultados obtidos na inspeção termográfica à subestação da Cemig.

O Capítulo 5 traz as conclusões a cerca dos resultados e propostas para futuras abordagens sobre o tema.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ensaios térmicos não-destrutivos

O diagnóstico de falhas e anomalias em materiais, componentes eletromecânicos e equipamentos é realizado através de ensaios específicos, sejam eles destrutivos ou não destrutivos. Um ensaio destrutivo causa algum grau de dano à amostra, podendo inutilizá-la, seja por sua parcial, ou total danificação. Os ensaios não destrutivos não submetem a amostra a solicitações ou produtos que possam comprometer sua integridade e vida útil. Fazem parte deste último grupo, os ensaios térmicos não destrutivos, NDTE (*Non Destructive Thermal Evaluation*), que constituem um conjunto de técnicas não intrusivas<sup>1</sup>, cujo estudo se baseia na análise do perfil térmico da amostra. A principal ferramenta empregada pela NDTE é o termovisor para leitura de temperatura sem contato. É importante observar que o instrumento mede a radiação térmica emitida pelo corpo possibilitando a leitura de sua respectiva temperatura.

Os ensaios térmicos não destrutivos baseados em termografia dividem-se em duas categorias, a passiva e a ativa. A termografia passiva caracteriza-se pela não estimulação térmica artificial do objeto em estudo. Os testes são realizados quando a temperatura ambiente e da amostra são naturalmente diferentes (MALDAGUE, 2000). Em contrapartida, a termografia ativa caracteriza-se pela estimulação térmica artificial da amostra. As técnicas mais comuns são a termografia pulsada, PT (*Pulsed Thermography*) – baseada na aplicação de um estímulo de energia sobre a superfície da amostra e posterior observação do seu comportamento térmico; termografia modulada, MT (*Modulated Thermography*) – que consiste na aplicação de ondas de energia moduladas no interior da amostra; e a termografia pulsada por fase, PPT (*Pulsed Phase Thermography*) – cujo princípio de aplicação é semelhante ao PT, contudo, com emprego de técnicas de processamento de sinais, torna-se possível obter não apenas amplitude e frequência do pulso térmico, como, também, sua fase (TAVARES, 2006).

---

<sup>1</sup> Embora o caráter não intrusivo do NDTE seja verdade na maioria das aplicações, existem situações onde a integridade da amostra pode ser comprometida. Por exemplo, em avaliações de obras de arte uma estimulação térmica demasiada pode acarretar danos irreparáveis na superfície e estrutura da amostra (TAVARES, 2006).

A utilização da termografia vem expandindo-se rapidamente nos mais diversos setores da sociedade civil. As aplicações mais comuns são em estudos de conforto térmico, manutenção preventiva e preditiva, medicinal, avaliação de componentes mecânicos e elétricos, propriedades de materiais e avaliação de obras de arte (MALDAGUE, 2000; TAVARES, 2006). Esta rápida expansão se deve às vantagens que a termografia oferece, como a não intervenção no funcionamento de equipamentos e processos produtivos; a segurança, por realizar medições sem que haja contato físico com o objeto estudado; a relativa facilidade de operação da termovisor; o provimento de um resultado visual do perfil térmico do objeto e a possibilidade de análise dos dados de uma inspeção.

Por outro lado, as desvantagens englobam desde o alto custo do equipamento a dificuldade técnicas de ensaios, como deposição uniforme de grande quantidade de energia em um curto período de tempo (termografia ativa), capacidade de inspecionar espessuras limitadas de materiais, interferência de efeitos térmicos indesejáveis, como convecção, difusão e radiação, que podem perturbar o contraste térmico, além de problemas na determinação da emissividade correta da superfície. Como na maioria das aplicações da termografia passiva o principal objetivo almejado é associar a diferença de temperatura entre um ponto quente e sua vizinhança a uma eventual anomalia térmica, a termografia tem sido empregada de maneira predominantemente qualitativa, com o objetivo de determinar se ocorreu ou não a elevação da temperatura do ativo sob inspeção (MALDAGUE, 2000).

Embora a termografia passiva qualitativa seja a mais praticada, o caráter qualitativo de seus resultados não implica que cautela, planejamento e treinamento adequado sejam dispensáveis. Para se obter melhores resultados, o técnico responsável deve ser experiente não apenas na utilização do termovisor, mas também conhecer as características dos equipamentos e materiais inspecionados, além de ser capaz de avaliar as condições ambientais. O ceticismo quanto à extensão da aplicabilidade da termografia se deve, na maioria das vezes, ao seu uso inapropriado, a pobres interpretações de resultados e a incapacidade de empregar a técnica correta de investigação (TITMAN, 2001).

Entretanto, há campos de pesquisa onde a termografia quantitativa é a alternativa mais desejável. No estudo de fadiga e deformações em materiais submetidos a solicitações

mecânicas as aplicações da termografia infravermelha vêm sendo estudadas há alguns anos. Wang *et al.* (2010) destaca que alguns métodos têm sido desenvolvidos para correlacionar a elevação da temperatura com o processo físico de danos e falhas em materiais. Também são bem sucedidos os resultados em estudo de solicitações termomecânicas em aço soldado. O advento de scanners infravermelhos de alta resolução, a partir da década de 1980, permitiu o desenvolvimento da chamada “análise de estresse termoelástica”, TSA (*Thermoelastic Stress Analysis*). Outra abordagem envolve a observação da dissipação térmica durante ensaios de fadiga (UMMENHOFER; MEDGENBERG, 2009).

Huon *et al.* (2009) investigaram o comportamento termomecânico de argamassas e concreto de alto desempenho em regime de carregamento quase-estático aliando a termografia infravermelha à técnica de correlação de imagem digital, DIC (*Digital Image Correlation*) que permite que o campo superficial de tensão em amostras possa ser determinado com precisão. Nos ensaios realizados em laboratório, a termografia foi bem sucedida ao localizar o sobreaquecimento devido ao acoplamento termoelástico em amostras de concreto.

Outro setor de grande expansão da aplicação da termografia é o de avaliação de materiais compósitos. Devido à grande variedade de materiais utilizados na indústria, a termografia tem se mostrado mais adequada para avaliação de produtos em programas de controle de qualidade fabril. Em geral, os defeitos mais comuns em materiais são a não-homogeneidade devido a materiais espúrios, delaminações, porosidade, excesso de resina e até descolamentos (MEOLA; CARLOMAGNO, 2002). Em meio a este cenário, a termografia é uma ferramenta bem sucedida para obtenção de propriedades termofísicas de forma rápida e segura em processos de fabricação de metais. Na avaliação de materiais, Barreira e Freitas (2007) destacam que o estudo do desempenho de materiais destinados à construção civil é fundamental devido às novas técnicas empregadas, assim como, a diversidade de materiais de características desconhecidas frequentemente utilizados pelo setor. A maioria dos problemas apresentados por materiais estão diretamente relacionados à temperatura. Portanto, a termografia como técnica não destrutiva de diagnóstico é de grande valia. Todavia, todo potencial da termografia ainda não tem sido plenamente explorado devido à incompreensão de todos os parâmetros que afetam a medição, que tornam a interpretação dos resultados difícil e confusa.

Dentre as diversas áreas onde a termografia é ativamente empregada, o setor de manutenção é o que vislumbra maiores benefícios com sua utilização. Este fenômeno é explicado pelo simples fato de que, em sua grande maioria, componentes e equipamentos eletromecânicos apresentam o sobreaquecimento como primeiro indicativo de futuras falhas. Logo, dispor de um equipamento capaz de estabelecer a temperatura sem contato e sem intervenção no processo produtivo traz grande benefícios à indústria e ao setor de prestação de serviços. Korendo e Florkowski (2001) afirmam ser difícil avaliar precisamente o potencial de economia gerada pela utilização da termografia como ferramenta da manutenção preditiva. Isto se deve ao fato de que os benefícios econômicos são provenientes de eventos que foram evitados, como paradas não programadas e danos de grande extensão, como explosão de equipamentos. Portanto, a termografia como instrumento capaz de diagnosticar falhas e anomalias em sistemas elétricos e mecânicos está consolidada. Situação confirmada pelo número expressivo de trabalhos, publicações científicas e normas técnicas dedicadas ao assunto, estabelecendo procedimentos e condições para inspeções de ativos e plantas industriais.

A crescente demanda por energia de qualidade e das exigências de órgãos reguladores tem levado concessionárias de energia elétrica do país a realizar investimentos cada vez maiores em políticas de manutenção, e uma das principais ferramentas empregadas é o termovisor. Por exemplo, até 1982 a termografia não era assumida como “Técnica de Diagnostico Preventivo”. Em 1994, a Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig – dispunha de seis termovisores arrefecidos a nitrogênio líquido em seu programa de manutenção. Com o advento dos detectores não refrigerados, 2002/2003, com imagens de alta resolução, e termovisores leves, a utilização do termovisor ganhou um forte impulso. Atualmente, a Cemig Distribuição dispõe de quarenta e dois termovisores em seu programa de manutenção de acordo com informações fornecidas por engenheiros da empresa.

Epperly *et al.* (1997) destacam a termografia como uma ferramenta confiável e segura para a detecção de falhas em programas de manutenção preventivas e preditivas de equipamentos elétricos e mecânicos. Em programas de manutenção de sistemas elétricos, medidas de temperaturas relativas são geralmente mais importantes que a determinação do valor real da temperatura dos dispositivos. Ou seja, a identificação do ponto ou área cuja temperatura esteja significativamente superior a sua vizinhança ou a temperatura ambiente. O autor destaca, também, a dificuldade em se determinar a

temperatura real de dispositivos polidos e refletivos devido ao baixo valor de suas emissividades. A publicação apresenta ainda uma série de critérios que devem constar em um programa de inspeção termográfica baseados nas normas *Neta MTS - Maintenance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems* e *MIL-STD-2194, Infrared Thermal Imaging Survey Procedure for Electrical Equipment* (cancelada em 1995), além de detalhado procedimento de inspeção.

Holst (2000) faz uma extensa abordagem da termografia infravermelha, apresentando as principais tecnologias de detecção e imageamento térmico, aspectos de desempenho, seleção de termovisores e aplicações civis e militares. As principais aplicações apresentadas pelo autor são relativas às inspeções qualitativas de edifícios e construções, em inspeções de dutos, tanques de armazenamento e equipamentos subterrâneos, vigilância e uso militar. Exemplos quantitativos são brevemente discutidos em exemplos de inspeções de sistemas elétricos e mecânicos, e em ensaios não destrutivos de materiais. Análises voltadas à qualidade da medição não são realizadas.

O resfriamento das conexões provocado pelo efeito convectivo e o aquecimento gerado pela variação da carga ao longo do dia podem dificultar o diagnóstico de anomalias. Situação que conduz muitos termografistas a adotarem critérios não confiáveis de “correção” dos efeitos do vento e da variação da carga. O valor da emissividade é outro desafio a ser superado. Valores elevados de emissividade podem tornar os resultados de medições de temperaturas mais confiáveis. Porém, a grande maioria dos dispositivos usados em sistemas elétricos possui baixos valores de emissividade, da ordem de 0,1 a 0,3, tornando os erros de medição significativos. Muitos usuários acreditam que a diferença de temperaturas entre componentes semelhantes submetidos às mesmas condições independe da emissividade de ambas. Este procedimento gera erros consideráveis. Outros fatores de influência são as condições ambientais, gradientes térmicos, absorção solar, precipitação e limitações do termovisor. Com base nestas observações, medidas que podem ser tomadas para a melhoria dos resultados obtidos em inspeções termográficas se estendem da qualificação dos termografistas a procedimentos simples para estimativa da emissividade de equipamentos e conexões (SNELL; RENOWDEN, 2000).

Santos (2006) apresenta uma discussão das limitações e influências que acometem as inspeções termográficas de subestações de alta tensão desabrigadas. O estudo apresenta as limitações do instrumento termográfico, como resolução espacial, de medida, temperatura de operação, sensibilidade térmica e recomendações quanto à especificação de termovisores. Quanto aos ativos inspecionados, os impactos da emissividade são discutidos, assim como formas de minimizar os erros em sua estimativa. O autor propõe a adoção de materiais baseados em refletores seletivos a fim de reduzir a absorção da radiação solar e elevar a emissividade de dispositivos, como conexões elétricas. As condições de operação do equipamento também são discutidas. Ensaaios realizados em laboratório e o monitoramento da corrente de operação de equipamentos instalados em subestações mostraram quão variáveis podem ser os valores de temperatura obtidos em inspeções termográficas devido à grande variação da corrente de carga. A influência das condições ambientais é analisada, com especial atenção aos fatores climáticos, como carregamento solar, precipitações e umidade, reflexão solar e velocidade do vento. Os efeitos sobre a temperatura de conexões elétricas provocadas por estes fatores foram monitorados durante extenso período de tempo, comprovando que o carregamento solar tende a elevar a temperatura de conexões com ou sem defeitos. A precipitação e a alta umidade também tendem a atenuar de maneira significativa a temperatura das conexões elétricas, assim como a velocidade do vento, o que pode prejudicar a detecção de pontos quentes.

Álvares (2008) empregou a termografia em inspeções de pára-raios de subestações de alta tensão assumindo valores de emissividade usualmente adotados por empresas e concessionárias de energia. Os resultados confirmam o importante papel do instrumento termográfico no diagnóstico de defeitos e anomalias em equipamentos elétricos.

Dentre os dispositivos que apresentam maior taxa de defeitos estão as conexões elétricas de redes de distribuição urbana e de linhas transmissão de alta tensão. Solicitações mecânicas, exposição a fenômenos climáticos, poeira e outros agentes podem afetar a vida útil das conexões, levando-as ao sobreaquecimento devido à redução de sua resistência mecânica e elevação de sua resistência elétrica.

Embora a temperatura das conexões possa alcançar valores elevados, algumas vezes, detectar a anomalia pode não ser uma tarefa simples. A temperatura da conexão depende diretamente da corrente elétrica de operação do sistema, e inversamente da

corrente de ar, ambos bastante variáveis. Valores baixos de corrente podem não ser suficientes para evidenciar o problema, principalmente quando ele ainda está no início de sua manifestação. Além disso, a convecção forçada provocada pela velocidade do vento pode reduzir a temperatura do ponto quente, dificultando sua visualização. Este fato tornou o vento um desafio a muitos inspetores. Além disso, há de se considerar que o vento não introduz erro às medições. Se há erro, ou dúvida, estas estão relacionadas apenas à interpretação dos resultados – se o dispositivo alcançou sua temperatura máxima de trabalho, ou se o defeito apresenta evolução desde a sua última inspeção. Todavia, muitas publicações apresentam relações empíricas para “corrigir” os efeitos do vento sob ativos elétricos durante as inspeções termográficas.

Madding e Lyon Jr (2000) realizaram ensaios onde relacionaram a queda da temperatura em um ponto de defeito de uma chave-fusível com a elevação da intensidade do vento, e apresentaram um fator multiplicativo para “corrigir” a temperatura medida a uma velocidade do vento arbitrária para a temperatura medida sem a presença do vento.

Os efeitos do vento sobre pontos de anomalia térmica também são discutidos por Muhr *et al.* (2006), que realizam um estudo comparativo entre o desempenho de contatos novos e velhos de uma chave seccionadora. Os resultados são semelhantes àqueles obtidos por Madding e Lyon Jr (2000) sobre o decaimento da temperatura com a velocidade do vento. Já a análise comparativa entre os dispositivos de idades diferentes demonstrou que conexões novas precisaram ser submetidas a 80% de sua carga nominal para atingir a temperatura média de 45°C. Por outro lado, conexões velhas atingiram temperaturas de até 80°C com apenas 40% de sua carga nominal.

Além da velocidade do vento, a variabilidade da corrente é apontada como fonte de dúvida no julgamento dos resultados. E, assim como o efeito convectivo, algumas publicações sugerem fatores de “correção” para a corrente de carga. Contudo, a capacidade de tais fatores em compensar os valores de temperatura para condições “normalizadas” é extremamente limitada e duvidosa. Lyon JR *et al.* (2000) demonstram que a relação entre a carga e elevação da temperatura pode ser aproximada exponencialmente. Segundo Lyon Jr *et al.* (2000) , fatores que correlacionam empiricamente estas grandezas devem ser observados com ceticismo, dadas as inúmeras influências envolvidas na geração e dissipação de potência em equipamentos elétricos.

Maldague e Moore (2001) abordam as principais características de equipamentos termográficos, limitações, vantagens e aplicações. Hou (1998) utiliza a termografia para detecção de falhas internas em equipamentos e dispositivos como conexões, transformadores de corrente e potencial, para-raios, dentre outros. Xingliang e Qiangfeng (2010) empregaram a termografia para analisar o grau de deterioração e contaminação de cadeias de isoladores devido à umidade e poluição. Pelizzari (2006) realizou ensaios em conexões elétricas submetendo-as a valores de corrente elétrica de até 675 A. A variação da temperatura com corrente elétrica foi monitorada e as potências dissipadas foram calculadas.

A lista de referências disponíveis na literatura para o emprego da termografia como ferramenta de manutenção e diagnóstico é extensa. Outras referências de ensaios e métodos podem ser encontradas em Maldague (1993), Madding e Lyon Jr (2000), Sakagami e Kubo (2002), Ambrosini *et al.* (2010) e Junyan *et al.* (2010).

Em oposição ao número expressivo de trabalhos voltados para as aplicações da termografia estão as publicações dedicadas à análise da qualidade dos resultados obtidos por ela. A escassez de trabalhos publicados sobre este assunto evidência a utilização das técnicas de imageamento térmico apenas como uma ferramenta qualitativa pelos setores de manutenção. Todavia, um procedimento de inspeção termográfico não seria completo se o grau de confiabilidade dos resultados não for conhecido. Do contrário, um termograma representaria apenas uma imagem colorida com valores de temperatura que podem estar corretos, ou totalmente equivocada.

Neste aspecto, Tavares (2006) apresenta uma detalhada revisão das fontes de incerteza na aplicação da termografia e sua aplicação em seus trabalhos experimentais. Tavares afirma que o cálculo da incerteza de medição da temperatura representa ferramenta de fundamental importância na validação definitiva da termografia no setor de avaliação da integridade de monumentos artísticos, visto que confere a confiabilidade metrológica desejada aos resultados obtidos. A autora comparou resultados da termografia ativa com resultados do modelo matemático do fenômeno em questão (difusão térmica), e a uma técnica de *Scanning Laser Doppler Vibrometer* (SLDV), já difundida na área de preservação da obras de arte. A diferença entre os valores obtidos pela comparação entre o modelo teórico e a termografia foi inferior à incerteza dos resultados experimentais, e a compatibilidade entre os resultados fornecidos pela termografia e o

SLDV permitiu a validação da metodologia de diagnóstico. É importante observar que sem análise de incerteza não seria possível atestar validade da técnica proposta, tampouco estabelecer a qualidade dos resultados apresentados por ela.

Minkina e Dudzik (2009) realizam uma detalhada análise da incerteza de medição em termografia infravermelha, com base no modelo de medição do termovisor ThermaCAM PM 595 LW, de fabricação FLIR. Para estimar a incerteza de medição foi empregado o MMC devido à não-linearidade do modelo matemático. Minkina e Dudzik (2009) apresentam uma extensa análise da interdependência entre as variáveis que compõe o modelo de medição, como emissividade, distância, temperatura ambiente, umidade e temperatura atmosférica. Os resultados demonstram que a emissividade da superfície é a maior contribuinte para incerteza de medição, seguida da temperatura de uma fonte externa de radiação (temperatura refletida). Também sugere existir uma grande correlação entre estas duas variáveis, que pode ser estritamente matemática, dado o modelo de medição, ou física, dada pela natureza das variáveis. Minkina e Dudzik (2009) não apresentam mais detalhes sobre o mensurando analisado e as condições em que o ensaio foi realizado. Segundo os autores, diferentes modelos de medição devem ser estudados, assim como, as condições de realização dos ensaios e outros fatores que podem afetar a precisão das medições.

Chrzanowski (2001a) descreve as limitações impostas pela estabilidade da temperatura, resolução digital e espacial, além das interferências causadas por ruídos, que podem ser consideradas fontes intrínsecas de incerteza de um instrumento termográfico. Chrzanowski (2001a) apresenta ainda, resultados de ensaios em termovisores comerciais realizadas nos laboratórios do instituto de metrologia Physikalisch-Technische Bundesanstalt, de Berlim, segundo as normas ISO9000 e EN45000. Mais detalhes sobre a publicação de Chrzanowski podem ser obtidos em Tavares (2006).

Em *Testing Thermal Imagers*, Chrzanowski (2010) aborda ensaios e testes para caracterização de sistemas de termovisores. A publicação traz uma extensa discussão sobre as características de termovisores destinados, principalmente, ao uso militar, onde objetivo primordial é a observação do alvo.

O autor classifica em oito categorias os parâmetros que descrevem o desempenho de um termovisor, como sendo parâmetros de qualidade da imagem, de resposta, de ruído, de resolução da imagem, geométricos, de “precisão”, espectrais e de operação.

Chrzanowski (2010) afirma que todos estes parâmetros são de fundamental importância para obtenção de imagens térmicas de alta qualidade; contudo, para termovisores comerciais, a precisão é o mais importante deles. Conforme o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2008), o conceito de precisão deve ser empregado apenas de maneira qualitativa, embora, os fabricantes o adotem como medida de qualidade. Assim, o conceito de precisão, adotado de maneira quantitativa, não é a melhor forma de se estimar a qualidade de uma medição (incerteza), uma vez que se desconhecem as condições em que tal medida de precisão foi obtida pelos fabricantes. Se os dados foram obtidos apenas em condições de calibração, há de se considerar que seus erros sejam menores do que aqueles obtidos em campo. Sabe-se que um termovisor é fortemente afetado pela temperatura ambiente, e em geral, as temperaturas praticadas em laboratórios são controladas. Por outro lado, a temperatura ambiente pode apenas ser monitorada, dependendo da localidade onde o equipamento é utilizado. Embora termovisores modernos sejam dotados de softwares capazes de compensar efeitos como a auto emissão de suas lentes, ou a variação de temperatura de seus detectores, as correções são apenas parciais (CHRZANOWSKI, 2010).

Portanto, a estimativa quantitativa da “precisão” depende de outros parâmetros, muitos deles presentes nos catálogos de fabricantes e que podem ser úteis como estimativas da incerteza. Os mais frequentemente encontrados são a sensibilidade térmica *NETD* (*Noise Equivalent Temperatura Difference*), e o campo de visão instantâneo, *IFOV* (*Instantaneous Field of View*). Raramente encontram-se os parâmetros *MRTD* (*Minimum Resolvable Temperatura Difference*) e *MDTD* (*Minimum Detectable Temperatura Difference*). De acordo com Chrzanowski, caso as informações fornecidas pelo fabricante ainda sejam insuficientes, é aconselhável a estimativa de outros quatro parâmetros, o mínimo erro, *ME* (*Minimal error*), o erro gerado por ruído, *NGE* (*Noise generated error*), estabilidade da temperatura, *TS* (*Temperatura stability*) e a resolução espacial de medição e *MSR* (*Measurement spatial resolution*). Estes e outros parâmetros importantes serão discutidos com mais detalhes no decorrer deste trabalho.

Visando estabelecer um conjunto mínimo de critérios para avaliação de termovisores, a publicação OIML R141 - *Procedure for Calibration and Verification of the Main Characteristics of Thermographic Instruments* da Organização Internacional de Metrologia Legal recomenda uma série de procedimentos que devem ser realizados periodicamente para verificar as condições de funcionamento de um termovisor. Dentre

as características a serem avaliadas, encontram-se o NETD (*Noise Equivalent Temperatura Difference*), a resolução espacial, o campo de visão, FOV (*field of view*) e o campo de visão instantâneo, IFOV (*instantaneous field of view*) e repetitividade de leitura. A publicação traz ainda em seu anexo, um modelo simples de relatório de verificação de instrumentos termográficos e esboços de alvos de testes que devem ser utilizados durante o procedimento.

Mais detalhes sobre análises de erros em termografia e fatores que afetam termovisores podem ser encontrados em Pokorni (2004), Chrzanowski e Szulim (1998, 1999) e Chrzanowski (2001b).

## 2.2 Radiação térmica

Radiação térmica é a energia radiante emitida por um meio relacionada às oscilações e transições de elétrons, que, por sua vez, estão relacionadas à temperatura do meio. A propagação da radiação térmica pode ser explicada pela teoria eletromagnética ou pela teoria quântica, (INCROPERA, DEWITT, 1992). A Figura 2.1 ilustra a radiação térmica, que abrange a radiação infravermelha, visível e ultravioleta.

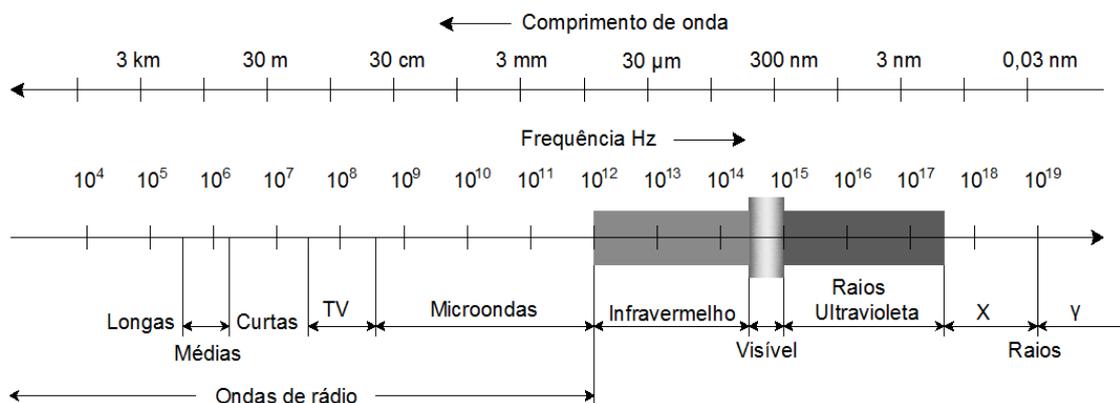


Figura 2.1– Espectro Eletromagnético.

FONTE – Rogalski (2010).

A radiação pode ser considerada, na maioria dos casos, um fenômeno de superfície, e sua propagação obedece à dualidade onda-partícula. Ao ocorrer em comprimentos de onda específicos, a radiação térmica adquire dependência espectral, assim como, ao ser emitido em dadas direções, adquire dependência direcional.

A dependência direcional da radiação emitida pode ser tratada pelo conceito de intensidade de radiação:

$$I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dq}{dA \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (2.1)$$

Onde  $dq$  ( $W$ ) é o elemento de radiação que deixa o elemento de área  $dA(m^2)$  formado pelo elemento de ângulo sólido  $d\omega(sr)$ , definido pelos ângulos  $\theta$  e  $\phi$ , cujo comprimento de onda é  $\lambda(\mu m)$ . Portanto, a unidade da intensidade radiação espectral é  $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$ . Do conceito de intensidade de radiação são obtidos fluxos radiativos importantes, como a emitância " $E$ " (fluxo radiativo emitido pela superfície do corpo), a irradiância " $G$ " (fluxo radiativo incidente sobre a superfície do corpo) e a radiosidade " $J$ ", que contabiliza todo fluxo radiativo emitido e a parcela do fluxo incidente refletida sobre o corpo. Assim como a intensidade de radiação, todos eles possuem suas formas espectrais. Dentre estes fluxos radiativos, destaca-se a emitância de uma superfície ideal, descrita pela Lei de Planck.

### 2.2.1 A Lei de Planck

Ao corpo que emite a máxima radiação a uma dada temperatura dá-se o nome de corpo negro. O corpo negro é uma idealização, mas sua importância reside no fato de que suas características são a base conceitual para a descrição do comportamento radiativo de corpos reais. Assim, a distribuição espectral de um corpo negro foi determinada por Max Planck, sendo sua emitância espectral dada pela Equação (2.2):

$$E_{\lambda,b} = \frac{2\pi h c_o^2}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{hc_o}{\lambda k T}\right) - 1 \right]}, W/m^2 \mu m \quad (2.2)$$

Onde:

$h = 6,6256 \times 10^{-34}$  : Constante universal de Plank [ $J \cdot s$ ];

$k = 1,3805 \times 10^{-23}$  : Constante universal de Boltzmann [ $J/K$ ];

$c_o = 2,998 \times 10^8$  : Velocidade da luz no vácuo [ $m/s$ ];

$T$  : Temperatura absoluta do corpo negro [ $K$ ];

$\lambda$  : Comprimento de onda [ $\mu m$ ].

A Equação (2.2) é chamada de Lei de Planck, sendo comumente expressa como:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, W/m^2 \mu m \quad (2.3)$$

Onde:

$C_1 = 3,742 \cdot 10^8$  : Primeira constante da radiação [ $W \cdot \mu m^4 / m^2$ ];

$C_2 = 1,439 \cdot 10^4$  : Segunda constante da radiação [ $\mu m \cdot K$ ].

A Equação (2.3), conhecida como distribuição de Planck, está representada graficamente para algumas temperaturas de interesse na Figura 2.2.

As distribuições espectrais representadas na Figura 2.2 mostram que a emitância espectral aumenta com a elevação da temperatura e com a redução do seu comprimento de onda até a máxima emissão. A máxima emitância em cada temperatura é ilustrada por pontos na Figura 2.2a. Pode-se demonstrar, pelo cálculo da derivada da Equação (2.3) em relação  $\lambda$ , que o comprimento de onda relativo à máxima emissão,  $\lambda_{m\acute{a}x}$ , é dependente da temperatura. Esse resultado é conhecido como a lei de Wien do deslocamento, sendo dada pela Equação (2.4):

$$\lambda_{m\acute{a}x} T = C_3 \quad (2.4)$$

Onde:

$C_3 = 2897,8$  : Terceira constante da radiação [ $\mu m \cdot K$ ];

A curva que une os pontos de máxima emissão da Figura 2.2a fornece a reta mostrada na Figura 2.2b, em escala logarítmica. Conclui-se que a máxima emissão de radiação desloca-se para os comprimentos de onda mais curtos com o aumento da temperatura.

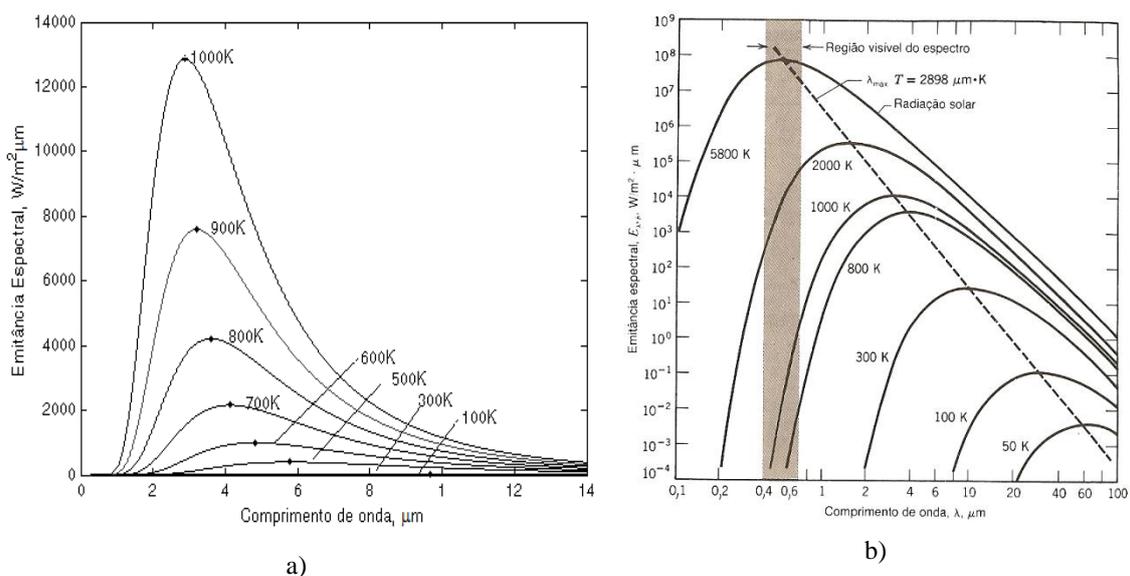


Figura 2.2- a) Emitância espectral do corpo negro, b) Lei de Wien.

FONTE - Incropera e DeWITT (1992)

### 2.2.2 Lei de Stefan-Boltzmann

A integração da lei Planck , Equação (2.2) sobre o comprimento de onda de zero ao infinito fornece a quantidade de radiação emitida pelo corpo negro em todas as direções e sobre todos os comprimentos de onda. Matematicamente:

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (2.5)$$

Onde  $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

A Equação (2.5) é conhecida como lei de Stefan-Boltzmann e permite calcular a emitância total de um corpo negro em função apenas de sua temperatura. Uma vez que nenhum corpo é capaz de emitir mais radiação do que o corpo negro à mesma temperatura, as Equações (2.2) e (2.5) podem ser estabelecidas como uma referência para a emissão total de uma superfície.

### 2.2.3 As propriedades das superfícies reais

#### 2.2.3.1 A emissividade

À razão entre a emissão de uma superfície real em relação à emissão de um corpo negro à mesma temperatura dá-se o nome de emissividade. Seu valor depende da temperatura, da direção, da faixa espectral, do formato e da textura da própria superfície. Portanto, trata-se de uma propriedade complexa, contudo fundamental na medição da radiação e fonte de incertezas no cálculo de temperatura. A emissividade de uma superfície pode ser qualificada de acordo com sua dependência em relação ao comprimento de onda e à direção da radiação emitida.

Assim, a emissividade espectral, direcional,  $\varepsilon_{\lambda,\theta}$ , de uma superfície à temperatura T é definida como a razão entre intensidade da radiação emitida,  $I_{\lambda,e}$ , no comprimento de onda  $\lambda$ , na direção  $(\theta, \phi)$ , em relação à intensidade da emissão de um corpo negro,  $I_{\lambda,b}$ , na mesma temperatura T e comprimento de onda  $\lambda$  (PERIN, 2009). Formalmente:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (2.6)$$

A emissividade total, direcional,  $\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T)$ , de uma superfície à temperatura T é a relação entre a intensidade  $I_e$ , considerando a contribuição de todos os comprimentos de onda  $\lambda$ , na direção  $(\theta, \phi)$  em relação àquele corpo negro à mesma temperatura T:

$$\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T) = \frac{I_e(\theta, \phi, T)}{I_b(T)} \quad (2.7)$$

A emissividade espectral, hemisférica  $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ , considera a contribuição da radiação emitida em todas as direções  $(\theta, \phi)$ :

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (2.8)$$

Finalmente, a emissividade total, hemisférica,  $\varepsilon(T)$ , considera a radiação emitida em todo o espectro de comprimentos de onda  $\lambda$  e sob todas as direções  $(\theta, \phi)$ :

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.9)$$

Embora todas as quatro formas de emissividade sejam bem definidas, a obtenção de seu valor representa um desafio. Segundo Chrzanowski (2001b), apesar da emissividade espectral, direcional,  $\varepsilon_{\lambda,\theta}$ , permitir o cálculo dos outros tipos de emissividade sua determinação experimental pode ser difícil e complexa. Logo, seu valor raramente é publicado na literatura especializada. Esta situação também pode ser observada diante das demais formas de emissividade, que em geral, quando publicadas, não são especificadas quanto a sua natureza. Diante do fato de que cada forma de emissividade apresenta características próprias, a omissão destas informações pode resultar na ineficiência da medição de temperatura sem contato. Por exemplo, o uso da emissividade total, direcional,  $\varepsilon_{\theta}$ , pode conduzir a resultados enganosos diante de materiais seletivos, onde as propriedades de emissão do material são dependentes do comprimento de onda. A emissividade espectral, hemisférica,  $\varepsilon_{\lambda}$ , limita-se a materiais onde não há dependência desta em relação ao ângulo de emissão da superfície, o que não ocorre com maioria dos materiais. Desta forma, utiliza-se a emissividade total hemisférica,  $\varepsilon$ , cujo valor independe não apenas direção da radiação emitida, como também do comprimento de onda, o que a torna adequada para caracterizar apenas superfícies cinzentas difusoras.

2.2.4 A absorvidade, a refletividade e a transmissividade

O fluxo radiativo incidente sobre uma superfície, a irradiância "G", pode ser proveniente de diversas fontes e incidir sobre todas as direções (INCROPERA, DEWITT, 1992). Ela pode ser dada como função do comprimento de onda  $\lambda$ ,  $G_\lambda(W/m^2\mu m)$  a irradiância espectral, ou como a contribuição sobre todos os comprimentos de onda,  $G(W/m^2)$ , irradiância total. A Figura 2.3 ilustra um meio semitransparente à radiação incidente  $G_\lambda$ , onde uma parcela da irradiação é refletida  $G_{\lambda,ref}$ , absorvida  $G_{\lambda,abs}$  e transmitida  $G_{\lambda,trans}$ .

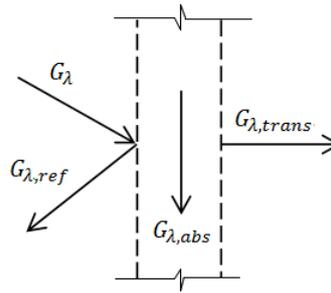


Figura 2.3 – Irradiância espectral sobre meio semitransparente.

O balanço da radiação no meio fornece a irradiação espectral:

$$G_\lambda = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,trans} \quad (2.10)$$

De cada parcela de irradiação modificada pelo meio,  $G_{\lambda,ref}$ ,  $G_{\lambda,abs}$  e  $G_{\lambda,trans}$ , em relação à totalidade da radiação incidente,  $G_\lambda$ , estabelecem-se as propriedades que caracterizam uma superfície quanto a sua capacidade de refletir, absorver e transmitir radiação. Assim, define-se a refletividade espectral hemisférica,  $\rho_\lambda = G_{\lambda,ref}/G_\lambda$ , como a fração refletida da irradiação espectral. A absorvidade espectral, hemisférica  $\alpha_\lambda = G_{\lambda,abs}/G_\lambda$  como a fração absorvida da irradiação espectral e a transmissividade espectral hemisférica,  $\tau_\lambda = G_{\lambda,trans}/G_\lambda$ , como a fração transmitida pelo meio da irradiação espectral. Logo, da Equação (2.10), obtém-se em termos espectrais:

$$\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (2.11)$$

Resultado análogo pode ser obtido em termos espectral direcional e total, respectivamente:

$$\rho_{\lambda,\theta} + \alpha_{\lambda,\theta} + \tau_{\lambda,\theta} = 1 \text{ e } \rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.12)$$

Para um meio opaco, onde não há transmissão ( $\tau = 0$ ), apenas as propriedades superficiais estão presentes, logo:

$$\rho_{\lambda,\theta} + \alpha_{\lambda,\theta} = 1, \rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} = 1 \text{ e } \rho + \alpha = 1 \quad (2.13)$$

A Figura 2.4 ilustra graficamente a refletividade e absortividade espectral de algumas superfícies opacas. Observa-se que as características de absorção e reflexão de algumas superfícies variam fortemente com o comprimento de onda da radiação incidente. Por exemplo, na faixa espectral que compreende os comprimentos de onda de 0,4-0,6 $\mu\text{m}$ , a neve apresenta alta refletividade no espectro visível, aproximadamente 0,9. Contudo, em comprimentos de onda superiores a 1 $\mu\text{m}$  sua absortividade torna-se elevada em detrimento de sua refletividade. Logo, em comprimento de onda longos seu comportamento assemelha-se a de um corpo negro.

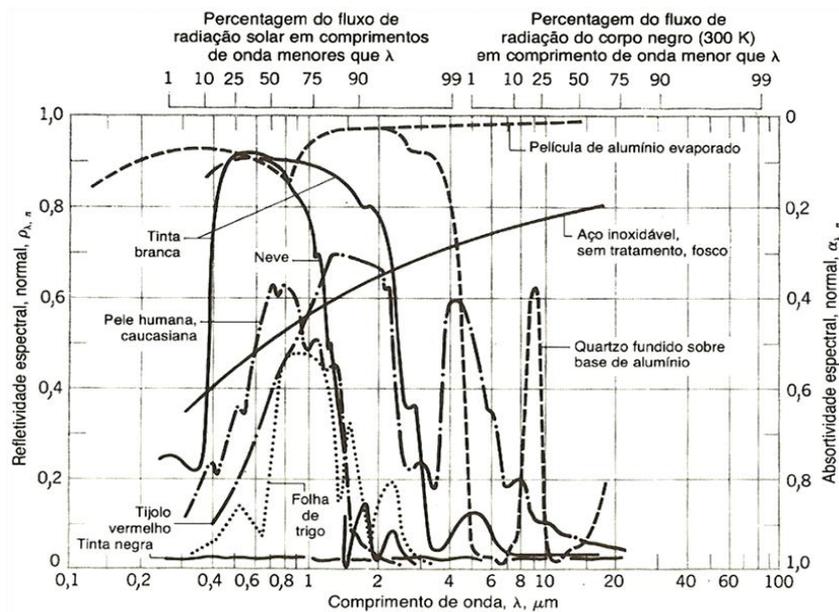


Figura 2.4 – Refletividade e absortividade espectral de algumas superfícies opacas.

FONTE - (INCROPERA, DEWITT, 1992)

A relação entre a capacidade de absorver e emitir radiação pode ser relacionada pela lei de Kirchhoff.

Kirchhoff observou que no interior de uma cavidade isotérmica à temperatura T, dentro da qual são confinados corpos de pequenas dimensões, a soma de toda a radiação incidente sobre estes corpos é igual à emissão da superfície da cavidade negra. Ou seja:

$$G = E_b(T) \quad (2.14)$$

Considerando que os corpos internos a esta cavidade, de absorvidade  $\alpha$ , também são capazes de emitir radiação, o balanço de energia fornece:

$$\alpha G - E(T) = 0 \quad (2.15)$$

Da Equação (2.14),

$$\frac{E(T)}{\alpha} = E_b(T) \quad (2.16)$$

Comparando a Equação (2.9) com a Equação (2.16), tem-se a relação entre a emissividade total hemisférica,  $\varepsilon$ , e absorvidade total hemisférica,  $\alpha$ , Equação (2.17):

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.17)$$

Portanto, a emissividade total hemisférica é igual à absorvidade total hemisférica. Aplicabilidade deste resultado possui limitações associadas à independência da emissividade e da absorvidade de determinadas superfícies em relação ao comprimento de onda e direção da radiação emitida e incidente. Portanto, o resultado da Equação (2.17) é válido para superfícies cinzentas difusoras.

Um resultado geral da lei de Kirchoff, para o qual não há restrições quanto à distribuição espectral e direcional da radiação emitida e incidente, (INCROPERA, DEWITT, 1992), é dada pela Equação (2.18):

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = \alpha_{\lambda,\theta} \quad (2.18)$$

Embora o resultado da Equação (2.18) seja válido para qualquer distribuição espectral e direcional, sua utilização é limitada pelo próprio desconhecimento das características espectrais e direcionais de superfícies reais.

Considerando a validade da Equação (2.17), para uma dada superfície opaca, pode-se relacionar sua emissividade e sua refletividade através da Equação (2.13), mostrada anteriormente:

$$1 = \rho + \alpha \quad (2.13)$$

Logo, da Equação (2.17):

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (2.19)$$

A Equação (2.19) trás particular interesse a medição de temperatura sem contato, uma vez que o conhecimento da emissividade permite a estimativa da parcela da irradiação refletida pelo objeto.

### 2.3 Radiação infravermelha

Além das aplicações anteriormente citadas para diagnósticos de falhas em equipamentos eletromecânicos, a radiação infravermelha propiciou o avanço do diagnóstico de doenças como câncer ou traumas diversos que podem elevar a temperatura de regiões específicas do corpo evidenciando a anomalia. O monitoramento de processos químicos, a conservação de energia nas casas e indústrias e a utilização militar estão entre os mais diversos setores cujos sistemas de imageamento térmico estão presentes. Atualmente, a determinação dos recursos do planeta é feita por imagens infravermelhas, assim como a delimitação de campos e florestas. O monitoramento da poluição ambiental, das mudanças climáticas, os prognósticos da produção agrícola e a saúde de culturas são também determinados do espaço por uma vasta rede de satélites meteorológicos dotados de detectores de radiação infravermelha (ROGALSKI, 2010).

A descoberta da radiação infravermelha é relativamente recente. Em 1800, o alemão Friedrich Wilhelm Hershel observou que diferentes faixas do espectro da luz solar refratados por um prisma eram capazes de produzir aumento de temperatura em termômetros situados além do espectro de cor vermelha. Os experimentos de Hershel provaram a existência de algum tipo de radiação além do vermelho, invisível a olho nu, capaz de estimular termicamente os termômetros. Hershel nomeou-os de “raios invisíveis” ou “espectro termométrico invisível”. Mais tarde, estes raios foram chamados de radiação infravermelha (MINKINA; DUDZIK, 2009).

As subdivisões da radiação infravermelha podem ser diferentes conforme a referência adotada. A Tabela 2.1 ilustra a subdivisão proposta por (CHRZANOWSKI, 2010). Outras referências podem ser encontradas em (CHRZANOWSKI, 2001b).

Atenção especial deve ser dada às bandas espectrais de 3-5 $\mu\text{m}$  (MWIR) e 8-14 $\mu\text{m}$  (LWIR). Nestas faixas a atenuação da radiação devido aos fenômenos de espalhamento

(ou difusão) e absorção atmosférica é relativamente baixa quando comparada a outras faixas do espectro infravermelho.

Tabela 2.1– Subdivisão do espectro infravermelho

Nome	Faixa de comprimento de onda
<i>Near Infrared</i> NIR (infravermelho próximo)	0.78 $\mu\text{m}$ - 1 $\mu\text{m}$
<i>Short Wave Infrared</i> SWIR (infravermelho de ondas curtas)	1 $\mu\text{m}$ - 3 $\mu\text{m}$
<i>Mid-Wave Infrared</i> MWIR (infravermelho de ondas médias)	3 $\mu\text{m}$ - 6 $\mu\text{m}$
<i>Long-Wave Infrared</i> LWIR (infravermelho de ondas longas)	6 $\mu\text{m}$ - 15 $\mu\text{m}$
<i>Very Long-Wave Infrared</i> VLWIR (infravermelho de ondas muito longas)	15 $\mu\text{m}$ - 1000 $\mu\text{m}$

FONTE – Chrzanowski(2010)

## 2.4 Medição de temperatura sem contato

A medição de temperatura sem contato em termografia é realizada por meio da detecção da radiação infravermelha do objeto empregando-se um termovisor dotado de sensores sensíveis a radiação térmica (instrumento termográfico). O documento *Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments* publicado pela OIML R141(2008) define como termovisor o “instrumento optoeletrônico concebido para observação, medição e registro espacial e temporal da radiação térmica de objetos, no campo de visão do instrumento, por formação de uma sequência temporal de termogramas e pela determinação da temperatura superficial de objetos a partir do conhecimento de sua emissividade e parâmetros de influência (temperatura refletida, transmissão atmosférica, distância de observação, etc.)”. Na literatura técnica encontram-se ainda outros termos para designar o mesmo equipamento, como por exemplo: termocâmara, termovisor, câmera infravermelha, dispositivo de imagem térmica, dentre outros. Neste trabalho, optou-se por adotar termovisor.

Diante das diversas características que um termovisor pode apresentar, faz-se necessário subdividi-lo de acordo com suas características e aplicações. Chrzanowski(2010) sugere uma subdivisão conforme o sistema de imageamento, a aplicação, a banda espectral e a geração.

As características de imageamento abrangem os dois tipos de equipamentos atualmente em uso para obtenção do termograma bidimensional: os termovisores e os escâneres de imagem térmica. Quanto à aplicação, os termovisores são subdivididos entre aqueles dedicados à vigilância e uso militar e a aquelas empregadas para medição de temperatura. A banda espectral caracteriza a faixa de comprimento de onda de detecção do instrumento, geralmente, no infravermelho médio (MWIR - 3  $\mu\text{m}$  a 6  $\mu\text{m}$ ) ou infravermelho longo (LWIR - 6  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$ ). Por fim, a geração se refere ao estágio tecnológico dos detectores infravermelhos, que evoluíram rapidamente ao longo dos últimos 40 anos. Neste aspecto, pode-se subdividir o desenvolvimento tecnológico dos detectores de radiação em três gerações. A primeira foi introduzida pelos primeiros modelos de uso militar, por volta das décadas de 70 e 80. Formado por fotocondutores discretos que compunham sistemas de escâneres, os detectores possuíam baixo número de elementos sensitivos, menos de duzentos.

A segunda geração se destacou pelo aumento do número de elementos detectores, pela redução de ruídos de resolução e pelo desenvolvimento das matrizes de detectores - Focal Plane Array (FPA) - ainda baseada em escâneres (CHRZANOWSKI, 2010). Uma FPA é uma matriz composta, por exemplo, de 320x240 elementos detectores, que podem gerar uma imagem de 320x240 pixels; muito embora o número de elementos detectores possa não corresponder, necessariamente, ao número de pixels do termograma. Este desenvolvimento ocorreu durante toda a década de 80.

A terceira geração, já no início dos anos 90, trouxe um expressivo salto tecnológico que culminou na atual tecnologia de detecção de radiação térmica. As matrizes FPA passaram a conter milhares de elementos detectores e serem lidas por circuitos eletrônicos. Basicamente, os detectores de terceira geração podem ser subdivididos em dois tipos: os detectores térmicos e os fotodetectores. Os detectores térmicos são baseados na tecnologia dos bolômetros e efeitos piroelétrico e ferroelétrico. Nestes detectores, a radiação incidente é absorvida de forma a alterar temperatura do material, resultando assim, na variação de alguma propriedade física que é usada para gerar um

sinal elétrico de saída proporcional a radiação incidente. No caso dos microbolômetros, observa-se a variação da resistividade elétrica com a temperatura.

Em geral, o microbolômetro é o elemento mais comumente empregado para absorção da radiação em detectores térmicos. Sua constituição mais comum é óxido de vanádio ( $\text{VO}_2$ ), mas também podem ser encontrados em filmes finos de silício amorfo. Os microbolômetros se caracterizam pela resposta lenta e pela sensibilidade modesta; contudo, são de baixo custo e podem ser empregados em temperatura ambiente. A Figura 2.5a apresenta uma matriz FPA composta de silício fabricada pela empresa francesa ULIS. A Figura 2.5b esquematiza um único sensor e seus principais elementos, e a Figura 2.5c apresenta a imagem ampliada de um microbolômetro de fabricação canadense.

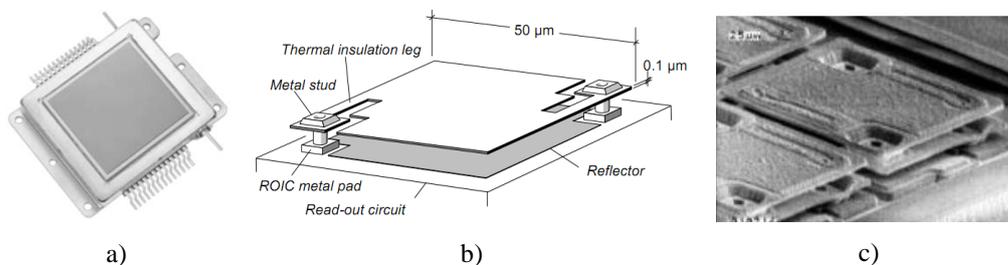


Figura 2.5 – a) Matriz FPA de 1024x786 pixels. b) Estrutura de um elemento detector (microbolômetro) c) Imagem ampliada 4000 vezes de um microbolômetro.

FONTE – Ulis (2011); Biancardini *et al.* (2003) e Phong e Zheng (2003)

Os fotodetectores são precursores aos atuais detectores térmicos. Seu funcionamento se baseia na interação da radiação incidente com os elétrons do material. O sinal elétrico de saída é resultado da variação da distribuição de energia dos elétrons. Os fotodetectores apresentam rápida resposta à radiação e excelente relação-sinal ruído. Entretanto, eles necessitam de refrigeração criogênica, o que torna seu custo elevado e pode fazer sua utilização inconveniente. Atualmente, os fotodetectores são divididos em intrínsecos, extrínsecos, fotoemissivos e *quantum well* (QW), Rogalski (2002, 2003, 2010) e Rogalski e Chrzanowski (2002).

Alguns exemplos de termovisores e seus respectivos termogramas são ilustrados na Figura 2.6. Os modelos AGEMA das a Figuras 3.6a-b não possuíam visor integrado, necessitando de um módulo externo para visualização do termograma. Estes eram simples e de baixa resolução. O modelo portátil “Thermovision 450”, Figura 2.6c, incorporou a praticidade do visor integrado; contudo, o sistema completo chegava a

pesar 18kg. Os modelos i50 e SC660 de fabricação FLIR (Figuras 3.6d-e) representam a atual geração de termovisores. Leves e portáteis (o modelo SC660 pesa 1,7kg), estes equipamentos caracterizam-se pela alta resolução de seus termogramas e visores embarcados aos termovisores, além da integração com softwares do fabricante. Em 1998 a empresa sueca Agema Infrared Systems, pioneira no desenvolvimento de termovisores para fins comerciais, foi incorporada à americana FLIR Systems.

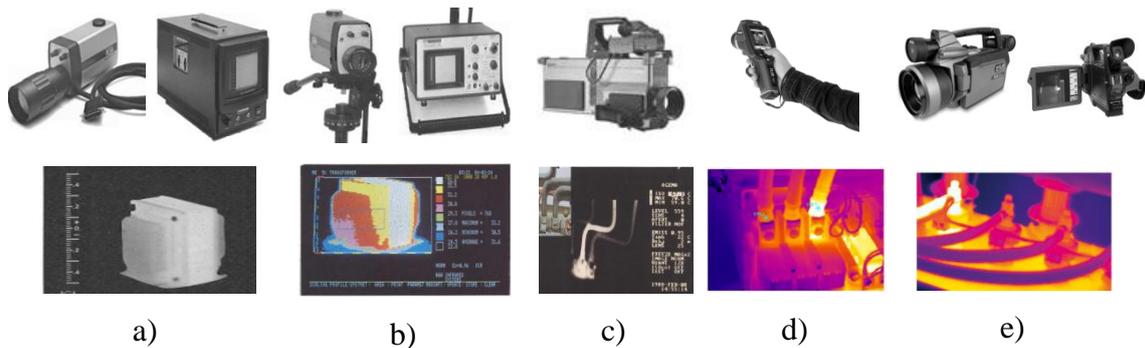


Figura 2.6 – Modelos de termovisores a) “Thermovision 780” (1980) b) “Thermovision 782” (1985) e c) modelo portátil “Thermovision 450”(1988) de fabricação AGEMA;d) “Flir i50” e e) “Flir SC660” de fabricação FLIR (dias atuais).

FONTE – Manual AGEMA (1980, 1985, 1988); FLIR (2010a, 2010b)

#### 2.4.1 Transmissão e emissão atmosférica

Ao se propagar pelo ar entre o objeto e o termovisor, a radiação infravermelha sofre atenuação devido aos fenômenos de espalhamento e absorção provocados por partículas suspensas no ar. O espalhamento é a mudança de direção de parcela da radiação que deveria incidir sobre os detectores do termovisor, e a absorção, a redução da quantidade de fluxo radiativo incidente devido à absorção da energia térmica pelo meio.

Para partículas relativamente grandes, o espalhamento não depende do comprimento de onda da radiação incidente. Contudo, para partículas da mesma ordem de grandeza da radiação propagada, o espalhamento exibe dependência em relação ao comprimento de onda, fenômeno conhecido como difusão de Rayleigh. A difusão de Rayleigh (ou molecular) está diretamente relacionada às moléculas de gases suspensas na atmosfera. Por outro lado, a outra forma de espalhamento conhecida está associada a partículas de poeira ou de aerossóis suspensas no ar, fenômeno chamado de difusão Mie. O espalhamento provocado por aerossóis afeta a transmissão atmosférica de forma mais intensa que a difusão molecular (CHRZANOWSKI, 2001b).

A atenuação da radiação provocada pela absorção atmosférica, assim como o espalhamento, apresenta duas formas distintas: a absorção molecular e a absorção aerossol. Entretanto, ao contrário da difusão, a absorção molecular é mais significativa que a aerossol. Os principais gases responsáveis pelo fenômeno de absorção são vapor de água (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>), em nível terrestre.

Como a atmosfera absorve radiação, ela também é capaz de emitir sua própria radiação, uma vez que sua emissividade,  $\epsilon$ , é igual à sua absorvidade,  $\alpha$ . Os principais gases responsáveis pela emissão atmosférica são H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, concentrados nas faixas espectrais de 5 $\mu$ m a 8 $\mu$ m e acima de 13 $\mu$ m, embora haja emissão em outras faixas espectrais (INCROPERA, DEWITT, 1992). A radiação ambiental é função da temperatura média da atmosfera, da concentração de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, da distância entre o alvo e o termovisor, e independe da radiação emitida pelo objeto.

A Figura 2.7 ilustra a transmissão atmosférica até uma altitude de aproximadamente 2 km em função do comprimento de onda. As duas regiões da ilustração que apresentam elevada capacidade de transmissão, de 3 $\mu$ m a 5 $\mu$ m e 8 $\mu$ m a 14 $\mu$ m são chamadas de “janelas atmosféricas”. Portanto, as duas janelas atmosféricas encontram-se dentro das faixas do infravermelho médio (MWIR) e infravermelho longo (LWIR). Logo, a maioria dos sistemas de imageamento infravermelho é projetada para operar nestas faixas.

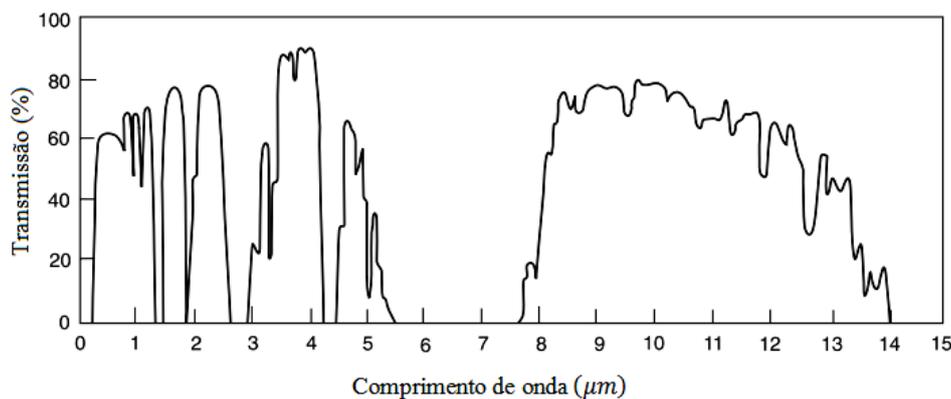


Figura 2.7 – Transmissão atmosférica para altitude de até 2 km em função do comprimento de onda.

FONTE – Rogalski e Chrzanowski (2002).

A atenuação provocada pela atmosfera pode ser estimada pela transmissividade atmosférica,  $\tau_{atm}$ , uma vez que não há reflexão do meio. Da Equação (2.12), tem-se:

$$\alpha_{atm} + \tau_{atm} = 1 \quad (2.20)$$

Da lei de Kirchhoff:

$$\varepsilon_{atm} = \alpha_{atm} \quad (2.21)$$

Logo:

$$\varepsilon_{atm} = 1 - \tau_{atm} \quad (2.22)$$

Observa-se que para os valores das janelas atmosféricas, a emissividade ambiental é relativamente baixa, o que sinaliza a baixa emissão de radiação. Por outro lado, entre  $5\mu\text{m}$  e  $8\mu\text{m}$  e para comprimentos de onda superiores a  $13\mu\text{m}$  o valor da emissividade é próximo a unidade.

#### 2.4.2 Transmissão e emissão da óptica

Ao incidir sobre o termovisor, a radiação é transmitida através de seu sistema óptico do ambiente externo até sua matriz de detectores. Adicionalmente, entre o termovisor e a fonte de radiação pode haver ainda janelas, domos, filtros e lentes que podem ser empregadas para proteger ou alterar a resposta espectral do detector (ROGALSKI, 2010).

Em termovisores comerciais de terceira geração, onde a incidência de radiação é diretamente transmitida à matriz de detecção, os materiais utilizados são refrativos, enquanto que escâneres de imagem térmica necessitam de ópticas refrativas e refletivas.

No que concerne às objetivas refrativas, os materiais empregados para fabricação de lentes na faixa espectral visível são opacos no espectro infravermelho. Portanto, materiais especiais devem ser utilizados para faixa espectral infravermelha. As objetivas mais comumente utilizados são fabricadas em germânio (Ge), dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), seleneto de zinco ( $\text{ZnSe}$ ), sulfeto de zinco ( $\text{ZnS}$ ), silício (Si) e vidro BK-7.

A Figura 2.8 ilustra a transmitância de alguns materiais empregados na fabricação de lentes infravermelhas em relação ao comprimento de onda. O germânio, por exemplo, é utilizado para a banda espectral de  $2\mu\text{m}$  a  $15\mu\text{m}$ . Devido ao seu alto índice de refração ( $n \cong 4$ ), é aconselhável que as objetivas de germânio recebam cobertura anti-reflexo, o que pode contribuir para o aumento do custo da lente. Além disso, seu índice de refração apresenta uma forte dependência com a temperatura. Por exemplo, a  $373,15\text{K}$  a transmitância das lentes de germânio pode sofrer uma queda de

20% a 30% de seu valor (LIGHTPATH, 2011). Por outro lado, um índice refração elevado é útil ao projeto de objetivas porque reduz o número de lentes.

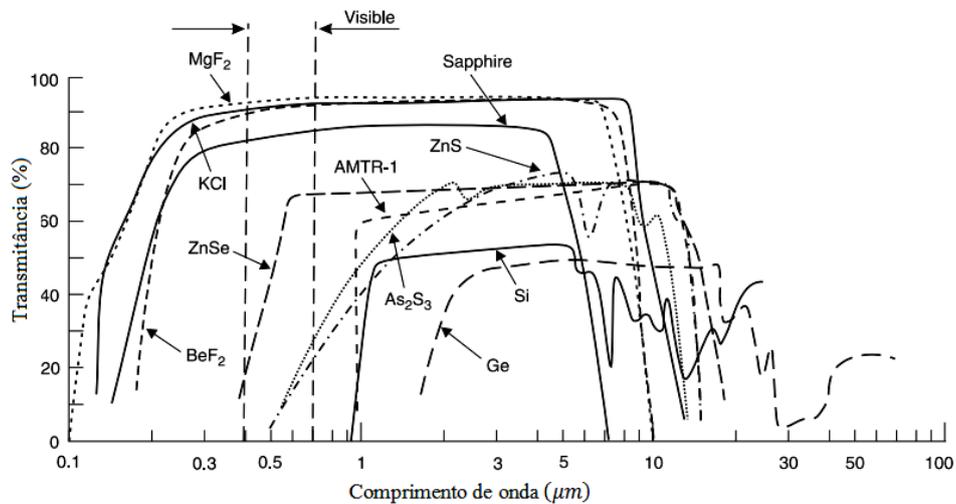


Figura 2.8 – Transmittância de alguns materiais empregados em lentes infravermelhas.

FONTE - Rogalski e Chrzanowski (2002).

Ao transmitir a radiação até o interior do termovisor, parte da energia radiativa é absorvida pelo seu bloco óptico. Além disso, o conjunto de lentes encontra-se a uma dada temperatura,  $T_{op}$ , que pode ser igual ou superior a temperatura ambiente. Consequentemente, a lente também se torna uma fonte emissora de radiação. Atualmente, os modernos termovisores comerciais possuem sistemas para monitoramento da temperatura do bloco óptico. Desta forma, a interferência causada pela radiação emitida pela lente (e capturada pelo detector) é compensada no modelo matemático de medição do termovisor. Informações adicionais sobre lentes infravermelhas podem ser obtidas em Rogalski (2010), e nos portais das empresas fabricantes de lentes Knight Optical , LightPath Technologies , JanosTechnology e Temmek Optics.

### 2.4.3 Campo de visão

O campo de visão, FOV (*Fiel of View*), determina à área de observação do termovisor para uma dada distância de observação. Conforme a aplicação pode ser necessária a utilização de lentes cujo campo de visão seja amplo para observação de grandes objetos, como, por exemplo, edifícios, em estudos de conforto térmico. Em outras aplicações, lentes com campo de visão menor permitem capturar mais detalhes dos objetos que não podem ser observados a curtas distâncias com lentes convencionais. Em estudos de

cicatrização, ou medição do comportamento térmico de dentes, por exemplo, estes tipos de lentes são utilizadas.

A Figura 2.9 esboça o campo de visão FOV de um termovisor . Os parâmetros HFOV e VFOV são, respectivamente, largura e a altura e do campo de visão FOV.

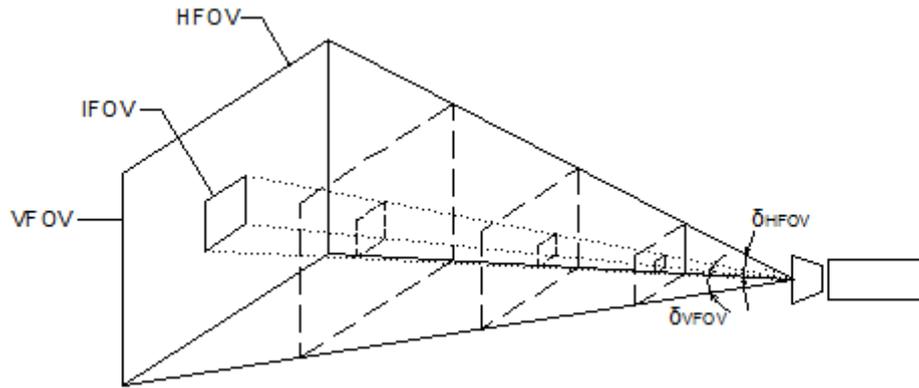


Figura 2.9 – Campo de visão FOV e IFOV.

Os valores de HFOV e VFOV podem ser calculados por:

$$\begin{aligned} HFOV &= d \times \text{sen } \delta_{HFOV}, m \\ VFOV &= d \times \text{sen } \delta_{VFOV}, m \end{aligned} \quad (2.23)$$

Onde  $\delta_{HFOV}$  e  $\delta_{VFOV}$  correspondem aos ângulos que formam o campo de visão horizontal e vertical, respectivamente, para uma dada distância  $d$ .

Dentro da janela de observação que forma o FOV, há outro pequeno campo de visão chamado de campo de visão instantâneo, IFOV (*Instantaneous Field of View*). Este campo determina a resolução espacial do termovisor e corresponde ao campo de visão de um único elemento detector da matriz de sensores. Para um termovisor cuja matriz FPA possua  $X$  pixels horizontais por  $Y$  pixels verticais, o IFOV é dado por:

$$IFOV = \frac{HFOV}{X} = \frac{VFOV}{Y}, mm \quad (2.24)$$

Isto significa que objetos cujas dimensões sejam inferiores a IFOV não poderão ser medidos com precisão. Portanto, o IFOV corresponde ao menor detalhe dentro do campo de visão em que o termovisor é capaz de medir a radiação térmica com precisão. Eventualmente, o IFOV pode ser encontrado em manuais de fabricantes de lentes e termovisores em mrad. Nestes casos, as relações utilizadas devem ser:

$$IFOV = \frac{\delta_{HFOV}\pi}{180 \times X} = \frac{\delta_{VFOV}\pi}{180 \times Y}, mrad \quad (2.25)$$

Há ainda casos em que fabricantes de termovisores especificam o campo de visão instantâneo de medição, *IFOV means (Instantaneous Field of View Measurement)*. Assumido como sendo  $3 \times IFOV$ , o *IFOV means* estabelece que a captura de radiação por pelo menos três detectores térmicos é necessária para assegurar a precisão da medição.

O *IFOV means* pode ainda ser encontrado com a denominação de *SMO (Smallest Measurable Object)*.

#### 2.4.4 O modelo matemático da medição

A radiação infravermelha emitida por um objeto percorre uma dada distância até ser captada pela matriz de detectores térmicos do termovisor. Além de emitir radiação, o objeto de interesse também pode refletir parte da radiação proveniente de outras fontes próximas, ou mesmo do Sol. Além disso, como discutido anteriormente, a atmosfera não é capaz apenas de atenuar a radiação transmitida, como também, é capaz de emitir. A Figura 2.10 ilustra este cenário para medição de temperatura sem contato de um objeto de emissividade  $\epsilon$  e à temperatura  $T_{ob}$  posicionado à distância  $d$  de um termovisor:

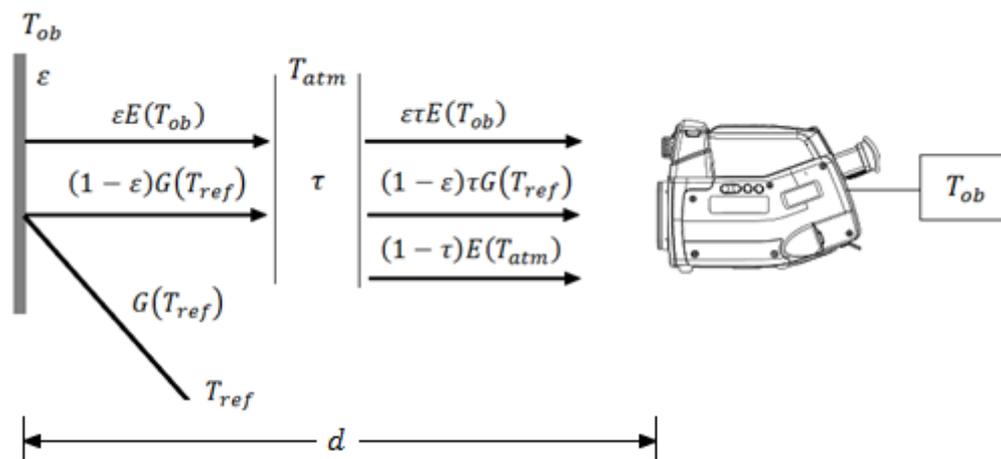


Figura 2.10 – Diagrama de medição.

FONTE - FLIR (2010a, 2010b).

Onde:

$\varepsilon\tau E(T_{ob})$ : fluxo radiativo emitido pelo objeto de emissividade  $\varepsilon$ , à temperatura  $T_{ob}$  e atenuado pela transmissividade atmosférica  $\tau$ ;

$(1 - \varepsilon)\tau G(T_{ref})$ : parcela da irradiação refletida sobre o objeto de refletividade  $(1 - \varepsilon)$ , Equação (2.19), proveniente de uma fonte de calor a temperatura  $T_{ref}$  e atenuada pela transmissividade atmosférica  $\tau$ ;

$(1 - \tau)E(T_{atm})$ : emissão atmosférica de emissividade  $(1 - \tau)$ , Equação (2.22).

Logo, o fluxo radiativo total,  $G$ , recebido pelo termovisor é dado por:

$$G = \varepsilon\tau E(T_{ob}) + (1 - \varepsilon)\tau G(T_{ref}) + (1 - \tau)E(T_{atm}) \quad (2.26)$$

O modelo matemático da medição relaciona a irradiação recebida pelo termovisor à temperatura do objeto através da resposta a excitação da sua matriz de detectores térmicos. Esta resposta pode ser em termos de um sinal elétrico absoluto, em Volts, ou Volts por alguma constante do detector. Ele pode ainda ser adimensional, fornecido pelo software do fabricante. Neste caso, o sinal é tratado como sendo um sinal digital. Assim, o sinal elétrico  $S$  é proporcional a irradiação recebida pelo termovisor, e os sinais  $S_{ob}$ ,  $S_{ref}$  e  $S_{atm}$  são proporcionais às radiações emitidas pelo objeto, de origem ambiental e pela atmosfera, respectivamente.

$$\begin{aligned} S &\propto G \\ S_{ob} &\propto E(T_{ob}) \\ S_{ref} &\propto G(T_{ref}) \\ S_{atm} &\propto E(T_{atm}) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Assim,  $S$  é dado por:

$$S = \varepsilon\tau S_{ob} + (1 - \varepsilon)\tau S_{ref} + (1 - \tau)S_{atm} \quad (2.28)$$

Da Equação (2.28), o sinal proporcional à emissão do objeto é dado por:

$$S_{ob} = \frac{S}{\varepsilon\tau} - \left[ \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} S_{ref} + \frac{(1 - \tau)}{\varepsilon\tau} S_{atm} \right] \quad (2.29)$$

A relação entre os sinais  $S_{ob}$ ,  $S_{ref}$  e  $S_{atm}$  e as temperaturas do objeto,  $T_{ob}$ , refletida  $T_{ref}$  e atmosférica  $T_{atm}$  pode ser obtida por uma aproximação da Lei de Planck em função da sensibilidade espectral relativa do detector do termovisor,  $S_R(\lambda)$ , e da sua banda espectral de operação. Para a faixa de operação entre os comprimentos  $\lambda_1 - \lambda_2$ , a resposta à emitância espectral de um corpo negro fornecida pelo detector é dada por (MINKINA; DUDZIK, 2009):

$$S(T) = C \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_k(\lambda) \frac{c_1 d\lambda}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) \right]} \quad (2.30)$$

Onde C é uma constante de proporcionalidade. A sensibilidade espectral relativa,  $S_k(\lambda)$ , é função da detectividade normalizada do detector  $D^*(\lambda)$ , que permite uma comparação efetiva entre detectores de mesmo tipo, mas de diferentes tamanhos (ROGALSKI, 2010).

Da Equação (2.30), obtém-se (MINKINA; DUDZIK, 2009):

$$S_{ob} = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T_{ob}}\right) - F} \quad (2.31)$$

$$S_{ref} = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T_{ref}}\right) - F} \quad (2.32)$$

$$S_{atm} = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T_{atm}}\right) - F} \quad (2.33)$$

As Equações (2.31), (2.32) e (2.33) demonstram a dependência não linear entre o sinal de saída do detector e as temperaturas das fontes de radiação. As constantes de calibração R, B e F são específicas para cada faixa de operação do termovisor e para diferentes filtros e lentes. Conforme a configuração do termovisor, o sistema determina a combinação correta de valores a serem utilizados.

A transmissividade atmosférica presente na Equação (2.29) introduz no modelo de medição a compensação devido aos fenômenos de absorção e espalhamento discutidos na Seção 2.4.1. Diferentes modelos de transmissividade atmosférica podem ser

encontrados na literatura, como FASCODE, MODTRAN e LOWTRAN (MINKINA; DUDZIK, 2009). Neste trabalho foi adotado o modelo transmitância atmosférica dos termovisores Agema 470 ProSW e Agema 880 ProLW baseados no modelo LOWTRAN.

$$\tau(d) = \exp \left[ -\alpha(\sqrt{d} - \sqrt{d_{cal}}) - \beta(d - d_{cal}) \right] \quad (2.34)$$

Onde:

$\alpha = 0,008m^{-1/2}$ ,  $\beta = 0 m^{-1}$  para termovisores LW (*long-wave*) que operam na banda espectral  $8\mu m$  a  $14\mu m$ ;  $d_{cal}$  é uma constante. Observa-se que o modelo da Equação (2.34) é função apenas da distância entre o termovisor e o objeto

Assim, o modelo matemático da medição da temperatura adotado é dado pelas Equações (2.35), (2.36) e (2.37):

$$\tau(d) = \exp \left[ -\alpha(\sqrt{d} - \sqrt{d_{cal}}) - \beta(d - d_{cal}) \right] \quad (2.35)$$

$$S_{ob} = \frac{S}{\varepsilon\tau} - \left[ \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T_{ref}}\right) - F} + \frac{(1 - \tau)}{\varepsilon\tau} \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T_{atm}}\right) - F} \right] \quad (2.36)$$

$$T_{ob} = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{S_{ob}} + F\right)} [K] \quad (2.37)$$

O modelo assumido é função da emissividade do objeto,  $\varepsilon$ , da sua distância  $d$  em relação ao termovisor, da temperatura refletida de uma fonte externa,  $T_{ref}$ , da temperatura atmosférica,  $T_{atm}$ , e do sinal proporcional à radiação incidente produzido pelo detector do termovisor  $S$ .

$$T_{ob} = f(\varepsilon, d, T_{ref}, T_{atm}, S) \quad (2.38)$$

As constantes do modelo matemático R, B e F podem ser calculadas com base na Lei de Planck e Equação (2.30). Porém, a escassez de informações sobre o equipamento pode impossibilitar a determinação das constantes. Além disso, resultados melhores são obtidos durante o procedimento de calibração para cada faixa de operação e para cada

tipo de filtros e lentes utilizados pelo termovisor, uma vez, que estes valores serão obtidos para o comportamento real do equipamento (AGEMA, 1993).

O procedimento para obtenção de R, B e F é realizado empregando-se um radiador padrão em condições controladas em laboratório. Para curtas distâncias  $d \ll 1$ , a transmissividade atmosférica é aproximadamente a unidade ( $\tau \cong 1$ ), e para um radiador padrão de corpo negro a emissividade é assumida como sendo unitária ( $\varepsilon \cong 1$ ). Conseqüentemente, da Equação (2.36), tem-se:

$$\begin{aligned} S_{ob} &= S \\ T_{ob} &= f(S) \end{aligned} \quad (2.39)$$

Portanto, qualquer influência externa à medição é negligenciada e a única radiação capturada pelo termovisor é assumida como sendo aquela proveniente do corpo negro. Para diferentes valores de temperatura,  $T_i$ , ajustados no radiador, são obtidos os sinais  $S_i$  medidos pelo termovisor, ou seja:

$$S_i = f(T_i) \quad (2.40)$$

Logo, um ajuste de curvas realizado com base nos pontos de calibração  $(T_i, S_i)$  fornece as constantes R, B e F. A Figura 2.11 exemplifica a relação  $(T_i, S_i)$ .

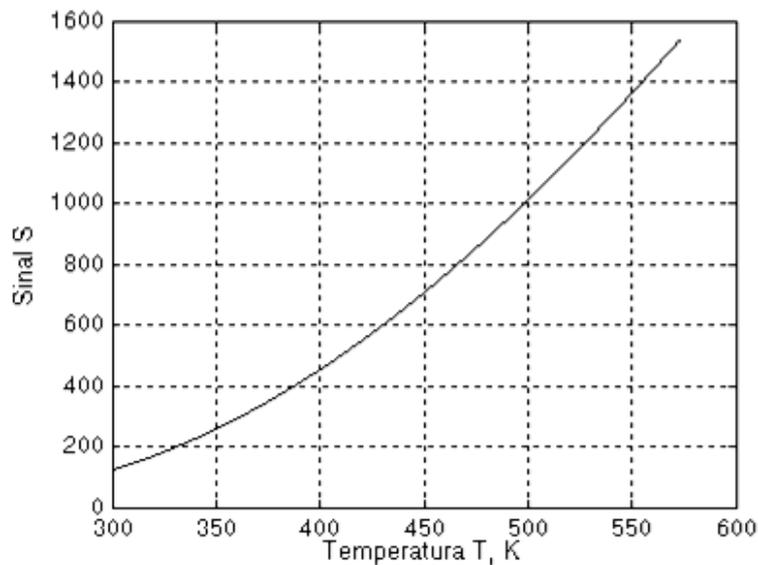


Figura 2.11 – Exemplo de característica de calibração  $S = f(T)$ .

Finalmente, a curva de calibração inversa  $T_i = f^{-1}(S_i)$  fornece a relação entre a temperatura  $T_{ob}$  e o sinal  $S_{ob}$  para as constantes obtidas. Estas são, por sua vez,

armazenadas na memória do termovisor e acionadas durante a medição, conforme a configuração apropriada.

Basicamente, o processo de medição da radiação infravermelha é realizado através das quatro etapas descritas a seguir e ilustradas na Figura 2.12 (CHRZANOWSKI, 2001b).

- i. Obtenção da característica de calibração do sinal elétrico  $S_i$  em função da temperatura do corpo negro  $T_i$ , para vários valores de temperatura  $S_i = f(T_i)$ ; Posteriormente, obtenção da curva de calibração inversa  $T_i = f^{-1}(S_i)$ ;
- ii. Medição do sinal real  $S$  gerado pela radiação incidente no detector;
- iii. Correção do sinal real  $S$  para o sinal gerado pela radiação do objeto  $S_{ob}$  em função de parâmetros radiométricos que caracterizam o alvo e as condições ambientais (emissividade, temperatura refletida, temperatura atmosférica, distância etc.);
- iv. Finalmente, obtenção da temperatura do objeto  $T_{ob}$  em função do sinal corrigido  $S_{ob}$  na curva de calibração inversa  $T_i = f^{-1}(S_i) \rightarrow T_{ob} = f^{-1}(S_{ob})$ .

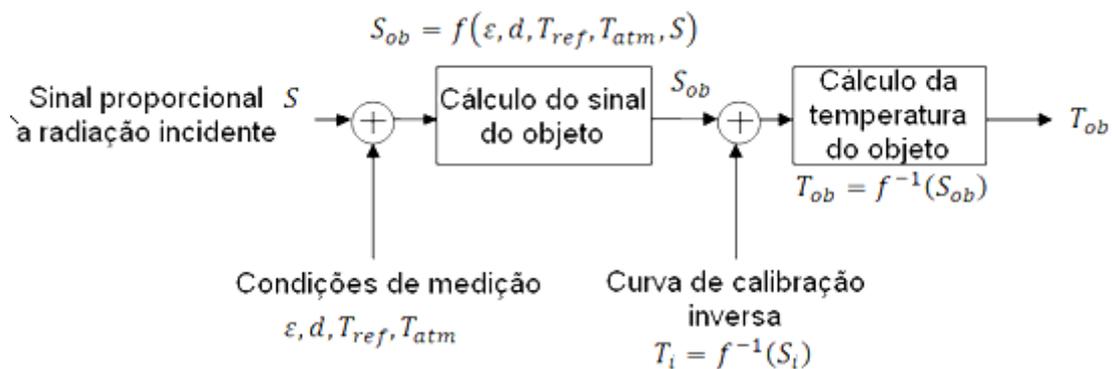


Figura 2.12 – Processo de medição da radiação.

Embora o sinal  $S$  seja apresentado como um único valor, ele constitui uma matriz de dados, que após ser processada forma a imagem bidimensional do perfil térmico do objeto chamada de termograma.

## 2.5 Incerteza de medição

O resultado da medição de qualquer grandeza física está invariavelmente associado um nível de incerteza, que poderá ser quantificada, monitorada e reduzida, porém não eliminada. Sua presença se deve aos mais diversos fatores presentes no instante da medição e ao julgamento do próprio instrumentista, o que o conduz a um resultado que não exprime a verdade absoluta acerca da grandeza medida. É importante observar que a incerteza de medição não é um erro, mas a incapacidade de se estabelecer o valor

exato do mensurando. Por outro lado, o erro de medição caracteriza-se pela diferença entre a leitura de um dado instrumento e o valor verdadeiro convencional do mensurando (já que seu valor exato é desconhecido).

O erro de medição é composto pela soma dos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Os erros aleatórios ocorrem devido a fatores imprevisíveis e sua influência é denominada efeitos aleatórios. Os erros sistemáticos ocorrem devido a um fator constante de erro e tendem a se repetir nas mesmas condições de medição. Este erro pode ser corrigido pela introdução de um fator de correção e sua influência é denominada efeito sistemático. Já o erro grosseiro ocorre devido imperícia do instrumentista ou mesmo por dano no instrumento de medição. Ele pode ser detectado com relativa facilidade devido a discrepâncias de seus resultados. Neste trabalho, o erro grosseiro não será considerado.

Dentre os fatores que podem contribuir para a incerteza de medição estão à influência do instrumentista, a definição incompleta do mensurando e dos parâmetros necessários para sua estimativa, das condições ambientais adversas, da amostragem não representativa do mensurando etc. Conseqüentemente, faz-se necessário a utilização de meios que possam assegurar a qualidade do resultado e quão correto este se encontra em relação ao valor verdadeiro da grandeza. Estes meios constituem as técnicas de cálculo de incerteza de medição, cujo objetivo é quantificar e assegurar, sob determinada probabilidade, a qualidade do resultado.

### 2.5.1 O Método GUM

#### 2.5.1.1 Contexto histórico

As primeiras ações no sentido de estabelecer meios para avaliação da incerteza de medição remontam do final da década de setenta (ABNT INMETRO, 2003). A iniciativa de buscar consenso internacional nesta matéria foi dada pelo *Comité International des Poids e Mesures* (CIPM), autoridade em mundial em metrologia, que solicitou ao *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) que abordasse o assunto com o intuito de uniformizar a forma como as incertezas deveriam ser declaradas pelos laboratórios de calibração e ensaios. Após pesquisas realizadas em laboratórios nacionais comprometidos em buscar uma solução para a questão, seus membros se reuniram em 1980, sob convocação do BIPM, formando o Grupo de Trabalho sobre

Declaração de Incertezas que resultou na publicação da Recomendação INC-1, Expressão de Incertezas Experimentais. O documento foi ratificado pelo CIPM em 1986 (ABNT INMETRO, 2003).

O desenvolvimento de um guia detalhado que pudesse orientar a indústria e o comércio sobre a expressão da incerteza de medição foi atribuída a *International Organization for Standardization* (ISO) que delegou a *ISO Technical Advisory on Group on Metrology* (TAG 4) a tarefa. A ISO, uniram-se a *International Electrotechnical Commission* (IEC), CIPM, a *International Organization of Legal Metrology* (OIML), a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) e a *International Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP) e a *International Clinical Chemistry* (IFCC), que elaboraram o *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (comumente conhecido como GUM). Contudo, sua difusão tornou-se expressiva apenas a partir de 1990. Atualmente, o GUM é amplamente empregado por instituições e empresas para estimativa da incerteza de medição em seus procedimentos sendo numerosas as publicações que debatem seu uso.

#### 2.5.1.2 Cálculo da incerteza de medição pelo GUM

As componentes da incerteza de medição são subdivididas pelo GUM em duas categorias, Tipo A e Tipo B, associadas a uma distribuição de probabilidades. A avaliação Tipo A é caracterizada pela sua variância estimada,  $s^2$ , obtida de uma série de observações realizadas sob condições de repetitividade. Seu desvio padrão  $s$  é a raiz quadrada positiva de sua variância estimada, sendo denominada incerteza padrão do Tipo A. Sua estimativa é baseada em uma função de densidade de probabilidade, PDF, obtida de uma distribuição de frequências das observações realizadas (geralmente, distribuição normal). Por outro lado, a avaliação do Tipo B é baseada na suposição da função de densidade de probabilidade que melhor representa a dispersão da variável analisada. Neste caso, utiliza-se o conhecimento disponível (ou *a priori*) para estimativa de sua variância, e o desvio padrão estimado é denominado incerteza padrão Tipo B. Contudo, independentemente da classificação, ambas são obtidas por distribuições de probabilidade e podem ser avaliadas por meios estatísticos (ABNT INMETRO, 2003).

**Incerteza Tipo A:** seja  $n$  o número de observações independentes,  $x_i$ , de uma variável aleatória  $X$  obtidas sob condições de repetitividade. O valor esperado,  $\mu_x$ , é dado pela média aritmética,  $\hat{x}$ , das  $n$  observações:

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.41)$$

Devido à ocorrência de efeitos aleatórios, os valores das  $n$  observações individuais diferem entre si, caracterizando uma dispersão. A variabilidade dos valores de  $x_i$  é quantificada por sua variância,  $\sigma^2$ , cuja estimativa é fornecida pela variância experimental:

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2 \quad (2.42)$$

Todavia, a variância média,  $s^2(x_i) = s^2/n$ , fornece a melhor estimativa da dispersão experimental dos valores, logo:

$$s^2(\hat{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n} \quad (2.43)$$

A raiz quadrada positiva de  $s^2(\hat{x})$  é o desvio padrão experimental da média,  $s(\hat{x})$ , cujo valor pode ser assumido como a incerteza padrão,  $u(x_i)$ , da variável aleatória  $X_i$ :

$$u(x_i) = s(\hat{x}) \quad (2.44)$$

Graficamente, a dispersão que caracteriza a incerteza Tipo A é aproximadamente uma distribuição normal, de valor esperado  $\mu_x$  e desvio padrão  $\sigma$ :

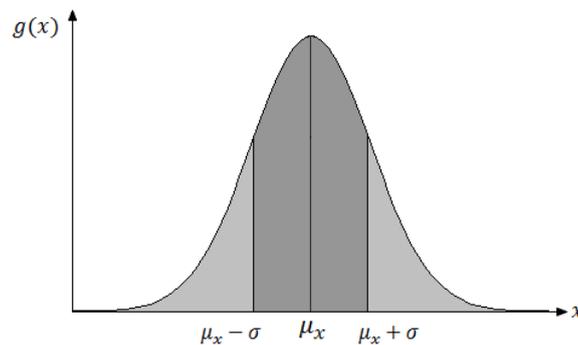


Figura 2.13 – Distribuição normal (Tipo A).

Onde  $g(x)$  é a função de densidade de probabilidade, que representa a probabilidade de uma faixa de valores de  $x_i$  pertencer à distribuição normal.

**Incerteza Tipo B:** Em uma situação onde não é possível estimar a distribuição que caracteriza a variável aleatória  $X$  a partir de uma série de observações, torna-se

necessário assumir uma distribuição que possa representar, razoavelmente, sua dispersão em torno de sua esperança,  $\mu_x$ . Portanto, considera-se igualmente provável que os valores de  $X$  encontrem-se dentro de uma faixa de valores, e que fora desta, sua probabilidade de ocorrência seja zero. Uma distribuição que atende tipicamente estas características é a distribuição uniforme, cujo valor esperado é dado por:

$$x = \frac{a_- + a_+}{2} \quad (2.45)$$

Onde  $a_+$  e  $a_-$  são os limites superior e inferior da distribuição uniforme, respectivamente. A variância estimada da distribuição,  $s^2$  é dada por:

$$s^2(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} \quad (2.46)$$

Se a diferença entre os limites da distribuição for de  $a_+ - a_- = 2a$ , a variância da Equação (2.46) é dada por:

$$s^2(x_i) = \frac{a^2}{3} \quad (2.47)$$

Assim como na Equação (2.44), a raiz quadrada positiva de  $s^2(x_i)$  é o desvio padrão, cujo valor pode ser assumido como uma estimativa de incerteza padrão  $u(x_i)$ , da variável aleatória  $X_i$ :

$$u(x_i) = s(\hat{x}) \quad (2.48)$$

A Figura 2.14 ilustra uma distribuição uniforme de valor esperado  $\mu_x$  e desvio padrão  $\sigma$ , que caracteriza a avaliação de incerteza Tipo B.

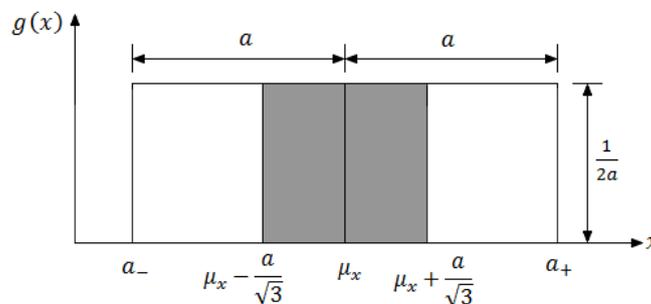


Figura 2.14 – Distribuição uniforme (Tipo B).

As distribuições estatísticas ilustradas anteriormente, embora sejam as mais comumente empregadas, não são as únicas capazes de estimar a incerteza de medição. Outras distribuições devem ser avaliadas, como trapezoidal, triangular dentre outras. Mais distribuições úteis podem ser encontradas em (JCGM 101, 2008).

### 2.5.1.3 Incerteza de medição em medições indiretas

Em uma medição indireta, um modelo matemático relaciona diferentes variáveis de entrada à(s) variável (is) de saída (resultado da medição). Nesta situação, a contribuição para a incerteza de medição provém de cada variável presente no modelo matemático. Logo, deve-se determinar a incerteza de cada variável a fim de que se possa estabelecer a incerteza do resultado da medição.

Suponha-se que o modelo matemático de uma medição indireta seja dado pela Equação (2.49):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.49)$$

Onde  $Y$  é o valor do mensurando para os  $N$  valores de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_N$ . Seja  $y$  uma estimativa de  $Y$  obtida a partir das estimativas das variáveis de entradas  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , logo, o resultado da medição será, então:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.50)$$

Onde cada valor de  $x$  está associado a uma incerteza  $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)$ . A incerteza padrão combinada,  $u_c(y)$ , pode ser estimada pela Equação (2.51), conhecida como lei da propagação de incertezas:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1+i}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (2.51)$$

Onde:

$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$  e  $c_j = \frac{\partial f}{\partial x_j}$  são denominados coeficiente de sensibilidade das variáveis  $x_i$  e  $x_j$ , respectivamente;

$r_i = \frac{s(x_i, x_j)}{s(x_i)s(x_j)}$  é coeficiente de correlação. Ele expressa a dependência mútua relativa entre as variáveis  $x_i$  e  $x_j$ ;

$s(x_i, x_j)$  é a covariância entre  $x_i$  e  $x_j$ ;

$s(x_i)$  e  $s(x_j)$  são os desvios padrão das variáveis  $x_i$  e  $x_j$ , respectivamente.

A Figura 2.15 apresenta esquematicamente a propagação de incertezas através de um modelo de medição:

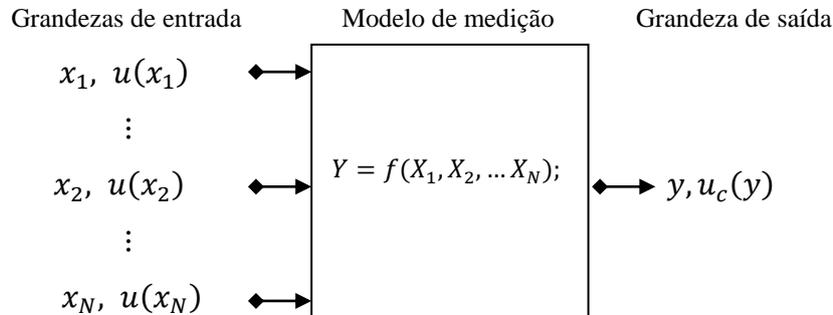


Figura 2.15 – Esquema de propagação de incertezas em uma medição indireta para N grandezas de entrada e uma grandeza de saída.

Na Equação (2.51) a incerteza padrão combinada é obtida por aproximação de primeira ordem da série de Taylor de  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ , o que pressupõe um modelo de medição linear. Havendo não-linearidade significativa no modelo matemático de  $Y$ , a Equação (2.51) pode não ser uma aproximação satisfatória para a distribuição da incerteza padrão combinada, tornando-se necessária a inclusão de termos de ordem superior da série de Taylor em sua formulação:

$$\begin{aligned}
 u_c^2(y) = & \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (2.52) \\
 & + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1+i}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)
 \end{aligned}$$

Uma vez determinada incerteza padrão combinada  $u_c(y)$ , a incerteza expandida  $U_p$ , pode ser calculada pelo produto  $U_p = k_p u_c(y)$  onde,  $k_p$  é denominado fator de abrangência para um determinado nível da confiança  $p$ . A incerteza expandida corresponde à faixa em torno do resultado da medição no qual se espera que o valor do mensurando esteja localizado para uma fração  $p$  da sua distribuição de probabilidade. Consequentemente, o resultado da medição é expresso por:

$$Y = y \pm U_p \quad (2.53)$$

O fator de abrangência  $k_p$  que atende ao nível da confiança  $p$  é obtido assumindo-se a aproximação  $k_p = t_p(v_{eff})$  onde  $t_p(v_{eff})$  é um fator derivado da distribuição-t ou distribuição de *Student* com graus de liberdade efetivos  $v_{eff}$ , calculados pela equação de *Welch-Satterthwaite*:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.54)$$

A incerteza expandida é então reescrita como sendo:

$$U_p = t_p(v_{eff})u_c(y) \quad (2.55)$$

A Figura 2.16 ilustra a distribuição normal admitida pela GUM, para a incerteza de medição. A incerteza combinada,  $u_c(y)$ , corresponde ao intervalo de abrangência de 68,27%. Logo, aumentar a confiabilidade da incerteza significa expandir seu intervalo de abrangência em torno do valor médio  $\mu_x$ .

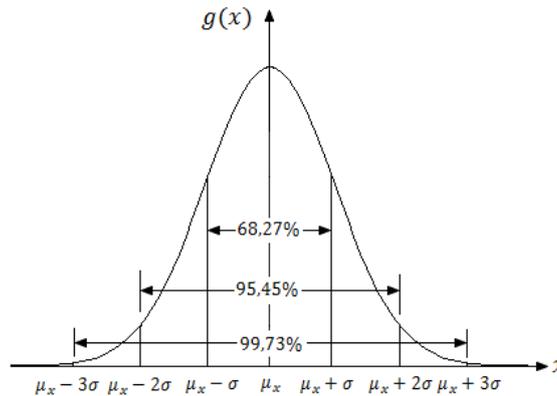


Figura 2.16 – Distribuição normal da incerteza de medição admitida pelo GUM.

Se  $v_{eff}$  tende ao infinito, o fator de abrangência,  $k_p$ , tende a 2, para um nível da confiança  $p$  de 95,45%, e 3, para um nível da confiança de 99,73%.

Embora o GUM seja amplamente difundido, a literatura apresenta discussões sobre a validade das Equações (2.52) e (2.54), para a expressão da incerteza de medição. Kacker e Jones (2003) demonstram inconsistências na metodologia descrita pelo GUM. Como, por exemplo, de que interpretação probabilística das componentes de incerteza Tipo A não são consistentes com a definição de intervalo de confiança, assim como, o fator de abrangência  $k_p$  para uma probabilidade de abrangência  $p$  de uma distribuição

normal ou *Student* obtido da fórmula de *Welch-Satterthwaite*, pode levar ao cálculo de um intervalo da confiança incorreto, pois o método de propagação de incertezas não reflete completamente a distribuição de probabilidades associada ao resultado de medição e a sua incerteza.

A menos das discussões mais profundas sobre o método GUM e sua validade estatística, três condições devem ser atendidas para sustentar seu emprego:

- a. O modelo matemático de  $Y$  deve ser linear;
- b. A função de densidade de probabilidade de  $Y$  deve ser suficientemente aproximada por uma distribuição Gaussiana ou distribuição  $t$ ;
- c. O cálculo dos graus de liberdade pela fórmula de *Welch-Satterthwaite* constitui uma aproximação adequada e precisa o suficiente para calcular  $k_p$ .

Em modelos de medição não lineares, o GUM recomenda o uso dos termos de mais alta ordem da série de Taylor para o cálculo de  $u_c(y)$ , ou o emprego de outros métodos numéricos e analíticos para sua avaliação.

Resumidamente, as etapas para aplicação do GUM são:

1. Definir o modelo de medição  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  incluindo todas as correções necessárias para  $f$ ;
2. Identificar as fontes de incerteza;
3. Determinar o valor  $x_i$  da variável  $X_i$  por meio estatístico ou outros meios;
4. Avaliar a incerteza padrão  $u(x_i)$  de cada estimativa  $x_i$  conforme a natureza de sua avaliação (Tipo A ou B);
5. Avaliar as covariâncias das eventuais variáveis correlacionadas;
6. Calcular o resultado da medição  $y$  por meio de seu modelo matemático  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ ;
7. Determinar a incerteza padrão combinada  $u(y)$  pela Equação (2.51) ou (2.52);
8. Calcular o número de graus de liberdade,  $\nu_{eff}$  e tomar o valor  $t_p$ , para o nível da confiança  $p$  desejado, com base na tabela da distribuição  $t$ ;
9. Aplicar a Equação (2.55) para o cálculo da incerteza expandida.

## 2.5.2 O Método de Monte Carlo

### 2.5.2.1 Contexto histórico

Durante a Segunda a Guerra Mundial, engenheiros e cientistas trabalharam no desenvolvimento do que viria a se tornar o primeiro computador eletrônico: o ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*). Desenvolvido na Universidade da Pensilvânia, Filadélfia (EUA), sob a responsabilidade do físico John Mauchly e do Engenheiro Presper Eckert, o ENIAC surpreendeu físicos e matemáticos pela incrível capacidade de solucionar equações diferenciais. Naquela época, Stanislaw Ulam, matemático entusiasta de teorias de amostragem, sugeriu a John von Neumann, membro do Instituto de Estudos Avançados, uma abordagem estatística para a solução de problemas envolvendo espalhamento de nêutrons em materiais sujeitos a fissão nuclear (METROPOLIS, 1987). Entusiasmados com a possibilidade de se obter distribuições estatísticas do fenômeno baseado em uma série de amostragens computacionais, Neumann e o Físico Nicholas Metropolis, realizaram o primeiro teste do MMC após a transferência do ENIAC para o Laboratório de Pesquisas Balísticas, em Maryland, por volta de 1947. Na ocasião, o método foi utilizado na solução de diversos problemas envolvendo o transporte de nêutrons, tendo sido os resultados bem sucedidos. Nas palavras de Metropolis “parecia que o Monte Carlo veio para ficar”. O mesmo Metropolis foi o responsável por nomear o método inspirado em um tio de Ulam que sempre tomava dinheiro em prestado de parentes porque “tinha de ir a Monte Carlo”, cidade do principado de Mônaco famosa por seus cassinos. Famosa por seus

Atualmente, o MMC possui várias aplicações, desde a física à economia, e também, no cálculo da incerteza de medição.

### 2.5.2.2 Cálculo da incerteza de medição pelo MMC

Baseado no conceito de propagação de distribuição de probabilidades o MMC é uma alternativa numérica para o cálculo de incerteza de medição onde o modelo matemático apresenta relativa complexidade, ou não atende aos critérios necessários para aplicação do GUM:

- i. O modelo da medição  $Y = f(X)$  é não-linear;
- ii. A distribuição de probabilidades da variável de saída  $y$  é assimétrica e não corresponde a uma distribuição Gaussiana;

- iii. A complexidade do modelo matemático torna inconveniente ou impossível a determinação analítica dos coeficientes de sensibilidade e os termos de ordem superior da série de Taylor;
- iv. O cálculo dos graus de liberdade através da fórmula de Welch-Satterthwaite não é considerado suficientemente adequado.

A aplicação do conceito de propagação de distribuição de probabilidades é realizada assumindo-se uma função de densidade de probabilidade,  $g_{X_i}$ , para cada uma das  $N$  variáveis que compõem o modelo da medição  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ . Em seguida, geram-se  $M$  valores aleatórios correspondentes a cada uma das distribuições de probabilidade assumidas para  $X_i$ , considerado variável aleatória. Os  $N$  conjuntos de dados aleatórios, de dimensão  $M$ , são simultaneamente avaliados no modelo de  $f$ , produzindo  $M$  resultados para  $Y$ , compondo sua função de densidade de probabilidade,  $g_Y$ . A Figura 2.17 ilustra este procedimento:

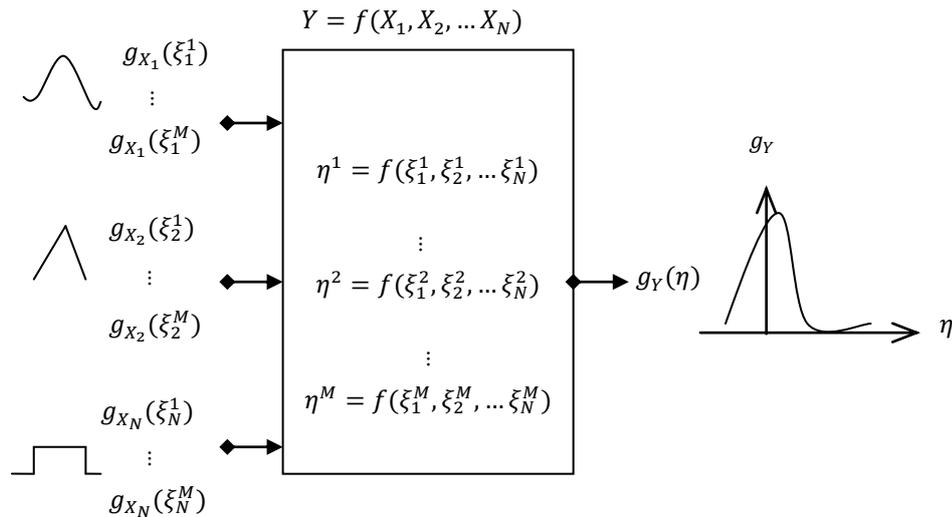


Figura 2.17 – Propagação de distribuição de probabilidades

Onde  $\xi_i$  e  $\eta$  são os possíveis valores que as variáveis aleatórias,  $X_i$  e  $Y$ , podem assumir atendendo as características das PDF's assumidas,  $g_{X_i}$ , e do modelo matemático  $f$ , respectivamente. Portanto, o MMC utiliza o próprio modelo matemático da medição como PDF da variável de saída  $Y$ .

A PDF  $g_Y(\eta)$ , ilustrada na Figura 2.17 é solução numérica da propagação de distribuição de probabilidades do modelo matemático  $f$ , dada por:

$$g_Y(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} g_{X_1, \dots, X_N}(\xi_1, \dots, \xi_N) \delta[\eta - f(\xi_1, \dots, \xi_N)] d\xi_1, \dots, \xi_N \quad (2.56)$$

Uma vez que a solução analítica da Equação (2.56) não é conveniente para abordagens práticas, infinitas amostras de  $Y$  e para modelos matemáticos complexos, o MMC é uma alternativa eficiente para a estimativa de  $g_Y$ , desde que, o número  $M$  de variáveis aleatórias seja suficientemente grande a fim de se obter um número representativo de amostras de  $Y$  e redução de eventuais correlações introduzidas pelo gerador de números aleatórios. O Suplemento 1 do GUM, recomendada ao menos  $10^4$  realizações.

A construção das funções de densidade de probabilidade,  $g_{X_i}$ , pode ser facilmente realizada, empregando-se softwares como *MatLab*, ou planilhas *Excel*. Geralmente, os softwares comerciais possuem algoritmos implementados para geração de números aleatórios que atendam aos parâmetros das distribuições mais comuns.

Considerando, por exemplo, a função de densidade de probabilidade,  $g_X$ , de uma distribuição normal, como aquela discutida anteriormente, no item 2.5.1.2. Sua PDF é dada por:

$$g_X(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.57)$$

Onde  $\xi$  são valores gerados aleatoriamente,  $\mu$ , o valor esperado de  $X$  e,  $\sigma$ , o desvio padrão da distribuição. Consequentemente, conhecendo-se o valor médio,  $\hat{x}$ , o desvio padrão  $s(x)$ , e gerando-se  $M$  variáveis aleatórias  $\xi$ , pode-se obter  $g_X$ . Todavia, a distribuição  $g_X$  pode ser obtida de maneira prática pelo uso da função *random*, presente no *MatLab*. Esta função gera uma distribuição normal a partir de dados aleatórios para valores de  $\hat{x}$ ,  $s(x)$  e  $M$  fornecidos pelo usuário.

Uma vez construída a PDF do modelo de medição  $Y$ ,  $g_Y(\eta)$ , podem ser calculados sua média,  $\hat{y}$  (valor esperado), incerteza padrão,  $u(\hat{y})$  (desvio padrão de  $y$ ) e intervalo de abrangência  $[y_{\min}, y_{\max}]$ , baseado no nível da confiança  $p$  desejado. Denotando os  $M$  resultados,  $\eta$ , ordenados em ordem ascendente por  $y_r$ ,  $r = 1, \dots, M$ , o valor esperado  $\hat{y}$ , dado por:

$$\hat{y} = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M y_r \quad (2.58)$$

E a incerteza padrão combinada,  $u_c(\hat{y})$ , associada a  $y$ :

$$u_c(\hat{y}) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (y_r - \hat{y})^2} \quad (2.59)$$

O intervalo de abrangência de  $Y$  é obtido de sua função de probabilidade acumulada,  $G_Y(\eta)$ , que fornece a probabilidade de que os valores assumidos pela variável aleatória  $Y$  sejam menores ou iguais a  $\eta$ . Seja  $\alpha$  um valor presente no intervalo de 0 a  $(1 - p)$ , onde  $p$  é o nível da confiança desejado. As extremidades do intervalo da abrangência serão dadas, então, por  $G_Y^{-1}(\alpha)$  e  $G_Y^{-1}(p + \alpha)$  para os limites inferior e superior, respectivamente.

A Figura 2.18 ilustra a PDF e a função de distribuição acumulada de uma distribuição normal,  $g_Y(\eta)$ . Devido a simetria, o valor de  $\alpha$  é de  $(1 - p)/2$ .

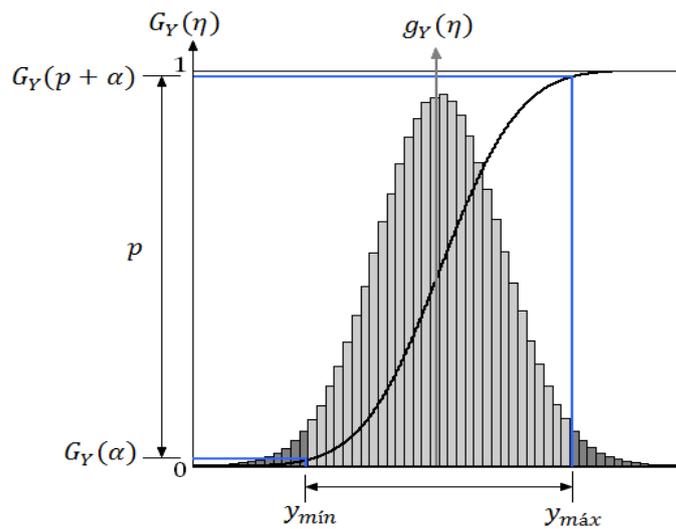


Figura 2.18 – Densidade de probabilidade e probabilidade acumulada de  $Y$

Assim, para um nível da confiança de 95% ( $p = 0,95$ ), por exemplo, o valor de  $\alpha$  será de 0,025 e o intervalo  $[G_Y^{-1}(0,025), G_Y^{-1}(0,975)]$  abrangerá a 2,5% e 97,5% dos resultados de  $y_r$ . Neste caso, a incerteza expandida,  $U(y)$ , é aproximadamente dada por:

$$U(y) = \frac{y_{(1+p)M/2} - y_{(1-p)M/2}}{2} \quad (2.60)$$

Para as situações onde a distribuição é assimétrica,  $\alpha = (1 + p)/2$  não deve ser empregado, pois mais de um intervalo de valores poderá satisfazer a equação:

$$g(G_Y^{-1}(\alpha)) = g(G_Y^{-1}(p + \alpha)) \quad (2.61)$$

Portanto, o valor de  $\alpha$  deverá ser escolhido de forma fornecer o menor intervalo de abrangência:

$$I_{p,min} = \min[G_Y^{-1}(p + \alpha) - G_Y^{-1}(\alpha)] \quad (2.62)$$

Onde,  $I_{p,min}$ , é o menor intervalo de abrangência para o nível da confiança  $p$  requerido.

A avaliação da incerteza de medição pelo MMC por ser resumida nos seguintes passos:

1. Definir o modelo matemático da medição,  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ ;
2. Identificar as variáveis  $X_i$  que contribuem para incerteza de  $Y$ ;
3. Estabelecer as PDF's para as variáveis de entrada com base no conhecimento disponível;
4. Definir o número de realizações  $M$ ;
5. Propagar as PDF's assumidas através do modelo matemático de  $Y$ ,  $f(\xi_1^1, \xi_2^1, \dots, \xi_N^1) \dots f(\xi_1^M, \xi_2^M, \dots, \xi_N^M)$ ;
6. Ordenar as  $M$  amostras de  $Y$ ,  $y_r = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$ ;
7. Calcular sua média,  $\hat{y}$ , incerteza padrão,  $u(y)$  e intervalo de abrangência  $[y_{min}, y_{max}]$ .

### 2.5.3 Comparação GUM x Monte Carlo

A validação dos resultados de incerteza obtidos pelo GUM e MMC é recomendada pelo *Supplement 1 to the 'Guide to the expression of uncertainty in measurement'* (JCGM 101, 2008) através da comparação entre os intervalos de abrangência obtidos pelas duas técnicas. Para isso, define-se uma tolerância numérica,  $\delta$ , com base no número de algarismos significativos  $n$  desejados na expressão da incerteza padrão combinada. Posteriormente, exprime-se a incerteza,  $u_c$ , obtida método GUM como:

$$u_c = c \times 10^l \quad (2.63)$$

Onde  $c$  é o valor da incerteza com  $n$  algarismo significativos e  $l$  é um número inteiro decorrente da nova apresentação de  $u_c$ . Define-se a tolerância numérica,  $\delta$ , dada por:

$$\delta = \frac{1}{2} 10^l \quad (2.64)$$

Uma vez obtida a tolerância numérica desejada, calcula-se a diferença entre as extremidades dos intervalos de abrangência, GUM e Monte Carlo como se segue:

$$\begin{aligned}d_{inferior} &= |(y - U_p) - y_{min}| \\d_{superior} &= |(y + U_p) + y_{max}|\end{aligned}\tag{2.65}$$

Onde:

$y$  : valor médio da grandeza;

$U_p$  : Incerteza expandida para um nível da confiança  $p$ ;

$y_{min}$  e  $y_{max}$ : Limites inferior e superior, respectivamente, do intervalo de abrangência do MMC.

As diferenças entre as extremidades dos intervalos de abrangência  $d_{inferior}$  e  $d_{superior}$  não devem superar a tolerância estipulada  $\delta$  para que o GUM seja considerado válido para avaliar a incerteza de medição considerando a tolerância numérica desejada. Do contrário, o MMC é o mais indicado.

Neste trabalho, foi adotada a tolerância numérica  $\delta = 0,5 K$  para o número de algarismo significativos  $n = 1$  na medição de temperatura.

#### 2.5.4 Fontes de Incerteza de medição na termografia

As fontes de incerteza de medição em termografia são as mais diversas possíveis. O acesso limitado a informações construtivas do termovisor e a dificuldade em se estabelecer corretamente as condições ambientais e do mensurando tornam a análise da totalidade dos fatores de influência impossível. Contudo, a investigação sobre as principais fontes de incerteza e seus impactos sobre a medição pode ser realizada baseada nas informações disponíveis na literatura que oferecem aproximações confiáveis sobre os fenômenos envolvidos.

Assim, as fontes de incerteza de medição podem ser divididas em intrínsecas, próprias dos componentes internos do termovisor, e de medição (ou externas), associadas ao conhecimento incompleto dos parâmetros radiométricos necessários para caracterização do mensurando e das condições ambientais (CHRZANOWSKI, 2001a).

Para realizar o cálculo das incertezas de medição pelos métodos GUM e de MMC, são necessárias as estimativas da dispersão de cada componente de incerteza, além de seu valor médio (ou valor esperado). O desvio padrão  $s(X_i)$ , ou o desvio padrão experimental da média,  $s(\hat{X}_i)$ , da variável  $X_i$ , constitui uma quantificação de sua incerteza, estabelecido pelo método GUM. Para o MMC,  $s(X_i)$  ou  $s(\hat{X}_i)$ , e o valor esperado,  $\hat{X}_i$ , são informações necessárias para a geração das PDFs que serão propagadas através do modelo matemático da medição.

As fontes intrínsecas de incerteza de um termovisor são atribuídas às seguintes componentes: erro gerado por ruído (NGE), estabilidade da temperatura (TS), repetitividade (RE), resolução digital da temperatura (DRT), mínimo erro (ME), resolução espacial da medição (MSR), e a uniformidade da medição (MU).

O erro gerado por ruído, NGE, é definido como o desvio padrão da leitura de temperatura devido aos ruídos internos do sistema. Segundo Tavares (2006), seu valor pode ser estimado com base no valor do NETD (*noise equivalent temperature difference*), ou resolução térmica. Medido em mK, o NETD, é o menor incremento de sinal produzido pelo detector e representa sua sensibilidade térmica. Seu valor pode ser estimado com o auxílio de um corpo negro registrando-se ao menos dois termogramas, em diferentes faixas de medição, e aplicando-se a seguinte equação (OIML R141, 2008):

$$\Delta t_{NETD} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y \frac{(\Delta t_{ij} - \hat{\Delta t})^2}{XY}} \quad (2.66)$$

Onde:

$\Delta t_{ij}$  é a diferença de temperatura entre cada pixel do primeiro e do segundo termograma de coordenadas  $(i,j)$  em K;

$\hat{\Delta t}$  é a diferença de temperatura média;

$X$  é o número de pixels na direção horizontal;

$Y$  é o número de pixels na direção vertical.

Segundo Minkina e Dudzik (2009), o NETD também pode ser estimado, de forma simplificada, medindo-se as temperaturas máxima ( $T_{máx}$ ) e mínima ( $T_{mín}$ ) ao longo de uma linha que cruza o centro de um termograma registrado de um corpo negro. O NETD é dado, então, por:

$$\Delta t_{NETD} = \frac{T_{máx} - T_{mín}}{2}, K \quad (2.67)$$

Segue-se, então, que  $NGE = \Delta t_{NETD}$  (CHRZANOWSKI; SZULIM, 1998). Para uma distribuição normal, assume-se:

$$s_{NGE}(\hat{T}_{ob}) = NGE \quad (2.68)$$

Onde  $s_{NGE}(\hat{T}_{ob})$  é o seu desvio padrão de  $T_{ob}$ , para um valor esperado de  $\hat{T}_{ob}$ .

A estabilidade da temperatura, TS, corresponde à faixa na qual os resultados de medição, em diferentes temperaturas ambientes, estão localizados. Sua ocorrência se deve à utilização do termovisor em temperaturas ambientes diferentes da temperatura ambiente de calibração (CHRZANOWSKI, 2001a). Devido a sua natureza não-linear, TS é de difícil estimativa. Portanto, sua melhor estimativa pode ser assumida como sendo uniforme, cujo desvio padrão é dado por:

$$s_{TS}(\hat{T}_{ob}) = \frac{TS}{\sqrt{12}} \quad (2.69)$$

Contudo, neste trabalho, TS foi desprezado não tendo sido encontrados elementos suficientes para sua correta estimativa.

A repetitividade, RE, é a precisão da medição sob condições de repetitividade. Pode ser obtida para qualquer temperatura do mensurando mediante uma série de medições. A repetitividade será assumida como sendo o desvio padrão experimental da média,  $s_{RE}(\hat{T}_{ob})$ , de  $n$  observações de  $T_{ob}$ , assim:

$$s_{RE}(\hat{T}_{ob}) = \frac{s_{RE}(T_{ob})}{\sqrt{n}} \quad (2.70)$$

$$s_{RE}(T_{ob}) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (T_{ob} - \hat{T}_{ob})^2$$

Onde  $s_{RE}(T_{ob})$  o desvio padrão de  $T_{ob}$ .

A resolução digital da temperatura, DRT, é a menor diferença entre dois níveis de temperatura que podem ser distinguidos devido às limitações do canal digital do termovisor (CHRZANOWSKI, 2001a; TAVARES, 2006). Seu valor depende do conhecimento específico do comportamento dos blocos eletrônicos que compõem o termovisor. Contudo, seu valor pode ser estimado por (TAVARES, 2006):

$$DRT = \frac{\Delta T_{span}}{2^k} \quad (2.71)$$

Onde  $\Delta T_{span}$  é a faixa nominal de temperatura e  $k$  é número de bits do conversor analógico digital do termovisor (TAVARES, 2006). A distribuição que melhor caracteriza a contribuição de DRT para incerteza de medição pode ser assumida como sendo retangular dada por:

$$s_{DRT}(\hat{T}_{ob}) = \frac{DRT}{\sqrt{12}} \quad (2.72)$$

O mínimo erro, ME, caracteriza a dispersão do valor registrado pelo termovisor,  $T_{ob}$ , em relação à temperatura do mensurando,  $T_{ob,real}$ , para medições realizadas em condição de calibração (CHRZANOWSKI, 2001a; TAVARES, 2006). A contribuição de ME é caracterizada por uma distribuição uniforme:

$$s_{ME}(\hat{T}_{ob}) = \frac{\widehat{ME}}{\sqrt{12}} \quad (2.73)$$

Onde será assumido:

$$\widehat{ME} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ME_i \quad (2.74)$$

$$ME_i = \hat{T}_{padr\tilde{a}o,i} - \hat{T}_{ob,i}$$

$\widehat{ME}$  : Média dos  $n$  valores de  $ME_i$ ;

$ME_i$  : Diferença entre a temperatura média do padrão (corpo negro),  $\hat{T}_{padr\tilde{a}o,i}$ , e a temperatura média indicada pelo termovisor,  $\hat{T}_{ob,i}$ , para  $n$  medições.

A resolução espacial de medição, MSR, é definida como a mínima dimensão angular do mensurando que não produz influência sobre o resultado de medição. Seu valor pode ser

estimado através do conceito da *Slit Response Function* (SRF) que, similarmente ao IFOV, descreve a capacidade do termovisor de medir a temperatura de objetos em seu campo de visão. O MSR é calculado para a dimensão angular na qual a SRF atinge 99% de seu valor (CHRZANOWSKI, 2010).

A Figura 2.19 mostra graficamente a SRF de um termovisor, onde a linha contínua representa a resposta ideal e linha pontilhada a resposta real de um termovisor sob teste. O parâmetro ISR é a resolução espacial de imagem, que corresponde a 50% da SRF.

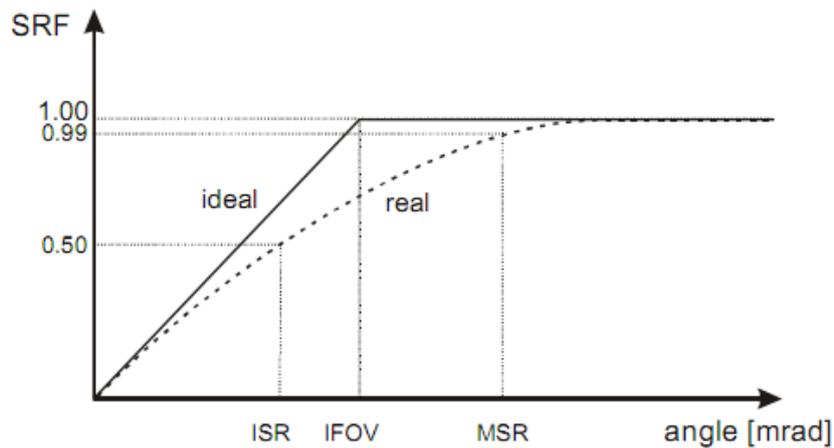


Figura 2.19 – *Slit Response Function* .FONTE – Chrzanowski (2010).

Para dimensões angulares inferiores ao IFOV, o valor da SRF decai, impossibilitando a medição do objeto com precisão.

A determinação da curva SRF pode ser feita em laboratório empregando-se um radiador de corpo negro, bem como dois diafragmas móveis posicionados a frente da abertura do radiador. A Figura 2.20 mostra, esquematicamente, o procedimento. O termovisor é posicionado a uma distância  $d$  dos diafragmas à temperatura ambiente,  $T_{amb}$ , por sua vez, separados por uma distância  $l$ . O ângulo do campo de visão formado pela largura da abertura da fenda em relação à distância termovisor-diafragma pode ser aproximado por  $\delta = l/d$  mrad.

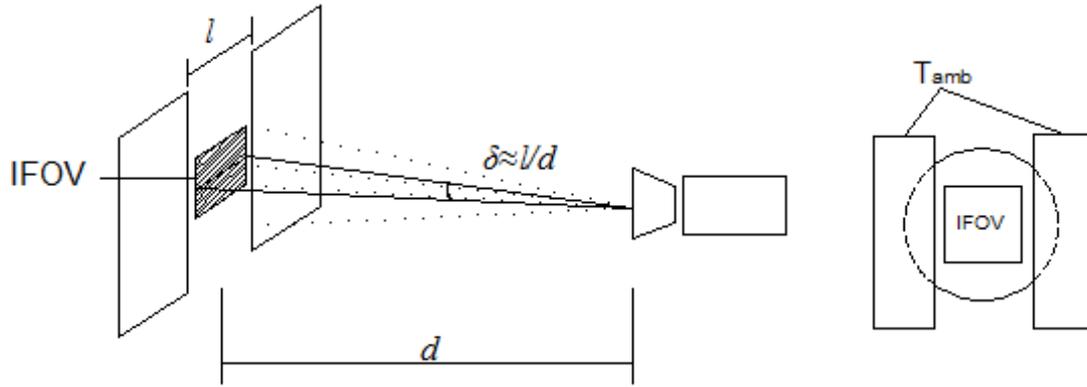


Figura 2.20 – Determinação do MSR.

À medida que os diafragmas são fechados, o campo de visão instantâneo é encoberto até o ponto onde não se pode mais medir a temperatura do radiador. A SRF pode ser calculada em termos de sinal ou temperatura (STRF, *Slit Temperature Response Function*) como sendo:

$$STRF = \frac{T_{fenda} - T_{amb}}{\text{máx}(T_{fenda} - T_{amb})} \quad (2.75)$$

Onde:

$T_{fenda}$  : Temperatura da fenda, K.

$T_{amb}$  : Temperatura do diafragma, K;

$\text{máx}(T_{fenda} - T_{amb})$  : Máxima diferença entre as temperaturas da fenda e ambiente, K.

Em seguida, traça-se a curva, como a da Figura 2.19, que relaciona o  $\delta \times STRF$  para cada posição dos diafragmas. Observa-se que até a largura da fenda  $l$  (ou  $\delta$  mrad) coincidir com a largura do IFOV, o termovisor medirá 100% da radiação proveniente da fenda. Portanto  $STRF = 1$ . Gradualmente, ao fechamento da abertura STRF decairá até alcançar valor nulo, quando  $T_{fenda} = T_{amb}$ .

A uniformidade da medição, MU, é definida como a faixa que abrange os resultados da medição para diferentes posições do mensurando dentro do campo de visão do termovisor. Seu valor deve ser estabelecido durante o procedimento de calibração podendo ser aproximado pela sensibilidade para um campo de visão não-uniforme,  $\delta t$ , definido pelo documento (OIML R141, 2008). O procedimento descrito por OIML para estimativa de  $\delta t$  estabelece o posicionamento de um corpo negro de testes em diferentes posições do campo de visão do termovisor (no centro e arestas que formam a imagem).

Para cada posição, ao menos cinco termogramas devem ser registrados. O ensaio deve ser realizado para cinco pontos da faixa de medição do termovisor. A sensibilidade para um campo de visão não uniforme do instrumento termográfico é calculado por:

$$\delta t = \hat{t}_{m\acute{a}x} - \hat{t}_{m\grave{i}n} \quad (2.76)$$

Onde:

$\hat{t}_{m\acute{a}x}$  é a temperatura máxima dentre as temperaturas médias obtidas;

$\hat{t}_{m\grave{i}n}$  é a temperatura mínima dentre as temperaturas médias obtidas;

Assumindo  $MU = \delta t$  e sua contribuição para incerteza de medição dada por uma distribuição uniforme, tem-se:

$$s_{MU}(\hat{T}_{ob}) = \frac{MU}{\sqrt{12}} \quad (2.77)$$

Logo, os desvios padrão das equações anteriores  $s_{NGE}$ ,  $s_{TS}$ ,  $s_{RE}$ ,  $s_{DRT}$ ,  $s_{ME}$  e  $s_{MU}$  podem ser assumidos como estimativas das componentes intrínsecas de incerteza de medição  $T_{ob}$ . Todavia, dada a dificuldade de acesso a informações mais específicas a cerca destes fatores, a análise de suas contribuições é extremamente limitada. Conseqüentemente, a ênfase despendida aos fatores intrínsecos de incerteza, limitar-se-á àquela que é de interesse do usuário e pode ser avaliado por ele: a qualidade e a confiabilidade da medição em termografia infravermelha. Discussões mais detalhadas sobre as fontes de incerteza intrínsecas podem ser obtidas em Chrzanowski (2001a) e Tavares (2006).

As fontes de incerteza de medição externas são atribuídas ao conhecimento incompleto dos parâmetros presentes no modelo matemático da medição:

$$T_{ob} = f(\varepsilon, d, T_{ref}, T_{atm}, S) \text{ [K]} \quad (2.78)$$

A menos do sinal  $S$ , todos os demais parâmetros devem ser ajustados pelo usuário no termovisor para caracterizar o mensurando e as condições ambientais locais.

Das quatro variáveis a que o usuário tem acesso, a emissividade é mais crítica, porém, é também a mais negligenciada. Seu valor deve ser determinado experimentalmente, o que na maioria das aplicações não é possível. Por conseguinte, os usuários são levados adotar valores tabelados ou aproximações que não refletem a verdadeira emissividade

do mensurando, uma vez que, esta também é função das condições superficiais do material que compõe o objeto.

A emissividade de uma amostra pode ser obtida, basicamente, pelo emprego de três técnicas: através dos métodos radiométricos diretos e indiretos, e métodos calorimétricos (PERIN, 2009). A fim de determinar a emissividade do material das conexões elétricas, optou-se pela comparação entre a temperatura média indicada por termopares instalados junto à conexão e a leitura de temperatura do termovisor para ajuste de emissividade até que as leituras de temperatura fossem iguais.

As variáveis,  $d$ ,  $T_{ref}$  e  $T_{atm}$ , ao contrário da emissividade, podem ser determinadas diretamente através das medições da distância e temperatura ambiente durante os ensaios em laboratório. A temperatura refletida pode ser atribuída à temperatura ambiente nas situações onde não há presença de corpos vizinhos ao objeto de interesse em temperaturas contrastantes com o meio, ou quando a influência da fonte de radiação refletida puder ser obstruída. Nas inspeções termográficas em subestações, a temperatura refletida, geralmente, também é assumida igual à temperatura ambiente, porém, devido a razões de segurança. Em inspeções de linhas energizadas não é possível aproximar-se suficientemente do objeto de interesse para identificar as fontes de radiação refletida, além disso, há a presença de vários equipamentos em operação dificultando o reconhecimento exato da fonte. A temperatura atmosférica, por sua vez, é própria temperatura ambiente. Desta forma, as incertezas destas medições diretas são atribuídas à repetitividade, a resolução e a calibração dos instrumentos.

A variável  $S$  corresponde ao sinal produzido pelo detector em resposta a totalidade da radiação incidente sobre a matriz de detecção (*focal plane array – FPA*). Seu valor é afetado por ruídos do detector, ou de outros componentes digitais de amplificação e conversão analógica/digital, além dos efeitos da temperatura ambiente. Como as incertezas intrínsecas constituem estimativas dos efeitos que podem afetar o valor de  $S$ , sua dispersão não é considerada no cálculo de incerteza realizado pelo método GUM. Todavia, sua dispersão é computada na aplicação do MMC, como estimativa das incertezas intrínsecas.

### 3 METODOLOGIA

As inspeções termográficas em subestações e nas redes distribuição elétricas urbanas são passíveis de diversas fontes de influência, limitações impostas pelo ambiente, além da habilidade e do treinamento do operador que conduzirá a inspeção. Logo, em uma inspeção real as diversas variáveis que compõe o modelo matemático da medição discutido na seção 2.4.4 não podem ser controladas, mas apenas monitoradas. Nestas condições, fatores pouco conhecidos podem influenciar os resultados. Em vista disso, a análise do modelo de medição, bem como dos métodos para cálculo da incerteza de medição foram realizados em laboratório, sob condições controladas. A influência de fontes de radiação externas foi evitada e ambiente foi mantido climatizado.

Para quantificar a incerteza de medição na determinação da temperatura de componentes elétricos, foi realizada uma série de ensaios em conectores elétricos tipicamente empregados em sistemas de distribuição de energia. Os conectores submetidos aos ensaios são listados a seguir.

#### 3.1.1 Conector paralelo à compressão “H”

O conector “H”, fabricado em liga de alumínio, é largamente empregado em redes de distribuição de energia para diversas seções nominais de condutores. A conexão elétrica é confeccionada por compressão com alicate hidráulico ou mecânico, sendo geralmente empregada uma pasta antioxidante entre os contatos.

A Figura 3.1 ilustra uma típica conexão com o conector “H” onde foi empregada uma pasta antioxidante a fim de melhorar os contatos entre os cabos e o conector.

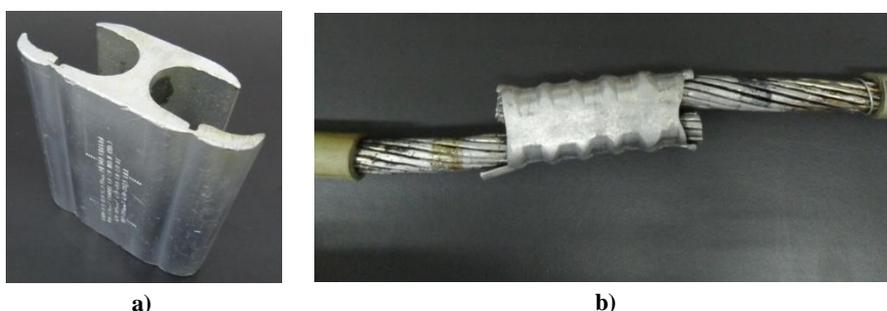


Figura 3.1 – a) Conector paralelo a compressão “H”, b) Conexão elétrica

### 3.1.2 Conector cunha de alumínio

O conector cunha, Figura 3.2, caracteriza-se pela alta condutibilidade elétrica podendo ser empregado para emendas de cabos alumínio-cobre ou alumínio-alumínio com ou sem alma de aço. A conexão é confeccionada por uso de ferramenta específica que mediante o uso do cartucho de pólvora apropriado impele a cunha entre os dois cabos posicionados no corpo metálico em C. Assim, como no conector H, é comum a utilização de pasta antioxidante para melhorar os contatos entre os cabos e a conexão.



Figura 3.2 – a) Conector cunha de alumínio, b) Conexão elétrica.

As conexões elétricas tipo cunha, Figura 3.2b, são comumente expostas ao tempo em derivações em redes de distribuição de energia, mas também podem ser encontradas protegidas por encapsulamentos plásticos para minimizar os efeitos das agressões ambientais e prover isolamento elétrico. A vedação das aberturas no encaixe dos cabos ao encapsulamento é feita com massa de calafetar e a caixa protetora é fechada por pressão. A Figura 3.3 mostra os detalhes do encapsulamento.

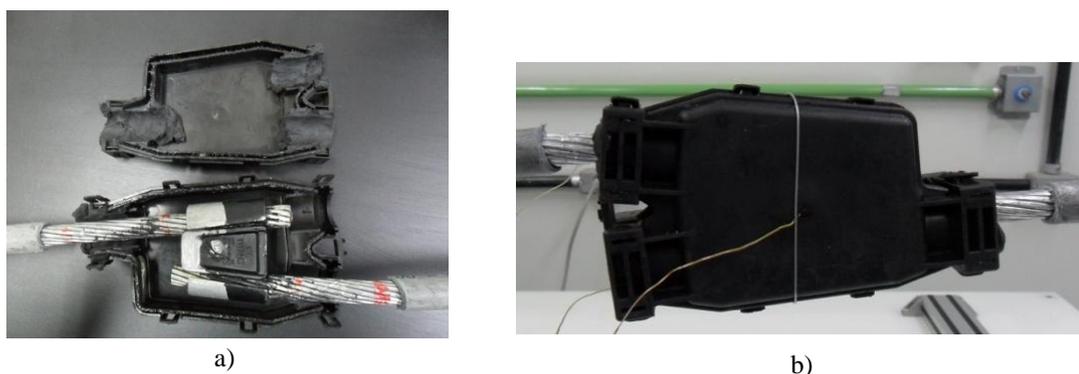


Figura 3.3 – a) Encapsulamento aberto, b) Conexão cunha encapsulada

### 3.1.3 Amostras

Um conjunto de diferentes amostras de conectores “H” e conectores cunha de alumínio foi confeccionado nas instalações da Companhia Energética de Minas Gerais. Em

algumas amostras foi introduzida uma camada de fita isolante nos pontos de emenda para simular um defeito no contato entre o cabo e conector de maneira a produzir um “ponto quente”, como ilustrado nas Figura 3.4a-b.



Figura 3.4 – a) Cabo coberto por camada de fita isolante, b) Conexão cunha defeituosa

Para avaliar o impacto da emissividade na medição de temperatura sem contato com o termovisor, algumas amostras foram pintadas com tintas spray comerciais e tintas utilizadas em refratários, que suportam temperaturas elevadas. A aplicação das tintas teve por objetivo conferir maior uniformidade à superfície da conexão elevando sua emissividade e cobrindo imperfeições do material. Além disso, para avaliar se a cor da tinta possui alguma influência no valor da emissividade da superfície, algumas conexões receberam pintura de quatro cores diferentes, sendo a espessura da camada de tinta a menor possível. Resumidamente, as amostras geradas são relacionadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Descrição das amostras

Conexão – CH1	Conexão nova feita com conector H em ótimo estado para cabo de seção nominal de $150\text{mm}^2$ . A confecção seguiu o padrão de operação normal e não foram gerados defeitos na emenda. A superfície do conector recebeu quatro faixas de tinta (azul, branco, preto e verde) para avaliação da emissividade da superfície, como mostrado na Figura 3.5a.
Conexão – CH2	Conexão nova feita com conector H em ótimo estado para cabo de seção nominal de $150\text{mm}^2$ . A confecção seguiu o padrão de operação normal, todavia foram gerados defeitos na conexão por introdução de fita isolante, como ilustrado na Figura 3.4a. A superfície do conector recebeu quatro faixas de tinta para avaliação da emissividade de superfície seguindo o mesmo padrão da conexão CH1.
Conexão – CH3	Conexão antiga, feita com conector H com pelo menos 3 anos de idade, porém em bom estado. A confecção seguiu o padrão de operação normal e não foram gerados defeitos na emenda. Esta conexão foi submetida a dois ensaios em momentos

<p>Conexão – CH3</p>	<p>diferentes. No primeiro ensaio, metade da superfície do conector recebeu tinta preta enquanto a outra metade foi deixada sem pintura, Figura 3.5b. No segundo momento, o conector recebeu uma cobertura de tinta fosca de aspecto rugoso empregada em refratários, capaz de suportar altas temperaturas, Figura 3.5c.</p>
<p>Conexão – CC1</p>	<p>Conexão nova feita com conector cunha de alumínio em ótimo estado para cabo de seção nominal de <math>150\text{mm}^2</math>. A confecção seguiu o padrão de operação normal e não foram gerados defeitos na emenda. Metade da superfície do conector foi pintada com tinta preta, Figura 3.5d.</p>
<p>Conexão – CC2</p>	<p>Conexão nova feita com conector cunha de alumínio em ótimo estado para cabo de seção nominal de <math>150\text{mm}^2</math>. A confecção seguiu o padrão de operação normal, contudo foram gerados defeitos na conexão por introdução de fita isolante, como ilustrado na Figura 3.4b. Metade da superfície do conector também foi pintada com tinta preta seguindo o mesmo padrão da conexão CC1.</p>

A Figura 3.5 ilustra algumas das amostras produzidas.



Figura 3.5 – a) Conexão CH1 pintada com quatro faixas de cores, b) Conexão CH3 com metade pintada em tinta preta, c) Conexão CH3 pintada com tinta de refratário, e d) Conexão CC1 com metade pintada em tinta preta.

À exceção da conexão CH3, as demais conexões foram confeccionadas em condutores isolados seguindo as orientações da norma NBR 9326, “Conectores para Cabos de Potência – Ensaio de Ciclos Térmicos e Curtos Circuitos” em relação ao comprimento e ao posicionamento dos cabos e conexões elétricas (ABNT NBR 9326, 1986). A Figura 3.6 mostra as dimensões das montagens. As conexões CH1 e CH2 foram montadas em condutores diferentes, enquanto que as conexões CC1 e CC2 foram montadas no

mesmo lance de condutores. A conexão CH3 não seguiu o padrão estabelecido por se tratar de uma montagem antiga, cujas dimensões foram preservadas.

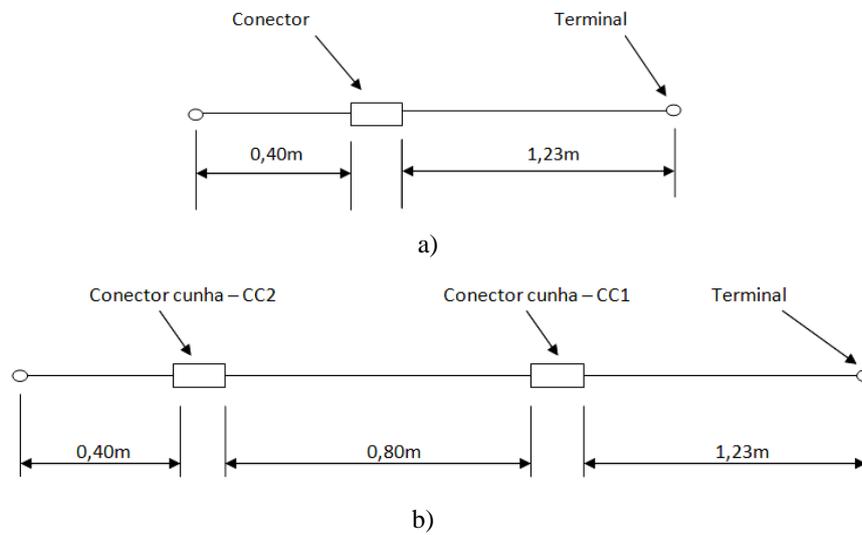


Figura 3.6 – Montagem para ensaios das conexões, a)CH1 e CH2, b) CC1 e CC2.

### 3.1.4 Ensaio

As Figura 3.7a e 3.7b mostram a bancada de testes projetada para ensaio das amostras e os instrumentos utilizados durante os ensaios, respectivamente. Construída em perfis modulares de alumínio, a bancada se caracteriza pela versatilidade com que pode ser empregada para os ensaios, sendo adaptável às necessidades do laboratório.

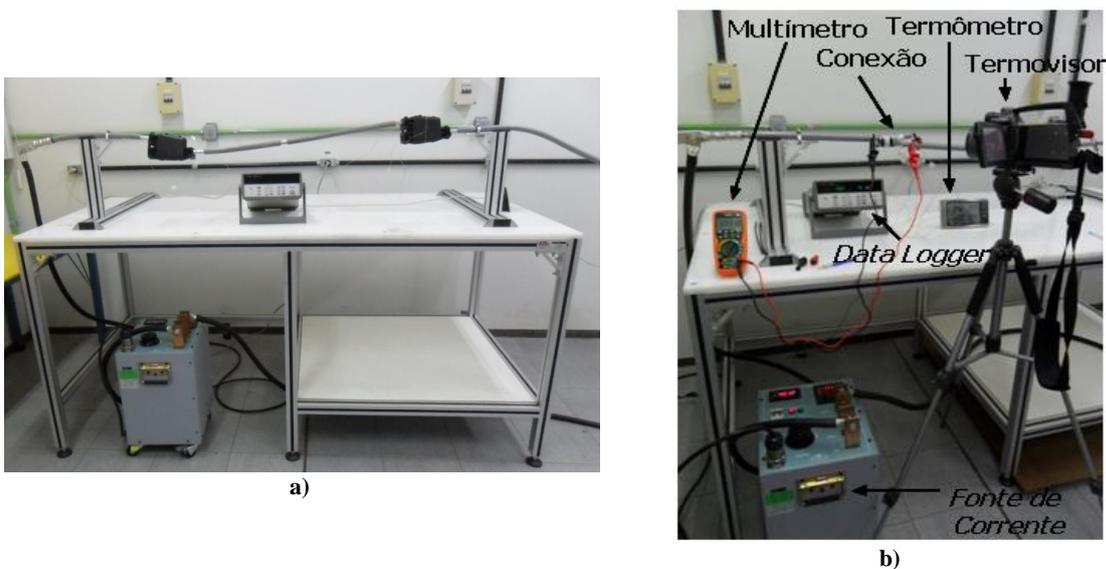


Figura 3.7 – a) Bancada de testes e montagem para ensaio da conexão cunha encapsulada, b)Aparelhagem para ensaio da conexão.

### 3.1.4.1 Evolução da Temperatura x Corrente Elétrica

O objetivo do ensaio foi avaliar a evolução da temperatura das conexões em relação à elevação da solicitação de corrente elétrica, incorporando aos resultados a análise da qualidade da medição de temperatura sem contato através da termografia infravermelha.

Resumidamente, os ensaios foram conduzidos conforme as seguintes etapas:

- I. Climatização do ambiente para assegurar uma temperatura local entre 293,15K e 298,15K, e umidade relativa do ar entre 40% e 80%;
- II. Com a fonte de corrente desligada, a resistência elétrica da conexão foi medida com um microohmmetro digital;
- III. Ajuste da corrente da fonte (valor inicial de 150A) e medição da corrente e da tensão sob a conexão.
- IV. Espera não inferior a 1 hora para estabilização da temperatura da conexão;
- V. Registro de três termogramas subsequentes em intervalos de 5 segundos e nova medição de corrente e tensão sob a conexão
- VI. Incremento de 50 A de corrente fornecida pela fonte e repetição dos passos IV a VI.

Em todas as medições o termovisor foi posicionado a uma distância de aproximadamente 0,30m da amostra, formando um ângulo de aproximadamente 30° com a direção normal à amostra, de maneira a evitar a influência da radiação refletida sobre o conector, proveniente do operador do termovisor, Figura 3.8.

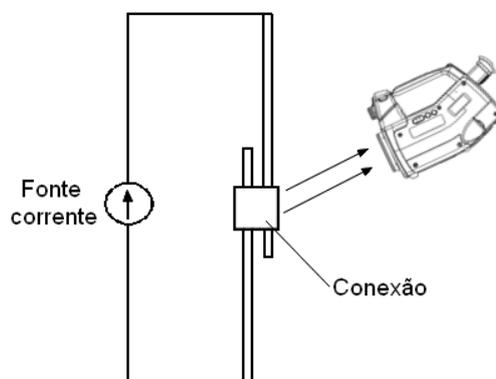


Figura 3.8 – Ilustração do posicionamento do termovisor.

### 3.1.4.2 Ensaios de ciclos térmicos

Os ensaios de ciclos térmicos foram realizados para avaliar a degradação da conexão elétrica ao longo de diversos ciclos de corrente de mesma intensidade. Os ciclos foram constituídos por duas etapas: uma de aquecimento, submetendo a conexão à carga durante período suficiente para estabilização de sua temperatura, e outro de resfriamento, quando se aguardava a temperatura da conexão atingir a temperatura ambiente, já com a fonte desligada.

Paralelamente, a influência de diferentes cores no valor de emissividade também foi analisada e os resultados comparados a medição de temperatura na parte sem pintura.

O ensaio de ciclos térmicos foi realizado conforme seguintes etapas:

- I. Climatização do ambiente para assegurar uma temperatura local entre 293,15K e 298,15K, e umidade relativa do ar entre 40% e 80%;
- II. Com a fonte de corrente desligada, a resistência elétrica da conexão foi medida com um microohmímetro digital;
- III. Ajuste da corrente da fonte em 500A e medição da corrente e da tensão sob a conexão – etapa de aquecimento;
- IV. Espera não inferior à 1 hora para estabilização da temperatura da conexão;
- V. Após a estabilização da temperatura foi efetuado o registro de três termogramas subsequentes em intervalos de 5 segundos e nova medição de corrente e tensão sob a conexão;
- VI. Desligamento do circuito – etapa de resfriamento;
- VII. Após a estabilização da temperatura da conexão em torno da temperatura ambiente, foi efetuado o registro de três termogramas subsequentes em intervalos de 5 segundos e nova medição da resistência elétrica com microohmímetro digital;
- VIII. Realização do passo III ,e assim em diante;

A relaciona as conexões submetidas aos ensaios de evolução da temperatura com a corrente e de ciclos térmicos.

Tabela 3.2- Ensaio realizados em laboratório.

Conexões	Ensaio	
	Evolução da Temperatura x Corrente Elétrica	Ensaio de ciclos térmicos
CH1	x	x
CH2	-	x
CH3	x	-
CC1	x	-
CC2	x	-

A amostra de conexão CH3 foi submetida a dois ensaios nas configurações descritas na Tabela 3.1, pintada com tinta preta e pintada com tinta de refratário. As conexões CC1 e CC2 foram submetidas aos ensaios com e sem encapsulamento. E apenas as conexões CH1 e CH2 foram submetidas aos ensaios de ciclos térmicos.

### 3.1.5 Inspeção Termográfica

Com a finalidade de avaliar a incerteza de medição no diagnóstico de anomalias térmicas em dispositivos elétricos, a metodologia de cálculo foi aplicada em medições realizadas durante inspeções termográficas na Subestação Adelaide, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte, de propriedade da concessionária de Cemig.

É importante observar que em inspeções termográficas voltadas para o diagnóstico, diversos fatores devem ser analisados a fim de minimizar a influência de fontes externas sob a medição. Entretanto, não é possível assegurar observância de todas as recomendações propostas, haja visto o tempo disponível e as condições em que as inspeções são realizadas. Muitas vezes, as medições são executadas com configurações fixas de emissividade e distância, e ainda, não é possível quantificar a temperatura refletida. Estas e muitas outras limitações são impostas pela própria topologia dos sistemas elétricos e pela necessidade de se observar critérios de segurança durante as inspeções. A Figura 3.9 ilustra imagens realizadas durante a inspeção na subestação Adelaide.



Figura 3.9 – Imagens da subestação Adelaide, a) para-raios, b) banco de capacitores série.

Um critério amplamente utilizado em sistemas elétricos consiste em comparar a leitura do ponto suspeito,  $T_p$  (temperatura no ponto de medição), com a temperatura de um ponto de referência,  $T_{pref}$ , tomado sob um dispositivo de mesma função que não apresenta leitura de temperatura julgada como anormal. Assim,  $\Delta T_{pref}$  é dado por:

$$\Delta T_{pref} = T_p - T_{pref} \quad (3.1)$$

Analogamente, a diferença entre a temperatura aparente do dispositivo,  $T_p$ , e a temperatura ambiente,  $T_{amb}$ , também é amplamente empregada como critério de análise, definindo o  $\Delta T_{amb}$  com sendo:

$$\Delta T_{amb} = T_p - T_{amb} \quad (3.2)$$

Na literatura técnica são encontradas referências e critérios de classificação da gravidade das anomalias baseada nos valores de  $\Delta T_{pref}$  e  $\Delta T_{amb}$ . A Tabela 3.3 apresenta os critérios sugeridos pela NETA (InterNational Electrical Testing Association).

Tabela 3.3 - Critérios e de ações sugeridas pela NETA MTS-1997.

$\Delta T_{pref}$	$\Delta T_{amb}$	Ação recomendada
1°C – 3°C	1°C – 10°C	Possível indicativo de falha
4°C – 15°C	11°C – 20°C	Provável indicativo de falha
----	21°C – 40°C	Monitorar até medidas corretivas sejam tomadas
>15°C	>40°C	Reparo imediato

FONTE - Epperly et al. (1997)

Embora os critérios apresentados na Tabela 3.3 sejam de fácil aplicação, sua utilização deve ser ponderada por outros fatores, como condições de operação, estado dos dispositivos e as próprias condições de medição. Geralmente, concessionárias de

energia adotam critérios próprios baseados em suas experiências e observações que dão origem a quadros de criticidade semelhantes ao apresentado.

Um resumo de critérios de severidade apresentados por normas e recomendações técnicas pode ser encontrado em Santos (2006).

### 3.2 Análise da incerteza

A Seção 2.5.4 discutiu os fatores de influência em termografia baseada no modelo de medição apresentado no Capítulo 3. Seguem-se, assim, as considerações acerca da utilização dos métodos GUM e Monte Carlo para o cálculo da incerteza de medição nos ensaios descritos.

#### 3.2.1 Incertezas em termografia pelo método GUM

A aplicação da Equação (2.52) ao modelo matemático da medição fornecido pela Equação (2.38) conduz à incerteza padrão combinada:

$$\begin{aligned}
 u_c(T_{ob}) = & \left\{ c_\varepsilon^2 u_\varepsilon^2(\varepsilon) + c_d^2 u_d^2(d) + c_{T_{ref}}^2 u_{T_{ref}}^2(T_{ref}) \right. \\
 & + c_{T_{atm}}^2 u_{T_{atm}}^2(T_{atm}) + u_{intr}^2 + u_{cal}^2 + \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial \varepsilon^2} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \frac{\partial^3 f}{\partial \varepsilon^3} \right] u^2(\varepsilon) u^2(\varepsilon) \\
 & \left. + \dots + \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_N \partial x_N} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_N} \frac{\partial^3 f}{\partial x_N \partial x_N \partial x_N} \right] u^2(x_N) u^2(x_N) \right\}^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Onde,  $c_\varepsilon$ ,  $c_d$ ,  $c_{T_{amb}}$  e  $c_{T_{atm}}$  são os coeficientes de sensibilidade relativos à emissividade, distância, temperatura refletida e temperatura atmosférica, respectivamente, dados por:

$$c_\varepsilon = - \frac{R(S_{ob} - S)T_{ob}^2}{\varepsilon B S_{ob}^2 \exp\left(\frac{B}{T_{ob}}\right)} \quad (3.4)$$

$$c_d = - \frac{BR\varepsilon\tau(\alpha + 2\beta\sqrt{d})(S - S_{atm})}{2\sqrt{d} K^2 \ln(F + R\varepsilon/K)^2 (F + R\varepsilon/K)} \quad (3.5)$$

sendo  $K = S_{atm}(1 - \tau) + S_{ref}(\varepsilon - 1) + S\tau$

$$c_{T_{ref}} = \frac{(\varepsilon - 1)T_{ob}^2 S_{ref}^2 \exp\left(\frac{B}{T_{ref}}\right)}{\varepsilon T_{ref}^2 S_{ob}^2 \exp\left(\frac{B}{T_{ob}}\right)} \quad (3.6)$$

$$c_{T_{atm}} = \frac{(\tau - 1)T_{ob}^2 S_{atm}^2 \exp\left(\frac{B}{T_{atm}}\right)}{\varepsilon \tau T_{atm}^2 S_{ob}^2 \exp\left(\frac{B}{T_{ob}}\right)} \quad (3.7)$$

Uma vez que o modelo matemático é não linear, torna-se necessário incluir os termos de ordem superior listados na Tabela 3.4:

Tabela 3.4 – Coeficientes de sensibilidade de ordem superior.

$\frac{\partial^2 f}{\partial \varepsilon^2}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial T_{ref}^2}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial T_{atm}^2}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial \varepsilon \partial d}$
$\frac{\partial^2 f}{\partial d \partial \varepsilon}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial d \partial T_{ref}}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial d \partial T_{atm}}$	
$\frac{\partial^2 f}{\partial T_{ref} \partial \varepsilon}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial \varepsilon \partial T_{ref}}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial \varepsilon \partial T_{atm}}$	
$\frac{\partial^2 f}{\partial T_{atm} \partial \varepsilon}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial T_{atm} \partial T_{ref}}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial T_{ref} \partial T_{atm}}$	
$\frac{\partial^3 f}{\partial \varepsilon^3}$			

A emissividade é uma das variáveis que mais afetam a incerteza do resultado  $T_{ob}$ . A emissividade é de difícil determinação, devido às variações no formato e textura da superfície do objeto, ao posicionamento do termovisor, pequena diferença entre a temperatura do objeto e a temperatura ambiente, além da dependência com a própria temperatura do objeto. Conseqüentemente, a dispersão atribuída à emissividade pode ser mais bem estimada pela distribuição uniforme, dado seu elevado grau de desconhecimento. Sendo assim, supõe-se  $s_\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\sqrt{3}}$ , uniforme para emissividade no intervalo  $\varepsilon \pm \Delta\varepsilon$ .

A medição da distância entre o termovisor e o objeto para aplicações em termografia está sujeita a incertezas relativamente elevadas. Em muitos casos, não é possível determinar a distância de ativos que se encontram, por exemplo, em postes e ou em locais de difícil acesso. Desta forma, o operador é levado a realizar medições imprecisas, ou a julgar o valor da distância conforme lhe seja conveniente. Assim, é razoável admitir que a contribuição da incerteza de medição,  $u_d$ , seja composta por um desvio,  $s_d$ , da distância termovisor–objeto e que outras possíveis fontes de incerteza, como resolução da trena ou sua calibração não sejam contribuições significativas a

incerteza da distância. Logo,  $s_d = \frac{\Delta d}{\sqrt{3}}$ , segue uma distribuição uniforme para distância no intervalo  $d \pm \Delta d$ , m.

As temperaturas refletida e atmosférica foram assumidas como sendo igual à temperatura ambiente. Considerando a realização de apenas uma medição, pode-se supor que a contribuição para incerteza de medição de ambas as variáveis,  $u_{T_{ref}}$  e  $u_{T_{atm}}$ , é composta por um desvio de temperatura,  $s_{T_{ref}}(T_{ref})$ , mais a resolução do instrumento digital  $s_{T_{ref,res}}(T_{ref,res})$  e sua calibração,  $s_{T_{ref,cal}}(T_{ref,cal})$ , logo:

$s_{T_{ref}} = \frac{\Delta T_{ref}}{\sqrt{3}}$  e  $s_{T_{atm}} = \frac{\Delta T_{atm}}{\sqrt{3}}$ , distribuições uniformes para as temperaturas  $T_{ref}$  e  $T_{atm}$ , respectivamente, nos intervalos  $T_{ref} \pm \Delta T_{ref}$ , [K], e  $T_{atm} \pm \Delta T_{atm}$  [K],

$s_{T_{ref,res}} = \frac{\text{Resolução}/2}{\sqrt{3}}$  e  $s_{T_{atm,res}} = \frac{\text{Resolução}/2}{\sqrt{3}}$ , distribuições uniformes para a resolução; e;  $s_{T_{ref,cal}} = U/k$  e  $s_{T_{atm,cal}} = U/k$ , distribuições normais – certificado de calibração termômetro digital. Logo, as incertezas padrão de medição atribuídas às temperaturas refletida e atmosférica são:

$$u_{T_{ref}} = \sqrt{u_{T_{ref}}^2 + u_{T_{ref,res}}^2 + u_{T_{ref,cal}}^2} \quad (3.8)$$

$$u_{T_{atm}} = \sqrt{u_{T_{atm}}^2 + u_{T_{atm,res}}^2 + u_{T_{atm,cal}}^2} \quad (3.9)$$

A contribuição de  $u_{intr}$  para incerteza do resultado da medição provém de todas as fontes de incerteza intrínsecas discutidas anteriormente. Mediante a realização de ensaios com auxílio de um corpo negro de testes, o valor de NGE pode ser estimado através das Equações (2.66), (2.67) e (2.68). O valor de DRT pode ser obtido diretamente da Equação (2.71), conhecendo-se o intervalo e o número de bits do conversor A/D do termovisor. O mínimo erro, ME, é determinado pelas Equações (2.74) para medições em diversas faixas de temperatura, nas condições de calibração. A uniformidade da medição, MU, pode ser calculada pela Equação (2.76), conforme o procedimento já descrito para cinco pontos da faixa de medição.

Por fim, a repetitividade, RE, pode ser calculada mediante o registro de  $n$  termogramas do mensurando, cuja temperatura deseja-se determinar. Neste caso, empregam-se as

Equação (2.70), caso seja realizada uma série de medições. Portanto, a incerteza intrínseca,  $u_{intr}$ , é dada por:

$$u_{intr} = \sqrt{u_{NGE}^2 + u_{RE}^2 + u_{DRT}^2 + u_{ME}^2 + u_{MU}^2} \quad (3.10)$$

Onde:

Tabela 3.5 – Desvios padrão das fontes de incerteza.

$u_{NGE} = S_{NGE}$	$u_{ME} = S_{ME}$
$u_{RE} = S_{RE}$	$u_{MU} = S_{MU}$
$u_{DRT} = S_{DRT}$	

Resumidamente, as distribuições assumidas para o cálculo da incerteza de medição pelo método GUM são ilustradas na Tabela 3.6

Tabela 3.6 – Fontes de incerteza assumidas pelo GUM.

FONTE DE INCERTEZA	DISTRIBUIÇÃO
Emissividade, $\varepsilon$	Uniforme
Distância, $d$	Uniforme
Temperatura Refletida, $T_{ref}$	Uniforme
Temperatura Atmosférica, $T_{atm}$	Uniforme
Erro Gerado por Ruído, $NGE$	Uniforme
Estabilidade da Temperatura, $TS$	-
Repetitividade, $RE$	Normal
Resolução digital da Temperatura, $DRT$	Uniforme
Mínimo Erro, $ME$	Uniforme
Resolução Espacial da Medição, $MSR$	-
Uniformidade da Medição, $MU$	Uniforme
Calibração, $Cal$	Normal

### 3.2.2 Incertezas em termografia pelo MMC

O MMC foi aplicado ao modelo matemático de medição, Equação (2.38), pela geração de números aleatórios para cada uma das variáveis presentes no modelo, conforme as distribuições de probabilidades assumidas na Tabela 3.7.

As variáveis apresentadas na Tabela 3.7 estão presentes no modelo matemático da medição. Neste trabalho, assumiu-se a dispersão do sinal digital  $S$ , como a estimativa das incertezas intrínsecas, visto que estas são as estimativas da influências sobre o sinal da medição. Uma vez que se desconhecem seus efeitos sobre o sinal medido, suas

influências são calculadas em termos de temperatura no GUM, e será adotada no MMC em termos do sinal  $S$ .

Tabela 3.7 – Fontes de incerteza assumidas pelo MMC.

Fonte de Incerteza	Distribuição
Emissividade, $\varepsilon$	Uniforme
Distância, $d$	Uniforme
Temperatura Refletida, $T_{ref}$	Uniforme
Temperatura Atmosférica, $T_{atm}$	Uniforme
Sinal digital, $S$	Normal
Calibração, $T_{cal}$	Normal

A incerteza estimada na calibração do termovisor foi considerada no MMC por adição da variável  $T_{cal}$  ao modelo da medição, cuja dispersão será dada por uma distribuição normal.

$$T_{ob} = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{S_{ob}} + F\right)} + T_{cal} [K] \quad (3.11)$$

A geração de números aleatórios para compor as distribuições de probabilidade foi realizada em ambiente computacional MatLab®, e é discutida brevemente a seguir.

### 3.2.2.1 Distribuição Uniforme

A função de densidade de probabilidade de uma distribuição uniforme, introduzida na Seção 2.5.1.2, é dada por:

$$g_X(\xi) = \begin{cases} 1/(a_+ - a_-), & a_- \leq \xi \leq a_+ \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.12)$$

Onde  $a_+$  e  $a_-$  são os limites da distribuição e  $\xi$  os possíveis valores que a variável aleatória  $X$  pode assumir. O valor esperado e a variância da distribuição uniforme são dados pelas Equações (2.45) e (2.46). Por fim, a amostragem da distribuição uniforme é realizada gerando-se  $M$  valores aleatórios de  $\xi$  obedecendo aos limites da distribuição uniforme  $R(a_-, a_+)$ . Logo, os  $M$  valores de  $\xi$  são dados pela Equação (3.13):

$$\xi = a_- + (a_+ - a_-)r \quad (3.13)$$

Onde  $r$  é um vetor de  $M$  números aleatórios provenientes de uma distribuição uniforme padrão  $R(0,1)$  gerada pelo software.

A Figura 3.10 exemplifica uma distribuição uniforme gerada para  $M = 10^6$  valores aleatórios cujos limites inferior e superior são  $a_- = -1$  e  $a_+ = 1$ , respectivamente.

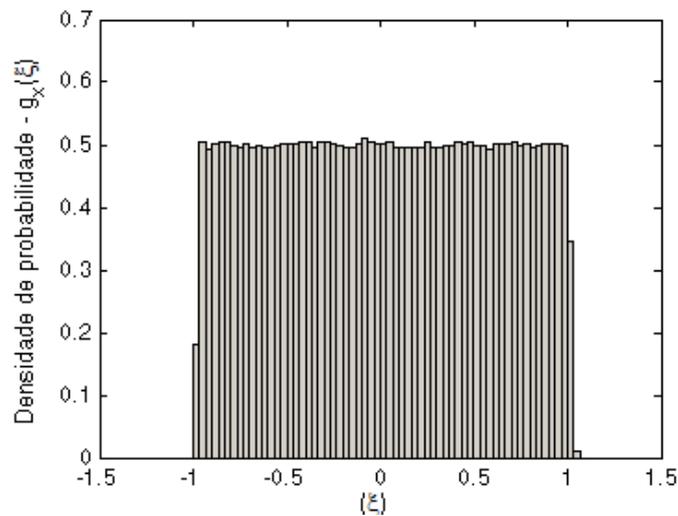


Figura 3.10 – Distribuição Uniforme,  $R(a_-, a_+)$ , de dados gerados aleatoriamente.

### 3.2.2.2 Distribuição Normal

A função de densidade de probabilidade de uma distribuição normal é dada pela Equação (2.57) da Seção 2.5.2.2:

$$g_X(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.14)$$

Onde  $\mu$  é o valor esperado de  $X$  e  $\sigma$  o desvio padrão da distribuição. O valor esperado e variância da distribuição normal são dados pelas Equações (2.41) e (2.43). A amostragem da distribuição normal é realizada gerando-se  $M$  valores aleatórios dados por:

$$\xi = \hat{x} + s * z \quad (3.15)$$

Onde  $\hat{x}$  é o valor médio de  $X$  e  $s$  o desvio padrão e  $z$  são valores aleatórios gerados pelo algoritmo de Box e Muller (1958).

A Figura 3.11 exemplifica uma distribuição normal gerada para  $M = 10^6$  valores aleatórios de desvio padrão  $\sigma$  igual a 1 e valor médio  $\mu$  igual a 0.

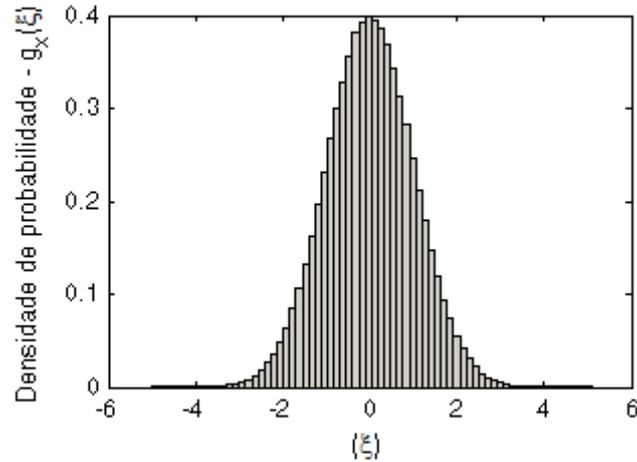


Figura 3.11 - Distribuição Normal,  $N(\xi, \sigma^2(\xi))$ , de dados gerados aleatoriamente,

Portanto, a metodologia da aplicação do MMC foi realizada com o software IMT conforme as etapas:

- i. Definição do modelo de medição  $T_{ob} = f(\varepsilon, d, T_{ref}, T_{atm}, S)$  acrescida da variável  $T_{Cal}$ ,
- ii. Estimação das variáveis  $\varepsilon, d, T_{ref}, T_{atm}$  e  $S$  ;
- iii. Definição da distribuição que melhor caracteriza a dispersão das variáveis e geração de  $M$  números aleatórios conforme as distribuições:
  - a. Uniforme;
  - b. Normal;
- iv. Propagação das distribuições no modelo de  $T_{ob}$ ,  
 $f(\varepsilon^1, d^1, T_{ref}^1, T_{atm}^1, S^1) \dots f(\varepsilon^M, d^M, T_{ref}^M, T_{atm}^M, S^M)$ ;
- v. Ordenação das  $M$  amostras de  $T_{ob}$ ,  $T_{ob_r} = \{T_{ob_1}, T_{ob_2}, \dots, T_{ob_M}\}$ ;
- vi. Cálculo da média de  $T_{ob}$ , da incerteza padrão,  $u(T_{ob})$  e do intervalo de abrangência  $[T_{ob_{inferior}}, T_{ob_{superior}}]$ ;
- vii. Comparação entre os intervalos de abrangência do MMC e GUM,  $d_{inferior}$  e  $d_{superior}$ .

Em todas as simulações foi adotado  $M = 10^6$  dados, valor considerado suficiente para prover corretamente um intervalo abrangência de 95% para um ou dois algarismos significativos (JCGM 101, 2008).

### 3.3 Software IMT

Os cálculos de temperatura e incerteza de medição apresentados neste trabalho foram realizadas no programa Incerteza de Medição Termográfica, IMT, desenvolvido em ambiente MatLab®, cuja interface gráfica é ilustrada na Figura B.1 do Anexo B. O software é composto por doze sub-rotinas, que importam a matriz de sinais proporcionais à radiação incidente exportadas pelo software do fabricante do termovisor, ThermaCAM™ Researcher Pro 2.9, no formato m-files. M-files são arquivos binários de extensão \*.mat, compatíveis com MatLab®, no qual dados de matrizes e vetores podem ser armazenados. A exportação de termogramas no formato \*.mat gera um cabeçalho com informações sobre o termograma, que contém:

- Matriz de 640x480 dados de sinal registrados no termograma;
- Dados de data e hora;
- Taxa de quadros de aquisição;
- Parâmetros do objeto (emissividade, temperatura refletida, temperatura atmosférica, distância, transmissividade, umidade, dentre outros);
- Faixa de aquisição, escala de temperatura, zoom, etc.

A Figura 3.12 esquematiza o uso do IMT. Após a termografia, os termogramas são exportados para um PC, e convertidos pelo usuário em m-files utilizando o software ThermaCAM™ Researcher Pro 2.9. Em seguida, importa-se a os m-file para o IMT o no qual a matriz de sinais  $S$  será utilizada para calcular o perfil térmico do objeto mediante os dados radiométricos fornecidos pelo usuário. O perfil térmico do objeto é exibido no termograma e pode ser recalculado para novos valores de  $\varepsilon$ ,  $d$ ,  $T_{ref}$  e  $T_{atm}$ .

Para efetuar o cálculo da incerteza de uma medição, o usuário deve adicionar as dispersões assumidas para cada variável, podendo considerar eventuais correlações entre elas. A entrada de dados das fontes de incertezas intrínsecas é feitas diretamente na interface de comando do MatLab®. Por fim, o programa fornece graficamente as distribuições obtidas e seus intervalos de abrangência.

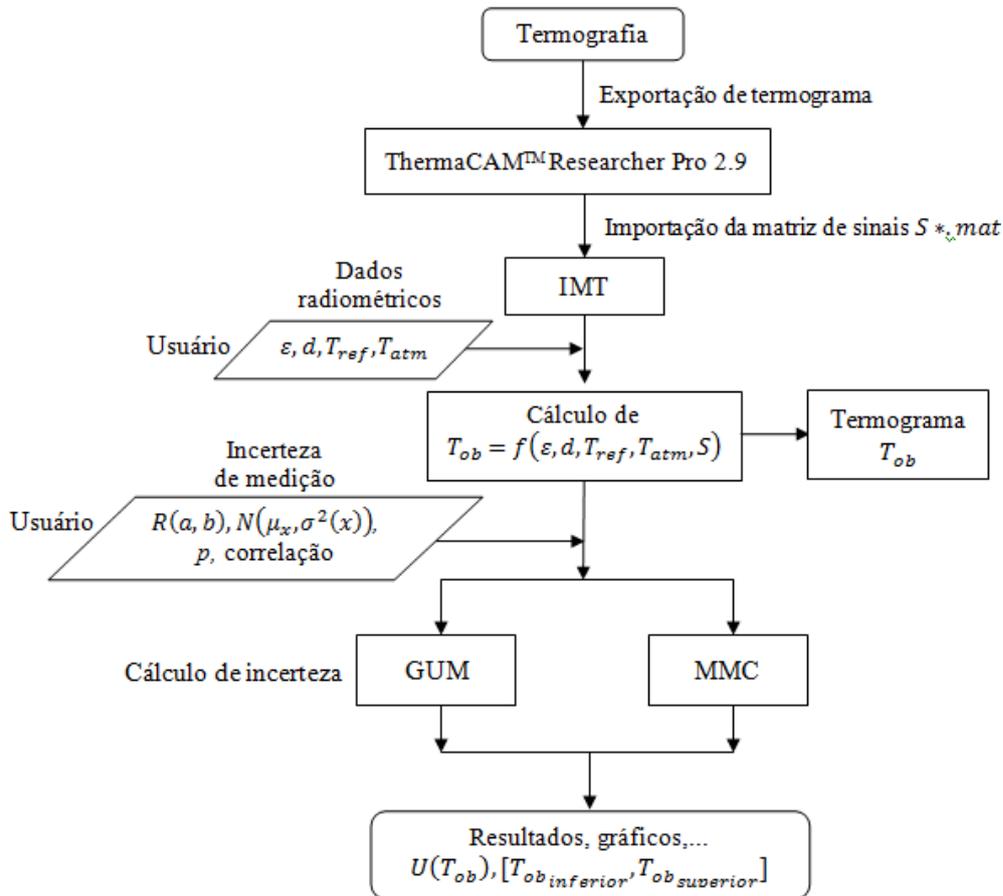


Figura 3.12 – Fluxograma de uso do IMT.

Portanto, todos os termogramas registrados ao longo do trabalho foram convertidos para formato \*.mat para posterior processamento no IMT, que agrega o modelo matemático obtido experimentalmente, a capacidade de calcular a temperatura do objeto com as informações fornecidas pelo usuário, além das incertezas de medição pelos métodos GUM de primeira e segunda ordens e pelo MMC.

## 4 RESULTADOS

O presente capítulo reúne os resultados da metodologia de cálculo de incerteza de medição em termografia. São apresentados os resultados do cálculo da incerteza de medição em conexões elétricas obtidas pelo software Incerteza de Medição Termográfica baseados nos ensaios realizados em laboratório descritos no Capítulo 2. As incertezas expressas pelo GUM e MMC são comparadas e a contribuição das fontes de incertezas discutida. Os resultados experimentais da evolução da temperatura em conexões elétricas são confrontados com modelos teóricos e a relevância da incerteza de medição é discutida. Por fim, são apresentados os resultados obtidos na inspeção termográfica nas instalações da Subestação Adelaide Cemig onde análise discorre sobre um ponto de defeito diagnosticado.

### 4.1 Modelo de Medição de Temperatura do Termovisor

A obtenção das constantes do modelo matemático do termovisor seguiu o processo descrito na Seção 2.4.4. Foi utilizado o modelo de termovisor FLIR SC660, da fabricante FLIR, e o radiador padrão de corpo negro Fluke 4181. A Figura 4.1 ilustra o procedimento realizado em laboratório, onde o termovisor foi posicionado em frente ao corpo negro, à distância de 0,45m. As condições ambientes do laboratório seguiram as recomendações da OIML R 141, com a temperatura ambiente mantida entre 293,15 K e 298,15 K, e a umidade relativa do ar entre 40% e 80%.

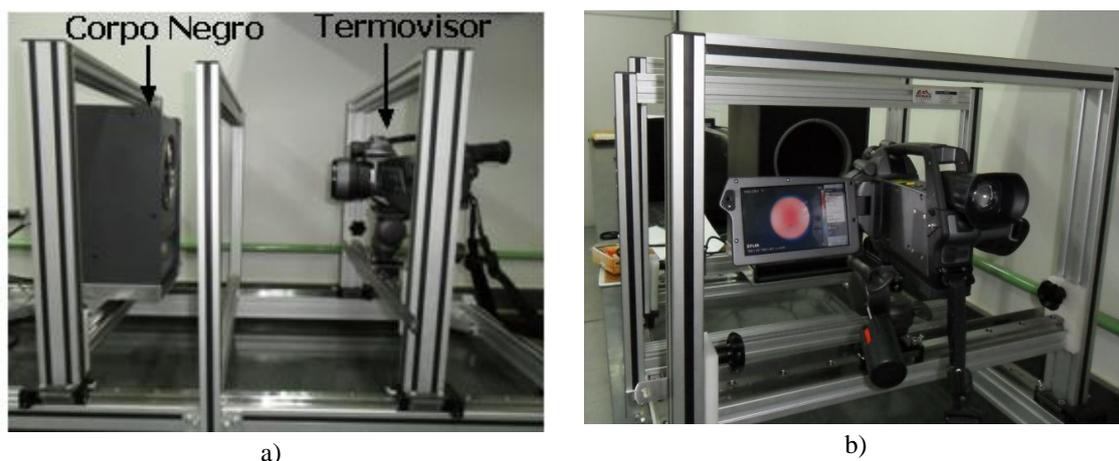


Figura 4.1 – Bancada experimental para obtenção das constantes R, B.

Os pontos de medição foram obtidos de 10 K em 10 K iniciados do menor valor da faixa de operação do radiador, 308,15 K, até o limite superior de 773,15 K. Em cada

temperatura ajustada, foi obtida uma série de cinco termogramas a cada 10s após a completa estabilização do corpo negro, totalizando 385 termogramas.

De cada termograma foram extraídas a temperatura e sinal médios, bem como suas respectivas dispersões. Posteriormente, foram calculadas as médias das temperaturas e sinais médios para cada conjunto de cinco termogramas utilizado o software ThermaCAM<sup>TM</sup> Researcher Pro 2.9. Estes pontos de medição  $(T_i, S_i)$  geraram o gráfico da Figura 4.2.

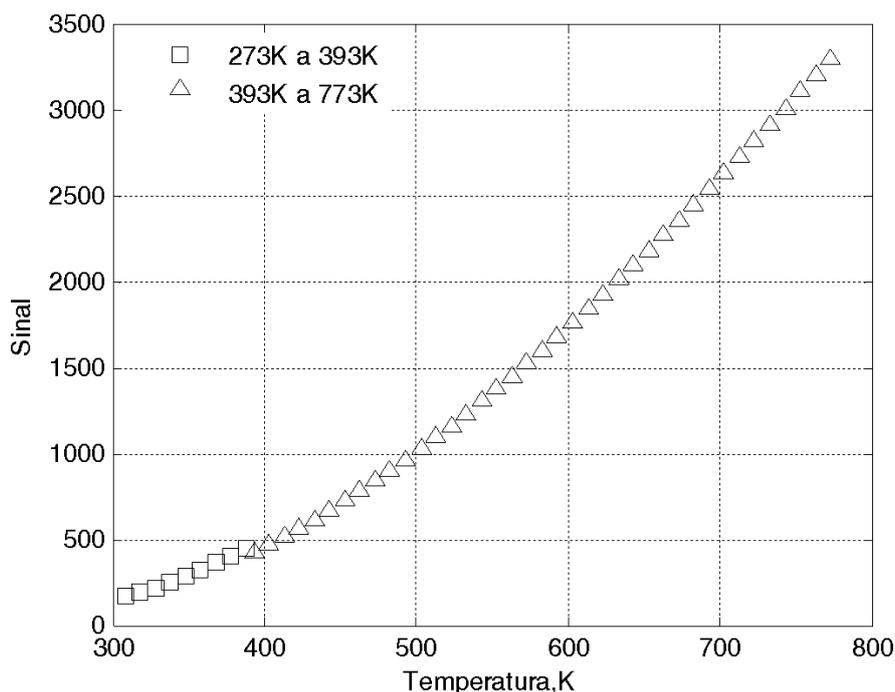


Figura 4.2 – Pontos de medição.

O comportamento descrito pelo gráfico corresponde à expectativa fornecida pela Equação (2.37). As constantes R e B foram obtidas através de regressão não-linear nas duas faixas de medição do instrumento, 293,15 K a 393,15 K (faixa 1) e 273,15 K a 773,15 K (faixa 2). Como exemplo, a Figura 4.3 ilustra o ajuste realizado para os dados obtidos na primeira faixa de medição (onde a faixa de ajuste está contida na faixa de medição do instrumento devido à temperatura mínima do corpo negro ser de 308,15 K). As linhas tracejadas indicam os limites do intervalo de confiança do ajuste e a linha contínua seu valor médio.

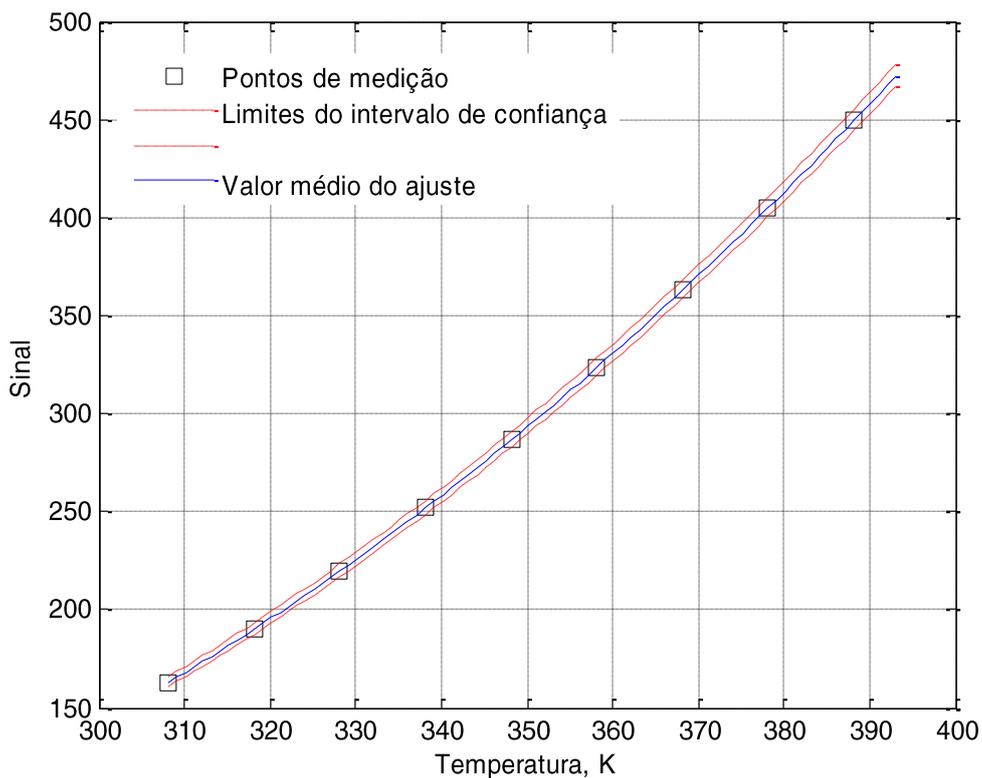


Figura 4.3 – Ajuste da curva na faixa de medição de 293,15 K a 393,15 K.

Embora a obtenção experimental das constantes do instrumento conduza o modelo matemático a dispersões na estimativa da temperatura, os resultados mostraram-se satisfatórios em todos os ensaios realizados em laboratório. Ao longo do trabalho, a obtenção das constantes foi aprimorada e os resultados refinados. Por exemplo, a faixa que corresponde às medições de 273,15 K a 773,15 K foi subdividida em três subfaixas , obtendo-se, assim, três constantes para cada uma delas.

Os valores das constantes obtidos para um intervalo de confiança de 95% em torno dos pontos de medição são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1– Constantes ajustadas.

Constante	Faixa de Medição	
	293,15 K - 393,15 K	273,15 K - 773,15 K
R	20651,19	20912,45; 27428,68; 34840,56;
B	1494, 26	1540,14; 1681,020; 1832,31;
F	1	1

Como resultado, os erros de estimativa de cálculo de temperatura foram mínimos, como mostra a Figura 4.4, na qual as temperaturas calculadas pelo IMT são comparadas aos

valores calculados pelo software ThermaCAM<sup>TM</sup> Researcher Pro 2.9 em alguns ensaios. Observa-se que até a temperatura de 402,4 K o erro percentual é inferior a 0,05%. Após este valor, o erro apresenta grande variação atingindo o valor máximo de 0,45%, em uma das medições realizadas.

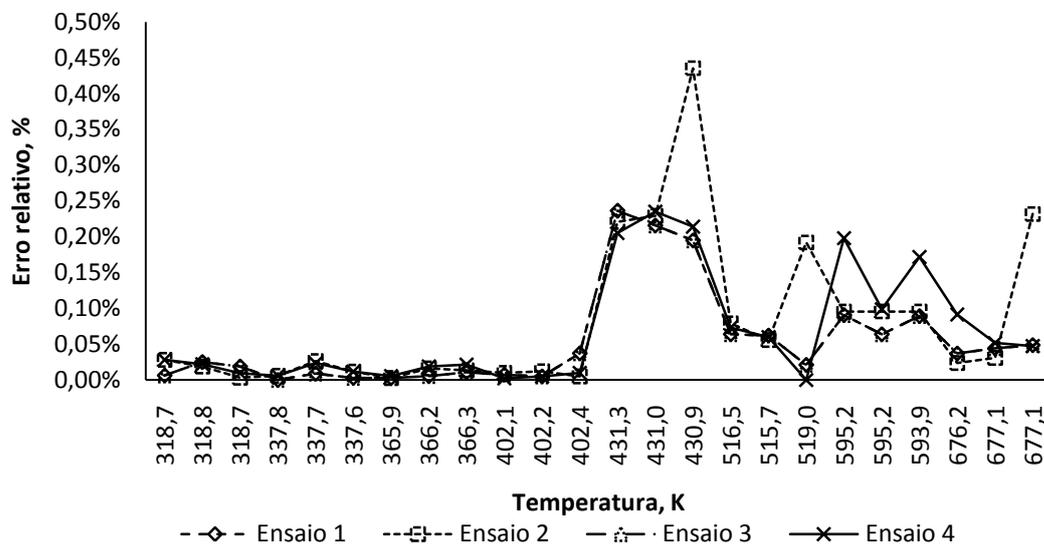


Figura 4.4 – Erro relativo do modelo de medição ajustado.

Nos aspectos relacionados à medição de temperatura, o modelo apresenta o comportamento ilustrado na Figura 4.5.

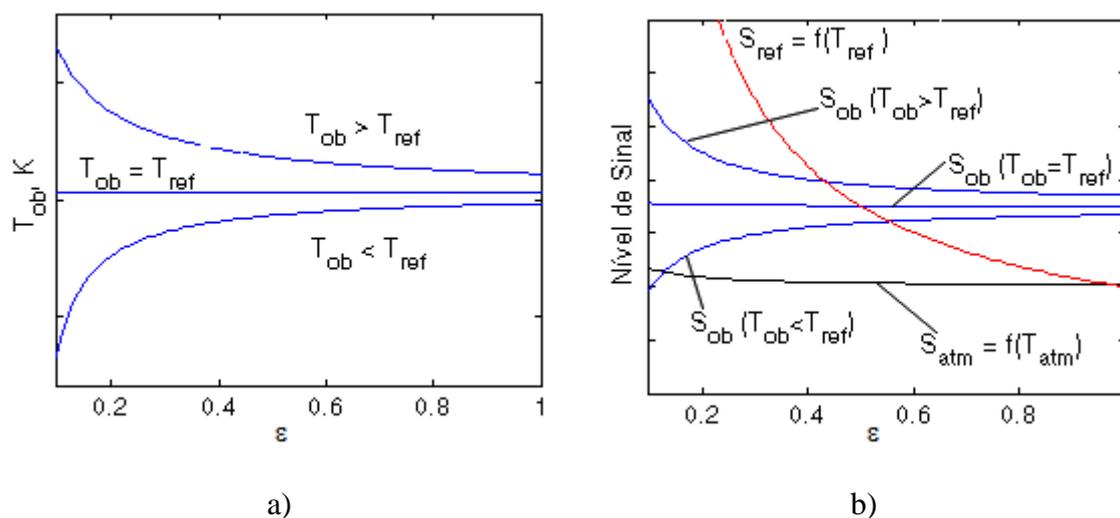


Figura 4.5 – Comportamento do modelo matemático com a variação da emissividade, a) Temperatura, b) Níveis de sinal.

Nas medições onde a temperatura do objeto,  $T_{ob}$ , é superior a temperatura refletida,  $T_{ref}$ , o aumento da emissividade no modelo reduz a temperatura medida pelo sistema.

Por outro lado, se  $T_{ob} < T_{ref}$ , a elevação da emissividade resulta na elevação da leitura de temperatura. Nos casos onde  $T_{ob} = T_{ref}$ , a leitura de  $T_{ob}$  independe do valor da emissividade, como ilustra a Figura 4.5a.

Na Figura 4.5b é mostrado o comportamento dos sinais proporcionais às radiações emitida,  $S_{ob}$ , refletida pelo objeto,  $S_{ref}$  e emitida pela atmosfera,  $S_{atm}$  em relação à emissividade. Em baixas emissividades o valor de  $S_{ref}$  é extremamente elevado, e o incremento de  $\varepsilon$  leva  $S_{ref}$  rapidamente a zero quando  $\varepsilon = 1$ . A radiação atmosférica,  $S_{atm}$ , apresenta ligeira variação em seu valor, convergindo para seu valor mínimo  $(1 - \tau)S_{atm}/\tau$  quando  $\varepsilon = 1$ . O sinal  $S_{ob}$  exibe a mesma tendência observada na Figura 4.5a, onde a redução ou elevação da leitura de temperatura com a emissividade é função dos valores de  $T_{ob}$  e de  $T_{ref}$ .

Já o modelo de transmissividade, Equação (2.34), função apenas da distância  $d$  entre o termovisor e o objeto, mostrou-se adequado para o uso, embora a umidade relativa do ar e a temperatura atmosférica sejam encontradas em modelos mais complexos de transmissividade utilizados pelos atuais termovisores. A Figura 4.6 ilustra o comportamento da transmissividade atmosférica em relação à distância para o modelo adotado. Até a distância de 100 metros, Figura 4.6a, transmissividade permanece superior a 90%. Na Figura 4.6b, a partir de 200 m entre o termovisor e o objeto, a transmissividade é inferior a 90%. Para uma distância de 1000 m, a transmissividade atinge o valor de aproximadamente 77%.

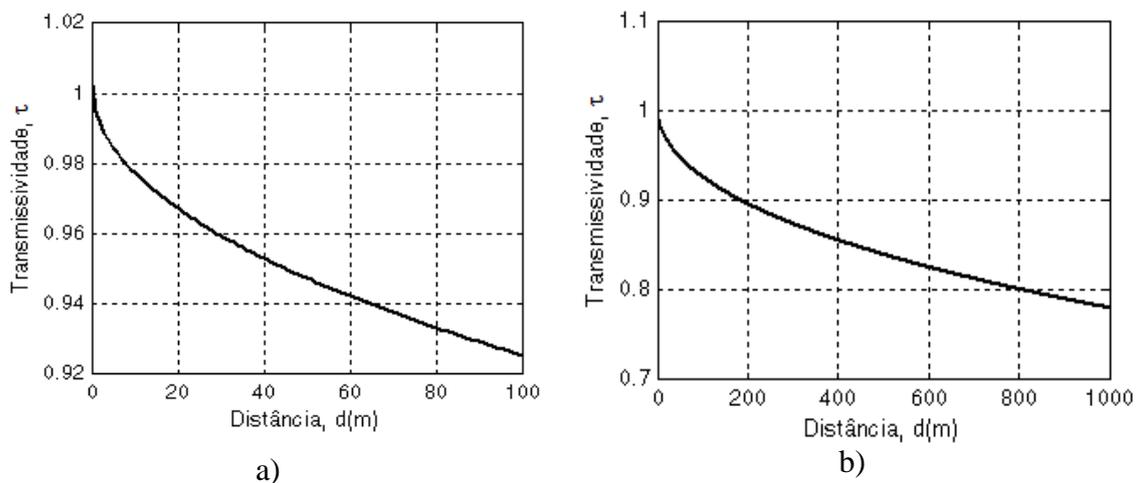


Figura 4.6 – Transmissividade atmosférica em relação à distância, a) distância de até 100 metros, b) distância de até 1000m.

## 4.2 Estimativa das incertezas intrínsecas

As incertezas intrínsecas, discutidas no Capítulo 3, foram estimadas em ensaios realizados no laboratório de termometria. As variáveis cujas influências não puderam ser determinadas, ou ainda, avaliadas como pouco significativas, foram desprezadas.

O erro gerado por ruído, NGE, foi estimado com base no cálculo do NETD, dado pela Equação (2.66), empregando-se os termogramas registrados durante a obtenção das constantes do modelo matemático. A Figura 4.7 ilustra os valores obtidos para o NETD em função das temperaturas, onde os pontos conectados pelas linhas pontilhadas indicam os valores calculados, e a linha contínua o valor do NETD declarado pelo fabricante, cerca de 45mK obtido a 303,15K. No laboratório as temperaturas do ensaio seguiram o padrão estabelecido, sendo mantida entre 293,15 K e 298,15 K.

Observa-se que os valores calculados são, em sua maioria, inferiores ao valor fornecido pelo fabricante. A menos de um ponto destoante, 85,25mK, os demais valores tendem a crescer com a temperatura, superando 45mK já em 500K. Uma vez que o valor do NETD é fortemente influenciado pela temperatura ambiente, pode-se atribuir os resultados obtidos à temperatura ambiental praticada durante o ensaio, mantida inferior aquela para a qual o NETD foi declarado. Por outro lado, a eficácia da Equação (2.66) recomendada pela OIML R 114 é desconhecida, não tendo sido encontrada na literatura nenhuma outra referência que critique seu emprego.

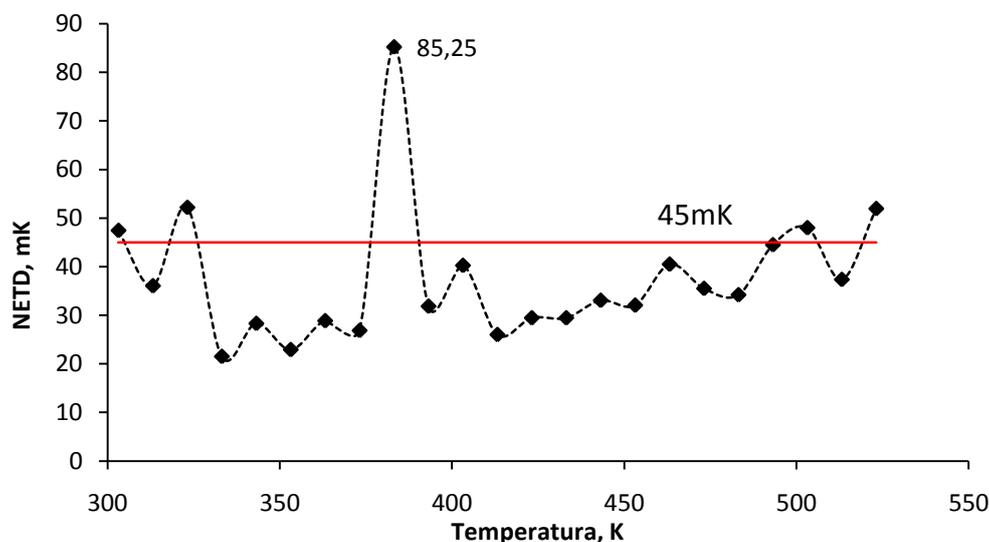


Figura 4.7 – NETD calculado para termovisor SC660.

A Equação (2.67) não apresentou resultados satisfatórios, tendo em vista a grande variabilidade de resultados, que coloca em dúvida seu uso.

Portanto, conforme os resultados obtidos, o NETD adotado foi aquele declarado pelo fabricante, de 45mK, para toda a faixa de medição.

A resolução digital de temperatura, DRT, foi calculada conforme os valores encontrados na literatura, onde o número de bits  $k$ , do conversor analógico digital são 14 bits (FLIR SYSTEMS, [S.d.]). Da Equação (2.71), para as duas faixas de medição consideradas, tem-se:

Tabela 4.2 – Resolução Digital de Temperatura.

Faixa de medição [K]	DRT [K]
293,15 - 393,15	0,00977
393,16 - 773,15	0,030518

O mínimo erro pode ser considerado uma primeira aproximação da incerteza de medição de um termovisor (TAVARES, 2006). Em laboratório, seu valor foi estimado com dados obtidos a partir de medições do radiador padrão de corpo negro. A Figura 4.8 ilustra as curvas de erros obtidas ao longo de uma série de 3 ensaios. Há grande concordância entre os resultados, tendo sido a dispersão entre as medições desprezível.

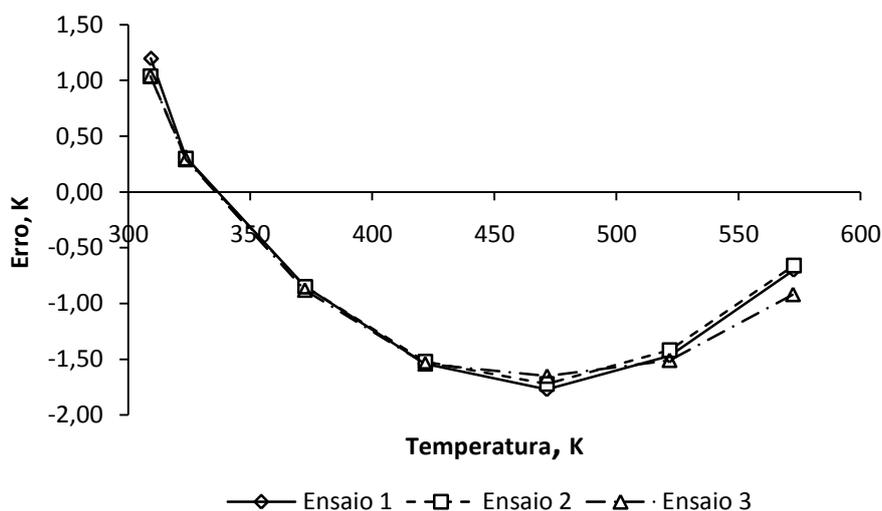


Figura 4.8 – Estimativa do mínimo erro.

Assim, o mínimo erro foi calculado como sendo a média dos Mínimos Erros, calculados pela Equação (2.74) para os três conjuntos de dados. Logo, o ME estimado foi de 1,10K, tendo sido este valor empregado para estimativa da incerteza de medição.

A resolução espacial da medição, MSR, foi estimada em laboratório conforme o processo descrito na Seção 2.5.4 do Capítulo 2. A Figura 4.9 mostra a montagem experimental para obtenção da STRF.

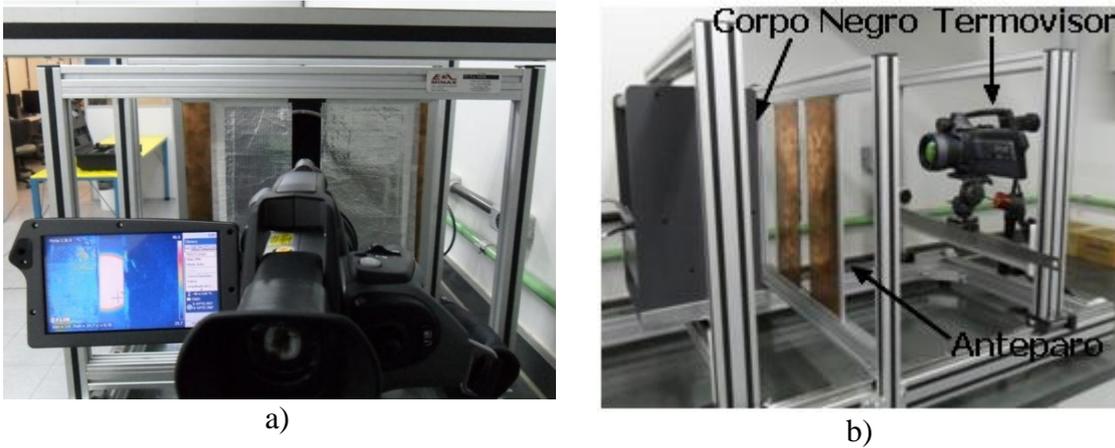


Figura 4.9 – Ensaio para determinação do MSR.

O termovisor foi posicionado a uma distância de 0,45m do anteparo e a temperatura do corpo negro foi ajustada em 323,15K para elevar o contraste térmico e reduzir a influência de fontes externas. A temperatura ambiente foi mantida em 295K, sendo esta a temperatura dos anteparos.

A Figura 4.10 mostra a STRF obtida para modelo de termovisor Flir SC 660, utilizando lente de 37,64 mm de distância focal e campo de visão de 23,9°. O ângulo  $\delta$  para o qual o valor do MSR é 99% do valor da STRF foi de 16,30 mrad.

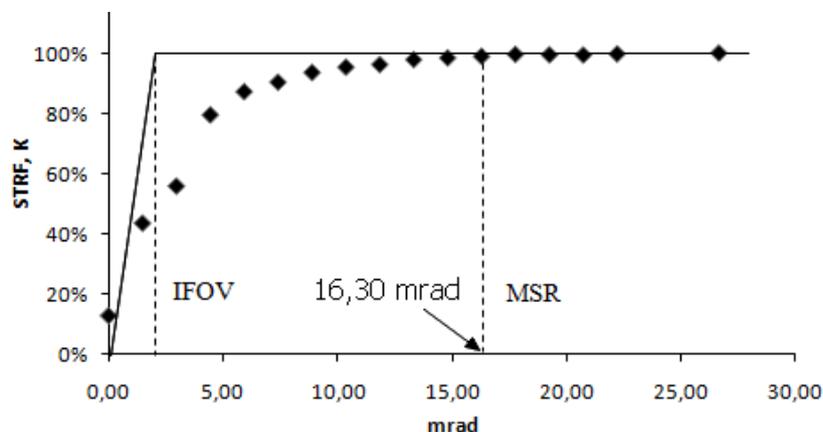


Figura 4.10 – Slit Temperature Response Functions.

O MSR encontrado é muitas vezes superior ao IFOV declarado pelo fabricante, que para a lente de  $23,9^\circ$ , e à distância praticada durante o ensaio, são de  $0,33\text{mm}$ , que correspondem a aproximadamente  $0,33\text{mrad}$ . Em condições ideais, o decaimento de temperatura observado na Figura 4.10 deveria ocorrer a partir deste valor.

Nota-se que  $0,33\text{ mrad}$  correspondem a um ângulo de abertura diminuto que se encontra além da capacidade de medição disponível durante o ensaio. Embora o comportamento ideal não possa ser alcançado, os resultados obtidos deveriam ser suficientemente próximos as especificações de IFOV disponíveis, o que remete os resultados a limitações de ordem metrológica.

Por outro lado, mesmo adotando o valor de MSR de  $16,30\text{mrad}$ , as influências deste parâmetro sobre os resultados são desprezíveis. Isto porque, em todas as medições realizadas em laboratório e nas aplicações em estudo, os objetos cuja temperatura é medida têm dimensão superior aos  $16,30\text{ mm}$  ( $\cong 16,30\text{mrad}$ ). Portanto, a influência do SMR sobre a incerteza de medição foi desprezada.

A uniformidade da medição foi obtida a partir da estimativa da sensibilidade para um campo de visão não-uniforme, descrito no Capítulo 2. O termovisor foi posicionado na bancada focalizando o corpo negro em diferentes pontos do seu campo de visão, conforme ilustram os termogramas da Figura 4.11.

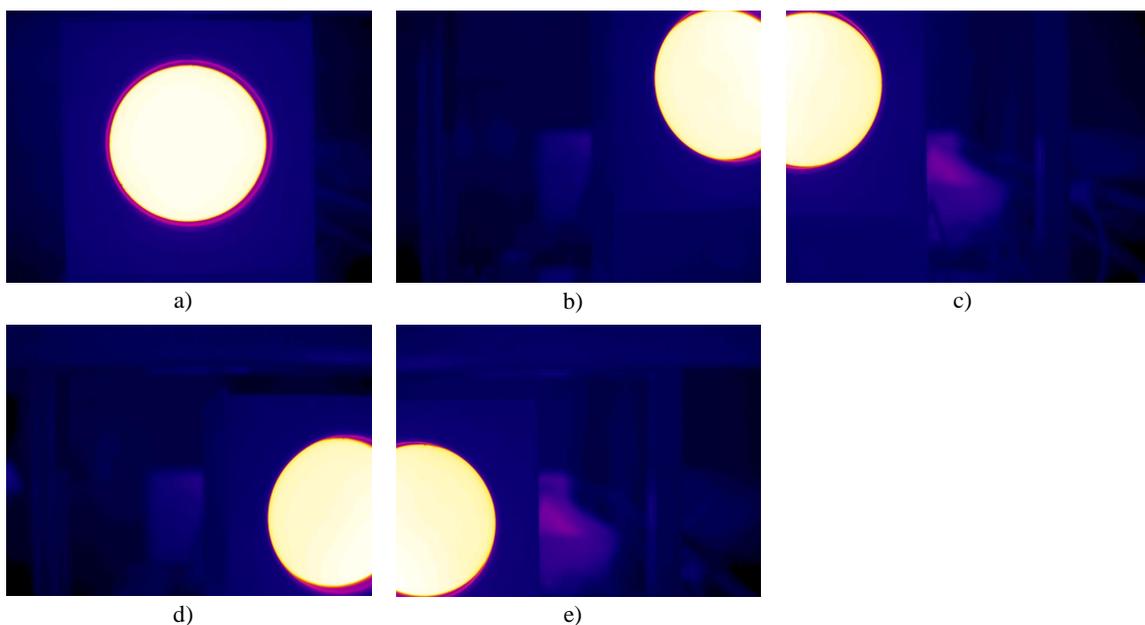


Figura 4.11 – Termogramas em diferentes pontos do campo de visão do termovisor, a) centro e arestas b) superior direita, c)superior esquerda, d)inferior direita e, e) inferior direita.

Em cada posição do campo de visão foram registrados cinco termogramas, cujo valor da sensibilidade do campo de visão,  $\delta t$ , foi calculado pela Equação (2.76) para diversas temperaturas relacionadas nos gráficos da Figura 4.12.

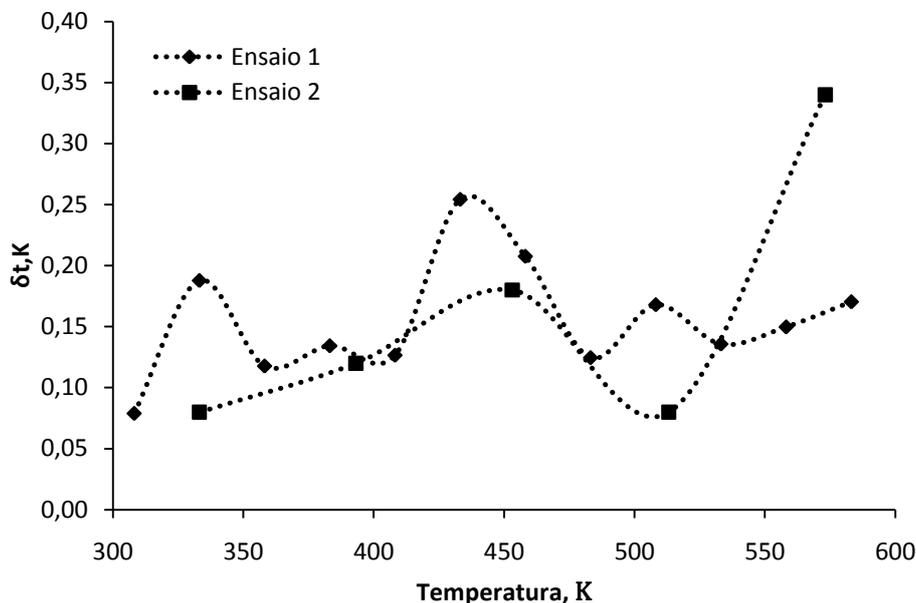


Figura 4.12 – Sensibilidade da medição para um campo de visão uniforme.

Os resultados mostram que o posicionamento do objeto no campo de visão do termovisor possui pouca influência sobre a capacidade do termovisor de medir temperatura. Desta forma, adotou-se o maior valor de  $\delta t$  calculado como estimativa do MU, tendo sido o valor de 0,34K obtido à temperatura de 583,15K.

A estimativa das componentes de incertezas intrínsecas apresentadas nesta seção forneceu resultados importantes que ajudam a caracterizar um termovisor. O ruído NETD, ME, DRT ou mesmo a MU, apresentam impacto significativo sobre as incertezas intrínsecas. Outros parâmetros, como MSR, não produzem impacto algum, a menos de aplicações mais específicas, podendo ser negligenciados. A estabilidade de temperatura, TS, não estimada neste trabalho, tem impacto desconhecido para medição. Contudo, nos resultados a serem discutidos nas próximas seções, sua contribuição (ou falta dela) não afetaram significativamente as incertezas calculadas. Por fim, a repetitividade adotada, RE, provém das próprias medições realizadas durante os ensaios das conexões elétricas.

É importante observar que todas as influências descritas anteriormente acometem o sistema de medição em nível de usuário de termovisores, que não dispõe de

informações suficientes para quantificá-las. A menos do NETD e do número de bits do conversor A/D do termovisor (que permite a estimativa do DRT), todos os demais parâmetros geralmente não são publicados pelos fabricantes de termovisores. Deve-se considerar a possibilidade de que tais parâmetros recebam denominações próprias de cada fornecedor, ou ainda, que, por adotarem critérios próprios para caracterizar o instrumento, os fabricantes de termovisores não reconheçam estas variáveis. Conseqüentemente, resta ao usuário recorrer às informações disponíveis na literatura e buscar meios próprios para quantificar as grandezas necessárias.

Nas próximas seções serão apresentados os resultados obtidos pelos ensaios, bem como, a contribuição das incertezas intrínsecas na qualidade da medição.

### **4.3 Incerteza de medição em termografia infravermelha**

Os resultados discutidos a seguir são relativos às medições realizadas durante os ensaios descritos na Seção 3.1.4. São apresentadas cinco medições de temperatura das amostras CH1, CH2, CH3 e CC2 onde foram realizados os cálculos de incerteza de medição, pelo GUM e MMC. Todas as incertezas foram calculadas para um nível da confiança  $p = 0,95$  e eventuais correlações entre as variáveis foram avaliadas. O Anexo A contém as planilhas de cálculo de incerteza pelo GUM de primeira ordem, onde todos os valores das variáveis e fontes de influência são apresentados.

A amostra de conexão CH2, Figura 4.13, foi submetida ao ensaio de ciclos térmicos em corrente alternada de aproximadamente 500A. Devido ao defeito gerado por adição de isolamento em seu contato, o conjunto cabo e conexão atingiu temperaturas elevadas, provocando degradação do material isolante e das faixas de tinta adicionadas sobre sua superfície para avaliação do impacto da emissividade na qualidade da medição. A temperatura medida foi de aproximadamente 518K e a emissividade sobre a faixa de tinta medida foi de 0,78. As condições em que a medição foi realizada, assim como as dispersões consideradas são reunidas nas Tabela 4.3 e Tabela A.1 do (Anexo A), para o MMC e o GUM, respectivamente.

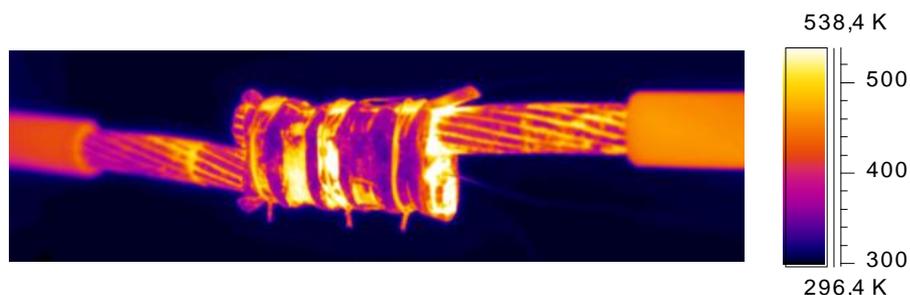


Figura 4.13 –Termograma da conexão CH2.

Tabela 4.3 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.1 do Anexo A ).

$T_{ob} = 518K$

Grandeza	Valor	Unidade	Dispersão	Distribuição
Emissividade	0,78	-	$\Delta\varepsilon = \pm 0,05$	Uniforme
Temperatura refletida	294,95	K	$\Delta T_{ref} = \pm 1,0$	Uniforme
Temperatura atmosférica	294,95	K	$\Delta T_{atm} = \pm 1,0$	Uniforme
Distância	0,3	m	$\Delta d = \pm 0,1$	Uniforme
Sinal <sup>2</sup>	912,60	-	$\sigma_S = 1,116$	Normal
Calibração	4,910	K	$\sigma_{T_{cal}} = 2,455$	Normal

Os resultados do cálculo de incerteza estão reunidos na Tabela 4.4. As incertezas de medição combinada,  $u(T_{ob})$ , obtidas pelo GUM, de primeira ordem e superior, e o MMC são iguais, demonstrando que os termos de ordem superior não foram expressivos a ponto de influenciar os resultados. Além disso, o comprimento do intervalo de abrangência do MMC é inferior ao obtido pelo GUM.

A Figura 4.14 ilustra as distribuições de probabilidades obtidas pela aplicação dos dois métodos. O GUM admite uma distribuição normal, dada pela linha contínua,, enquanto que o MMC resulta na distribuição de probabilidade dada pelas barras. Observa-se uma assimetria na distribuição dada pelo MMC é proveniente da não linearidade do modelo matemático. Os limites dos intervalos de abrangência são ilustrados pelas linhas verticais tracejadas (MMC), pontilhadas (GUM de primeira ordem) e contínuas (GUM de ordem superior).

<sup>2</sup> A dispersão do sinal é o desvio padrão das medições obtidas em condições de repetitividade.

Tabela 4.4 – Incerteza de medição pelo método GUM e MMC.

Método	M	$T_{ob}$ [K]	$u(T_{ob})$ [K]	Intervalo de abrangência (95%) [K]	$d_{inf}$ [K] <sup>3</sup>	$d_{sup}$ [K]
GUM 1ªOrd.		518,9	6,0	[507,1 530,7]	1,3	0,7
GUM Ord.Sup.		518,9	6,0	[507,1 530,7]		
MMC	$1 \times 10^6$	519,1	6,0	[508,4 530,0]		

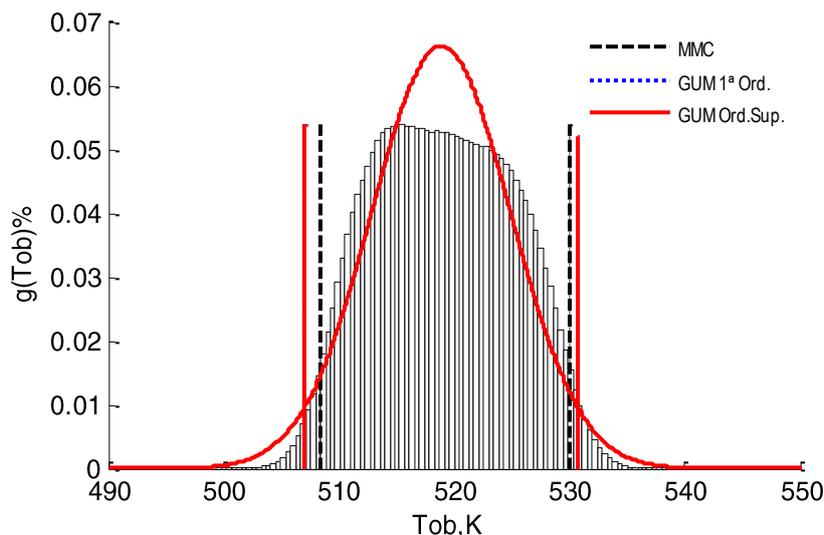


Figura 4.14 – Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para  $T_{ob} = 518K$ .

A diferença entre os intervalos de abrangência dados pela MMC e GUM, visíveis na Figura 4.13, correspondem ao  $d_{inf}$  e  $d_{sup}$  mostrados na Tabela 4.4. Devido ao fato das diferenças entre os limites dos intervalos de abrangência serem superiores ao limite numérico estabelecido,  $\delta = 0,5 K$ , conclui-se que o método GUM não é apto para determinar a incerteza de medição nesta aplicação.

A Figura 4.15 ilustra a amostra de conector cunha CC2 submetida ao ensaio de evolução da temperatura por aplicação de corrente elétrica de forma crescente. Assim como a conexão CH2, na amostra CC2 foi introduzido um defeito durante sua montagem. A temperatura medida foi de aproximadamente 361K e a emissividade no ponto de medição foi de 0,33. A Tabela 4.5 reúne as considerações nos cálculos realizados com MMC (vide Tabela A.2, Anexo A, para incerteza de medição pelo GUM 1ª Ordem).

<sup>3</sup>  $d_{inf}$  e  $d_{sup}$  correspondem aos parâmetros  $d_{inferior}$  e  $d_{superior}$  apresentados na Seção 2.5.3

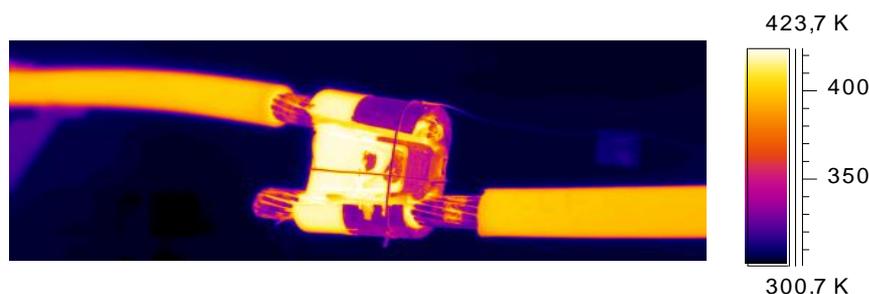


Figura 4.15 – Termograma da conexão CC2,

Tabela 4.5 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.2 do Anexo A ).

$T_{ob} = 361 K$

Grandeza	Valor	Unidade	Dispersão	Distribuição
Emissividade	0,33	-	$\Delta\varepsilon = \pm 0,05$	Uniforme
Temperatura refletida	296,95	K	$\Delta T_{ref} = \pm 1,0$	Uniforme
Temperatura atmosférica	296,95	K	$\Delta T_{atm} = \pm 1,0$	Uniforme
Distância	0,5	m	$\Delta d = \pm 0,1$	Uniforme
Sinal	202,38	-	$\sigma_S = 0,791$	Normal
Calibração	1,765	K	$\sigma_{T_{cal}} = 0,88$	Normal

A Tabela 4.6 mostra os resultados do cálculo da incerteza de medição. Observa-se uma ligeira diferença entre as incertezas padrão combinadas obtidas pelos dois métodos. Novamente, a diferença entre os limites dos intervalos de abrangência supera a tolerância  $\delta$  à direita tornando a abordagem do GUM inadequada.

Tabela 4.6 - Incerteza de medição pelos métodos GUM e MMC.

Método	M	$T_{ob}[K]$	$u(T_{ob})[K]$	Intervalo de abrangência (95%) [K]	$d_{inf}[K]$	$d_{sup}[K]$
GUM 1ªOrd.		361,4	4,7	[352,3 370,7]	0,1	1,0
GUM Ord.Sup.		361,4	4,7	[352,2 370,6]		
MMC	$1 \times 10^6$	361,7	5,3	[352,4 371,7]		

A assimetria da distribuição de probabilidades deste caso é mostrada na Figura 4.16. Devido ao baixo valor de emissividade da superfície do conector, 0,33, a não-linearidade do modelo de medição tornou-se mais evidente, contribuindo para intervalo de abrangência assimétrico.

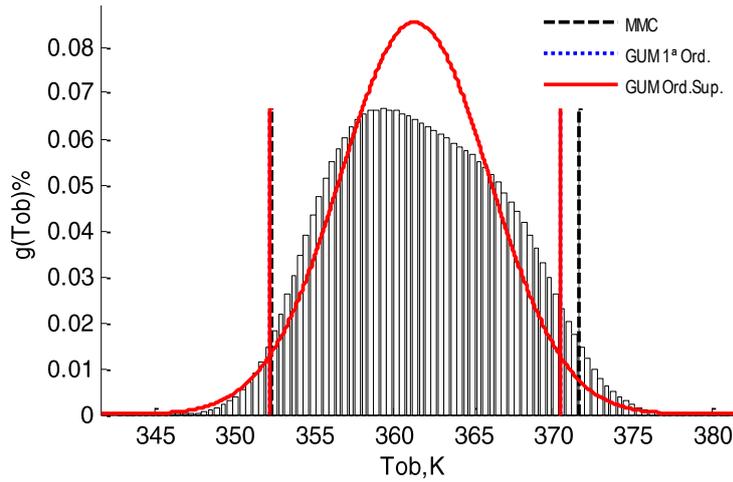


Figura 4.16 - Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para  $T_{ob} = 361K$ .

A conexão CH3, Figura 4.17, foi submetida ao ensaio de evolução da temperatura, tal qual a conexão CC2. Contudo, nesta conexão nenhum defeito foi gerado em sua confecção. Das conexões submetidas aos ensaios, a conexão CH3 foi a que apresentou a menor média de emissividade,  $\epsilon = 0,12$ . Os resultados apresentados a seguir são relativos à medição da temperatura de 343 K. As Tabela 4.7 e Tabela A.3 (Anexo) trazem os dados considerados nos cálculos realizados com MMC e o GUM (1ª Ordem), respectivamente.

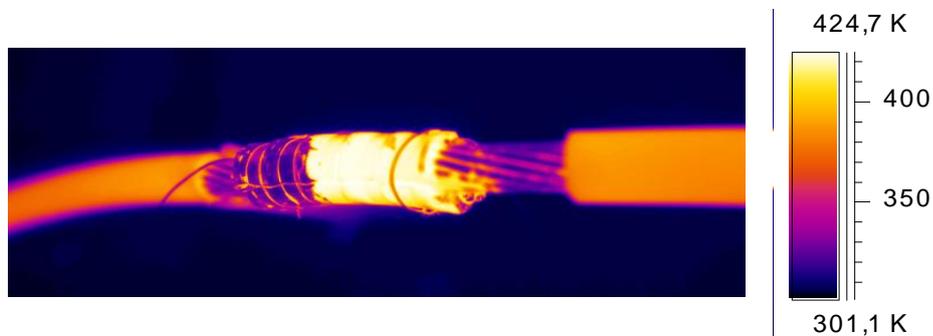


Figura 4.17 – Termograma da conexão CH3

Tabela 4.7 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.3 e Tabela A.4 do Anexo A ).

$T_{ob} = 343 K$

Grandeza	Valor	Unidade	Dispersão	Distribuição
Emissividade	0,12	-	$\Delta\epsilon = \pm 0,05$	Uniforme
Temperatura refletida	294,55	K	$\Delta T_{ref} = \pm 1,0$	Uniforme
Temperatura atmosférica	294,55	K	$\Delta T_{atm} = \pm 1,0$	Uniforme
Distância	0,3	m	$\Delta d = \pm 0,1$	Uniforme
Sinal	146,92	-	$\sigma_S = 0,148$	Normal
Calibração	1,397	K	$\sigma_{T_{cal}} = 0,69$	Normal

As Tabela 4.8 e Tabela 4.9 apresentam os resultados da incerteza de medição não-correlacionadas e correlacionadas, respectivamente. Nos casos anteriores, a correlação entre as variáveis não produziu diferenças significativas, motivo pelo qual os resultados apenas deste caso são ilustrados. A correlação avaliada foi entre emissividade,  $\varepsilon$ , e temperatura refletida,  $T_{ref}$ , com coeficiente de correlação  $r = 1$ .

Tabela 4.8 - Incerteza de medição pelos métodos GUM e MMC para  $\varepsilon$  e  $T_{ref}$  não-correlacionadas.

Método	M	$T_{ob}$ [K]	$u(T_{ob})$ [K]	Intervalo de abrangência (95%) [K]		$d_{inf}$ [K]	$d_{sup}$ [K]
GUM 1ªOrd.		343,8	10,3	[323,6	363,9]	4,9	4,1
GUM Ord.Sup.		343,8	10,8	[322,6	364,9]		
MMC	$1 \times 10^6$	346,0	11,4	[328,4	368,1]		

Os resultados demonstram que baixas emissividades impactam fortemente a incerteza por elevação da influência da  $T_{ref}$  sobre a medição, Tabela 4.8. Apesar da temperatura de medição ser inferior aos casos apresentados anteriormente e as condições ambientais não apresentarem diferenças significativas em relação às anteriores,  $u(T_{ob})$  foi à maior dentre as apresentadas. Destaca-se, também, que MMC apresentou temperatura média,  $T_{ob}$ , superior ao valor médio calculado de forma direta pelo modelo da medição. Conclui-se que o MMC foi afetado pelo baixo valor de emissividade, que em valores próximos a zero, tendem a acentuar a descontinuidade do modelo matemático em  $\varepsilon = 0$  e sua não-linearidade.

Tabela 4.9 - Incerteza de medição pelos métodos GUM e MMC para  $\varepsilon$  e  $T_{ref}$  correlacionadas.

Método	M	$T_{ob}$ [K]	$u(T_{ob})$ [K]	Intervalo de abrangência (95%) [K]		$d_{inf}$ [K]	$d_{sup}$ [K]
GUM 1ªOrd.		343,8	12,8	[318,7	368,9]	8,1	4,9
GUM Ord.Sup.		343,8	13,2	[317,9	369,7]		
MMC	$1 \times 10^6$	346,6	14,3	[326,8	373,8]		

Na Tabela 4.9 observa-se o aumento significativo da incerteza, e conseqüentemente, do intervalo de abrangência ao ser considerada a correlação emissividade-temperatura refletida. A diferença entre os limites dos intervalos de abrangência superou o  $d_{inf}$  e  $d_{sup}$  da Tabela 4.9, demonstrando que assimetria da distribuição do MMC foi ainda maior do que a anterior. A correlação  $\varepsilon$ - $T_{ref}$  da parcela da radiação refletida, apresentada na Equação (2.26), mostra que, para baixos valores de emissividade, a

influência da irradiação refletida é elevada, tornando a correlação  $\varepsilon-T_{ref}$  significativa. Por outro lado, altos valores de emissividade tornam a refletividade baixa, reduzindo a influência da irradiação  $G(T_{ref})$ , tornando a correlação  $\varepsilon-T_{ref}$  desprezível.

As Figura 4.18 e Figura 4.19 ilustram as distribuições de probabilidade relativas aos resultados das Tabela 4.8 Tabela 4.9, respectivamente. Nota-se uma ligeira diferença entre as incertezas calculadas pelo GUM de primeira ordem e superior, que tem reflexo nos limites dos intervalos de abrangência. Por outro lado, a forte assimetria das distribuições geradas pela MMC evidencia incapacidade do GUM de estimar corretamente o intervalo de confiança.

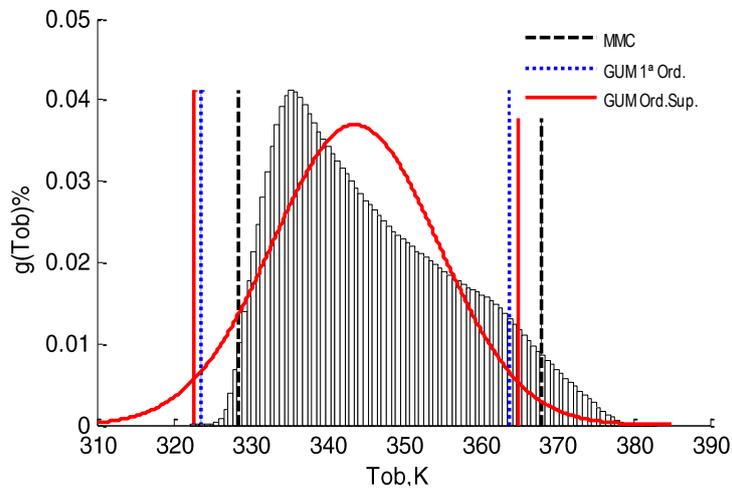


Figura 4.18 - Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para  $T_{ob} = 343K$ , com  $\varepsilon-T_{ref}$  não correlacionados.

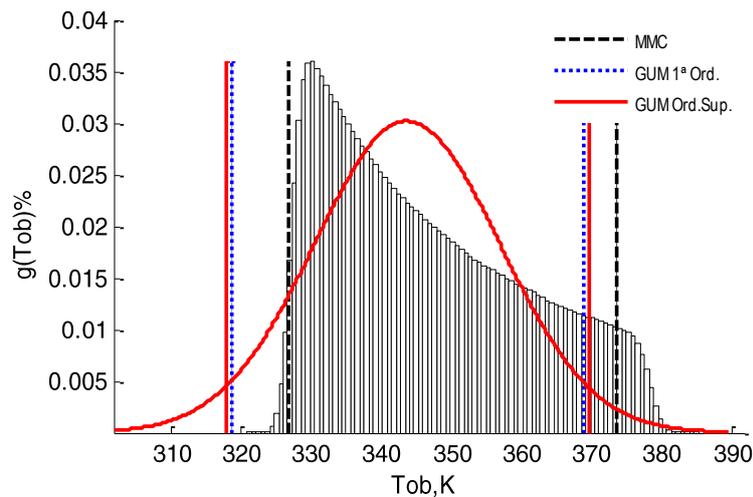


Figura 4.19 - Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para  $T_{ob} = 343K$ , com  $\varepsilon-T_{ref}$  correlacionados.

A conexão CH1, Figura 4.20, foi submetida ao ensaio de aquecimento não tendo sido gerado nenhum defeito em seus contatos. A conexão foi revestida com as cores branca, azul, preta e verde para elevar a emissividade da superfície e reduzir a incerteza de medição, conforme descrito na Tabela 3.1. A temperatura da medição cujos resultados estão relacionados na Tabela 4.11 foi de 318K, sendo a emissividade da superfície de 0,97. As Tabela 4.10 e Tabela A.5 relacionam os dados empregados nos cálculos realizados com MMC e o GUM (1ª Ordem), respectivamente.

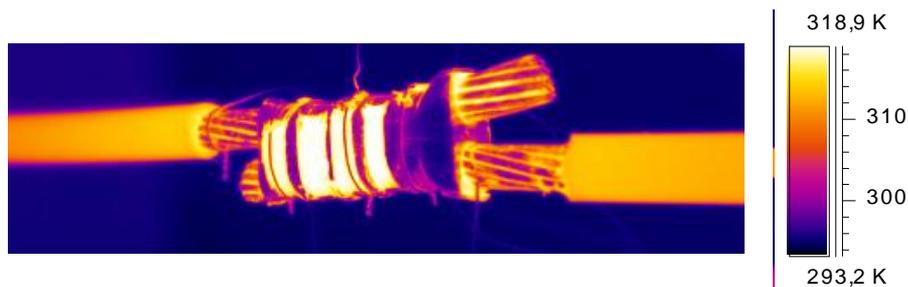


Figura 4.20 –Termograma da conexão CH1.

Tabela 4.10 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.5 do Anexo A ).

$T_{ob} = 318 K$

Grandeza	Valor	Unidade	Dispersão	Distribuição
Emissividade	0,97	-	$\Delta\varepsilon = \pm 0,05$	Uniforme
Temperatura refletida	293,5	K	$\Delta T_{ref} = \pm 1,0$	Uniforme
Temperatura atmosférica	293,5	K	$\Delta T_{atm} = \pm 1,0$	Uniforme
Distância	0,3	m	$\Delta d = \pm 0,1$	Uniforme
Sinal	189,65	-	$\sigma_S = 0,155$	Normal
Calibração	0,912	K	$\sigma_{T_{cal}} = 0,45$	Normal

Os resultados relacionados na Tabela 4.10 demonstram que um alto valor de emissividade produz uma significativa redução da incerteza de medição. As medições apresentadas foram realizadas na faixa de coloração branca, mas sobre todas as faixas de cores foram obtidos os resultados semelhantes.

Tabela 4.11 - Incerteza de medição pelos métodos GUM e MMC.

Método	M	$T_{ob}[K]$	$u(T_{ob})[K]$	Intervalo de abrangência (95%) [K]	$d_{inf}[K]$	$d_{sup}[K]$
GUM 1ªOrd.		318,7	0,9	[316,9 320,6]	0,3	0,3
GUM Ord.Sup.		318,7	0,9	[316,9 320,6]		
MMC	$1 \times 10^6$	318,8	0,8	[317,2 320,3]		

Novamente, o intervalo de abrangência obtido pela MMC foi inferior ao obtidos pelo GUM de primeira e ordem e superior. Contudo, observa-se que a tolerância numérica adotada,  $\delta = 0,5 K$  foi satisfeita. Portanto, a abordagem apresentada pelo GUM mostrou-se valida neste caso. Este resultado não é surpreendente, visto haver significativa simetria do MMC e forte tendência a uma distribuição normal, como mostra a Figura 4.21. Contudo, os limites do intervalo de abrangência dados pelo GUM mostram-se mais conservadores que aquele apresentado pela MMC, embora a diferença seja relativamente pequena.

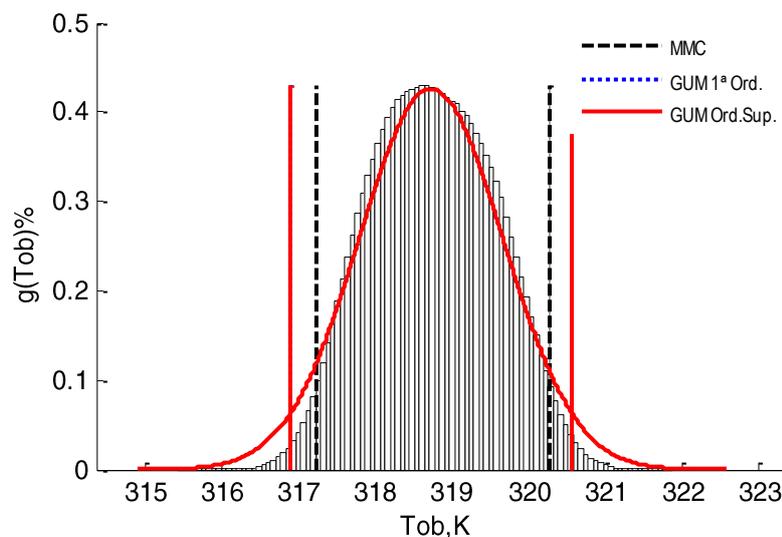
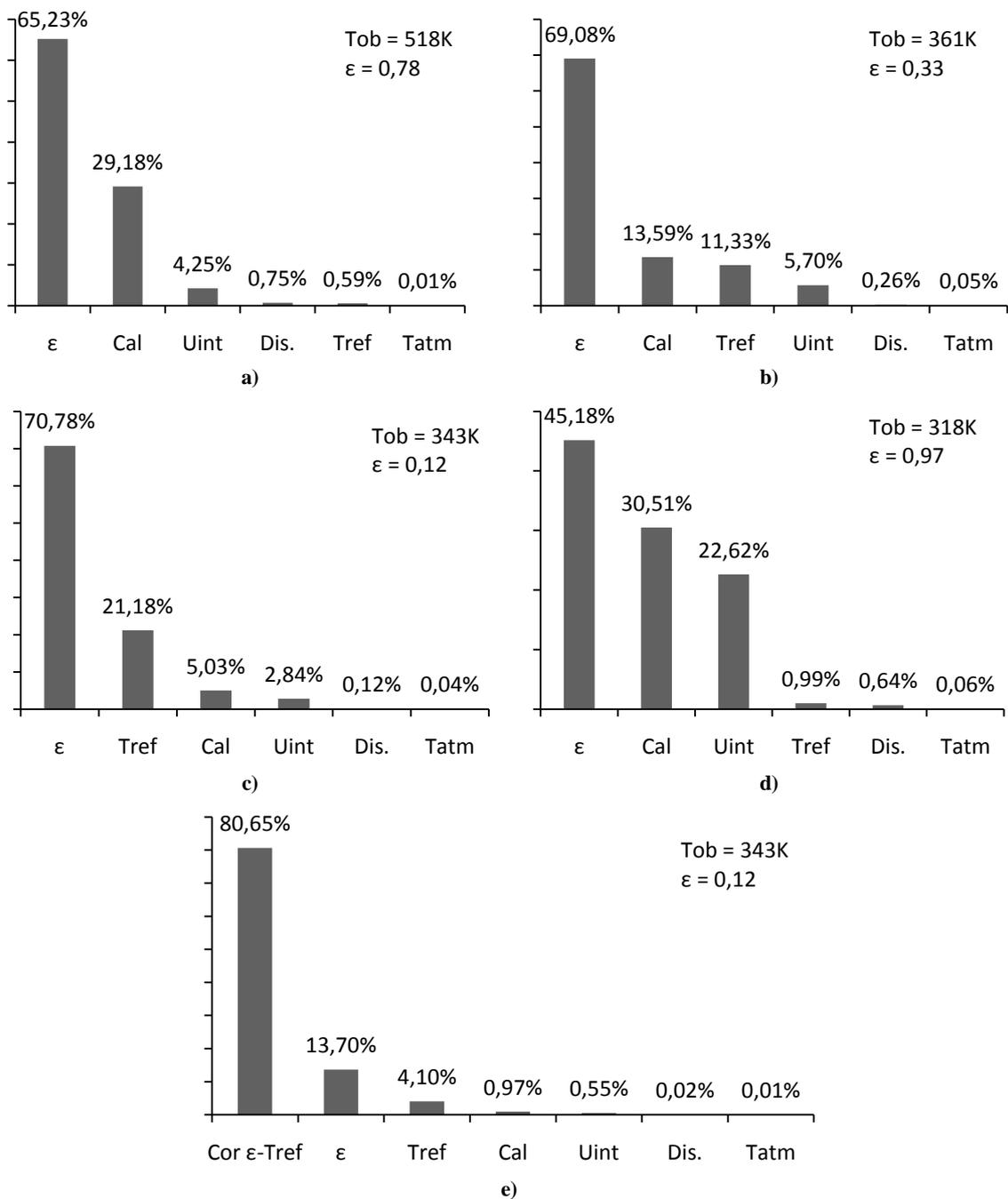


Figura 4.21 - Função de densidade de probabilidade GUM e MMC, para  $T_{ob} = 318K$ .

Dos resultados apresentados anteriormente, conclui-se que a maior fonte de incerteza de medição é proveniente da emissividade. Além disso, essa propriedade não apenas é maior contribuinte, como também, determina a participação de outras propriedades na incerteza. Apesar do GUM mostrar-se inadequado para determinação da incerteza expandida na maioria dos casos discutidos, o método provê um importante auxílio para a estimativa da contribuição de cada variável na incerteza de medição, como ilustra a Figura 4.22.

Baixos valores de emissividade elevam a contribuição da irradiação refletida, Figura 4.22a-c. Portanto, nestes casos a correlação  $\varepsilon-T_{ref}$  tende a tornar-se acentuada, podendo assumir a maior parcela de contribuição de incerteza, Figura 4.22e. Não obstante, pode-se inferir que a emissividade é o principal fator a afetar a simetria da distribuição. À medida que houve redução dos valores de emissividade 0,97; 0,78; 0,33 até 0,12, as

distribuições de probabilidade tornaram-se mais assimétricas, independentemente da temperatura medida.



ε:Emissividade; Tref: Temperatura refletida; Cal:Calibração; Uint: Incertezas intrínsecas; Dis.: Distância termovisor-objeto; Tatm: Temperatura atmosférica; Cor ε-Ter: Correlação entre ε e Tref.

Figura 4.22 – Contribuição das fontes de incerteza. a) Conexão CH2, b) Conexão CC2, c) Conexão CH3 e d) Conexão CH1, e) Conexão CH3 ( $\epsilon-T_{ref}$ , correlacionados).

A distância entre o termovisor e as amostras, assim como temperatura atmosférica, não apresentaram contribuição considerável para os resultados.

As contribuições das incertezas intrínsecas e da calibração do termovisor apresentaram pouca diferença em todos os resultados calculados pelo GUM, exceto na medição da temperatura de 518K, onde a participação da calibração se sobressaiu. Na medição da temperatura de 318K, com emissividade de 0,97, as contribuições percentuais das duas variáveis mantiveram-se pareadas e elevadas. Isto ocorreu devido ao alto valor da emissividade, que reduziu sua participação na incerteza, bem como da temperatura refletida. Consequentemente, a calibração e as incertezas intrínsecas, que caracterizam o instrumento, destacaram-se. Resultado que corrobora com a simetria obtida pela MMC, Figura 4.21, onde a calibração e as incertezas intrínsecas foram assumidas como distribuições normais, gerando uma distribuição semelhante a uma Gaussiana.

Devido à não-linearidade do modelo matemático e às distribuições assimétricas obtidas, o MMC mostrou-se mais adequado para o cálculo da incerteza de medição, apesar de apresentar deficiências para baixas emissividades.

Excetuando-se a medição de temperatura na amostra CC2, o comprimento dos intervalos de abrangência obtidos pelo MMC foram inferiores aos obtidos pelo GUM, sendo seu valor percentual (em relação temperatura medida) tanto maior quanto menor o valor da emissividade da superfície, Figura 4.23.

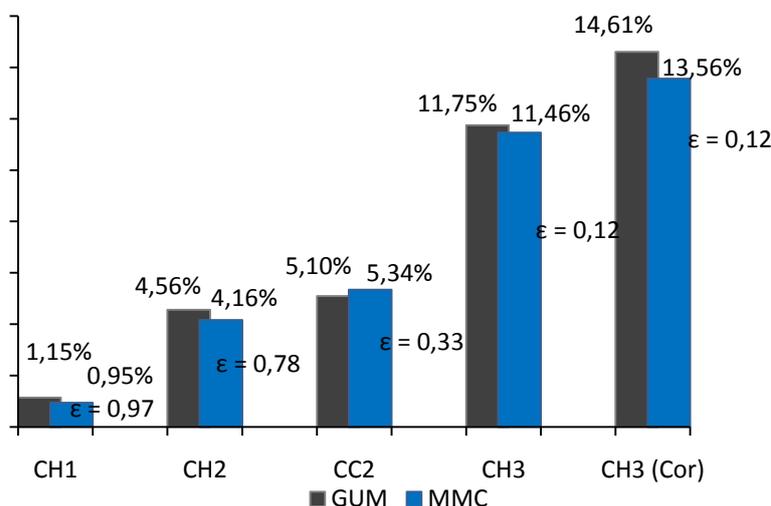


Figura 4.23 – Comparação entre o comprimento percentual dos intervalos de abrangência GUM e MMC em relação às temperaturas medidas.

Uma comparação mais efetiva entre o impacto da emissividade na qualidade da medição é mostrada nos gráficos da Figura 4.24 para ensaios realizados nas conexões CH1, CH3, CC1 e CC2, cujos resultados foram obtidos pelo MMC. A temperatura da conexão

elétrica foi medida em pontos de diferentes emissividades e a incerteza percentual (expandida) de cada uma delas confrontada com a temperatura de medição.

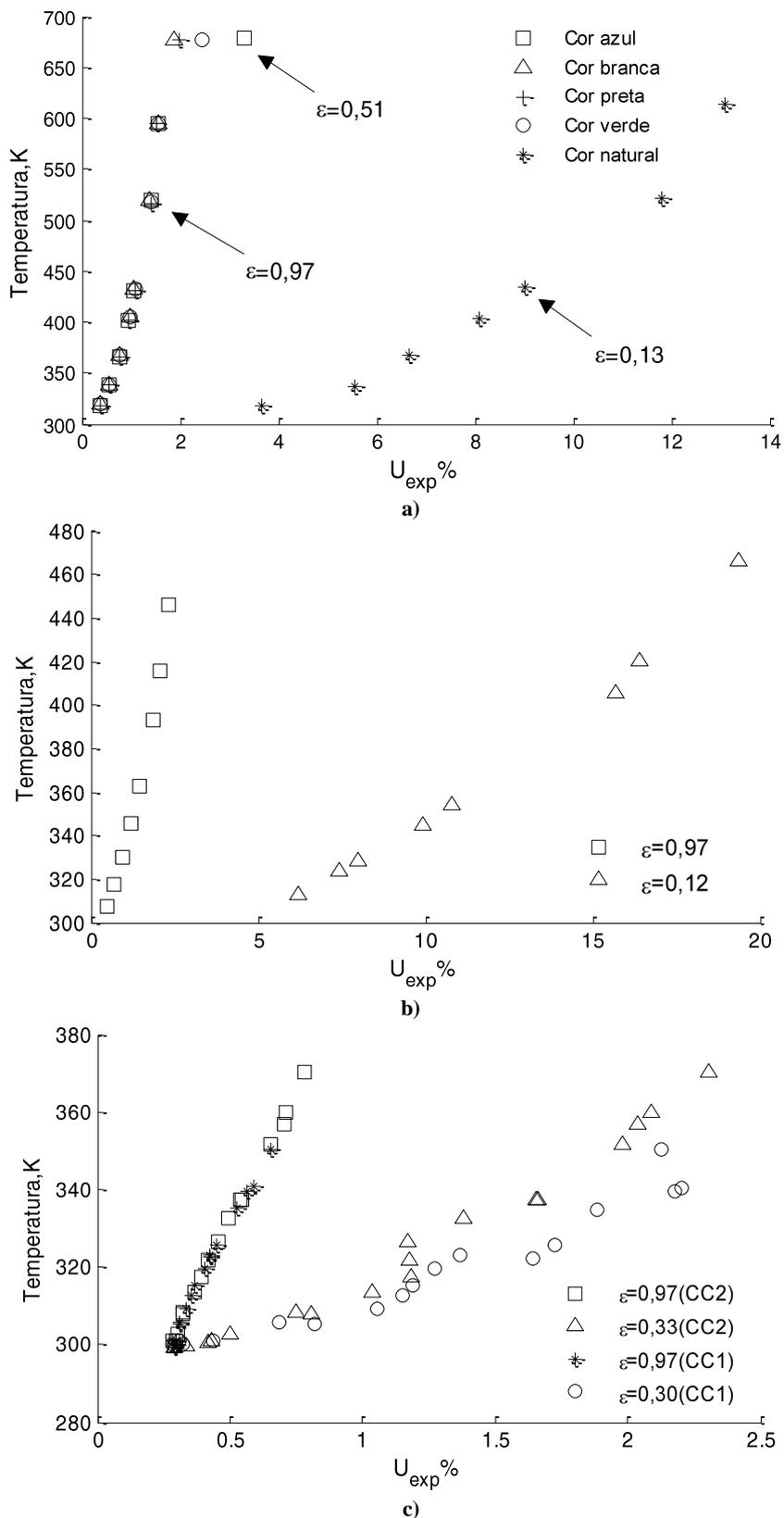


Figura 4.24 – Evolução da incerteza de medição em relação às temperaturas medidas, a) Ensaio na conexão CH1, b) Ensaio na conexão CH3, e c) Ensaio nas conexões CC1 e CC2.

Observa-se que o valor da incerteza de medição sofre incremento com a temperatura, independentemente do valor da emissividade, tendendo a ser mais discreto para emissividades elevadas e mais severo para baixas emissividades. Por exemplo, a incerteza percentual na medição temperatura de 520 K na conexão CH1, Figura 4.24a, é de aproximadamente 1,41% quando medida sobre uma das faixas de  $\varepsilon = 0,97$ . Por outro lado, uma medição no ponto de  $\varepsilon = 0,13$  resulta em uma incerteza de 11,81%. Um valor oito vezes superior. Portanto, revestir a superfície da conexão é um importante artifício para elevar sua emissividade e proporcionar medidas mais confiáveis de temperatura. Além disso, os ensaios demonstram que estes resultados podem ser alcançados independentemente da cor em que a superfície é coberta, como mostra a Figura 4.24a, para as medições realizadas sobre as faixas de cores azul, branca, preta e verde. Assim, a emissividade no espectro infravermelho é independente da cor da tinta. Contudo, a degradação da pintura reduz seu valor, como na faixa de cor azul, que sob alta temperatura decresceu de 0,97 para 0,51.

Nas Figura 4.24b-c o comportamento das incertezas percentuais é o mesmo da Figura 4.24a. Na Figura 4.24c, as incertezas seguem a mesma tendência para as medições realizadas nas conexões CC1 e CC2 nos pontos de  $\varepsilon = 0,97$ , embora as conexões tenham atingido temperaturas diferentes sob a mesma corrente elétrica. Já nos pontos de emissividade 0,33 (medições na conexão CC2) e 0,30 (medições na conexão CC1), as incertezas percentuais são ligeiramente mais elevadas que nos de  $\varepsilon = 0,97$ , seguindo a tendência dos demais resultados de que baixas emissividades proporcionam maiores incertezas.

#### **4.4 Diagnósticos de falhas em conexões elétricas**

Diagnosticar uma falha em uma conexão elétrica não significa apenas determinar o sobreaquecimento do dispositivo, mas inferir que este possui resistência elétrica acima dos valores normais ou tolerados. Portanto, há uma relação direta entre a temperatura da conexão e sua resistência elétrica que deve ser conhecida.

A Figura 4.25 mostra os resultados obtidos para os ensaios realizados nas conexões CH1 e CH3, onde as barras delimitam os intervalos de abrangência das incertezas das medições de suas temperaturas calculadas pelo MMC. As resistências medidas em corrente contínua (através de ponte Kelvin),  $R_{CC}$ , também são mostradas. A conexão CH1 apresentou resistência elétrica inicial de  $199\mu\Omega$ , enquanto que conexão CH3,

testada em dois momentos diferentes, apresentou resistência elétrica de  $85\mu\Omega$  no primeiro ensaio, e de  $227\mu\Omega$  no segundo, quando foi pintada com tinta de refratário, conforme descrito na Tabela 3.1.

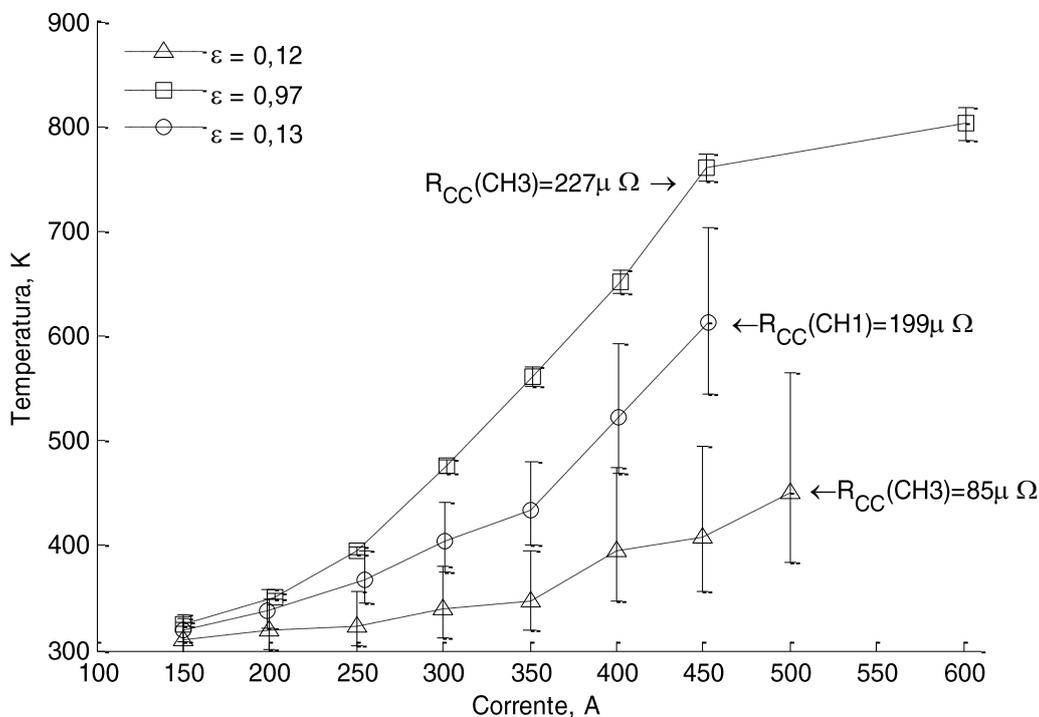


Figura 4.25 – Evolução temperatura em relação à corrente em conexões tipo H. Medições em baixa emissividade.

Os resultados demonstram que a conexão que apresentou maior resistência elétrica inicial,  $R_{CC}=227\mu\Omega$  atingiu a maior temperatura, seguida pela conexão cujo valor de resistência é de  $R_{CC}=199\mu\Omega$  e, finalmente, pela conexão cuja resistência inicial foi de  $R_{CC}=85\mu\Omega$ .

A conexão CH3 apresentou clara degradação de sua resistência do primeiro para o segundo ensaio tendo sido a submissão da conexão elétrica a uma sobrecarga o suficiente para prejudicar sua condutividade elétrica, mesmo por um período relativamente curto de tempo. Além disso, nos ensaios onde  $R_{CC}=227\mu\Omega$ , nota-se a interrupção abrupta da tendência de elevação da temperatura em relação ao incremento de corrente, observada no ponto destacado na Figura 4.25. Neste ponto, a degradação da conexão atingiu um valor irreversível, próximo a fusão do material.

As medições realizadas nas partes não recobertas por tinta das conexões CH1 e CH3 ( $R_{CC} = 85\mu\Omega$ ) de emissividade,  $\epsilon=0,13$ , e  $\epsilon=0,12$ , apresentaram valores de incerteza elevados. À corrente de 450 A, as incertezas foram da ordem de 80K e 70K,

respectivamente. Nos resultados obtidos na medição de temperatura da amostra CH3 ( $227\mu\Omega$ ), recoberta com tinta de refratário, as incertezas das medições foram menores, 13K a 450A, o que reflete a influência da emissividade na largura do intervalo de abrangência destas medições.

Observa-se que nas medições de temperatura até a corrente de até 300A o intervalo de abrangência das temperaturas das conexões CH1 e CH3 ( $85\mu\Omega$ ) se sobrepõem. Portanto, não é possível garantir a distinção dos valores de temperatura com base nas medições nestes pontos, pois os intervalos de confiança onde as temperaturas das duas conexões se sobrepõem. Considerando que as duas conexões apresentam situações diferentes quanto a sua degradação, inferir seu estado de degradação a partir destas medições de temperatura pode conduzir a um diagnóstico errôneo.

As medições realizadas nos pontos de alta emissividade permitem inferir com elevado grau de confiabilidade as temperaturas das conexões, como mostra a Figura 4.26. Observa-se que os intervalos de abrangência, calculadas com o MMC, são estreitos e não se sobrepõem, sendo possível distinguir claramente as temperaturas de cada conexão e a faixa provável onde se encontram.

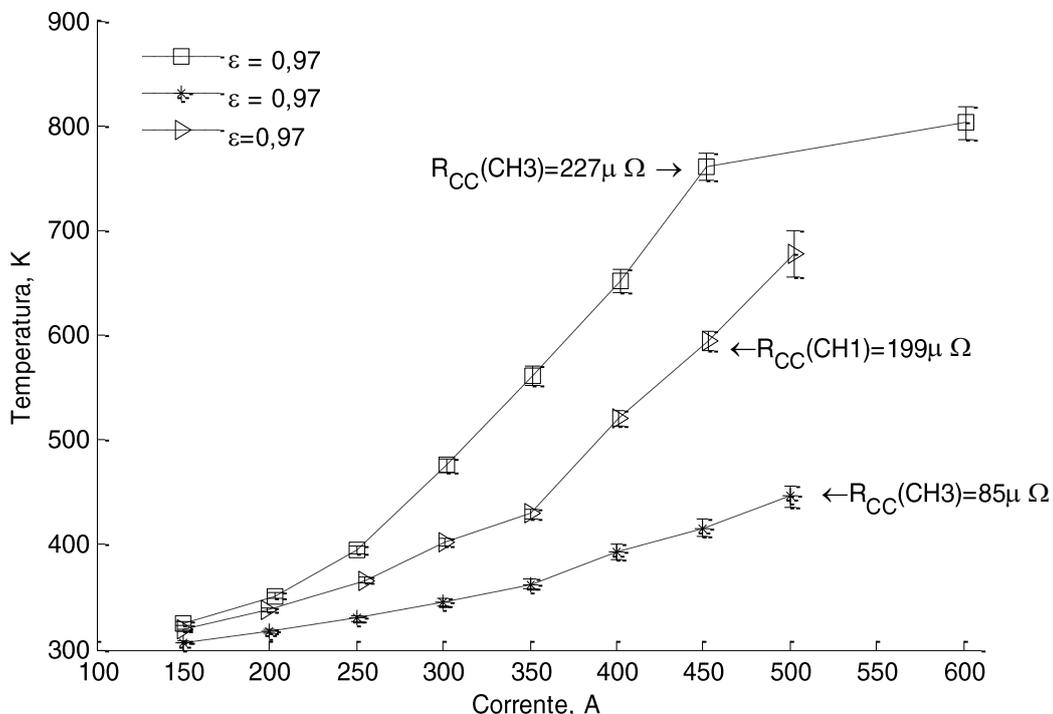


Figura 4.26 – Evolução temperatura em relação à corrente em conexões tipo H. Medições em alta emissividade.

Embora as resistências  $R_{CC}$  sejam referências importantes sobre o estado das conexões, seus valores não correspondem às resistências elétricas reais durante sua utilização em corrente alternada. Isto porque a resistência elétrica dos condutores é afetada pela sua temperatura, frequência e densidade de corrente elétrica conduzida.

A resistividade elétrica do condutor varia diretamente com sua temperatura, não sendo esta relação totalmente linear para ampla faixa de temperaturas. Assim, a resistência do condutor tende a valores maiores quando este opera em temperaturas acima da temperatura ambiente. O outro efeito ao qual cabo esta submetido está relacionado à redução efetiva de sua seção de condução, o chamado efeito pelicular (*skin effect*). Observado apenas em corrente alternada, este efeito se manifesta através da passagem de corrente apenas em torno das extremidades do cabo, sobre a superfície. Conseqüentemente, a densidade de corrente elétrica fluindo pelo interior do condutor diminui, tornando o fluxo de corrente não uniforme na seção do condutor, provocando o incremento de sua resistência elétrica. Conseqüentemente, o efeito combinado destes fatores provoca a elevação da resistência do condutor. Embora a literatura aborde sua ocorrência apenas voltada para condutores, o conjunto cabo-conexão está submetido aos mesmos fenômenos. A Figura 4.27 mostra as resistências elétricas das conexões CH1 e CH3 calculadas através da lei de Ohm. Os resultados da conexão CH3 são relativos à sua resistência  $R_{CC}$  de  $227\mu\Omega$ .

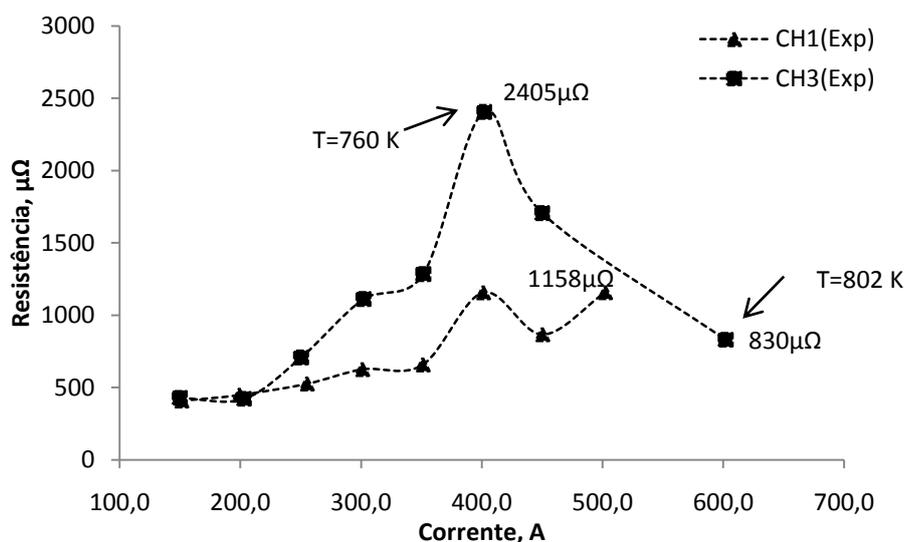


Figura 4.27 – Evolução da resistência em relação à corrente em conexões tipo H.

Nota-se grande variação da resistência das amostras ao longo das medições e de forma crescente com a corrente. Sobre a amostra CH3 registraram-se os maiores valores de

resistência elétrica. Ao fim do ensaio ( $T=802\text{ K}$ ), a resistência elétrica da conexão CH3 sofreu um decréscimo significativo de seu valor, o que reforça a hipótese de fusão do material e explica a interrupção da tendência da temperatura observada na Figura 4.26. Estes resultados corroboram o diagnóstico da manutenção, no qual conexões que apresentam os maiores valores de resistência elétrica atingem maiores temperaturas, logo maior tendência de falhas. Contudo, inferir as tolerâncias na resistência elétrica de uma conexão íntegra exige uma abordagem teórica dos efeitos que a temperatura e pelicular exercem sobre o conjunto conector-cabo, além da influência do próprio processo de dissipação térmica na conexão.

Resultados semelhantes foram obtidos dos ensaios realizados nas amostras CC1 e CC2, ambas sem encapsulamento, Figura 4.28. As incertezas de medição das duas conexões se sobrepõem até aproximadamente 275A. Neste ponto, as temperaturas das conexões CC1 (íntegra) e CC2 (defeituosa) encontram-se na faixa provável de  $[315,6\text{K}; 323,8\text{K}]$  e  $[322,8\text{K}; 330,4\text{K}]$ , respectivamente. Portanto, para esta corrente, há uma estreita faixa de valores onde a temperatura das conexões íntegra e defeituosa são comuns. Logo, não é possível classificar exatamente a conexão como íntegra ou defeituosa.

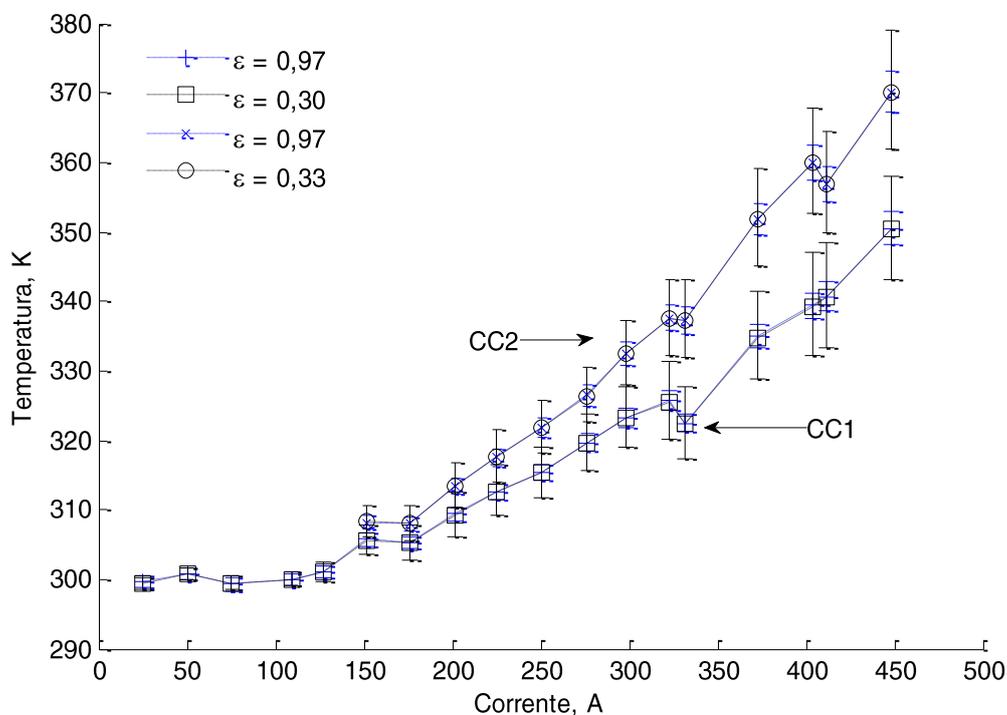
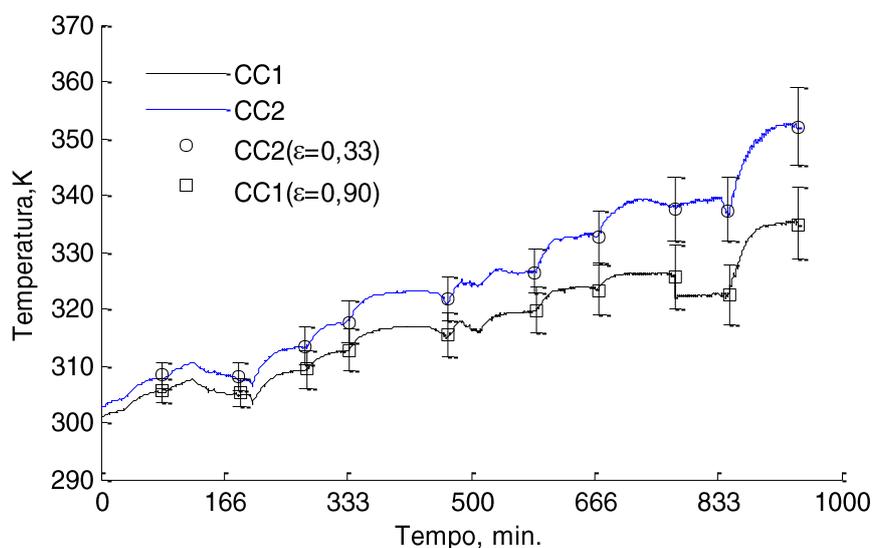
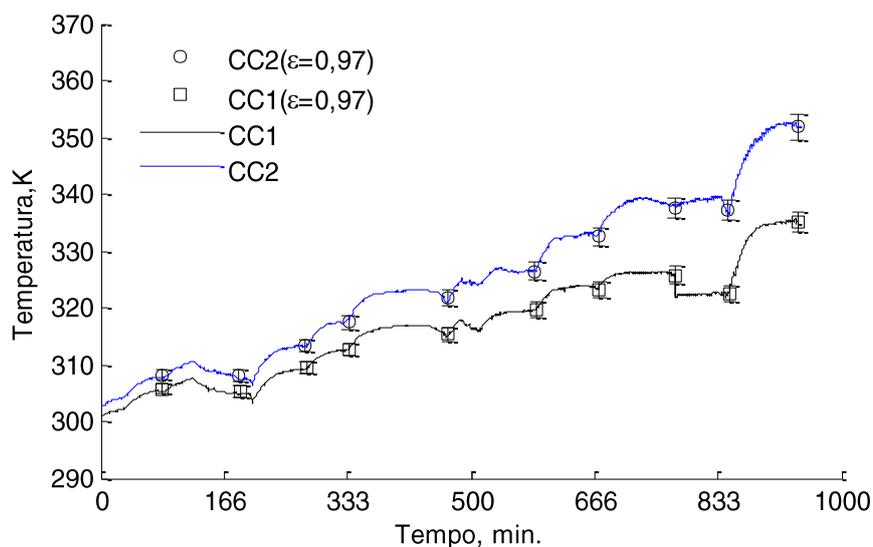


Figura 4.28 – Evolução temperatura em relação à corrente em conexões tipo cunha. Medições em alta e baixa emissividade.

As temperaturas destes ensaios foram monitoradas com termopares, que auxiliaram na determinação das emissividades das amostras CC1 ( $\epsilon=0,33$ ) e CC2 ( $\epsilon=0,30$ ), nas superfícies sem cobertura e 0,97 nas superfícies recobertas por tinta. A máxima diferença de temperatura registrada entre as conexões foi de 20K e a mínima de 2,5K. A Figura 4.29, exprime no mesmo gráfico, as medições realizadas por termopares (linhas contínuas) e pelo termovisor (marcadores) ao longo dos experimentos até a temperatura de aproximadamente 350K. As incertezas de medição nas medições por termografia são indicadas pelas barras, tendo sido calculadas pelo MMC.



a)



b)

Figura 4.29 – Medições de temperatura em conexões tipo cunha, a) baixa emissividade, b) alta emissividade.

Quando as medições feitas em baixas emissividades são confrontadas com a diferença entre as temperaturas das conexões íntegra e defeituosa, torna-se clara a necessidade de se avaliar o papel da incerteza de medição no diagnóstico de anomalias, principalmente, porque a grande maioria dos dispositivos elétricos utilizados possui emissividade inferior a 0,5.

Os resultados dos ensaios com as conexões CC1 e CC2 com encapsulamento (CC1 C.E. e CC2 C.E., respectivamente) são ilustrados graficamente na Figura 4.30, onde os dados são confrontados com as medições de temperatura sobre as conexões sem a proteção do encapsulamento (CC1 S.E. e CC2 S.E.) mostradas anteriormente na Figura 4.29. As temperaturas das caixas de proteção também são ilustradas (ENC CC1 e ENC CC2), assim como as medições em termografia. A incerteza de medição dos termopares é de 1%, em toda faixa medição de temperatura.

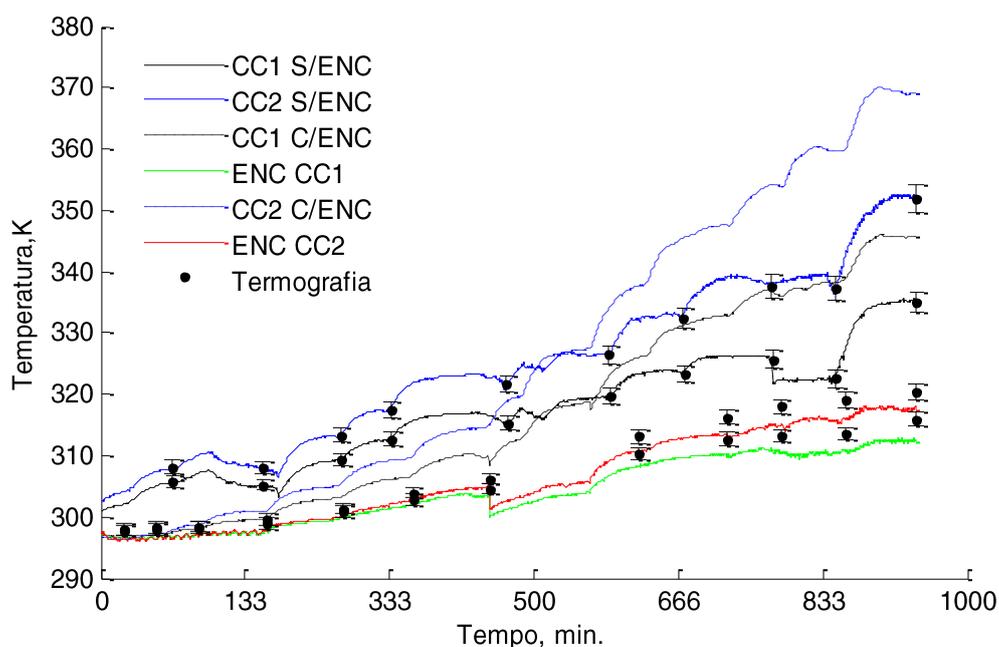


Figura 4.30 – Medições de temperatura em conexões tipo cunha, com e sem encapsulamento.

As linhas tracejadas e contínuas indicam as medições de temperatura das conexões com e sem encapsulamento, respectivamente. Nota-se que o encapsulamento reduz a dissipação térmica provocando a elevação da temperatura das conexões a valores superiores aos registrados quando as mesmas amostras não estavam protegidas pela caixa polimérica. Esta situação tem reflexo sobre a resistência elétrica da conexão, como exprime a Figura 4.31.

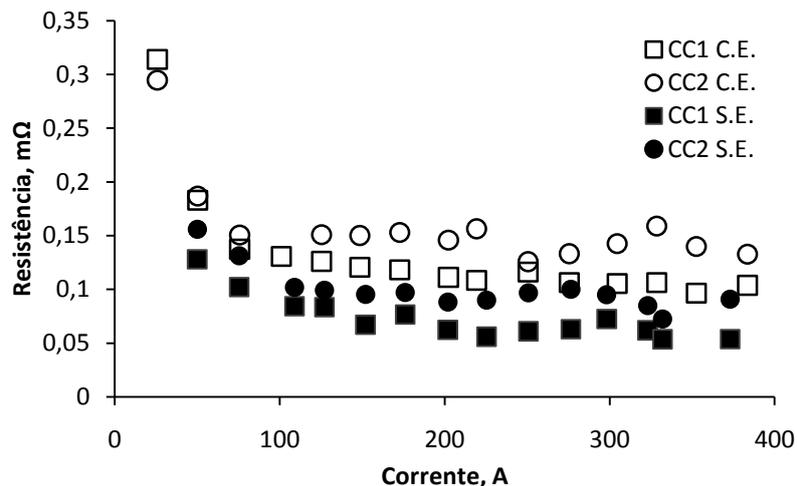


Figura 4.31 – Evolução da resistência em relação à corrente em conexões tipo cunha.

Assim como ocorreu com suas temperaturas, as conexões encapsuladas, CC1 C.E e CC2 C.E, apresentaram resistência elétrica superior ao registrado quando não estavam protegidas pelo invólucro. Portanto, embora o encapsulamento confira proteção e isolamento elétrico às conexões, sua utilização prejudica a dissipação térmica do dispositivo, que submetido a um elevado gradiente de temperatura, tem sua capacidade de condução prejudicada. Além disso, o diagnóstico de sobreaquecimento do dispositivo elétrico é prejudicado, pois não é possível relacionar a temperatura medida pela termografia infravermelha à temperatura das conexões internas ao invólucro.

Segue-se a comparação entre os resultados experimentais e teóricos dos resultados discutidos nesta seção.

### 5.3 Modelo experimental

O efeito combinado da temperatura e do efeito pelicular exerce um papel importante na redução da capacidade de condução de um condutor elétrico. O incremento da resistência elétrica devido à temperatura do material pode ser assumido como linear acima de uma faixa moderada de temperatura, 273,15K a 393,15K, onde o coeficiente de temperatura do condutor,  $\alpha$ , também apresenta comportamento linear (ASSOCIATION, 1982).

Contudo, em corrente alternada, os modelos lineares não podem mais ser aplicados, a menos que o efeito pelicular seja desprezado, o que não condiz com operação real dos sistemas elétricos de distribuição. Ainda sim, em projetos de linhas de transmissão, determinar o máximo carregamento em corrente contínua da linha é necessário para

estabelecer as perdas de potência, regulação de tensão, máxima temperatura de operação da linha, estabilidade, dentre outros fatores (WESTINGHOUSE ELECTRIC, 1964).

Todavia, para se quantificar os efeitos da temperatura e pelicular sobre as conexões elétricas torna-se necessário estender os conceitos já concebidos para condutores aos diferentes tipos de dispositivos conectores. A aplicação dos conceitos envolvidos nestes fenômenos às conexões elétricas é um importante passo para tornar o diagnóstico de falhas mais confiável.

Neste aspecto, o trabalho publicado por Ferreira *et al.* (2011) fornece uma importante contribuição ao setor de manutenção, ao buscar estabelecer o comportamento térmico da conexão investigando a relação entre a resistência elétrica com sua temperatura, bem como, de sua dissipação térmica. O modelo proposto será brevemente abordado a seguir.

O fluxo de corrente elétrica ao longo de uma conexão (ou ainda, de um condutor) encontra como obstáculo a resistência elétrica do material do qual a conexão é feita, além da resistência de contato entre o conector e os cabos. Embora a conexão elétrica seja confeccionada de forma a minimizar sua resistência, o fluxo de corrente por ela constituirá uma geração de potência, cuja dissipação se dará pelos processos convectivos e radiativos. Assim, a perda (geração) e a dissipação de potência na conexão para o meio são relacionadas pela Equação (5.1):

$$\dot{Q}_{gerado} = \dot{Q}_{dissipado} \quad (5.1)$$

Onde,  $\dot{Q}_{gerado}$  e  $\dot{Q}_{dissipado}$  correspondem à perda por efeito Joule e à dissipação de potência por convecção e radiação, respectivamente. Devido ao comportamento não linear entre a temperatura e a resistência elétrica do material condutor, além do efeito pelicular atribuído à frequência da corrente elétrica, o efeito Joule torna-se (FERREIRA *et al.*, 2011):

$$\dot{Q}_{gerado} = \frac{R_0 i_0^2}{1 + f_e(K - 1)} \quad [W] \quad (5.2)$$

Onde:

$R_0$  : Resistência elétrica de referência [ $\Omega$ ];

$i_0$  : corrente elétrica [A];

$f_e$  : fração efetiva de área da seção por onde  $i_0$  flui;

$K$  : constante de proporcionalidade (função do coeficiente de temperatura do material);

E a dissipação de potência por convecção e radiação,  $\dot{Q}_{dissipado}$ , é dada por:

$$\dot{Q}_{dissipado} = (h_{conv} + h_{rad})A_{sup}\Delta T \quad [W] \quad (5.2)$$

Onde:

$h_{conv}$  : coeficiente de transferência de calor por convecção  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ ;

$h_{rad}$  : coeficiente de transferência de calor por radiação  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ ;

$\Delta T$  : diferença de temperatura entre a superfície da conexão e o ambiente, [K];

O coeficiente  $h_{rad}$  é dado por:

$$h_{rad} = \sigma\varepsilon(T_s^2 + T_{amb}^2)(T_s + T_{amb}) \quad \left[\frac{W}{m^2K}\right] \quad (5.3)$$

Onde:

$\sigma$  : Constante de Stephan-Boltzman,  $5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2K^4}\right]$  ;

$\varepsilon$  : emissividade da superfície;

$T_s$  : temperatura da superfície da conexão [K];

$T_{amb}$  : temperatura ambiente [K];

O modelo proposto foi solucionado numericamente para alguns dos resultados apresentados anteriormente. Em todas as simulações, foi assumido um modelo de convecção natural, e condição de regime permanente. Como demonstrando, a aplicação do modelo exige o conhecimento de um número significativo de variáveis. Contudo, as dificuldades de aplicação do modelo se restringem a poucas delas. Como variáveis de entrada, tem-se a corrente elétrica, tensão e temperatura ambiente, que podem ser medidas ou estimadas diretamente. O cálculo da constante  $K$  e da fração efetiva de condução,  $f_e$ , é realizado com base no conhecimento das propriedades dos dispositivos

utilizados, como o coeficiente de temperatura e a seção do condutor. A determinação do coeficiente convectivo é o maior obstáculo do modelo teórico. A geometria da conexão, a velocidade do ar e o processo de dissipação térmica tornam sua estimativa uma tarefa complexa. O coeficiente convectivo pode variar cerca de 20% impactando fortemente o resultado (INCROPERA; DEWITT, 1992).

A solução do modelo fornece a resistência elétrica, a temperatura superficial da conexão, uma nova estimativa de corrente elétrica, além dos coeficientes convectivo e radiativo obtidos ao final das iterações.

A Figura 4.32 compara os resultados de resistência elétrica calculados pelo modelo da Equação (5.1) com os resultados experimentais já apresentados na Figura 4.27 relativos à conexão CH3, de resistência  $R_{CC}=227\mu\Omega$ . Nota-se que os resultados teóricos seguem a tendência da variação da resistência elétrica observada nos ensaios. Embora haja dispersão entre os valores teóricos e experimentais de resistência, o modelo estimou a temperatura da conexão com significativa concordância ao longo do incremento de corrente, como mostrado na Figura 4.33.

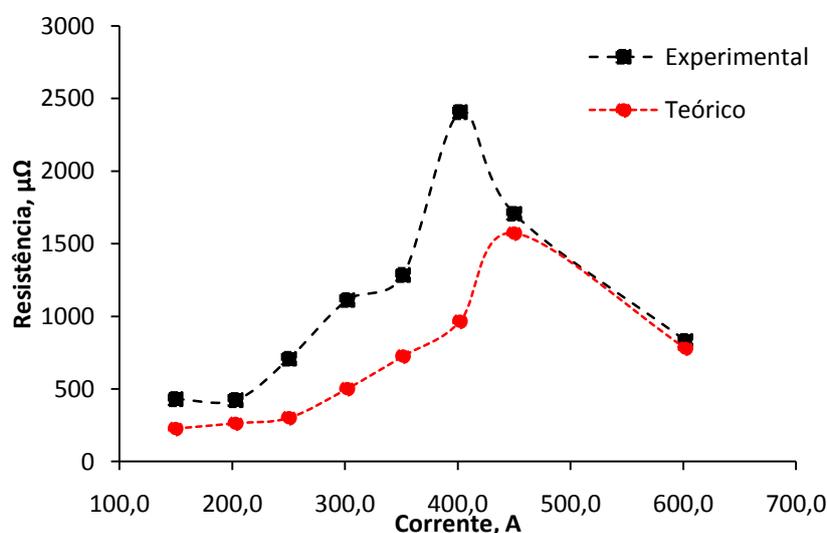


Figura 4.32 – Evolução da resistência em relação à corrente na amostra CH3. Comparação entre resultados teóricos e experimentais.

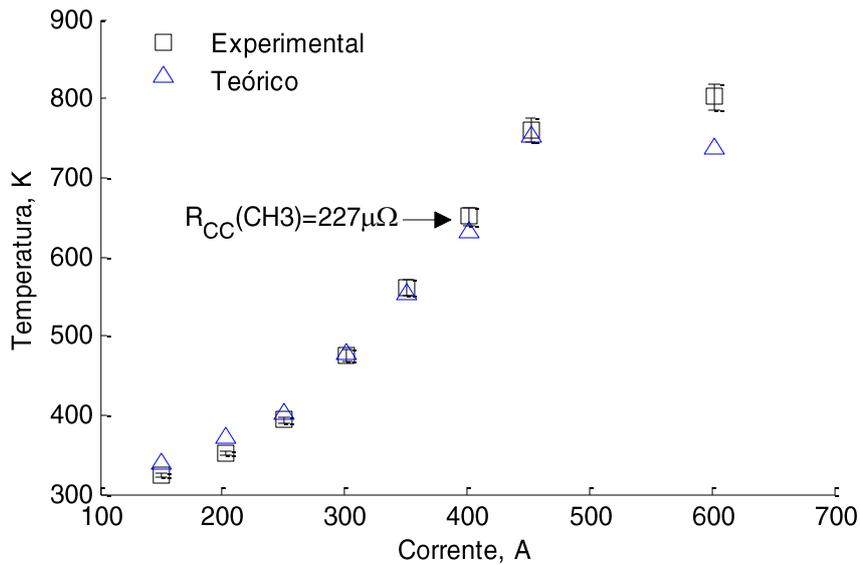


Figura 4.33 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais da variação da temperatura na amostra CH3.

Quando aplicado aos dados da amostra CH1, o modelo forneceu os seguintes resultados como estimativa da resistência elétrica da conexão, Figura 4.34.

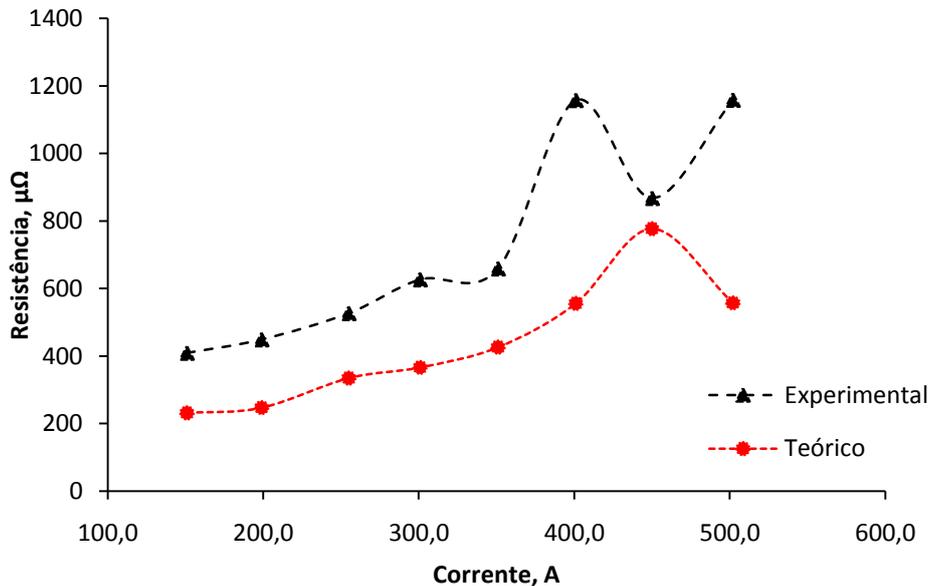


Figura 4.34 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais. Evolução da resistência em relação à corrente na amostra CH1.

Novamente, o modelo exprime a tendência da resistência elétrica sofrer variação de seu valor ao longo de sua operação. A Figura 4.35 mostra os resultados da estimativa da temperatura com base no modelo. Neste caso, as temperaturas calculadas estiveram além das incertezas experimentais das medições de temperatura realizadas com termografia.

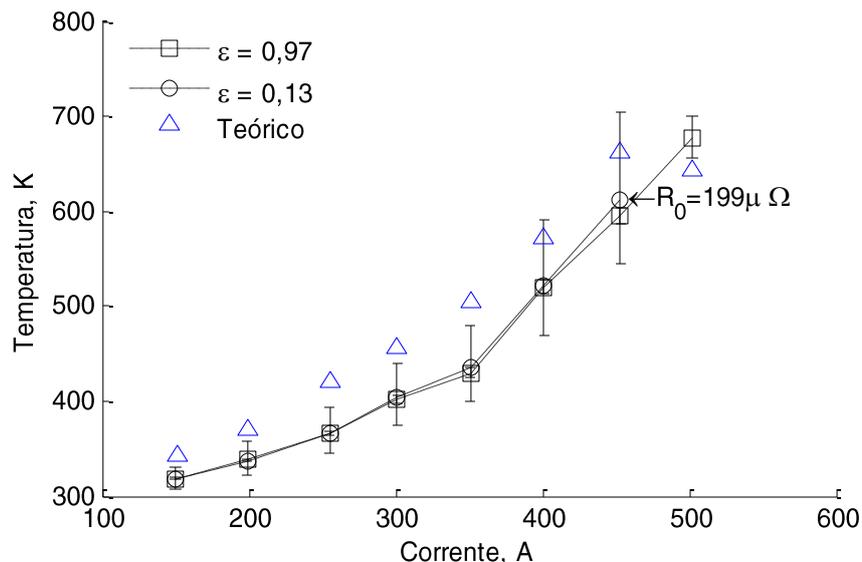
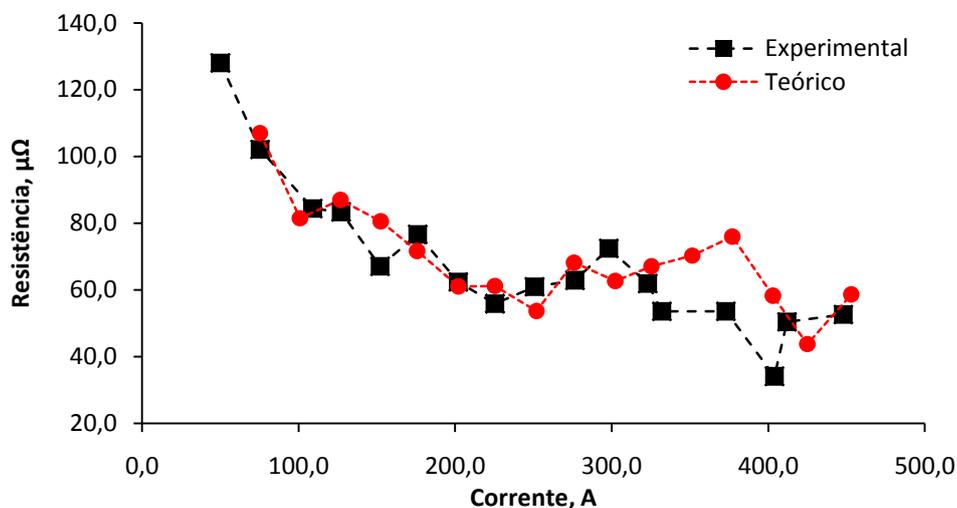


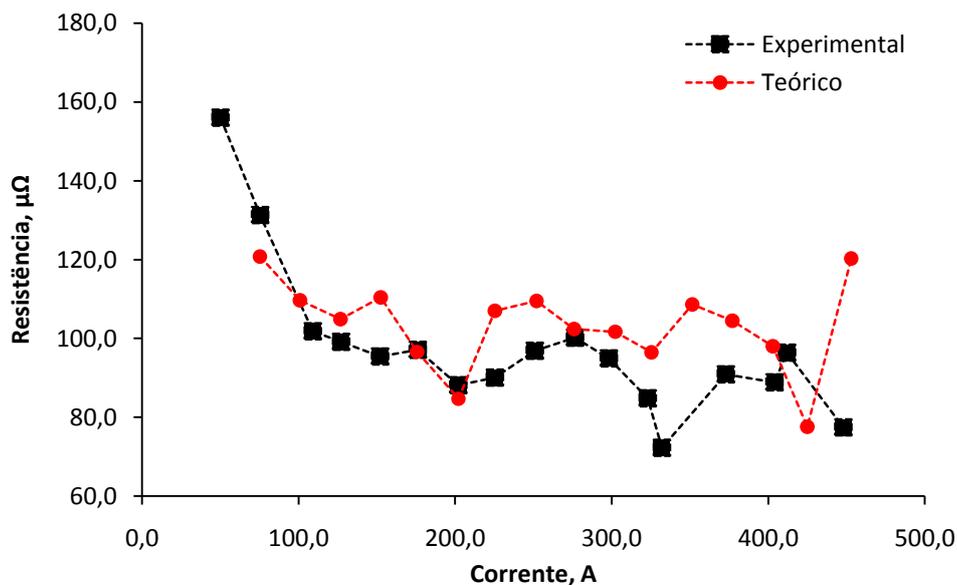
Figura 4.35 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais da variação da temperatura na amostra CH1.

Os resultados apresentados pelo modelo quando aplicado as conexões CC1 e CC2 apresentaram resultados mais satisfatórios, embora ainda exprimam uma tendência. A Figura 4.36 mostra os resultados da comparação entre os valores de resistências elétricas calculadas em relação às medidas durante os ensaios.

Os resultados refletidos da modelagem refletem de maneira coerente os comportamentos observados para as resistências das conexões cunha íntegra, CC1, e defeituosa, CC2. Com os valores de resistência calculados o modelo determinou as temperaturas das conexões para a faixa de corrente aplicada. A comparação entre os dados medidos e calculados são mostrados na Figura 4.37.

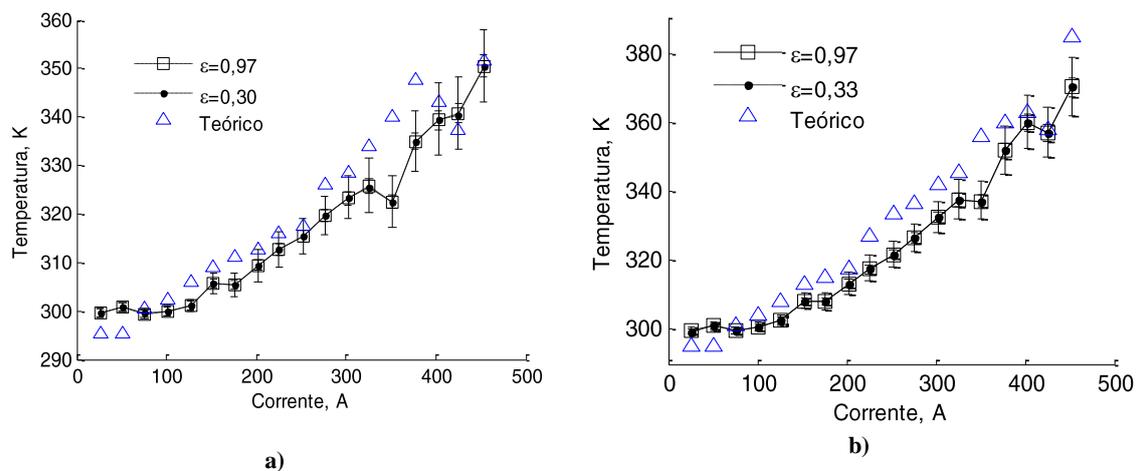


a)



b)

Figura 4.36 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais, a) amostra CC1, b) amostra CC2. Evolução da resistência em relação à corrente.



a)

b)

Figura 4.37 – Comparação entre resultados teóricos e experimentais da variação da temperatura, a) amostra CC1, b) amostra CC2.

Os resultados alcançados demonstram que um modelo matemático que exprima o comportamento termoelétrico das conexões utilizadas é plenamente possível, ainda que os resultados sejam limitados às condições em que foram aplicados. Neste aspecto é importante destacar que o desconhecimento do coeficiente convectivo foi o maior responsável pelas dispersões obtidas em relação às medições realizadas. A influência do coeficiente convectivo pode provocar erros de 5% a 18% nos valores estimados de temperatura.

Todavia, diante da complexidade imposta pelo meio no qual as inspeções são realizadas e a grande variabilidade de equipamentos e dispositivos utilizados, não é possível, nem desejável, um modelo matemático exato. Mas um modelo que expresse, com o grau de exatidão requerido, o comportamento do dispositivo, provendo subsídios suficientes para o gestor de ativos ser capaz de avaliar o estado dos equipamentos utilizados, e, especificamente neste contexto, conexões elétricas.

#### **4.5 Inspeção termográfica**

A inspeção termográfica foi realizada na Subestação Adelaide Cemig após as 16:00 horas do dia 27 de outubro de 2011. A temperatura no local era de 25,2 °C e a umidade relativa do ar de 30%. O procedimento ocorreu durante uma inspeção diretiva executada por um técnico da empresa Cemig, e na ocasião, foi possível avaliar um ponto de anomalia já conhecido. A emissividade utilizada durante foi de 0,75, sendo um valor comumente adotado por setores de manutenção em inspeções de sistemas elétricos.

A Figura 4.38 ilustra as conexões de saída de um religador às chaves seccionadoras A, B e C. A Chave A já havia apresentado anomalia térmica em inspeção anterior sendo seu estado monitorado desde então.



Figura 4.38 - Chaves seccionadoras.

A Figura 4.39 apresenta os resultados das medições de temperatura, onde são destacados os pontos de anomalia térmica,  $T_p$ , e de referência,  $T_{pref}$ , respectivamente. As condições em que as medições foram realizadas, bem como, os dados para o cálculo

da incerteza de medição pelo MMC são resumidas na Tabela 4.12 (vide Tabela A.6, à Tabela A.13, Anexo A, para incerteza de medição pelo GUM de 1ª Ordem).

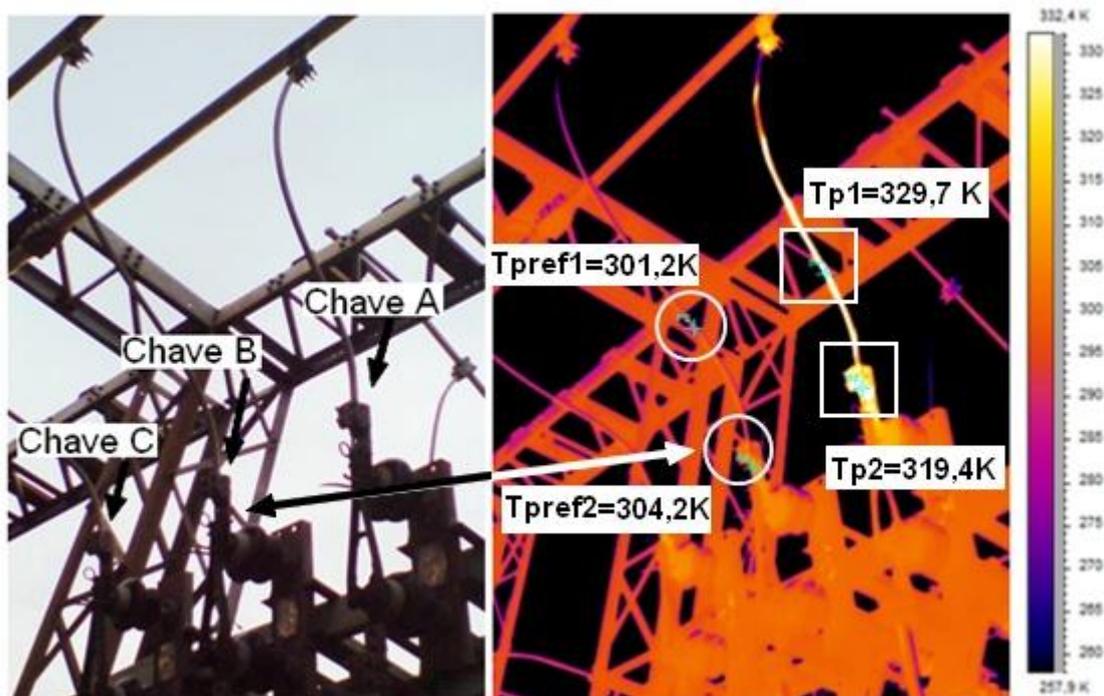


Figura 4.39 – Diagnóstico de anomalia nos cabos de derivação das chaves seccionadoras (À direita).À esquerda, imagem no visível.

Tabela 4.12 – Condições de medição e dados para o cálculo de incerteza pelo MMC (GUM 1ª Ord. vide Tabela A.6 à Tabela A.13 do Anexo A ).

Grandeza	Valor	Unidade	Dispersão	Distribuição
Emissividade	0,75	-	$\Delta\varepsilon = \pm 0,05$	Uniforme
Temperatura refletida	298,35	K	$\Delta T_{ref} = \pm 1,0$	Uniforme
Temperatura atmosférica	298,35	K	$\Delta T_{atm} = \pm 1,0$	Uniforme
Distância	6,0	m	$\Delta d = \pm 1,0$	Uniforme
Sinal <sup>4</sup>	202,38	-	$\sigma_s = 0,5\%$ do Sinal	Normal
Calibração	1,130	K	$\sigma_{T_{cal}} = 0,56$	Normal

A Tabela 4.13 reúne os resultados obtidos nas medições de temperatura nos pontos Tp1 e Tpref1, e a diferença entre estas medições,  $\Delta T_{pref1}$ . Os resultados obtidos pelos métodos GUM e MMC são coincidentes, tendo sido a maior diferença entre os

<sup>4</sup> Neste caso, não houve medições repetidas tendo sido a dispersão assumida para o sinal de 0,5% de S uma estimativa compatível com as incertezas intrínsecas quantificadas pelo GUM.

intervalos de abrangência 0,1 K. Logo, avaliação da incerteza de medição pode ser realizada indistintamente pelos dois métodos.

Tabela 4.13 – Resultados das medições nos pontos Tp1, Tpref1 e cálculo do  $\Delta T_{pref1}$  ( $\epsilon=0,75$ ).

**Ponto Tp1**

Método	M	$T_{ob}[K]$	$u(T_{ob}), [K]$	Intervalo de abrangência (95%) [K]		$d_{inf}[K]$	$d_{sup}[K]$
GUM 1ªOrd.		329,7	1,3	[327,3	332,2]	0,1	0,0
GUM Ord.Sup.		329,7	1,3	[327,3	323,2]		
MMC	$1 \times 10^6$	329,7	1,3	[327,4	332,2]		

**Ponto Tpref1**

GUM 1ªOrd.		301,2	0,5	[300,3	302,2]	0,1	0,1
GUM Ord.Sup.		301,2	0,5	[300,3	302,2]		
MMC	$1 \times 10^6$	301,2	0,6	[300,2	302,3]		

**$\Delta T_{pref1}$**

GUM 1ªOrd.		28,5	1,4	[25,9	31,2]	0,0	0,1
GUM Ord.Sup.		28,5	1,4	[25,9	31,2]		
MMC	$1 \times 10^6$	28,6	1,4	[25,9	31,3]		

A diferença entre o ponto de anomalia térmica e o de referência,  $\Delta T_{pref1}$ , foi de 28,6 K, sendo que devido à incerteza das medições de Tp1 e Tpref1, pode-se afirmar, com 95% de probabilidade, que o valor de  $\Delta T_{pref1}$  se encontra na faixa de 25,9 K a 31,3 K. Observa-se, portanto, que a incerteza nas medições de temperatura torna impraticável atribuir um valor único a  $\Delta T_{pref}$ , mas apenas uma faixa provável onde este se encontra. Consequentemente, o valor de  $\Delta T_{pref1}$  poderia figurar em duas faixas consecutivas de ações o que pode conduzir a uma ação errônea sobre o destino do ativo.

Esta situação ocorre no diagnóstico de anomalia sobre o conector da chave seccionadora de temperatura Tp2. A Tabela 4.14 mostra os resultados da medição neste ponto, no ponto de referência, Tpref2 e a diferença entre eles,  $\Delta T_{pref2}$ .

Tabela 4.14 – Resultados das medições nos pontos Tp2, Tpref2 e cálculo do  $\Delta T_{pref2}$  ( $\epsilon=0,75$ ).

**Ponto Tp2**

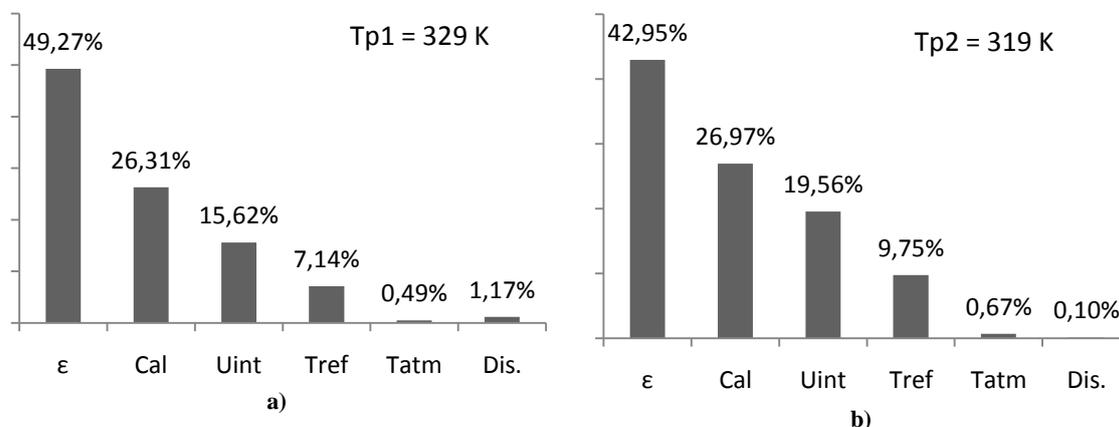
Método	M	$T_{ob}[K]$	$u(T_{ob})[K]$	Intervalo de abrangência (95%) [K]		$d_{inf}[K]$	$d_{sup}[K]$
GUM 1ªOrd.		319,4	1,0	[317,5	321,2]	0,2	0,1
GUM Ord.Sup.		319,4	1,0	[317,5	321,3]		
MMC	$1 \times 10^6$	319,4	0,9	[317,7	321,2]		

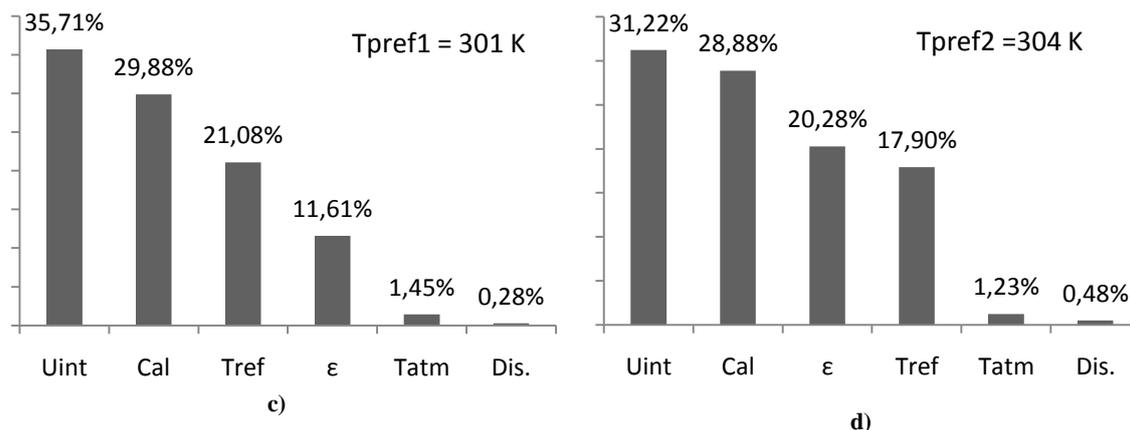
**Ponto Tpref2**

GUM 1ºOrd.		304,2	0,5	[303,1	305,2]	0,1	0,1
GUM Ord.Sup.		304,2	0,5	[303,1	305,2]		
MMC	$1 \times 10^6$	304,2	0,5	[303,2	305,1]		
<b><math>\Delta T_{pref2}</math></b>							
GUM 1ºOrd.		15,2	1,1	[13,1	17,4]	0,2	0,1
GUM Ord.Sup.		15,2	1,1	[13,1	17,4]		
MMC	$1 \times 10^6$	15,2	1,1	[13,2	17,3]		

Embora  $\Delta T_{ref2}$  seja 15,2 K a incerteza de medição permite ao usuário afirmar que o valor provável de  $\Delta T_{pref2}$  encontra-se na faixa de 13,2K a 17,3K. Tomando como base os critérios de  $\Delta T_{pref}$  apresentados na Tabela 3.3 da norma NETA, o valor de  $\Delta T_{pref2}$  estaria, simultaneamente, nas faixas de provável indicativo de falha (4K-15K) e reparo imediato (>15K). Logo, assumir a anomalia como pertencente à primeira ação recomendada (provável indicativo de falha) poderia conduzir a uma subestimativa da falha, caso a gravidade do problema exija um intervenção imediata. Por outro lado, assumi-la como pertencente à segunda faixa conduziria a uma parada desnecessária, caso a severidade do defeito ainda seja baixa. Haja visto que a incerteza de medição não pode ser totalmente eliminada, torna-se necessário controlar as influências sobre a medição para que se possa alcançar maior confiabilidade nas medições e, consequentemente, nas decisões a serem tomadas a cerca do ativo.

A Figura 4.40 mostra a participação das variáveis na incerteza da medição das temperaturas Tp1, Tpref1, Tp2 e Tpref2 com emissividade de 0,75.





ε: Emissividade; Tref: Temperatura refletida; Cal: Calibração; Uint: Incertezas intrínsecas; Dis.: Distância termovisor-objeto; Tatm: Temperatura atmosférica.

Figura 4.40 - Contribuição das fontes de incerteza. Pontos de medição a) Tp1, b) Tp2, c) T<sub>pref1</sub> e d) T<sub>pref2</sub>.

Nas medições das temperaturas Tp1 e Tp2 (Figura 4.40a e 4.39b, repectivamente) a maior fonte de incerteza foi a emissividade das conexões, seguida da calibração do termovisor. Resultados semelhantes foram observados nos ensaios em laboratório, em que emissividades elevadas tendem a reduzir a contribuição de fontes que caracterizam o meio e acentuar a contribuição das componentes que caracterizam a dispersão do instrumento. Portanto, nas medições das temperaturas de T<sub>pref1</sub> e T<sub>pref2</sub> (Figura 4.40c e 4.39d, repectivamente) as incertezas intrínsecas, seguidas pela calibração, constituíram as maiores contribuintes. As temperaturas medidas nestes pontos são pouco superiores à temperatura ambiente, motivo pelo qual a emissividade não é a maior contribuinte para a incerteza. A temperatura atmosférica e a distância não apresentaram contribuição significativa para incerteza.

A Figura 4.41 ilustra as distribuições de probabilidade obtidas pelo MMC e GUM. Observa-se grande similaridade entre as distribuições geradas pelos dois métodos devido a elevada emissividade.

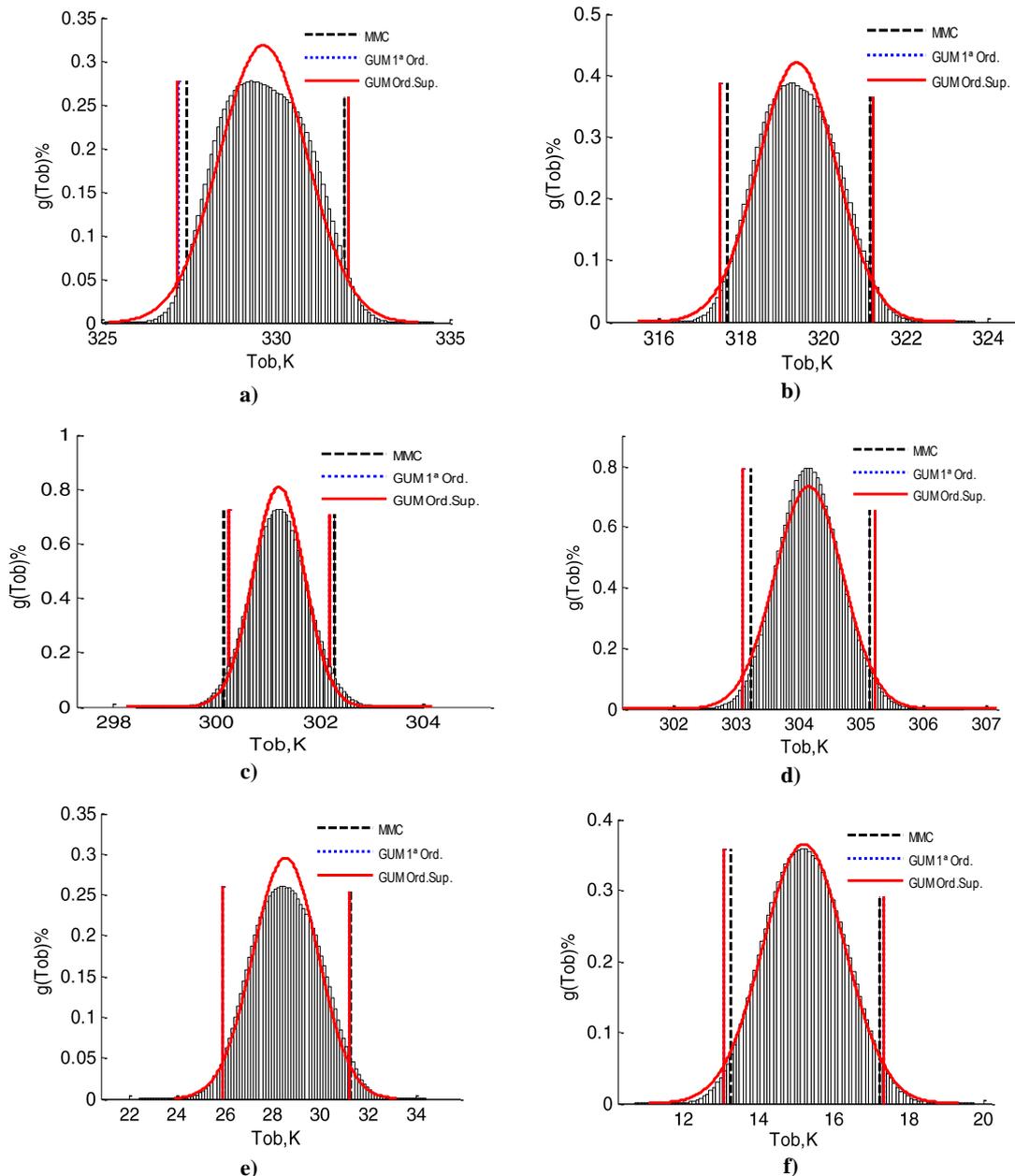


Figura 4.41 – Distribuições de probabilidade ( $\epsilon=0,75$ ) - GUM e MMC, a)  $T_{p1}$ , b)  $T_{p2}$ , c)  $T_{pref1}$ , d)  $T_{pref2}$ , e)  $\Delta T_{pref1}$  e d)  $\Delta T_{pref2}$

A emissividade de 0,75 é normalmente adotada por empresas do setor elétrico em inspeções termográficas. Contudo, dada à variabilidade dos materiais elétricos a emissividade da superfície difere do valor arbitrado. Em inúmeros ensaios em laboratório, as superfícies com aspecto de alumínio polido apresentam baixos valores de emissividade. No contexto da inspeção realizada, é razoável afirmar que as emissividades das superfícies medidas diferem de 0,75. Contudo, não é possível realizar medições que permitam estimar a emissividade dos componentes elétricos, por se encontrarem em operação. Para efeito de análise comparativa, as medições foram

recalculadas para uma emissividade de 0,30 considerada para materiais de alumínio fortemente oxidados (FLIR SYSTEMS, 2010b), Tabela 4.15 e

Tabela 4.16.

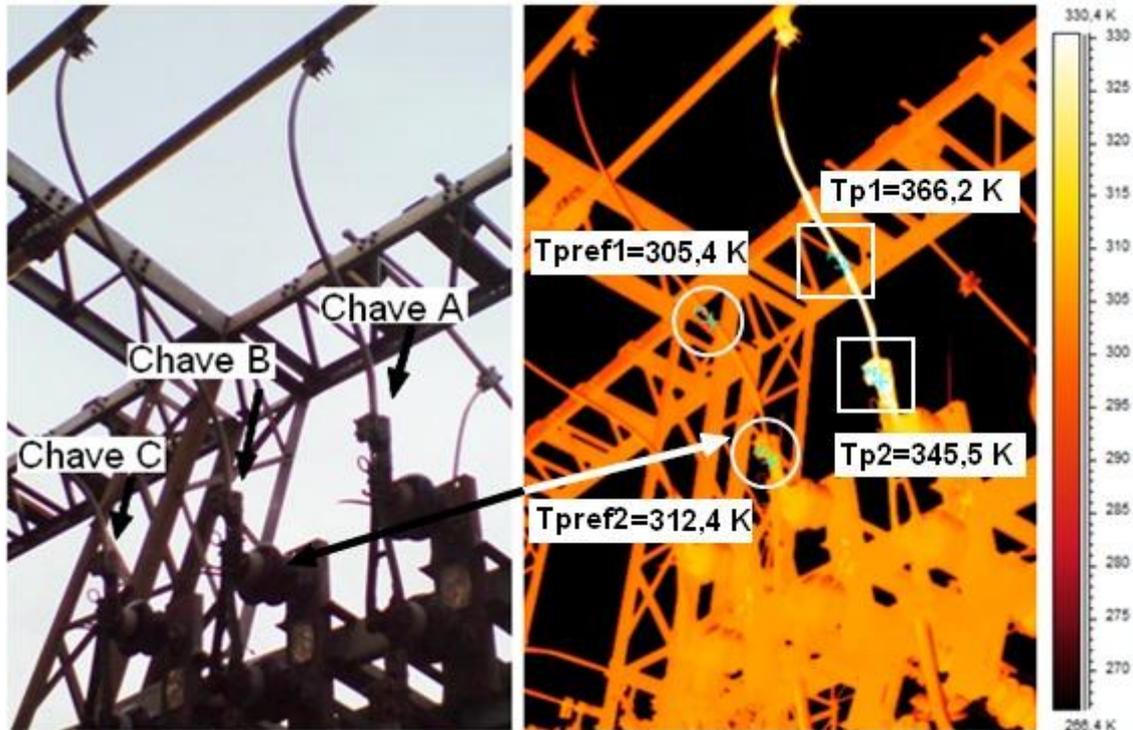


Figura 4.42 – Medição de temperatura nos pontos de anomalia com  $\epsilon=0,30$ .

Com a redução da emissividade, houve incremento de temperatura, da incerteza de medição, do intervalo de abrangência e, conseqüentemente, no valor de  $\Delta T_{pref}$ . Baseado nestes novos valores,  $\Delta T_{pref}$ , provavelmente seria um forte indicativo de falha conforme muitos critérios disponíveis na literatura. Por outro lado, os intervalos de abrangência mais largos tornam significativas as probabilidades de  $\Delta T$  pertencer a mais de uma faixa de ações recomendadas. Nestes resultados o limite numérico  $\delta = 0,5 K$  foi superado por  $d_{inf}$  ou  $d_{sup}$  em todas as medições. Logo, o método GUM não é válido para quantificar as incertezas atribuídas estas variáveis.

Tabela 4.15 – Resultados das medições nos pontos Tp1, Tpref1 e cálculo do  $\Delta T_{pref1}(\epsilon=0,30)$ .

**Ponto Tp1**

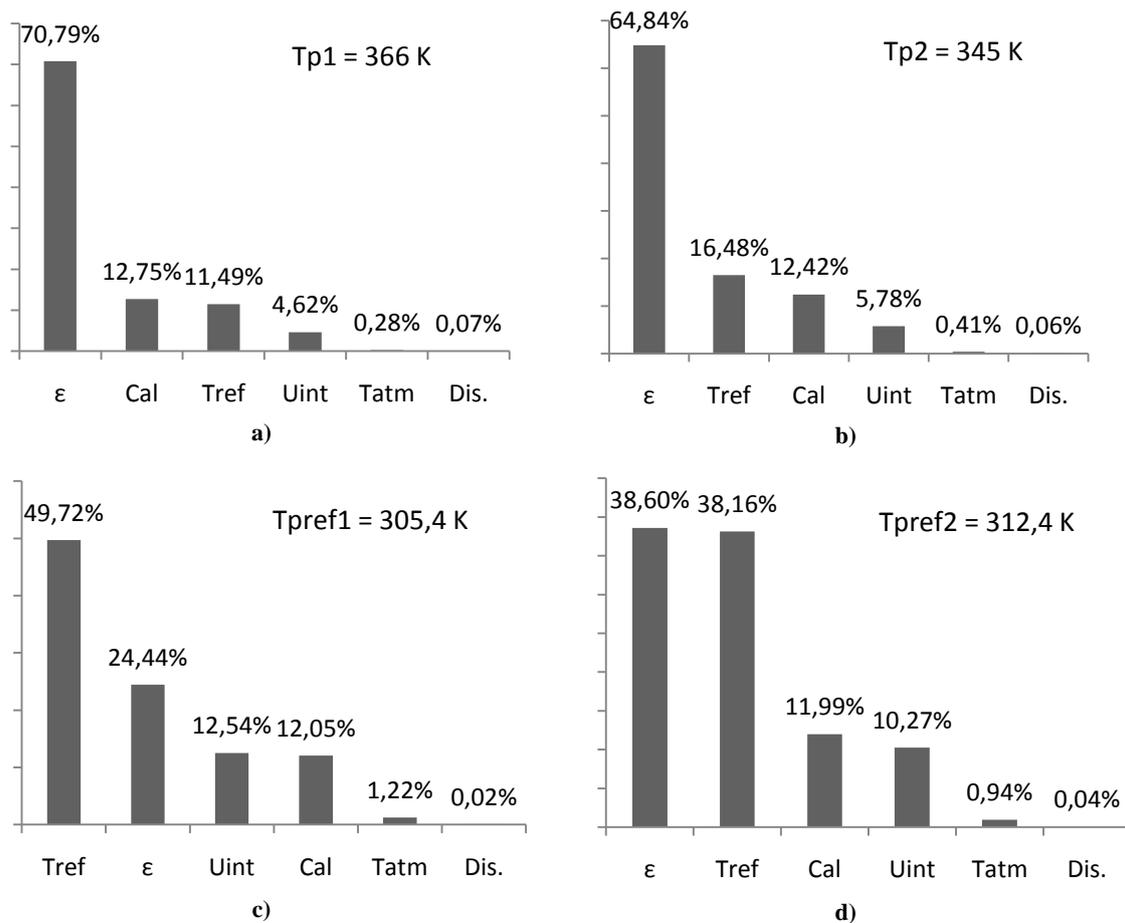
Método	M	$T_{ob}[K]$	$u(T_{ob})[K]$	Intervalo de abrangência (95%) [K]		$d_{inf}[K]$	$d_{sup}[K]$
GUM 1ªOrd.		365,7	5,3	[355,4	376,2]	2,1	0,2
GUM Ord.Sup.		365,7	5,3	[355,4	376,3]		
MMC	$1 \times 10^6$	366,2	5,4	[357,5	376,0]		
<b>Ponto Tpref1</b>							
GUM 1ªOrd.		305,3	1,6	[302,3	308,4]	0,6	0,8
GUM Ord.Sup.		305,4	1,6	[302,3	308,5]		
MMC	$1 \times 10^6$	305,4	1,9	[301,8	309,2]		
<b><math>\Delta T_{pref1}</math></b>							
GUM 1ªOrd.		60,5	5,2	[49,6	71,3]	1,3	0,2
GUM Ord.Sup.		60,5	5,6	[49,6	71,3]		
MMC	$1 \times 10^6$	60,8	5,7	[50,9	71,4]		

Tabela 4.16 – Resultados das medições nos pontos Tp2, Tpref2 e cálculo do  $\Delta T_{pref2}(\epsilon=0,30)$ .

**Ponto Tp2**

Método	M	$T_{ob}[K]$	$u(T_{ob})[K]$	Intervalo de abrangência (95%)		$d_{inf}[K]$	$d_{sup}[K]$
GUM 1ªOrd.		345,2	4,0	[337,4	353,3]	1,1	0,2
GUM Ord.Sup.		345,2	4,0	[337,4	353,0]		
MMC	$1 \times 10^6$	345,5	4,1	[338,5	353,1]		
<b>Ponto Tpref2</b>							
GUM 1ªOrd.		312,3	1,9	[308,7	316,0]	0,2	0,7
GUM Ord.Sup.		312,3	1,9	[308,7	316,0]		
MMC	$1 \times 10^6$	312,4	2,1	[308,5	316,6]		
<b><math>\Delta T_{pref2}</math></b>							
GUM 1ªOrd.		32,9	4,4	[24,3	41,4]	0,4	0,6
GUM Ord.Sup.		32,9	4,4	[24,2	41,5]		
MMC	$1 \times 10^6$	33,1	4,6	[19,2	42,0]		

A Figura 4.43 reúne as contribuições das variáveis na incerteza da medição das temperaturas Tp1, Tpref1, Tp2 e Tpref2 com emissividade de 0,30.

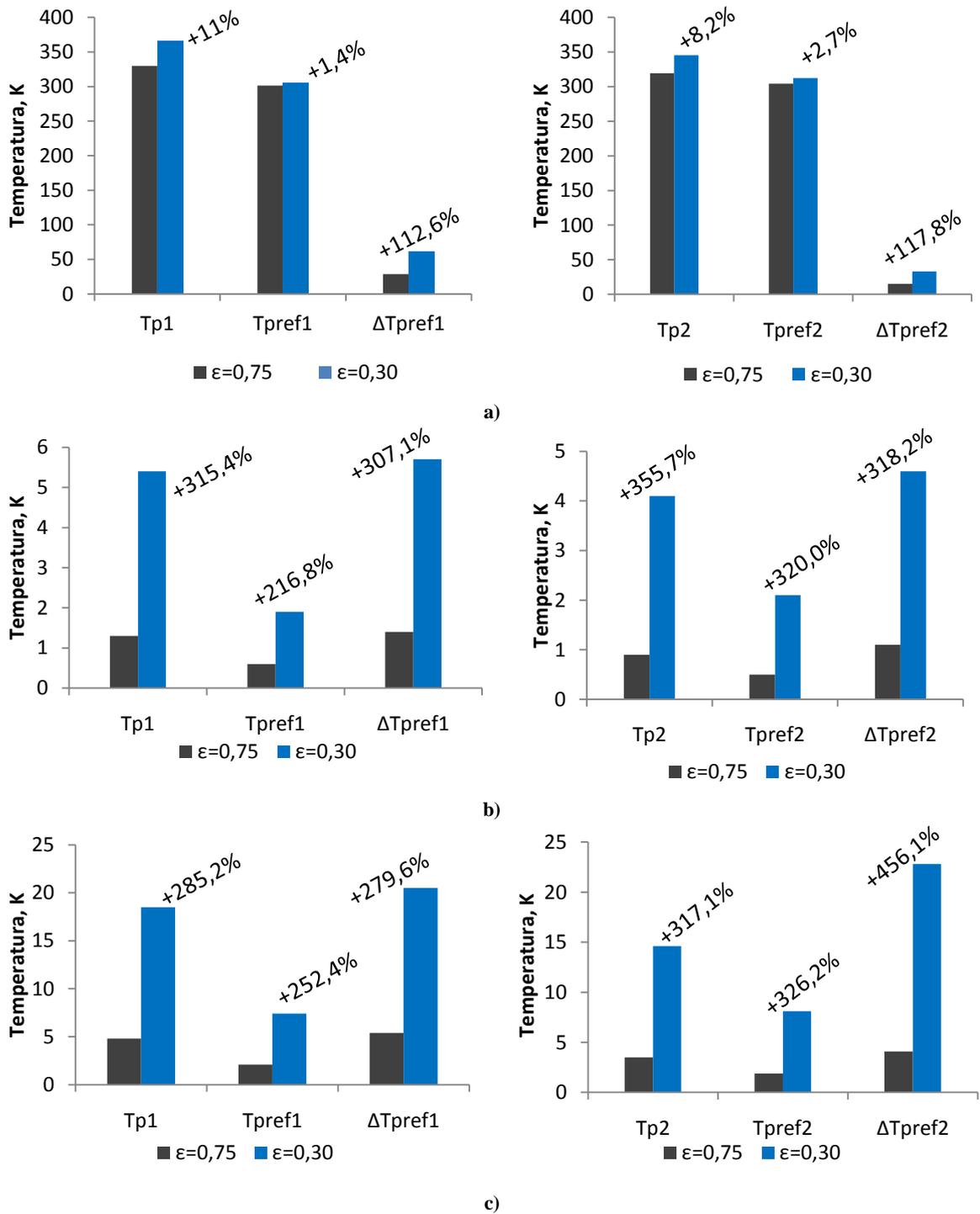


ε: Emissividade; Tref: Temperatura refletida; Cal: Calibração; Uint: Incertezas intrínsecas; Dis.: Distância termovisor-objeto; Tatm: Temperatura atmosférica.

Figura 4.43 - Contribuição das fontes de incerteza. Pontos de medição a) Tp1 , b) Tp2, c) Tpref1 e d) Tpref2.

A emissividade é a maior fonte de incerteza nas medições das temperaturas Tp1 e Tp2 e Tpref2 (Figura 4.43a-c, respectivamente). Nas medições da temperatura Tpref1 (Figura 4.43c) a temperatura refletida prestou maior contribuição à incerteza devido à baixa temperatura e emissividade no ponto de medição. A distância e a temperatura atmosférica não apresentaram contribuição significativa.

O impacto da redução da emissividade sobre as medições é ilustrado graficamente na Figura 4.44 para as medições realizadas sobre os pontos de anomalia e referência.



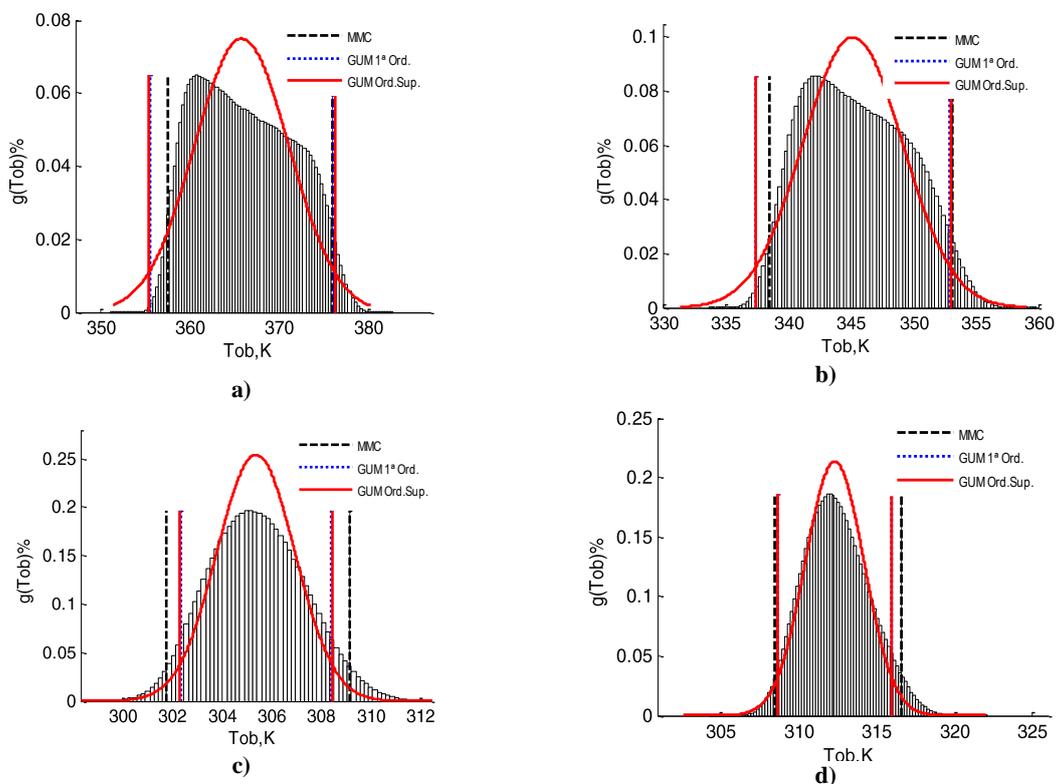
$T_{p1}$  e  $T_{p2}$ : Temperatura nos pontos de medição 1 e 2, respectivamente;  $T_{pref1}$  e  $T_{pref2}$ : Temperatura nos pontos de referência 1 e 2, respectivamente;  $\Delta T_{pref1}$  e  $\Delta T_{pref2}$ : Diferença de temperatura entre  $T_p$  e  $T_{pref}$  nos pontos de medição 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.44 – Aumento percentual, a) Temperatura medida, b) Incerteza de medição e c) Intervalo de abrangência .

Embora a emissividade de 0,30 represente um aumento percentual de 11% e 8,2% nos valores de temperatura medidos sobre os  $T_{p1}$  e  $T_{p2}$  em relação às medições com a

emissividade de 0,75, os valores de  $\Delta T_{pref1}$  e  $\Delta T_{pref2}$  sofreram aumento de 112,6% e 117,8%, respectivamente (Figura 4.44a). Contudo, as incertezas nas medições sobre os pontos de falha,  $T_{p1}$  e  $T_{p2}$ , sofreram elevações expressivas, 315,4% e 355,7%, respectivamente, assim como, a incerteza do critério  $\Delta T_{pref}$ , que sofreu um incremento de 307,1% e 318,2%, para  $\Delta T_{pref1}$  e  $\Delta T_{pref2}$ , respectivamente. Logo, os intervalos de abrangência sofreram incrementos significativos, superando 279% e 456% nos cálculos de  $\Delta T_{pref1}$  e  $\Delta T_{pref2}$ , respectivamente, Figura 4.44c. Como a emissividade de 0,30 é superior aos valores encontrados na literatura para as superfícies consideradas, elevações ainda mais expressivas nos resultados podem ser esperadas caso emissividades menores sejam utilizadas nas medições.

Por fim, as distribuições de probabilidade dos cálculos de incerteza contidos na Tabela 4.15 e Tabela 4.16 são mostradas na Figura 4.45. A emissividade 0,30 tornou as distribuições assimétricas nas medições sobre os pontos de defeito, e não apresentou assimetria nas medições sobre os pontos de referência, devido à magnitude elevada da temperatura medida nos pontos de falha e baixa nos pontos de referência.



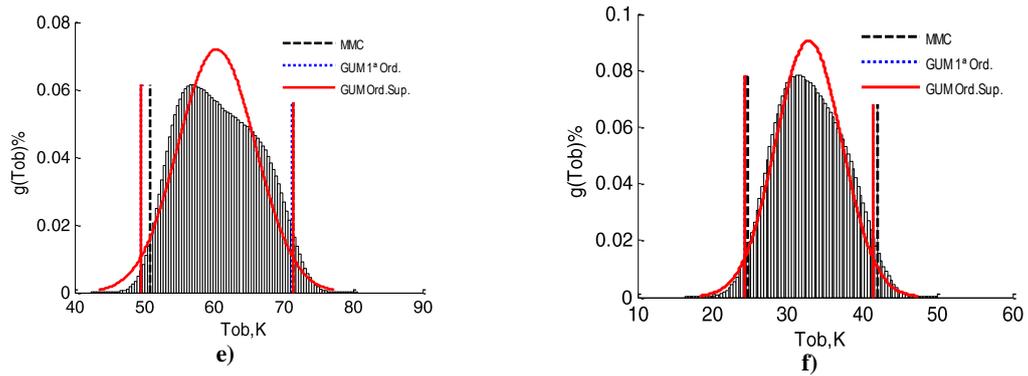


Figura 4.45 – Distribuições de probabilidade ( $\epsilon=0,45$ ) - GUM e MMC, a)  $T_{p1}$ , b)  $T_{p2}$ , c)  $T_{pref1}$ , d)  $T_{pref2}$ , e)  $\Delta T_{pref1}$  e d)  $\Delta T_{pref2}$

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma metodologia para a avaliação da incerteza de medição termográfica aplicada a componentes de sistemas elétricos. A metodologia desenvolvida se baseou na obtenção do modelo matemático da medição de temperatura de um termovisor comercial, estimativa dos parâmetros de influência sobre a medição, e, posteriormente, utilização do modelo na medição da temperatura de dispositivos elétricos sob ensaios em laboratório, análise da incerteza de medição pelos métodos GUM e Monte Carlo e avaliação do impacto da qualidade da medição no diagnóstico de anomalias térmicas em conexões elétricas.

Na obtenção das constantes do modelo de medição, Seção 2.4.4 do Capítulo 2, foi utilizado um radiador padrão de corpo negro sob condições controladas em laboratório. O ajuste por faixa de medição forneceu resultados satisfatórios, tendo sido os erros das medições realizadas com a utilização do modelo inferiores a 0,5%.

Devido a não linearidade do modelo matemático da medição, optou-se pelo emprego do MMC para avaliar a incerteza de medição e o emprego do GUM como forma de validação. Os resultados demonstram que o MMC é opção mais adequada para a avaliação de incerteza, por considerar as características não lineares do modelo, as quais se acentuam com o decréscimo dos valores médios de emissividade, tendo em vista descontinuidade do modelo quando o valor da emissividade tende a zero. O método GUM se mostrou inadequado para estimativa da incerteza na grande maioria dos casos tratados, sendo os termos de ordem superior insuficientes para aumentar a robustez da técnica frente ao modelo não linear. Para baixos valores de emissividade, o GUM mostrou-se conservador, apresentado intervalos de abrangência muito superiores aos obtidos pelo MMC e para altas emissividades, as duas técnicas convergiram, situação onde o GUM pode ser considerado apto.

A emissividade é a maior fonte de incerteza de medição sendo responsável ainda por determinar a simetria da distribuição. A temperatura refletida constitui a segunda maior fonte de incerteza, entretanto sua influência torna-se significativa para baixos valores de emissividade, quando a correlação  $\varepsilon-T_{ref}$  se torna acentuada em função do aumento da parcela de radiação refletida com a diminuição de  $\varepsilon$ . À distância termovisor-objeto e a temperatura atmosférica praticamente não apresentaram influência sobre incerteza de

medição da temperatura do objeto. Outras fontes de incertezas, como a calibração do termovisor e as incertezas intrínsecas, tiveram participação relativa nas incertezas de temperatura. Em relação às incertezas intrínsecas, a obtenção de suas componentes se mostrou um processo de fundamental importância, não apenas para estimar suas influências sobre o sistema de medição, mas para a compreensão do funcionamento do próprio termovisor.

A relevância da incerteza de medição no diagnóstico de anomalias em dispositivos elétricos foi demonstrada ao serem analisadas medições de temperatura em conexões elétricas íntegras e defeituosas. Em medições caracterizadas pela baixa qualidade, a extensão do intervalo de confiança se torna grande o suficiente para prejudicar a inferência sobre o estado da conexão, uma vez que, medições sob conexões íntegras e defeituosas podem apresentar faixas de temperatura comuns. Fenômenos físicos como vento, incidência solar ou mesmo a precipitação não afetam a capacidade de medição do termovisor, mas atuam aumentando ou reduzindo a temperatura do objeto em análise.

Embora a detecção de temperaturas elevadas em um dispositivo seja um forte indicativo de falha, não é possível, apenas por uma abordagem experimental, obter um ponto ótimo que aponte o momento mais adequado para uma intervenção sobre o ativo. Assim, uma abordagem teórico-experimental torna-se importante para compreender o comportamento de um dispositivo que apresenta tendência a falha. Embora os resultados teóricos se mostrem incipientes, eles expressam as tendências apresentadas pela temperatura e a resistência da conexão conforme as observações experimentais. Um desafio ao modelo teórico é a estimativa suficientemente satisfatória do coeficiente convectivo que possa estabelecer a dissipação térmica do conector atendendo a um nível de incerteza tolerável.

A inspeção termográfica realizada na subestação de propriedade da concessionária Cemig, forneceu resultados importantes para a avaliação da qualidade da medição. Inspeções reais carecem de informações mais confiáveis quanto aos parâmetros que caracterizam o objeto e o meio. Os resultados analisados apontaram novamente a emissividade como a maior fonte de incerteza sobre a medição da temperatura dos pontos de anomalia, seguida da calibração do instrumento e incertezas intrínsecas. Quando considerada a medição sobre superfícies de baixa emissividade, a temperatura refletida tem grande destaque pelos motivos já discutidos neste trabalho.

Como proposta de continuidade, sugere-se associar as incertezas intrínsecas à metodologia de cálculo de incerteza pelo MMC por acréscimo dos parâmetros NGE, TS, RE, DRT, ME, MSR e MU ao modelo de medição, tal como a abordagem dada à calibração na Equação (3.11).

Para futuras abordagens, sugere-se a utilização do cálculo da incerteza de medição pelo MMC na avaliação da qualidade da medição de temperatura de outros dispositivos elétricos, assim como, em outros setores que utilizam a termografia.

Como discutido, revestir a superfície da conexão pode melhorar a capacidade da medição de temperatura, mas por outro lado é importante analisar a viabilidade desta medida. A exposição da tinta a intempéries e altas temperaturas pode degradá-la a ponto da solução não surtir efeito. Além disso, deve-se avaliar se haverá incremento da absorção de radiação solar nos equipamentos expostos ao tempo.

A investigação teórico-experimental do comportamento de conexões e outros equipamentos de interesse é necessária. Neste aspecto, deve-se buscar melhorar os modelos e reduzir o distanciamento entre sua abordagem teórica e aplicação prática.

Por fim, sugere-se a avaliação dos critérios de severidade adotados e a incorporação da incerteza de medição como forma de quantificar a confiabilidade na classificação do estado do dispositivo. Estas medidas podem contribuir com a qualidade dos dados e prover melhores condições para que ações possam ser tomadas a respeito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT INMETRO. **Guia para a expressão da incerteza de medição**. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)/Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). , 2003

ABNT NBR 9326. **Conectores para cabos de potência - Ensaio de ciclos térmicos e curtos-circuitos - Método de ensaio**. . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). , 1986

AGEMA INFRARED SYSTEMS. **Thermovision 780**. . [S.l: s.n.]. , 1980

AGEMA INFRARED SYSTEMS. **Thermovision 782-DIPS**. . [S.l: s.n.]. , 1985

AGEMA INFRARED SYSTEMS. **Thermovision 450 system**. . [S.l: s.n.]. , 1988

AGEMA, S. I. Thermovision 900 Series. n. 1, 1993.

ALVARES, R. C. **Diagnóstico de Falhas em Pára-raios Utilizando Termografia Universidade Federal de Minas Gerais**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

AMBROSINI, D.; DAFFARA, C.; BIASE, R. D. *et al.* Integrated reflectography and thermography for wooden paintings diagnostics.pdf. **Journal of Cultural Heritage**, v. 11, n. 2, p. 196-204, 2010.

ARAÚJO, R. A.; BARBOSA, L. C.; SINISCALCHI, R. TEIXEIRA. **Os impactos da aplicação da termografia na operação do sistema elétrico de furnas e as ações adotadas para buscar a máxima operacionalidade, produtividade e confiabilidade do sistema**. X EDÇÃO – ENCONTRO PARA DEBATES DE ASSUNTOS DE OPERAÇÃO. **Anais...** São Paulo, SP, Brasil: [s.n.]. , 2008

ASSOCIATION, A. Aluminum Electrical Conductor Handbook. 1982.

BARREIRA, E.; FREITAS, V. DE. Evaluation of building materials using infrared thermography. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 218–224, 2007.

BIANCARDINI, L.; MOTTIN, E.; LETELLIER, L. Infrared microbolometer sensors and their application in automotive safety. **Advanced Microsystems for Automotive Applications**, p. 1-15, 2003.

BOX, G. E. P.; MULLER, M. E. A note on the generation of random normal deviates. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 29, n. 2, p. 610–611, 1958.

CHRZANOWSKI, K. Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 standards. **Proceedings of SPIE**, v. 4360, p. 387–401, 2001a.

CHRZANOWSKI, K. **Non-contact thermometry – measurement errors**. Polish Cha ed. Warsaw: [s.n.], 2001b. v. 7

CHRZANOWSKI, K. **Testing Thermal Imagers, Practical Guidebook**. Warsaw, Poland: Military University of Technology, 2010.

CHRZANOWSKI, K.; SZULIM, M. Measure of the influence of detector noise on temperature-measurement accuracy for multiband infrared systems. **Applied optics**, v. 37, n. 22, p. 5051–5057, 1998.

CHRZANOWSKI, K.; SZULIM, M. Errors of temperature measurement with multiband infrared systems. **Applied Optics**, v. 38, n. 10, 1999.

EPPERLY, R. A.; MEMBER, S.; NEMOIURS, E. I. D. *et al.* A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography. **Changes**, p. 59-68, 1997.

FERREIRA, R. A. M.; ANDRADE, R. M. DE; DINIZ, H. E. P. **Modelagem matemática de conexões elétricas: avaliação da variação da resistência elétrica com a temperatura**. XX Semana de Iniciação Científica da UFMG. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 2011

FERRERO, A.; SALICONE, S. Decision Making in the Presence of Measurement Uncertainty: an Approach in Terms of the Theory of Evidence. **Probabilistic Methods Applied to**, p. 1-6, 2006.

FLIR SYSTEMS. **User 's manual FLIR bXX series FLIR iXX series**. English. [S.l: s.n.], 2010a

FLIR SYSTEMS. **User 's manual FLIR B6XX series FLIR P6XX series FLIR SC6XX series**. . [S.l: s.n.], 2010b

FLIR SYSTEMS. **The Ultimate Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry**. [S.d.].

HOLST, G. C. **Common sense approach to thermal imaging**. [S.l.]: JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 2000.

HOU, N. **The infrared thermography diagnostic technique of high-voltage electrical equipments with internal faults**. POWERCON '98. International Conference on. **Anais...** Beijing, China: [s.n.], 1998

HUON, V.; COUSIN, B.; WATTRISSE, B. Investigating the thermo-mechanical behaviour of cementitious materials using image processing techniques. **Cement and Concrete**, v. 39, n. 6, p. 529-536, 2009.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Tradução Horacio Macedo. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC, 1992.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**. . [S.l: s.n.], 2008

JCGM 100. **Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. GUM 1995 with minor corrections.** . Sèvres, France: Joint Committee For Guides In Metrology (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML). , 2008

JCGM 101. **Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “ Guide to the expression of uncertainty in measurement ” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method.** . Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML). , 2008

JUNYAN, L.; YANG, W.; JINGMIN, D. Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT. **Infrared Physics and Technology**, v. 53, n. 5, p. 348-357, 2010.

**Janos Technology.** Disponível em: <<http://www.janostech.com/>>. Acesso em: 7 jun. 2011.

KACKER, R.; JONES, A. On use of Bayesian statistics to make the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement consistent. **Metrologia**, v. 40, p. 235, 2003.

KORENDO, Z.; FLORKOWSKI, M. Thermography based diagnostics of power equipment. **Power Engineering Journal**, v. 15, n. 1, p. 33–42, 2001.

**Knight Optical.** Disponível em: <<http://www.knightoptical.co.uk/>>. Acesso em: 7 jun. 2011.

LIGHTPATH, T. **Product Catalog. Horizon.** Orlando, FL, USA: [s.n.]. , 2011

LYON JR, B. R.; ORLOVE, G. L.; PETERS., D. L. The Relationship between current load and temperature for quasisteady state and transient conditions. **Proceedings of SPIE**, v. 4020, p. 62-70, 2000.

**Light Path Technologies.** Disponível em: <<http://www.lightpath.com>>. Acesso em: 7 jun. 2011.

MADDING, R. P.; LYON JR, B. R. **Wind effects on electrical hot spots- some experimental IR data.** PROC SPIE INT SOC OPT ENG. **Anais...** [S.l.: s.n.]. , 2000

MALDAGUE, X. **Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography.** **Srping – Verlag**, p. 207, 1993.

MALDAGUE, X. Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation. **Trends in optical nondestructive testing**, p. 591–609, 2000.

MALDAGUE, X.; MOORE, P. Infrared and Thermal Testing. **ASNT**, v. 3, p. 718, 2001.

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G. Non-destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography. **Measurement Science**, v. 13, p. 1583-90, 2002.

METROPOLIS, N. The beginning of the Monte Carlo method. **Los Alamos Science**, v. 15, n. 584, p. 125–130, 1987.

MINKINA, W.; DUDZIK, S. **Infrared Thermography Errors and Uncertainties**. 1. ed. [S.l.]: Wiley, 2009. p. 212

MUHR, M.; PACK, S.; JAUFER, S.; LUGSCHITZ, H. Thermography of aged contacts of high voltage equipment. **e & i Elektrotechnik und Informationstechnik**, v. 123, n. 12, p. 537-543, dez 2006.

OIML R141, O. I. D. M. L. **Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments**. . [S.l: s.n.]. , 2008

PELIZZARI, E.; MARTINS, C. O. D.; MENEZES, A. F. S.; REGULY, A. **Aplicações da termografia como ferramenta de manutenção preditiva em conectores elétricos**. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, Brasil: [s.n.]. , 2006

PERIN, A. L. **Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PHONG, L. N.; ZHENG, W. **Canadian microbolometer technology for future space missions**. International Workshop on thermal detectors 2003. **Anais...** Maryland, USA: [s.n.]. , 2003

POKORNI, S. Error analysis of surface temperature measurement by infrared sensor. **International journal of infrared and millimeter waves**, v. 25, n. 10, p. 1523–1533, 2004.

ROGALSKI, A. Infrared detectors : an overview. **Infrared Physics & Technology**, v. 43, p. 187-210, 2002.

ROGALSKI, A. Infrared detectors : status and trends. **Progress in Quantum Electronics**, v. 27, p. 59-210, 2003.

ROGALSKI, A. **Infrared detector**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2010. p. 898

ROGALSKI, A.; CHRZANOWSKI, K. Infrared devices and techniques. **Optoelectronics Review**, v. 10, n. 2, p. 111-136, 2002.

SAKAGAMI, T.; KUBO, S. Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations. **Infrared Physics & Technology**, v. 43, n. 3-5, p. 211–218, 2002.

SANTOS, L. **Termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas**. . [S.l: s.n.]. , 2006

SNELL, J.; RENOWDEN, J. **Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines**. Transmission and Distribution

Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. 2000 IEEE ESMO-2000 IEEE 9th International Conference on. **Anais...** [S.l.]: IEEE. , 2000

SOUZA, J. R. . S. DE; TUMA, R. W. A. **Um novo método para proteção de linhas de transmissão com compensação série II - análise complementar do comportamento do algoritmo proposto.** XIII Eriac Décimo Terceiro Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré. **Anais...** Puerto Iguazú: [s.n.]. , 2009

TAVARES, S. G. **Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte.** [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

TITMAN, D. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. **NDT & E International**, v. 34, n. 2, p. 149–154, 2001.

**Temmek Optics.** Disponível em: <<http://www.temmek.com/>>. Acesso em: 7 jun. 2011.

ULIS. **Silicon infrared imaging sensors. Elite Series - Pico1024E(UL0525 1).** . [S.l: s.n.]. , 2011

UMMENHOFER, T.; MEDGENBERG, J. On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints. **International Journal of Fatigue**, v. 31, n. 1, p. 130–137, 2009.

WANG, X.; CRUPI, V.; GUO, X.; ZHAO, Y. Quantitative Thermographic Methodology for fatigue assessment and stress measurement. **International Journal of Fatigue**, v. 32, n. 12, p. 1970–1976, 2010.

WESTINGHOUSE ELECTRIC. **Electrical transmission and distribution reference book.** 4. ed. East Pittsburgh, USA: Westinghouse Electric Corp., 1964. p. 824

XINGLIANG, J.; QIANGFENG, X. **Influence of contamination on deteriorated insulators detection with infrared imaging method.** High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2010 International Conference on. **Anais...** [S.l: s.n.]. , 2010

## A. ANEXO

Tabela A.1 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CH2 (Capítulo 4, Seção 4.3).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM								
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coeficiente de Sensibilidade - $c_i$	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade $\nu_{eff}$
Emissividade, $u(\varepsilon)$	0,780	x	-	1,7321	0,028868	190,0969	5,48762482	infinito
Desvio , $u(\Delta\varepsilon)$	0,050	x	Uniforme					
Distância, $u(d)$	0,300	m	-	1,7321	0,057735	1,0873	0,06277529	infinito
Desvio , $u(\Delta d)$	0,100	m	Uniforme					
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	294,950	K	-	1	0,611692	0,0810	0,04954702	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				
Resolução, $u(T_{ref, res})$	0,050	K	Uniforme	1,7321				
Calibração, $u(T_{ref, cal})$	0,400	K	Normal	2				
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	294,950	K	-	1	0,611692	0,0007	0,00042818	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				
Resolução, $u(T_{atm, res})$	0,050	K	Uniforme	1,7321				
Calibração, $u(T_{atm, cal})$	0,400	K	Normal	2				
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	4,910	K	Normal	2	2,455000	1	2,455	infinito
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,357142	1	0,35714216	infinito
Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme	1,7321				
Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme	3,4641				
Repetitividade, $u(RE)$	0,212	K	Normal	1,7321				
Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0305	K	Uniforme	3,4641				
Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme	3,4641				
Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme	0,0000				
Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme	3,4641				
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	6,02	1,17E+07
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	11,80	K

Tabela A.2 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CC2 (Capítulo 4, Seção 4.3).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM								
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade - $c_i$	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade $\nu_{eff}$
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,330	-	-	1,7321	0,028868	155,3839	4,4855468	infinito
Desvio, $u(\Delta\epsilon)$	0,050	-	Uniforme					
Distância, $u(d)$	0,300	m	-	1,7321	0,057735	0,2888	0,0166739	infinito
Desvio, $u(\Delta d)$	0,100	m	Uniforme					
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	294,550	K	-	1	0,611692	1,2026	0,7356204	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				
Resolução, $u(T_{ref, res})$	0,050	K	Uniforme	1,7321				
Calibração, $u(T_{ref, cal})$	0,400	K	Normal	2				
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	294,550	K	-	1	0,611692	0,0056	0,0034255	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				
Resolução, $u(T_{atm, res})$	0,050	K	Uniforme	1,7321				
Calibração, $u(T_{atm, cal})$	0,400	K	Normal	2				
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	1,765	K	Normal	2	0,882400	1	0,8824	infinito
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,369963	1	0,3699628	infinito
Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme	1,7321				
Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme	3,4641				
Repetitividade, $u(RE)$	0,266	K	Normal	1,7321				
Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0977	K	Uniforme	3,4641				
Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme	3,4641				
Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme	0,0000				
Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme	3,4641				
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	4,65	1,67E+06
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	9,10	K

Tabela A.3 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CH3, não correlacionada (Capítulo 4, Seção 4.3).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM								
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza	Coefficiente de Sensibilidade -	Contribuição p/ Incerteza -	Graus de Liberdade $\nu_{eff}$
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,119	-	-	1,7321	0,028868	340,7359	9,8361982	infinito
	Desvio , $u(\Delta\epsilon)$	0,050	-					
Distância, $u(d)$	0,300	m	-	1,7321	0,057735	0,2953	0,0170492	infinito
	Desvio , $u(\Delta d)$	0,100	m					
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	294,550	K	-	1	0,611692	4,8127	2,9438884	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				
Resolução, $u(T_{ref, res})$	0,050	K	Uniforme	1,7321				
Calibração, $u(T_{ref, cal})$	0,400	K	Normal	2				
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	294,550	K	-	1	0,611692	0,0101	0,0061781	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				
Resolução, $u(T_{atm, res})$	0,050	K	Uniforme	1,7321				
Calibração, $u(T_{atm, cal})$	0,400	K	Normal	2				
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	1,397	K	Normal	2	0,698500	1	0,6985	infinito
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,395281	1	0,3952815	infinito
Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme	1,7321				
Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme	3,4641				
Repetitividade, $u(RE)$	0,359	K	Normal	1,7321				
Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0977	K	Uniforme	3,4641				
Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme	3,4641				
Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme	0,0000				
Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme	3,4641				
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	10,30	1,22E+07
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	20,19	K

Tabela A.4 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CH3 correlacionada (Capítulo 4, Seção 4.3).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM								
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade - $c_i$	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade $\nu_{eff}$
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,119	-	-	1,7321	0,028868	340,7359	9,8361982	infinito
	Desvio , $u(\Delta\epsilon)$	0,050	-					
Distância, $u(d)$	0,300	m	-	1,7321	0,057735	0,2953	0,0170492	infinito
	Desvio , $u(\Delta d)$	0,100	m					
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	294,550	K	-	1	0,611692	4,8127	2,9438884	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				
Resolução, $u(T_{ref, res})$	0,050	K	Uniforme	1,7321				
Calibração, $u(T_{ref, cal})$	0,400	K	Normal	2				
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	294,550	K	-	1	0,611692	0,0101	0,0061781	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				
Resolução, $u(T_{atm, res})$	0,050	K	Uniforme	1,7321				
Calibração, $u(T_{atm, cal})$	0,400	K	Normal	2				
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	1,397	K	Normal	2	0,698500	1	0,6985	infinito
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,395281	1	0,3952815	0,000922795
Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme	1,7321				
Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme	3,4641				
Repetitividade, $u(RE)$	0,359	K	Normal	1,7321				
Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0977	K	Uniforme	3,4641				
Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme	3,4641				
Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme	0,0000				
Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme	3,4641				
Correlação $u(\epsilon), u(T_{ref})$ / Coef. Correlação = 1	1	-	-				57,913339	
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	12,81	2,91E+07
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	25,10	K

Tabela A.5– Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Amostra CH1 (Capítulo 4, Seção 4.3).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM								
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade	Contribuição p/ Incerteza $u_i(x)$	Graus de Liberdade $\nu_{eff}$
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,97	x		1,7321	0,028868	23,3848	0,675061	-
	Desvio , $u(\Delta\epsilon)$	0,050	Uniforme					infinito
Distância, $u(d)$	0,300	m		1,7321	0,057735	0,1652	0,0095378	-
	Desvio , $u(\Delta d)$	0,100	Uniforme					infinito
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	293,250	K		1	0,611692	0,0242	0,0148029	-
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	Uniforme	1,7321				infinito
	Resolução, $u(T_{ref}, res)$	0,050	Uniforme	1,7321				infinito
	Calibração, $u(T_{ref}, cal)$	0,400	Normal	2				infinito
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	293,250	K		1	0,611692	0,0015	0,0009175	infinito
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	Uniforme	1,7321				infinito
	Resolução, $u(T_{atm}, res)$	0,050	Uniforme	1,7321				infinito
	Calibração, $u(T_{atm}, cal)$	0,400	Normal	2				infinito
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	0,912	K	Normal	2	0,455900	1	0,4559	infinito
Incerteza Intrínseca		K		1,7321	0,338076	1	0,3380761	-
	Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	Uniforme	1,7321				infinito
	Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	Uniforme	3,4641				infinito
	Repetitividade, $u(RE)$	0,055	Normal	1,7321				5,08368E-07
	Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0977	Uniforme	3,4641				infinito
	Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	Uniforme	3,4641				infinito
	Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	Uniforme	0,0000				infinito
	Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	Uniforme	3,4641				infinito
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	0,88	1,19E+06
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	1,73	K

Tabela A.6– Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tp1( $\epsilon=0,75$ )

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM								
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade $v_{eff}$
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,750	-	-	1,7321	0,028868	36,6606	1,0583004	-
	Desvio , $u(\Delta\epsilon)$	0,050	Uniforme					infinito
Distância, $u(d)$	6,000	m	-	1,7321	0,57735	0,0437	0,02523	-
	Desvio , $u(\Delta d)$	1,00	Uniforme					infinito
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,2506	0,1532899	-
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	Uniforme	1,7321				infinito
	Resolução, $u(T_{ref}, res)$	0,050	Uniforme	1,7321				infinito
	Calibração, $u(T_{ref}, cal)$	0,400	Normal	2				infinito
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,0173	0,0105823	-
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	Uniforme	1,7321				infinito
	Resolução, $u(T_{atm}, res)$	0,050	Uniforme	1,7321				infinito
	Calibração, $u(T_{atm}, cal)$	0,400	Normal	2				infinito
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	1,130	K	Normal	2	0,565100	1	0,5651	infinito
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,335409	1	0,3354095	-
	Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	Uniforme	1,7321				infinito
	Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	Uniforme	3,4641				infinito
	Repetitividade, $u(RE)$	0	Normal	1,7321				2
	Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0097	Uniforme	3,4641				infinito
	Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	Uniforme	3,4641				infinito
	Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	Uniforme	0,0000				infinito
	Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	Uniforme	3,4641				infinito
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	1,26	infinito
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	2,46	

Tabela A.7 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tpref1( $\epsilon=0,75$ )

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM									
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade $v_{eff}$	
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,750	-	-	1,7321	0,028868	3,7771	0,1090355	infinito	
	Desvio , $u(\Delta\epsilon)$	0,050	-					Uniforme	infinito
Distância, $u(d)$	6,00	m	-	1,7321	0,577350	0,0045	0,0025981	infinito	
	Desvio , $u(\Delta d)$	1,000	m					Uniforme	infinito
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,3237	0,1980046	infinito	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Resolução, $u(T_{ref}, res)$	0,050	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Calibração, $u(T_{ref}, cal)$	0,400	K	Normal				2	infinito
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,0223	0,0136407	infinito	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Resolução, $u(T_{atm}, res)$	0,050	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Calibração, $u(T_{atm}, cal)$	0,400	K	Normal				2	infinito
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	0,561	K	Normal	2	0,280700	1	0,2807	infinito	
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,335409	1	0,3354095	infinito	
	Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Repetitividade, $u(RE)$	0	K	Normal				1,7321	2
	Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0097	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme				0,0000	infinito
	Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme				3,4641	infinito
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	0,49	#DIV/0!	
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	0,97		

Tabela A.8– Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tp2( $\epsilon=0,75$ ).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM								
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade, $v = n-1$
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,750	-	-	1,7321	0,028868	25,5086	0,7363699	infinito
	Desvio , $u(\Delta\epsilon)$	0,050	Uniforme					infinito
Distância, $u(d)$	6,00	m	-	1,7321	0,057735	0,0304	0,0017551	infinito
	Desvio , $u(\Delta d)$	1,00	Uniforme					infinito
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,2732	0,1671142	infinito
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	Uniforme	1,7321				infinito
	Resolução, $u(T_{ref}, res)$	0,050	Uniforme	1,7321				infinito
	Calibração, $u(T_{ref}, cal)$	0,400	Normal	2				infinito
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,0188	0,0114998	infinito
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	Uniforme	1,7321				infinito
	Resolução, $u(T_{atm}, res)$	0,050	Uniforme	1,7321				infinito
	Calibração, $u(T_{atm}, cal)$	0,400	Normal	2				infinito
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	0,925	K	Normal	2	0,462400	1	0,4624	infinito
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,335409	1	0,3354095	infinito
	Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	Uniforme	1,7321				infinito
	Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	Uniforme	3,4641				infinito
	Repetitividade, $u(RE)$	0	Normal	1,7321				2
	Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0097	Uniforme	3,4641				infinito
	Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	Uniforme	3,4641				infinito
	Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	Uniforme	0,0000				infinito
	Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	Uniforme	3,4641				infinito
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	0,95	infinito
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	1,86	

Tabela A.9 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tpref2( $\epsilon=0,75$ ).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM								
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade - $c_i$	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade, $\nu = n-1$
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,750	-	-	1,7321	0,028868	7,5473	0,2178718	infinito
	Desvio , $u(\Delta\epsilon)$	0,050	Uniforme					infinito
Distância, $u(d)$	6,00	m	-	1,7321	0,577350	0,0090	0,0051962	infinito
	Desvio , $u(\Delta d)$	1,000	Uniforme					infinito
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,3144	0,1923159	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				infinito
Resolução, $u(T_{ref}, res)$	0,050	K	Uniforme	1,7321				infinito
Calibração, $u(T_{ref}, cal)$	0,400	K	Normal	2				infinito
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,0216	0,0132125	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				infinito
Resolução, $u(T_{atm}, res)$	0,050	K	Uniforme	1,7321				infinito
Calibração, $u(T_{atm}, cal)$	0,400	K	Normal	2				infinito
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	0,621	K	Normal	2	0,310300	1	0,3103	infinito
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,335409	1	0,3354095	infinito
Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme	1,7321				infinito
Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme	3,4641				infinito
Repetitividade, $u(RE)$	0	K	Normal	1,7321				2
Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0097	K	Uniforme	3,4641				infinito
Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme	3,4641				infinito
Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme	0,0000				infinito
Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme	3,4641				infinito
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	0,54	infinito
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	1,06	

Tabela A.10 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tp1( $\epsilon=0,30$ ).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM									
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade - $c_i$	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade, $\nu = n-1$	
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,450	-	-	1,7321	0,028868	178,1836	5,1437175	infinito	
	Desvio , $u(\Delta\epsilon)$	0,050	Uniforme					infinito	
Distância, $u(d)$	6,00	m	-	1,7321	0,057735	0,0853	0,0049248	infinito	
	Desvio , $u(\Delta d)$	1,00	Uniforme					infinito	
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	298,350	K	-	1	0,611692	1,3644	0,8345921	infinito	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Resolução, $u(T_{ref}, res)$	0,050	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Calibração, $u(T_{ref}, cal)$	0,400	K	Normal				2	infinito
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,0336	0,0205528	infinito	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Resolução, $u(T_{atm}, res)$	0,050	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Calibração, $u(T_{atm}, cal)$	0,400	K	Normal				2	infinito
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	1,853	K	Normal	2	0,926500	1	0,9265	infinito	
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,335409	1	0,3354095	infinito	
	Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Repetitividade, $u(RE)$	0	K	Normal				1,7321	2
	Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0097	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme				0,0000	infinito
	Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme				3,4641	infinito
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	5,30	infinito	
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	10,39		

Tabela A.11 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tpref1( $\epsilon=0,30$ ).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM									
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade, $\nu = n-1$	
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,450	-	-	1,7321	0,028868	22,6550	0,6539935	infinito	
	Desvio, $u(\Delta\epsilon)$	0,050	Uniforme					infinito	
Distância, $u(d)$	6,00	m	-	1,7321	0,057735	0,0108	0,0006235	infinito	
	Desvio, $u(\Delta d)$	1,00	Uniforme					infinito	
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	298,350	K	-	1	0,611692	2,1747	1,3302458	infinito	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Resolução, $u(T_{ref}, res)$	0,050	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Calibração, $u(T_{ref}, cal)$	0,400	K	Normal				2	infinito
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,0535	0,0327255	infinito	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Resolução, $u(T_{atm}, res)$	0,050	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Calibração, $u(T_{atm}, cal)$	0,400	K	Normal				2	infinito
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	0,645	K	Normal	2	0,322400	1	0,3224	infinito	
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,335409	1	0,3354095	infinito	
	Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Repetitividade, $u(RE)$	0	K	Normal				1,7321	2
	Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0097	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme				0,0000	infinito
	Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme				3,4641	infinito
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	1,55	infinito	
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	3,05		

Tabela A.12 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tp2( $\epsilon=0,30$ ).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM								
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade - $c_i$	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade, $v = n-1$
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,300	-	-	1,7321	0,028868	130,2387	3,7596674	infinito
Desvio, $u(\Delta\epsilon)$	0,050	-	Uniforme					infinito
Distância, $u(d)$	6,00	m	-	1,7321	0,057735	0,0622	0,0035911	infinito
Desvio, $u(\Delta d)$	1,00	m	Uniforme					infinito
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	298,350	K	-	1	0,611692	1,5624	0,955707	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				infinito
Resolução, $u(T_{ref}, res)$	0,050	K	Uniforme	1,7321				infinito
Calibração, $u(T_{ref}, cal)$	0,400	K	Normal	2				infinito
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,0384	0,023489	infinito
Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme	1,7321				infinito
Resolução, $u(T_{atm}, res)$	0,050	K	Uniforme	1,7321				infinito
Calibração, $u(T_{atm}, cal)$	0,400	K	Normal	2				infinito
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	1,441	K	Normal	2	0,720400	1	0,7204	infinito
Incerteza Intrínseca	-	K	-	1,7321	0,335409	1	0,3354095	infinito
Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme	1,7321				infinito
Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme	3,4641				infinito
Repetitividade, $u(RE)$	0	K	Normal	1,7321				2
Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0097	K	Uniforme	3,4641				infinito
Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme	3,4641				infinito
Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme	0,0000				infinito
Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme	3,4641				infinito
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	3,96	infinito
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	7,76	

Tabela A.13 – Cálculo da incerteza de medição pelo GUM de 1ª ordem. Inspeção termográfica, ponto Tpref2( $\epsilon=0,30$ ).

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM									
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição de Probabilidade	Div.	Valor da Incerteza $\pm u_i$	Coefficiente de Sensibilidade - $c_i$	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u(x_i)$	Graus de Liberdade, $v = n-1$	
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,30	-	-	1,7321	0,028868	43,6550	1,2602113	infinito	
	Desvio, $u(\Delta\epsilon)$	0,050	Uniforme					infinito	
Distância, $u(d)$	6,00	m	-	1,7321	0,057735	0,0208	0,0012009	infinito	
	Desvio, $u(\Delta d)$	1,00	Uniforme					infinito	
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	298,350	K	-	1	0,611692	2,0365	1,24571	infinito	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{ref})$	1,000	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Resolução, $u(T_{ref}, res)$	0,050	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Calibração, $u(T_{ref}, cal)$	0,400	K	Normal				2	infinito
Temperatura Atmosférica, $u(T_{atm})$	298,350	K	-	1	0,611692	0,0501	0,0306458	infinito	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta T_{atm})$	1,000	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Resolução, $u(T_{atm}, res)$	0,050	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Calibração, $u(T_{atm}, cal)$	0,400	K	Normal				2	infinito
Certificado de Calibração (2% da leitura °C)	0,783	K	Normal	2	0,391500	1	0,3915	infinito	
Incerteza Intrínseca		K	-	1,7321	0,335409	1	0,3354095	infinito	
	Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,045	K	Uniforme				1,7321	infinito
	Estabilidade da temperatura, $u(TS)$	0	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Repetitividade, $u(RE)$	0	K	Normal				1,7321	2
	Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	0,0097	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Mínimo erro, $u(ME)$	1,1	K	Uniforme				3,4641	infinito
	Resolução espacial da medição, $u(MSR)$	0	K	Uniforme				0,0000	infinito
	Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,34	K	Uniforme				3,4641	infinito
Incerteza Padrão Combinada						$\pm u_c =$	1,85	infinito	
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$					K =	1,96	3,62		

## B. ANEXO

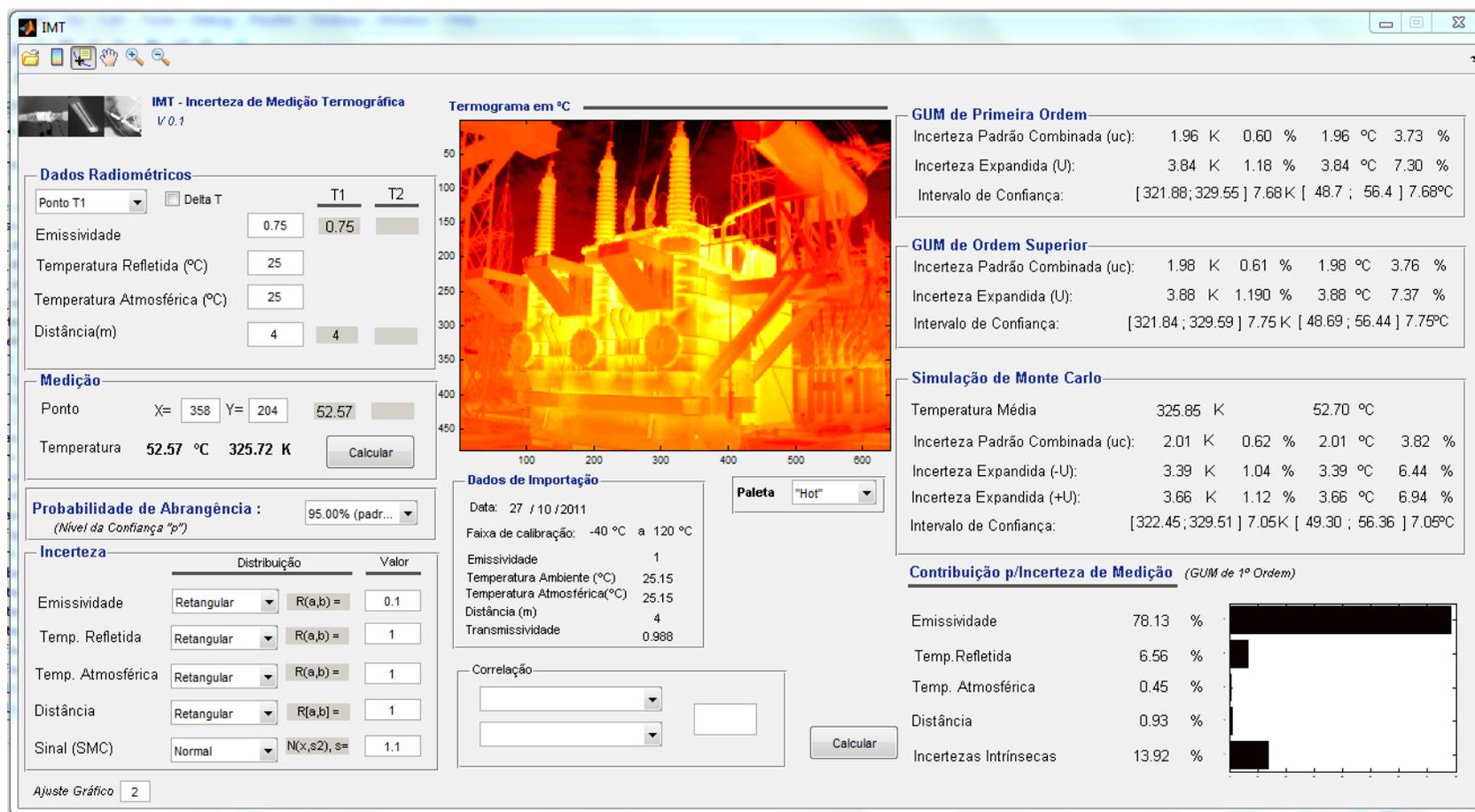


Figura B.1 - Interface gráfica do IMT.

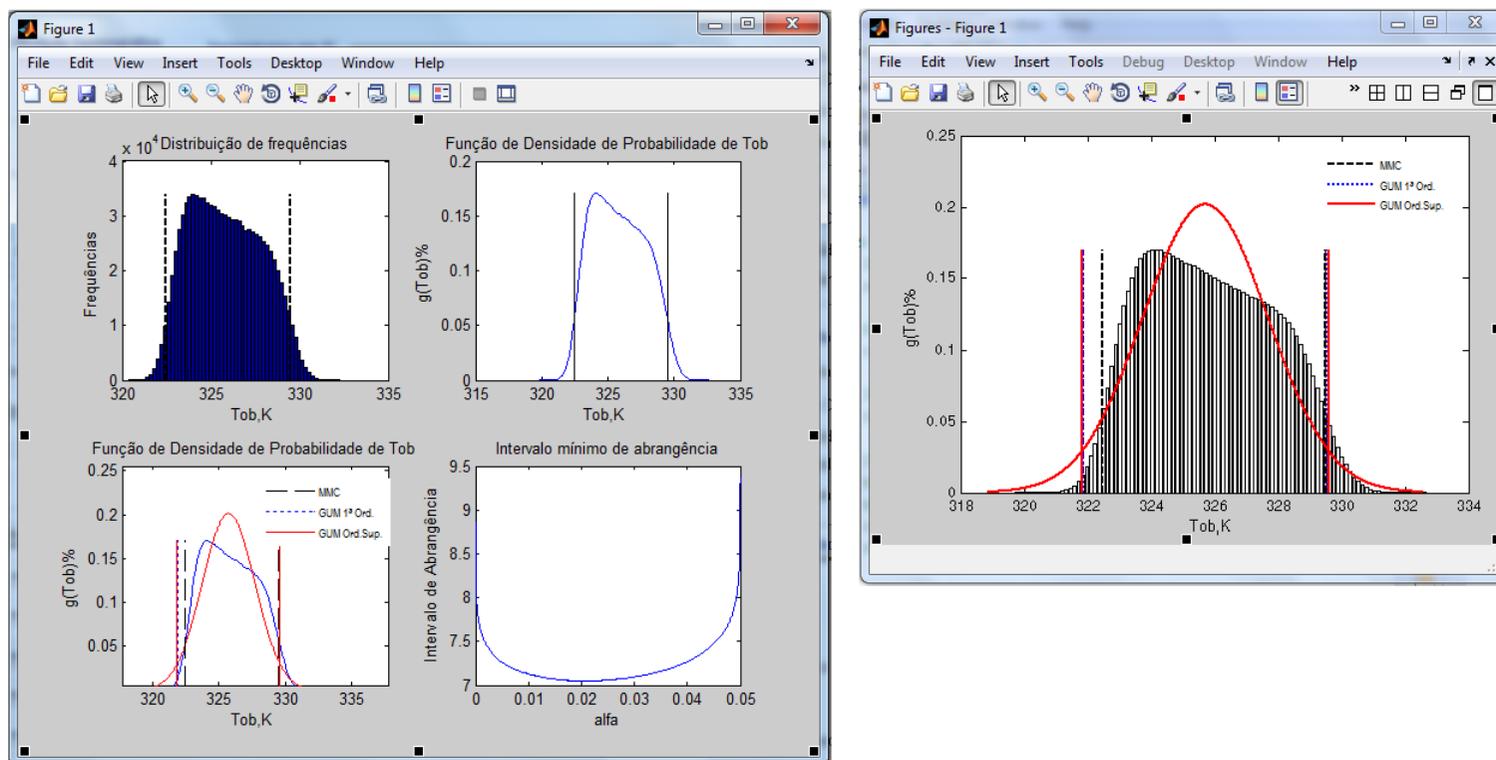


Figura B.2 – Gráficos de saída.