

# TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

aplicada à  
**MANUTENÇÃO ELÉTRICA**

Dos fundamentos ao diagnóstico



Edifes

**PABLO RODRIGUES MUNIZ**  
**MARIANA ALTOÉ MENDES**

**Termografia Infravermelha**  
**Aplicada à Manutenção Elétrica**  
Dos fundamentos ao diagnóstico



Pablo Rodrigues Muniz  
Mariana Altoé Mendes

**Termografia Infravermelha**  
**Aplicada à Manutenção Elétrica**  
Dos fundamentos ao diagnóstico



**Edifes**

Vitória, 2019



**Edifes**

Editora do Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia do Espírito Santo  
R. Barão de Mauá, nº 30 – Jucutuquara  
29040-689 – Vitória – ES  
www.edifes.ifes.edu.br | editora@ifes.edu.br

Reitor: Jadir José Pela

Pró-Reitor de Administração e Orçamento: Lezi José Ferreira

Pró-Reitor de Desenvolvimento Institucional: Luciano de Oliveira Toledo

Pró-Reitora de Ensino: Adriana Piontkovsky Barcellos

Pró-Reitor de Extensão: Renato Tannure Rotta de Almeida

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação: André Romero da Silva

Coordenador da Edifes: Adonai José Lacruz

### **Conselho Editorial**

Aldo Rezende • Ediu Carlos Lopes Lemos • Felipe Zamborlini Saiter • Francisco de Assis Boldt  
• Glória Maria de F. Viegas Aquije • Karine Silveira • Maria das Graças Ferreira Lobino  
• Marize Lyra Silva Passos • Nelson Martinelli Filho • Pedro Vitor Morbach Dixini  
• Rossanna dos Santos Santana Rubim • Viviane Bessa Lopes Alvarenga

### **Produção editorial**

Projeto Gráfico: Assessoria de Comunicação Social do Ifes

Revisão de texto: Rowena Esteves

Diagramação e epub: Know-How Desenvolvimento Editorial

Capa: Romério Damascena

Imagem de capa: Shutterstock

---

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

M966 Muniz, Pablo Rodrigues.

Termografia infravermelha aplicada à manutenção elétrica : dos fundamentos ao diagnóstico / Pablo Rodrigues Muniz e Mariana Altoé Mendes. – Vitória, ES : Edifes, 2019.

1 recurso on-line (134 p.): PDF ; il. col.

ISBN: 978-85-8263-416-5 (e-book).

1. Instalações elétricas – Manutenção e reparos. 2. Manutenção – Método termográfico. 3. Radiação infravermelha – Tecnologia. I. Mendes, Mariana Altoé. II. Título.

CDD 22 – 621.362

---

Bibliotecária Rossanna dos Santos Santana Rubim – CRB6- ES 403

© 2019 Instituto Federal do Espírito Santo

Todos os direitos reservados.

É permitida a reprodução parcial desta obra, desde que citada a fonte.

O conteúdo dos textos é de inteira responsabilidade do autor.

## **Sumário**

<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>11</b>
<b>Lista de Siglas</b> .....	<b>13</b>
<b>Lista de Símbolos</b> .....	<b>15</b>
<b>Prefácio</b> .....	<b>21</b>
<b>Capítulo 1</b>	
A termografia por infravermelho .....	25
<b>Capítulo 2</b>	
Diagnóstico de instalações elétricas a partir da termografia .....	73
<b>Capítulo 3</b>	
Avanços recentes em inspeções termográficas de instalações elétricas	89
<b>Referências</b> .....	<b>131</b>
<b>Sobre os autores</b> .....	<b>133</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1-1</b>	Diagrama esquemático do funcionamento de um termovisor .....	26
<b>Figura 1-2</b>	Distribuição espectral da excitância de corpos à temperatura de (100 a 5.800) K .....	28
<b>Figura 1-3</b>	Transmitância atmosférica típica para a faixa de (0 a 15) $\mu\text{m}$ ao nível do mar, para a distância de propagação de 1.820 m.....	37
<b>Figura 1-4</b>	Transmitância normalizada típica para a faixa de [(1 a 3), (3 a 7) e (7 a 15)] $\mu\text{m}$ , para a distância de 10 m .....	37
<b>Figura 1-5</b>	Determinação da umidade absoluta de um meio de propagação ....	39
<b>Figura 1-6</b>	Emissão de um sinal que se propaga por um meio até um receptor	42
<b>Figura 1-7</b>	Desalinhamento paralelo de raio $r$ entre o detector e a frente de onda do sinal radiado .....	43
<b>Figura 1-8</b>	Problema em comunicações ópticas para 3 situações de desalinhamento normalizado $\sigma_y/r = 1, 2, 3$ , em função da potência óptica, dB, gerando a probabilidade de perda de comunicação ( $P_{out}$ )	44
<b>Figura 1-9</b>	Simulação de desempenho de sistemas de comunicações ópticas com “meio-ângulo FOV” de (2,0; 4,0 e 8,0) mrad, e desalinhamentos de (8 a 20) mrad .....	46
<b>Figura 1-10</b>	Irradiação térmica emitida por uma superfície que atinge outra, em posições arbitrárias .....	47
<b>Figura 1-11</b>	Dependência angular da emissividade de um objeto em comparação à radiação de um corpo negro.....	49
<b>Figura 1-12</b>	Característica direcional típica da emissividade de condutores e não condutores, comparada a corpos negros.....	50

<b>Figura 1-13</b>	Diagrama de blocos dos componentes de um termovisor .....	51
<b>Figura 1-14</b>	Esquema de projeção da imagem sobre os <i>pixels</i> de um termovisor	52
<b>Figura 1-15</b>	Comparativo do número total de <i>pixels</i> de termovisores com diferentes matrizes de plano focal .....	53
<b>Figura 1-16</b>	Imagens infravermelhas da mesma cena geradas a partir de termovisores com diferentes números de <i>pixels</i> . (a) 1.024 x 1.024 <i>pixels</i> ; (b) 640 x 512 <i>pixels</i> ; (c) 320 x 240 <i>pixels</i> ; (d) 160 x 120 <i>pixels</i> ; e (e) 80 x 80 <i>pixels</i> .....	54
<b>Figura 1-17</b>	Área efetivamente sensível ao infravermelho de termovisores com diferentes fatores de preenchimento (FP), 49%, 81% e um hipotético valor de 100%.....	55
<b>Figura 1-18</b>	Respostas espectrais de diferentes termovisores com diferentes sistemas ópticos de lentes, normalizadas em relação aos seus máximos valores .....	56
<b>Figura 1-19</b>	Comparação de situações reais (b e c) e uma situação ideal (a) de formação de imagem óptica em um FPA.....	59
<b>Figura 1-20</b>	Campo de visão (FOV) de termovisores: (a) parâmetros para cálculo do FOV; (b) área vista pelo termovisor; (c) esquemático da seção transversal em duas dimensões .....	59
<b>Figura 1-21</b>	Imagens térmicas de uma mesma cena (a) com (b) termovisor FLIR SC2000 de FOV 45° – grande abertura; (c) FOV 24° – lente padrão; (d) FOV 12° – lente telescópica. Os ângulos referem-se à direção horizontal .....	61
<b>Figura 1-23</b>	Medição de temperatura de um objeto a 80°C, utilizando o termovisor em três diferentes faixas de medição nela disponíveis, (20 a 80)°C, (30 a 150)°C e (100 a 250)°C.....	65
<b>Figura 1-22</b>	Distribuição em frequência do ruído inserido pelas partes próprias do termovisor na medição de temperatura.....	65
<b>Figura 1-24</b>	IFOV: ângulo sob o qual um elemento detector do FPA percebe a radiação do objeto inspecionado .....	66
<b>Figura 1-25</b>	SRF, que descreve a resposta do termovisor à medição de temperatura de um objeto com uma fenda de dimensão variável	67
<b>Figura 1-26</b>	Medição de temperatura para objetos de (1 a 30) mm, todos à mesma temperatura, a 5,5 m do termovisor .....	68
<b>Figura 2-1</b>	Termograma dos terminais de um disjuntor trifásico apresentando falha em uma das fases.....	76
<b>Figura 2-2</b>	Relação entre a incerteza padrão dos instrumentos de medição e sua contribuição à incerteza da medição de temperatura de um objeto (Tob) por termografia .....	84

<b>Figura 3-1</b>	Chaves desconectadas em um sistema trifásico de 220V: (a) figura real; (b) termografia infravermelha; e (c) valores das correntes elétricas nas três fases.....	90
<b>Figura 3-2</b>	Termografia de uma instalação trifásica com cabos em paralelo...	91
<b>Figura 3-3</b>	Modelo esquemático para condutores em paralelo .....	92
<b>Figura 3-4</b>	Gráfico com resultados de temperatura do bom e do mau contato – modelo teórico e resultados experimentais .....	96
<b>Figura 3-5</b>	Resultados de dados experimentais relativos à corrente elétrica em cabos paralelos .....	97
<b>Figura 3-6</b>	Exemplos de situações, ilustrando a temperatura nos contatos para os casos A e B, em que o diagnóstico não é trivial .....	98
<b>Figura 3-7</b>	Medidas de temperatura com três diferentes FOVs com o mesmo termovisor, como função do ângulo de visão para o objeto analisado	100
<b>Figura 3-8</b>	Gráfico de dispersão dos erros apresentados pela regressão .....	103
<b>Figura 3-9</b>	Fluxo de corrente na superfície de contato de conexões elétricas, onde em A observa-se uma superfície de contato reduzida e em B uma superfície com maior área de contato .....	109
<b>Figura 3-10</b>	Imagem real e imagem termográfica da instalação elétrica experimental .....	110
<b>Figura 3-11</b>	Método de cálculo das grandezas envolvidas na termografia infravermelha .....	114



## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1-1</b>	Janelas de transmissão infravermelha .....	33
<b>Tabela 1-2</b>	Parâmetros para cálculo da atenuação atmosférica conforme as janelas de transmissão .....	34
<b>Tabela 1-3</b>	Faixa operacional de comprimento de onda de termovisores recomendados para manutenção elétrica.....	40
<b>Tabela 1-4</b>	Classificação da radiação óptica conforme IEC.....	57
<b>Tabela 1-5</b>	Classificação da radiação óptica adotada por fabricantes e pela norma ABNT NBR 15572.....	58
<b>Tabela 1-6</b>	Parâmetros de desempenho de termovisores .....	63
<b>Tabela 2-1</b>	Classificação e recomendações para sobreaquecimento em componentes elétricos .....	77
<b>Tabela 2-2</b>	Ações recomendadas de manutenção para equipamentos elétricos conforme resultados da inspeção termográfica.....	77
<b>Tabela 2-3</b>	Normas técnicas relativas à termografia no Brasil.....	79
<b>Tabela 2-4</b>	Normas técnicas estrangeiras relativas à termografia .....	81
<b>Tabela 3-1</b>	Termovisor utilizado.....	100
<b>Tabela 3-2</b>	Comparação do Teste T Pareado – Temperatura medida de diferentes FOVs .....	101
<b>Tabela 3-3</b>	Dados obtidos experimentalmente e resultados do cálculo da radiação.....	106
<b>Tabela 3-4</b>	Avaliação da qualidade do modelo de estimativa da área de contato .....	111

<b>Tabela 3-5</b>	Avaliação da qualidade do modelo de estimativa da potência dissipada.....	112
<b>Tabela 3-6</b>	Valores adotados para validação do modelo proposto .....	117
<b>Tabela 3-7</b>	Faixa de incerteza padrão para as entradas para validação do modelo proposto .....	117
<b>Tabela 3-8</b>	Instrumentos utilizados e medições realizadas pelo termografista	118
<b>Tabela 3-9</b>	Contribuição de cada variável para uma incerteza padrão de emissividade de 0,015 .....	118
<b>Tabela 3-10</b>	Contribuição de cada variável para uma a incerteza padrão de emissividade de 0,030 .....	118

## Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT/ONS-58	Organismo de Normalização Setorial de Ensaios Não Destrutivos
CONMETRO	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
DAS	<i>Detector angular substance</i>
FOV	<i>Field of view</i>
FP	Fator de preenchimento
FPA	<i>Focal plane array</i>
FSO	<i>Free space optics</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IFOV	<i>Instantaneous field of view</i>
IR-A	<i>Infrared A</i>
IR-B	<i>Infrared B</i>
IR-C	<i>Infrared C</i>
LW	<i>Long wave infrared</i> (infravermelho distante)
MW	<i>Mid wave infrared</i> (infravermelho médio)
NETD	<i>Noise equivalent temperature difference</i>
OIML	<i>International Organization of Legal Metrology</i>

QWIP *Quantum Well Infrared Photodetectors*  
ROIC *Readout integrated circuit*  
SNR *Signal noise relation*  
SRF *Slit response function*  
SW *Short wave infrared (infravermelho próximo)*  
UV-A *Ultraviolet A*  
UV-B *Ultraviolet B*  
UV-C *Ultraviolet C*

## Lista de Símbolos

- $A$  Área do receptor
- $A_c$  Área de contato da conexão elétrica
- $\alpha$  Coeficiente (expoente) usado em correção de elevação de temperatura
- $A_1, A_2$  Área de uma superfície emissora de radiação ou receptora de irradiação
- $A_i$  Parâmetro para cálculo da transmitância atmosférica em função da janela de transmissão considerada
- $B$  Dimensão lateral do FPA
- $C$  Velocidade da luz no vácuo
- $c_i$  Derivada parcial de uma função em relação à variável  $x_i$
- $co(., .)$  Coeficiente de correlação entre duas variáveis
- $D$  Distância entre um objeto e a câmera
- $\bar{d}$  Média das diferenças entre as amostras de duas populações
- $d_1$  Distância entre o termovisor e a superfície inspecionada, sob uma segunda medição de ângulo de visada
- $D_L$  Diâmetro de abertura da lente da câmera
- $D_r$  Distância radial de desalinhamento entre o receptor e a frente de onda do campo

- $E_b$  Componente da radiação emitida pelo objeto  
 $F$  Distância focal  
 $F_{12}$  Fator de forma entre as superfícies 1 e 2  
 $FM$  Fator multiplicativo de correção da temperatura medida pelo termovisor  
 $G$  Componente de radiação refletida pelo objeto  
 $h$  Constante de Planck  
 $h(y,x)$  Coeficiente de Kessel de contribuição da variável  $x$  à variável  $y$   
 $h_p(.)$  Fração de potência radiada pelo emissor e coletada pelo receptor  
 $I$  Corrente  
 $I(\lambda, T_x)$  Equação de radiação de Planck multiplicada pelo comprimento de onda, à temperatura  $T_x$   
 $I_{beam}$  Campo de propagação  
 $I_{BC}$  Corrente elétrica no bom contato  
 $I_{MC}$  Corrente elétrica no mau contato  
 $I_{NOM}$  Corrente elétrica nominal  
 $I_{TEST}$  Corrente elétrica durante uma inspeção  
 $J$  Radiação total  
 $K$  Coeficiente que é uma função do termovisor e inclui algumas constantes presentes na Lei de Planck  
 $k$  Constante de Boltzmann  
 $k_i$  Parâmetro para cálculo da transmitância atmosférica em função da janela de transmissão considerada  
 $l$  Menor dimensão de um objeto detectável pela câmera  
 $M$  Dimensão mínima de uma superfície a ser inspecionada  
 $M_{bb,\lambda}$  Excitância espectral de um corpo negro  
 $M_\lambda(T)$  Excitância espectral  
 $N$  Ruído gaussiano

$n_A$	Número de amostras de cada conjunto de medição
$P$	Potência dissipada na conexão elétrica
$P_{out}$	Probabilidade de perda de comunicação
$P_R$	Potência média recebida pelo receptor
$P_t$	Potência óptica média transmitida
$Q$	Feixe de onda recebido já atenuado pelo meio de propagação
$R$	Distância radial de desalinhamento entre o receptor e a frente de onda do campo
$r$	Raio de um receptor
$R^2$	Coefficiente de determinação (ou de correlação) entre os valores apresentados por um modelo e os valores esperados
$R[z]$	Potência do objeto inspecionado a uma distância $z$ do termovisor
$R[0]$	Radiação recebida pelo termovisor
$R_{BC}$	Resistência elétrica da conexão conforme
$R_{carga}$	Resistência da carga
$r_d$	Raio de um detector
$R_{linha}$	Resistência de linha (do condutor)
$R_{MC}$	Resistência elétrica da conexão não conforme
$R_p$	Resistência
$R(\lambda, T_{ob}, T_A)$	Resposta do termovisor
$s_d$	Desvio padrão das diferenças entre as amostras de duas populações
$SE(\bar{d})$	Erro padrão da diferença média entre as amostras de duas populações
$S_R$	Sensibilidade de um receptor
$T$	Temperatura
$T_A$	Temperatura dos objetos no ambiente de inspeção
$T_{AMB}$	Temperatura do meio de propagação

$T_{ob}$	Temperatura absoluta do objeto inspecionado
$T_{BCS\bar{A}}$	Temperatura do bom contato em condições conformes
$T_{MCS\bar{A}}$	Temperatura do mau contato em condições conformes
$T_{S\bar{A}}$	Temperatura das conexões com a instalação elétrica funcionando sem defeito
$u(.)$	Incerteza padrão de uma variável
$u(x_i, x_j)$	Covariância entre as variáveis $x_i$ e $x_j$
$u_c(.)$	Incerteza padrão combinada de uma variável
UR	Umidade relativa do meio de propagação
V	Parâmetro meteorológico denominado Visibilidade
$V_0$	Fonte de corrente alternada
$w_z$	Raio da frente de onda
X	Densidade de potência de um sinal emitido
$x_i$ e $x_j$	Estimativas das variáveis de entrada de um sistema
Z	Distância de propagação
$\Delta T$	Elevação de temperatura
$\Delta T_c$	Elevação de temperatura corrigida
$\Delta \lambda$	Largura de faixa do filtro óptico do receptor
$\Theta$	Ângulo da fenda de um objeto de pequenas dimensões
$\Theta_v$	Ângulo de visão entre o objeto e o termovisor
$\alpha_a$	Coefficiente de absorção aerossol
$\alpha_m$	Coefficiente de absorção molecular
$\alpha, \alpha_1$	Ângulos de inclinação do termovisor em relação ao solo
$\beta$	Ângulo de visada entre o termovisor e a superfície inspecionada
$\beta_a$	Coefficiente de espalhamento aerossol
$\beta_i$	Parâmetro para cálculo da transmitância atmosférica em função da janela de transmissão considerada
$\beta_m$	Coefficiente de espalhamento molecular
$\beta$	Quantidade de água precipitável no caminho de propagação do campo eletromagnético

$\delta_1, \delta_2$	Ângulo entre o caminho de propagação da radiação e o vetor normal da superfície emissora ou receptora de irradiação
$\delta_i$	Parâmetro para cálculo da transmitância atmosférica em função da janela de transmissão considerada
$\delta_p$	Ângulo de desalinhamento
$\varepsilon$	Emissividade da superfície
$\varepsilon_\lambda$	Emissividade espectral
$\varphi$	Meio-ângulo FOV
$\kappa$	Constante de Boltzmann
$\lambda$	Comprimento de onda
$\lambda_i$	Comprimento de onda operacional do termovisor
$\rho$	Umidade absoluta do ar no caminho de propagação
$\rho_r$	Refletividade do objeto
$\psi$	Vetor radial da frente de onda de propagação, com origem em seu centro
$\sigma$	Coefficiente de atenuação atmosférica por unidade de comprimento
$\sigma_n^2$	Variância
$\tau$	Densidade óptica
$\tau [z]$	Transmitância a uma distância $z$
$\tau_a$	Transmitância de um meio devido à turbulência atmosférica
$\tau_{ai}$	Transmitância devido à quantidade de água precipitável no caminho de propagação
$\tau_{eq}$	Transmitância de um meio
$\tau_l$	Transmitância de um meio devido à sua atenuação
$\tau_p$	Transmitância de um meio devido ao espalhamento geométrico e desalinhamento
$\tau_{si}$	Transmitância atmosférica devido ao espalhamento
$\zeta$	Ângulo de inclinação de uma superfície inspecionada em relação ao solo
$Z$	Comprimento do meio de propagação do campo eletromagnético do objeto até o termovisor



## **Prefácio**

Na economia globalizada do século XXI, a sobrevivência das organizações depende da habilidade e rapidez de inovar e efetuar melhorias contínuas, geralmente com o objetivo de maximizar o retorno financeiro produzido pelos seus ativos. Como resultado, as organizações vêm buscando incessantemente novas ferramentas de gerenciamento que as direcionem para uma maior competitividade através da melhoria da qualidade e produtividade de seus processos, produtos e serviços.

Considerando o ativo “instalações elétricas”, que fazem parte da infraestrutura de qualquer complexo organizacional, com o decorrer do tempo os componentes e as conexões de uma instalação elétrica passam, obrigatoriamente, por uma degradação em função do ciclo de funcionamento normal ou acelerado por agentes externos, perdendo parcial ou totalmente as funções projetadas, alterando suas características nominais, conduzindo a uma redução na segurança e na confiabilidade dos sistemas associados. Para manter o funcionamento adequado de uma instalação elétrica, são essenciais o monitoramento de sintomas correlacionados às falhas e a previsão do desempenho esperado para execução de ações preventivas adequadas. Nesse sentido, a gestão da manutenção, como função estratégica das organizações, se apresenta como responsável direta pela disponibilidade dos ativos, buscando incessantemente a aplicação das melhores práticas preventivas.

A adoção da manutenção preditiva se configura como uma solução eficiente e eficaz para falhas e defeitos que possam ocorrer nas instalações elétricas, sendo realizada com base no monitoramento de

modificações de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. Esse é o grande objetivo da manutenção preditiva: prever (ou prever) as falhas através de acompanhamento dos diversos parâmetros, permitindo a operação contínua da instalação pelo maior tempo possível. Ou seja, a manutenção preditiva privilegia a “disponibilidade” à medida que não promove intervenções no regime normal de funcionamento da instalação elétrica. Além disso, a intervenção só é decidida quando os parâmetros acompanhados indicam sua real necessidade. Quando o nível de degradação se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido, é tomada a decisão de intervenção.

Dentre as diversas técnicas de manutenção preditiva, a termografia infravermelha representa uma poderosa ferramenta para se determinar as condições operacionais das instalações elétricas. Problemas como conexões com alta resistência elétrica, curto-circuito, circuito aberto, aquecimento por indução eletromagnética, cargas desbalanceadas em circuitos trifásicos, influência de harmônicos, sobrecargas e equipamentos instalados de maneira inadequada podem ser detectados através da inspeção termográfica por infravermelho. Isso ocorre porque esses problemas apresentados apresentam como sintoma alterações em suas temperaturas superficiais.

Segundo pesquisas recentes, conduzidas pela Fluke Corporation e divulgadas em seus vídeos institucionais, uma parada operacional não programada, oriunda de um equipamento defeituoso que foi mantido em operação, acarreta custos médios por evento da ordem de US\$ 10.000 (dez mil dólares estadunidenses) às organizações. Por outro lado, outros estudos indicam que a parada programada para realização de manutenção corretiva tem custos médios por ocorrência de US\$ 1.000 (um mil dólares estadunidenses). Desse modo, a melhoria do índice de acertos nos diagnósticos de inspeções termográficas propiciaria às organizações uma redução de custos oriundos de paradas operacionais intempestivas, bem como redução de custos com paradas operacionais para manutenções corretivas desnecessárias.

Assim sendo, para o entendimento do processo de utilização da inspeção termográfica na manutenção das instalações elétricas e suas limitações, este livro foi desenvolvido com o intuito de trazer ao leitor os fenômenos físicos envolvidos na termografia, algo além do usualmente

disponível em manuais e tutoriais, levando-o ao entendimento e domínio da técnica e, sobretudo, a ter condições de perceber, interpretar e atuar sobre diversos fatores não triviais que podem comprometer o resultado da inspeção termográfica.

Face às condições ambientais durante as inspeções termográficas, aos parâmetros e instrumentos envolvidos além do termovisor, aos critérios de diagnóstico de instalações elétricas e considerando também recentes avanços técnico-científicos quanto às incertezas associadas, ao posicionamento do termografista em relação à superfície a ser inspecionada e à estimativa de emissividade, este livro foi estruturado com a seguinte organização:

- no primeiro capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos princípios físicos e equipamentos empregados em inspeções termográficas. São analisadas também as implicações e feitas algumas considerações relativas à termografia aplicada à manutenção elétrica industrial;
- no segundo capítulo são apresentados os critérios de diagnóstico de instalações elétricas por meio de inspeções termográficas, e normas técnicas para capacitação e certificação de pessoal no assunto. São discutidos também os problemas relativos às incertezas de medição e ângulo de visada do termografista em relação à superfície inspecionada;
- o terceiro capítulo apresenta resultados de estudos e pesquisas recentes no que tange a novos métodos de inspeção e de diagnóstico em equipamento industriais a partir da termografia infravermelha. É apresentado um método de cálculo da incerteza associada à medição de temperatura por termografia. Essa incerteza é função das estimativas e medições realizadas pelo usuário. Essas medições são realizadas com instrumentos específicos que incluem, além do próprio termovisor, outros necessários para medição de parâmetros que auxiliam na construção do termograma. Apresenta-se também modelos de correção do erro de medição de temperatura em função do ângulo de visada e do campo de visão do termovisor, situação muitas vezes negligenciada que leva a erros de medição. Por fim, apresenta-se um método de diagnóstico de problemas de conexão em cabos em paralelo, situação melindrosa em instalações elétricas.

Esperamos que este livro leve ao termografista uma contribuição técnico-científica além daquela normalmente empregada na prática da manutenção, subsidiando os profissionais da área com o conhecimento necessário para o entendimento dos fenômenos envolvidos na inspeção termográfica e o conseqüente aperfeiçoamento do diagnóstico de instalações elétricas.

# Capítulo 1

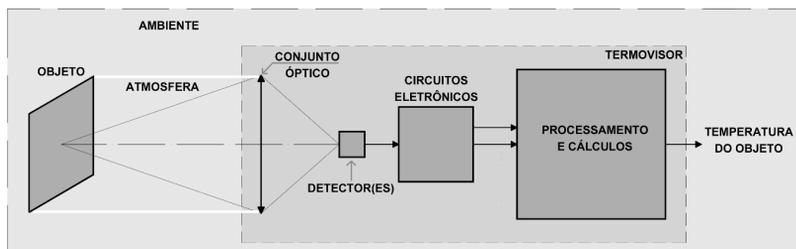
## A termografia por infravermelho

De acordo com o *International Lighting Vocabulary*, publicado pelo IEC (*International Electrotechnical Commission*) [1], a radiação eletromagnética contida acima da faixa destinada à comunicação via rádio e abaixo dos raios X é denominada radiação óptica. Assim, a radiação óptica é definida como a radiação com comprimentos de onda entre 1  $\eta\text{m}$  e 1 mm. A radiação óptica é subdividida em três escalas: radiação infravermelha, radiação visível e radiação ultravioleta [2].

Quando se utiliza a radiação infravermelha emitida pelos corpos para estimativa de suas temperaturas, é comum o uso do termo “radiação térmica”. Esse termo é aplicado à energia térmica emitida pelos meios (sólidos, líquidos e gasosos) relacionada às oscilações e transições dos elétrons que, por sua vez, estão relacionadas à temperatura do meio [3].

A termografia por infravermelho, que opera na faixa da radiação infravermelha, é uma técnica de aquisição e análise de informações térmicas a partir de imagens obtidas a distância, ou seja, sem contato [4]. Emprega instrumentos denominados termovisores ou câmeras termográficas [5]. A Figura 1-1 mostra um esquema simplificado do funcionamento de um termovisor [5]. O objeto sob análise radia uma potência eletromagnética na faixa de frequência do infravermelho que se propaga pela atmosfera até o termovisor. Essa irradiação, recebida pelo termovisor em seu detector, é amplificada em circuitos eletrônicos e é convertida em um sinal condicionado para o processamento eletrônico, por exemplo tensão elétrica. Cálculos são efetuados para se correlacionar a irradiação recebida com a temperatura do objeto e, finalmente, a imagem térmica é construída e visualizada ou armazenada pelo operador [2], [4], [5].

Figura 1-1 – Diagrama esquemático do funcionamento de um termovisor



Fonte: adaptado de [5].

## 1.1 Princípios físicos

A termografia está fundamentada no fato de que todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto emitem radiação térmica, radiação que inclui comprimentos de onda classificados como infravermelho [5], [6]. Quanto maior for a temperatura do objeto, mais intensa será a potência de sua radiação emitida [5], [7]. A distribuição espectral da radiação térmica, em função do comprimento de onda, emitida por um radiador ideal (corpo negro) é descrita pela Lei de Planck, de acordo com a Equação (1.1) [5], [8].

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{h \cdot c / (\lambda \cdot k \cdot T)} - 1)} \quad (1.1)$$

Onde:

$M_{\lambda}(T)$ : excitância espectral,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ;

$T$ : temperatura absoluta do objeto (corpo negro), K;

$h$ : constante de Planck,  $6,626\ 069\ 57 \times 10^{-34}$  J.s [9];

$c$ : velocidade da luz no vácuo,  $2,997\ 924\ 58 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup> [9];

$\lambda$ : comprimento de onda analisado,  $\mu\text{m}$ ;

$k$ : constante de Boltzmann,  $1,380\ 648\ 8 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup> [9].

Desenvolvendo-se a Lei de Planck desde temperaturas ambientes até a temperatura solar, chega-se à conclusão de que a excitância espectral assume seus valores máximos na faixa de comprimento de onda de (1 a 20)  $\mu\text{m}$ , faixa que está contida no espectro infravermelho [5]. Os termovisores comercialmente disponíveis no mercado

operam, são sensíveis, justamente nas frequências contidas nessa faixa [5], [8].

A função inversa da Lei de Planck permite o cálculo da temperatura do objeto radiante a partir da excitância espectral recebida pelo termovisor [5]:

$$T = \frac{c_2}{\ln \left[ \frac{(c_1 + \lambda^5 \cdot M_\lambda)^\lambda}{(\lambda^5 \cdot M_\lambda)^\lambda} \right]} \quad (1.2)$$

Onde:

$$c_2 = 1,438\,777\,0 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K} [5];$$

$$c_1 = 3,741\,771\,52 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^4 [5].$$

Na Equação (1.2), a excitância espectral  $M_\lambda$  expressa a potência de radiação térmica numa faixa espectral de  $1 \mu\text{m}$  em torno do comprimento de onda  $\lambda$ , radiado por um corpo negro de  $1 \text{ m}^2$  de área, em um hemisfério [5].

Os equipamentos que recebem essa irradiação, os termovisores, são termômetros que medem indiretamente a temperatura do objeto analisado em duas etapas: primeiro, a potência óptica radiada pelo objeto e recebida pelo detector é medida, em seguida a temperatura do objeto é determinada através de um algoritmo de cálculo que considera a Lei de Planck [5].

Os termovisores geralmente são sensíveis a uma faixa de frequência contínua dentro do espectro infravermelho [5], [8], logo a excitância recebida pelo termovisor deve ser calculada através da integração de toda a faixa de frequência operacional do termovisor, de acordo com a Equação (1.2) [8].

Entretanto, geralmente os termovisores são calibrados<sup>1</sup> (ajustados) em fábrica através de um procedimento que correlaciona toda a excitância espectral recebida com a temperatura do objeto radiante, baseando-se na Equação (1.3) [8].

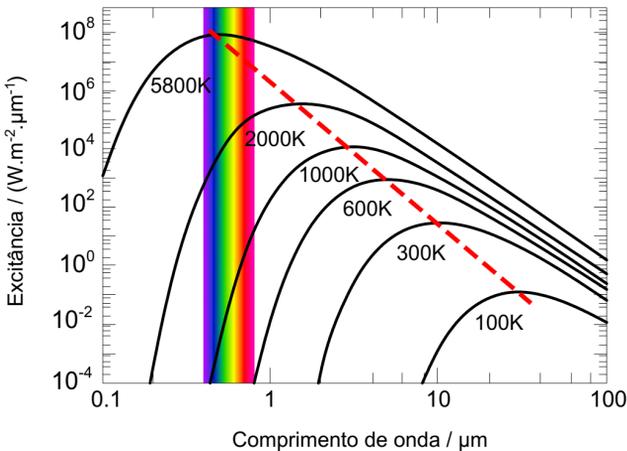
1 O termo “calibrado” refere-se ao projeto, à construção e principalmente aos ajustes feitos em fábrica para funcionamento do termovisor. Apesar de não se referir ao procedimento descrito em [72], o termo é mantido neste livro por ser utilizado dessa maneira no dia a dia das pessoas.

$$M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(T) d\lambda \quad (1.3)$$

O instrumento é então ajustado para correlacionar a excitância espectral total recebida com a temperatura do objeto analisado.

A Figura 1-2 mostra a distribuição espectral da excitância na faixa de (0,1 a 100)  $\mu\text{m}$  de corpos à temperatura de (100 a 5.800) K, como consequência da aplicação da Lei de Planck. Analisando a figura, verifica-se que objetos a temperaturas em torno de (300 a 400) K, típicas de equipamentos elétricos em operação, possuem excitância máxima em comprimentos de onda em torno de 10  $\mu\text{m}$ . Os termovisores comercialmente disponíveis e indicados para uso em manutenção de equipamentos elétricos, em sua grande maioria, operam na faixa de (3 a 15)  $\mu\text{m}$  [2].

Figura 1-2 – Distribuição espectral da excitância de corpos à temperatura de (100 a 5.800) K



Fonte: adaptado de [8].

Ainda na Figura 1-2, nota-se que o objeto radiante apresenta seu pico de excitância a um determinado comprimento de onda que é função de sua temperatura. Esses picos de excitância estão identificados no gráfico através da linha vermelha tracejada. Matematicamente, a localização do comprimento de onda  $\lambda_{max}$  onde ocorre a excitância máxima, em função da temperatura  $T$ , pode ser obtida derivando-se a Lei de Planck em função do comprimento de

onda, o que conduz à Lei de Deslocamento de Wien apresentada na Equação (1.4) [8].

Para que a Lei de Planck seja aplicável a todos os objetos, e não somente a radiadores perfeitos (corpos negros), devem ser consideradas as propriedades radiantes de cada objeto sob análise. A uma mesma temperatura, corpos reais emitem radiação menor do que a emitida por radiadores perfeitos. Em função disso, a propriedade “emissividade espectral” é definida como a comparação entre a excitação emitida pelo objeto analisado e a excitação emitida por um corpo negro, ambos à mesma temperatura, conforme definido na Equação (1.5).

$$\lambda_{max} \times T = 2.897,8 [\mu m \times K] \quad (1.4)$$

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{M_{bb,\lambda}} \quad (1.5)$$

Onde:

$\varepsilon_{\lambda}$ : emissividade espectral do objeto analisado, adimensional;

$M_{\lambda}$ : excitação radiante do objeto analisado, no comprimento de onda  $\lambda$ ,  $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ ;

$M_{bb,\lambda}$ : excitação radiante de um corpo negro à mesma temperatura do objeto analisado, no comprimento de onda  $\lambda$ ,  $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ .

Um corpo negro é um corpo perfeitamente opaco que, como resultado de sua temperatura, emite a máxima radiação possível [10], ou seja, um emissor perfeito [5], [11].

A partir da Lei de Planck, e considerando a emissividade do objeto analisado, o termovisor determina a temperatura do objeto analisado. A emissividade é uma característica intrínseca de cada objeto e depende da direção de radiação, do comprimento de onda analisado e de suas características superficiais [5], [12].

É importante ressaltar que o termo “emissividade” vem sendo utilizado neste livro em consonância à maneira como é frequentemente empregado no dia a dia por termografistas. Entretanto, o termo correto a ser aplicado seria “emitância”. Emissividade é uma propriedade fundamental de materiais, e não de objetos. O termo emissividade deveria ser empregado somente às amostras de materiais perfeitamente planas, livres de porosidades, oxidação ou qualquer alteração que afete suas características. A emitância é calculada

exatamente da mesma forma que a emissividade, porém é aplicada a corpos reais, que podem conter oxidação, superfícies curvas, rugosidade ou outras características próprias [10].

## 1.2 Propagação da radiação infravermelha na atmosfera

Apesar de a radiação infravermelha se propagar no espaço livre entre o objeto e o termovisor, no procedimento de medição de temperatura por termografia infravermelha devem ser considerados os fenômenos físicos que ocorrem nesse ambiente e que afetam a excitação recebida pelo termovisor [12]-[14].

A atenuação atmosférica é um dos fenômenos experimentados pela radiação eletromagnética ao se propagar. Ou seja, enquanto se propaga e até atingir o termovisor, a radiação óptica, emitida pelo objeto sob análise, sofre atenuações por absorção e por espalhamento. O conhecimento de fatores físicos facilmente mensuráveis, tais como umidade relativa, temperatura do meio de propagação e distância entre o objeto e o termovisor, permite o cálculo da atenuação da energia radiada [12]-[14]. A partir da energia recebida (já atenuada), o termovisor estima a temperatura do “objeto-alvo”, considerando todos esses fatores e a sua própria calibração (ajustes) de fábrica, que foi feita com base na Lei de Planck [5], [8].

Apesar de haver vasta bibliografia abordando métodos fenomenológicos e empíricos para a estimativa da atenuação atmosférica na propagação óptica aplicada às comunicações [5], [8], [12]-[16], não se tem a mesma disponibilidade do assunto quando se deseja estimar a atenuação atmosférica aplicada à medição de temperatura por termografia infravermelha. Desse modo, neste livro são adaptados e aplicados os modelos já empregados em comunicações ópticas no espaço livre (conhecido pela sigla FSO, do inglês *free space optics*), por também retratarem fenomenologia da propagação do infravermelho no espaço livre.

Para análise de incertezas de medição, os modelos matemáticos são mais adequados que os modelos gráficos. Assim, sempre que possível serão aplicados os modelos empíricos de cálculo de atenuação em inspeções termográficas que se apresentem em forma de equações, viabilizando o cálculo das incertezas associadas. Desafortunadamente,

a pouca literatura disponível geralmente traz modelos em forma de tabelas [17].

Considerando que a faixa espectral de sensibilidade dos termovisores aplicados em manutenção elétrica, de uma forma geral, encontra-se entre (3 e 15)  $\mu\text{m}$  [2], [5], [8], e considerando que as distâncias típicas para as inspeções termográficas de instalações elétricas são inferiores a 50 m [5], [15], [18], somente dois fenômenos físicos contribuem significativamente para a atenuação da radiação térmica que se propaga desde a superfície inspecionada até o termovisor: a absorção e o espalhamento [12]-[14]. O entendimento da atenuação atmosférica na faixa do infravermelho é baseado nos estudos de propagação óptica no espaço livre, FSO [12], [16].

A absorção causa perda real de energia do campo eletromagnético, enquanto o espalhamento redireciona (espalha) a energia do campo [12], [14]. A excitância radiante transmitida a uma determinada distância é determinada pela Lei de Beer [8], [12]-[14]:

$$\tau[z] = \frac{M_\lambda[z]}{M_\lambda[0]} = e^{-\sigma \cdot z} \quad (1.6)$$

Onde:

$\tau[z]$  é a transmitância à distância  $z$ , adimensional;

$M_\lambda[z]$  é a excitância radiante à distância  $z$ ,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ;

$M_\lambda[0]$  é a excitância radiada pelo objeto,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ;

$\sigma$  é o coeficiente de atenuação por unidade de comprimento,  $\text{neper} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

$z$  é a distância de propagação, m.

O parâmetro  $\sigma$  pode ser subdividido em quatro variáveis conforme apresentado na Equação (1.7) [12], [14].

$$\sigma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (1.7)$$

Onde:

$\alpha_m$  é o coeficiente de absorção molecular,  $\text{neper} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

$\alpha_a$  é o coeficiente de absorção aerossol,  $\text{neper} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

$\beta_m$  é o coeficiente de espalhamento molecular,  $\text{neper} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

$\beta_a$  é o coeficiente de espalhamento aerossol,  $\text{neper} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Os valores dos coeficientes  $\alpha_m$  e  $\beta_m$  são devidos às moléculas que constituem o ar atmosférico, enquanto os valores dos coeficientes  $\alpha_a$  e  $\beta_a$  são devidos às partículas em suspensão.

A umidade relativa e a temperatura atmosférica têm seus efeitos pronunciados na absorção e no espalhamento moleculares,  $\alpha_m$  e  $\beta_m$  respectivamente. O coeficiente de absorção aerossol ( $\alpha_a$ ) e o coeficiente de espalhamento aerossol ( $\beta_a$ ) são independentes da umidade relativa e da temperatura atmosférica [12], [14]. Considerando que é usual e exequível o emprego de instrumentos portáteis de medição de umidade relativa e de temperatura atmosférica; que as inspeções termográficas são feitas a curtas distâncias, tipicamente a menos de 50 m, e muitas vezes em ambientes fechados livres de materiais em suspensão, tornando desprezíveis os efeitos de aerossóis na propagação da radiação infravermelha nessas condições; e que não é trivial o uso de instrumentos de medição para medição de partículas em suspensão, o parâmetro  $\sigma$  se limita aos coeficientes  $\alpha_m$  e  $\beta_m$ .

O espalhamento molecular ocorre porque a onda eletromagnética radiada pelo objeto, usualmente considerada plana a um ponto distante da fonte de radiação, interage com as cargas elétricas livres das moléculas em suspensão, geralmente modeladas como esféricas. Isso leva as moléculas em suspensão a produzir um campo eletromagnético secundário, que não existia anteriormente à interação dessas moléculas com o campo eletromagnético proveniente do objeto. Após a interação com o campo eletromagnético secundário, gerado pelas moléculas em suspensão, a frente de onda eletromagnética “original” se desvia de seu trajeto inicial, sofrendo o espalhamento [12]. Assim, a secção transversal dessa frente de onda oriunda do objeto é diferente daquela frente de onda sem espalhamento, o que, em última análise, altera sua densidade de potência por área.

A transmitância devido ao espalhamento atmosférico pode ser calculada conforme a Equação (1.8) [12].

$$\tau_{si} = e^{-\frac{3,91}{V} \left( \frac{\lambda_i}{0,55} \right)^\delta \cdot z} \quad (1.8)$$

Onde:

$\tau_{si}$ : transmitância atmosférica devido ao espalhamento, adimensional;

$V$ : parâmetro meteorológico denominado Visibilidade, km;

$\lambda_i$ : comprimento de onda operacional do termovisor,  $\mu\text{m}$ ;

$\delta$ : quantidade de água precipitável no caminho de propagação do campo eletromagnético,  $\mu\text{m}$ ;

$z$ : comprimento do caminho de propagação do campo eletromagnético, m.

O parâmetro  $\delta$  pode ser calculado conforme a Equação (1.9) [12].

$$\begin{aligned} \text{Se } V < 6\text{km} : \delta &= 0.585 \cdot \sqrt[3]{V} \\ \text{Se } V \geq 6\text{km} : \delta &= 0.0057 \cdot V + 1.025 \end{aligned} \quad (1.9)$$

Já a absorção molecular ocorre porque existem moléculas que absorvem energia do campo eletromagnético radiante. Na faixa operacional dos termovisores, tipicamente (3 a 15)  $\mu\text{m}$ , as moléculas que mais contribuem para atenuação do campo radiante por absorção são as moléculas de água, de dióxido de carbono e de ozônio [12], [14]. Para se calcular a transmitância atmosférica devido à absorção molecular, devem ser conhecidas as concentrações dessas moléculas no caminho de propagação do campo. Entretanto, esse é um problema complexo, uma vez que essas concentrações variam conforme a altitude, a região, o clima e outros parâmetros do local de propagação. Geralmente, ao se calcular a absorção atmosférica em um local específico, é possível obter resultados suficientemente precisos usando informações extraídas de bases de dados disponíveis na literatura [12], [14].

Se o comprimento de onda analisado estiver em uma das janelas de transmissão listadas na Tabela 1-1, é possível determinar a transmitância com o uso da Equação empírica (1.10) desenvolvida por Langer, baseada no trabalho de Elder e Stronger [12], [14], [16].

Tabela 1-1 – Janelas de transmissão infravermelha

Janela	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Fronteiras / $\mu\text{m}$	0,72 0,94	0,94 1,13	1,13 1,38	1,38 1,90	1,90 2,70	2,70 4,30	4,30 6,00	6,00 15,0

Fonte: adaptado de [12], [14], [16].

$$\tau_{ai} = e^{-A_i \delta_i^{\frac{1}{2}}}, \text{ se } \delta < \delta_i$$

$$\tau_{ai} = k_i \left( \frac{\delta_i}{\delta} \right)^{\beta_i}, \text{ se } \delta > \delta_i \quad (1.10)$$

Onde  $\tau_{ai}$  é a transmitância devido à quantidade de água precipitável no caminho de propagação ( $\delta$ , mm), adimensional.

Os parâmetros  $A_i$ ,  $k_i$ ,  $\beta_i$  e  $\delta_i$  são especificados na Tabela 1-2.

A variável  $\delta$  na Equação (1.10) expressa a quantidade de água precipitável no caminho de propagação, e é determinada conforme a Equação (1.11) [12], [14].

$$\delta = 10^{-3} \cdot \rho \cdot z \quad (1.11)$$

Onde  $\rho$  é a umidade absoluta do ar no caminho de propagação,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

**Tabela 1-2 – Parâmetros para cálculo da atenuação atmosférica conforme as janelas de transmissão**

Janela	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$A_i / \text{mm}^{-1/2}$	0,0305	0,0363	0,1303	0,211	0,350	0,373	0,598	Não estudado
$k_i$	0,800	0,765	0,830	0,802	0,814	0,827	0,784	
$\beta_i$	0,112	0,134	0,093	0,111	0,1035	0,095	0,122	
$\delta_i / \text{mm}$	54	54	2,0	1,1	0,35	0,26	0,165	

Fonte: adaptado de [12].

O valor de  $\rho$  é obtido a partir de duas medições facilmente executáveis pelo termografista: a umidade relativa e a temperatura atmosférica do caminho de propagação. Há, na literatura, tabelas e equações empíricas, assim como gráficos que correlacionam essas grandezas [8], [14], [19]. Alternativamente, pode-se aplicar a Equação (1.12) para esse cálculo [12].

$$\rho = 1322,8 \cdot \frac{UR}{T_{AMB}} \cdot \exp \left[ \frac{25,22 \cdot (T_{AMB} - 273,16)}{T_{AMB}} - 5,31 \cdot \ln \left( \frac{T_{AMB}}{273,16} \right) \right] \quad (1.12)$$

Onde:

$UR$ : umidade relativa do meio de propagação, em fração, adimensional;

$T_{AMB}$ : temperatura do meio de propagação, K.

Entretanto, para a faixa de comprimento de onda mais usual em termografia, aplicada à manutenção elétrica, janela VIII de (6 a 15)  $\mu\text{m}$  [5], o método de cálculo da transmitância atmosférica disponível em [12], [14], [16] não é aplicável, uma vez que não foi estudado justamente para essa faixa, conforme foi apresentado na Tabela 1-2.

As câmeras termográficas recomendadas para aplicação em manutenção preditiva operam na faixa de (7,5 a 14)  $\mu\text{m}$  [20]-[23]. Para esta janela de transmitância, a absorção atmosférica, que é o fator preponderante para a atenuação atmosférica, é praticamente independente do comprimento de onda [17]. Para essa faixa de comprimento de onda, o método disponível em [17] pode ser usado para o cálculo da atenuação atmosférica.

Esse método de cálculo da atenuação atmosférica para a janela VIII considera que as concentrações dos absorvedores  $\text{N}_2\text{O}$  (óxido nitroso),  $\text{CO}$  (monóxido de carbono),  $\text{O}_2$  (oxigênio),  $\text{CH}_4$  (metano) e  $\text{N}_2$  (nitrogênio) podem ser constantes e que suas contribuições são irrelevantes para problemas práticos de termografia. A concentração de vapor de água varia muito em função da localização e do clima, e é relevante no cálculo de atenuação. A concentração de  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) é praticamente constante em torno de 0,032% e, em princípio, deveria ser considerada no cálculo de atenuação atmosférica. No entanto, quando se analisam os trabalhos publicados em [24], [25], observa-se que a transmitância atmosférica, devido à concentração de dióxido de carbono, é praticamente unitária na faixa de comprimento de onda (7 a 14)  $\mu\text{m}$  para distâncias de propagação inferiores a 200 m, situação típica em termografia aplicada à manutenção preditiva. Assim, o cálculo da atenuação atmosférica nessas condições se reduz a calcular a atenuação devido a moléculas de água no meio de propagação.

Enfim, a transmitância do meio de propagação pode ser determinada consultando-se as tabelas de Passman e Larmore, disponíveis em [17], [24], [26]. Os dados de entrada necessários são a quantidade de água precipitável no caminho de propagação, grandeza determinada a partir das Equações (1.11) e (1.12), e o comprimento de onda de interesse. Ressalta-se que isso é válido para a faixa de comprimento de onda da janela VIII, (6 a 15)  $\mu\text{m}$ , porque a atenuação atmosférica pode

ser considerada independente do comprimento de onda [17] e dependente apenas da quantidade de água precipitável, uma vez que a influência da atenuação devida ao  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) foi considerada irrelevante.

### 1.3 Janelas de transmitância atmosférica

Conforme exposto na seção 1.2, na faixa de comprimento de onda de (1 a 15)  $\mu\text{m}$  os principais absorvedores atmosféricos são as moléculas de água, de dióxido de carbono e de ozônio. A atenuação atmosférica ocorre porque essas moléculas absorvem a radiação de maneira seletiva, ou seja, de maneira não linear, na faixa citada. Em contrapartida, os dois gases presentes em maior abundância na atmosfera, nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ) são homonucleares, não possuindo dipolo magnético e, por conseguinte, não apresentam absorção molecular [12].

Naturalmente, as concentrações de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ , os dois absorvedores mais importantes, dependem das condições climáticas, da altitude, da localização geográfica e de outros fatores. Tipicamente, a concentração de  $\text{H}_2\text{O}$  varia de ( $10^{-3}$  a 1) % e a de  $\text{CO}_2$  entre (0,03 e 0,04) %. Outras moléculas absorvedoras são as de metano ( $\text{CH}_4$ ), de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ). Existem referências que indicam as suas concentrações típicas em função, principalmente, da altitude do local [12].

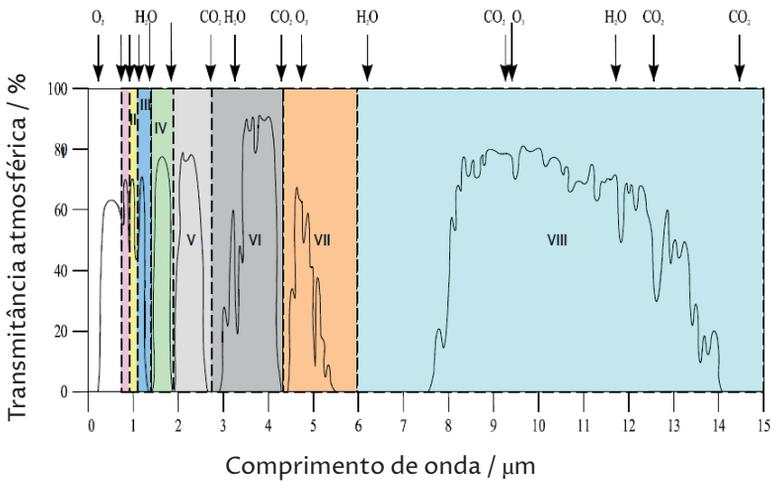
A combinação das diferentes concentrações dessas moléculas, algumas absorvedoras de maneira seletiva, outras não absorvedoras, produz um perfil de transmitância atmosférica que é função do comprimento de onda, as chamadas “janelas de transmitância atmosféricas” [12].

A Figura 1-3 apresenta a transmitância atmosférica típica para a faixa de comprimento de onda de (0 a 15)  $\mu\text{m}$  ao nível do mar, considerando-se uma distância de propagação de 1.820 m. São indicados os principais absorvedores em cada faixa. Também estão identificadas as janelas atmosféricas, de I a VIII, conforme apresentado na Tabela 1-2 [12].

Nota-se que entre uma janela e outra existem regiões de grande atenuação atmosférica onde, geralmente, são evitadas as operações dos termovisores. A faixa de frequência operacional dos termovisores também deve considerar qual será a faixa de temperatura a ser medida [8], pois conforme pôde ser visto na Figura 1-2 a radiação emitida pelos corpos assumem seus valores máximos a diferentes comprimentos de onda para diferentes temperaturas.

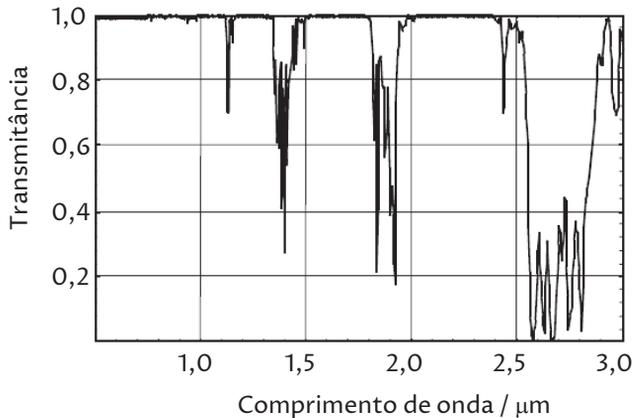
A Figura 1-4 apresenta a transmitância típica para as faixas de [(1 a 3), (3 a 7) e (7 a 15)]  $\mu\text{m}$ , que são faixas operacionais de alguns termovisores, para a distância de 10 m, mais usual em termografia [5]. Nota-se que para distâncias menores, de poucos metros, há várias faixas praticamente sem atenuação.

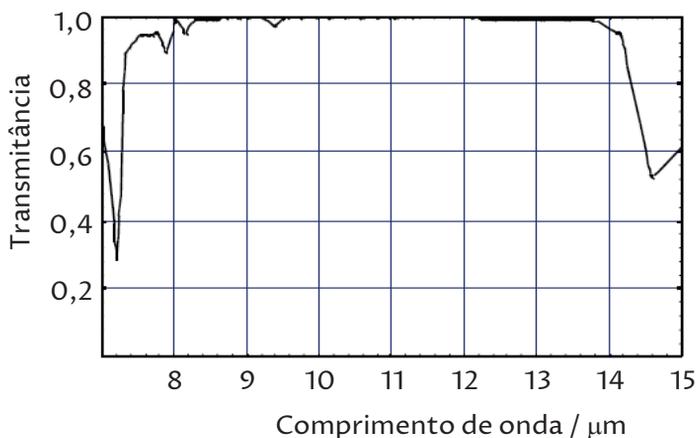
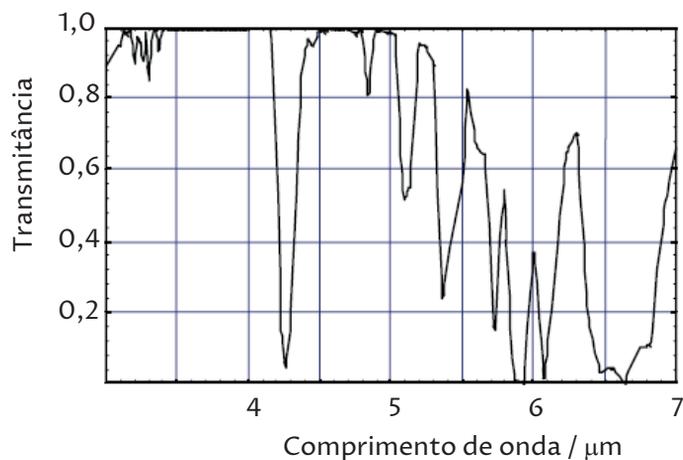
Figura 1-3 – Transmitância atmosférica típica para a faixa de (0 a 15)  $\mu\text{m}$  ao nível do mar, para a distância de propagação de 1.820 m



Fonte: adaptado de [12].

Figura 1-4 – Transmitância normalizada típica para a faixa de [(1 a 3), (3 a 7) e (7 a 15)]  $\mu\text{m}$ , para a distância de 10 m





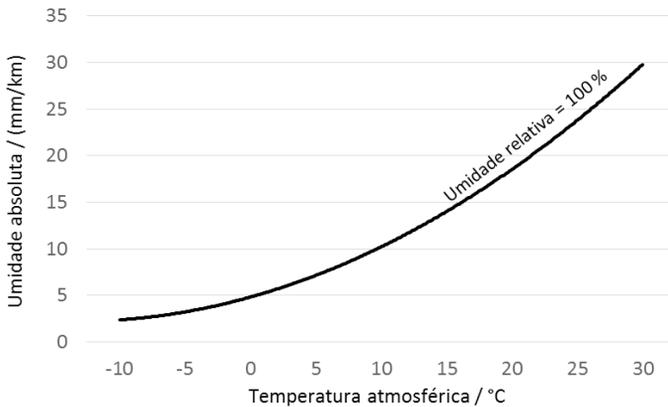
Fonte: adaptado de [5].

## 1.4 A janela de transmitância atmosférica VIII

Conforme exposto nas seções 1.2 e 1.3, a janela de transmitância atmosférica VIII, que compreende a faixa de comprimento de onda de (6 a 15)  $\mu\text{m}$ , não foi estudada para aplicação em comunicações ópticas. Entretanto, essa faixa é bastante usual em termografia infravermelha [5]. Para essa faixa de interesse, pode ser utilizado o método de cálculo de transmitância atmosférica que está disponível em [17]. Nessa janela, o cálculo da atenuação atmosférica se resume ao cálculo da atenuação devido às moléculas de água no caminho de propagação entre o objeto inspecionado e o termovisor.

Alternativamente à Equação (2.12), a quantidade de água precipitável ( $\rho$ ) no caminho de propagação pode ser determinada em função da umidade relativa atmosférica ( $UR$ ) e da temperatura atmosférica ( $T_{AMB}$ ) a partir da relação gráfica apresentada na Figura 1-5. Essa figura apresenta a umidade absoluta, em milímetros de água por quilômetro de propagação, mm/km, em função da temperatura atmosférica, °C, para umidade relativa de 100%. Para se obter a umidade absoluta  $\rho$  a uma dada umidade relativa  $UR$ , deve-se multiplicar  $\rho$  obtido no gráfico por  $UR$  [17].

Figura 1-5 – Determinação da umidade absoluta de um meio de propagação



Fonte: adaptado de [17].

Uma vez determinada a umidade absoluta do meio de propagação, a quantidade de água precipitável é obtida multiplicando-se aquele valor pela distância de propagação, conforme a Equação (1.11). A atenuação desse meio pode ser obtida consultando-se as tabelas de Passman e Larmore, disponíveis em [17], [24], [26]. Os dados necessários são a quantidade de água precipitável e o comprimento de onda de interesse.

Considerando que o fenômeno de transmitância atmosférica tem comportamento exponencial em função da quantidade de água precipitável [17], [26], conforme apresentado na Equação (1.6), sendo necessária a interpolação para obtenção da transmitância atmosférica em função de um valor qualquer de quantidade de água precipitável não diretamente disponível nas tabelas, tal interpolação deve ser exponencial, e não linear [26].

### 1.4.1 Delimitação da janela de transmitância VIII na termografia aplicada à manutenção elétrica

Através de buscas realizadas nos sítios eletrônicos dos fabricantes Flir, Fluke, Irisys e Testo, constatou-se que os termovisores recomendados por esses fabricantes para aplicação em manutenção elétrica operam na faixa de comprimento de onda entre (7,5 e 14)  $\mu\text{m}$ . A Tabela 1-3 apresenta as faixas de comprimento de onda dos termovisores recomendados por esses fabricantes.

A utilização dessa janela de transmitância atmosférica compreendida aproximadamente entre os comprimentos de onda de (7,5 a 14)  $\mu\text{m}$  está em consonância à distribuição espectral da excitância dos corpos apresentada na Figura 1-2. Corpos a temperaturas entre (300 e 400) K, temperaturas típicas de componentes elétricos em operação, possuem excitância máxima nos comprimentos de onda entre aproximadamente (5 e 20)  $\mu\text{m}$ . Isso também está em conformidade com o fato de a transmitância atmosférica ser bastante favorável e praticamente independente do comprimento de onda nessa faixa, conforme apresentado na Figura 1-4 e analisado em [17].

**Tabela 1-3 – Faixa operacional de comprimento de onda de termovisores recomendados para manutenção elétrica**

Fabricante	Modelo	Faixa operacional de comprimento de onda / $\mu\text{m}$
Irisys	IR32 DS [27]	8 a 14
	IRI 2010 [28]	
	IRI 4030 [29]	
	IRI 4040 [30]	
Flir	Série i [31]	7,5 a 13
	Série E [32]	
	Séries P e B [33]	
Fluke	Ti125 [34]	7,5 a 14
	Ti110 [35]	
	Ti105 [36]	
Testo	875 e 875i [37]	8,0 a 14
	876 [38]	
	882 [39]	
	885 [40]	
	890 [41]	

Fonte: elaboração dos autores.

## 1.5 Desalinhamento entre emissor e receptor óptico

Já que a emissividade dos objetos varia em função do ângulo de emissão com a normal à superfície do objeto [5], [12], é recomendável que a inspeção termográfica seja feita em um ângulo de visada igual a zero, ou seja, o termovisor deve ser posicionado na direção paralela à normal da superfície do objeto sob inspeção.

Entretanto, estudos experimentais [42] apresentam resultados que indicam que as características do conjunto óptico do termovisor também influenciam na medição de temperatura, pois termovisores diferentes apresentaram erros de medição diferentes. Nesse trabalho foram utilizados três termovisores (Flir ThermaCAM E25, Fluke Ti20 e NEC TH7800) que apresentaram erro de medição proporcional ao ângulo de visada, quando este era maior que 45°. Quando o ângulo de visada era inferior a 45°, o erro de medição era desprezível. Para os três casos, os erros de medição eram negativos, ou seja, os resultados das medições eram numericamente menores do que os valores esperados. Entretanto, os resultados experimentais foram interpretados pelos autores daquele trabalho como diferentes entre si, levando à conclusão de que cada termovisor teria um erro de medição diferente.

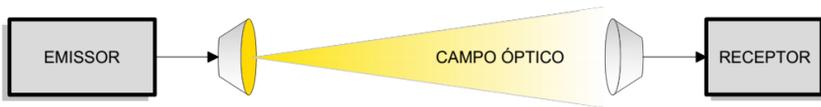
Para se avaliar a influência do desalinhamento e das características ópticas do termovisor na temperatura medida, uma alternativa é recorrer aos modelos de FSO. Em FSO, é desejado o perfeito alinhamento entre o emissor e o receptor ópticos, visto que o desalinhamento atenua o sinal no receptor e afeta o desempenho do sistema de comunicação [43], [44]. Analogamente, em termografia o desalinhamento e as características ópticas do termovisor afetam a excitação irradiante recebida pelo termovisor e, por conseguinte, a temperatura medida. Tais avaliações se limitam ao campo qualitativo, pois nesses modelos os emissores são considerados pontuais e extremamente direcionais [45], conceito que não pode ser empregado em termografia, onde os objetos analisados geralmente possuem dimensões não desprezíveis em relação às dimensões da frente de onda propagada e da área do conjunto óptico do termovisor. Como exemplo, cita-se que os desalinhamentos em sistemas de comunicações ópticas são da ordem de 0,01 mrad ( $\sim 0,6 \times 10^{-3}^\circ$ ) [43], enquanto que em inspeções termográficas são esperados e processados desalinhamentos de até 70°, dependendo da posição do objeto inspecionado e da definição da posição mais acessível e segura para o inspetor.

No modelo simplificado da Figura 1-6, um sinal emitido com densidade de potência  $x$  se propaga por um meio de transmitância  $h$  até um receptor de sensibilidade  $S_r$ , produzindo um sinal  $y$ , conforme Equação (1.13) [43].

$$y = h \cdot R \cdot x + n \quad (1.13)$$

Onde  $n$  é um ruído gaussiano independente do sinal propagado, com variância  $\sigma_n^2$ .

Figura 1-6 – Emissão de um sinal que se propaga por um meio até um receptor



Fonte: adaptado de [43].

Seja o parâmetro  $\tau_{eq}$ , a transmitância do meio de propagação, composto por três fatores: a atenuação do meio  $\tau_l$ , o espalhamento geométrico e o desalinhamento  $\tau_p$ , e a turbulência atmosférica  $\tau_a$ . Assim, a transmitância pode ser escrita como apresentado na Equação (1.14) [43].

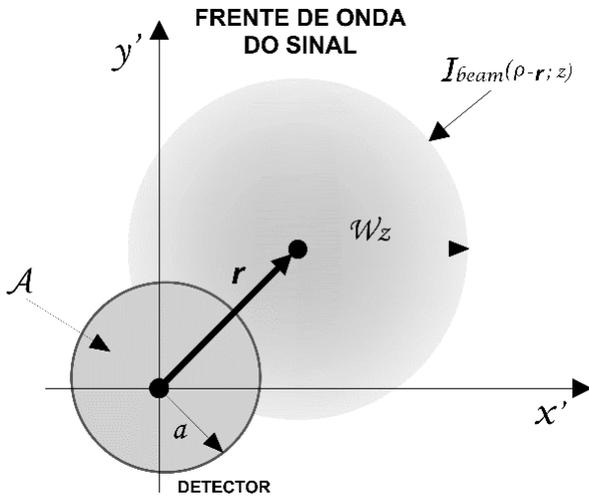
$$\tau_{eq} = \tau_l \cdot \tau_p \cdot \tau_a \quad (1.14)$$

A turbulência atmosférica causa alterações tanto na intensidade quanto na fase do sinal recebido, distorcendo a frente de onda do sinal propagado [43], [46], [47]. Isso ocorre porque o sinal propagado na atmosfera “turbulenta” experimenta variações aleatórias no índice de refração ao longo de sua trajetória no meio [43], [46]. Essas variações de índice de refração são causadas basicamente por moléculas de água de dimensões tipicamente encontradas em condições de nevoeiro forte, chuva ou neve [47]. Também podem ser causadas por camadas de ar a diferentes temperaturas na trajetória de propagação [12]. Entretanto, em inspeções termográficas de instalações elétricas as distâncias entre o objeto inspecionado e o termografista são relativamente pequenas, e há exigência normativa de não se executar serviços em instalações elétricas sob condições de perigo

aos trabalhadores [48], onde se enquadram as situações de nevoeiro e de chuva durante a inspeção. Assim, esses efeitos não são considerados nesta análise.

Para os desalinhamentos paralelos, os modelos disponíveis indicam que a atenuação no sinal recebido pelo receptor depende das características do campo eletromagnético propagado, do meio e da distância de propagação, bem como da área de abertura do conjunto óptico do receptor [43], o que em termografia seria equivalente à área de abrangência do conjunto óptico do termovisor. Na Figura 1-7 é apresentado um esquema de desalinhamento paralelo de raio  $r$  entre o detector e a frente de onda do sinal radiado. O círculo menor de área  $A$  representa o detector e o círculo maior de raio  $w_z$  representa a frente de onda do sinal radiado, com desalinhamento paralelo em relação ao detector.

Figura 1-7 – Desalinhamento paralelo de raio  $r$  entre o detector e a frente de onda do sinal radiado



Fonte: adaptado de [43].

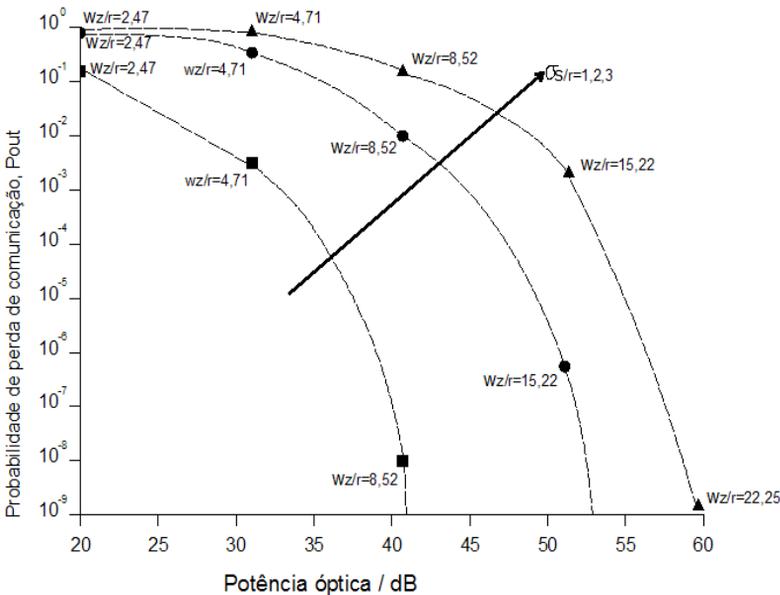
A fração de potência do campo eletromagnético que é de fato coletada pelo receptor, tendo em vista o desalinhamento paralelo, pode ser calculada como apresentado na Equação (1.15) [43].

$$h_p(\mathbf{r}; z) = \int A I_{beam}(\psi - D_r; z) d\rho \quad (1.15)$$

Onde  $h_p(\cdot)$  representa a fração de potência irradiada coletada pelo receptor,  $A$  é a área do receptor,  $\psi$  é o vetor radial com origem no centro da frente de onda do campo de propagação,  $D_r$  é a distância radial de desalinhamento entre o receptor e a frente de onda do campo,  $I_{beam}(\psi - D_r; z)$  é o campo de propagação à distância  $z$  do emissor, na posição  $(\psi - D_r)$ .

A Figura 1-8 mostra a solução de um problema em comunicações ópticas para três situações de desalinhamento normalizado ( $\sigma_s/r = 1, 2, 3$ ), onde  $\sigma_s$  é o desvio padrão do erro de desalinhamento no receptor. À medida que o desalinhamento aumenta, a probabilidade de perda de comunicação ( $P_{out}$ ) também aumenta. Se a relação entre as dimensões da frente de onda e o raio do receptor  $w_z/r$  diminui (por exemplo, através do aumento do raio  $r$  do receptor), uma menor potência (dB) é necessária para que o sistema se mantenha em operação.

Figura 1-8 – Problema em comunicações ópticas para 3 situações de desalinhamento normalizado  $\sigma_s/r = 1, 2, 3$ , em função da potência óptica, dB, gerando a probabilidade de perda de comunicação ( $P_{out}$ )



Fonte: adaptado de [44].

Nota-se que tais resultados em comunicações ópticas sugerem que quanto maior o desalinhamento entre emissor e receptor, menor

a potência recebida por este. E quanto maior o raio de abertura da lente do receptor, maior a potência por ele recebida.

Kedar e Arnon afirmam em [45] que um receptor com um valor reduzido de FOV (*field of view*, campo de visão ou ângulo de abertura de lente, ou ainda, ângulo de aceitação) é preferível por ser menos sujeito a ruídos e interferências do meio. Entretanto, tal característica impõe limites mais restritivos à potência irradiada incidente sobre o receptor, tornando-se um problema quando os requisitos de alinhamento entre emissor e receptor não podem ser garantidos. Este mesmo trabalho [45] segue uma linha de raciocínio diferente para modelar o desalinhamento entre emissor e receptor. É considerado um desalinhamento angular, e não paralelo, e o receptor é modelado tendo como parâmetro principal o FOV, característica também presente em termovisores. Entretanto, novamente as análises e comparações com termovisores serão qualitativas, visto que várias considerações pertinentes aos sistemas de comunicações ópticas foram adotadas e não são adequadas para inspeções termográficas. Por exemplo, em receptores ópticos o ângulo de abertura da lente é suficientemente pequeno para que seu valor seja considerado aproximadamente igual à sua tangente [45]. Em termovisores, o ângulo de abertura varia tipicamente de  $(7 \text{ a } 45)^\circ$ , faixa para qual tal consideração não é cabível.

Para modelar os efeitos do desalinhamento angular em comunicações ópticas, o receptor é modelado através de seu “meio-ângulo FOV”  $\varphi / 2$  que, para pequenos ângulos, seu valor se aproxima ao valor de sua tangente, conforme apresentado na Equação (1.16) [45].

$$\frac{\varphi}{2} \approx \frac{r_d}{f} \quad (1.16)$$

Onde  $r_d$  é o raio do detector e  $f$  é a distância focal da lente do receptor.

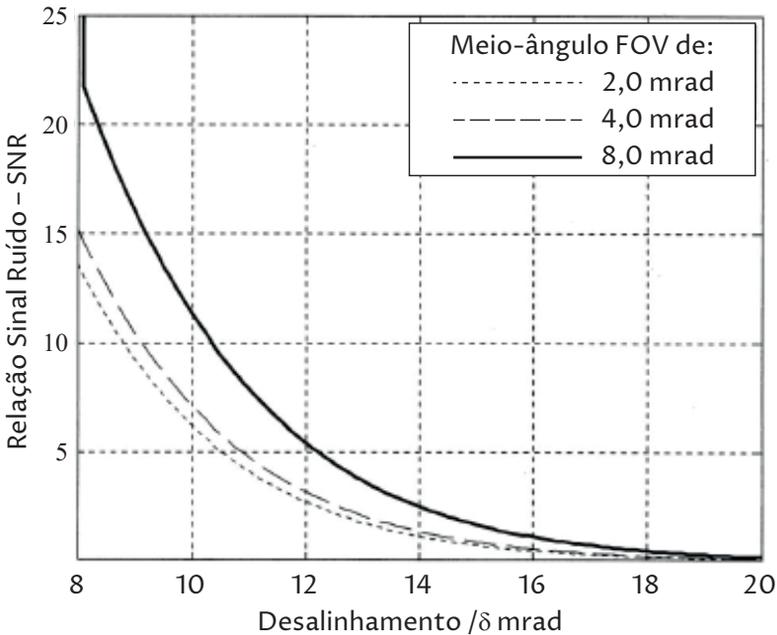
A potência recebida pelo receptor é função de seu ângulo FOV  $\varphi$ , do ângulo de desalinhamento  $\delta_p$ , do comprimento de onda irradiante  $\lambda$ , da área de abertura do detector  $A$  e dos parâmetros intrínsecos ao meio de propagação. Tal relação é apresentada na Equação (1.17).

$$P_R(\varphi, \delta_p, \tau, \lambda, A) = \int_{\delta_p - \frac{\varphi}{2}}^{\delta_p + \frac{\varphi}{2}} Q(\varphi, \delta_p, \tau, \lambda, A) d\varphi \tag{1.17}$$

Onde  $P_R$  é a potência recebida,  $\tau$  é a densidade óptica (um parâmetro que caracteriza o meio de propagação) e  $Q$  representa o feixe de onda recebido já atenuado pelo meio de propagação.

Para esse modelo, foram simulados sistemas de comunicações ópticas para avaliação de seus desempenhos com “meio-ângulo FOV” de (2,0; 4,0 e 8,0) mrad, e desalinhamentos de (8 a 20) mrad. Os resultados são apresentados na Figura 1-9. Nota-se que quanto maior o ângulo FOV, maior a potência (relação sinal ruído SNR) recebida. À medida que o desalinhamento aumenta, é diminuída a potência recebida.

Figura 1-9 – Simulação de desempenho de sistemas de comunicações ópticas com “meio-ângulo FOV” de (2,0; 4,0 e 8,0) mrad, e desalinhamentos de (8 a 20) mrad



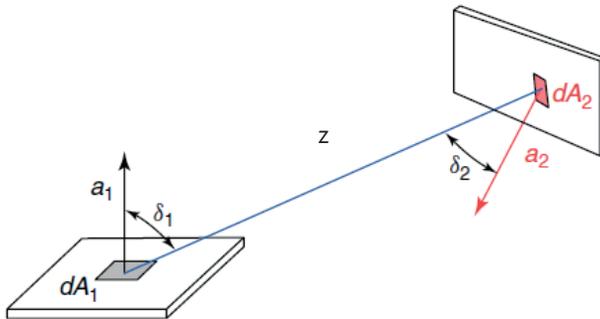
## 1.6 Desalinhamento entre superfícies emissora e receptora de irradiação

Uma alternativa para se avaliar qualitativamente o desalinhamento entre o objeto inspecionado e o termovisor é recorrer ao conceito de fator de forma empregado em engenharia térmica. Duas superfícies arbitrariamente posicionadas, de áreas  $A_1$  e  $A_2$ , separadas por uma distância  $z$  são representadas na Figura 1-10. Os ângulos  $\delta_1$  e  $\delta_2$  representam a inclinação dos vetores normais às superfícies em relação à linha que liga seus centros. A potência irradiante oriunda da superfície  $A_1$  que atinge a superfície  $A_2$ ,  $\Phi_{12}$ , é dada por [8], [49] conforme a Equação (1.18).

$$\Phi_{12} = L_1 \cdot \iint_{A_1, A_2} \frac{\cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad (1.18)$$

Onde  $L_1$  é a radiância oriunda da superfície  $A_1$ .

Figura 1-10 – Irradiação térmica emitida por uma superfície que atinge outra, em posições arbitrárias



Fonte: adaptado de [8].

Sabendo que a potência radiante  $\Phi_1$  emitida por  $A_1$  em um hemisfério pode ser dada por  $\Phi_1 = \pi L_1 A_1$ , a fração de  $\Phi_1$  realmente interceptada pela superfície  $A_2$  é dada pela Equação (1.19) [8].

$$F_{12} = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_1} = \frac{1}{\pi A_1} \cdot \iint_{A_1, A_2} \frac{\cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad (1.19)$$

A relação apresentada na Equação (1.19) define justamente o fator de forma  $F_{12}$  entre as superfícies 1 e 2 [8]. Outros nomes como fator de configuração, fator de ângulo e fator de visada são usados na literatura para fator de forma [49].

O fator de forma assume valor entre (0 e 1) [49], ou seja, indica qual porção da energia radiada pela superfície  $A_1$  incide na superfície  $A_2$ .

O fator de forma auxiliaria na análise da porção da energia radiada por um objeto, proporcional à sua temperatura, que de fato é recebida pelo termovisor. Nota-se na Equação (1.19) que quanto maior forem os ângulos de inclinação  $\delta_1$  e  $\delta_2$ , menor será o fator de forma. Ou seja, menor será a porção de energia radiada pelo objeto de área  $A_1$  recebida pelo objeto de área  $A_2$ . Fazendo analogia à termografia, menor seria a energia recebida pelo termovisor. Tal fenomenologia se assemelha aos resultados empíricos de enlaces de comunicações ópticas apresentados na seção 2.5, que avalia a potência óptica recebida pelo receptor em função de seu desalinhamento ao emissor.

Entretanto, as evidências experimentais indicam que ângulos de visada entre a superfície inspecionada e o termovisor inferiores a  $45^\circ$  não impactam significativamente na medição de temperatura [42], e o modelo matemático apresentado em Equação (1.19) mostra que desalinhamentos entre (0 e  $45^\circ$ ) impactam consideravelmente no fator de forma. Como exemplo, poder-se-ia aproximar a situação de um objeto inspecionado preencher completamente o FPA do termovisor, sob ângulo de visada  $\delta_p$ , à condição de duas placas planas de “grandes dimensões” [50] com ângulo de inclinação  $\delta_p$  entre si. Tal condição leva ao cálculo do Fator de Forma conforme a Equação (1.20) [50].

$$F_{12} = 1 - \text{sen} \left( \frac{\delta_p}{2} \right) \quad (1.20)$$

Adotando como exemplo um ângulo de visada de  $25^\circ$ , o Fator de Forma para essa situação seria de aproximadamente 80,5%. Sob esse ângulo de visada, as evidências experimentais indicam erro de medição inferior a 0,5% [42], o que implica num Fator de Forma superior a 99,5%. Desse modo, o fator de forma para duas superfícies planas não pode ser usado diretamente em termografia para correção do erro de medição devido ao ângulo de visada. Para termografia infravermelha, o modelo que mais se aproxima à sua configuração física seria a de uma superfície plana radiando para

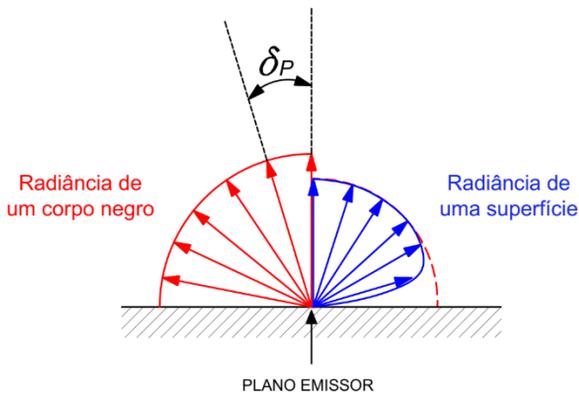
uma lente, configuração típica de um objeto inspecionado por um termovisor [49], [50]. Não se encontram disponíveis na literatura modelos fenomenológicos para análise de tal situação. No capítulo 3 é apresentado um método empírico que corrige a temperatura medida pelo termovisor em função do ângulo de visada e do FOV do termovisor, o que, em última análise, é o emprego do fator de forma para essa condição de inspeção termográfica.

## 1.7 Emissividade angular dos objetos

Conforme já exposto na seção 1.1, a emissividade do objeto analisado deve ser um parâmetro conhecido pelo inspetor termográfico para a correta parametrização do termovisor e do seu *software*, possibilitando o cálculo adequado da temperatura do objeto. Entretanto, o inspetor deve se atentar ao fato de que a emissividade de corpos não ideais (radiadores não ideais) é variável em função do ângulo de emissão [5], [8], [51]-[54].

Radiadores ideais têm emissividade unitária em todas as direções de radiação, pois se comportam como emissores isotropicamente perfeitos, enquanto corpos reais têm emissividade inferior e que varia conforme o ângulo de emissão [8]. A Figura 1-11 ilustra essa dependência angular em comparação à radiação de um corpo negro. O ângulo  $\delta_p$  representa o ângulo de emissão com a normal à superfície do objeto analisado.

Figura 1-11 – Dependência angular da emissividade de um objeto em comparação à radiação de um corpo negro

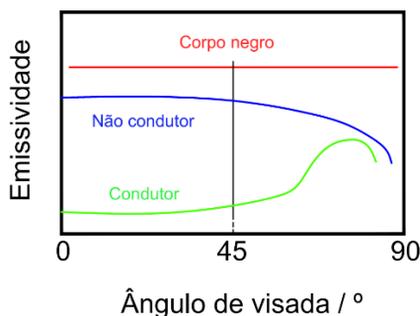


Fonte: adaptado de [8].

Corpos condutores e não condutores de eletricidade, considerando suas superfícies cruas, sem recobrimento, comportam-se de maneira diferente. Materiais não condutores de fato apresentam uma redução da emissividade com o aumento do ângulo de visada. Entretanto, materiais condutores tendem a apresentar inicialmente uma elevação da emissividade e somente para ângulos de visada extremamente altos, em torno de  $80^\circ$ , começam a apresentar diminuição [8]. Tal comportamento é ilustrado para ambos os materiais na Figura 1-12.

Assim, em verdade o inspetor termográfico deve atentar-se à emissividade do objeto inspecionado sob as condições reais da inspeção realizada, visto que essa propriedade é função não só das características do objeto, mas também do ângulo de emissão, de sua temperatura e do comprimento de onda operacional do termovisor [5], [8], [51], [52], [55]. Entretanto, caso a inspeção termográfica seja em objetos condutores, por exemplo barramentos de cobre ou conectores de alumínio, esse fator não é relevante para ângulos de visada inferiores a  $45^\circ$ .

Figura 1-12 – Característica direcional típica da emissividade de condutores e não condutores, comparada a corpos negros



Fonte: adaptado de [8].

## 1.8 Termovisores

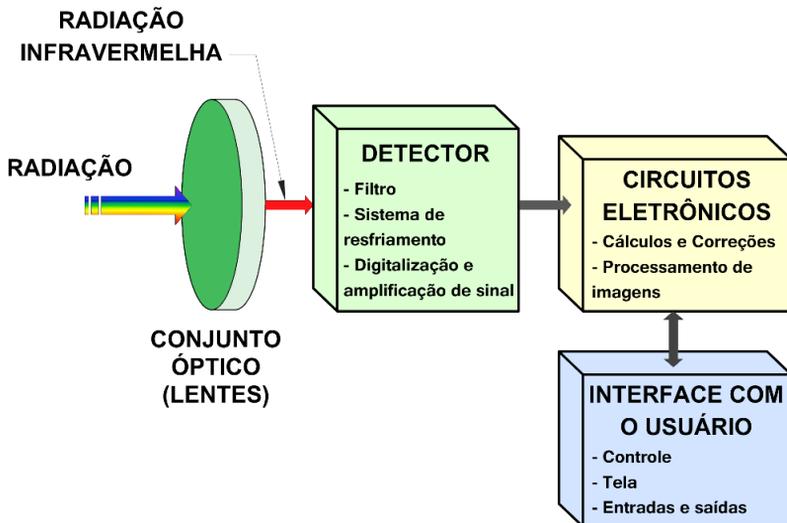
Segundo a OIML (*International Organization of Legal Metrology*), termovisor é um “instrumento optoeletrônico concebido para observação, medição e registro espacial e temporal da radiação térmica de objetos, no campo de visão do instrumento, por formação de uma sequência temporal de termogramas e pela determinação da

temperatura superficial de objetos a partir do conhecimento de sua emissividade e parâmetros de influência (temperatura ambiente, transmitância atmosférica, distância de observação, etc.)” [56].

A origem dos termovisores é relacionada às aplicações militares, em atividades qualitativas para se “enxergar no escuro”. Entretanto, hoje em dia o termovisor é largamente usado em aplicações civis, com propósitos principalmente quantitativos, ou seja, de medição de temperatura [2]. O principal propósito de um termovisor é converter a radiação infravermelha emitida pelo objeto analisado, propagada pelo espaço livre e recebida pela câmera, em uma imagem visual bidimensional, geralmente numa escala de cores ou tons de cinza. A imagem visual possui uma correlação entre suas cores e a temperatura do objeto inspecionado [2], [8].

Os principais componentes operacionais de um termovisor são o conjunto óptico (lentes), o detector, o sistema de resfriamento ou de estabilização da temperatura do detector, os circuitos eletrônicos para processamento do sinal e da imagem, e a interface com o usuário, que pode ter portas de saída de comunicação, portas de entrada de controle, e tela para exibição das imagens [8]. A Figura 1-13 mostra um diagrama de blocos esquematizando tais componentes.

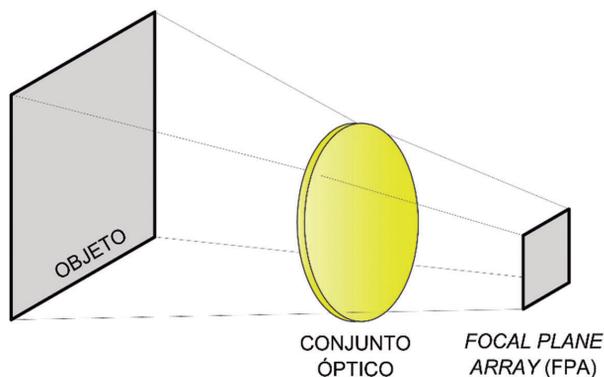
Figura 1-13 – Diagrama de blocos dos componentes de um termovisor



Geralmente as câmeras indicadas por fabricantes para termografia infravermelha aplicada à manutenção industrial são do tipo *staring system*, que têm a imagem projetada simultaneamente em todos os *pixels* do conjunto detector [8]. A Figura 1-14 ilustra essa configuração.

Esse sistema é conhecido também como FPA (matriz de plano focal, do inglês *focal plane array*). No FPA, os detectores são distribuídos em uma matriz de colunas e linhas e recebem simultaneamente toda a irradiação infravermelha direcionada pelo conjunto óptico [8]. O FPA é constituído basicamente de duas partes: o sensor infravermelho, feito de um material sensível à radiação infravermelha; e o ROIC (circuito integrado de leitura, do inglês *readout integrated circuit*), feito de silício. O ROIC tem duas funções, a saber: realizar a leitura do sinal (analógico) proveniente do sensor infravermelho e processar esse sinal, amplificando-o e, em alguns casos, já o convertendo em digital [2], [8]. A saída do ROIC, com sinais proporcionais à temperatura do objeto inspecionado, é levada à interface com o usuário para, dentre as outras funções, gerar na tela uma imagem com cores correlacionadas aos valores de temperatura.

Figura 1-14 – Esquema de projeção da imagem sobre os *pixels* de um termovisor



Fonte: adaptado de [8].

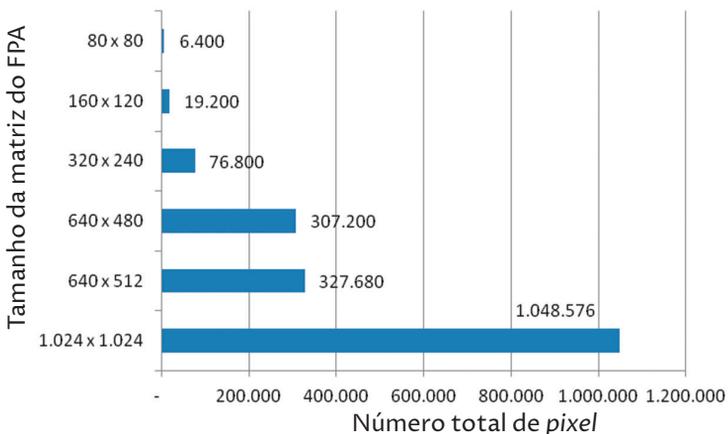
Atualmente, os termovisores disponíveis no mercado possuem FPA com as seguintes características:

- o número de *pixels*, assim como em câmeras fotográficas, tem se elevado. Estão disponíveis no mercado câmeras com até (1.024 x 1.024) *pixels* [8]. Entretanto, para aplicações mais simples ainda se encontram disponíveis câmeras com (120 x 120) [19] ou (160 x 120) *pixels* [57], a custos mais acessíveis. A Figura 1-15 ilustra o

número total de *pixels* de diferentes FPAs. A Figura 1-16 mostra a mesma cena reproduzida por termovisores com diferentes números de *pixels*. Nota-se claramente que quanto maior o número de *pixels*, melhor a resolução da imagem gerada;

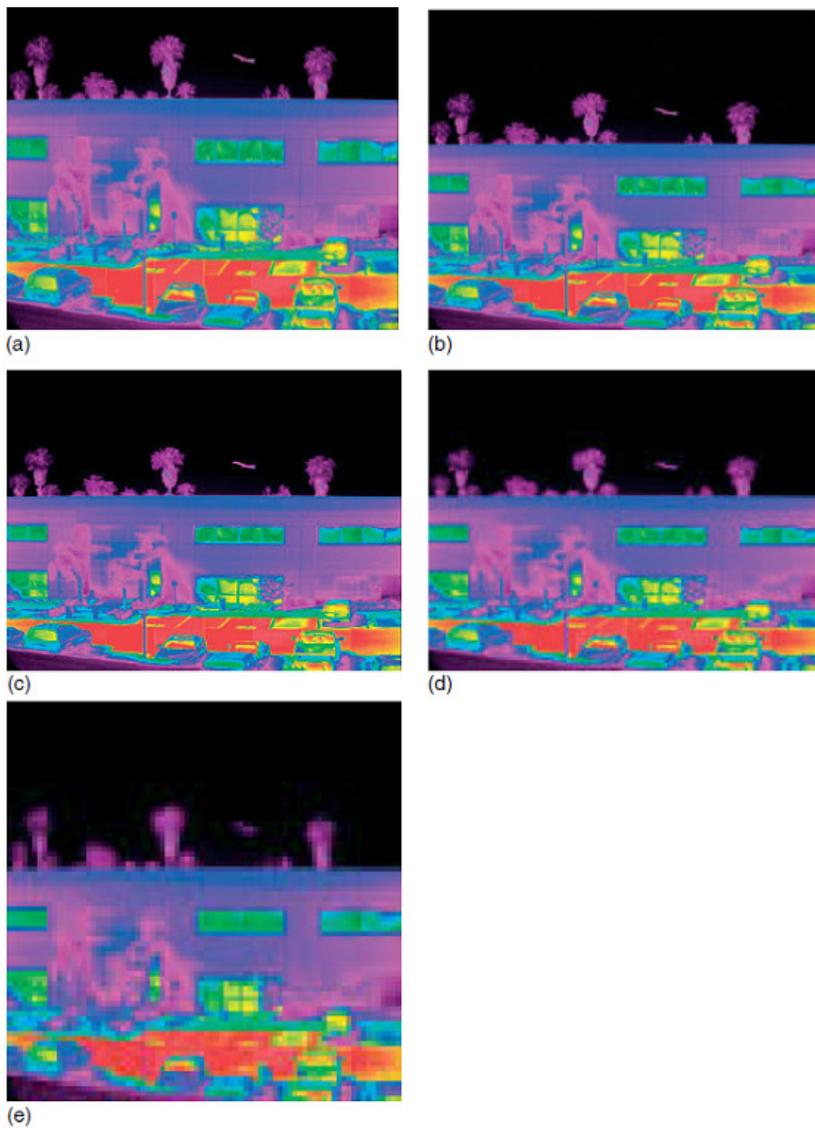
- o tamanho do *pixel* tem diminuído. A redução do tamanho do *pixel*, além de permitir um maior número deles, permite diminuir o tamanho da lente, diminuindo seu custo. Atualmente os *pixels* têm dimensões da ordem de (15 a 17)  $\mu\text{m}$  [8];
- a tendência de diminuição do tamanho do *pixel* permite um aumento do fator de preenchimento do FPA. O fator de preenchimento é definido como a razão entre a área efetivamente preenchida com células sensíveis ao infravermelho e a área total do FPA. Cada elemento sensor deve ser separado física e termicamente dos elementos vizinhos e individualmente conectado ao ROIC. Assim, devido a essas separações, a área do FPA efetivamente sensível ao infravermelho será menor que sua área total. O fator de preenchimento influencia o desempenho da câmera, principalmente em sua resolução espacial. Atualmente, os termovisores têm fator de preenchimento típico entre (80 e 90) % [8]. A Figura 1-17 faz um comparativo mostrando a área efetivamente sensível ao infravermelho de termovisores com diferentes fatores de preenchimento (FP), desde 49% até um hipotético valor de 100%.

Figura 1-15 – Comparativo do número total de *pixels* de termovisores com diferentes matrizes de plano focal



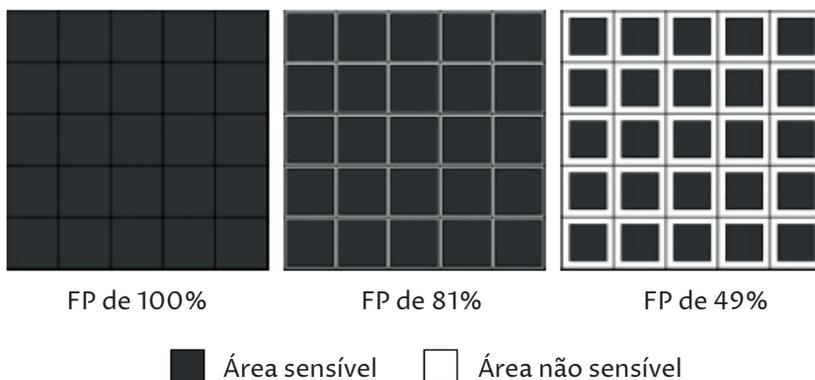
Fonte: adaptado de [8].

Figura 1-16 – Imagens infravermelhas da mesma cena geradas a partir de termovisores com diferentes números de *pixels*. (a) 1.024 x 1.024 *pixels*; (b) 640 x 512 *pixels*; (c) 320 x 240 *pixels*; (d) 160 x 120 *pixels*; e (e) 80 x 80 *pixels*



Fonte: adaptado de [8].

Figura 1-17 – Área efetivamente sensível ao infravermelho de termovisores com diferentes fatores de preenchimento (FP), 49%, 81% e um hipotético valor de 100%



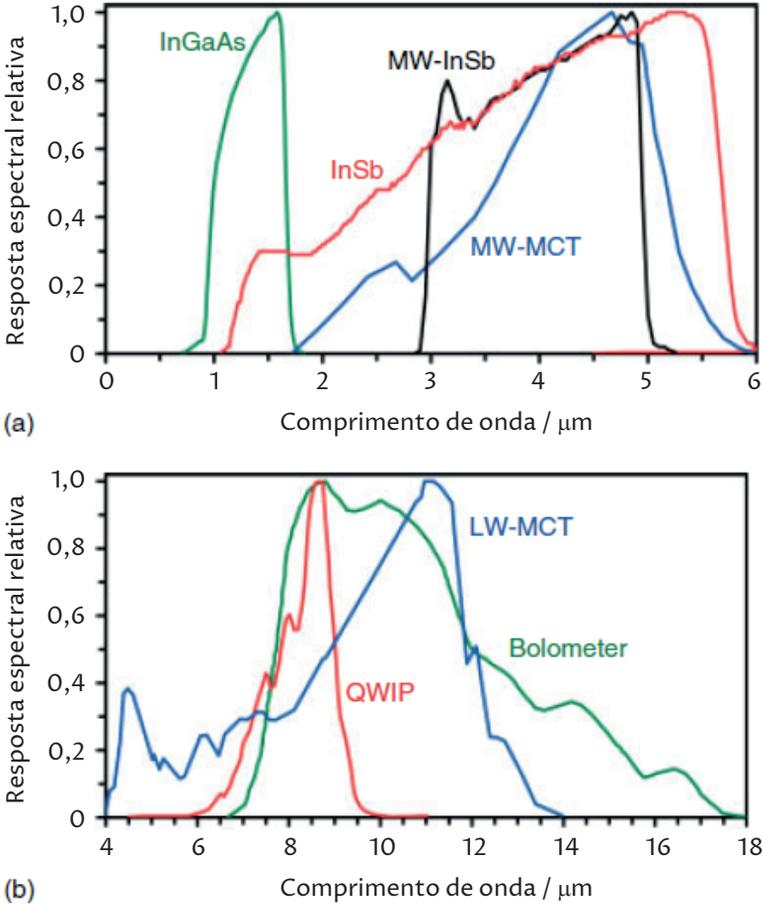
Fonte: adaptado de [8].

Para que os sensores infravermelhos operem adequadamente, é necessário um sistema de resfriamento / estabilização da temperatura [8]. Desde os anos 1990, sistemas de refrigeração pesados, volumosos e baseados em compressão de gases têm sido substituídos por sistemas termoelétricos que usam o efeito Peltier [2]. Os aparatos que empregam tais sistemas geralmente são leves, compactos e consomem pouca energia, da ordem de (0,2 a 0,6) W [2]. Os sensores geralmente operam a aproximadamente 30°C, temperatura não muito diferente da temperatura ambiente em uma indústria. Entretanto, devem ser resfriados com temperatura controlada e independente da ambiente para evitar que mudanças bruscas na temperatura ambiente afetem a operação do termovisor [8].

O sistema óptico de lentes e detectores a ser empregado deve ser adequado à faixa de frequência operacional do termovisor. A Figura 1-18 apresenta as curvas de resposta espectral de diferentes detectores, normalizadas em relação aos seus máximos valores. Nota-se que as curvas de sensibilidade apresentam grande variação entre si, dentro da faixa apresentada, (0 a 18)  $\mu\text{m}$ .

Figura 1-18 – Respostas espectrais de diferentes termovisores com diferentes sistemas ópticos de lentes, normalizadas em relação aos seus máximos valores

- (a) - Comprimento de onda de (0 a 6)  $\mu\text{m}$ ;  
 (b) - Comprimento de onda de (4 a 18)  $\mu\text{m}$ .



Fonte: adaptado de [8].

O detector tipo InGaAs é um fotodiodo de alta velocidade de resposta constituído de GaAs (arseneto de gálio) e InAs (arseneto de índio). A sigla MCT representa também um fotodiodo só que composto de mercúrio, cádmio e telúrio, que pode ser de característica espectral mais adequada a sistemas LW, infravermelho distante, (6 a 15)  $\mu\text{m}$ ; ou MW, infravermelho médio, (3 a 6)  $\mu\text{m}$  [8].

InSb, antimoneto de índio, é o material semicondutor mais utilizado na fabricação de detectores de termovisores que operam na faixa de (1 a 5)  $\mu\text{m}$ , por ter a tecnologia relativamente menos complicada e propiciar boa uniformidade de resposta em detectores de até 1 mega pixels [8].

QWIP, do inglês *Quantum Well Infrared Photodetectors*, são fotodetectores com uma tecnologia que permite compactação de diferentes materiais semicondutores com resolução dimensional da ordem da dimensão atômica. Isso propicia uma resposta espectral mais específica a um determinado comprimento de onda [8].

*Bolometer*, ou bolômetro, é um detector matricial onde a resistência elétrica de seus elementos varia em função da temperatura. Sua temperatura varia devido à irradiação infravermelha absorvida em cada elemento [8].

Atualmente, os termovisores disponíveis no mercado indicados à aplicação em manutenção elétrica utilizam predominantemente como detector um microbolômetro não refrigerado [27], [29], [30], [34]-[36], [58]-[63]. O fabricante Testo utiliza microbolômetros não refrigerados com uma camada de silicone amorfo (a-Si) [37]-[41], o que aumenta o coeficiente resistência/temperatura dos detectores [64].

O *International Lighting Vocabulary*, emitido pelo IEC [1], recomenda que a radiação óptica seja classificada conforme a Tabela 1-4.

Tabela 1-4 – Classificação da radiação óptica conforme IEC

Nome	Faixa de comprimento de onda/ $\mu\text{m}$
UV-C ( <i>Ultraviolet C</i> )	0,1 a 0,28
UV-B ( <i>Ultraviolet B</i> )	0,28 a 0,315
UV-A ( <i>Ultraviolet A</i> )	0,315 a 0,4
Faixa visível ( <i>Visible range</i> )	Aproximadamente 0,36~0,4 a 0,76~0,8
IR-A ( <i>Infrared A</i> )	0,78 a 1,4
IR-B ( <i>Infrared B</i> )	1,4 a 3
IR-C ( <i>Infrared C</i> )	3 a 1.000

Fonte: adaptado de [1].

Entretanto, os fabricantes costumam não seguir a recomendação do IEC e têm adotado uma classificação que faz referência às faixas onde a atmosfera tem transmitância mais favorável ao infravermelho. Os termovisores geralmente são operacionais nessas janelas do

infravermelho onde a atenuação atmosférica é menos relevante. As principais janelas são (3 a 5)  $\mu\text{m}$  e (8 a 12)  $\mu\text{m}$ , conforme exposto na Figura 1-3. A norma brasileira ABNT NBR 15572 [65] segue classificação praticamente idêntica. Tal classificação é vista na Tabela 1-5 [2], [5].

**Tabela 1-5 – Classificação da radiação óptica adotada por fabricantes e pela norma ABNT NBR 15572**

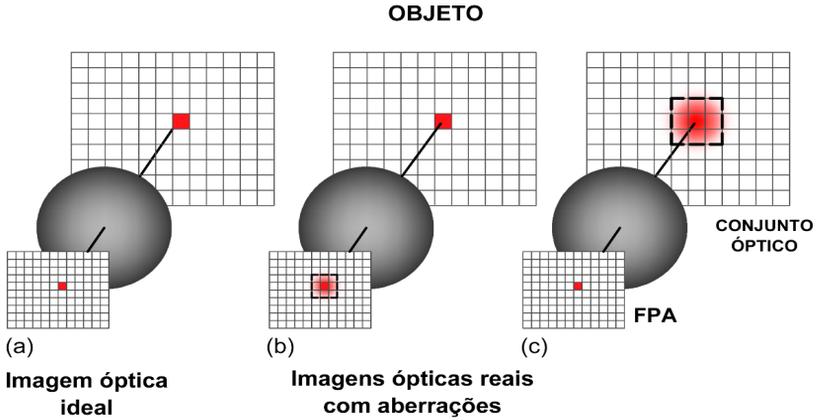
<b>Designação de fabricantes (Designação ABNT NBR 15572)</b>	<b>Faixa de comprimento de onda/<math>\mu\text{m}</math></b>
<i>Near infrared</i> (Infravermelho muito próximo)	0,78 a 1,1
<i>Short wave infrared</i> (Infravermelho próximo)	1,1 a 3
<i>Mid wave infrared</i> (Infravermelho médio)	3 a 6
<i>Long wave infrared</i> (Infravermelho distante)	6 a 15
<i>Very long wave infrared</i> (Infravermelho muito distante)	15 a 1.000

Fonte: elaboração dos autores.

Os dois principais tipos de termovisores têm suas nomenclaturas baseadas nessa classificação do espectro infravermelho: Os sistemas MW (*mid wave*) operam na janela de (3 a 5)  $\mu\text{m}$  e os sistemas LW (*long wave*) operam na faixa de (8 a 12)  $\mu\text{m}$ . Existem ainda os sistemas SW (*short wave*) para a faixa de (1 a 3)  $\mu\text{m}$ , mas são mais raros [2], [5].

Apesar de os termovisores serem ajustados em fábrica para correção de não linearidades e diferenças de sensibilidade entre seus sensores do FPA, algumas aberrações ainda permanecem [8] e devem ser levadas em conta durante as inspeções termográficas. Essas aberrações afetam principalmente a resolução espacial da imagem térmica produzida. A Figura 1-19 (b) apresenta um exemplo de uma aberração onde ocorre um espalhamento da radiação emitida pelo objeto, fazendo com que detectores vizinhos também recebam indevidamente esse sinal. Por outro lado, a radiância emitida pelo objeto pode ser diminuída, “comprimada espacialmente” pela lente, fazendo com que sua temperatura medida seja diminuída (Figura 1-19 c).

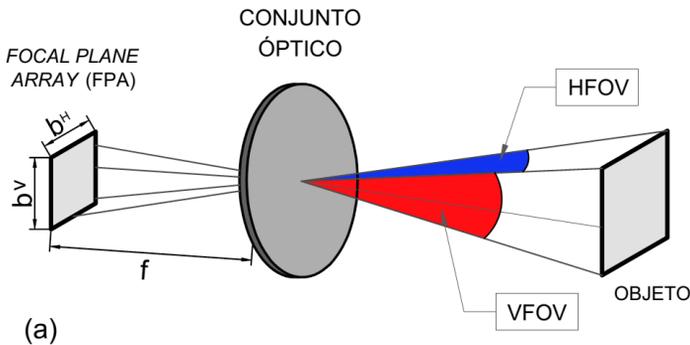
Figura 1-19 – Comparação de situações reais (b e c) e uma situação ideal (a) de formação de imagem óptica em um FPA

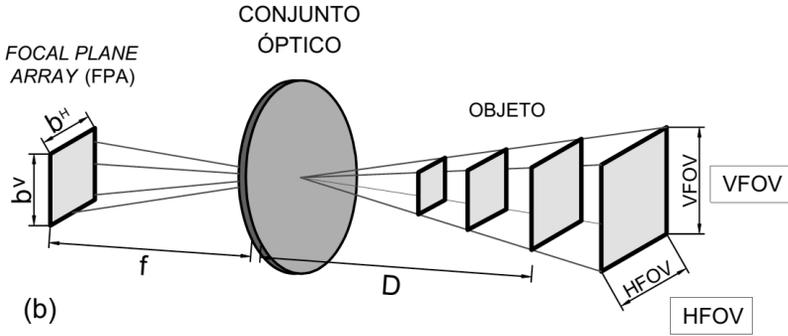


Fonte: adaptado de [8].

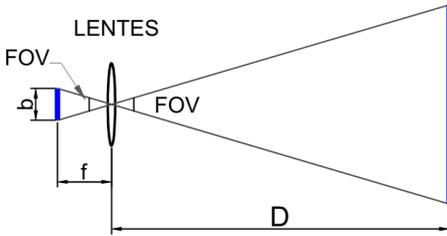
Essa transformação do objeto em imagem no FPA ocorre se o objeto estiver no campo de visão da câmera, FOV. A Figura 1-20 apresenta uma representação do FOV considerando seus ângulos horizontal (HFOV) e vertical (VFOV), e também uma consideração análoga em forma de área do campo de visão.

Figura 1-20 – Campo de visão (FOV) de termovisores: (a) parâmetros para cálculo do FOV; (b) área vista pelo termovisor; (c) esquemático da seção transversal em duas dimensões





(b)



(c)

Fonte: adaptado de [8].

Conforme visto na Figura 1-20, o FOV pode ser facilmente verificado a partir de óptica geométrica. Os raios infravermelhos que atravessam as (finas) lentes não são refratados. Assim, os raios que atravessam os quatro cantos do FPA limitam o FOV. Logo, o FOV depende das dimensões da lente e do FPA. Para uma lente com distância focal  $f$  e um FPA com dimensão  $b$ , o FOV pode assim ser determinado de acordo com a Equação (1.21) [8]:

$$FOV = 2 \cdot \arctan\left(\frac{b}{2f}\right) \quad (1.21)$$

A menor dimensão  $l$  de um objeto visível pela câmera a uma distância  $D$  é calculada como a Equação (1.22) [8]:

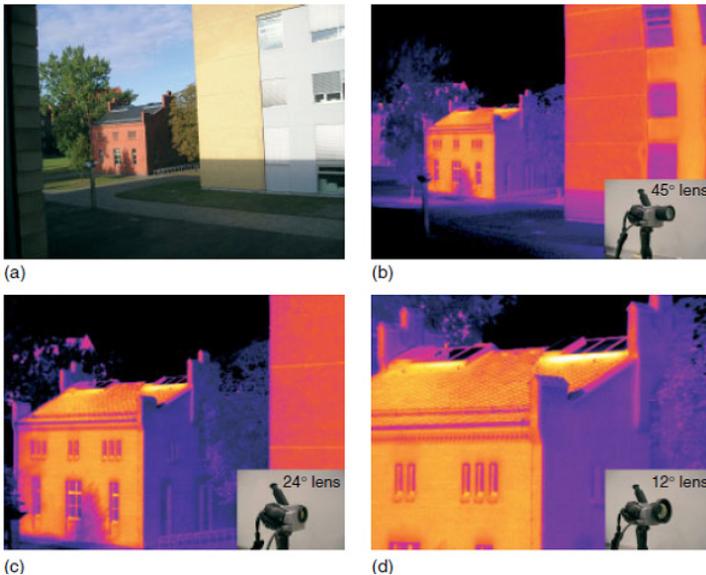
$$l = 2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \quad (1.22)$$

Caso o FPA tenha dimensões retangulares em vez de ser um quadrado, o termovisor terá diferentes FOVs horizontal e verticalmente.

Os termovisores comercialmente disponíveis possuem FOV variando de 7° a 45° aproximadamente [8]. A Figura 1-21 mostra uma mesma imagem térmica de uma mesma cena gerada por diferentes termovisores, com FOVs de 45°, 24° e 12°. Quanto menor o FOV da câmera, melhor a resolução espacial [8]. Isso porque o mesmo número de *pixels* será responsável por uma área de menor abrangência. Em contrapartida, FOV maior terá uma área de abrangência visual maior com, entretanto, menor resolução.

Se o número de *pixels* do FPA é conhecido, a resolução espacial pode ser facilmente determinada a partir da dimensão do objeto inspecionado. Por exemplo, se o FPA tem 320 *pixels* (horizontal ou verticalmente) e o objeto tem 34 mm (horizontal ou verticalmente, preenchendo todo o FPA), cada *pixel* será responsável por  $(34 \text{ mm}) / (320 \text{ pixel}) \approx 0,1 \text{ mm/pixel}$ . O conhecimento do FOV da câmera e do número de *pixels* é necessário para se determinar o menor objeto que pode ser detectado, produzindo assim uma medição correta da temperatura [8].

Figura 1-21 – Imagens térmicas de uma mesma cena (a) com (b) termovisor FLIR SC2000 de FOV 45° – grande abertura; (c) FOV 24° – lente padrão; (d) FOV 12° – lente telescópica. Os ângulos referem-se à direção horizontal



Fonte: adaptado de [8].

### 1.8.1 Ajustes de fábrica do termovisor

O termovisor infravermelho mede quantidades radiométricas, geralmente radiância [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ] ou potência radiante [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]. Ajustes de fábrica, também chamados de “calibração” por alguns autores [5], [8], determinam a relação quantitativa entre o que a câmera informa de temperatura medida e a irradiação incidente. Para o procedimento de ajuste em fábrica, são usados corpos negros (radiadores perfeitos) a diferentes temperaturas. Em seguida, é ajustado o sinal de saída da câmera em função da temperatura conhecida do corpo negro. Isso é válido para cada *pixel* do FPA, individualmente [8].

Para que todos os *pixels* tenham seus sinais ajustados, o corpo negro deve cobrir todo o FOV da câmera e a distância entre o corpo negro e o termovisor deve ser a menor possível, de maneira que a imagem possa ser formada adequadamente no FPA e que a transmitância atmosférica possa ser considerada unitária [8].

O sinal de saída do termovisor depende da sensibilidade espectral do detector, da transmitância óptica espectral da lente e das outras características da câmera, como por exemplo o “número-F” da lente. O número-F é a relação entre a distância focal  $f$  e o diâmetro de abertura da lente  $D_L$  [5]. Assim, os ajustes são válidos somente para a configuração em que foram feitos. A troca da lente da câmera, que pode implicar em uma mudança de seu número-F ou em uma mudança em sua transmitância espectral, pode requerer novos ajustes [8]. Algumas câmeras podem trazer gravados em seu *firmware* diferentes ajustes que são adequados a diferentes lentes ou diferentes filtros externos [8].

O sinal de saída da câmera é afetado também pela radiação adicional emitida pelas próprias partes da câmera. O sinal de saída então representa a soma da radiação oriunda do objeto inspecionado e também das partes da própria câmera. Este último sinal depende, naturalmente, da temperatura da câmera, causando um deslocamento, um *offset*, no sinal de saída. A influência desse sinal adicional deve ser corrigida através de cálculos que devem considerar a temperatura do termovisor. A qualidade dessa correção contribui para a diminuição da incerteza de medição do termovisor [8]. Logo, além de ser resfriado, o termovisor deve ter a sua temperatura própria medida durante a sua operação. Todas essas medições e correções fazem sentido se a câmera estiver em um equilíbrio térmico. Uma mudança brusca na temperatura ambiente pode acarretar uma alteração da

temperatura em algumas partes da câmera, levando a medições incorretas [8]. Por esse motivo, os fabricantes recomendam que o termovisor seja ligado e mantido no ambiente onde será operado por alguns minutos antes que as medições sejam feitas [2], [8], [19], [57].

### 1.8.2 Características de desempenho do termovisor

O desempenho de um termovisor é descrito por uma quantidade razoável de parâmetros que incluem o ruído eletrônico, o ruído do detector, a resolução geométrica, a incerteza, a faixa espectral, dentre outros. O mais importante é que o inspetor termográfico saiba correlacionar a relevância desses parâmetros às suas aplicações e aos resultados obtidos nas medições da temperatura [8].

Quanto à normatização de tais parâmetros, verifica-se que a Associação Brasileira de Normas Técnicas, órgão responsável pela normatização técnica no Brasil, encontra-se em fase de elaboração e emissão dos documentos na área de termografia [66], tendo poucos e superficiais textos em vigor [67]. Entretanto, internacionalmente já existem diversas normas com aprofundamento técnico no assunto [68]-[71].

Os parâmetros que caracterizam o desempenho da câmera para aplicação em manutenção elétrica industrial, ou seja, objetos imóveis em temperaturas da ordem de 100°C, são listados na Tabela 1-6.

Tabela 1-6 – Parâmetros de desempenho de termovisores

Nome	Definição [2], [8]	Unidade	Significância
Incerteza de medição	Incerteza de medição de temperatura de um corpo negro	K °C °F ou %	Incerteza associada à temperatura medida [2], [8]
NETD ( <i>noise equivalent temperature difference</i> )	Diferença de temperatura mínima detectável para relação sinal ruído SNR = 1	K °C °F	Capacidade de o termovisor detectar baixos contrastes no objeto inspecionado [2]
FOV ( <i>field of view</i> )	Abrangência angular do campo observável pela câmera	°	Definição das dimensões mínimas de um objeto inspecionado detectáveis pelo termovisor [2], [8]
IFOV ( <i>instantaneous field of view</i> )	Abrangência angular do campo de visão de um detector (de um pixel)	mrاد	Resolução espacial da imagem térmica produzida [8]

Fonte: elaboração dos autores.

A especificação da incerteza de medição de um termovisor informada pelos fabricantes é a incerteza associada à medição de temperatura de um corpo negro. Para a maioria dos termovisores disponíveis no mercado, a incerteza está especificada em  $\pm 2$  K ou  $\pm 2\%$  da temperatura medida, o que for maior [8], [19], [57]. A incerteza do termovisor é devida, principalmente, à incerteza dos processos de ajuste realizados em fábrica, à variabilidade da sensibilidade dos detectores da câmera, às incertezas dos modelos matemáticos empregados no processo de cálculo, dentre outros [8]. Fabricantes têm utilizado erroneamente o termo “precisão” para a incerteza do instrumento [2], em desacordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia [72]. O usuário deve ficar atento a essa questão, visto que precisão é um termo qualitativo, um adjetivo, não podendo ser associado a uma quantidade numérica.

A resolução de temperatura de um sistema radiométrico é dada pelo NETD, que quantifica a sensibilidade térmica do termovisor. Esse parâmetro dá a mínima diferença de temperatura detectável entre um objeto corpo negro e um fundo também corpo negro. O NETD é influenciado pelo ruído inserido pelas partes internas do termovisor [8].

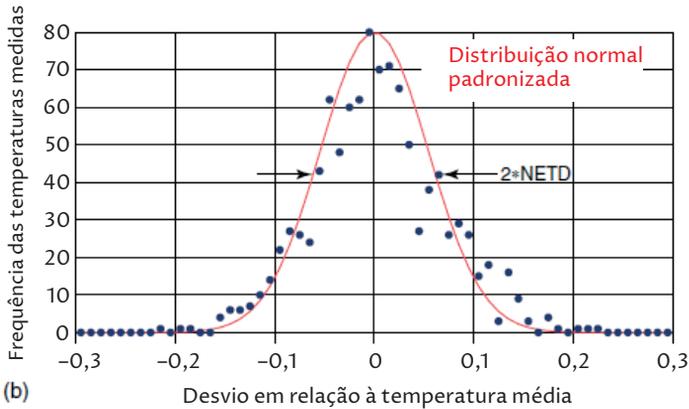
Esse ruído, de maneira geral, tem comportamento aleatório e sua distribuição se aproxima de uma distribuição gaussiana, como é apresentado no gráfico de frequências da Figura 1-22. O NETD é definido como, justamente, um desvio padrão dessa distribuição [8].

Desse modo, a resolução térmica pode ser entendida como uma medição de temperatura com Algarismos Significativos que tragam a influência do NETD somente no algarismo duvidoso.

Caso o nível de confiança desejado seja, por exemplo, de 95,45% devemos considerar dois desvios padrões, ou seja, duas vezes o NETD. Caso o nível de confiança desejado seja de 99,7%, devem ser considerados três desvios padrões [8]. Por exemplo, se o NETD é de 0,065 K numa medição cujo resultado é  $34,50^{\circ}\text{C}$ , 99,7% das medições realizadas estarão na faixa  $(34,50 \pm 0,195)^{\circ}\text{C}$  [8]. Nesse caso, o resultado correto seria  $(34,5 \pm 0,2)^{\circ}\text{C}$ , o que alterou a resolução da medição de  $0,01^{\circ}\text{C}$  para  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

O NETD é fortemente influenciado pela faixa de medição selecionada no termovisor. Isso porque, por exemplo, na escolha de uma faixa mais alta de medição, geralmente é inserido um filtro que diminui o sinal que chega ao sistema de medição sem, entretanto, diminuir o nível de ruído gerado internamente. Logo, a relação sinal-ruído seria diminuída [8]. Isso indica que o inspetor termográfico deve selecionar adequadamente a faixa de medição em função da temperatura esperada para o objeto inspecionado.

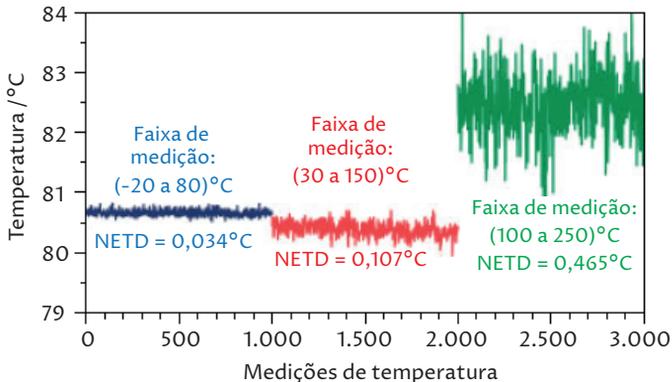
Figura 1-22 – Distribuição em frequência do ruído inserido pelas partes próprias do termovisor na medição de temperatura



Fonte: adaptado de [8].

A Figura 1-23 apresenta resultados de medição de temperatura para um mesmo objeto, a 80°C, utilizando a mesma câmera em três diferentes faixas de medição nela disponíveis, (20 a 80)°C, (30 a 150)°C e (100 a 250)°C. As demais condições de medição foram mantidas constantes [8]. Nota-se nitidamente o aumento no nível de ruído associado aos resultados, o que indica que a medição de temperatura deve ser feita, como qualquer medição, com o instrumento ajustado para a faixa adequada e que os resultados devem ser interpretados com cuidado.

Figura 1-23 – Medição de temperatura de um objeto a 80°C, utilizando o termovisor em três diferentes faixas de medição nela disponíveis, (20 a 80)°C, (30 a 150)°C e (100 a 250)°C



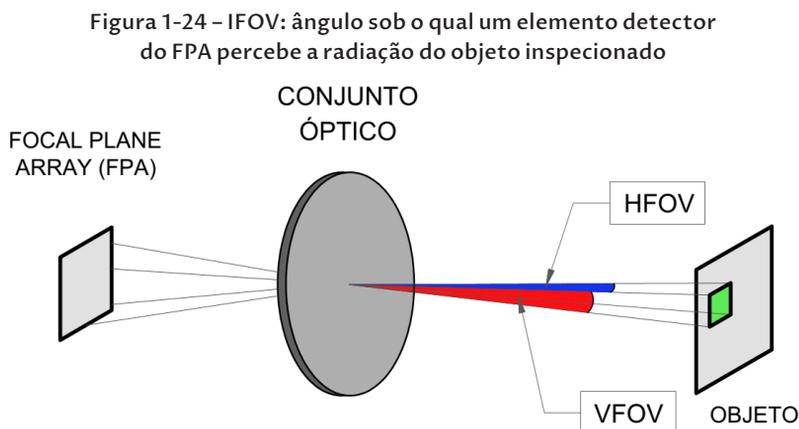
Fonte: adaptado de [8].

O IFOV, também denominado DAS (*detector angular substance*) [2], fornece o ângulo sob o qual um elemento detector do FPA percebe a radiação do objeto inspecionado. A Figura 1-24 ilustra esse esquema. Utilizando a aproximação do ângulo suficientemente pequeno para o valor de sua própria tangente, o tamanho mínimo  $l$  de um objeto que preenche plenamente o detector para uma dada distância  $D$  é dado pela Equação (1.23) [8]:

$$l = IFOV \cdot D \quad (1.23)$$

Por exemplo, caso a lente tenha distância focal de  $f = 50$  mm, e cada *pixel* tenha dimensão lateral de  $50 \mu\text{m}$ , o IFOV será de 1 mrad. Caso o objeto esteja à distância de 5,5 m, este deverá ter dimensões mínimas de 5,5 mm para que seja detectável por um simples detector.

O IFOV também pode ser determinado dividindo-se o FOV pelo número de *pixels*. Por exemplo, um termovisor com FOV de  $20^\circ$  e 320 *pixels* em uma dimensão (vertical ou horizontal), terá IFOV de 1 mrad nessa dimensão.

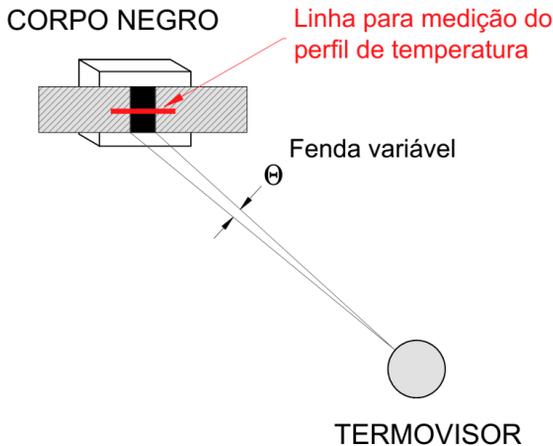


Fonte: adaptado de [8].

É importante notar que o IFOV é um parâmetro geométrico calculado a partir do tamanho do detector e da distância focal da lente. Se cada detector tiver dimensões horizontal e vertical diferentes, o termovisor terá IFOVs horizontal (HIFOV) e vertical (VIFOV) diferentes também [2]. A resolução do sistema é influenciada não só

pelo IFOV mas também pela difração dos raios na lente do termovisor. Esse fenômeno, denominado SRF (do inglês *slit response function*), descreve a resposta do termovisor à medição de temperatura de um objeto com uma fenda de dimensão variável. Essa definição fica mais clara na Figura 1-25, onde é mostrado o ângulo  $\Theta$  que é função da fenda do objeto. O SRF descreve a capacidade de o termovisor medir a temperatura da superfície da fenda à medida que ela varia. Ele é conceituado como o sinal medido de um objeto de dimensões pequenas e definidas, em relação a um objeto de dimensões suficientemente grandes para que a difração nas lentes seja irrelevante [2], [8]. Como ocorre difração na lente do termovisor, para pequenos ângulos  $\Theta$  o termovisor apresenta dificuldade de medição da temperatura, mesmo que a princípio seja esperado que um *pixel* seja plenamente preenchido.

Figura 1-25 – SRF, que descreve a resposta do termovisor à medição de temperatura de um objeto com uma fenda de dimensão variável

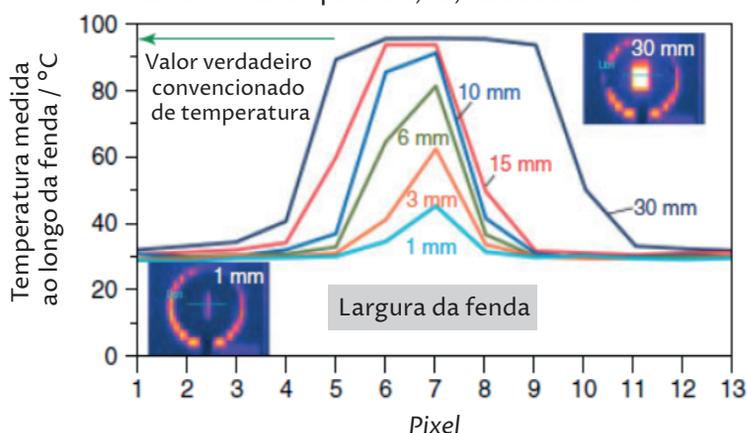


Fonte: adaptado de [8].

A Figura 1-26 apresenta o resultado de medição de temperatura para objetos de (1 a 30) mm, todos à mesma temperatura, a 5,5 m do termovisor, cujo FOV é de 20°. Para essa configuração, é esperado que um objeto de 5,5 mm preencha plenamente um *pixel*. Entretanto, mesmo para objetos de dimensões acima desse valor, no caso (6 e 10) mm, nota-se que o termovisor ainda apresenta erros negativos de medição da temperatura [8].

Experimentos têm demonstrado que, devido ao SRF, o tamanho mínimo do objeto inspecionado deve ser duas a três vezes o tamanho mínimo calculado a partir do IFOV. A consideração de duas vezes o tamanho do IFOV produziria medição de temperatura da ordem de 95% do valor verdadeiro, e a consideração de três vezes produziria medição com resultados da ordem de 99% do valor verdadeiro [8]. Esse fator multiplicativo para o tamanho do objeto, de 2 a 3, tem sido recomendado também por fabricantes de termovisores [73].

Figura 1-26 – Medição de temperatura para objetos de (1 a 30) mm, todos à mesma temperatura, a 5,5 m do termovisor



Fonte: adaptado de [8].

### 1.8.3 Software

Em manutenção elétrica industrial, geralmente são necessárias análises quantitativas dos resultados de medição de temperatura, que são facilitadas pelos *softwares* de apoio aos termovisores e suas ferramentas disponibilizadas pelos fabricantes. Os *softwares* geralmente dispõem das seguintes facilidades [8]:

- ajuste de faixa e de nível de temperatura a ser medida;
- paletas de cores (tipos de cores) selecionáveis;
- análises de pontos, de linhas, de áreas, com indicação de temperaturas máxima, mínima e média;
- ajuste de parâmetros do objeto (emissividade) e da atmosfera de propagação entre o objeto e o termovisor (umidade, temperatura atmosférica, distância);
- emissão de relatórios adequados às necessidades do usuário.

Essas facilidades devem ser utilizadas com cuidado e critério pelo inspetor, visto que a escolha adequada dos parâmetros citados influencia diretamente nos erros e incertezas associadas ao resultado da medição.

Como exemplos de *softwares*, citam-se QuickReport<sup>2</sup>, SmartView<sup>3</sup>, Camara Irisys série IR<sup>4</sup> e PC IRSoft<sup>5</sup>. Quanto às facilidades citadas acima, apenas o QuickReport permite ao usuário informar os parâmetros da atmosfera de propagação (distância, temperatura atmosférica e umidade relativa) para que seja calculada a transmitância. O IRSoft solicita os valores de temperatura atmosférica e umidade relativa, mas aparentemente não os considera para eventual cálculo e aplicação da atenuação atmosférica. O SmartView permite a inserção do valor numérico da transmitância atmosférica o que não é uma informação trivial para o usuário. O Camara Irisys não prevê a informação da transmitância atmosférica de nenhuma forma. Os demais recursos são equivalentes nos quatro *softwares*.

## 1.9 Análise e considerações

Erro de medição é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência, normalmente um valor verdadeiro convencional. Caso o erro seja constante ou varie de maneira previsível, esse erro é denominado sistemático [72].

A incerteza de medição é um parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando. A incerteza é um parâmetro que pode ser, por exemplo, um desvio-padrão do conjunto de dados medidos, sendo nesse caso denominada incerteza-padrão. Podem ser adotados mais desvios-padrões através de uma probabilidade de abrangência (ou nível de confiança), levando a uma incerteza expandida [72].

Posto isso, nota-se que a medição de temperatura de um objeto através da termografia por infravermelho é uma medição indireta sujeita a muitos fatores internos e externos ao termovisor. Logo, incertezas e erros associados a essa medição podem ser consideravelmente

2 Software QuickReport, Versão 1.2, Copyright © 2009 Flir.

3 Software SmartView 3.3.164.0, Copyright © 2006-2013 Fluke Thermography.

4 Software Camara Irisys série IR, Versão 1.3.0.2, Copyright © 2010-2012 Infrared Integrated Systems Ltd.

5 Software PC IRSoft, Versão 3.3, Copyright © 2011 – Testo AG.

significativos para a emissão de um diagnóstico correto, visto que diferenças de temperatura da ordem de 4°C entre componentes semelhantes já podem ser indícios de defeitos [4], [6], [7], [74].

As seguintes fontes de erros e incertezas podem influenciar o resultado final de medição de temperatura: compósitos e processos de fabricação do termovisor, que podem levar a incertezas nas frequências às quais ele é sensível [8]; determinação da emissividade do objeto analisado [8]; determinação do coeficiente de atenuação (e por conseguinte, a transmitância da atmosfera através dos algoritmos de cálculo do termovisor) [8], o que inclui as incertezas das equações e constantes aplicadas e do processamento eletrônico [5], incertezas oriundas do processo de calibração (ajustes em fábrica) do termovisor [5].

Portanto, os instrumentos, que são fontes de incerteza no processo de medição de temperatura por termografia infravermelha, devem ter suas influências avaliadas de maneira a se buscar meios para minimizar seus impactos, gerando resultados mais precisos.

A partir de dados experimentais com termovisores, e a partir de experimentos e modelos matemáticos para comunicações ópticas e para radiação térmica, verifica-se que a medição de temperatura por termografia sob ângulos de visada diferentes de zero implicam em erros de medição. Esses erros são não só devido à variação da emissividade dos objetivos em função da direção de radiação, mas também em função de parâmetros do receptor, notadamente o campo de visão FOV. Ângulos de visada elevados implicam em menor potência recebida, o que, em termografia, pode resultar em medição da temperatura do objeto analisado com erro negativo. Termovisores com campo de visão maiores, a despeito de mais susceptíveis a ruídos, tendem a minimizar esse problema.

Os modelos desenvolvidos para desalinhamento entre emissor e receptor em comunicações ópticas não são aplicáveis a termografia, visto que partem de pressupostos não aplicáveis a inspeções termográficas, tais como o emissor puntual<sup>6</sup> e direcional. Os equipamentos elétricos geralmente emitem radiação em todas as direções, ainda que não na mesma intensidade [8]. Em comunicações ópticas, é assumido que se o ângulo de desalinhamento for maior que o “meio-ângulo FOV” não haverá visada direta entre emissor e receptor,

---

6 “Puntual” se refere a algo com dimensões desprezíveis em relação ao seu contexto, ou seja, algo que trigonometricamente pode ser representado por um ponto.

sendo que este receberia apenas o sinal “espalhado” pela atmosfera [45]. Isso não é aplicável a inspeções termográficas, visto que os objetos reais emitem radiação em todas as direções, havendo, a princípio, o recebimento de alguma irradiação sob qualquer ângulo de visada entre emissor (objeto) e receptor (termovisor). Quanto aos modelos matemáticos de fator de forma empregados em engenharia térmica, verifica-se que suas aplicações são limitadas, uma vez que a solução envolvendo a superfície da lente do termovisor não é trivial.

Não foram encontrados *softwares* de visualização e análise de imagens disponibilizados por fabricantes de sistemas termográficos que tratem ou auxiliem o usuário quanto à estimativa da incerteza associada à medição de temperatura ou correção de erros de medição devido ao ângulo de visada entre o termovisor e o objeto analisado. Esse levantamento foi feito nos sítios eletrônicos dos fabricantes Flir, Fluke, Irisys e Testo [75]-[78].

Desse modo, esses dois aspectos – erro de medição devido ao ângulo de visada e ao campo de visão do termovisor, e estimativa da incerteza da temperatura medida pelo termovisor – se apresentam como um desafio ao termografista, que pode ser levado a conclusões precipitadas devido à qualidade associada às temperaturas estimadas por termografia infravermelha.



## Capítulo 2

# Diagnóstico de instalações elétricas a partir da termografia

### 2.1 Introdução

A característica comportamental térmica do equipamento a ser inspecionado por termografia infravermelha deve ser de conhecimento do termografista. No caso específico de equipamentos elétricos, escopo deste trabalho, os princípios físicos das falhas e os seus padrões sintomáticos são fortemente relacionados a um aumento da resistência de contato ou a um aumento da corrente de carga. Esses fenômenos são bem dominados [19].

Entretanto, essas regras genéricas não podem ser aplicadas a todos os casos [19]. Por exemplo, é comum em solenoides a ocorrência de eventuais sobreaquecimentos, visto que são equipamentos de operação tipicamente em regime intermitente.

Há ainda situações em que as partes defeituosas do equipamento elétrico apresentam como sintoma uma menor temperatura, estando menos aquecidas do que as partes saudáveis, situação inversa ao padrão usual para diagnóstico de um defeito [19], [79]. O termografista deve sempre estar atento às características da instalação elétrica e procurar obter o máximo de informação acerca dessa instalação. Logo, para considerar em sua análise as características comportamentais do equipamento inspecionado e também as características de regime operacional da instalação inspecionada, é comum que o termografista apoie-se na experiência e no conhecimento de um profissional que trabalha no dia a dia da manutenção e/ou da operação do equipamento [19].

A regra geral é: se há um ponto quente, provavelmente há um defeito [19]. A (elevação de) temperatura de um componente e a sua respectiva carga (corrente elétrica) são os indicadores de quão grave é o defeito [19].

## 2.2 Preparação para inspeção termográfica

A preparação para a inspeção termográfica inclui essencialmente a escolha dos instrumentos de medição adequados ao serviço. A medição da corrente elétrica deve ser feita com um amperímetro [19], ou, alternativamente, deve-se ter acesso à leitura dessa grandeza nos sistemas de medição ligados à instalação. Para resultados mais precisos, poder-se-ia acessar o registro do histórico de corrente elétrica das últimas horas [18]. Um anemômetro também pode ser utilizado para realizar as correções necessárias devido à velocidade do vento incidente sobre o componente inspecionado [7], [18], [80]-[82]. Termo-higrômetro e trena são necessários para medir as características do meio de propagação entre o objeto inspecionado e o termovisor, possibilitando o cálculo da atenuação atmosférica.

A emissividade da superfície inspecionada, a identificação correta do componente inspecionado e as reais condições operacionais do equipamento devem ser conhecidas pelo termografista, tanto para a medição correta da temperatura, quanto para a análise dos resultados e a emissão do diagnóstico adequado.

Após a inspeção termográfica, que inclui a medição da temperatura do objeto inspecionado e a medição de outras variáveis pertinentes, o termografista deve analisar os termogramas obtidos. Tecnicamente, são indicados dois métodos de análise: o método da elevação de temperatura e o método das medições comparativas.

## 2.3 Diagnóstico pela elevação de temperatura

A elevação de temperatura de uma superfície inspecionada é definida como a diferença entre a sua temperatura e a temperatura do ambiente onde se encontra. Entretanto, alguns autores entendem que a referência não deve ser o ambiente, e sim as demais partes em contato direto com a superfície inspecionada [74], uma vez que a troca de calor não seria diretamente com o ambiente, e sim com as partes circunvizinhas.

Para exemplificar o diagnóstico pela elevação de temperatura, cita-se que uma elevação de 30°C na temperatura de um cabo elétrico certamente é um indicativo de alguma falha [19]. Em um ambiente industrial, para cabos de classe térmica 70°C, esse seria o limite

aceitável de sobretemperatura em relação ao ambiente, pois em um meio industrial a temperatura ambiente é considerada como máxima em 40°C. Um segundo cabo elétrico, de características semelhantes ao cabo já citado, com a elevação de temperatura em 20°C pode, a princípio, passar uma impressão de estar em condições conformes. Entretanto, ao completarmos essas informações dizendo que o primeiro cabo está operando em regime de 100% de carga, e o segundo em regime de 50% de carga, concluiríamos que este último cabo estaria em um regime de maior severidade de falha que o primeiro [19]. Isso acontece porque as diferentes condições de carga provocam diferentes aquecimentos.

Dessa forma, convém corrigir os valores medidos de elevação de temperatura para a referência de 100% de carga [74], [80]. Essa correção pode ser feita considerando a influência residual dos valores de corrente elétrica num passado recente [18] ou, como é mais usual, considerando que o sistema esteja operando a uma carga praticamente constante há um tempo suficiente para que os componentes inspecionados estejam em equilíbrio térmico [7]. Para este último caso, a elevação de temperatura do componente é corrigida de acordo com a Equação (2.1) [7], [80], [83]–[85]:

$$\Delta T_C = \Delta T \cdot \left( \frac{I_{NOM}}{I_{TEST}} \right)^a \quad (2.1)$$

Onde:

$\Delta T_C$ : elevação de temperatura corrigida, °C;

$\Delta T$ : elevação de temperatura obtida diretamente da inspeção, °C;

$I_{NOM}$ : corrente elétrica nominal do componente inspecionado, A;

$I_{TEST}$ : corrente elétrica no componente durante a inspeção, A;

$a$ : coeficiente que varia tipicamente entre (1,4 e 2,0), conforme o componente [7], [80], [85].

De posse da elevação de temperatura corrigida para a referência de plena carga, o termografista deve comparar esse valor com os valores recomendados por referências [4], [80], por exemplo, os catálogos técnicos dos próprios fabricantes do equipamento. Alguns termografistas preferem criar suas próprias tabelas de referência baseados em sua experiência [4].

Esse método é conhecido também por método quantitativo [4].

## 2.4 Diagnóstico por medições comparativas

Em inspeções termográficas de instalações elétricas, além da medição da elevação de temperatura do componente sob avaliação, também pode ser usada a medição comparativa de temperatura entre objetos diferentes, mas semelhantes em seu projeto e na sua operação [19], [86]. Geralmente o componente de referência é um componente vizinho que, sob condições normais em um sistema de potência, pode ser considerado sob as mesmas condições de carga e ambientais do objeto analisado [19], [80]. A grande vantagem desse método é que o valor (e o desconhecimento) da emissividade tem impacto mínimo no resultado, visto que seria introduzido um erro semelhante na medição de todos os componentes, tendo uma pequena influência na análise comparativa entre eles [80].

A simples comparação entre as temperaturas medidas nos cabos de três fases fisicamente em paralelo é um exemplo desse método. Eventuais diferenças nas temperaturas medidas podem indicar carga desbalanceada, ou ainda impedâncias diferentes nas três linhas, geralmente ocasionadas por erros de projeto/montagem.

A Figura 2-1 [19] apresenta um termograma dos terminais de um disjuntor trifásico. Por comparação, nota-se que a fase mais à direita ( $86^{\circ}\text{C}$ ) encontra-se com algum defeito, visto que as duas fases mais à esquerda estão operando a uma temperatura consideravelmente inferior ( $68^{\circ}\text{C}$ ).

Figura 2-1 – Termograma dos terminais de um disjuntor trifásico apresentando falha em uma das fases



Fonte: adaptado de [19].

Geralmente, credita-se a uma diferença de 2°C entre componentes semelhantes uma condição de “suspeita de falha”. Diferenças de 4°C já seriam uma prova de comportamento anormal, e que deve ser investigado [74].

Este método é conhecido também por método qualitativo [4].

## 2.5 Severidade das falhas

Uma vez que a falha for detectada, a priorização de sua correção depende fortemente da filosofia de manutenção da empresa, com apoio de critérios técnicos.

Considerando como referência a situação de 100% de carga, usualmente o sobreaquecimento, ou seja, a obtenção de temperaturas acima das temperaturas esperadas para o componente, é dividido em três categorias, conforme indicado na Tabela 2-1 [19].

Tabela 2-1 – Classificação e recomendações para sobreaquecimento em componentes elétricos

<b>Categoria</b>	<b>Sobreaquecimento</b>	<b>Recomendação</b>
I	Menor que 5°C	O componente deve ser monitorado com maior frequência.
II	De (5 a 30)°C	O componente deve ser reparado assim que possível, mas as condições operacionais e de carga devem ser levadas em conta para definição do prazo.
III	Acima de 30°C	O componente deve ser reparado imediatamente, mas as condições de carga devem ser consideradas.

Fonte: adaptado de [19].

Para as inspeções qualitativas, ou seja, para as comparações de temperatura entre componentes semelhantes, também existem recomendações de ações de manutenção conforme os resultados das inspeções. Exemplos são mostrados na Tabela 2-2 [4], [7], [87].

Tabela 2-2 – Ações recomendadas de manutenção para equipamentos elétricos conforme resultados da inspeção termográfica

<b>Diferença de temperatura entre componentes similares</b>	<b>Sobreaquecimento</b>	<b>Ação recomendada</b>
De (1 a 3)°C	De (1 a 10)°C	Continuar monitorando.
De (4 a 15)°C	De (11 a 20)°C	Reparar assim que for possível.
----	De (21 a 40)°C	Monitorar continuamente até que o reparo seja feito.
Acima de 15°C	Acima de 40°C	Reparar imediatamente.

Fonte: adaptado de [4], [7], [87].

Outros autores sugerem que é possível a comparação de temperatura operacional entre componentes diferentes desde que eles componham o mesmo circuito, ou seja, que conduzam a mesma corrente. Isso pode ser feito desde que os critérios de diagnóstico sejam montados a partir de medições na instalação elétrica quando ela estiver conhecidamente saudável. A partir desses parâmetros de diferenças de temperatura normais entre eles, poderiam ser determinados critérios de “atenção” e “alarme”, que devem ser baseados na relação entre as elevações de temperatura de dois componentes analisados. Essa relação deveria manter-se aproximadamente constante, independente da carga e das condições ambientais. Variações da ordem de 9% na relação das elevações de temperatura seriam uma situação de atenção. Variações de 17% seriam uma condição de alarme [84], [86].

## 2.6 Normalização e certificação de pessoal

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o único foro nacional de normalização, nos termos da Resolução n. 7 do CONMETRO, de 24/08/1992 [88].

Na ABNT, o comitê técnico responsável pela normatização na área de inspeção por termografia infravermelha é o ABNT/ONS-58 – Organismo de Normalização Setorial de Ensaio Não Destrutivos, cujo âmbito de atuação é “normalização no campo de ensaios não destrutivos geralmente aplicados aos materiais de construção, aos componentes e aos acessórios no que concerne à terminologia, requisitos, métodos de ensaio, especificações de desempenho de equipamentos, qualificação de pessoal e generalidades” [89].

### 2.6.1 Normalização e certificação de pessoal no Brasil

Em pesquisa realizada no sítio eletrônico do ABNT/ONS-58<sup>1</sup>, constatou-se que as normas técnicas listadas na Tabela 2-3 estão em vigor. Verificou-se ainda que as normas NBR 15424 e NBR 15572 encontravam-se em revisão. Não havia informação de novas normas em elaboração cujo assunto fosse termografia.

---

1 Sítio eletrônico do ABNT/NOS-58: <http://www.abnt.org.br/cb-58>. Acesso em 4 de outubro de 2019.

Não foram encontradas instituições que fornecessem serviços (cursos, provas e testes) de certificação de pessoal como inspetor termográfico baseados nas normas brasileiras.

**Tabela 2-3 – Normas técnicas relativas à termografia no Brasil**

<b>NBR</b>	<b>Título (Assunto)</b>	<b>Publicação</b>
15424	Ensaaios não destrutivos – Termografia – Terminologia (Define os termos utilizados no método de ensaio não destrutivo de termografia.)	13/10/2016
15572	Ensaaios não destrutivos – Termografia por infravermelha – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos (Constitui um guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos, relacionando as responsabilidades do usuário final e do termografista.)	15/03/2013
15718	Ensaaios não destrutivos – Termografia – Guia para verificação de termovisores (Fornece diretrizes para garantir a confiabilidade das medições dos termovisores, através de procedimentos seguidos pelo usuário final para a verificação dos termovisores durante o intervalo da validade da calibração definido pelo próprio usuário.)	15/06/2009
15763	Ensaaios não destrutivos – Termografia – Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência (Prescreve os critérios para definição de periodicidade de inspeção por termografia de sistemas elétricos de potência.)	15/09/2009
15866	Ensaio não destrutivo — Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos (Destina-se a orientar a metodologia de avaliação térmica, qualitativa e/ou quantitativa, a ser realizada pelo responsável da análise termográfica, de acordo com as diversas situações e contextos em que os diferentes equipamentos elétricos estão submetidos.)	12/08/2010

Fonte: elaboração dos autores.

## 2.6.2 Normalização e certificação de pessoal internacional

Em todas as instituições brasileiras e estrangeiras verificadas, constatou-se um mesmo conjunto de normas técnicas internacionais referenciadas como base para certificação de pessoal como inspetor termográfico. Tais normas são listadas na Tabela 2-4.

Tais certificações convergem para uma mesma hierarquia de conhecimento, classificada como inspetor termográfico Nível I, Nível II e Nível III. Compilando as informações disponibilizadas por 12

instituições de certificação em termografia listadas em [90], resumem-se esses treinamentos e certificações da seguinte forma:

Nível I: é indicado para um novo usuário de câmeras infravermelhas. Esse treinamento é focado na aplicação da termografia em aplicações de manutenção preditiva. Seus principais conteúdos e objetivos são:

- introdução à geração de imagens térmicas;
- coleta de dados com qualidade, leituras precisas de temperatura, cálculos em termografia (tais como distância e emissividade);
- interpretação de termogramas e tomadas de decisão (diagnóstico) utilizando conceitos de transferência de calor para analisar imagens térmicas;
- *softwares* para banco de dados e para emissão de relatórios de termografia;
- distinção entre pontos quentes e reflexões, leituras diretas *versus* indiretas, termografia qualitativa *versus* quantitativa.

Nível II: é indicado para o termografista nível I aprimorar sua formação. Este curso/certificação se concentra no fortalecimento e melhoria das habilidades do termografista em aplicações de manutenção preditiva. Suas principais características são:

- expansão dos conhecimentos de termografia com novos conceitos de teoria do infravermelho, transferência de calor e resolução espacial;
- programa de inspeção por infravermelho e cálculo de custos evitados;
- medição de emissividade dos materiais mais comuns.

Nível III: indicado ao profissional nível II que deseja criar e gerenciar um programa de manutenção preditiva por termografia infravermelha. O curso capacita o profissional a desenvolver tecnicamente outros profissionais e a desenvolver recursos e tecnologias. O termografista nível III é capaz de:

- identificar os requisitos de segurança para execução de termografia;
- empregar adequadamente as normas técnicas na termografia;
- criar procedimentos de inspeção termográfica;
- produzir orçamentos relativos à termografia;
- desenvolver programas de treinamento e certificação níveis I, II e III.

Tabela 2-4 – Normas técnicas estrangeiras relativas à termografia

<b>Norma</b>	<b>Título</b>	<b>Publicação</b>
ANSI/ASNT CP-105	<i>Training Outlines for Qualification of Nondestructive Personnel</i>	2011
SNT-TC-1A	<i>Personal Qualification and Certification in Nondestructive testing</i>	2011
ANSI/ASNT CP-189	<i>ASNT Standard for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel</i>	2011
ISO 9712	<i>Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel</i>	2012
ISO/TS 11774	<i>Non-destructive testing – Performance-based qualification</i>	2011
ISO 18436-7	<i>Condition monitoring and diagnostics of machines – Requirements for qualification and assessment of personnel – Part 7: Thermography</i>	2008
BS EN ISO 9712	<i>Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel</i>	2012

Fonte: elaboração dos autores.

### 2.6.3 Análises e considerações quanto à normatização

Do levantamento realizado no Brasil, nas Américas e na Europa, verifica-se uma convergência nas características de certificação de pessoal na área de termografia por infravermelhos. Verificou-se que as instituições brasileiras seguem normas internacionais em seus programas de treinamento, seja por aproveitamento de tecnologia consolidada, seja por omissão do organismo normalizador nacional (ABNT).

Por outro lado, conforme listado na Tabela 2-3, a ABNT aparentemente possui normas técnicas que cobrem razoavelmente atividades de inspeções termográficas.

## 2.7 A tolerância para diagnóstico e o erro admissível de medição em termografia por infravermelho

Os critérios de diagnóstico de instalações elétricas por inspeção termográfica são baseados em dois métodos: análise do sobreaquecimento

do componente analisado e comparação de sua temperatura com a temperatura de componentes semelhantes.

Para o primeiro caso, o sobreaquecimento, qualquer temperatura acima do valor máximo esperado, já requer uma atenção diferenciada ao componente, conforme visto na Tabela 2-1 e na Tabela 2-2. Sobreaquecimentos acima de 5°C já indicariam necessidade de reparo. Para o segundo caso, análise comparativa, diferenças de temperatura de 4°C entre componentes semelhantes também já são indicativos de necessidade de ação corretiva.

Nota-se então que o valor em torno de (4 a 5)°C se apresenta como a tolerância do processo “inspeção termográfica de instalações elétricas”.

As incertezas e os erros nesse processo de medição de temperatura não devem levar o inspetor a um diagnóstico equivocado. A incerteza máxima admissível para todo o sistema de medição de temperatura deve ser consideravelmente menor, no máximo da ordem de 1/3 da tolerância do processo [91], [92]. Assim, deve ser admitida uma incerteza máxima de aproximadamente 1,5°C no processo de medição por termografia infravermelha.

Insta frisar que a incerteza máxima admissível para o sistema de medição de temperatura por termografia infravermelha não deve ser confundida com a incerteza máxima admissível para o termovisor. O termovisor é um dos instrumentos que compõem o sistema de medição. A estimativa da temperatura do componente inspecionado passa, além do termovisor, por instrumentos de medição de distância, temperatura atmosférica, umidade relativa.

Além disso, outros erros e incertezas podem ser inseridos no resultado final devido às determinações da emissividade da superfície analisada [8] e da transmissão atmosférica através de modelos matemáticos [5].

O ângulo de visada entre a superfície do componente inspecionado e o termovisor, quando diferente de 0°, é um outro fator que insere erro nos resultados de medição [4], [42], [93]. Tais erros facilmente ultrapassam o valor estabelecido como admissível, 1,5°C, quando aplicados ângulos de visada em torno de 50° [42]. Como em instalações elétricas nem sempre é possível para o termografista posicionar-se frontalmente ao objeto inspecionado, os resultados da medição podem apresentar-se com erros significativos.

## 2.8 A incerteza de medição de temperatura por termografia infravermelha

Apesar da disponibilidade de modelos fenomenológicos e empíricos para estimativa da temperatura da superfície inspecionada a partir da irradiação recebida pelo termovisor, nesta seção, verificar-se-á que os métodos disponíveis para cálculo da incerteza associada à medição de temperatura por termografia, ou são reservados e não estão disponíveis, ou demandam informações usualmente não disponíveis ao termografista.

Conforme apresentado no capítulo 1, as fontes de incerteza internas ao termovisor são dominadas e, de maneira geral, o fabricante desse equipamento informa em seu catálogo sua incerteza máxima esperada. Alternativamente, sua incerteza pode ser determinada a partir dos dados do certificado de calibração [72].

A medição de temperatura por termografia envolve também outros instrumentos, já que a temperatura atmosférica e a umidade relativa, bem como a distância entre o termovisor e o objeto inspecionado devem ser medidas. O trabalho apresentado em [94] sugere um método de cálculo da incerteza de medição da temperatura do objeto inspecionado a partir das incertezas de medição da transmitância do meio de propagação, das incertezas de medição da emissividade do objeto e das incertezas de medição do termovisor. Entretanto, nota-se que algumas considerações demandam informações geralmente não disponíveis ao termografista, a saber:

- o usuário necessita saber a atenuação do meio de propagação e sua incerteza associada, em vez de fornecer parâmetros mais acessíveis para que o cálculo da atenuação atmosférica seja feito pelo modelo;
- o usuário deve conhecer o modelo matemático, ou seja, a sensibilidade espectral do termovisor empregado. Essa informação geralmente não é disponível [95], [96].

Logo, o trabalho apresentado em [94] demonstra um método de cálculo da incerteza de medição associada à temperatura medida por termografia sem, contudo, ser aplicável, visto que demanda do usuário algumas informações não disponíveis.

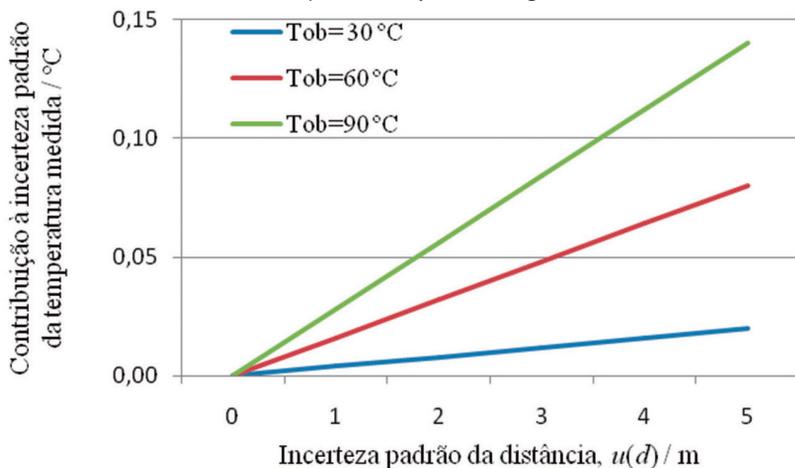
Verifica-se que os *softwares* de análise e tratamento de imagens térmicas disponibilizados por fabricantes de termovisores não

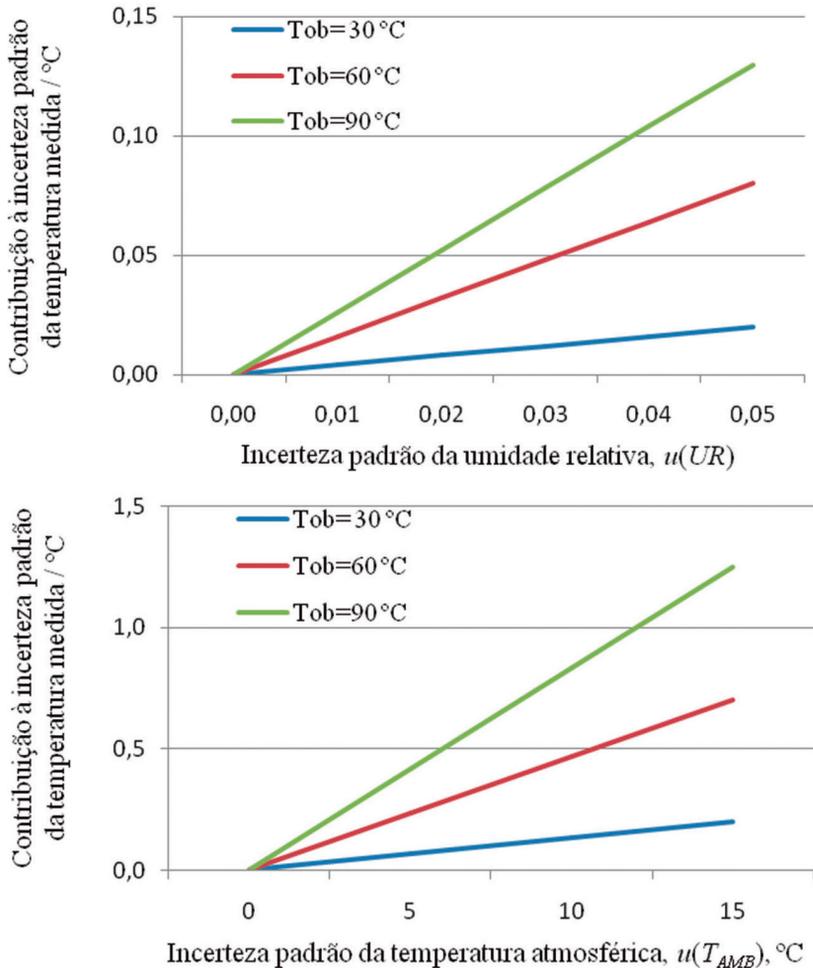
preveem o tratamento da incerteza de medição. Considerando que “quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física, é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade” [97], entende-se que seria adequado que tais *softwares* previssem a estimativa da incerteza da temperatura medida.

De maneira geral, os modelos de cálculo da incerteza são reservados pelos fabricantes. Eventualmente, sob consulta, o fabricante fornece os dados de saída (incerteza associada à medição de temperatura por termografia) a partir de dados de entrada (incerteza dos instrumentos de medição) informados pelo cliente [95], [96]. Contudo, o método de cálculo não é disponibilizado.

Quanto à contribuição dos instrumentos de medição para a incerteza da temperatura medida, a Figura 2-2 apresenta os resultados de um estudo de caso feito para o termovisor modelo ThermaCAM 595. Considerando-se uma distância fixa de 50 m, umidade relativa de 50%, e temperatura atmosférica de 296 K (aproximadamente 23°C), são apresentados os resultados das contribuições das incertezas dessas três grandezas na medição de temperatura do objeto. Os valores de distância (50 m), umidade relativa (50 %) e temperatura atmosférica (296 K) foram mantidos constantes, variando-se suas incertezas. A emissividade do objeto inspecionado era de 0,9 [96].

Figura 2-2 – Relação entre a incerteza padrão dos instrumentos de medição e sua contribuição à incerteza da medição de temperatura de um objeto ( $T_{ob}$ ) por termografia





Fonte: adaptado de [96].

A pedido do fabricante Flir, os autores não apresentaram o modelo matemático que correlaciona as variáveis de entrada (elencadas como umidade relativa, distância de medição, temperatura atmosférica) à variável de saída (coeficiente empregado à emissividade e à potência radiada recebida para cálculo da temperatura do objeto) [96].

Apesar de os autores não indicarem a incerteza total associada à temperatura medida para cada caso estudado, os resultados apresentados sugerem que as contribuições esperadas para a incerteza de medição de temperatura pelos instrumentos de medição de distância,

umidade relativa e temperatura atmosférica seriam muito pequenas em relação à incerteza total. Isso é posto uma vez que o termovisor empregado, Flir ThermaCAM 595, possui incerteza de 2 K para a faixa de medição adotada, (303 a 363) K [98].

Analisando os gráficos da Figura 2-2, nota-se que uma incerteza padrão exagerada de 0,5 m para medição da distância de 50 m contribuiria em menos 0,05 K à medição de temperatura. Para a umidade relativa, uma incerteza padrão usual de 0,03 contribuiria com aproximadamente 0,05 K ao resultado final. Para a temperatura atmosférica, uma incerteza padrão usual de 0,6 K resultaria numa contribuição aparentemente inferior a 0,1 K no resultado final.

Dessa forma, indiretamente esse trabalho sugere que os instrumentos de medição de temperatura atmosférica, umidade relativa e distância teriam influências irrelevantes na incerteza da medição de temperatura por termografia infravermelha, prevalecendo a incerteza do termovisor. Entretanto, tais afirmações não podem ser plenamente validadas visto que o modelo empregado não foi disponibilizado.

Assim, no capítulo 3 é apresentado, dentre outros estudos, um método recentemente publicado para estimativa da incerteza de medição de temperatura por termografia infravermelha, a partir das características dos instrumentos empregados no processo de inspeção (termovisor, medidores de distância, umidade relativa, temperatura ambiente e temperatura atmosférica). Adicionalmente, são apresentados valores típicos de incertezas em diferentes condições de inspeção, que podem ser considerados por termografistas no dia a dia de trabalho.

## **2.9 Erros em medição devido ao ângulo de visada combinado com o campo de visão**

Alguns autores afirmam que a inspeção termográfica deve ser feita sempre que possível com ângulo de visada nulo, ou seja, frontalmente ao objeto inspecionado. Sugerem ainda que para ângulos de visada inferiores a (25 ou 30)° os erros seriam toleráveis [99], [100], outros citam o ângulo de 60° como tolerável [101]. Essa recomendação é fundamentada no fato de a maioria dos objetos ter sua emissividade dependente desse ângulo [5], [8], [54], [102].

Entretanto, analisando dados disponíveis em outras pesquisas, nota-se que o erro de medição não é devido somente à emissividade direcional do objeto inspecionado. Para um mesmo objeto, termovisores com diferentes FOV apresentaram erros de medição diferentes quando em função do ângulo de visada [42]. Analisando ainda os dados disponíveis em [42], considerando que os termovisores empregados teriam FOV de  $(27 \times 20)^\circ$  – NEC TH7800 [103],  $(20 \times 15)^\circ$  – Fluke Ti20 [59] e  $(12 \times 9)^\circ$  – Flir ThermaCAM E25 [104], nota-se que quanto maior era o ângulo de abertura da lente do termovisor, menor era o erro de medição em função do ângulo de visada. Não foi feita nem foram apresentados dados que permitam uma análise de significância estatística das diferenças entre os erros dos termovisores.

Os resultados apresentados em [42] indicam que para ângulos de visada em torno de  $50^\circ$  somente o erro devido ao ângulo de visada/FOV já atingiria o erro máximo admissível de  $1,5^\circ\text{C}$  sugerido na seção 3.6.

Assim, no capítulo 3 é apresentado ao leitor um resumo de um estudo recente que apresenta uma equação empírica para a correção do erro de medição de temperatura em função do ângulo de visada durante a inspeção e do campo de visão (FOV) do termovisor.



## Capítulo 3

### **Avanços recentes em inspeções termográficas de instalações elétricas**

Nos capítulos anteriores, foram apresentados ao leitor os princípios físicos que sustentam a inspeção termográfica e os critérios de diagnósticos de instalações elétricas a partir da termografia infravermelha. Entretanto, como o leitor pôde perceber, há diversos fatores que influenciam nos resultados da medição de temperatura que podem levar a um diagnóstico equivocado, por exemplo: erros e incertezas de medição não mitigados ou considerados pelo termografista, posicionamento do termovisor face à superfície inspecionada, dentre outros.

Neste contexto, este capítulo traz um resumo de publicações técnico-científicas recentes com resultados de diversas situações não usuais envolvendo a termografia [105]-[109].

Uma das técnicas mais utilizadas para manutenções preditivas, ou seja, aquela manutenção baseada em análises periódicas e monitoramento de alguns parâmetros dos equipamentos em operação, visando identificar falhas e defeitos em estágios iniciais, é a termografia. Manutenções preditivas podem, dessa maneira, otimizar a produção evitando longas paradas para manutenções corretivas.

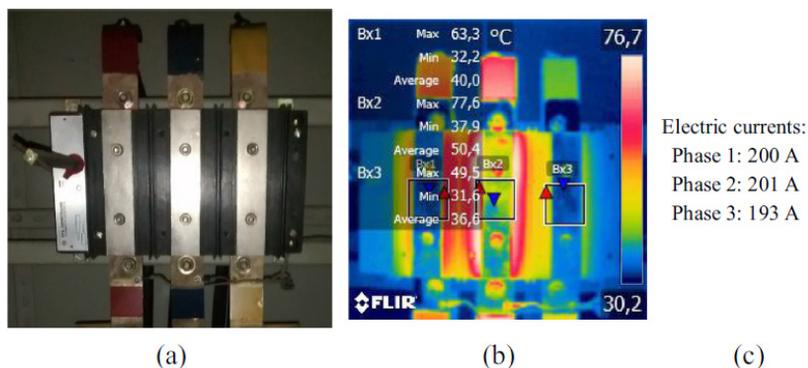
Medir a radiação infravermelha emitida pelos objetos, definição de termografia, possibilita identificar variações nas temperaturas dos equipamentos analisados, permitindo análise de equipamentos elétricos, análise de corrosão, soldas em revestimentos de construção, equipamentos eletrônicos e mecânicos, entre outros. Além disso, a termografia permite que a inspeção seja feita a distância, o que é uma grande vantagem, principalmente se tratando de equipamentos muito aquecidos ou que podem apresentar riscos para o operador.

### 3.1 Método para evitar diagnósticos termográficos equivocados em cabos paralelos

Mendes, Tonini, Muniz e Donadel (2016), desenvolveram um estudo que propõe um método para diagnosticar defeitos em cabos em paralelo a partir da termografia infravermelha. O método proposto visa assistir o termografista para que seja possível identificar de maneira assertiva qual cabo de fato é o defeituoso numa situação em que um dos cabos está mais aquecido que o outro. O método usual diagnosticaria o cabo mais aquecido como o defeituoso. Entretanto, os autores mostraram que o cabo mais frio pode ser o cabo defeituoso e apresentam um procedimento de inspeção para tal situação [105].

Normalmente, na indústria, as elevações na temperatura dos equipamentos estão diretamente associadas a falhas, conforme pode ser observado na Figura 3-1, que apresenta um problema na chave seccionadora em um sistema trifásico de 220 V. Embora a corrente elétrica seja balanceada nas três fases, a fase central está aproximadamente 15°C acima da fase da esquerda e 27°C acima da fase da direita.

Figura 3-1 – Chaves desconectadas em um sistema trifásico de 220V:  
(a) figura real; (b) termografia infravermelha; e (c) valores das correntes elétricas nas três fases



Fonte: adaptado de [105].

Dessa maneira, analisar as diferenças de temperaturas entre equipamentos ou entre partes das superfícies do mesmo, durante uma manutenção preditiva, pode permitir a identificação de falhas antecipadamente.

Apesar disso, nem sempre os pontos mais quentes observados em uma termografia necessariamente estão associados a defeitos. Para situações onde há cabos em paralelo de uma mesma fase, por exemplo, caso haja uma falha do tipo mau contato, a corrente elétrica pode ter intensidade significativamente maior no cabo cujas conexões são boas e menos intensa nos cabos onde existe algum mau contato. Isso pode resultar em maior dissipação de potência e, conseqüentemente, corrente na conexão de bom contato e menor dissipação de potência na conexão defeituosa. Ou seja, o cabo mais aquecido, na verdade, está em conformidade pois é o único que está conduzindo a corrente.

A Figura 3-2 ilustra um exemplo de uma situação como a citada, onde o cabo aquecido é, na verdade, o que está em conformidade. Nela, é possível observar uma termografia de um sistema trifásico com dois condutores por fase em que o método de diagnóstico trivial indicaria que a conexão mais quente ( $110,9^{\circ}\text{C}$ ) seria defeituosa. Na verdade, neste contexto, essa conexão pode estar sã. A conexão mais fria ( $85,9^{\circ}\text{C}$ ), aparentemente saudável, pode estar não conforme, conduzindo menos corrente elétrica.

Figura 3-2 – Termografia de uma instalação trifásica com cabos em paralelo



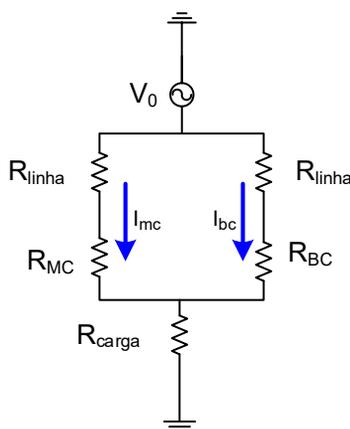
Fonte: Cortesia de ArcelorMittal Tubarão.

Diagnósticos equivocados para inspeções preditivas termográficas poderiam sugerir, portanto, ações nos condutores saudáveis,

fazendo com que os cabos danificados permanecessem em operação. Dessa maneira, é importante utilizar métodos capazes de identificar situações como as citadas, visando diagnósticos precisos e reduzindo custos de manutenção.

Uma modelagem pode ser feita, considerando que instalações elétricas com condutores paralelos por fase podem, então, ter comportamentos não triviais, ou seja, o cabo mais aquecido pode ser, na verdade, o condutor saudável. Assim, a situação pode ser modelada conforme a Figura 3-3.

Figura 3-3 – Modelo esquemático para condutores em paralelo



Fonte: adaptado de [105].

Onde:

$V_0$ : fonte de corrente alternada, V;

$R_{MC}$ : resistência elétrica da conexão não conforme,  $\Omega$ ;

$R_{BC}$ : resistência elétrica da conexão conforme,  $\Omega$ ;

$R_{linha}$ : resistência de linha (do condutor),  $\Omega$ ;

$R_{carga}$ : resistência da carga,  $\Omega$ .

Para esse modelo, os cabos de alimentação da carga são modelados como resistores, visto que em baixa tensão, em regime permanente, os efeitos indutivos podem ser desprezados [110]. As equações das correntes elétricas em cada cabo em paralelo são obtidas através do conceito de divisor de corrente – uma técnica de análise de circuitos lineares que permite determinar a corrente passante em cada trecho de um circuito, como uma fração da corrente total que passa.

As temperaturas nas conexões podem ser modeladas correlacionando a elevação de temperatura e a potência dissipada na própria conexão. A variável independente nos dois casos é a resistência elétrica da conexão defeituosa, denominada como “resistência de mau contato”. As variáveis dependentes são as correntes em cada linha em paralelo e as temperaturas em cada conexão em paralelo. As equações da corrente no bom contato e no mau contato podem ser apresentadas, portanto, conforme as Equações (3.1) e (3.2).

$$I_{BC}(pu) = \frac{R_{MC} + R_{carga}}{R_{MC} + R_{BC} + (2 \cdot R_{carga})} \quad (3.1)$$

$$I_{MC}(pu) = \frac{R_{BC} + R_{carga}}{R_{MC} + R_{BC} + (2 \cdot R_{carga})} \quad (3.2)$$

Onde:

$I_{BC}(pu)$ : corrente elétrica no bom contato, por unidade;

$I_{MC}(pu)$ : corrente elétrica no mau contato, por unidade.

Através das correntes do bom e mau contato é possível obter a potência dissipada em cada conexão, de acordo com a Equação (3.3).

$$P = R \cdot I^2 \quad (3.3)$$

Onde  $P$  é a potência elétrica dissipada nas conexões, em W;  $R$  a resistência elétrica da conexão, em  $\Omega$  e  $I$ , a corrente elétrica conduzida pela conexão em A.

A correlação entre a temperatura superficial das conexões com suas potências dissipadas deve ser feita através de modelos apropriados. Alguns autores afirmam haver uma relação direta entre elevação de temperatura e potência dissipada, o que implicaria na Equação (3.4).

$$T \propto P$$

$$T = K \cdot R_p \cdot I^2 \quad (3.4)$$

Apesar da relação apresentada na Equação (3.4), alguns estudos apontam que o expoente mais adequado para a corrente elétrica na relação apresentada na equação seria um valor entre 1,4 e 1,7 [7], [85].

Para o desenvolvimento desse modelo, foi utilizado o coeficiente  $K$  apresentado na Equação (3.4) e, assim, é possível manipular as Equações (3.1), (3.2) e (3.4) para obter as equações de cálculo das temperaturas superficiais das conexões de “bom contato” e “mau contato”, apresentadas respectivamente nas Equações (3.5) e (3.6).

$$T_{BC} = K \cdot R_{BC} \cdot \left( \frac{R_{MC} + R_{carga}}{R_{MC} + R_{BC} + 2 \cdot R_{carga}} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$T_{MC} = K \cdot R_{MC} \cdot \left( \frac{R_{BC} + R_{carga}}{R_{MC} + R_{BC} + 2 \cdot R_{carga}} \right)^2 \quad (3.6)$$

A constante  $K$  é oriunda da hipótese de proporcionalidade entre potência dissipada e temperatura superficial da conexão elétrica. Seu valor é determinável tendo como parâmetro a temperatura das conexões em condições normais de operação, ou seja, sem defeito, e depende do objeto específico que está sendo inspecionado, conforme apresentado na Equação (3.7).

$$K = \frac{T_{S\tilde{A}}}{T_{BCS\tilde{A}}} = \frac{T_{S\tilde{A}}}{T_{MCS\tilde{A}}} \quad (3.7)$$

Onde:

$T_{S\tilde{A}}$ : temperatura das conexões com a instalação elétrica funcionando sem defeito;

$T_{BCS\tilde{A}}$ : temperatura do bom contato em condições conformes, obtida a partir do modelo matemático;

$T_{MCS\tilde{A}}$ : temperatura do mau contato em condições conformes, obtida a partir do modelo matemático.

Como essa constante  $K$  é difícil de ser calculada em inspeções reais de termografia, usualmente comparam-se diferentes situações operacionais do mesmo objeto inspecionado para evitar o cálculo de  $K$ .

Assim, para a construção dos gráficos das correntes elétricas e temperaturas de “bom” e “mau contato” necessárias para analisar se a situação em questão apresenta diagnóstico trivial, em função da resistência de mau contato, primeiramente é necessário que alguns dados da instalação sejam conhecidos. São esses:

- a resistência elétrica da conexão em condições conformes;
- a resistência da linha;
- a temperatura das conexões elétricas quando a instalação opera sem defeitos nas conexões.

Para obter um modelo genérico, as correntes elétricas estão em pu, tendo como base a corrente total da fase; as resistências de contato também estão em pu, tendo a resistência da linha como base.

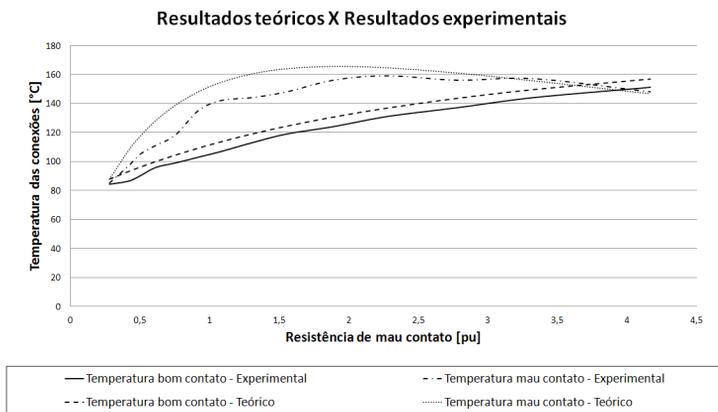
Utilizando as Equações (3.1) a (3.7), é possível construir os gráficos de corrente e temperatura que modelam o comportamento das conexões elétricas em função da resistência de mau contato. Entretanto, como valores de resistência variam em função de sua própria temperatura, as equações foram solucionadas numericamente, obtendo-se resultados mais precisos.

Para avaliar o modelo levantado, foram feitos experimentos em instalações elétricas de diferentes ordens de grandeza de tensão e corrente elétrica, simuladas em laboratório. Por exemplo, foi feito um experimento que consistiu em alimentar uma carga resistiva de  $12,5 \Omega$  através de dois condutores de  $3,6 \Omega$  em paralelo com as conexões simuladas por resistores em série. O bom contato foi modelado através de um resistor de  $1 \Omega$  e o mau contato através de resistores de  $(1 \text{ a } 15) \Omega$ . A tensão de alimentação foi  $65,8 \text{ V}$ . A relação entre temperatura e potência dissipada das conexões foi feita através das informações disponibilizadas pelo fabricante dos resistores empregados. Os valores medidos de temperaturas e resistências foram comparados com os valores obtidos a partir do modelo matemático proposto.

A Figura 3-4 apresenta os resultados obtidos pelo modelo matemático proposto e pelo modelo experimental obtido através de análises termográficas. A temperatura do contato é mostrada em função da resistência de mau contato.

O erro médio dos resultados experimentais para o bom contato, tomando como base os resultados teóricos esperados, foi de  $6^\circ\text{C}$ . Considerando que a média das temperaturas desse contato foi  $113^\circ\text{C}$ ,

Figura 3-4 – Gráfico com resultados de temperatura do bom e do mau contato – modelo teórico e resultados experimentais



Fonte: adaptado de [105].

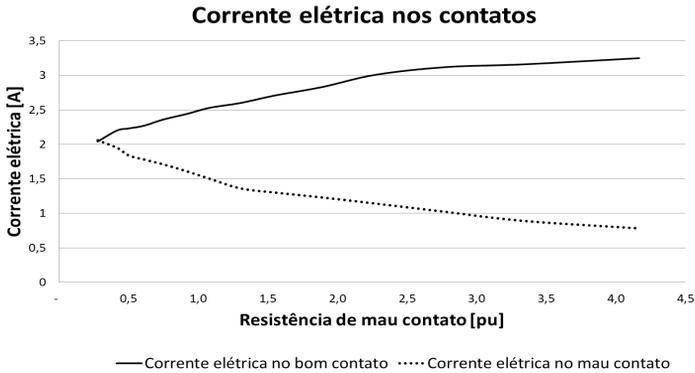
o erro médio relativo é 5%. Para o mau contato, o erro médio foi de 10°C. Como sua temperatura média foi 133°C, o erro relativo é de 8%. Considerando os intervalos de incertezas (“precisão”) dos instrumentos de medição empregados, da ordem de 3%, e as tolerâncias de fabricação dos resistores utilizados nos experimentos, 10%, conclui-se que os resultados experimentais têm erros aceitáveis quando comparados aos valores teóricos esperados.

Ainda analisando o gráfico da Figura 3-4, nota-se que para resistências de mau contato relativamente baixas, até aproximadamente 4 pu para o caso estudado, o diagnóstico trivial é correto, ou seja, a conexão mais aquecida é a que apresenta defeito. Entretanto, para valores altos de resistência de contato, acima de 4 pu neste exemplo, a conexão mais aquecida é a conexão em condições conformes, estando a conexão defeituosa menos aquecida.

Os resultados dos dados experimentais relativos à corrente elétrica em cabos paralelos são apresentados na Figura 3-5. Pode-se verificar que, à medida que o “mau contato” torna-se cada vez pior, o valor de sua corrente elétrica diminui e a corrente elétrica na conexão de “bom contato” aumenta.

Para diagnóstico correto, somente as temperaturas das duas conexões não são suficientes. A Figura 3-5 exemplifica situações onde

Figura 3-5 – Resultados de dados experimentais relativos à corrente elétrica em cabos paralelos

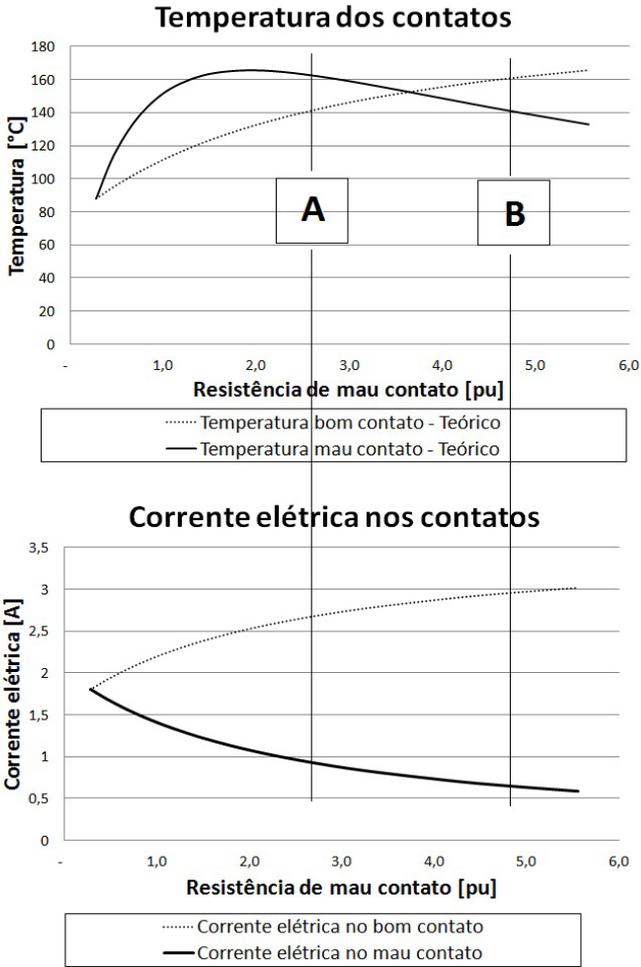


Fonte: adaptado de [105].

apenas a informação de dois valores de temperatura não permite determinar a condição operacional da instalação, pois o profissional de manutenção poderia não conseguir determinar qual é a conexão conforme e qual é a conexão defeituosa, confundindo-se entre os casos A e B que apresentam os mesmos valores de temperatura nas duas conexões.

Para apoio ao diagnóstico nessa situação, é proposto o uso dos gráficos de corrente elétrica, conforme apresentado também na Figura 3-6. Esses gráficos são desenvolvidos a partir das Equações (3.5) e (3.6). Através da medição da corrente nos condutores no momento da inspeção termográfica, é possível verificar se a situação da instalação defeituosa se encontra antes ou depois do encontro e inversão das temperaturas, e assim, identificar qual condutor é de fato o não conforme. Exemplificando ainda no exemplo proposto, os casos A e B apresentam valores de temperatura das conexões de 140 °C e 160 °C. Realizando a medição de corrente elétrica em ambas as linhas, a determinação da situação é concretizada analisando o gráfico de corrente. Caso as correntes sejam 2,75 A e 0,90 A, seria o caso A, ou seja, a conexão mais aquecida seria a defeituosa. Do contrário, as correntes seriam 2,90 A e 0,60 A, indicando que a conexão mais aquecida seria a conforme e a menos aquecida estaria defeituosa, caso B.

Figura 3-6 – Exemplos de situações, ilustrando a temperatura nos contatos para os casos A e B, em que o diagnóstico não é trivial



Fonte: adaptado de [105].

Portanto, a utilização desses gráficos durante as atividades preditivas de inspeção termográfica na instalação elétrica pode permitir um diagnóstico mais assertivo quanto à identificação da conexão defeituosa, evitando, desse modo, diagnósticos errôneos que possam levar à manutenção da conexão que estaria sem defeito. Vale ressaltar que os resultados do modelo proposto dependem do modelo matemático que correlaciona a temperatura superficial das conexões elétricas

à potência por ela dissipada. A literatura traz alguns modelos que produzem resultados ligeiramente diferentes, em função da incerteza do expoente da corrente elétrica na equação que a correlaciona à temperatura superficial da conexão.

### **3.2 Influência do campo de visão de termovisores e ângulo de visão em medições de temperatura por termovisão infravermelha**

Sabendo que diversos fatores tais como a habilidade técnica do profissional que realiza a inspeção termográfica, as características do termovisor, condições ambientais – temperatura, umidade relativa e velocidade do vento –, carga de corrente elétrica do equipamento analisado e sua emissividade podem afetar o resultado de uma termografia, modelos matemáticos foram desenvolvidos e são empregados para estimar essas influências e permitir resultados de inspeção termográfica com maior qualidade.

O fator “posição angular do termovisor em relação ao objeto analisado”, ou seja, o ângulo de visada, pode afetar a sensibilidade do termovisor à emissividade angular do objeto inspecionado. Há também evidências de que as características do termovisor, associadas ao ângulo de visada, também podem introduzir erros de medição. Muniz, Cani, e Magalhaes (2014) realizaram estudos experimentais e desenvolveram modelo empíricos de apoio ao termografista, permitindo a correção do erro de medição de temperatura em função desses parâmetros [106].

Dessa maneira, torna-se importante analisar a influência do campo de visão do termovisor (FOV, do inglês *field of view*), característica de seu conjunto óptico, a partir de diferentes ângulos de visada entre o equipamento e o objeto sob inspeção, nos resultados de medição de temperatura por termografia.

Os experimentos foram conduzidos com uma câmera termográfica, com diferentes FOVs horizontal e vertical, permitindo duas condições diferentes de medição. Uma terceira lente com FOV também foi utilizada. Além disso, um termohigrômetro foi usado para medir a temperatura e umidade relativa do ar. A Tabela 3-1 ilustra as características do termovisor utilizado.

Tabela 3-1 – Termovisor utilizado

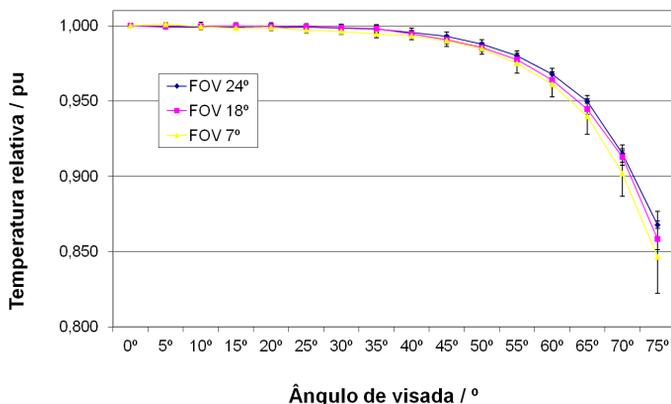
Características	Termovisor
Fabricante	Flir
Modelo	P640
Resolução	0,1 °C
Incerteza do manual	2 °C
Campo de visão	42° x 18°
Tamanho da matriz do plano focal	640 x 480 <i>pixels</i>
Campo de visão da lente adicional	7°

Fonte: Adaptado de [106].

A temperatura apresentada para cada ponto de medição sob cada ângulo de visada é a média de 10 medições realizadas com sua incerteza associada para um nível de confiança de 90%. Os três conjuntos de medições analisados foram obtidos usando o termovisor Flir P640 na posição horizontal (FOV de 24°), na posição vertical (FOV de 18°) e com o conjunto adicional de lentes (FOV de 7°).

A Figura 3-7 representa os resultados obtidos nos três conjuntos de medições. Observa-se que os erros de medições se acentuam para ângulos de visada maiores do que 45°. Nota-se também, em uma análise preliminar e qualitativa, que os erros apresentam comportamentos diferentes de acordo com o campo de visão utilizado. Quanto maior o FOV, menor o erro na temperatura medida.

Figura 3-7 – Medidas de temperatura com três diferentes FOVs com o mesmo termovisor, como função do ângulo de visada para o objeto analisado



Fonte: adaptado de [106].

Os dados obtidos em cada um dos três conjuntos de medições foram comparados utilizando a ferramenta “Teste T Pareado” para determinar se eles são significativamente diferentes entre si em um nível de confiança de 90%. Na comparação de dois conjuntos de 10 amostras, um T-valor maior que 1,73 indica que os conjuntos de amostras são diferentes em um nível de confiança de 90%. Os resultados são mostrados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Comparação do Teste T Pareado –  
Temperatura medida de diferentes FOVs

Ângulo de visada / °	FOV 24° x 18°	FOV 24° x 7°	FOV 18° x 7°
5	0,50	-2,87	-2,68
10	0,08	0,39	0,09
15	-0,15	1,48	1,08
20	-0,12	0,82	0,70
25	0,61	<b>2,95</b>	1,37
30	0,64	<b>3,63</b>	<b>1,74</b>
35	0,45	<b>4,57</b>	<b>3,70</b>
40	1,37	<b>3,68</b>	<b>1,77</b>
45	<b>1,87</b>	<b>3,62</b>	<b>2,26</b>
50	<b>1,79</b>	<b>3,63</b>	<b>2,20</b>
55	<b>1,83</b>	<b>3,73</b>	<b>1,78</b>
60	<b>2,06</b>	<b>3,76</b>	1,66
65	<b>2,29</b>	<b>3,72</b>	1,42
70	1,22	<b>3,26</b>	<b>1,73</b>
75	<b>2,35</b>	<b>3,42</b>	1,32

Fonte: adaptado de [106]

Os resultados da Tabela 3-2 sugerem que diferentes campos de visão podem apresentar distintas medidas em ângulos de visão acima de 20°, pois o teste estatístico é predominantemente afirmativo nessa faixa. Combinado com a análise do gráfico na Figura 3-7, pode ver-se que quanto menor for o FOV, menor é a temperatura medida, isto é, mais erro negativo está associado.

Comparando esses erros para a incerteza do termovisor disponível no catálogo do fabricante, pode ser visto, a partir dos dados experimentais consolidados na Figura 3-7, que o termovisor com

campo de visão de 24° apresenta erro de medição acima de 2% a partir do ângulo de visão de 35°. Para o FOV de 18°, esse erro também é presente a partir de 35°. Para a lente com campo de visão de 7°, o erro é notado a partir do ângulo de visão de 25°. Essa comparação mostra que os erros de medição devido ao ângulo de visada são realmente significativos. Nota-se que o erro introduzido na medição depende do campo de visão e não têm correlação com a incerteza do termovisor.

O valor da temperatura em cada ponto medido, o ângulo de visada, seno e cosseno do ângulo de visada, FOV, seno e cosseno do FOV foram utilizados como variáveis preditoras para a regressão. A ordem das variáveis de entrada foi gradualmente aumentada até a 6ª ordem. A partir da segunda ordem, não foi notada nenhuma melhoria no coeficiente de correlação  $R^2$  ajustado.

O resultado, onde  $R^2$  ajustado foi de 94,3% é mostrado conforme a Equação (3.8).

$$FM = -27,0256 + 0,0899 \cdot \theta + 0,0025 \cdot \theta_v^2 - 5,0255 \cdot \text{sen}(\theta_v) + 5,4072 \cdot \text{sen}^2(\theta_v) + 28,0063 \cdot \text{cos}(\theta_v) + 0,1762 \cdot FOV - 0,000412 \cdot FOV^2 - 9,779 \cdot \text{sen}(FOV) \quad (3.8)$$

Onde:

*FM*: fator de correção multiplicativo a ser aplicado aos resultados de medição de temperatura;

$\theta_v$ : ângulo de visão entre o objeto e o termovisor, °;

*FOV*: campo de visão do termovisor, °.

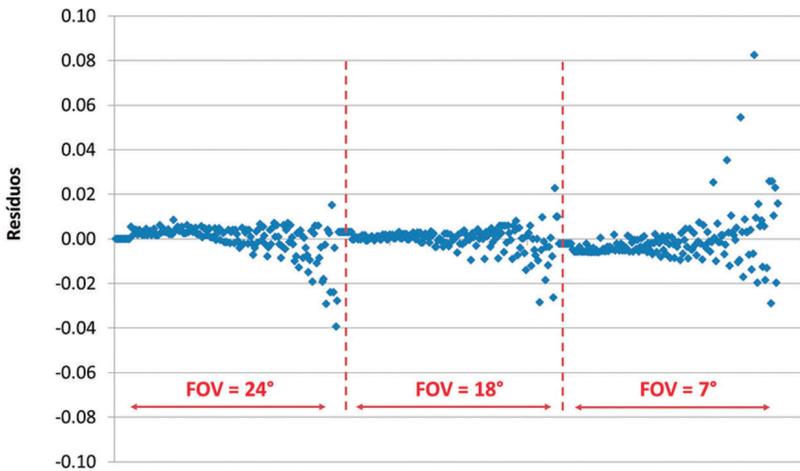
Para avaliar a qualidade do modelo proposto, seus erros de predição em função aos dados de entrada foram comparados aos resultados experimentais, tido como esperados. Esses erros são mostrados na Figura 3-8 em gráficos de dispersão.

Analisando os gráficos de dispersão da Figura 3-8, observa-se que os erros resíduos, diferença entre os valores preditos pela regressão e os valores de referência indicados pelo procedimento experimental, são relativamente pequenos e concentrados próximo a 0,00. De fato, com um fator de abrangência de 1,645 (nível de confiança de 90%), espera-se que os resíduos sejam inferiores a 0,014.

Considerando que diferenças de temperatura de 5°C entre componentes elétricos similares já são indicativos de possível falha, valor que representa cerca de 5% na ordem de grandeza dos resultados

experimentais (a temperatura de referência foi definida em torno de 100°C), verifica-se que o modelo proposto corrige os erros de medição em função do ângulo de visada e do FOV do termovisor, com uma incerteza da ordem de 1/3 da tolerância de diagnóstico, ou seja, com uma incerteza de 1,4% perante uma tolerância de 5%. Portanto, o modelo proposto pode ser utilizado como “instrumento” para compensar os erros de medição devido ao ângulo de visão e FOV nas inspeções termográficas.

Figura 3-8 – Gráfico de dispersão dos erros apresentados pela regressão



Fonte: adaptado de [106].

### 3.3 Método de medição de emissividade exequível em campo sem a necessidade de contato físico

Sabe-se que para estimar a temperatura superficial de um objeto, os termovisores carecem de informações como distância entre o termovisor e o objeto, temperatura e umidade relativa atmosféricas, além da emissividade da superfície.

A emissividade de um corpo é responsável por cerca de 80% da incerteza na medição de temperatura por termografia infravermelha. Com essa necessidade, diversas técnicas foram desenvolvidas com intuito de obter os valores de emissividade. Dentre elas destacam-se principalmente os métodos de simulação de corpo negro e

condições com temperatura conhecida. Entretanto, esses métodos necessitam de interação física com a superfície analisada, o que muitas vezes é impraticável, principalmente tratando-se de ambientes industriais onde os equipamentos podem estar instalados em locais de difícil acesso e funcionando com temperaturas extremamente elevadas, ou mesmo energizados eletricamente. Assim, Demuner, Fardin, Muniz e Gomes (2015) desenvolveram um método de estimativa da emissividade de superfícies sem a necessidade de contato físico, podendo ser feito em campo com o equipamento em operação, visando à aplicação em instalações elétricas é de grande relevância e aplicabilidade [107].

O desenvolvimento matemático do método proposto para estimar a emissividade de um corpo inicia-se com a análise de equações fundamentais da radiação e emissão da radiação de objetos. A radiação total proveniente de uma superfície inspecionada corresponde à soma da radiação emitida pela própria superfície com a parcela por ela refletida proveniente do ambiente. Considerando  $E_b$  a componente da radiação emitida pelo objeto e  $G$  a parcela refletida por este, a radiação total  $J$ , denominada radiosidade total, dá-se conforme a Equação (3.9).

$$J = \varepsilon \cdot E_b + \rho_r \cdot G \quad (3.9)$$

Onde  $\varepsilon$  representa a emissividade da superfície e a variável  $\rho_r$  está associada ao valor da refletividade do objeto. Mas, sabe-se que a emissividade é um fato complementar à refletividade e pode ser representada pela Equação (3.10).

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (3.10)$$

Assim, é possível reescrever a Equação (3-9) em função da emissividade, da radiação emitida e da parcela refletida pelo objeto, obtendo a Equação (3.11).

$$J = \varepsilon \cdot E_b + (1 - \varepsilon) \cdot G \quad (3.11)$$

As componentes  $E_b$ ,  $G$  e  $J$  podem ser obtidas através da Lei de Planck, que descreve a emissão de radiação do corpo negro relacionando a distribuição espectral da radiação emitida por ele a uma determinada temperatura absoluta ( $T$ ), por unidade de área, por unidade de comprimento de onda ( $\lambda$ ) descrita pela Equação (3.12).

$$M_\lambda(T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot C^2}{\lambda^5 \cdot \left( e^{h \cdot \frac{C}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (3.12)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck,  $6,62606957 \times 10^{-34}$  J.s;  $C$  é a velocidade da luz no vácuo,  $2,9979246 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup> e  $k$  é a constante de Boltzmann,  $1,3806488 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>.

Por conseguinte, a estimativa da emissividade é dada a partir da Equação (3.11), que pode ser rescrita evidenciando o termo  $\varepsilon$  conforme a Equação (3.13).

$$\varepsilon = \frac{J - G}{E_b - G} \quad (3.13)$$

Para uma estimativa mais assertiva, faz-se necessário obter a incerteza associada à emissividade calculada. O numerador e o denominador da razão entre as subtrações na Equação (3.13) mostram-se como grandezas correlacionadas. Dessa forma, a incerteza relativa resultante da divisão entre as grandezas que determinam a emissividade é dada pela Equação (3.14) que descreve a divisão de variáveis correlacionadas envolvidas.

$$u_r \left( \frac{J - G}{E_b - G} \right) = \left| \frac{|u(J) + u(G)|}{J - G} - \frac{\sqrt{u(E_b)^2 + u(G)^2}}{E_b - G} \right| \quad (3.14)$$

Na Equação (3.14),  $\frac{|u(J) + u(G)|}{J - G}$  corresponde à razão entre a incerteza resultante da diferença entre a radiação total  $J$  e irradiação  $G$ , sendo estas correlacionadas diretamente. Já a parcela  $\frac{\sqrt{u(E_b)^2 + u(G)^2}}{E_b - G}$  equivale à razão entre incerteza resultante da diferença entre a radiação de corpo negro  $E_b$  e irradiação  $G$ , sendo essas duas últimas propriedades não correlacionadas.

Para estimar a emissividade sem contato físico com o objeto, primeiramente calcula-se a radiação emitida  $E_e$ . Depois, é calculada a radiação refletida pelo objeto  $G$ , mantendo as condições anteriores do corpo e do ambiente. Por fim, direciona-se a fonte de radiação térmica para o sistema inspecionado, calculando a radiação total captada  $J$ .

Para calcular a radiação em todas as etapas é necessária a medição da temperatura, feita com um termovisor. Utilizando a Lei de Planck, Equação (3.12), e integrando a faixa de comprimento de onda do termovisor utilizado, obtém-se a radiação característica.

Então, a emissividade é obtida com o emprego da Equação (3.13). O cálculo da emissividade foi implementado usando o *software* MatLab®. As variáveis de entrada no *software* são os valores de temperatura medidos pelo termovisor, bem como a incerteza típica de medição associada a cada uma das três etapas de cálculo. Como dado de saída o programa fornece as respectivas radiações e a emissividade da superfície. Em ambos os resultados a incerteza associada do objeto inspecionado é calculada.

Para confirmar o modelo proposto, foi realizado um experimento cujo material escolhido foi uma placa de aço galvanizado aquecida através de circulação de corrente elétrica. Para variar a influência externa, foi utilizada como fonte de radiação uma placa de aquecimento da marca Quimis, modelo Q-261-22, 220 V, 552 W, com controle de temperatura. Para as imagens térmicas foi utilizado um termovisor Flir BCAM SD, operando na faixa de (8 a 13)  $\mu\text{m}$ , distante 0,8 m da placa de aço galvanizado.

Cada medição de temperatura foi realizada cinco vezes com e sem a influência externa da placa de aquecimento, e está apresentada na Tabela 3-3. Os resultados das medições de temperatura bem como a incerteza padrão típica de 1,9°C, são dados de entrada do programa implementado.

Tabela 3-3 – Dados obtidos experimentalmente e resultados do cálculo da radiação

Medição	Temperatura aparente do objeto - medida pelo termovisor / °C	Radiação recebida pelo termovisor / $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$	Temperatura da fonte de calor / °C	Radiação associada à fonte de calor / $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$	Emissividade estimada
1	35,5 ± 1,9	4,09.10 <sup>-14</sup>	-	-	0,51 ± 0,03
	105,9 ± 1,9	5,06.10 <sup>-14</sup>	179 ± 1,9	6,03.10 <sup>-14</sup>	

2	35,9 ± 1,9	4,12.10 <sup>-14</sup>	-	-	0,51 ± 0,03
	107,6 ± 1,9	5,08.10 <sup>-14</sup>	179 ± 1,9	6,03.10 <sup>-14</sup>	
3	35,7 ± 1,9	4,12.10 <sup>-14</sup>	-	-	0,51 ± 0,03
	106,9 ± 1,9	5,07.10 <sup>-14</sup>	179 ± 1,9	6,03.10 <sup>-14</sup>	
4	35,6 ± 1,9	4,12.10 <sup>-14</sup>	-	-	0,51 ± 0,03
	103,2 ± 1,9	5,02.10 <sup>-14</sup>	179 ± 1,9	6,03.10 <sup>-14</sup>	
5	36,1 ± 1,9	4,13.10 <sup>-14</sup>	-	-	0,51 ± 0,03
	100,9 ± 1,9	4,99.10 <sup>-14</sup>	179 ± 1,9	6,03.10 <sup>-14</sup>	

Fonte: elaboração dos autores.

Com os experimentos realizados e considerando a independência entre as medições pode-se afirmar que o valor médio de emissividade é 0,52 com incerteza resultante de 0,06.

Para validar o modelo, foi empregado o método de estimativa da emissividade do corpo de prova por aplicação do método de simulação de corpo negro, cujo resultado estimado para a amostra foi de 0,57. Outra forma de analisar o resultado obtido é por meio de comparação com tabelas de emissividade disponíveis na literatura. Consultando a tabela Contemp [111] para o mesmo material, com acabamento superficial do tipo “placa oxidada”, são encontrados valores que variam de 0,23 a 0,85 para diferentes temperaturas e espectros.

Assim, verifica-se que o método proposto demonstra ser eficaz e útil aos termografistas para estimativa de emissividade de superfícies inspecionadas por termografia infravermelha, sem a necessidade de contato físico. Diferentemente de tabelas de referência, a metodologia proposta leva a um resultado único de emissividade, obtido em função do próprio termovisor a ser empregado na inspeção preditiva, tornando a análise termográfica mais assertiva e confiável.

### 3.4 Quantificação de perdas energéticas e caracterização de conexões elétricas por termografia infravermelha

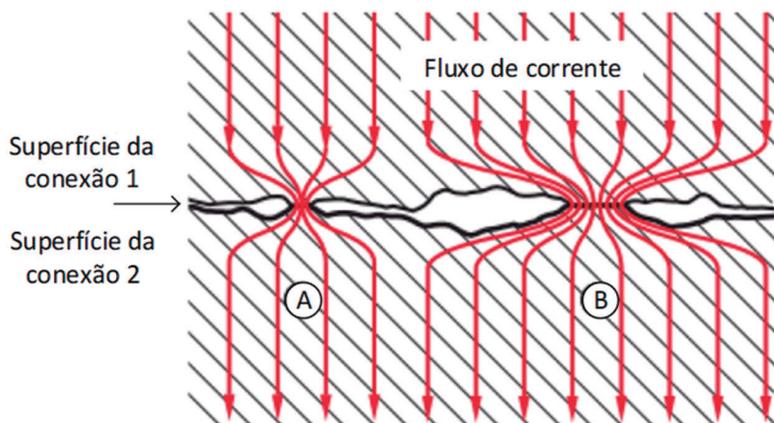
Além do uso convencional para manutenção preditiva, a termografia infravermelha tem sido empregada como ferramenta para

análise e diagnóstico de eficiência energética em instalações elétricas. Por exemplo, estima-se que 36% dos problemas de eficiência energética em motores elétricos são causados por conexões elétricas defeituosas [112] e normalmente os métodos tradicionais de análise de temperatura por termografia infravermelha de conexões elétricas podem recomendar a continuidade operacional em situações que, para manutenção preditiva estão em conformidade, mas que já estão em condições não energeticamente eficientes. Assim, Almeida *et al.* (2017) desenvolveram modelos empíricos a partir de resultados experimentais para analisar se a termografia infravermelha poderia ser utilizada como ferramenta para estimar a severidade de um mau contato de uma conexão elétrica defeituosa. A modelagem proposta permite que o termografista estime a área efetiva de contato das conexões inspecionadas bem como a potência nelas dissipada e, conseqüentemente, avalie sua eficiência energética [108].

Uma conexão só estabelece fluxo ininterrupto de corrente elétrica através do dispositivo de contato se for estabelecido um bom contato metal-metal na conexão. Ademais, verifica-se que uma conexão deve ter baixa resistência ôhmica, o que implica em baixa dissipação de potência e operação a temperaturas compatíveis com seus materiais construtivos e com a instalação elétrica, principalmente quando submetidas a correntes elevadas. Quando a resistência ôhmica da conexão assume valores elevados e a corrente elétrica que passa por essa conexão também é alta, a temperatura da conexão tende a se elevar consideravelmente, pois a temperatura é diretamente proporcional à resistência elétrica e proporcional aproximadamente ao quadrado da corrente elétrica.

Entretanto, além da superfície de contato dos materiais, a resistência de contato em uma conexão elétrica também depende da pressão entre as superfícies de contato. Ou seja, se a pressão entre as superfícies não é suficientemente grande, a área de contato pode não ser a área de contato total. Quando isso ocorre, as conexões podem não ter a mesma eficiência de um caso onde há uma área com 100% do contato. Na Figura 3-9 é possível observar o fluxo de corrente através da superfície de contato onde as linhas de corrente (linhas vermelhas) passam somente onde o contato existe. Dessa maneira, observa-se que quanto maior a superfície de contato, caso B, maior o fluxo de corrente.

Figura 3-9 – Fluxo de corrente na superfície de contato de conexões elétricas, onde em A observa-se uma superfície de contato reduzida e em B uma superfície com maior área de contato



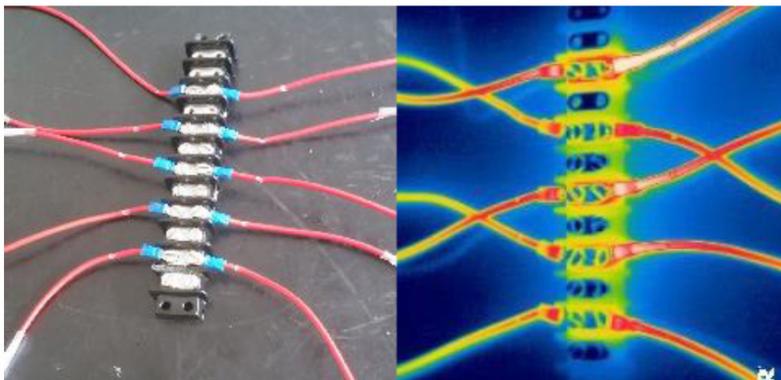
Fonte: adaptado de [108].

Para avaliar a qualidade da conexão elétrica a partir de inspeção termográfica, um experimento foi realizado e foram relacionadas grandezas de fácil acesso ao termografista como variáveis independentes (bitola do condutor, corrente elétrica no condutor, corrente elétrica ao quadrado e elevação da temperatura), e grandezas cujos valores seriam de interesse e inacessíveis como variáveis dependentes como a área de contato da conexão elétrica e a potência dissipada pela mesma.

O modelo matemático foi desenvolvido experimentalmente a partir de uma instalação onde circulava corrente elétrica em condutores em série conectados a uma placa de bornes com conectores elétricos do tipo olhal. De um lado da placa de bornes havia conexões elétricas sãs, com 100% de área de contato, e do outro lado as conexões elétricas defeituosas, com áreas de contato conhecidas e diferentes de 100%, como pode ser visto na Figura 3-10.

Foram adotadas as bitolas de cabos usuais em instalações elétricas prediais, normatizadas no Brasil (1,5; 2,5; 4 e 6) mm<sup>2</sup>. Para avaliar a influência da corrente elétrica, em percentual, foram adotados os valores experimentais de (33, 66 e 100)% da ampacidade do cabo. A elevação de temperatura em graus Celsius foi medida por termografia infravermelha, a uma distância de 1 m, distante o suficiente para segurança operacional e próximo o suficiente para se minimizar efeitos de variáveis espúrias e se obter foco no termograma. A potência dissipada

Figura 3-10 – Imagem real e imagem termográfica da instalação elétrica experimental



Fonte: adaptado de [108].

em percentual foi calculada em watts através do produto entre a queda de tensão na conexão elétrica e a corrente elétrica que circulava por ela, sendo, em seguida, normalizada em relação à potência dissipada pela conexão elétrica são de referência. Por fim, a área de contato, reproduzida também em porcentagem, variou de (25, 50 e 75) %.

Para cada situação analisada foram feitas três medições. Ou seja, cada bitola de cabo, sob cada nível de corrente elétrica, sob cada patamar de área de contato de conexão elétrica, teve três conexões elétricas construídas, totalizando assim 108 casos.

As relações quantitativas entre cada variável dependente, área de contato e potência dissipada, com as variáveis independentes, corrente elétrica, corrente elétrica ao quadrado, bitola do cabo e elevação de temperatura, foram estimadas utilizando-se planilha eletrônica. Foi adotado um nível de confiança para as regressões realizadas de 90%.

Para cada variável dependente, foi feita uma regressão linear considerando todas as variáveis independentes. A significância para a regressão, de cada variável independente foi avaliada através de seu “p-valor”. Uma vez que o nível de confiança foi definido em 90%, para cada regressão linear executada, caso houvesse uma ou mais variáveis independentes com p-valor superior a 0,10, a variável de maior p-valor era excluída e a regressão era novamente conduzida. A significância das equações obtidas por regressão era analisada através do “Teste-F”, que verifica se há uma relação linear entre a variável de resposta e as variáveis regressoras.

Foram consideradas satisfatórias regressões cujo Teste-F apresentaram valor que indicassem nível de confiança superior a 90%. O valor de  $F$  foi comparado com o valor  $F$  de referência para nível de confiança de 90%, considerando os graus de liberdade obtidos na regressão final.

Para a área de contato, a correlação obtida está apresentada na Equação (3.15). Essa equação demonstra que a área efetiva de contato da conexão elétrica é inversamente proporcional à sua elevação de temperatura, já que quanto menor a área de contato, maior será a resistência elétrica da conexão e, por conseguinte a potência dissipada.

$$A_c = 56,81 - 3,471 \cdot \Delta T \quad (3.15)$$

Onde:

$A_c$  é a área de contato da conexão elétrica, %;

$\Delta T$  é a elevação de temperatura da conexão elétrica em relação à sua condição normal de operação, °C.

Os parâmetros que avaliam a qualidade dessa equação são apresentados na Tabela 3-4 e indicam que a Equação (3.15) representa adequadamente o fenômeno estudado. A variável independente que se apresenta na equação, elevação de temperatura ( $\Delta T$ ), tem p-valor igual a 0,000 e o Teste-F da equação apresenta valor muito acima do mínimo aceitável para nível de confiança de 90%. Ou seja, o teste indica que a Equação tem nível de confiança superior a 99,5%.

**Tabela 3-4 - Avaliação da qualidade do modelo de estimativa da área de contato**

Grandeza	Parâmetro de avaliação	Valor de referência	Valor obtido
Equação	Teste F	$F > 2,881$	18,72
Interseção (56,81)	p-valor	$p\text{-valor} \leq 0,10$	0,000
Variável $\Delta T$	p-valor	$p\text{-valor} \leq 0,10$	0,000

Fonte: adaptado de [108].

Para a potência dissipada, a correlação obtida é apresentada na Equação (3.16), que demonstra que a potência dissipada na conexão elétrica é proporcional à sua elevação de temperatura, uma vez que a potência dissipada ocorre em forma de calor, elevando a temperatura da parte em questão.

$$P = 138,2 + 19,61 \cdot \Delta T \quad (3.16)$$

Onde  $P$  é a potência dissipada na conexão elétrica, %.

Os dados apresentados na Tabela 3-5 avaliam a qualidade da Equação (3.16) e indicam que essa representa adequadamente os resultados experimentais. A variável independente da equação, elevação de temperatura ( $\Delta T$ ), tem p-valor igual a 0,002 e o Teste-F da equação indica que ela tem nível de confiança superior a 99,5%.

Tabela 3-5 – Avaliação da qualidade do modelo de estimativa da potência dissipada

Grandeza	Parâmetro de avaliação	Valor de referência	Valor obtido
Equação	Teste F	$F > 2,881$	10,98
Interseção (138,2)	p-valor	$p\text{-valor} \leq 0,10$	0,000
Variável $\Delta T$	p-valor	$p\text{-valor} \leq 0,10$	0,002

Fonte: adaptado de [108].

Ou seja, os resultados demonstram que, dentro do universo estudado é possível avaliar quantitativamente a gravidade da falha da conexão elétrica a partir de inspeção termográfica, estimando-se a área de contato da conexão elétrica e a potência nela dissipada. Não é necessário o conhecimento de dados e variáveis de difícil obtenção pelo inspetor termográfico, somente a elevação de temperatura da conexão. Desse modo, os modelos apresentados nas equações propostas por [108] são potencialmente ferramentas simples e poderosas para análise de conexões elétricas não só do ponto de vista de manutenção preditiva, mas também de análise de eficiência energética, uma vez que se pode quantificar a potência dissipada nas conexões.

### 3.5 Método prático para estimar a incerteza da medição de temperatura por termografia infravermelha

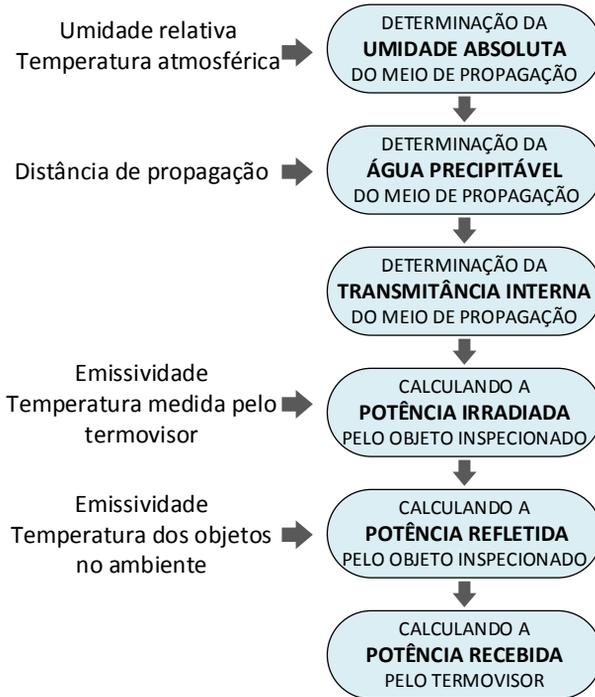
A incerteza envolvida na medição de temperatura por termografia não se deve apenas ao termografista, mas também às medições e estimativas feitas pelo usuário, tais como: emissividade do objeto inspecionado, distância entre o termovisor e a superfície

inspecionada, temperatura e umidade relativa do meio de propagação, temperatura dos objetos localizado no ambiente e termovisor. Essa incerteza de medição deve ser conhecida para que o profissional possa, durante a inspeção termográfica, fazer um diagnóstico preciso. Os métodos disponíveis na literatura para estimar a incerteza da temperatura medida geralmente requerem informações não acessíveis ao operador. Visando minimizar os erros de diagnóstico que podem ser causados pelo desconhecimento dessas incertezas, Pablo Rodrigues Muniz *et al.* (2014) propõem um método para calcular a incerteza da temperatura que requer apenas dados disponíveis ao operador [109].

A técnica de medição de temperatura por termografia infravermelha está sujeita a diversas fontes de incerteza, internas e externas ao termovisor, que podem afetar o resultado da medição e, em casos extremos, levar a diagnósticos equivocados. As fontes internas de incerteza normalmente são bem compreendidas e sua influência pode ser obtida através de dados dos fabricantes ou de certificados de calibração dos instrumentos. Mas, sabendo que a medição de temperatura por termografia também envolve outros instrumentos além do termovisor, como termômetro, higrômetro e fita métrica (ou medidor de distância a *laser*) e variáveis como a temperatura atmosférica (temperatura do meio de propagação), a umidade relativa, a distância entre o termovisor e o objeto inspecionado e a temperatura dos objetos localizados no ambiente (temperatura ambiente), além da estimativa da emissividade do objeto inspecionado, as incertezas associadas a essas variáveis e equipamentos também precisam ser medidas. Ou seja, essas medidas são fontes de incerteza fora da câmera termográfica que, portanto, são de responsabilidade do usuário.

Como alguns parâmetros como a transmitância do meio de propagação e o modelo matemático, ou seja, a sensibilidade espectral do termovisor empregado e suas incertezas associadas, usualmente não estão disponíveis para o operador, métodos clássicos que estimam a incerteza através dessas variáveis nem sempre podem ser aplicados. Assim, o método proposto por [109] estima a incerteza de medição de temperatura por termografia infravermelha considerando as incertezas dos instrumentos utilizados e as medidas tomadas pelo termografista a partir de dados usualmente disponíveis ao termografista. Além disso, é possível identificar a contribuição de cada fonte de incerteza para a medição final da incerteza. O método de cálculo é apresentado em formato de fluxograma conforme Figura 3-11.

Figura 3-11 – Método de cálculo das grandezas envolvidas na termografia infravermelha



Fonte: adaptado de [109].

A umidade absoluta é uma característica do meio de propagação que não está prontamente disponível. No entanto, pode ser calculada a partir da umidade relativa e da temperatura atmosférica de acordo com a Equação (3.17).

$$\rho = 1322,8 \cdot \frac{UR}{T_{ATM}} \cdot e^{\left[ \frac{25,22 \cdot (T_{ATM} - 273,16)}{T_{ATM}} - 5,31 \cdot \ln\left(\frac{T_{ATM}}{273,16}\right) \right]} \quad (3.17)$$

Onde  $UR$  é a umidade relativa do meio de propagação (adimensional),  $T_{ATM}$  é a temperatura do meio de propagação (unidade: K); e  $\rho$  é a umidade absoluta do ar no meio de propagação (unidade:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Depois de obter a umidade absoluta, a quantidade de água precipitável no meio de propagação é calculada de acordo com a Equação (3.18).

$$\delta = 10^{-3} \cdot \rho \cdot z \quad (3.18)$$

Onde  $\delta$  é a quantidade de água precipitável (unidade: mm) e  $z$  é o comprimento do meio de propagação do campo eletromagnético do objeto até o termovisor (unidade: m).

A transmitância do meio de propagação pode ser obtida através das Tabelas de Passman e Larmore, e outros estudos, disponíveis em [17], [26], [113]. Os dados de entrada necessários são a quantidade de água precipitável e o comprimento de onda de interesse.

A radiação total recebida pelo termovisor é composta de radiação do objeto inspecionado, radiação das outras superfícies localizadas no ambiente e refletida na superfície inspecionada e radiação da coluna de ar entre a superfície inspecionada e o termovisor. Para distâncias curtas, a radiação da coluna de ar é insignificante. Portanto, a radiação que atingirá o termovisor é oriunda apenas do objeto inspecionado e da reflexão nas outras superfícies no ambiente. Não considerando a transmitância atmosférica, a radiação total pode ser calculada de acordo com a Equação (3.19).

$$R(\lambda, T_{ob}, T_A) = K \cdot [\varepsilon_\lambda \cdot I(\lambda, T_{ob}) + (1 - \varepsilon_\lambda) \cdot I(\lambda, T_A)] \quad (3.19)$$

Onde  $R(\lambda, T_{ob}, T_A)$  é a resposta do termovisor;  $T_{ob}$  é a temperatura absoluta do objeto sob inspeção (unidade: K);  $T_A$  é a temperatura absoluta dos objetos no ambiente (unidade: K);  $K$  é um coeficiente, que depende do termovisor e inclui algumas constantes presentes na Lei de Planck;  $\varepsilon_\lambda$  é a emissividade espectral do objeto inspecionado (adimensional);  $I(\lambda, T_x)$  representa a equação de radiação de Planck integrada na banda espectral do termovisor, à temperatura  $T_x$ ; e  $\lambda$  é o comprimento de onda analisado (unidade:  $\mu\text{m}$ ).

A transmitância, neste caso devido à absorção atmosférica, é considerada conforme mostra a Equação (3.20).

$$R[z] = \frac{R[0]}{\tau[z]} \quad (3.20)$$

Onde  $R[z]$  é a potência do objeto inspecionado a uma distância  $z$  do termovisor,  $R[0]$  é a radiação recebida pelo termovisor e  $\tau[z]$  é a

transmitância do meio entre a câmera termográfica e o objeto (adimensional).

Para os casos mais comuns de termografia utilizada em manutenção preditiva,  $I(\lambda, T_X)$  pode ser expresso de acordo com a Equação (3.21).

$$I(\lambda, T_X) = \frac{1}{\lambda^4 \cdot e^{\frac{1,44 \cdot 10^4}{\lambda \cdot T_X}}} \quad (3.21)$$

Como o usuário informa todos os parâmetros no lado direito da Equação (3.19), o coeficiente  $K$  é considerado hipoteticamente unitário e uma resposta hipotética do termovisor é calculada. Como fator multiplicador, esse coeficiente não influencia o cálculo. A emissividade é considerada constante para o modelo proposto.

Para calcular a incerteza da temperatura medida, é necessário um conhecimento dos modelos matemáticos envolvidos nesse processo. Com esses modelos, pode-se aplicar a lei da propagação da incerteza das entradas para a saída. Considerando as variáveis de entrada não correlacionadas, a Equação (3.22) é aplicada.

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (3.22)$$

Onde  $x_i$  são as estimativas das variáveis de entrada;  $u_c(y)$  é a incerteza padrão combinada associada à variável de saída  $y$ ; e  $f$  é a função que correlaciona as variáveis de entrada  $x_i$  com a variável de saída  $y$ .

O cálculo da contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza de medição da temperatura por termografia infravermelha é realizado conforme a Equação (3.23).

$$h(T, x_i) = \left[ \frac{c_i \cdot u(x_i)}{u(T)} \right] \cdot [co(T, x_i)] \quad (3.23)$$

Onde  $h(T, x_i)$  é o coeficiente de contribuição de Kessel da incerteza da variável de entrada  $u(x_i)$  para a incerteza da variável de saída  $u(T)$  (sem dimensão);  $c_i$  é a derivada parcial da função  $T$  em relação à

variável de entrada  $x_i$ ; e  $co(T, x_i)$  é o coeficiente de correlação entre a variável de saída  $T$  e a variável de entrada  $x_i$ .

O coeficiente de correlação  $co$  pode ser calculado de acordo com a Equação (3.24).

$$co(T, x_i) = \sum_{j=1}^n \left( \frac{c_j \cdot u(x_j)}{u(T)} \right) \cdot [co(x_i, x_j)] \quad (3.24)$$

Para validar o modelo proposto, o mesmo foi comparado à função que relaciona a radiação recebida pelo termovisor à temperatura do objeto inspecionado. Os valores adotados para a validação do modelo proposto estão na Tabela 3-6 e os valores para faixa de variação da incerteza de entrada estão apresentados na Tabela 3-7.

Tabela 3-6 – Valores adotados para validação do modelo proposto

Temperatura atmosférica	Temperatura ambiente	Umidade relativa	Emissividade do objeto	Distância	Temperatura do objeto
23°C	23°C	50%	0,90	50 m	60°C, 90°C

Fonte: adaptado de [109].

Tabela 3-7 – Faixa de incerteza padrão para as entradas para validação do modelo proposto

Variável de entrada	Faixa de incerteza padrão
Temperatura atmosférica	0 a 2°C
Temperatura ambiente	0 a 2°C
Umidade relativa	0 a 5%
Emissividade do objeto	0,00 a 0,03
Distância	0,0 a 0,1 m
Termovisor	1°C, 2°C

Fonte: adaptado de [109].

A contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza final da medição de temperatura, considerando as características típicas das medições realizadas pelo termografista, considerando catálogos de instrumentos usualmente utilizados na termografia, está apresentada na Tabela 3-8.

Tabela 3-8 – Instrumentos utilizados e medições realizadas pelo termografista

Variável (instrumento)	Resolução	Faixa de incerteza
Temperatura atmosférica (termômetro)	0,1°C	1°C
Temperatura ambiente (termômetro)	0,1°C	1°C
Umidade relativa (higrômetro)	1%	5%
Distância (trena eletrônica)	0,001m	0,01m
Sensibilidade radiométrica (termovisor)	0,1°C	1°C, 2°C

Fonte: adaptado de [109].

A incerteza padrão de cada medição é calculada considerando seus intervalos de incerteza e resolução, gerando sua incerteza do tipo B. O processo de cálculo foi realizado no *software* MatLab® e os resultados podem ser vistos na Tabela 3-9 e na Tabela 3-10.

Tabela 3-9 – Contribuição de cada variável para uma incerteza padrão de emissividade de 0,015

Variável (instrumento)	1°C de incerteza do termovisor	2°C de incerteza do termovisor
Temperatura atmosférica (termômetro)	<1%	<1%
Temperatura ambiente (termômetro)	<1%	<1%
Umidade relativa (higrômetro)	<1%	<1%
Distância (trena eletrônica)	<1%	<1%
Sensibilidade radiométrica (termovisor)	13%	36%
Emissividade (critério do usuário)	86%	62%
Incerteza padrão da temperatura medida	1,6°C	1,9°C

Fonte: adaptado de [109].

Tabela 3-10 – Contribuição de cada variável para uma a incerteza padrão de emissividade de 0,030

Variável (instrumento)	1°C de incerteza do termovisor	2°C de incerteza do termovisor
Temperatura atmosférica (termômetro)	<1%	<1%
Temperatura ambiente (termômetro)	<1%	<1%
Umidade relativa (higrômetro)	<1%	<1%
Distância (trena eletrônica)	<1%	<1%
Sensibilidade radiométrica (termovisor)	4%	15%
Emissividade (critério do usuário)	95%	85%
Incerteza padrão da temperatura medida	2,8°C	3,0°C

Fonte: adaptado de [109].

Analisando as Tabela 3-9 e Tabela 3-10 é possível observar uma discrepância entre os resultados da incerteza da emissividade do objeto inspecionado, apesar de serem da mesma ordem de grandeza. No entanto, este resultado está de acordo com os resultados apresentados em [114]. Além disso, observa-se que a influência das medidas de distância, temperatura ambiente e atmosférica e umidade relativa é muito baixa em comparação com a influência da medição da emissividade do objeto inspecionado. Portanto, concluiu-se que a medição da emissividade e a incerteza intrínseca do termovisor são os dois principais fatores na incerteza total.

Ainda analisando a Tabela 3-9 e a Tabela 3-10, nota-se que um aumento na incerteza padrão da emissividade de 0,015 a 0,030 quase dobra a incerteza padrão da temperatura medida de 1,6 a 2,8°C se o termovisor tiver 1°C de incerteza. Menos impactante, mas ainda significativo, um termovisor com incerteza de 2°C, comparado a um termovisor de incerteza de 1°C, aumenta a incerteza final de 1,6 para 1,9°C, em 19%, se a incerteza padrão da emissividade for 0,015.

Portanto, o método proposto por Pablo Rodrigues Muniz *et al.* (2014) pode ser usado para fornecer uma indicação da qualidade da medição de temperatura por termografia infravermelha realizada a partir de uma estimativa de sua incerteza para o diagnóstico do equipamento sob inspeção [109]. Ficou claro que de todas as fontes consideradas, as incertezas da emissividade e do termovisor são os fatores mais importantes. A emissividade, que geralmente não é medida, mas estimada pelo termógrafo, segundo dados disponíveis na literatura, é o fator de maior impacto.



## Referências

- [1] International Electrotechnical Commission, “IEC 60050-845:1987 – International Electrotechnical Vocabulary. Lighting.” IEC, Genève, p. 293, 1987.
- [2] K. Chrzanowski, *Testing thermal imagers - Practical guidebook*. Warsaw: Military University of Technology, 2010.
- [3] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, *Fundamentos de transferência de calor*, 4th ed. México: Prentice Hall, 1999.
- [4] M. S. Jadin and S. Taib, “Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 55, n. 4, pp. 236–245, Jul. 2012.
- [5] K. Chrzanowski, *Non-contact thermometry: measurement errors*, vol. 7. Warsaw: Polish Chapter of SPIE, 2001.
- [6] R. Epperly, G. Heberlein, and L. Eads, “Thermography, a tool for reliability and safety,” *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 5, n. 1, pp. 28–36, 1999.
- [7] B. R. Lyon, Jr., G. L. Orlove, and D. L. Peters, “The relationship between current load and temperature for quasi-steady state and transient conditions” in *Thermosense XXII*, 2000, vol. 4020, pp. 62–70.
- [8] M. Vollmer and K.-P. Möllmann, *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. Weinheim: John Wiley & Sons, 2010.

- [9] National Institute of Standards and Technology (NIST), “Fundamental physical constants.” [Online]. Available: [http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h%7Csearch\\_for=abbr\\_in!](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h%7Csearch_for=abbr_in!) [Accessed: 06-Out-2018].
- [10] T. D. McGee, *Principles and methods of temperature measurement*. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- [11] C. Leite, “Aerothermal Effects on the Infrared Seeker Staring Sensor Performance of High Supersonic Missiles,,” United States Navy, Monterey, California, 1995.
- [12] R. Sabatini and M. A. Richardson, *Airborne Laser Systems Testing and Analysis*, vol. 323, April. Virginia: North Atlantic Treaty Organisation, 2010.
- [13] J. A. H. Osorio, “Simulação e desenvolvimento de um enlace de ‘Free-Space Optics’ no Rio de Janeiro e a relação com a ITU-T G826,,” PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.
- [14] D. J. C. Coura, “Analysis of the major effects of the propagation of optical signals in free space, coated with a numerical efficient platform [in Portuguese],” INATEL, Santa Rita do Sapucaí, 2004.
- [15] T. P. Sheahen, “Effect of atmospheric attenuation on temperature measurements made using IR scanning systems,” *Appl. Opt.*, vol. 22, n. 7, pp. 1070–1077, 1983.
- [16] T. Elder and J. Strong, “The infrared transmission of atmospheric windows,” *J. Franklin Inst.*, vol. 255, n. 03, pp. 189–208, 1953.
- [17] G. Gaussorgues, *Infrared Thermography*, 3rd ed. London: Chapman & Hall, 1994.
- [18] E. da Costa Bortoni, L. dos Santos, G. S. Bastos, L. E. de Souza, and M. A. C. Craveiro, “Extracting Load Current Influence From Infrared Thermal Inspections,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, n. 2, pp. 501–506, Apr. 2011.
- [19] Flir, “User’s manual FLIR InfraCAM SD.” Flir Systems, Wilsonville, USA, p. 168, 2008.
- [20] Flir Systems Inc., “FLIR Customer Support Center.” [Online]. Available: <http://flir.custhelp.com/>. [Accessed: 03-Out-2018].
- [21] Fluke Corporation, “Fluke Thermal Imagers.” [Online]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/usen/products/categoryti.htm>. [Accessed: 06-Out-2018].

- [22] Testo AG, “The thermal imager – your new favourite tool” [Online]. Available: <https://www.testo.com/en-US/products/thermal-imager>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [23] InfraRed Integrated Systems Ltd., “Thermal Cameras – Thermography Products.” [Online]. Available: <http://www.irisys.co.uk/thermal-imaging/products/>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [24] S. Passman and L. Larmore, “Atmospheric transmission,” The RAND Corporation, Santa Monica, 1956.
- [25] V. R. Stull, P. J. Wyatt, and G. N. Plass, “The infrared absorption of carbon dioxide,” Ford Motor Company, Newport Beach, 1963.
- [26] P. J. Wyatt, V. R. Stull, and G. N. Plass, “The infrared absorption of water vapor,” Ford Motor Company, Newport Beach, 1962.
- [27] Irisys, “IR32 DS Dual view thermal imaging camera,” 2011. [Online]. Available: <http://www.irisys.co.uk/Portals/13940/docs/IPU 40398 IR32DS Thermal Imager Data Sheet Issue1.pdf>. [Accessed: 06-Out-2016].
- [28] Irisys, “IRI 2010 Thermal imager,” 2010. [Online]. Available: [http://www.irisys.co.uk/Portals/13940/docs/ipu 40234 iri2010 data sheet\\_issue 3 1.pdf](http://www.irisys.co.uk/Portals/13940/docs/ipu 40234 iri2010 data sheet_issue 3 1.pdf). [Accessed: 06-Out-2018].
- [29] Irisys, “IRI 4030 High temperature range thermal imager,” 2010. [Online]. Available: [https://www.irisys.co.uk/hs-fs/hub/13940/file-13239242-pdf/docs/ipu\\_40139\\_iri4030\\_high\\_temperature\\_range\\_thermal\\_imager\\_datasheet\\_issue\\_4\\_7.pdf/images/miscellaneous\\_to\\_sort\\_out\\_later/docs/ipu\\_40139\\_iri4030\\_high\\_temperature\\_range\\_thermal\\_imager\\_datasheet\\_issue\\_4\\_7.pdf](https://www.irisys.co.uk/hs-fs/hub/13940/file-13239242-pdf/docs/ipu_40139_iri4030_high_temperature_range_thermal_imager_datasheet_issue_4_7.pdf/images/miscellaneous_to_sort_out_later/docs/ipu_40139_iri4030_high_temperature_range_thermal_imager_datasheet_issue_4_7.pdf). [Accessed: 06-Out-2018].
- [30] Irisys, “IRI 4040 Long range thermal imager,” 2010. [Online]. Available: [http://www.irisys.co.uk/Portals/13940/docs/ipu 40124 iri4040 long range thermal imager datasheet\\_issue 4 9.pdf](http://www.irisys.co.uk/Portals/13940/docs/ipu 40124 iri4040 long range thermal imager datasheet_issue 4 9.pdf). [Accessed: 06-Out-2018].
- [31] FLIR, “Termovisores compactos Flir i5 Flir i7,” 2010. [Online]. Available: [http://vortex.com.br/flir/flir\\_pdf/i5%20e%20i7%20termovisores%20FLIR.pdf](http://vortex.com.br/flir/flir_pdf/i5%20e%20i7%20termovisores%20FLIR.pdf). [Accessed: 06-Out-2018].
- [32] FLIR, “Termovisores FLIR Série-E,” Flir Systems Brasil, Sorocaba, 2012.
- [33] FLIR, “Technical Data FLIR P660,” 2013. [Online]. Available: [http://www.acm-bg.com/upl\\_doc/flir-P660\\_Datasheet\\_en.pdf](http://www.acm-bg.com/upl_doc/flir-P660_Datasheet_en.pdf). [Accessed: 06-Out-2018].

- [34] Fluke, “Termovisor industrial/comercial Ti125.” [Online]. Available: <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-imaging/infrared-cameras/fluke-cnx-ti125-industrial-system> [Accessed: 05-Out-2018].
- [35] Fluke, “Termovisor industrial/comercial Ti110.” [Online]. Available: <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-imaging/infrared-cameras/fluke-ti110>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [36] Fluke, “Câmara termográfica Ti105 para aplicações industriais e comerciais.” [Online]. Available: <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-imaging/infrared-cameras/fluke-ti105> [Accessed: 06-Out-2018].
- [37] Testo, “Datasheet thermal imager – testo 875 and testo 875i – the entry into professional thermography,” 2012. [Online]. Available: <http://pdf.directindustry.com/pdf/testo/testo-875-testo-875i-entry-into-professional-thermography/5240-452329.html>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [38] Testo, “Datasheet thermal imager – testo 876– flexible thermography in practical camcorder design,” 2012. [Online]. Available: <https://media.testo.com/media/24/64/6475ed957884/testo-876-Data-sheet.pdf>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [39] Testo, “Datasheet thermal imager – testo 882 – reliable thermography with high image resolution,” 2012. [Online]. Available: <https://www.testo.com/en-AU/testo-882/p/0560-0882>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [40] Testo, “Datasheet thermal imager – testo 885 – professional, versatile and precise thermography,” 2012. [Online]. Available: <https://media.testo.com/media/3f/80/25f81c086692/Brochure-testo-885-2981-4044-EN.pdf>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [41] Testo, “Datasheet thermal imager – testo 890 – Thermography for the highest demands,” 2012. [Online]. Available: <https://media.testo.com/media/db/10/579cd6a91c59/testo-890-Data-sheet.pdf> [Accessed: 06-Out-2018].
- [42] M. Litwa, “Influence of Angle of View on Temperature Measurements Using Thermovision Camera,” *IEEE Sens. J.*, vol. 10, n. 10, pp. 1552–1554, Oct. 2010.

- [43] A. A. Farid and S. Hranilovic, “Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors,” *J. Light. Technol.*, vol. 25, n. 7, pp. 1702–1710, Jul. 2007.
- [44] H. Sandalidis, “Optimization Models for Misalignment Fading Mitigation in Optical Wireless Links,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, n. 5, pp. 395–397, May 2008.
- [45] D. Kedar and S. Arnon, “Optical wireless communication through fog in the presence of pointing errors,” *Appl. Opt.*, vol. 42, n. 24, pp. 4946–54, Aug. 2003.
- [46] A. A. Farid and S. Hranilovic, “Diversity Gain and Outage Probability for MIMO Free-Space Optical Links with Misalignment,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, n. 2, pp. 479–487, Feb. 2012.
- [47] S. S. Muhammad, P. Kohldorfer, and E. Leitgeb, “Channel modeling for terrestrial free space optical links,” in *International Conference Transparent Optical Networks, VII.*, 2005, vol. 1, pp. 407–410.
- [48] Brasil, “NR 10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade,” n. 10. Ministério do Trabalho e Emprego, Brasília, pp. 1–13, 2004.
- [49] M. F. Modest, *Radiative heat transfer*, 2nd ed. California, USA: Elsevier Science, 2003.
- [50] JOHN R. HOWELL, “A catalog of radiation heat transfer configuration factors.” [Online]. Available: <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/>. [Accessed: 04-Out-2018].
- [51] N. Mattiucci, G. D’Aguanno, A. Alù, C. Argyropoulos, J. V. Foreman, and M. J. Bloemer, “Taming the thermal emissivity of metals: A metamaterial approach,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, n. 20, p. 201109, 2012.
- [52] L. del Campo, R. B. Pérez-Sáez, X. Esquisabel, I. Fernández, and M. J. Tello, “New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, n. 11, p. 113111, 2006.
- [53] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR ISO 10012:2003 – Measurement management systems – Requirements for measurement processes and measuring equipment [in Portuguese].” ABNT, Rio de Janeiro, p. 20, 2010.

- [54] A. Kribus, I. Vishnevetsky, E. Rotenberg, and D. Yakir, “Systematic errors in the measurement of emissivity caused by directional effects,” *Appl. Opt.*, vol. 42, n. 10, pp. 1839–1846, Apr. 2003.
- [55] S. N. Mekhontsev, A. V. Prokhorov, and L. M. Hanssen, “Experimental characterization of blackbody radiation sources,” *Exp. methods Phys. Sci.*, vol. 49, n. 2, pp. 56–136, 2010.
- [56] OIML – International Organization of Legal Metrology, “OIML R 141 – International Recommendation – Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments,” vol. 2008. Bureau International de Métrologie Légale, Paris, p. 21, 2008.
- [57] Irisys, “IRISYS Multi-Purpose Thermal Imagers IRI 4000 Series User Manual,” n. 4. Infrared integrated systems Ltd, Northampton, pp. 1–37, 2009.
- [58] FLIR Systems Inc., “FLIR T620 & T640,” 2012. [Online]. Available: [http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/IND\\_004/IND\\_004\\_EN.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/IND_004/IND_004_EN.pdf). [Accessed: 06-Out-2018].
- [59] Fluke, “Ti20 Thermal Imager.” Fluke Corporation, Everett, p. 2, 2006.
- [60] FLIR Systems Inc., “FLIR Série-Ex.” [Online]. Available: <https://www.flir.com/instruments/ex-series/>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [61] FLIR Systems Inc., “FLIR Série E.” [Online]. Available: <https://www.sermatecnet.com.br/view/catalogo/camera-termica-flir-e60-com-msx-catalogo.pdf>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [62] FLIR, “FLIR Série-P 600.” Flir Systems Brasil, Sorocaba, p. 4, 2007.
- [63] Flir Systems Inc., “FLIR T420 & T440,” 2012. [Online]. Available: [http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/IND\\_003/IND\\_003\\_EN.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/IND_003/IND_003_EN.pdf). [Accessed: 05-Out-2018].
- [64] C. Hanson, “IR DETECTORS: Amorphous-silicon bolometers could surpass IR focal-plane technologies,” 2011. [Online]. Available: <http://www.laserfocusworld.com/articles/2011/04/ir-detectors-amorphous-silicon-bolometers-could-surpass-ir-focal-plane-technologies.html>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [65] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 15572 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos,” ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

- [66] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “CE 58 000 11 – Termografia,” *Associação Brasileira de Normas Técnicas – Comitê Técnico Termografia*. [Online]. Available: <http://abnt.iso.org/livelink/livelink?func=ll&objId=4893183&objAction=browse&sort=name&viewType=1>. [Accessed: 10-Dec-2012].
- [67] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT Catalogo.” [Online]. Available: <http://www.abntcatalogo.com.br/normagrid.aspx>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [68] American Society for Testing and Materials, “ASTM Standard E 1213-2002 – Standard Test Method for Minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems.” ASTM, West Conshohocken, USA, 2012.
- [69] American Society for Testing and Materials, “ASTM Standard E 1311-89 – Standard Test Method for Minimum Detectable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems.” ASTM, West Conshohocken, USA, 1999.
- [70] International Organization for Standardization, “ISO 15529, Principles of measurement of modulation transfer function (MTF) of sampled imaging systems.” ISO, 1999.
- [71] North Atlantic Treaty Organization, “STANAG 4349, Measurement of minimum resolvable thermal difference (MRTD) of thermal cameras.” Military Agency for Standardization, p. 8, 1995.
- [72] Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia, *International Vocabulary of Metrology: basic and general concepts and associated terms – JCGM 200:2012*, 3<sup>rd</sup> ed. Rio de Janeiro: Inmetro, 2012.
- [73] Fluke, “Field of view calculator,” 2012. [Online]. Available: [http://assets.fluke.com/OnlineTools/FOV\\_calc.htm](http://assets.fluke.com/OnlineTools/FOV_calc.htm). [Accessed: 06-Oct-2018].
- [74] K. P. Boshnakov, V. I. Petkov, L. a. Doukovska, D. I. Borissova, and S. L. Kojnov, “Approaches for Diagnostic and Predictive Maintenance,” in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2011, vol. 8008, p. 80081Z–80081Z–9.
- [75] FLIR, “Termovisores FLIR & Câmeras Infravermelhas.” [Online]. Available: <https://prod.flir.com.br/browse/professional-tools/thermography-cameras/>. [Accessed: 06-Out-2018].

- [76] Fluke, “Termovisores, câmeras termográficas. Ferramentas de teste.” [Online]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/brpt/products/termovisores.htm>. [Accessed: 06-Out-2013].
- [77] Irisys, “Thermal imaging cameras | Queue management.” [Online]. Available: <http://www.irisys.co.uk/>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [78] Testo AG, “Thermography technology made in Germany – Testo thermal imagers,” 2013. [Online]. Available: <https://www.testo.com/en-US/products/thermal-imager>. [Accessed: 05-Out-2018].
- [79] M. A. Mendes and P. R. Muniz, “Inspeções termográficas de condutores em paralelo: proposta de método de diagnóstico,” in *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2012, p. 5.
- [80] T. M. Lindquist, L. Bertling, and R. Eriksson, “Estimation of disconnecter contact condition for modelling the effect of maintenance and ageing,” in *2005 IEEE Russia Power Tech*, 2005, n. 2, pp. 1–7.
- [81] Y. A. Sil’d, M. A. Ivanova, and V. A. Nikonenko, “Development of a System of Metrological Supervision of Thermovision Measuring Devices,” *Meas. Tech.*, vol. 47, n. 4, pp. 389–392, Apr. 2004.
- [82] T. Suesut, N. Nunak, and T. Nunak, “Emissivity measurements on material and equipment in electrical distribution system,” in *Control, Automation and Systems (ICCAS), 11th International Conference on*, 2011, pp. 1259–1263.
- [83] T. M. Lindquist and L. Bertling, “Hazard rate estimation for high-voltage contacts using infrared thermography,” in *2008 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2008, pp. 231–237.
- [84] Z. Korendo and M. Florkowski, “Trend analysis for thermographic surveys of electrical equipment,” ABB Corporate Research, Krakow, 2000.
- [85] Tommie Lindquist, “On reliability and maintenance modelling of ageing equipment in electric power systems,” KTH School of Electrical Engineering, Stockholm, 2008.
- [86] M. Florkowski and Z. Korendo, “Thermography based diagnostics of power equipment,” *Power Eng. J.*, vol. 15, n. 1, pp. 33–42, Feb. 2001.
- [87] American National Standards Institute, “ANSI/NETA MTS-2011

- Standard for maintenance testing specifications for electrical power equipment and systems.” International Electrical Testing Association, Portage, USA, 2011.
- [88] “Resolução CONMETRO número 7 de 24/08/1992 – Determinar que o sistema de Normalização do SINMETRO terá um foro de normalização, único.” Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.
- [89] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ONS-58 – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.” [Online]. Available: <http://abnt.iso.org/livelihood/livelihood/fetch/14025021/ons58.pdf?nodeid=14044548&vernum=0>. [Accessed: 21-Feb-2013].
- [90] “Training programs – Maintenance Technology.” [Online]. Available: <http://www.mt-online.com/training-programs>. [Accessed: 06-Out-2018].
- [91] Association for the advancement of medical instrumentation, “ANSI/AAMI DF80 – Medical electrical equipment.” Association for the Advancement of Medical Instrumentation, Arlington, USA, 2010.
- [92] N. D. S. F. Duarte Jr, “Management System of Measurement: important, but not always recognized [in Portuguese],” *Metrol. Instrumentação*, n. 56, p. 6, 2008.
- [93] L. Coret, X. Briottet, Y. H. Kerr, and A. Chehbouni, “Simulation Study of View Angle Effects on Thermal Infrared Measurements Over Heterogeneous Surfaces,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, n. 3, pp. 664–672, Mar. 2004.
- [94] K. Chrzanowski and R. Matyszekiel, “Software package for uncertainty calculations of temperature measurements with thermal cameras,” in *Quantitative infrared thermography Conference*, 2000, pp. 97–102.
- [95] W. Minkina and S. Dudzik, *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*, 1st ed. Noida: Wiley, 2009.
- [96] W. Minkina and S. Dudzik, “Simulation analysis of uncertainty of infrared camera measurement and processing path,” *Measurement*, vol. 39, n. 8, pp. 758–763, Oct. 2006.
- [97] Bureau International des Poids et Mesures *et al.*, “JCGM (100:2008) Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (First edition 2008,

- Corrected version 2010),” no. September. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), p. 134, 2008.
- [98] Flir, “ThermaCAM PM 595.” Flir Systems, Boston, p. 8, 1999.
- [99] T. M. D. Oliveira, “Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a termografia,” Universidade do Porto, Porto, 2012.
- [100] P. W. Nugent and J. a. Shaw, “Large-area blackbody emissivity variation with observation angle,” in *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing XX*, 2009, vol. 7300, p. 73000Y–73000Y–9.
- [101] A. R. Al-Kassir, J. Fernandez, F. V. Tinaut, and F. Castro, “Thermographic study of energetic installations,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, n. 2–3, pp. 183–190, Feb. 2005.
- [102] G. C. Holst, *Common Sense Approach to Thermal Imaging*. Bellingham: SPIE Optical Engineering, 2000.
- [103] Avio, “Thermo Tracer TH7800.” [Online]. Available: <http://www.infrared.avio.co.jp/en/products/ir-thermo/lineup/th7800/index.html> [Accessed: 06-Out-2013].
- [104] Flir, “ThermaCAM E25 Infrared Camera.” Flir Systems, p. 2, 2005.
- [105] M. A. Mendes, L. G. R. Tonini, P. R. Muniz, and C. B. Donadel, “Thermographic analysis of parallelly cables: A method to avoid misdiagnosis,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 104, pp. 231–236, Jul. 2016.
- [106] P. R. Muniz, S. P. N. Cani, and R. da S. Magalhaes, “Influence of Field of View of Thermal Imagers and Angle of View on Temperature Measurements by Infrared Thermovision,” *IEEE Sens. J.*, vol. 14, n. 3, pp. 729–733, Mar. 2014.
- [107] J. C. D. Demuner, J. F. Fardin, P. R. Muniz, and L. C. Gomes, “Método De Medição De Emissividade Exequível Em Campo Sem a Necessidade De Contato Físico,” in *XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, 2015.
- [108] L. S. Almeida, L. L. Schuína, and P. R. Muniz, “Quantificação de perdas energéticas e caracterização de conexões elétricas por termografia infravermelha,” in *14ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos COTEQ2017*, 2017, pp. 1–10.

- [109] P. R. Muniz, R. de Araújo Kalid, S. P. N. Cani, and R. da Silva Magalhães, “Handy method to estimate uncertainty of temperature measurement by infrared thermography,” *Opt. Eng.*, vol. 53, n. 7, p. 074101, Jul. 2014.
- [110] Prysmian, “Baixa tensão – uso geral – Cabo sintenax flex,” 2004. [Online]. Available: [http://br.prysmiangroup.com/br/files/sintenax\\_flex\\_ctl.pdf](http://br.prysmiangroup.com/br/files/sintenax_flex_ctl.pdf). [Accessed: 06-Out-2018].
- [111] Contemp, “Tabela de emissividades.”
- [112] J. Yun, J. Cho, S. Bin Lee, and J.-Y. Yoo, “Online Detection of High-Resistance Connections in the Incoming Electrical Circuit for Induction Motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, n. 45, pp. 694–702, 2009.
- [113] S. Passman and L. Larmore, “Atmospheric Transmission.” The RAND Corporation, Santa Monica, 1956.
- [114] B. Lane, E. Whitenton, V. Madhavan, and A. Donmez, “Uncertainty of temperature measurements by infrared thermography for metal cutting applications,” *Metrologia*, vol. 50, n. 6, pp. 637–653, Dec. 2013.



## Sobre os autores



**Pablo Rodrigues Muniz** é Técnico em Eletrotécnica (1997) pela Escola Técnica Federal do Espírito Santo, Graduado em Engenharia Elétrica (2002) e Mestre em Engenharia Mecânica (2006) pela Universidade Federal do Espírito Santo, Doutor em Engenharia Industrial (2014) pela Universidade Federal da Bahia e Pós-doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (2017). Atualmente é professor do Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes. Tem experiência nas áreas de máquinas elétricas, manutenção preditiva e eficiência energética em instalações elétricas. Tem se dedicado ao ensino e pesquisa na área de Termografia Infravermelha aplicada a instalações elétricas.



**Mariana Altoé Mendes** é Graduada em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes (2016) e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (2018). Tem experiência na área em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: termografia, incerteza, proteção de sistemas elétricos, mini e microgeração distribuída, manutenção preditiva e metrologia.

