

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JUAN CARLOS DIMANSKI DEMUNER

**MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE EM CAMPO SEM CONTATO FÍSICO
COM A SUPERFÍCIE INSPECIONADA**

VITÓRIA
2016

JUAN CARLOS DIMANSKI DEMUNER

**MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE EM CAMPO SEM CONTATO FÍSICO
COM A SUPERFÍCIE INSPECIONADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientadora: Profa. Dra. Jussara Farias Fardin.

VITÓRIA
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

D389m Demuner, Juan Carlos Dimanski, 1989-
Medição de emissividade em campo sem contato físico com
a superfície inspecionada / Juan Carlos Dimanski Demuner. –
2016.
86 f. : il.

Orientador: Jussara Farias Fardin.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Emissividade. 2. Termografia. 3. Manutenção preditiva. 4.
Manutenção Elétrica. I. Fardin, Jussara Farias. II. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

JUAN CARLOS DIMANSKI DEMUNER

**MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE EM CAMPO SEM CONTATO FÍSICO
COM A SUPERFÍCIE INSPECIONADA**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de Agosto de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA



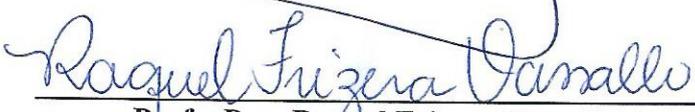
Profa. Dra. Jussara Farias Fardin – Orientadora
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Pablo Rodrigues Muniz
Instituto Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. José Barrozo de Souza
Instituto Federal do Espírito Santo



Profa. Dra. Raquel Frizera Vassallo
Universidade Federal do Espírito Santo

“Tente e não diga que a vitória está perdida, se é de batalhas que se vive a vida, tente outra vez...”

(Raul Seixas)

Dedico à minha família.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero louvar e agradecer a Deus Pai, que em sua infinita bondade me concedeu vida, saúde e perseverança para realização de mais essa conquista.

Aos meus pais, Genivaldo Ângelo Cesar Demuner e Gersa Barreto Dimanski Demuner, minha irmã Joyce Dimanski Demuner e toda a minha família pelo carinho, compreensão, apoio e paciência na superação desde desafio.

A minha orientadora Professora Doutora Jussara Farias Fardin, pela paciência, direcionamento, apoio e confiança.

Ao Professor Doutor Pablo Rodrigues Muniz pela ideia do tema, dedicação e empenho no apoio à realização desta dissertação.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo e à Coordenadoria de Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Espírito Santo por ter cedido o laboratório e os equipamentos para a realização do experimento.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio financeiro concedido.

Aos alunos de iniciação científica do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Espírito Santo em especial a aluna Letícia Colombi Gomes pelo apoio na realização da pesquisa.

Aos meus colegas de instituição, pelos momentos de descontração, dicas e suportes.

Aos meus amigos e conhecidos que de alguma maneira contribuíram para a realização desta dissertação.

Resumo

Termografia é uma técnica de sensoriamento preditivo que permite adquirir informações e diagnosticar condições térmicas de determinado objeto através da radiação emitida por ele. Essa técnica parte do princípio que qualquer superfície, estando a uma temperatura maior que zero absoluto, emite radiação térmica.

A capacidade de uma superfície em emitir radiação térmica, denomina-se emissividade. Segundo alguns autores, a emissividade tem grande influência na determinação da temperatura e uma vez estimada de forma incorreta leva a resultados errôneos de temperatura.

Estimar a emissividade em aplicações industriais pode se tornar uma operação complexa. A impossibilidade de retirada do equipamento ou componentes para ensaios em laboratório para determinação de sua emissividade, a dificuldade de acesso e o impedimento de contato físico direto, principalmente em instalações elétricas energizadas, dificultam a aplicação dos métodos tradicionais. Além disso, a retirada do equipamento para a realização de ensaios pode provocar mudanças significativas em suas características superficiais.

Nesta dissertação é proposto um método para estimar a emissividade de superfícies sem a necessidade de contato físico. O método consiste na realização de três medições de temperatura aparente da superfície através de termografia infravermelha, com e sem fonte de calor externa de temperatura controlada. Os resultados são utilizados como dados de entrada para um programa desenvolvido com base na Lei de Planck e nas características do termovisor empregado. O programa estima a emissividade da superfície avaliada bem como a incerteza associada.

A validação do método proposto é feita através de experimentos em ambiente controlado obtendo-se valores estimados da emissividade com nível de incerteza bem inferior aos encontrados nas tabelas de emissividade disponíveis na literatura. Com isso, as medições de temperatura tornam-se mais precisas e exatas, levando a diagnósticos mais assertivos.

Os resultados obtidos com o método proposto são também comparados com os resultados obtidos a partir de métodos reconhecidos na literatura técnica. O método proposto provou ser capaz de apresentar boas estimativas da emissividade sem a necessidade de contato físico com a superfície.

Abstract

Thermography is a predictive sensing technique to acquire information and diagnose thermal conditions of a particular object through the radiation emitted by it. This technique assumes that any surface being at a temperature greater than absolute zero emit thermal radiation.

The ability of a surface to emit thermal radiation, is called emissivity. According to some authors, the emissivity has great influence in determining the temperature and once estimated incorrectly leads to erroneous temperature results.

To estimate the emissivity in industrial applications can become a complex operation. The impossibility of removal of equipment or components for laboratory tests to determine its emissivity, the difficulty of access and direct physical contact impediment, especially in electrical installations, difficult to apply traditional methods. Furthermore, the removal equipment for performing tests can cause significant changes in their surface characteristics.

This dissertation proposes a method to estimate the emissivity surfaces without the need for physical contact. The method consists in realizing three temperature measurements of apparent surface through infrared thermography, with or without an external heat source of controlled temperature. The results will be used as input data for a program developed based on Planck's Law and the characteristics of the thermal imager. The program estimates the emissivity of the surface evaluated as well as the associated uncertainty.

The validation of the proposed method is done through experiments in a controlled environment obtaining estimated values of emissivity with much lower level of uncertainty than those found in emissivity tables available in the literature. Thus, temperature measurements become more precise and accurate, leading to more assertive diagnostics.

The results obtained with proposed method are also compared with results obtained from methods known in the technical literature. The proposed method has proven to be able to provide good estimates of the emissivity without the need for physical contact with the surface.

LISTA DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS

Artigo completo publicado em anais de congresso:

DEMUNER, J. C. D.; FARDIN, J. F.; MUNIZ, P. R.; GOMES, L. C. Método de Medição de Emissividade Exequível em Campo sem a Necessidade de Contato Físico. In: Congresso Ibero-Latino Americano de Métodos Computacionais e Engenharia, XXXVI. **Anais...** Rio de Janeiro: CILAMCE, 2015.

Participação em artigo publicado em anais de congresso:

GOMES, L. C.; MUNIZ, P. R. Estimativa da emissividade de superfícies inspecionadas por termografia infravermelha em campo e sem contato. In: Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos, XXX. **Anais...** Campinas: ABRAMAN, 2015.

Patente depositada:

INSTITUTO FEDERAL DO ESPIRITO SANTO (Vitória, ES). Juan Carlos Dimanski Demuner; Pablo Rodrigues Muniz; Jussara Farias Fardin. **Calculador de emissividade para termografia utilizando fonte de radiação com temperatura conhecida**. PI BR 51 2016 000937-3, 13 jun. 2016.

Sumário

Capítulo 1: Introdução	17
1.1 Objetivo Geral	18
1.2 Objetivos Específicos	18
1.3 Motivação	19
1.4 Organização deste Texto	20
Capítulo 2: Fundamentos técnicos.....	21
2.1 Termografia	21
2.1.1 Princípios Físicos da Termografia.....	22
2.1.2 Radiação de Corpo Negro	23
2.1.3 Radiação em Corpos Cinza	26
2.2 Emissividade.....	28
2.3 Métodos de Medição de Emissividade	30
2.3.1 Método Radiométrico	31
2.3.1.1 Simulação de Corpo Negro na Amostra.....	31
2.3.1.2 Superfície com Temperatura Conhecida	32
2.3.2 Método Calorimétrico	32
2.4 Termovisor.....	33
2.4.1 Faixa de Temperatura	35
2.4.2 Faixa Espectral	35
2.4.3 Resolução Espacial	35
2.4.4 Sensibilidade Térmica	36
2.4.5 Taxa de Repetição de Quadro (<i>Frame Rate</i>).....	36
2.5 Incerteza de Medição.....	37
2.6 Software Flir Tools.....	41
Capítulo 3: Desenvolvimento Matemático	44
Capítulo 4: Metodologia proposta	47
Capítulo 5: Software Desenvolvido para Cálculo da Emissividade baseado na Metodologia Proposta.....	51
Capítulo 6: Procedimento Experimental	56

6.1 Etapas de medição	58
6.1.1 Primeira Etapa de Medição: Medição de T_J para Determinação da Radiação Total J Emitida pelo Corpo de Prova	58
6.1.2 Segunda Etapa de Medição: Medição de TE_b para Determinação da Radiação E_b Emitida pelo Corpo de Prova,	59
6.1.3 Terceira Etapa de Medição: Medição de T_G para Determinação da Radiação G Refletida pelo Corpo de Prova.....	60
6.2 Termovisor e obtenção de outras medições.....	61
 Capítulo 7: Resultados e Discussões	 63
7.1 Cálculo da Emissividade a Partir do Método Proposto	63
7.1.1 Preparação do experimento	63
7.1.2 Primeira Etapa – Medição da Temperatura da Radiação Total Emitida pelo Corpo de Prova - T_J	65
7.1.3 Segunda Etapa de Medidas – Medição da Temperatura do Corpo de Prova T_{Eb}	66
7.1.4 Terceira Etapa – Medição da Temperatura da Fonte de Radiação Externa T_G	67
7.2 Cálculo da Emissividade Através da Simulação de Corpo Negro na Amostra.	71
7.3 Discussão Quantitativa dos Resultados	74
7.4 Discussão Qualitativa dos Resultados	77
 Capítulo 8: Conclusão	 80
8.1 Conclusões do Trabalho	80
8.2 Trabalhos Futuros	81
 Referências Bibliográficas.....	 82

Lista de Figuras

Figura 1 Espectro eletromagnético (SANTOS, 2006).....	22
Figura 2 Emitância espectral de um corpo negro (CHRZANOWSKI, 2001).....	24
Figura 3 Emitância radiante total do corpo negro em uma dada temperatura absoluta (Adaptado de Charzanowski, 2001).....	25
Figura 4 Representação gráfica da radiação incidente em um objeto real (Adaptado de Incropera et al., 2007).	26
Figura 5 (a) Imagem real da superfície de um ferro de passar roupas. (b) Imagem térmica do mesmo objeto (Santos, 2006).....	28
Figura 6 Diagrama simplificado de um Termovisor genérico (Santos, 2006).	33
Figura 7 Representa o Campo de Visão (FOV) e o Campo de Visão Instantâneo (IFOV) (Santos, 2006).	36
Figura 8 Tela do <i>FlirTools</i>	42
Figura 9 Destaque das abas <i>Parameters</i> e <i>Measurements</i>	43
Figura 10 Diagrama com as etapas da metodologia proposta (Autor).	50
Figura 11 Linhas de código para inserção dos dados de entrada (Autor)	52
Figura 12 Rotina de cálculo da Equação da Lei de Planck (Autor).	53
Figura 13 Cálculo da média da radiação e erro (Autor).	54
Figura 14 Cálculo de emissividade e do erro associado (Autor).....	54
Figura 15 Bancada experimental (Autor).....	57
Figura 16 Arranjo experimental para determinar a radiação total emitida pelo corpo de prova (Autor).....	58
Figura 17 Arranjo experimental para obtenção da radiação emitida pelo corpo de prova (Autor).....	59
Figura 18 Arranjo experimental para se obter a temperatura da fonte de radiação (Autor)....	60
Figura 19 Montagem do experimento com a fixação do corpo de prova (Autor).....	63
Figura 20 Montagem do experimento incluindo a fonte de radiação e o termovisor (Autor). 64	
Figura 21 Imagem capturada no experimento para medição de T_j a ser usada no cálculo da radiação total emitida pelo corpo de prova (Autor).	66

Figura 22 Imagem capturada no experimento para medição de T_{Eb} usada no cálculo da radiação emitida pelo corpo de prova (Autor).	67
Figura 23 Imagem capturada no experimento para cálculo da radiação refletida pelo corpo de prova (Autor).	68
Figura 24 Imagem gerada pelo método da simulação de corpo negro na amostra (Autor)....	72
Figura 25 Diagrama esquemático de comparação dos valores de emissividade obtidos com os Experimentos 1 e 2 (Autor).....	77
Figura 26 Tabela de valores típicos de emissividade adaptado para materiais ferro galvanizado (Adaptado de CONTEMP [s.d.].....	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 Contribuição de cada instrumento de medição para uma incerteza de emissividade $0,80 \pm 0,03$ (Adaptado de Muniz et al., 2014)	38
Tabela 2 Característica do termovisor <i>Flir</i> BCAM SD (Adaptador de FLIR, 2013).	61
Tabela 3 Grandezas medidas para caracterização do experimento (Autor).	64
Tabela 4 Valores medidos das temperaturas T_{Eb} , T_J e T_G e valores calculados da emissividade e incerteza associada (Autor).	69
Tabela 5 Valores medidos das temperaturas médias da superfície conhecida e do corpo de prova e valores calculados da emissividade (Autor).....	74
Tabela 6 Resultados obtidos nos dois experimentos comparativos (Autor).....	75

Nomenclatura

Símbolos métricos

Símbolo	Descrição	Unidade
c	Velocidade de propagação	m.s^{-1}
d	Distância entre o corpo de prova e o termovisor	m
E_b	Radiação do corpo negro	W.m^{-2}
f	Frequência da onda	Hz
FOV	Campo de visão	graus
G	Radiação incidente	W.m^{-2}
h	Constante de Planck	J.s
i	Corrente elétrica	A
$IFOV$	Campo de visão instantâneo	miliradianos
J	Radiosidade total ou radiação total emitida pela superfície	W.m^{-2}
k	Constante de Boltzmann	J.K^{-1}
M_b	Emitância radiante total de um corpo negro	W.m^{-2}
$M_{\lambda,b}$	Emitância espectral de um corpo negro	$\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}$
n	Quantidade de amostras	Adimensional
P_{ix}	Número de <i>pixels</i> do termovisor	Adimensional
T	Temperatura de um objeto qualquer	K
T_b	Temperatura de um corpo negro	K
T_{Eb}	Temperatura do objeto sem a presença da fonte de calor externa	K
T_G	Temperatura da fonte de calor externa	K
T_J	Temperatura do conjunto fonte de calor e objeto	K
λ_i	Faixa inferior do comprimento de onda	μm
λ_s	Faixa superior do comprimento de onda	μm

Letras Gregas

Símbolo	Descrição	Unidade
μ	Média	
δ	Ângulo zenital	rad
λ	Comprimento de onda	m
α	Absortividade	Adimensional
τ	Transmissividade	Adimensional
ρ	Refletividade	Adimensional
ε	Emissividade	Adimensional
σ	Desvio padrão	
ν	Graus de liberdade	Adimensional
φ	Ângulo azimutal	rad

Outros símbolos

Símbolo	Descrição
\bar{I}	Média das “ n ” indicações;
I_k	k -ésima indicação
t	Probabilidade t -student
$u()$	Incerteza-padrão de medição
$u_r()$	Incerteza relativa

Siglas

Símbolo	Descrição
<i>FOV</i>	<i>Field of View</i> (campo de visão)
<i>FPA</i>	<i>Focal Plane Array</i> (Matriz de Plano Focal)
<i>IFOV</i>	<i>Instantaneous Field of View</i> (campo de visão instantâneo)
<i>LW</i>	<i>Long Wave</i> (faixa longa de comprimento de onda)
<i>NETD</i>	<i>Noise Equivalent Temperature Difference</i> (diferença de temperatura equivalente ao ruído)
<i>SW</i>	<i>Short Wave</i> (faixa curta de comprimento de onda)

Capítulo 1: Introdução

Termografia é uma técnica de sensoriamento remoto que possibilita a medição de temperatura e a formação de imagens térmicas da superfície de um componente ou equipamento (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). A partir da radiação infravermelha emitida pelos corpos é possível estimar a temperatura de objetos estacionários ou em movimento a uma distância segura.

Na manutenção elétrica a análise termográfica é útil para detectar componentes que estejam sofrendo algum tipo de aquecimento anormal. Essa informação permite diagnosticar problemas como mau contato, oxidação, desgaste, sobrecarga, dentre outras anomalias que venham causar falha no funcionamento de qualquer equipamento (SANTOS, 2006). Além disso, a termografia permite que o operador não fique exposto à presença de cargas elétricas, gases venenosos, fumos, altas temperaturas, altas tensões elétricas, e não interfira no funcionamento do equipamento (SANTOS, 2012). Isso torna a inspeção mais eficiente, precisa e segura no que diz respeito à avaliação de instalações e componentes elétricos, pois se trata de um ensaio não destrutivo, destacando benefícios como a minimização dos riscos de acidente, redução de custos, segurança e otimização da manutenção (AZEVEDO; JUNIOR, 2012).

As imagens termográficas ou termogramas são obtidos por câmera infravermelha que possui sensores que destacam o perfil térmico de um componente (ÁLVARES, 2008). A imagem formada pelo termovisor depende de uma multiplicidade de fatores que se não forem considerados influenciam diretamente na análise da imagem (MUNIZ, 2014).

A relação entre a temperatura medida pela câmera e a temperatura real do objeto são influenciadas por características físicas que dependem do material analisado, ambiente em que se encontra inserido, distância do termovisor ao objeto entre outros fatores. Dentre esses fatores, o de maior influência é a emissividade do corpo analisado (CHRZANOWSKI, 2001; MUNIZ, 2014; MUNIZ et al., 2014; VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

A emissividade é uma característica da superfície que determina a sua capacidade de emitir radiação (INCROPERA et al., 2007). Os valores de emissividade vão de zero, refletor perfeito, até um. Além disso, seu valor varia com a qualidade da superfície, o comprimento de onda, o formato do objeto, a temperatura e o ângulo de emissão (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

A medição de emissividade é realizada basicamente de duas formas: através de medidas calorimétricas e medidas radiométricas. A primeira se baseia no balanço de energia e no conhecimento dos caminhos e quantidades dos fluxos de energia, a segunda utiliza sensores de radiação que produzem sinal elétrico proporcional ao fluxo de radiação que estão expostos (PERIN, 2009).

Nessas técnicas de medição de emissividade é necessário o contato com a superfície inspecionada. Esse fator dificulta o procedimento, visto que pode implicar em necessidade de parada operacional do equipamento a ser inspecionado (SANTOS, 2006).

O presente trabalho consiste em propor uma metodologia de medição de emissividade sem contato com o equipamento em análise, com instrumentos usualmente disponíveis a inspetores termográficos. A qualidade dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta será comparada com a qualidade dos métodos de simulação de corpo negro na amostra já consolidado pela literatura técnica (PERIN, 2009).

1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia de medição de emissividade sem a necessidade de contato com o objeto inspecionado, no contexto da manutenção elétrica.

1.2 Objetivos Específicos

Para cumprimento do objetivo geral faz-se necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- realizar levantamento dos métodos usuais de medição de emissividade, verificando a qualidade de seus resultados;
- avaliar a qualidade dos resultados do método proposto;
- validar o método proposto através de planejamento, execução e análise de resultados experimentais;
- comparar os resultados experimentais obtidos com o método proposto com os valores de emissividade encontrados através do método de simulação de corpo negro na amostra.

1.3 Motivação

A termografia infravermelha é uma importante técnica para determinar as condições operacionais de componentes em instalações elétricas (ÁLVARES, 2008). 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 infravermelhos (SANTOS, 2012).

Segundo Vollmer & Möllmann (2010) a temperatura obtida em uma inspeção termográfica depende de vários fatores como temperatura atmosférica, umidade do ar e principalmente da emissividade. Esta última segundo Muniz (2014) influencia em mais de 85% na correta determinação da temperatura do objeto inspecionado.

Nas inspeções termográficas a emissividade é obtida através de análise visual da superfície do objeto inspecionado (SANTOS, 2006). Nela o inspetor termográfico identifica a superfície visualmente e com a tabela em mãos adota um valor de emissividade útil para determinar a temperatura do objeto. Essa técnica provoca erros, pois a identificação da superfície varia de acordo com a experiência e expertise do inspetor. Além disso, os adjetivos utilizados para caracterizar a superfície são muito subjetivos aumentando a ainda mais a incerteza. O método proposto visa amenizar este problema permitindo que seja executado no momento da inspeção gerando resultados confiáveis.

Outra motivação é que as técnicas consolidadas para identificar a emissividade, como as descritas por Perin (2009) e outros autores como Holman (2011), indicam a necessidade do contato físico com a superfície. Em ambas as técnicas o executor precisa preparar o objeto inspecionado para que seja realizada a medição de emissividade. Isso altera as condições reais de operação do objeto da inspeção gerando possíveis erros de medição ou até mesmo ocultando falhas.

Neste contexto e com a intenção de melhorar a qualidade dos resultados de emissividade, propõe-se uma metodologia de medição de emissividade sem contato. Assim, com o auxílio dos instrumentos disponíveis e aplicando procedimentos relativamente simples, será possível realizar medições de emissividade de forma rápida e precisa evitando contato com a superfície e produzindo resultados mais precisos quando comparados à consulta de tabelas.

Para facilitar o cálculo necessário na aplicação da metodologia proposta foi desenvolvido um *software* em que o usuário entrará com os valores de temperatura obtidos na

aplicação da metodologia, juntamente com a incerteza característica do instrumento de medição e o *software* retornará o valor de emissividade junto com a incerteza calculada, gerando assim um único valor de emissividade e incerteza.

1.4 Organização deste Texto

Este texto está dividido em oito capítulos que serão descritos a seguir:

O Capítulo 1 descreve de forma sucinta o que é termografia, sua aplicação e características além de apresentar os objetivos gerais, específicos e a motivação para o estudo do tema abordado.

No Capítulo 2 é realizada a revisão de literatura. Nele são tratados detalhes como os princípios físicos sobre radiação infravermelha, conceitos de emissividade e os métodos existentes de medição. Também são abordadas as características dos termovisores, os conceitos de incerteza de medição e um *software* de tratamento de imagem, o *FlirTools*.

Baseada na revisão de literatura, o Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento matemático dos conceitos de emissividade além do detalhamento do cálculo de emissividade.

O Capítulo 4 unifica todo o conceito e desenvolvimento matemático apresentado propondo uma metodologia de inspeção com o intuito de estimar a emissividade de um determinado objeto sem a necessidade do contato físico do inspetor com este.

No Capítulo 5 um *software* é desenvolvido com base na metodologia proposta no Capítulo 4.

O Capítulo 6 apresenta o procedimento experimental para aplicação do método proposto e o *software* desenvolvido. Neste estudo de caso é analisada a emissividade em uma placa de aço galvanizado.

Os resultados e discussões são apresentados no Capítulo 7, nela é realizada uma comparação entre os resultados experimentais obtidos com a metodologia proposta e os resultados encontrados através da aplicação do método de simulação de corpo negro na amostra. Por fim neste capítulo são feitas as discussões com análises quantitativas e qualitativas dos resultados encontrados.

No Capítulo 8 estão as considerações finais e propostas de futuros trabalhos visando a continuidade da pesquisa.

Capítulo 2: Fundamentos técnicos

Neste capítulo são abordados os principais conceitos que auxiliam no processo de desenvolvimento deste trabalho, tais como radiação térmica em corpos negros e reais, termovisores, métodos de medição de emissividade, incerteza de medição, entre outros. Toda a revisão de literatura será focada em inspeções termográficas voltadas para instalações e equipamentos elétricos, em especial na determinação de emissividade.

2.1 Termografia

Termografia é uma técnica que permite adquirir e diagnosticar informações térmicas de determinado objeto através da radiação térmica emitida por este (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

A técnica de termografia tem grandes aplicações na indústria, medicina, construção civil entre outros ramos do conhecimento (AZEVEDO; JUNIOR, 2012). Dentre as aplicações industriais a termografia se destaca no auxílio à manutenção preditiva, em especial na manutenção elétrica (ÁLVARES, 2008).

A manutenção preditiva tem por intenção se antecipar à ocorrência de um problema através de medições onde se prevê a iminência da ocorrência de uma falha. A termografia auxilia na medição de temperatura gerando imagens chamadas de termogramas (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Essas imagens permitem visualizar a distribuição de temperatura na superfície inspecionada, sem a necessidade do contato físico com ela. Isso contribui para apontar ações corretivas em possíveis falhas (ÁLVARES, 2008). O equipamento que gera essas imagens é chamado de termovisor ou câmera termográfica (SANTOS, 2006).

O termovisor ou câmera termográfica é um equipamento capaz de converter a radiação recebida em uma imagem que mostra a distribuição de temperatura (ÁLVARES, 2008). A qualidade da imagem gerada depende das características do termovisor utilizado na captura da imagem tais como resolução, faixa de comprimento de onda entre outras configurações que influenciam diretamente no resultado da termografia (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

Assim a termografia é uma técnica que consiste em diagnosticar a variação de temperatura do corpo inspecionado sem a necessidade do contato direto com o mesmo,

tornando um bom instrumento de auxílio à manutenção de equipamento, uma vez que a variação de temperatura indica a possível iminência de uma falha (AZEVEDO; JUNIOR, 2012).

2.1.1 Princípios Físicos da Termografia

A termografia parte do princípio que qualquer matéria que esteja a uma temperatura acima de zero absoluto emite radiação eletromagnética em função da excitação existente entre átomos e moléculas que o constitui (INCROPERA et al., 2007). A radiação eletromagnética, em especial a radiação térmica, é emitida nas faixas de ultravioleta, visível, infravermelho e nas faixas de micro-ondas do espectro eletromagnético. Porém, para temperaturas tipicamente encontradas em ambientes industriais, a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho (CHRZANOWSKI, 2001). Por isso, os termovisores normalmente encontrados são fabricados com detectores que respondem a essa faixa do espectro, mais especificamente de (3 a 5) μm ou (8 a 14) μm , sendo esta última faixa mais indicada para temperaturas e condições que envolvem equipamentos elétricos, tipicamente de (-20 a 500)°C (SANTOS, 2012).

A radiação infravermelha está localizada dentro do espectro eletromagnético entre a região de radiação visível e a região de radiação micro-ondas, na faixa de (10^0 a 10^3) μm , como descrito na Figura 1.



Figura 1 Espectro eletromagnético (SANTOS, 2006).

A radiação infravermelha obedece às leis de refração e reflexão, além disso, desloca-se em linha reta, é absorvida, apresenta espalhamento de feixe e viaja no vácuo à velocidade da luz, aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

A propagação da radiação infravermelha pode ser considerada como a das ondas eletromagnéticas que viajam no tempo e espaço. Assim como qualquer onda possui

frequência (f), comprimento de onda (λ) e velocidade de propagação (c), descrita pela Equação 1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Onde:

c é a velocidade de propagação no meio, m.s^{-1} ;

λ é o comprimento de onda, m;

f é a frequência da onda, Hz.

2.1.2 Radiação de Corpo Negro

Segundo Incropera et al. (2007) qualquer corpo que esteja a temperatura acima de zero absoluto emite radiação. Um emissor perfeito de radiação infravermelha possui a capacidade de emitir em todos os comprimentos de onda e absorver toda a radiação incidente sobre sua superfície, independente da direção e do comprimento de onda. O objeto que apresentar essas características é dito ser um corpo negro.

O corpo negro, segundo Vollmer & Möllmann (2010), apresenta algumas características que o classificam dessa maneira. Além da capacidade de absorver toda radiação incidente independente do comprimento de onda e da direção, nenhuma superfície pode emitir mais energia a qualquer temperatura e comprimento de onda que a sua e, a emissão de radiação por um corpo negro é função do comprimento de onda e da temperatura não dependendo da direção, tornando-o um emissor difuso.

A emissão de radiação de um corpo negro é descrita pela lei de Planck. Nela se relaciona a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro ($M_{\lambda,b}$), em uma dada temperatura (T), por unidade de área, por unidade de comprimento de onda (λ), conforme Equação 2 (INCROPERA et al., 2007; VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

$$M_{\lambda,b}(T) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)} \quad (2)$$

Onde:

$M_{\lambda,b}$ é a emitância espectral do corpo negro, $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$;

T é temperatura do corpo negro, K;

λ o comprimento de onda, μm ;

h é a constante de Planck considerada como $6,626176 \times 10^{-34}$ J.s ;

k é a constante de Boltzmann com o valor de $1,38064852 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹

c é a velocidade da luz no vácuo e vale $2,9979246 \times 10^8$ m.s⁻¹;

Utilizando a Equação 2, variando o comprimento de onda ao longo da faixa infravermelha, obtêm-se os respectivos valores de densidade de fluxo radiante espectral, ou seja, a energia total por segundo por metro quadrado por comprimento de onda, também conhecida como emitância espectral (CHRZANOWSKI, 2001). Na Figura 2 encontra-se a emitância espectral de um corpo negro. Nota-se que para uma dada temperatura há uma emitância espectral em função do comprimento de onda.

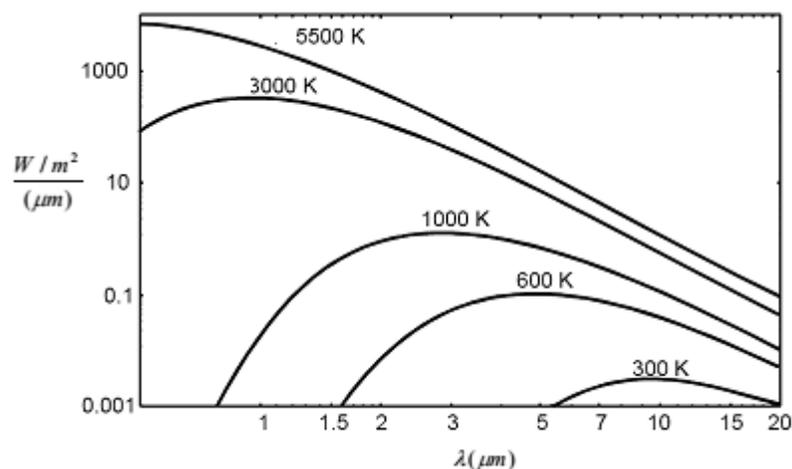


Figura 2 Emitância espectral de um corpo negro (CHRZANOWSKI, 2001).

Nota-se através da Figura 2 que a intensidade da radiação emitida aumenta com a elevação de temperatura para qualquer comprimento de onda, ou seja, quanto maior a temperatura maior a emitância espectral (CHRZANOWSKI, 2001).

No caso de instalações elétricas, onde se trabalha com temperaturas que variam desde a temperatura ambiente e, em casos extremos, até a fundição de materiais (SANTOS, 2012), a

intensidade máxima de radiação ocorre para comprimentos de onda de aproximadamente 10 μm . Assim, os termovisores utilizados para este fim devem operar com faixa de comprimento de onda entre 8 a 15 μm e temperatura entre (300 e 400) K (CHRZANOWSKI, 2001; MUNIZ et al., 2014).

Retornando à Equação 2, porém agora integrando-a no intervalo de comprimento de onda entre zero a infinito, é possível calcular a emitância radiante total de um corpo negro (M_b). A Equação 3 é resultado dessa integração cujo equacionamento é conhecido como Lei de Stefan-Boltzmann.

$$\int_0^{\infty} M_b \, d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(\frac{h c}{\lambda k T_b} - 1 \right)} \, d\lambda \quad (3)$$

Graficamente, a emitância radiante total (M_b) representa a área abaixo da curva de Planck para uma temperatura específica (CHRZANOWSKI, 2001). A Figura 3 mostra a emitância radiante total do corpo negro em uma dada temperatura (T_b). Assim, com o aumento de temperatura maior será a radiação emitida por área, ou seja, maior será a intensidade da radiação emitida para o meio.

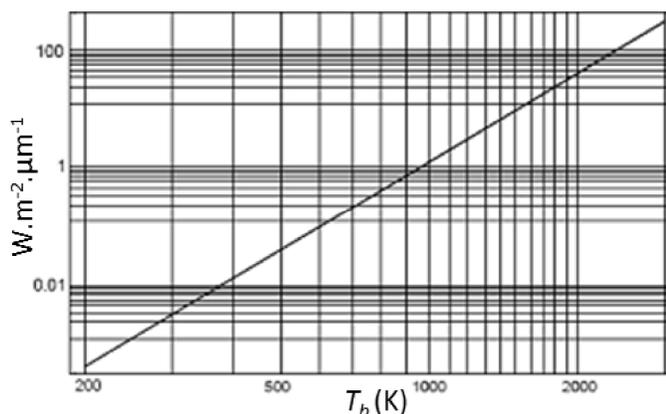


Figura 3 Emitância radiante total do corpo negro em uma dada temperatura absoluta (Adaptado de Charzanowski, 2001).

Assim, os corpos negros seguem um comportamento ideal de emissão e absorção de radiação, mas, na grande maioria das instalações, os objetos inspecionados não apresentam este tipo de comportamento (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Os corpos que não seguem o comportamento dos corpos negros são ditos corpos cinza ou emissores reais de radiação. O

comportamento físico desses objetos não segue diretamente as definições de corpos negros, sendo necessárias algumas considerações.

2.1.3 Radiação em Corpos Cinza

Os emissores reais de radiação ou corpos cinza apresentam emitância radiante menor que a de um corpo negro. Para emprego das leis físicas apresentadas sobre corpos negros, é necessário caracterizar algumas propriedades importantes como emissividade, absorção, reflexão, transmissão e a relação entre absorção e emissividade descrita pela lei de Kirchhoff (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

Na Figura 4 um objeto real ou corpo cinza recebe uma determinada radiação (G) proveniente do meio em que está inserido. Quando esta atinge o objeto, parte dela é refletida (ρG), outra parcela é absorvida pelo meio (αG) e dependendo do objeto haverá uma transmissão através da superfície (τG) (INCROPERA et al., 2007).

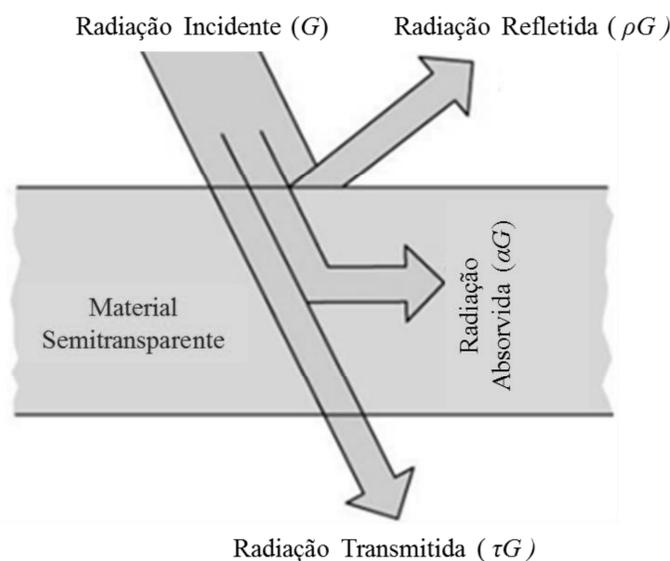


Figura 4 Representação gráfica da radiação incidente em um objeto real (Adaptado de Incropera et al., 2007).

Pela Figura 4, a radiação incidente sobre o objeto pode ser escrita matematicamente através da radiação total recebida pelo corpo. Na Equação 4, a radiação total incidente (G) é a soma das parcelas refletida (ρG), absorvida (αG) e transmitida (τG). Dos termos da equação se originam as quatro principais propriedades radiantes de um emissor real de radiação, que são

a transmissividade (τ), refletividade (ρ), absorvidade (α) e emissividade (ε) (INCROPERA et al., 2007).

$$\tau G + \rho G + \alpha G = G \quad (4)$$

Na Equação 4, a transmissividade, τ , é a propriedade que ocorre mais significativamente em materiais semitransparentes e é definida como a fração da energia que transpassa o material de acordo com a Equação 5 (PERIN, 2009).

$$\text{Transmissividade} = \tau = \frac{\text{Energia que transpõe o corpo}}{\text{Energia incidente no corpo}} \quad (5)$$

Como visto na Figura 4, um corpo ao receber radiação terá parte refletida de volta para o meio isso é definido como refletividade. Ou seja, é a razão entre a energia refletida pelo corpo e a energia total incidente sobre este (PERIN, 2009). Essa característica está descrita na Equação 6 sendo exclusiva dos corpos cinza.

$$\text{Refletividade} = \rho = \frac{\text{Energia refletida pelo corpo}}{\text{Energia incidente no corpo}} \quad (6)$$

Absorvidade, α , é a razão entre a energia absorvida por um corpo em relação à energia total recebida pelo mesmo corpo, ou seja, corresponde a quanto da radiação recebida pela superfície foi absorvida. A quantidade absorvida depende da superfície do material. Essa propriedade é descrita pela Equação 7 (PERIN, 2009).

$$\text{Absorvidade} = \alpha = \frac{\text{Energia absorvida pelo corpo}}{\text{Energia incidente no corpo}} \quad (7)$$

Conforme relatado, os corpos reais de emissão de radiação possuem características de absorção e emissão de radiação diferente daquelas do corpo negro. Essa diferença acrescenta a eles propriedades a mais como absorvidade, refletividade, transmitância e emissividade. Esta última tem influência significativa na medição de temperatura (MUNIZ et al., 2014) e sendo foco deste trabalho será tratada com maior atenção no capítulo posterior.

2.2 Emissividade

A emissividade (ε) é a capacidade de determinada superfície emitir radiação. É a relação entre a energia emitida pelo corpo em relação à radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura (INCROPERA et al., 2007; PERIN, 2009; SANTOS, 2006). Matematicamente ela é descrita pela Equação 8.

$$\varepsilon = \frac{\text{Energia Emitida pela Superfície Real}}{\text{Energia Emitida pelo Corpo Negro}} \quad (8)$$

Por definição, um corpo negro possui emissividade unitária para todos os comprimentos de onda. Em corpos reais a emissividade depende de fatores como temperatura do corpo, comprimento de onda da energia emitida, características da superfície e cor do objeto. Cada material possui seu valor de emissividade particular, mas se o material apresentar diferentes características para diversos graus de limpeza da sua superfície, ele pode ter valores diferentes de emissividade correspondentes (CHRZANOWSKI, 2001).

A Figura 5 apresenta uma superfície com temperatura uniforme, porém ela possui diferentes áreas com acabamentos superficiais distintos. Na imagem, a superfície do ferro de passar roupas apresenta algumas áreas com emissividade alterada devido à mudança de material ou mesmo o estado de conservação apresentado. Apesar de toda a superfície estar à mesma temperatura, a imagem térmica da Figura 5 (b) revela que as áreas mais claras, de maior emissividade, possuem temperatura aparente mais elevada que as áreas mais escuras. Isso acontece porque a imagem térmica foi construída sob a informação de que toda a superfície do ferro elétrico possuiria a mesma emissividade, o que na realidade não ocorre.

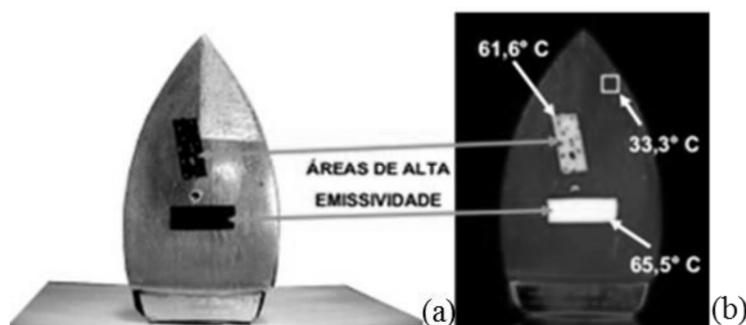


Figura 5 (a) Imagem real da superfície de um ferro de passar roupas. (b) Imagem térmica do mesmo objeto (Santos, 2006).

Como visto na Figura 5, a determinação correta da emissividade de uma superfície influencia diretamente no termograma e no diagnóstico do defeito (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Segundo Muniz et. al. (2014) a emissividade influencia em mais de 85% na qualidade do resultado de uma medição de temperatura.

A emissividade é função do comprimento de onda λ , da temperatura T e da direção de radiação (PERIN, 2009). A definição de emissividade é a razão entre a radiação emitida entre o corpo real e o corpo negro. Na Equação 4 a radiação recebida por um objeto real é a soma das componentes refletidas, absorvidas e transmitidas. A emissividade neste caso é a quantidade de radiação absorvida pelo corpo conforme descreve a Lei de Kirchhoff.

A Lei de Kirchhoff define que a quantidade de radiação absorvida por qualquer objeto é igual à quantidade de radiação emitida por este corpo (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Assim a absorvidade é igual à emissividade de um determinado corpo, ou seja:

$$\varepsilon = \alpha \quad (9)$$

Substituindo a Equação 9 na Equação 4, a radiação total recebida por um objeto real é reescrita gerando a Equação 10.

$$\tau + \rho + \varepsilon = 1 \quad (10)$$

Considerando que a superfície que recebe a radiação não possui características semitransparentes, situação típica em equipamentos elétricos inspecionados por termografia infravermelha, a Equação 10 pode ser reescrita com a transmissividade, τ , igual a zero.

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (11)$$

Portanto, a Equação 11 é aplicada para descrever a emissividade em superfícies cinzas, opacas e difusas, ou seja, superfícies reais. Nelas a radiosidade total ou radiação total emitida, J , é uma importante característica que descreve a potência de radiação emitida por unidade de área (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Matematicamente é a soma da radiação refletida pela superfície mais a emitida por ela mesma, como descrito na Equação 12.

$$J = \varepsilon E_b + \rho G \quad (12)$$

Onde:

J é a radiosidade total ou radiação total emitida pela superfície, W.m^{-2} ;

ε é a emissividade da superfície;

E_b é o poder emissivo do corpo negro para aquela temperatura, W.m^{-2} ;

ρ é a refletividade da superfície;

G é o valor da radiação incidente superfície, W.m^{-2} .

Observando a Equação 12 verifica-se que a refletividade pode ser substituída pela sentença da Equação 11 gerando assim a Equação 13.

$$J = \varepsilon E_b + (1 - \varepsilon) G \quad (13)$$

Evidenciando o termo emissividade na Equação 13, chega-se à Equação 14. Com essa equação calcula-se a emissividade usando como parâmetros a radiação total emitida, refletida e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura.

$$\varepsilon = \frac{J - G}{E_b - G} \quad (14)$$

A Equação 14 é a base deste trabalho no qual, através de procedimentos relatados mais adiante, será possível estimar as variáveis J , G e E_b , gerando valores de emissividade com determinado nível de confiança. Para tanto é importante antes de tudo entender e conhecer os métodos de estimativa de emissividade existentes para que estes possam ser comparados com o método proposto.

2.3 Métodos de Medição de Emissividade

Determinar experimentalmente o valor da emissividade das superfícies inspecionadas é difícil, pois o processo de transferência de calor entre a superfície e o ambiente em que a amostra está inserida, influencia diretamente nos resultados (PERIN, 2009).

Para se estimar a emissividade de um objeto tradicionalmente são utilizadas medidas calorimétricas, radiométricas diretas e por reflexão (HOLMAN, 2011; PERIN, 2009).

Os métodos de medidas calorimétricos consideram o balanço de energia e o conhecimento da quantidade e da direção do fluxo de energia (HOLMAN, 2011; PERIN, 2009). Normalmente são aplicados em ambiente de laboratório, em amostras dos objetos de interesse.

Os métodos radiométricos utilizam sensores de radiação que respondem com um sinal elétrico proporcional à energia radiante a que estão expostos. Nesse método é possível obter a emissividade direcional (HOLMAN, 2011; PERIN, 2009), podendo ser aplicado tanto em laboratório, quanto em campo.

2.3.1 Método Radiométrico

Como o termovisor, o radiômetro é um equipamento utilizado para medição de intensidade de radiação. Ele possui vários sensores de radiação ligados em série que captam a radiação emitida pela superfície e a transformam em um sinal elétrico. A radiação percebida pelos sensores é uma soma da radiação emitida pelo meio de propagação com a radiação emitida pela superfície inspecionada mais a radiação refletida pela vizinhança e outras regiões (HOLMAN, 2011).

As medições feitas com radiômetros são rápidas e de fácil operação, porém limitadas dentro de uma pequena faixa do espectro, tipicamente entre (8 e 14) μm , fazendo com que esse método não seja confiável para se obter a emissividade hemisférica (HOLMAN, 2011).

A emissividade hemisférica é o resultado da integração de todo o espectro de radiação térmica existente entre (0,1 a 100) μm . Como os radiômetros normalmente estão na faixa de (8 a 14) μm , a estimativa da emissividade hemisférica da superfície não é considerada como a total.

Segundo Perin (2009) há dois métodos mais comuns que utilizam radiômetro. São eles: simulação de corpo negro na amostra e amostra com temperatura conhecida.

2.3.1.1 Simulação de Corpo Negro na Amostra

Na técnica de simulação de corpo negro na amostra utiliza-se um corpo negro que tenha emissividade próxima à unidade, ou que seja conhecida, por exemplo, uma fita adesiva na cor preta que geralmente possui emissividade igual a 0,95. Coloca-se esta fita sobre a superfície de interesse e aguarda-se o equilíbrio térmico entre as partes (PERIN, 2009).

Com um radiômetro de emissividade ajustável, ajusta-se esse parâmetro para o valor de emissividade do corpo negro, neste caso a fita preta, e em seguida direciona-se o

radiômetro para a fita. Mede-se então a temperatura da fita. Em seguida, direciona-se o radiômetro à superfície de interesse e ajusta-se o valor de emissividade do aparelho até se obter a temperatura de quando estava direcionado para a fita (PERIN, 2009). A emissividade ajustada é a emissividade da superfície de interesse, considerando que há equilíbrio térmico entre a superfície de interesse e a fita preta de referência. Além da fita preta normalmente se usa tinta preta com emissividade conhecida.

O método de simulação do corpo negro na amostra tem como vantagem a praticidade de se obter a emissividade da superfície, porém exige o contato direto com a superfície que, por questão de segurança para aplicações em instalações elétricas, necessita ser desenergizada (BRASIL, 2005) para a colocação da fita ou aplicação da tinta.

2.3.1.2 Superfície com Temperatura Conhecida

Nesta metodologia a temperatura da superfície já é conhecida através de termômetros de contato. Com o radiômetro apontado para a amostra, ajusta-se o parâmetro de emissividade até que se obtenha a temperatura previamente conhecida. O valor de emissividade encontrado corresponde ao da superfície (HOLMAN, 2011).

Este tipo de método tem como desvantagem a necessidade de ter o contato com a superfície medida para fixação do termômetro, aumentando os riscos de segurança ao homem (BRASIL, 2005) e de interferência no processo onde o equipamento opera.

Assim, os dois métodos para estimativa de emissividade relatados acima demonstram que é possível obter esse parâmetro, com o equipamento em campo, realizando medições com o próprio termovisor, porém em ambos os métodos é necessário entrar em contato com a superfície. Atento a essas limitações e visando obter a emissividade de forma simples e rápida foi pensada uma metodologia que facilitasse esse objetivo podendo ser executada pelo próprio profissional no momento da inspeção.

A proposta do método é utilizar instrumentos que estejam ao alcance do termografista podendo ser realizado sem contato físico com a superfície inspecionada e resultando em um valor de emissividade associado à sua incerteza de medição.

2.3.2 Método Calorimétrico

Os métodos de medição de emissividade por meio de calorímetros levam em consideração o balanço de energia e o conhecimento da quantidade e da direção do fluxo de energia. É possível obter-se a emissividade direcional e a hemisférica (HOLMAN, 2011;

PERIN, 2009). Normalmente são aplicados em ambiente de laboratório não podendo ser realizados em campo, ou seja, diretamente no ambiente em que se encontra o objeto inspecionado.

Alguns métodos de medidas calorimétricas são detalhados por alguns autores, entre eles destacam-se o método do sensor de fluxo radiante tipo dupla face (KERN, 1980), refletômetro Hohlraum (MODEST, 2003), calorímetro tipo cavidade (PERIN, 2009) entre outros. Todos esses métodos utilizam equipamentos de alto custo devendo ser executados em ambientes laboratoriais não sendo o foco desta dissertação.

2.4 Termovisor

O termovisor é o principal instrumento de uma inspeção termográfica. Por meio dele a radiação infravermelha emitida pelo objeto é convertida em imagem visível e em leituras de temperatura (SANTOS, 2006). A Figura 6 esquematiza o funcionamento de um termovisor genérico. No equipamento, a radiação emitida pelo objeto passa por uma lente óptica que coleta e converge a radiação para o sistema de detecção. Os termovisores geralmente utilizam dois tipos de tecnologia de detecção, um sistema por varredura (*scanning system*) e outro fixo de detecção, ou seja, sem varredura (*staring system*) (SANTOS, 2006).

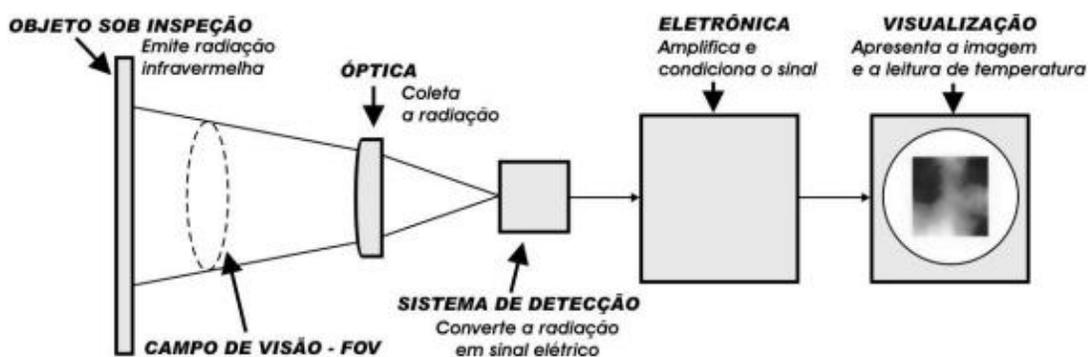


Figura 6 Diagrama simplificado de um Termovisor genérico (Santos, 2006).

O sistema de detecção por varredura utiliza em seu funcionamento um conjunto eletromecânico de espelhos e/ou prismas rotativos que fazem a varredura da cena de interesse. Isso traz como vantagem a utilização de um arranjo linear de detectores, em contra partida, essa configuração limita a taxa de captura de quadros (*frame rate*) prejudicando a qualidade

da imagem (SANTOS, 2006). Já o sistema fixo de detecção ou matriz de plano focal (*Focal Plane Array – FPA*), mais utilizada atualmente, faz uso de uma matriz bidimensional de detectores. Como não há varredura, a taxa de repetição dos quadros (*frame rate*) é alta, além disso, cada detector empregado monitora continuamente a emissão de radiação vinda do objeto (MALDAGUE; MOORE, 2001). Os detectores de radiação infravermelha são limitantes para o bom desempenho dos termovisores, sendo classificados em dois principais tipos, detectores térmicos e fotodetectores.

Os detectores térmicos respondem à mudança de temperatura com a variação de alguma propriedade elétrica como resistência, tensão, entre outras. Operam à temperatura ambiente e possuem resposta espectral ampla e uniforme, porém lenta em comparação com os fotodetectores (SANTOS, 2012).

Os fotodetectores ou detectores de fótons respondem diretamente à incidência de radiação liberando cargas elétricas. Eles operam em temperaturas abaixo de zero grau Celsius necessitando de resfriamento criogênico ou resfriamento por processo elétrico tornando seu uso muito custoso (WOLFE, 1996).

O sinal elétrico emitido pelo detector é tratado no sistema eletrônico do equipamento e o sinal interpretado é enviado ao visor apresentando a leitura de temperatura do objeto inspecionado (WOLFE, 1996).

Os tipos de detectores e as formas de varredura da imagem influenciam diretamente a qualidade e o resultado da inspeção termográfica, além disso, a escolha correta do termovisor deve considerar o objeto inspecionado, o local em que este se encontra, sendo importante conhecer a temperatura do objeto a ser inspecionado, a sua distância até o termovisor além da temperatura do ambiente inspecionado (SANTOS, 2006).

Conhecendo as características do objeto inspecionado, o termovisor deve ser escolhido observando os seguintes critérios abaixo (SANTOS, 2006):

- tecnologia de detecção;
- tipos de detectores;
- faixa de temperatura;
- faixa espectral;
- resolução espacial e resolução de medida;
- sensibilidade térmica.

2.4.1 Faixa de Temperatura

Nas aplicações em instalações elétricas, a faixa de temperatura operacional do termovisor deve estar entre a temperatura ambiente e a de fusão de metais, em geral alumínio, aço galvanizado e cobre (SANTOS, 2012). Os termovisores comercialmente encontrados operam na faixa de temperatura entre (-20 e 500) °C, o suficiente para as inspeções em equipamentos elétricos.

2.4.2 Faixa Espectral

A faixa espectral corresponde à faixa de comprimento de onda operada pelo termovisor. Comumente eles são fabricados na faixa de (3 a 5) μm (*SW – short wave*) e de (7 a 14) μm (*LW – long wave*) (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Esta última faixa apresenta maior transmitância à radiação infravermelha, sendo menos sensível a falsos pontos de alta temperatura provocados pelo reflexo solar. Além disso, nas temperaturas normalmente encontradas nos equipamentos elétricos a radiação emitida é maior na faixa *LW* (CHRZANOWSKI, 2001; KAPLAN, 2007).

2.4.3 Resolução Espacial

A resolução espacial define o menor detalhe de imagem que pode ser percebido e depende do tamanho do detector e da óptica do sistema. Ela é especificada em miliradianos e definida como campo de visão instantâneo (*IFOV - instantaneous field of view*), ou seja, é a projeção de um *pixel* na superfície observada. A soma de todos os *IFOV* forma o campo de visão (*FOV - field of view*) (SANTOS, 2006). Na Figura 7 é observada a projeção de um *pixel* no campo de visão instantâneo, quando todos estes são somados é formado o campo de visão *FOV* normalmente declarado pelos fabricantes em graus. O campo de visão instantâneo, *IFOV*, pode ser calculado a partir da Equação 15 (SANTOS, 2006).

$$IFOV = \frac{\pi \cdot FOV}{180 \cdot Pix} \quad (15)$$

Onde:

IFOV campo de visão instantâneo, miliradianos.

FOV campo de visão, graus.

Pix número de pixels do Termovisor.

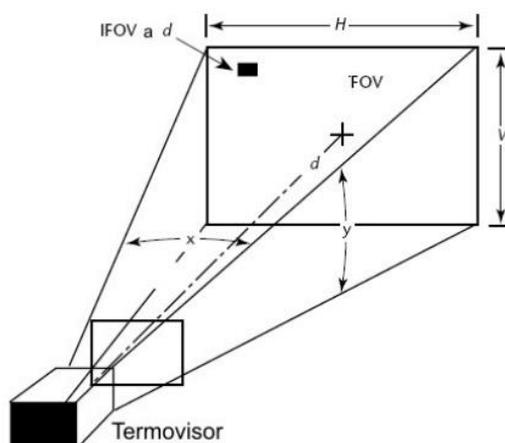


Figura 7 Representa o Campo de Visão (FOV) e o Campo de Visão Instantâneo (IFOV) (Santos, 2006).

O valor do *IFOV* fornece o ângulo sob o qual a matriz do plano focal percebe a radiação do objeto inspecionado. Assim conhecendo o valor de *IFOV* e o tamanho do objeto inspecionado é possível determinar a distância na qual o termovisor e o objeto devam ser posicionados a fim de obter uma correta medição de temperatura (MUNIZ, 2014)

2.4.4 Sensibilidade Térmica

A sensibilidade térmica ou resolução de temperatura é a menor diferença de temperatura que pode ser detectada pelo termovisor. Ela é especificada como a diferença de temperatura equivalente ao ruído (*NETD - noise equivalent temperature difference*) e depende das propriedades do sistema óptico, da resposta do detector e do nível de ruído do sistema. Termovisores com resposta espectral na faixa *LW* tendem a ter melhor resolução de medição de temperatura do que os encontrados na faixa *SW* (MUNIZ, 2014; SANTOS, 2006).

2.4.5 Taxa de Repetição de Quadro (*Frame Rate*)

A taxa de repetição é o número de vezes por segundo que uma imagem completa da cena observada é atualizada pelo termovisor (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). A taxa de repetição de quadros é a frequência com que as imagens são capturadas pelo termovisor. Assim quanto maior a frequência de captura melhor será a qualidade e a resolução das imagens produzidas pelo termovisor (SANTOS, 2006).

2.5 Incerteza de Medição

Dentre os objetivos deste trabalho está a medição da emissividade de um objeto por meio de análise termográfica. A medição consiste em um procedimento experimental cujo resultado é uma faixa de valores em que se encontra o verdadeiro valor da emissividade do objeto mensurado, com um nível de confiança aceitável. O valor medido é composto do resultado-base juntamente com sua incerteza. O resultado-base é o valor que se acredita ser o mais próximo do valor verdadeiro e a incerteza é a parcela duvidosa associada à medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

A incerteza que envolve a medição de temperatura por termografia está relacionada com a: qualidade e precisão do termovisor, emissividade do objeto inspecionado, distância entre o objeto e a câmera, temperatura e umidade relativa dos meios de propagação bem como temperatura dos objetos localizados no ambiente da inspeção. (MUNIZ, 2014; MUNIZ et al., 2014). Além disso, quando se estima a emissividade de um objeto é levada em consideração a função resposta e os parâmetros de *offset* do termovisor, ambos obtidos através de ensaios de calibração (DEL CAMPO et al., 2010).

A Tabela 1 mostra os resultados experimentais da contribuição de cada instrumento de medição na composição do resultado final para uma incerteza de medida de emissividade de $0,80 \pm 0,03$ a uma temperatura de 90°C . Nesta tabela são analisados dois tipos de câmeras termográficas, uma com incerteza de 1°C e outra com 2°C . A medição de emissividade e a incerteza intrínseca do termovisor são os dois principais fatores que impactam na incerteza total. Assim, a utilização de uma câmera termográfica com baixa incerteza e a avaliação cuidadosa e profunda da emissividade contribui para medições de temperatura com melhor qualidade (MUNIZ, 2014; MUNIZ et al., 2014). Assim, a Tabela 1 mostra a contribuição total de incerteza de cada instrumento de medição apresentando uma incerteza padrão na medição de temperatura de $2,8^{\circ}\text{C}$ para termovisor de incerteza 1°C e $3,0^{\circ}\text{C}$ para o de 2°C .

Tabela 1 Contribuição de cada instrumento de medição para uma incerteza de emissividade $0,80 \pm 0,03$ (Adaptado de Muniz et al., 2014)

Medição (instrumento)	Incerteza do termovisor	
	1 °C	2 °C
Temperatura Atmosférica (termômetro)	<1%	<1%
Temperatura Ambiente (termômetro)	<1%	<1%
Umidade Relativa (higrômetro)	<1%	<1%
Distância (trena eletrônica)	<1%	<1%
Incerteza do termovisor (Câmera termográfica)	4%	15%
Emissividade (avaliação do usuário)	95%	85%
Incerteza-padrão da temperatura medida	2,8 °C	3,0 °C

A análise dos fenômenos que causam incerteza contribui para quantificar a influência sistêmica da fonte de incerteza no resultado. A contribuição individual de cada fonte de incerteza é quantificada pela incerteza-padrão, que comumente utiliza dois caminhos, o procedimento estatístico também conhecido como tipo A e não estatístico, tipo B, ambos interpretados como desvios padrão (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; LIMA JUNIOR; SILVEIRA, 2011).

O procedimento estatístico de caracterização da incerteza-padrão ou tipo A envolve medições repetidas do mesmo mensurando, ou seja, trata-se de um procedimento estatístico em que se utiliza a média e o desvio padrão a partir de várias medições (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

O procedimento não estatístico ou tipo B se aplica quando não é possível realizar várias medições, para isso é necessário levar em consideração todas as informações que estejam relacionadas com a qualidade do resultado da medição permitindo assim determinar a amplitude e o tipo de distribuição de probabilidade esperado. A distribuição de probabilidade estimada deve se ajustar às informações relevantes para a qualidade do resultado da medição e traduzi-las em uma quantidade que pode ser interpretada como desvio padrão (LIMA JUNIOR; SILVEIRA, 2011).

Uma distribuição de probabilidade onde em um dado intervalo há, por exemplo, 95 % de chance de se encontrar o erro aleatório do processo de medição determina-se como incerteza expandida para um nível de confiança de 95 %. Sendo calculada como o produto entre a incerteza combinada padrão e o coeficiente de *Student* correspondente ao número de graus de liberdade efetivos com 95% de probabilidade. Além disso, a incerteza padrão

também pode ser definida como o número de desvio padrões da amostra, no caso de nível de confiança de 95% a incerteza padrão corresponde a dois desvios padrões (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

As incertezas encontradas em medições podem ser classificadas como, incerteza de medições diretas ou indireta. Assim, nas incertezas de medições diretas, o valor do mensurando é obtido diretamente do sistema de medição como, por exemplo, a leitura de temperatura do termovisor, ao passo que quando se pretende obter a emissividade é necessário calcular seu valor através de operações matemáticas envolvendo grandezas medidas diretamente sobre o mensurando, sendo esse tipo medição dita como indireta.

Como nas medições diretas, as indiretas também carregam incertezas. A forma com que são tratadas tem relação com a influência das variáveis medidas no processo. Quando as variáveis do processo de medição não dependem uma das outras elas são classificadas como não-correlacionadas e quando há influência entre variáveis são chamadas de correlacionadas, podendo ter correlação direta, quando ambas influenciam diretamente no comportamento uma das outras, e correlação inversa, quando o aumento de uma variável contribui para a redução da outra (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

No cálculo da emissividade descrita na Equação 14, a radiação emitida pelo objeto, E_b , e a radiação incidente, G , são variáveis não-correlacionadas, ou seja, o aumento da radiação do objeto não influencia na radiação refletida e vice-versa. Mas, quando se analisa a radiação total emitida pelo objeto, J , identifica-se que a radiação incidente influencia diretamente na fonte da radiação total, obtendo-se assim uma correlação direta.

Quando o resultado de uma medição indireta é obtido a partir da combinação de duas ou mais medições correlacionadas ou estatisticamente dependentes, a incerteza combinada deve ser estimada de forma diferente (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Os caminhos para estimar a incerteza combinada de medições correlacionadas são influenciados pelo tipo de correlação existente, direta ou indireta.

Analisando cada parâmetro da Equação 14 que calcula a emissividade, identifica-se que a radiação total J apresenta forte correlação com a radiação incidente $(1 - \varepsilon) G$ visto que a radiação refletida por um corpo é parte componente da radiação total J captada pelo termovisor. De maneira conservadora, as variáveis são consideradas diretamente correlacionadas, ou seja, a parcela de radiação total J emitida pelo objeto depende diretamente da radiação incidente G de forma que nessa operação de subtração a incerteza resultante é calculada pela Equação 16 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM), 2008).

$$u(J - G) = |u(J) - u(G)| \quad (16)$$

Onde:

$u(J - G)$, incerteza da diferença entre radiação total (J) e irradiação (G), W.m^{-2} ;

$u(J)$, incerteza de medição associada à radiação total (J), W.m^{-2} ;

$u(G)$, incerteza de medição associada à radiação incidente (G), W.m^{-2} .

De maneira adversa, a radiação que incide sobre o objeto (G) é dita independente da radiação característica do objeto, E_b . Portanto, essas variáveis são não correlacionadas e têm sua incerteza associada ao resultado da subtração calculada pela Equação 17 (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM), 2008).

$$u(E_b - G) = \sqrt{u(E_b)^2 + u(G)^2} \quad (17)$$

Onde $u(E_b - G)$ é a incerteza resultante da diferença entre a radiação característica do objeto E_b e a radiação incidente (G). As variáveis $u(E_b)$ e $u(G)$ são as incertezas das medições associadas à radiação característica do objeto e à radiação incidente, respectivamente.

O numerador e o denominador da razão entre as subtrações dos termos da Equação 14 mostram-se como grandezas correlacionadas. Dessa forma, a incerteza da emissividade será dada pela Equação 18, a qual descreve a divisão das variáveis correlacionadas (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM), 2008).

$$u_r\left(\frac{J - G}{E_b - G}\right) = \left| \frac{u(J - G)}{J - G} - \frac{u(E_b - G)}{E_b - G} \right| \quad (18)$$

Onde:

$u_r\left(\frac{J - G}{E_b - G}\right)$ é a incerteza relativa resultante da divisão entre as grandezas da Equação 14;

$\frac{u(J - G)}{J - G}$ é a razão entre a incerteza resultante da diferença entre a radiação total (J) e a radiação incidente (G), e o resultado da diferença entre as variáveis;

$\frac{u(E_b - G)}{E_b - G}$ é a razão entre incerteza resultante da diferença entre a radiação de corpo negro (E_b) e a radiação incidente (G), e o resultado da diferença entre as mesmas.

A incerteza associada a uma medição qualifica o resultado encontrado dando credibilidade, permitindo saber o quanto o resultado é confiável. Neste trabalho o processo de determinação de incerteza qualifica a metodologia proposta contribuindo para sua confiabilidade e revelando a qualidade do valor encontrado de emissividade.

2.6 Software Flir Tools

As imagens capturadas pelo termovisor necessitam de uma ferramenta de computação que consiga fornecer a temperatura de uma determinada região do objeto estudado e, além disso, deve permitir alterar as características de emissividade da imagem. Para isso foi utilizado o *software Flir Tools* fornecido pelo próprio fabricante do termovisor modelo BCAM SD, empregado neste trabalho.

O *software Flir Tools* é um produto desenvolvido pela *Flir Systems* com o objetivo de dar um tratamento às imagens capturadas pelos seus termovisores. O objetivo principal do programa é criar relatórios de inspeção termográfica. Além disso, pode-se importar imagem da câmera para o computador, aplicar filtros, adicionar cabeçalhos, rodapés e utilizar ferramenta para alterar os parâmetros das imagens (FLIR, 2014). Esta ferramenta terá grande valia para o método proposto, pois possibilita identificar a temperatura do objeto em um ponto específico.

Com a imagem escolhida para o tratamento adiciona-se ao *software*, em seguida com a ferramenta *Add box measurement tool* seleciona-se o local da superfície que se deseja analisar. Com a área selecionada, a barra lateral *Parameters* deve ser preenchida com os parâmetros utilizados no ensaio experimental. A Figura 8 mostra a tela do *software* vista pelo usuário. Nesta tela se encontra a imagem capturada pelo termovisor com a área já selecionada pelo usuário.



Figura 8 Tela do *FlirTools*

A Figura 8 exibe a tela do *software* de tratamento de imagens térmicas. Para que seja realizada a correta análise das imagens a aba *Parameters* exibida na Figura 9 deve ser preenchida com as informações abaixo listadas (FLIR, 2014).

- *Emissivity*: corresponde à emissividade do objeto.
- *Refl. Temp*: é usado para compensar a radiação refletida pelo objeto, proveniente do ambiente circunvizinho.
- *Distance*: é a distância entre a lente do termovisor e o objeto inspecionado, este valor deve ser inserido em metros.
- *Atmospheric temp.*: é o valor de temperatura atmosférica existente entre a câmera e o objeto.
- *Ext. optics temp.*: equivale à temperatura de quaisquer lentes externas ou janelas utilizadas em frente da câmera. Quando não houver nenhum tipo desses aparatos, o valor inserido deve ser o valor da temperatura atmosférica do local.
- *Ext. optics trans.*: índice de transmissão de lentes externas ou janelas utilizadas em frente à câmera. As imagens analisadas nesta dissertação terão índice de transmissão unitário.
- *Relative humidity*: o valor de umidade relativa atmosférica permite à câmera compensar o fator de transmissividade atmosférica que depende do conteúdo de

umidade no meio de propagação entre o objeto inspecionado e o termovisor. Este valor é obtido através da leitura do termohigrômetro.

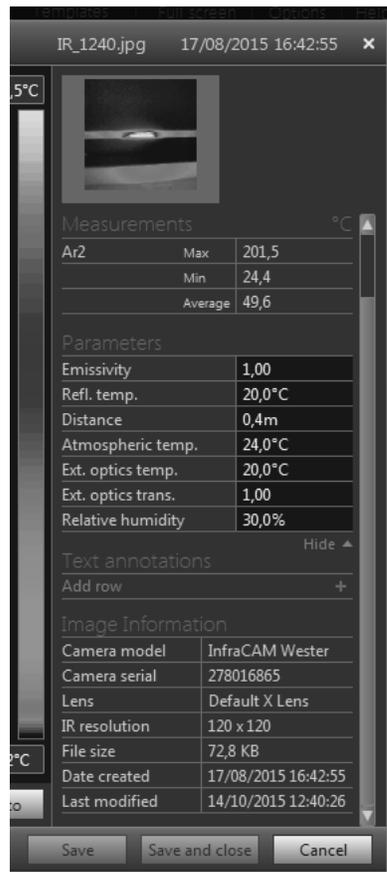


Figura 9 Destaque das abas *Parameters* e *Measurements*

Com o correto preenchimento dos campos da aba *Parameters* e com a área selecionada, o *software* retorna, no quadro *Measurements*, os valores de temperaturas máxima, mínima e média respectivamente para *Max*, *Min* e *Average* da área selecionada. Todos os valores são apresentados em graus Celsius como mostra a Figura 9.

Com os dados de temperatura obtidos pelo *FLIR Tools* elabora-se uma planilha em que haverá as numerações de todas as imagens registradas das situações propostas na metodologia. A planilha deverá conter as colunas com as temperaturas obtidas nas imagens capturadas e estas deverão ser inseridas no programa desenvolvido em plataforma MATLAB¹ que calculará a emissividade do objeto inspecionado com sua respectiva incerteza.

¹MatLab: Linguagem técnica computacional útil na resolução de problemas matemáticos com interface computacional. A versão utilizada é 7.8.0.347.

Capítulo 3: Desenvolvimento Matemático

Este trabalho tem a proposta de desenvolver uma metodologia para estimar a emissividade de um objeto sem a necessidade do contato físico com este, devendo ser executada de forma simples, fazendo o uso de recursos de baixo custo, podendo ser realizada no local da inspeção. Com esse objetivo e baseado nos conceitos da revisão de literatura será apresentado o desenvolvimento matemático como forma de entender os princípios da metodologia proposta.

Como já descrito na revisão de literatura desta dissertação, o valor de emissividade (ε) de um dado objeto é obtido pela Equação 14 aqui rerepresentada.

$$\varepsilon = \frac{J - G}{E_b - G} \quad (14)$$

Os termos E_b , G e J da Equação 14 são obtidas através da Lei de Planck, Equação 2, a qual descreve a emissão de radiação do corpo negro relacionando à distribuição espectral da radiação emitida por ele a uma determinada temperatura absoluta (T), por unidade de área, por unidade de comprimento de onda (λ) (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

A radiosidade total de uma superfície, a uma dada temperatura, será obtida através da equação da Lei de Planck, Equação 2, que será integrada em função do comprimento de onda, λ , cujos limites de integração correspondem à faixa operacional de comprimento de onda do termovisor (MUNIZ, 2014). Com isso, os valores das radiações dos termos da Equação 14 se diferem apenas pela temperatura e o modo como são obtidos, sendo que a faixa de integração da Equação 2 é realizada dentro do intervalo de comprimento de onda do termovisor utilizado na aquisição de temperatura.

Os termos E_b , G e J da Equação 14 resultam nas Equações 19, 20 e 21 respectivamente. Estas apresentam a forma integral dos termos, cujos limites de integração λ_s e λ_i representam respectivamente a faixa de comprimento superior e inferior do espectro que se está estudando. Neste caso, o intervalo será a faixa operacional de comprimento de onda do termovisor.

$$E_b = \int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_{Eb}}} - 1 \right)} d\lambda \quad (19)$$

$$J = \int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_J}} - 1 \right)} d\lambda \quad (20)$$

$$G = \int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_G}} - 1 \right)} d\lambda \quad (21)$$

Portanto, substituindo os respectivos termos de radiação da Equação 14 pelos das Equações 19, 20 e 21 gera-se uma nova equação para a emissividade, equação 22. Nesta, cada termo depende da temperatura aparente capturada pelo termovisor.

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_J}} - 1 \right)} d\lambda - \int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_G}} - 1 \right)} d\lambda}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_{Eb}}} - 1 \right)} d\lambda - \int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_G}} - 1 \right)} d\lambda} \quad (22)$$

Evidenciando o termo $2 \pi h c^2$ na Equação 22, a emissividade pode ser obtida pela Equação 23.

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_J}} - 1 \right)} d\lambda - \int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_G}} - 1 \right)} d\lambda}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_{Eb}}} - 1 \right)} d\lambda - \int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_G}} - 1 \right)} d\lambda} \quad (23)$$

Na Equação 23 observam-se três variáveis independentes T_{Eb} , T_G e T_J . Estas variáveis representam as temperaturas aparentes, respectivamente, da radiação emitida pelo próprio objeto, da radiação refletida por ele oriunda do ambiente ao seu redor, e da radiação total recebida por um termovisor que inspeciona o objeto. Essas três temperaturas devem ser inseridas na Equação 23 em kelvin.

Para avaliar a qualidade do resultado obtido a partir da Equação 23, faz-se necessário associar uma incerteza à emissividade calculada. Para isso é preciso identificar a relação que existe entre os termos, E_b , G e J . Essa relação entre as variáveis é mais bem descrita na seção 2.5 desta dissertação onde são identificadas as correlações e apresentada as equações para tais cálculos.

Desta maneira, conhecendo as temperaturas aparentes que provêm da radiação emitida pelo objeto inspecionado, refletida por ele e a oriunda do ambiente em que este está inserido é possível juntamente com a incerteza associada a essas medições de temperatura estimar a incerteza associada à emissividade calculada utilizando as Equações 16, 17 e 18.

Capítulo 4: Metodologia proposta

Com base no desenvolvimento matemático, apresentado no capítulo 3, a estimativa da emissividade dá-se pela relação entre as radiações emitida e refletida referente a uma superfície, além da soma dessas, a radiação total. Dessa forma, propõe-se obter a emissividade almejada experimentalmente avaliando tais parâmetros presentes na Equação 14.

A metodologia proposta neste trabalho consiste em avaliar as três componentes de radiação que proveem de uma superfície e a partir delas obter a emissividade do objeto estudado. Conforme o desenvolvimento matemático apresentado no Capítulo 3, as componentes de radiação são obtidas através da integração da Equação 2 que descreve a Lei de Planck. Nesta equação a variável temperatura do objeto inspecionado e o comprimento de onda do termovisor utilizado na medição são dados de entrada.

Na integração da Equação 2 as variáveis Temperatura e Comprimento de Onda dependem diretamente do termovisor, ou seja, o equipamento mede a temperatura e já a faixa de comprimento de onda é característica do instrumento de medição escolhido. Esta última relaciona-se com a primeira, pois determina qual é a faixa de temperatura medida pelo equipamento (FLIR, 2014; VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

Como o termovisor mede a temperatura aparente da radiação emitida pela superfície, a proposta é criar três situações em que haja variação de temperatura aparente na superfície e por consequência variação de radiação emitida a fim de calcular a emissividade da mesma.

Para aplicação da metodologia apresentada, o termovisor deve inicialmente estar com configuração de emissividade em valor unitário. Isso é necessário uma vez que a superfície estudada é considerada um emissor ideal de radiação (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010), ou seja, com esse ajuste o termovisor interpreta a superfície como um corpo negro. Portanto nas três situações de medição de temperatura aparente, proposta pela metodologia, o termovisor deve estar configurado para emissividade igual a um.

As três situações descritas na metodologia consistem em identificar a radiação emitida pela superfície estudada, a parcela refletida pela mesma e a radiação total que corresponde à soma das duas.

A radiação emitida pela superfície estudada, enquanto considerada como corpo negro, é a componente E_b da Equação 14 de emissividade. Nesta etapa o termovisor mede a

temperatura da superfície estudada, porém como já visto os corpos cinza também apresentam radiação refletida pelo meio.

Para que o termovisor capture apenas a temperatura da radiação emitida pela superfície estudada (E_b), Muniz (2014) descreve que deve haver uma diferença significativa de temperatura entre o ambiente e a superfície cuja imagem será capturada, uma vez que nessa condição a radiação refletida pela superfície inspecionada, proveniente do ambiente, pode ser desconsiderada (TEIXEIRA, 2012). Os equipamentos elétricos por estarem em funcionamento apresentam temperatura aparente mais elevada que o meio em que está inserido, nesta condição é possível obter somente a radiação emitida pela superfície do equipamento (MUNIZ, 2014). Além disso, a superfície desses equipamentos, na maioria, é opaca com baixa reflexão o que minimiza os efeitos da radiação refletida por eles (TEIXEIRA, 2012)

. Nesta e nas outras etapas de captura da imagem, a distância entre o termovisor e o objeto estudado deve ser segura tanto para o operador quanto para os equipamentos envolvidos, além disso, a distância está relacionada com o campo de visão do termovisor (TEIXEIRA, 2012).

Toda superfície possui radiação emitida e refletida, porém, esta última provém do meio em que está inserida (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Devido às observações anteriormente feitas sobre a radiação emitida pela própria superfície, considerou-se que esta superfície não apresenta radiação refletida, portanto, é necessário inserir uma fonte de calor que produza radiação significativa e cuja temperatura seja conhecida. Esta fonte responde por toda a energia refletida pela superfície testada.

Por estar a uma temperatura bem acima da temperatura ambiente e por não ser translúcida, a superfície testada apresenta a característica da Lei de Reflexão onde toda a energia incidente é igual à refletida (TEIXEIRA, 2012). Assim, a partir da fonte de calor determina-se a radiação incidente.

A radiação incidente é determinada com o direcionamento da fonte de calor à lente do termovisor, ficando esta perpendicular à fonte. A distância entre os dois equipamentos deve ser a mesma utilizada no processo de captura da radiação emitida. Neste procedimento o termovisor mede a temperatura da fonte (T_G).

Com a temperatura da fonte, T_G , a radiação refletida é obtida através da integração da Equação de Planck. O resultado fornece a componente G da equação de emissividade, restando apenas determinar a radiação total J para calcular a emissividade.

Como já observado a superfície estudada, e todos os corpos que estão acima de zero absoluto, apresenta emissão de radiação, além disso, ela reflete, mesmo que pouco, a radiação que provém do meio em que está inserida (INCROPERA et al., 2007; VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). As duas radiações juntas respondem pela radiação total emitida pelo corpo estudado. A radiação total responde pela componente J da equação 14 de emissividade.

Para obter a radiação total a metodologia propõe que a fonte de calor seja posicionada na direção da superfície estudada. Assim o termovisor captura a temperatura, T_J , como sendo representativa do somatório da radiação emitida pela superfície mais a refletida proveniente da fonte de calor.

A captura da imagem é feita com o direcionamento da fonte de calor para a superfície estudada com a mesma distância que foi realizada as etapas anteriores. O termovisor também deve estar com o mesmo espaçamento. Como a fonte de calor não pode interferir no posicionamento do termovisor, ambos devem estar afastados um do outro. Assim o posicionamento da fonte de calor e do termovisor deve ser tal que ambos estejam com o mesmo ângulo.

O ângulo formado entre o termovisor e a fonte de calor tem como referência a reta normal à superfície estudada. O ângulo entre qualquer um dos dois equipamentos e essa reta deve ser menor ou igual a 15° , pois em ângulos maiores há uma variação de emissividade direcional (MUNIZ, 2014; VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Assim a fonte de calor e o termovisor devem ficar separados entre si em um ângulo menor ou igual a 30° .

Com as três etapas de medições é obtida a emissividade substituindo os valores encontrados na Equação 14. Para facilitar o cálculo e aplicação da metodologia é usada a Plataforma MATLAB, conforme será descrito no Capítulo 5. No *software* desenvolvido, calculam-se as radiações, a emissividade da superfície e sua incerteza associada. Nesse programa, as variáveis de entrada provêm da aplicação da metodologia proposta e correspondem aos três valores de temperatura com suas incertezas típicas:

- temperatura do objeto sem a presença da fonte de calor externa (T_{Eb});
- temperatura do conjunto fonte de calor e objeto (T_J);
- temperatura da fonte de calor externa (T_G).

O programa retorna como variável de saída a emissividade do objeto inspecionado com sua incerteza associada.

A metodologia descrita expõe de forma simples um método de obter a emissividade utilizando somente um termovisor e uma fonte de calor. Ele traz como vantagem a realização

do método sem a retirada do equipamento de seu funcionamento normal, a não necessidade do contato físico com a superfície estudada e permite realizar os procedimentos no momento e local da inspeção com baixo custo financeiro. A Figura 10 mostra um diagrama com o resumo da metodologia onde é possível acompanhar as etapas propostas.

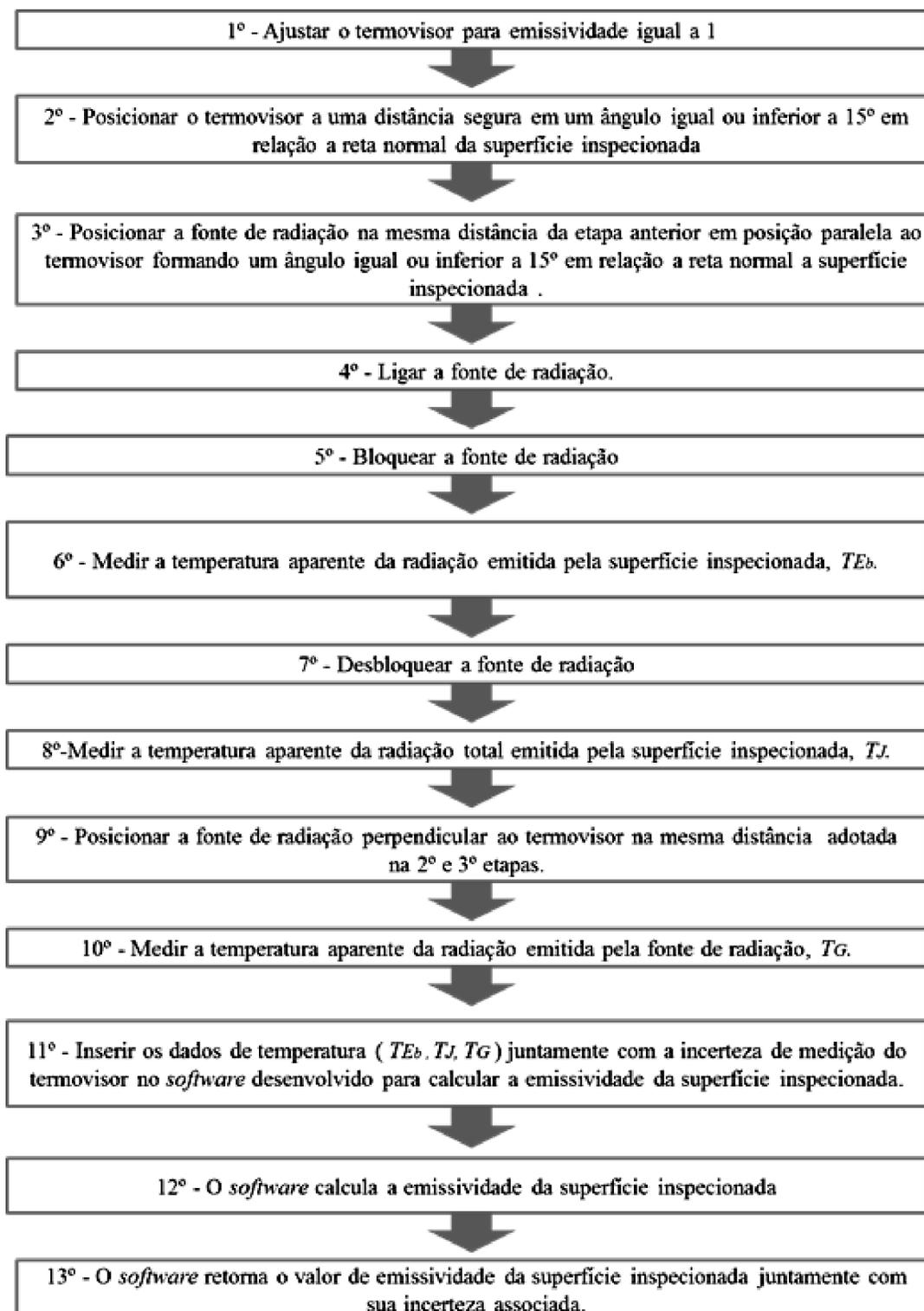


Figura 10 Diagrama com as etapas da metodologia proposta (Autor).

Capítulo 5: Software Desenvolvido para Cálculo da Emissividade baseado na Metodologia Proposta

Com base na modelagem matemática e na metodologia proposta nesta dissertação foi usada a Plataforma MATLAB tendo como objetivo facilitar a resolução das equações de emissividade.

O programa desenvolvido calcula as radiações e a emissividade da superfície bem como sua incerteza associada. Nesse programa, as variáveis de entrada são os três valores de temperatura com suas incertezas típicas:

- temperatura do objeto sem a presença da fonte de calor externa (T_{Eb});
- temperatura do conjunto fonte de calor e objeto (T_J);
- temperatura da fonte de calor externa (T_G).

Inicialmente é necessário inserir o valor da temperatura do objeto sem a presença da fonte de calor externa, bem como a incerteza de medição. Esta última pode ser estimada através do procedimento descrito em Muniz 2014, ou podem ser adotados valores típicos em função da instrumentação empregada. Ambos os valores devem ser inseridos na unidade de graus Celsius.

Na sequência, o programa solicita que sejam inseridos os valores da temperatura aparente do conjunto fonte de calor e objeto, e da temperatura aparente da fonte de calor externo. Nos dois casos também devem ser inseridos os valores de incerteza de medição, sendo que a unidade devem ser a mesma da temperatura aparente inserida.

A Figura 11 mostra as linhas de código em que são solicitadas ao usuário inserir os valores de temperatura bem como a incerteza de medição das três situações encontradas no experimento.

```

T1=input('Inserir o valor da temperatura do objeto medido no termovisor:')
DT1 = input('Incerteza da Temperatura Medida:')
%Direciona a fonte de calor pra a amostra
T2=input('Inserir o valor da temperatura NOVA TEMPERATURA APÓS DIRECIONAR A
FONTE DE CALOR AO OBJETO:')
DT2 = input('Incerteza da NOVA TEMPERATURA APÓS DIRECIONAR A FONTE DE CALOR
AO OBJETO:')
%Temperatura da fonte de calor conhecida
T3=input('Inserir o valor da temperatura DO OBJETO FONTE DE CALOR
CONHECIDO:')
DT3 = input('Incerteza da Temperatura DO OBJETO FONTE DE CALOR CONHECIDO:')

```

Figura 11 Linhas de código para inserção dos dados de entrada (Autor)

Os dados de entrada inseridos pelo usuário correspondem à temperatura com a sua respectiva incerteza associada. Portanto, os dados de entrada variam entre a temperatura lida pelo usuário mais a incerteza associada, temperatura máxima, e a temperatura mínima que é a temperatura lida menos a incerteza do instrumento de medição.

Com os valores das temperaturas é possível calcular a radiação emitida pelos objetos e para tanto será utilizada a Equação da Lei de Planck.

Com os dados de entrada e as constantes inicializadas pode se iniciar o cálculo da radiação proveniente dos objetos. Conforme o desenvolvimento matemático é necessário integrar a Equação de Planck no intervalo de comprimento de onda correspondente ao termovisor que será utilizado. Neste caso foi utilizado um equipamento que possui faixa de leitura de comprimento de onda que varia de (8 a 13) μm . Na Figura 12 o programa executa o somatório dentro da faixa citada com passo de 0,1 μm .

Na rotina de integração da Figura 12 o programa utiliza a Equação 2 da modelagem matemática, inserindo nela o valor da temperatura correspondente, as constantes já inicializadas e o comprimento de onda “ λ ”. Este último é acrescido de 0,1 a partir da faixa inicial à medida que a rotina é executada. O resultado é armazenado em um vetor de uma linha e com posição de coluna dada pelo contador “ i ”.

Na Figura 12 a variável “ $soma$ ” acumula todos os valores que estão armazenados nos vetores iniciados com “ J ”.

A rotina apresentada na Figura 12 é realizada para todas as temperaturas com seus valores máximos e mínimos provenientes da incerteza de medição.

```

for Lamb1=8:.1:13

    i=i+1 %CONTADOR

    %PARTE POSITIVA

    J1p(1,i)=C1/((Lamb1^5)*(exp((h*c)/(k*Lamb1*T1p))-1)) %EQUA. PLANK P/
TEMP. MEDIDA PELA CAMERA
    soma1=soma1+ J1p(1,i) %ACUMULADOR DA RADIAÇÃO 1
    plot(Lamb1,J1p(1,i),'*b')
    hold on

    J2p(1,i)=C1/((Lamb1^5)*(exp((h*c)/(k*Lamb1*T2p))-1)) %EQUA. PLANK P/
TEMP. MEDIDA PELA CAMERA COM A FONTE DE CALOR SOB O OBJETO
    soma2=soma2+ J2p(1,i) %ACUMULADOR DA RADIAÇÃO 2
    plot(Lamb1,J2p(1,i),'*r')
    hold on

    J3p(1,i)=C1/((Lamb1^5)*(exp((h*c)/(k*Lamb1*T3p))-1)) %EQUA. PLANK P/
FONTE DE CALOR CONHECIDO
    soma3=soma3+ J3p(1,i) %ACUMULADOR DA RADIAÇÃO 3
    plot(Lamb1,J3p(1,i),'*y')

    %PARTE NEGATIVA

    J1n(1,i)=C1/((Lamb1^5)*(exp((h*c)/(k*Lamb1*T1n))-1)) %EQUA. PLANK P/
TEMP. MEDIDA PELA CAMERA
    soma1n=soma1n+ J1n(1,i) %ACUMULADOR DA RADIAÇÃO 1

    J2n(1,i)=C1/((Lamb1^5)*(exp((h*c)/(k*Lamb1*T2n))-1)) %EQUA. PLANK P/
TEMP. MEDIDA PELA CAMERA COM A FONTE DE CALOR SOB O OBJETO
    soma2n=soma2n+ J2n(1,i) %ACUMULADOR DA RADIAÇÃO 2

    J3n(1,i)=C1/((Lamb1^5)*(exp((h*c)/(k*Lamb1*T3n))-1)) %EQUA. PLANK P/
FONTE DE CALOR CONHECIDO
    soma3n=soma3n+ J3n(1,i) %ACUMULADOR DA RADIAÇÃO 3
end

```

Figura 12 Rotina de cálculo da Equação da Lei de Planck (Autor).

A rotina de cálculo é encerrada e obtida a média para cada valor de radiação calculado, ou seja, para cada valor de temperatura inicialmente inserido no programa foram calculados dois valores de radiação um maior e outro menor correspondentes aos valores máximo e mínimo de temperatura. A Figura 13 apresenta o código fonte onde é obtida a média das radiações e o erro médio calculado pela diferença entre o maior e menor valor de radiação.

```

G1= soma1 %INTENSIDADE DE RADIAÇÃO 1-POSITIVA
G1n= soma1n %INTENSIDADE DE RADIAÇÃO 1 - NEGATIVA
G2= soma2 %INTENSIDADE DE RADIAÇÃO 2 - POSITIVA
G2n= soma2n %INTENSIDADE DE RADIAÇÃO 2 - NEGATIVA
G3= soma3 %INTENSIDADE DE RADIAÇÃO 3 - POSITIVA
G3n= soma3n %INTENSIDADE DE RADIAÇÃO 3 - NEGATIVA

IG1=(G1+G1n)/2 % INDICAÇÃO MÉDIA RADIAÇÃO 1
EG1=(G1-G1n)/2 %ERRO MÉDIO RADIAÇÃO 1
IG2=(G2+G2n)/2 % INDICAÇÃO MÉDIA RADIAÇÃO 2
EG2=(G2-G2n)/2 %ERRO MÉDIO RADIAÇÃO 2
IG3=(G3+G3n)/2 % INDICAÇÃO MÉDIA RADIAÇÃO 3
EG3=(G3-G3n)/2 %ERRO MÉDIO RADIAÇÃO 3

```

Figura 13 Cálculo da média da radiação e erro (Autor).

A emissividade e a incerteza associada são calculadas na rotina da Figura 14. Nesta rotina os valores médios de radiação e erro calculados a partir da temperatura aparente são inseridos na Equação 14 de emissividade. A incerteza é obtida pelas Equações 16, 17 e 18 contidas no desenvolvimento matemático, Capítulo 3. Nestas equações, os erros médios são substituídos originando o erro percentual da emissividade calculada.

```

e=(IG2-IG3)/(IG1-IG3) %CÁLCULO DA EMISSIVIDADE

DELTA_NUM= abs(EG2+EG3) %MEDICÃO CORRELACIONADA DIRETA

DELTA_DEN= abs(EG1+EG3) %MEDICÃO NÃO CORRELACIONADA

DELTA_E= abs((DELTA_NUM/(IG2-IG3))-(DELTA_DEN/(IG1-IG3))) %MEDICÃO
CORRELACIONADA DIRETA

Perct_erro=DELTA_E*100/e

fprintf('Resultado da medição indireta de emissividade. e=%d +/-
%e',e,DELTA_E)

```

Figura 14 Cálculo de emissividade e do erro associado (Autor).

O programa desenvolvido facilita os cálculos de integração necessários para obter a emissividade e torna simplificada a aplicação da metodologia desenvolvida. Além disso, apresenta a qualidade dos resultados uma vez que inclui os valores de incerteza nos cálculos.

A incerteza da emissividade obtida através do *software* desenvolvido possui as características da incerteza informada pelo usuário, assim, se for informada a incerteza padrão ou mesmo a incerteza expandida, o *software* calculará a incerteza conforme o tipo informado

nos dados de entrada. Em ambos os casos os resultados apresentados possuem o mesmo nível de confiança.

Para avaliar a metodologia foi realizada uma averiguação experimental tendo como corpo de prova uma placa de aço galvanizado. O objetivo é obter a emissividade utilizando o termovisor e a fonte de radiação térmica. Ao fim do teste o resultado obtido é comparado com o método de simulação de corpo negro na amostra amplamente difundido na literatura.

Capítulo 6: Procedimento Experimental

A metodologia desenvolvida propõe a criação de uma sequência de passos a ser realizada na superfície estudada a fim de estimar sua emissividade e sua incerteza associada. Para isso foi desenvolvido um experimento, em ambiente controlado, com intuito de aplicar de forma simples e objetiva o método proposto.

No experimento desenvolvido foi utilizada, como corpo de prova, uma placa de aço galvanizado cuja emissividade era desconhecida. Este material tem vasta aplicação no setor de instalações elétricas, pois além de conduzir eletricidade possui boa resistência mecânica e sofre baixo efeito de corrosão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). A peça utilizada possui espessura de 1,25 mm conforme informado pelo fabricante (ARCELOR MITTAL, 2016). A espessura do material precisa ser definida, pois uma vez definida a seção transversal é possível determinar a capacidade de corrente suportada pela placa (MAMEDE FILHO, 2010).

Conforme a metodologia, o corpo de prova deve apresentar temperatura acima da temperatura ambiente, para caracterizar uma situação real de inspeção de manutenção. Para isso é necessário aquecer a superfície estudada. Isto foi feito com a passagem de corrente pela peça. A corrente foi fornecida por uma máquina de solda modelo NM 250 Turbo do fabricante Bambozzi. Para este experimento a fonte forneceu 55A de corrente.

Com o valor da corrente da fonte determinado em 55A, passou-se ao dimensionamento do corpo de prova para que seja aquecido com a passagem da corrente fornecida pela fonte. Para tanto adotou-se uma seção retangular de 16 mm² em uma chapa com espessura de 1,25 mm a largura desta será de 12,90 mm. Com essa área, a placa de aço galvanizado pode conduzir corrente de forma segura e, além disso, esta seção transversal propicia um aquecimento considerável no material. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Além do aquecimento, verificou-se também que a largura do corpo de prova apresenta uma área adequada de captura de imagens pelo termovisor. Com a seção transversal definida o comprimento da amostra fica a critério, lembrando que este deve ser suficiente para uma operação segura (BRASIL, 2005, 2011).

Para este estudo de caso foi utilizado um corpo de prova com 400 mm de comprimento na qual foi fixado no suporte sobre a bancada de testes. Nas extremidades do corpo de prova foram conectados os terminais da fonte de corrente de forma que aquele sofra aquecimento com a passagem da corrente elétrica. A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** mostra a montagem da bancada experimental com o posicionamento do corpo de prova, do termovisor e da fonte de radiação.

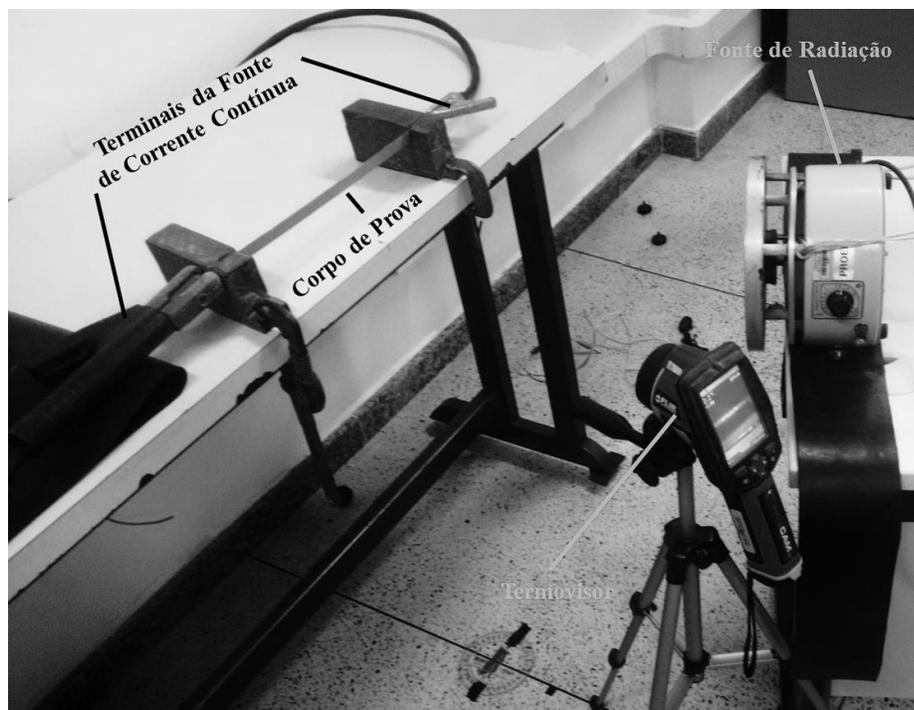


Figura 15 – Bancada experimental (Autor)

Na metodologia proposta duas etapas são realizadas com o corpo de prova em aquecimento. Uma ocorre quando a radiação captada (E_b) provém somente do corpo de prova e outra sob influência da fonte externa de radiação (J). Nestas etapas o termovisor e a fonte de radiação térmica são utilizados. Uma terceira etapa é realizada para determinação da radiação refletida (G) pela superfície do corpo de prova.

6.1 Etapas de medição

6.1.1 Primeira Etapa de Medição: Medição de T_j para Determinação da Radiação Total J Emitida pelo Corpo de Prova

A Figura 16 mostra o arranjo experimental montado para determinar a radiação total emitida pelo corpo de prova, para a realização da primeira etapa de medidas. Nesta etapa a fonte de radiação e o termovisor são posicionados a uma distância d suficiente para que haja influência da primeira sobre o corpo de prova. A variação dessa distância não é objetivo deste trabalho. Para determinar a distância d alguns pontos como segurança com os equipamentos aquecidos (BRASIL, 2011), resolução do termovisor e as dimensões do laboratório foram consideradas na determinação da distância. Isto levou a adotar o valor de 0,60 metros como a distância de separação entre a fonte de radiação e o corpo de prova.

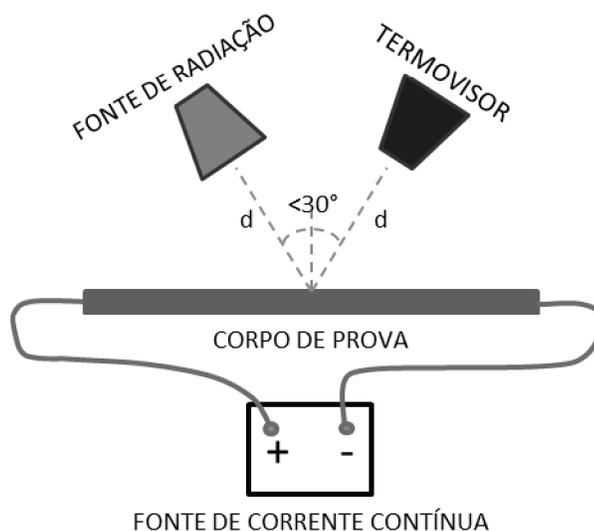


Figura 16 Arranjo experimental para determinar a radiação total emitida pelo corpo de prova (Autor).

Mantendo a distância de 0,60 metros, foi formado o ângulo de 30° entre a fonte de radiação e o termovisor (MUNIZ, 2014; VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Na determinação do ângulo, tomou-se como referência o centro do corpo de prova e com ajuda do transferidor foi marcado o ângulo de 30° entre o termovisor e a fonte de radiação. Este valor permanecerá fixo uma vez que não faz parte de experimento variar o ângulo entre equipamentos.

6.1.2 Segunda Etapa de Medição: Medição de T_{E_b} para Determinação da Radiação E_b Emitida pelo Corpo de Prova, .

A segunda etapa da metodologia consiste em obter a radiação emitida (E_b) pelo corpo de prova. A Figura 17 mostra o arranjo experimental usado nesta etapa. Observa-se que este permanece o mesmo da Figura 16, apenas se diferenciando por apresentar um objeto utilizado para impedir a propagação da radiação proveniente da fonte. O arranjo da Figura 17 permite que ao bloquear a fonte de radiação, o termovisor capture apenas a radiação emitida pelo aquecimento do corpo de prova mantendo o mesmo ângulo e distância d da etapa anterior.

A Figura 17 mostra o bloqueio da radiação proveniente da fonte de radiação. Para isso, foi utilizada uma placa de madeira de eucalipto no tamanho de 30 x 40 centímetros. Este material apresenta boa atenuação à radiação térmica e não se danifica quando em contato com a superfície aquecida (NAVROSKI et al., 2010; RAUBER, 2011). Nesta etapa, toda vez que se obteve a radiação emitida pelo corpo de prova, a fonte de radiação foi bloqueada pela placa de madeira.

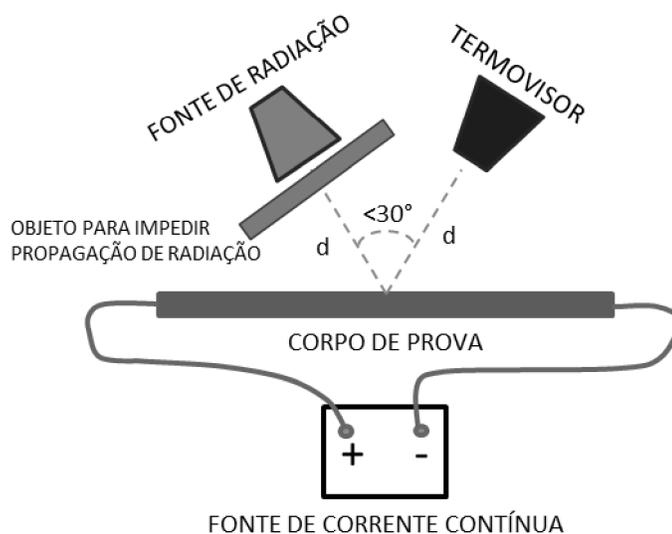


Figura 17 Arranjo experimental para obtenção da radiação emitida pelo corpo de prova (Autor).

Nas duas etapas anteriormente descritas a fonte de radiação utilizada nos experimentos é uma placa de aquecimento marca Quimis, modelo Q-261 -22, 220 V, 552 W, com controle de temperatura. Esta foi revestida com tinta preta fosca para altas temperaturas (600 °C) com o objetivo de aproximá-la de um radiador ideal, ou seja, um corpo negro (MUNIZ, 2014). O

equipamento foi alimentado eletricamente por uma tensão de 220V, e a determinação de sua temperatura faz parte da terceira etapa da metodologia.

A decisão de utilizar a placa de aquecimento como fonte de radiação se deu após pesquisa com outras duas fontes. Foram testadas como fonte de radiação uma lanterna com lâmpada de halogênio H3 de 55W (BLACK E DECKER, 2007) e um conjunto de LED infravermelho de 5mm (EVERLIGHT, 2005). Nos dois casos o objetivo era criar um dispositivo portátil podendo ser utilizado na inspeção termográfica. Porém, as duas fontes de radiação testadas não produziram resultados satisfatórios.

A lanterna de halogênio (BLACK E DECKER, 2007) apresentou seus raios luminosos dispersos, ou seja, a radiação fornecida pela lanterna na forma de luz não tinha seu foco concentrado sobre a superfície inspecionada não sendo perceptível para o termovisor.

Outro teste foi feito com conjunto de LED infravermelho (EVERLIGHT, 2005) que operam com faixa de comprimento de onda padronizado (0,88 até 1,04) μm sendo esta faixa fora da faixa de comprimento de onda típica de operação de um termovisor (7,00 até 14,00) μm . Portanto, em ambos os casos não foi possível adotar tais fontes de radiação. Assim, comparando a placa de aquecimento, a lanterna de lâmpada de halogênio e o conjunto de LED infravermelho a que obteve o melhor resultado foi a placa de aquecimento, sendo esta adotada durante todas as etapas dessa metodologia.

6.1.3 Terceira Etapa de Medição: Medição de T_G para Determinação da Radiação G Refletida pelo Corpo de Prova.

A determinação da temperatura da placa de aquecimento, usada como fonte de radiação, consiste em direcioná-la ao termovisor, configurado com emissividade igual a 1. O termovisor é posicionado perpendicular à placa e afastado dela da mesma distância d das etapas anteriores. A Figura 18 mostra como deve ser realizada a captura das imagens para se obter a temperatura da fonte de radiação.

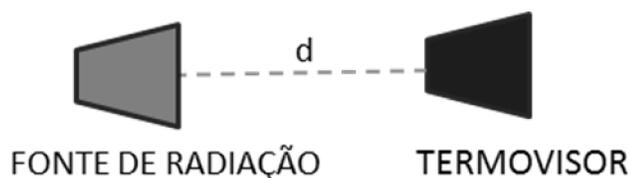


Figura 18 Arranjo experimental para se obter a temperatura da fonte de radiação (Autor).

6.2 Termovisor e obtenção de outras medições

A captura das imagens termográficas de todas as etapas descritas foi realizada com o termovisor *Flir BCAM SD* pertencente ao curso de Eletrotécnica do Instituto Federal do Espírito Santo *campus* Vitória. O equipamento possui certificado de calibração rastreado junto à Rede Brasileira de Calibração. A Tabela 2 mostra as características do equipamento onde é possível destacar a faixa espectral de comprimento de onda e a incerteza associada à medição, parâmetros importantes que serão utilizados no cálculo da emissividade.

Tabela 2 Característica do termovisor *Flir BCAM SD* (Adaptador de FLIR, 2013).

Característica	Valor
Fabricante	Flir
Modelo	BCAM SD
Resolução	0,1 °C
Incerteza	1,9°C ou 1,9% (o que for maior)
Faixa espectral	7,5 – 13 μm

As imagens capturadas pelo termovisor em todas as etapas do experimento foram enviadas ao *software FlirTools*. Este é fornecido pelo fabricante sendo mais bem explicado no item 2.5 desta dissertação.

Como detalhado no Capítulo 2, na seção que trata do *software FlirTools*, para análise da imagem, o programa necessita como dados de entrada do valor da temperatura ambiente e da umidade relativa do local em que foi realizada a captura, além da distância entre o termovisor e o corpo de prova (FLIR, 2014).

Os parâmetros temperatura ambiente e umidade relativa foram medidos com o termo higrômetro marca MINIPA modelo MT-240 (MINIPA, 2009). Os dados medidos foram fornecidos ao *software* do termovisor para cálculo da temperatura.

Com a inserção dos parâmetros no *FlirTools* o programa retornou em sua aba *Measurements* os valores da temperatura máxima, mínima e média da área selecionada (FLIR, 2014). Nos experimentos foi adotada a temperatura máxima dentro da área selecionada na imagem uma vez que se desejava obter a maior temperatura aparente atingida pela superfície.

Os valores de temperatura obtidos pelo *software* juntamente com a incerteza associada às três etapas da metodologia foram inseridos no programa desenvolvido na plataforma

MATLAB (THE MATH WORKS, 2009), e foi calculada a emissividade e sua incerteza associada.

O local de realização dos experimentos foi o Laboratório de Energia localizado no *campus* Vitória do Instituto Federal do Espírito Santo. Os condicionadores de ar e a iluminação artificial foram mantidos desligados durante os experimentos.

Para o experimento foram feitas 30 medições de temperatura para cada uma das três etapas da metodologia gerando assim 30 valores de emissividade. Segundo (MARTINS, 2010; MUNIZ, 2014) essa quantidade de amostras permite uma quantidade “boa” de graus de liberdade para incerteza padrão do Tipo A. Isso permitiu também a execução das medições em um curto intervalo de tempo sem variações significativas da temperatura ambiente e umidade relativa.

A metodologia experimental permitiu obter a emissividade e sua incerteza de forma simples e rápida visando se tornar parte da rotina de uma inspeção termográfica que produza resultados assertivos e com qualidade.

Capítulo 7: Resultados e Discussões

7.1 Cálculo da Emissividade a Partir do Método Proposto

Com o objetivo de avaliar a resposta da metodologia proposta para o cálculo da emissividade, foi realizado o experimento tendo como corpo de prova uma placa de aço galvanizado que terá sua emissividade determinada.

7.1.1 Preparação do experimento

O corpo de prova utilizado no experimento possui comprimento de 400 mm, com largura de 12,90 mm e espessura de 1,25 mm, equivalente a seção transversal de um cabo de 16 mm² (MAMEDE FILHO, 2010). O corpo de prova foi preso ao suporte e aquecido através da passagem de uma corrente de 55 A fornecida pela fonte de corrente. A Figura 19 mostra a montagem do experimento com o corpo de prova fixado e os terminais da máquina de solda conectados.



Figura 19 Montagem do experimento com a fixação do corpo de prova (Autor).

Com o corpo de prova fixado, o experimento segue o procedimento descrito no Capítulo 6. A fonte de radiação térmica, neste caso a placa de aquecimento, e o termovisor são posicionados com ângulo de 30° entre si com visto na Figura 20. Ambos se encontram a uma distância de 0,60 metros do corpo de prova.

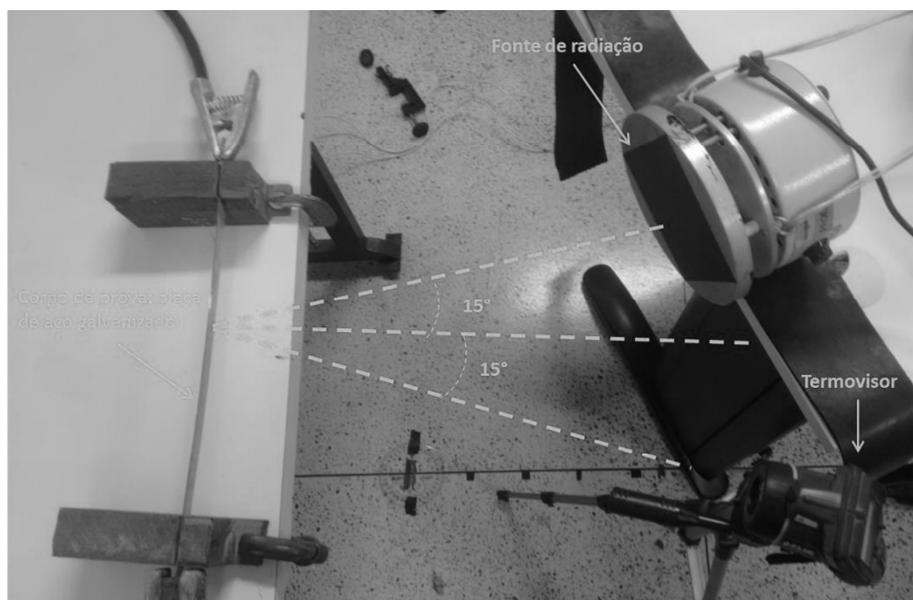


Figura 20 Montagem do experimento incluindo a fonte de radiação e o termovisor (Autor).

Para realização e possível reprodução do experimento, algumas medições foram feitas para caracterização da montagem. Na Tabela 3 são encontradas as dimensões do corpo de prova usado, a distância entre a amostra e o equipamento e outras características. Para tanto nota-se que apenas a temperatura atmosférica e a umidade relativa do ar são utilizadas no cálculo da emissividade. Estas duas são úteis para o tratamento das imagens no *FlirTools*.

Tabela 3 Grandezas medidas para caracterização do experimento (Autor).

Grandeza Medida	Valor Encontrado	Instrumento de Medição
Temperatura atmosférica	24 °C	Termohigrômetro
Umidade relativa do ar	70 %	Termohigrômetro
Distância entre termovisor e corpo de prova	600 mm	Trena
Distância entre fonte de radiação e corpo de prova	600 mm	Trena
Ângulo de separação entre termovisor e fonte de radiação	30°	Transferidor
Comprimento do corpo de prova	400 mm	Paquímetro
Largura do corpo de prova	12,90 mm	Paquímetro
Espessura do corpo de prova	1,25 mm	Paquímetro
Corrente fornecida pela fonte	55 A	Alicate Amperímetro

O experimento foi realizado seguindo rigorosamente a metodologia e as etapas experimentais citadas respectivamente nos capítulos 4 e 6 desta dissertação. Em todas elas, as grandezas informadas na Tabela 3 foram mantidas constantes.

7.1.2 Primeira Etapa – Medição da Temperatura da Radiação Total Emitida pelo Corpo de Prova - T_j

Nesta etapa a fonte de calor é direcionada para o corpo de prova e a imagem térmica capturada pelo termovisor representa a radiação total emitida pelo corpo de prova, ou seja, a radiação própria mais a refletida pelo corpo de prova.

A Figura 21 mostra uma das imagens capturadas durante esta etapa de medição. Nota-se que no centro do corpo de prova a área mais clara da imagem mostra a influência da fonte de radiação sobre a amostra, ou seja, nas zonas que apresentam coloração mais esbranquiçada a temperatura é maior uma vez que esta recebe uma quantidade maior de radiação que nesse caso está sendo fornecida pela fonte de calor.

A região selecionada na imagem apresenta coloração que varia de azul escuro ao branco. Observada a escala lateral, que varia de 25°C a 100°C, as regiões mais claras próximas ao centro do corpo de prova são as que apresentam temperaturas maiores.

A área selecionada para análise da temperatura da primeira etapa de medidas corresponde a um retângulo dentro da imagem que inclua toda área do corpo de prova conforme visto na Figura 21.

Com a área selecionada e os parâmetros de distância, umidade atmosférica e temperatura ambiente inseridos, 60 cm, 70 % e 24,0°C respectivamente, o *software FlirTools* retorna os valores de temperatura máxima, mínima e média. Para o cálculo de emissividade temperatura (T_j) será a maior temperatura encontrada na região selecionada. Na Figura 21, a maior temperatura encontrada corresponde a 204,4°C.



Figura 21 Imagem capturada no experimento para medição de T_j a ser usada no cálculo da radiação total emitida pelo corpo de prova (Autor).

A temperatura obtida na Figura 21 corresponde à etapa de cálculo da radiação total emitida pelo corpo de prova. Com a temperatura (T_j) e a incerteza de sua medição, aqui adotada igual a 1,9°C, é formado o primeiro grupo de dados de entrada no programa desenvolvido para calcular a emissividade.

7.1.3 Segunda Etapa de Medidas – Medição da Temperatura do Corpo de Prova T_{Eb}

A segunda etapa da metodologia é a aquisição, por meio do termovisor, da temperatura da radiação emitida pelo corpo de prova (T_{Eb}). A Figura 22 mostra uma das imagens capturadas nesta etapa do experimento.



Figura 22 Imagem capturada no experimento para medição de T_{Eb} usada no cálculo da radiação emitida pelo corpo de prova (Autor).

Na análise da imagem, o *software FlirTools* determinou como temperatura aparente da radiação emitida pelo corpo de prova (T_{Eb}) a maior temperatura encontrada na região selecionada, que a partir da Figura 22 corresponde a 49,4°C. Esta é a temperatura medida do corpo de prova sob condições de temperatura e umidade atmosférica de 24,0°C e 70 % respectivamente.

A temperatura obtida na Figura 22 corresponde à etapa de cálculo da radiação emitida somente pelo corpo de prova. Com a temperatura (T_{Eb}) e sua incerteza de medição, aqui adotada igual a 1,9°C, é formado o segundo grupo de dados de entrada no programa desenvolvido para calcular a emissividade.

7.1.4 Terceira Etapa – Medição da Temperatura da Fonte de Radiação Externa T_G

Por fim a última etapa do procedimento experimental consiste em obter a temperatura da fonte de radiação (T_G). O resultado dessa medição é necessário para calcular a radiação refletida pelo corpo de prova.

A medição da temperatura da radiação refletida (T_G) é realizada direcionando o termovisor perpendicularmente à placa de aquecimento com a mesma distância de 0,60 metros utilizada nas etapas anteriores. A Figura 23 mostra uma das imagens capturadas, bem

como a área selecionada no *software FlirTools* para medição da temperatura. Verificando a imagem, nota-se que na placa de aquecimento, na área onde foi aplicada a tinta preta fosca, a temperatura tem distribuição uniforme, ou seja, todo o local apresenta coloração avermelhada.

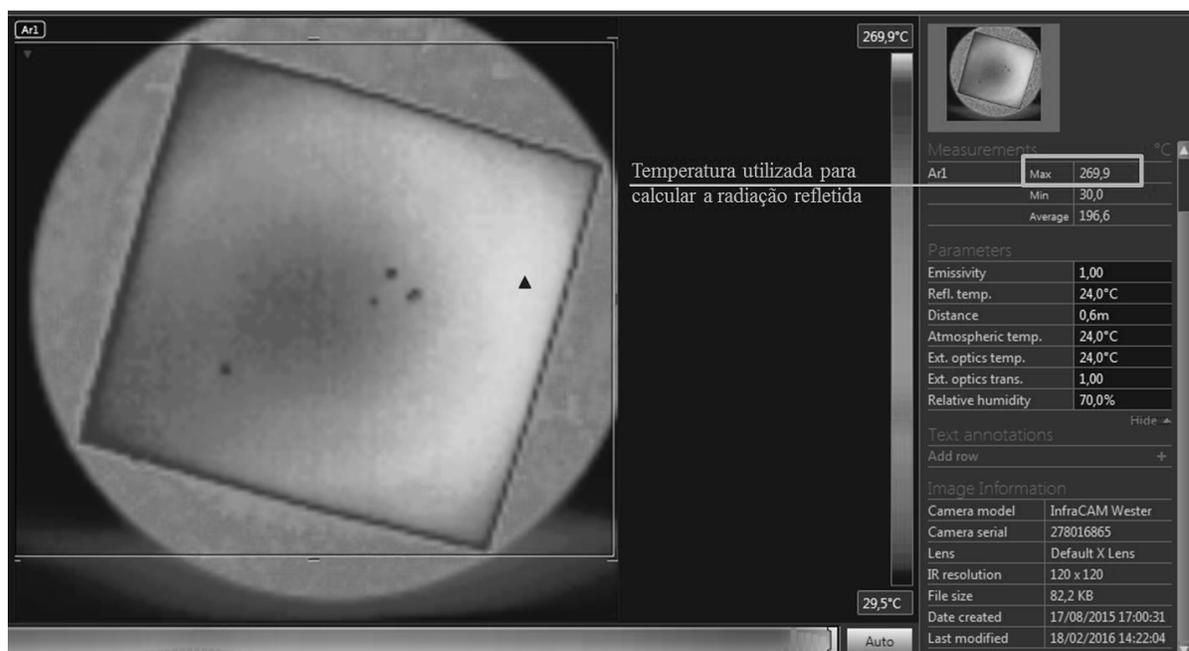


Figura 23 Imagem capturada no experimento para cálculo da radiação refletida pelo corpo de prova (Autor).

A temperatura utilizada no cálculo da radiação refletida é a máxima encontrada dentro da área selecionada, neste caso corresponde a região cuja área da placa de aquecimento foi pintado de preto fosco e que na imagem da Figura 23 é o retângulo avermelhado. De acordo com o *software FlirTools* a temperatura máxima nessa região é de 269,9°C. A temperatura em destaque juntamente com sua incerteza de medição será valor de entrada para calcular a emissividade. Este é o terceiro conjunto de dados para o cálculo da emissividade.

Cada valor de temperatura obtido nas três etapas descritas, juntamente com suas incertezas de medição, formam um conjunto de dados que inseridos no *software* desenvolvido em MATLAB permitirão o cálculo da emissividade e sua incerteza.

A Tabela 4 mostra todos os valores de temperatura encontrados na execução do procedimento experimental. O agrupamento de cada três temperaturas, T_{Eb} , T_J e T_G , forma uma amostra de um total de trinta medições. Cada amostra, juntamente com a incerteza de medição, é inserida no programa de cálculo da emissividade desenvolvido. Este por sua vez

retorna com dado de saída os valores de emissividade e incerteza exibidos na coluna resultados da Tabela 4.

Tabela 4 Valores medidos das temperaturas T_{Eb} , T_J e T_G e valores calculados da emissividade e incerteza associada (Autor).

Número da amostra	Temperatura obtida para calcular a radiação emitida pelo corpo de prova (T_{Eb})	Temperatura obtida para calcular a radiação total emitida pelo corpo de prova (T_J)	Temperatura obtida para calcular a radiação refletida pelo corpo de prova (T_G)	Resultados	
				Emissividade	Incerteza
1	34,0	201,5	269,7	0,2894	0,0396
2	36,9	202,4	269,9	0,2897	0,0400
3	42,5	202,7	270,2	0,2964	0,0396
4	44,1	203,8	270,0	0,2931	0,0406
5	45,6	203,7	270,3	0,2964	0,0401
6	49,3	204,2	269,7	0,2972	0,0408
7	42,8	204,1	269,9	0,2897	0,0410
8	45,7	204,3	270,2	0,2935	0,0407
9	47,5	205,4	270,0	0,2903	0,0417
10	46,7	205,0	270,3	0,2920	0,0412
11	46,5	204,7	263,4	0,2706	0,0472
12	44,7	205,1	263,7	0,2676	0,0475
13	45,8	205,4	263,7	0,2676	0,0477
14	49,0	205,8	263,5	0,2690	0,0481
15	45,2	205,5	264,4	0,2687	0,0472
16	47,2	205,2	264,6	0,2732	0,0465
17	45,9	206,3	264,7	0,2669	0,0477
18	45,2	206,5	265,5	0,2678	0,0472
19	46,1	205,6	265,8	0,2740	0,0458
20	47,4	199,5	266,1	0,3045	0,0397
21	47,0	200,6	266,3	0,2996	0,0405
22	50,5	201,7	266,7	0,3006	0,0409
23	51,3	203,1	266,9	0,2959	0,0419
24	48,9	203,6	267,8	0,2933	0,0418
25	48,3	204,2	265,7	0,2829	0,0443
26	49,3	204,1	268,2	0,2928	0,0419
27	50,5	204,6	269,1	0,2951	0,0415
28	49,4	205,6	267,4	0,2835	0,0441
29	48,3	197,1	267,3	0,3205	0,0368
30	45,8	197,3	266,9	0,3148	0,0374

A quantidade de trinta amostras segundo (MARTINS, 2010; MUNIZ, 2014) fornece uma “boa” quantidade de graus de liberdade para incerteza-padrão do Tipo A.

Os trinta resultados de emissividade geram média aritmética, μ_I , de 0,2879 e desvio padrão, σ_I , de 0,0144. A incerteza $u(I)$ de medição de emissividade é calculada através da Equação 24 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008) chegando neste caso a um valor de incerteza igual a 0,0428. Como o termovisor e os *softwares* de análise trabalham com duas casas decimais, os resultados da média aritmética, desvio padrão e incerteza foram arredondados respectivamente para 0,29, 0,02 e 0,05 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977; JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM), 2008).

$$u(I) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k - \bar{I})^2}{n}} \quad (24)$$

Onde:

$u(I)$ incerteza-padrão das medições calculadas a partir de “ n ” medições repetidas;

I_k k -ésima indicação;

\bar{I} a média das “ n ” indicações;

n número de indicações repetidas efetuadas.

A emissividade calculada a partir do experimento realizado com base na metodologia proposta foi de $0,29 \pm 0,05$. Com o objetivo de validar o método proposto, usando o mesmo corpo de prova, foi feita uma comparação com o método de simulação de corpo negro na amostra descrito por Perin (2009). O método de simulação de corpo negro na amostra consiste em obter a emissividade da superfície estudada a partir da referência a outra superfície cuja emissividade seja conhecida. O teste produz um resultado médio de emissividade que será comparado com o da metodologia proposta.

7.2 Cálculo da Emissividade Através da Simulação de Corpo Negro na Amostra.

O método da simulação de corpo negro na amostra proposto por Perin (2009) consiste em obter a emissividade de um objeto por meio de uma superfície com emissividade conhecida. Neste método supõe-se que ambas as superfícies estejam a mesma temperatura.

Para o método de simulação de corpo negro na amostra, o termovisor deve primeiramente ser direcionado à superfície de emissividade conhecida, em seguida no termovisor configura-se sua emissividade para a mesma da superfície conhecida. Por fim é feita a medição da temperatura da superfície de emissividade conhecida. Realizada a medição, o termovisor agora é direcionado para o objeto de interesse e a emissividade deste é ajustada até que o valor de temperatura seja o mesmo daquela medida na superfície de emissividade conhecida. O valor de emissividade encontrado é o que corresponde à do objeto em análise (PERIN, 2009).

Os valores de emissividade obtidos com a aplicação do método de simulação de corpo negro na amostra foram utilizados para comparar com os resultados experimentais encontrados através da aplicação da metodologia proposta. Para isso o método da simulação de corpo negro na amostra foi realizado com o mesmo corpo de prova, nas mesmas condições de aquecimento, adotado no procedimento experimental proposto neste trabalho.

Para aplicação do método de simulação da superfície conhecida foi utilizada uma fita isolante com emissividade de 0,95. A fita foi fixada no corpo de prova utilizado nas etapas experimentais. Este por sua vez foi aquecido através da passagem de corrente elétrica até atingir a mesma temperatura das etapas experimentais realizadas com aplicação da metodologia proposta.

Com o corpo de prova preparado para o teste de comparação, o termovisor é posicionado perpendicularmente ao corpo de prova, mitigando possíveis erros de medição de emissividade no que diz respeito ao posicionamento do termovisor em relação ao corpo de prova (MUNIZ, 2014). Além disso, ambos são afastados a uma distância de 0,60 metros mantendo as mesmas características dos ensaios experimentais realizados.

No teste de comparação, o corpo de prova é submetido ao aquecimento. Após a estabilização térmica, capturam-se as imagens com o termovisor em que o ajuste de emissividade será igual ao da fita isolante, ou seja, 0,95. Em seguida as imagens são enviadas ao *FlirTools* para serem analisadas.

As imagens inseridas no *software* foram analisadas considerando a umidade e temperatura atmosféricas de 70% e 24,0°C respectivamente. Foram selecionadas duas regiões, uma corresponde ao local no qual foi fixada a fita com emissividade conhecida e outra no corpo de prova. Na Figura 24, a parte da imagem marcada por E11 corresponde à superfície para a qual se conhece o valor da emissividade e a marcada por Ar2 corresponde à superfície para a qual se deseja calcular a emissividade.

Para se determinar a emissividade do corpo de prova deve-se inserir no *software FlirTools* os dados de distância, temperatura e umidade atmosférica e em seguida o valor de emissividade da superfície conhecida, neste caso 0,95. Após o procedimento, o *FlirTolls* retorna as temperaturas máxima, mínima e média, sendo adotado o valor médio como o valor da temperatura para o cálculo da emissividade. Como a área selecionada da superfície, neste caso, se apresenta uniforme foi adotada a temperatura média para a estimativa de emissividade.



Figura 24 Imagem gerada pelo método da simulação de corpo negro na amostra (Autor)

Na sequência, a emissividade deve ser variada no *software FlirTools* até que se tenha a temperatura média da região Ar1 igual ou próxima àquela obtida na etapa anterior. O valor encontrado corresponde à emissividade do corpo de prova.

A Tabela 5 apresenta os valores de emissividade do corpo de prova além dos valores de temperatura obtidos no teste comparativo. Nesta tabela, a média aritmética, μ_2 , dos trinta valores ensaiados é de 0,31 com desvio padrão, σ_2 , de 0,02. Segundo (MARTINS, 2010; MUNIZ, 2014) as trinta amostras equivalem a uma quantidade “boa” de graus de liberdade úteis para encontrar a incerteza-padrão Tipo A e comparar valores. Os valores de média e desvio padrão foram devidamente arredondados respeitando a quantidade de casas decimais dos valores de emissividade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977).

Como o *software FlirTools* de análise não fornece a incerteza nas medições, é possível considerar que a incerteza-padrão seja o próprio desvio padrão (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Portanto o resultado obtido com o método de simulação de corpo negro na amostra produziu um valor de emissividade, ε_2 , de $0,31 \pm 0,02$.

Os resultados obtidos a partir dos dois métodos foram analisados de forma qualitativa e quantitativa. Em ambas as análises o resultado do método de simulação de corpo negro na amostra foi assumido como verdadeiro, ou seja, a intenção na análise dos resultados é comparar a metodologia proposta com a estimativa de emissividade proposta por Perin (2009).

O valor obtido no método de simulação de corpo negro na amostra apresenta resultado confiável (PERIN, 2009), porém, uma vez que é necessário introduzir sobre o corpo de prova outra superfície torna este método perigoso do ponto de vista da segurança. Por exemplo, se o equipamento em análise estiver energizado, todo o procedimento de desenergização (BRASIL, 2005) deverá ser seguido para que se possa introduzir no equipamento a superfície com emissividade conhecida, tornando este procedimento custoso e de risco para o trabalhador.

Tabela 5 Valores medidos das temperaturas médias da superfície conhecida e do corpo de prova e valores calculados da emissividade (Autor).

Número da Amostra	Temp. Méd. da superfície conhecida (°C).	Temp. Méd. do corpo de prova (°C)	Emissividade calculada
1	48,0	48,0	0,36
2	48,2	48,0	0,36
3	48,6	48,4	0,33
4	48,1	48,2	0,34
5	48,4	48,6	0,36
6	59,5	59,6	0,30
7	62,0	62,5	0,30
8	62,5	62,9	0,32
9	63,2	63,0	0,31
10	64,2	64,3	0,29
11	65,2	65,7	0,29
12	65,7	65,9	0,29
13	66,2	66,1	0,31
14	67,0	67,1	0,30
15	67,8	67,8	0,29
16	70,5	69,9	0,30
17	71,1	71,7	0,29
18	71,7	71,9	0,29
19	74,8	74,1	0,29
20	74,4	74,7	0,29
21	77,0	77,6	0,29
22	80,1	80,3	0,28
23	81,1	81,8	0,33
24	80,9	80,6	0,30
25	81,3	81,3	0,28
26	83,3	83,3	0,29
27	84,0	84,3	0,29
28	83,2	83,0	0,29
29	82,3	82,5	0,30
30	84,0	84,0	0,34

7.3 Discussão Quantitativa dos Resultados

Na análise quantitativa dos resultados será utilizada a ferramenta estatística de comparação *t-student*. Esta ferramenta permite a comparação de duas populações independentes de tamanhos amostrais diferentes apenas utilizando a média e o desvio padrão (BUSSAB; MORETTIN, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2006). Nos dois casos as

medições foram realizadas independentemente uma da outra. Os resultados encontrados estão na Tabela 6.

Tabela 6 Resultados obtidos nos dois experimentos comparativos (Autor).

Experimento de estimativa de emissividade	Média aritmética (μ)	Desvio padrão (σ)	Número amostral (n)	Incerteza Padrão (u)
Metodologia proposta (Experimento 1)	0,29	0,02	30	0,05
Simulação de corpo negro na amostra (Experimento 2)	0,31	0,02	30	0,02

Para comparação dos dois conjuntos de amostras, duas hipóteses são formuladas. A primeira, conhecida na literatura como hipótese de nulidade define como verdade que a média do primeiro conjunto de amostra é igual à do segundo (BUSSAB; MORETTIN, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2006). No caso de experimentos iguais então $\mu_1 = \mu_2$. A segunda é a hipótese alternativa, contrária à primeira, ou seja, as médias são diferentes entre amostras $\mu_1 \neq \mu_2$.

A probabilidade de rejeitar a hipótese de nulidade, sendo esta verdadeira, é medida pelo nível de significância, α . Esse índice mede a probabilidade da hipótese, dita como verdadeira, ser aceita ou rejeitada (MONTGOMERY; RUNGER, 2006). No caso dos experimentos realizados é importante que as médias dos valores de emissividade encontrados sejam iguais, assim o nível de significância será baixo e a chance dessa hipótese ser rejeitada será pequena. Tipicamente em experimentos com quantidade de amostras menores que 40 o nível de significância aceitável deve ser maior ou igual a 5% (BUSSAB; MORETTIN, 2010). No caso dos métodos que estão sendo avaliados deseja-se obter um nível de significância maior ou igual a 5% ou seja, deseja-se trabalhar com 95% de confiança de que a igualdade entre as médias seja verdadeira.

Para encontrar a probabilidade de aceitar a hipótese nula como verdadeira aplica-se a equação do teste *t-student* (MONTGOMERY; RUNGER, 2006). A Equação 25 mostra que a probabilidade, t , é calculada a partir da quantidade de amostras, da média e do desvio padrão dos dois resultados apresentados na Tabela 6.

$$t = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (25)$$

O objetivo nesta análise é provar que as médias obtidas em ambos os experimentos são estatisticamente iguais com nível de significância de 5%. Para que isso ocorra primeiramente deve-se consultar a tabela de distribuição *t-student* (BUSSAB; MORETTIN, 2010) e determinar o valor crítico para que as hipóteses possam ser comparadas. Na consulta à tabela de distribuição *t-student* o número de graus de liberdade (ν) da amostra é dado pela soma da quantidade das duas amostras menos dois assim o número de graus de liberdade (ν) é dado pela Equação 26 (BUSSAB; MORETTIN, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2006).

$$\nu = n_1 + n_2 - 2 \quad (26)$$

Para determinar o valor crítico do teste de hipótese, aplica-se a Equação 26 para n_1 e n_2 igual a 30, obtendo 58 graus de liberdade. Com esse valor e nível de significância de 5%, a tabela de distribuição de *t-student* (BUSSAB; MORETTIN, 2010) é consultada encontrando-se o valor crítico de 2,000. Isso mostra que para valor maior que o valor crítico a hipótese de aceitar que as médias são iguais é válida com certeza de 95% (MONTGOMERY; RUNGER, 2006). Esse valor comparativo é obtido através Equação 25 com dados da Tabela 6.

Aplicando a Equação 25 é encontrado o valor de 4,899. Comparando com o valor crítico conclui-se que este é maior podendo então afirmar que a hipótese de nulidade é verdadeira. Assim é possível dizer com confiança de 95% que o valor médio de emissividade obtido no experimento em que foi aplicada a metodologia proposta é igual à média do resultado do teste de simulação do corpo negro na amostra proposto por Perin (2009).

Os resultados experimentais obtidos com a aplicação da metodologia proposta nesta dissertação são considerados satisfatórios, porém algumas condições para que isso ocorra devem ser consideradas. A primeira condição é de que o experimento seja realizado num ambiente controlado onde não haja influência da luz solar e nem do vento que interferem diretamente nas análises das imagens e dos resultados obtidos (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). A segunda condição é que a distância adotada entre a fonte de radiação e o corpo de prova deve ser de 600mm. A esta distância só é permitido que sejam realizadas medições para baixo nível de tensão pois, segundo a NR-10 (2005), para cada nível de tensão há um distância mínima de segurança para o operador. No caso de trabalhar com nível de tensões maiores haveria a necessidade de aumentar a distância sendo necessário realizar novos testes aplicando a mesma metodologia.

7.4 Discussão Qualitativa dos Resultados

Com os resultados dos dois experimentos será feita uma análise qualitativa comparando os valores das médias e as incertezas. Além disso, serão analisados os valores com as tabelas de emissividade usadas nas inspeções termográficas.

Nos Experimentos 1 e 2 os valores de emissividade encontrados foram respectivamente $0,29 \pm 0,05$ e $0,31 \pm 0,02$. Os resultados estão apresentados graficamente na Figura 25, na qual é possível ver que o valor de emissividade obtido com o método da simulação de corpo negro na amostra se encontra dentro do intervalo de resultados do experimento utilizando a metodologia proposta.

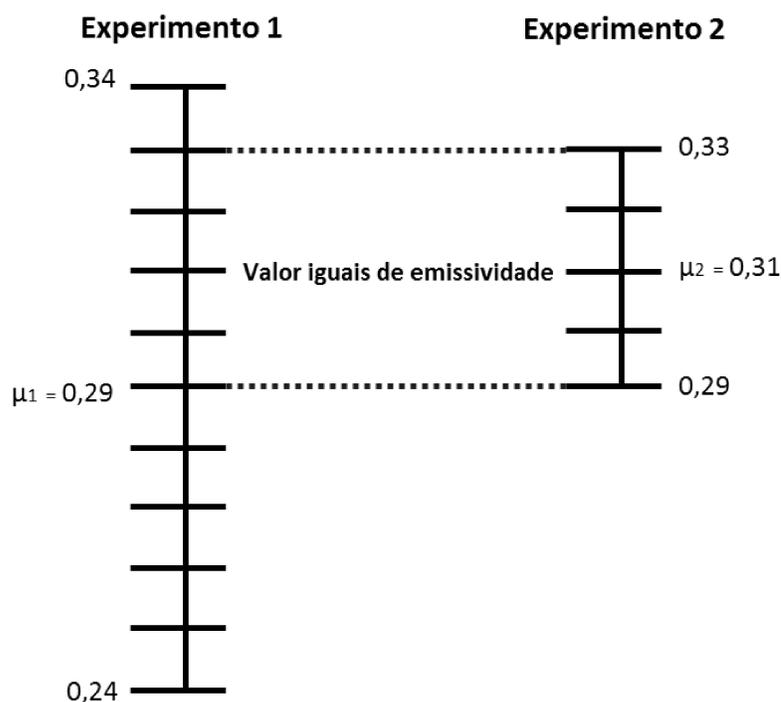


Figura 25 Diagrama esquemático de comparação dos valores de emissividade obtidos com os Experimentos 1 e 2 (Autor)

Outra análise qualitativa que pode ser feita é a comparação da média da emissividade encontrada por meio da metodologia proposta com o valor de emissividade tipicamente utilizada nas inspeções termográficas (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Na Figura 26, é apresentada a tabela da (CONTEMP, 2015) com a informação do tipo de material, sua especificação, temperatura, espectro e o correspondente valor típico de emissividade.

Material	Especificação	Temperatura em oC	Espectro	Emissividade	Lit.
Ferro galvanizado	Placa	92	T	0,07	4
Ferro galvanizado	Placa, oxidada	20	T	0,28	1
Ferro galvanizado	Placa, oxidada	30	T	0,23	1
Ferro galvanizado	Placa, oxidada	70	LW	0,85	9
Ferro galvanizado	Placa, oxidada	70	SW	0,64	9

Figura 26 Tabela de valores típicos de emissividade adaptado para materiais ferro galvanizado (Adaptado de CONTEMP, 2015)

Na Figura 26, a tabela mostra valores de emissividade para o material ferro galvanizado com especificação tipo placa. Como a tabela CONTEMP (2015) não apresenta em sua especificação “aço galvanizado”, adotou-se a nomenclatura ferro galvanizado na comparação com os resultados experimentais pois ela se aproxima do material utilizado como corpo de prova.

A tabela da Figura 26 apresenta a coluna Especificação nela há quatro valores em que a placa é oxidada. Os quatro valores com adjetivo oxidado confundem o inspetor no momento da inspeção correndo grave risco de medição errada de temperatura (MUNIZ et al., 2014). A metodologia proposta nesta dissertação apresenta um único resultado de emissividade, neste caso o inspetor efetuará o teste e obtendo apenas um único valor médio de emissividade juntamente com sua incerteza.

A tabela da Figura 26 apresenta também dois importantes parâmetros que influenciam o valor de emissividade: a faixa espectral considerada e a temperatura da superfície inspecionada. Essas duas condições aumentam a incerteza por parte do inspetor no momento de consultar a tabela de valores.

Na metodologia proposta, a emissividade é calculada na própria temperatura operacional do objeto inspecionado e no espectro que corresponde ao termovisor utilizado. Assim não há necessidade do inspetor consultar a tabela de valores típicos de emissividade, bastando apenas executar os procedimentos descritos, tornando o resultado confiável e gerando menos dúvidas no momento da inspeção.

Portanto, os resultados obtidos com a metodologia proposta nesta dissertação apresentam resultados satisfatórios indicando que a metodologia pode ser aplicada em inspeções termográficas, proporcionando resultado confiável comparável a método consolidado na literatura e apresentando vantagens econômicas e de segurança operacional.

Capítulo 8: Conclusão

8.1 Conclusões do Trabalho

A medição de emissividade em uma superfície é de fundamental importância na qualidade da medição de temperatura por termografia. Segundo Muniz et. al. (2014), a medição de emissividade influencia em mais de 62% no resultado final de medição de temperatura. Assim, estimar a emissividade de uma superfície requer um método que produza resultados confiáveis.

Na literatura técnica existem vários métodos de estimativa de emissividade em superfícies. Nela dois métodos se destacam pela simplicidade e praticidade de aplicação. São eles os métodos de simulação de corpo negro na amostra (PERIN, 2009) e o método de medição com temperatura conhecida (HOLMAN, 2011). Nesses dois métodos é possível obter a emissividade, com o equipamento em campo, realizando medições com o próprio termovisor, porém em ambos é necessário entrar em contato com a superfície avaliada.

A metodologia proposta contribui para a segurança de quem executa a inspeção, pois não é necessário que a pessoa que vai fazer a medição entre em contato a superfície do objeto para estimar a emissividade. A estimativa é acompanhada da incerteza de medição.

A metodologia proposta, além de ser simplificada e de fácil execução pelo inspetor, possibilita a inserção de um valor estimado de emissividade da superfície avaliada junto ao termovisor. Normalmente em inspeções termográficas não se conhece o valor de emissividade da superfície inspecionada e para tanto utilizam-se valores previamente tabelados.

Os valores tabelados de emissividade geralmente são especificados segundo o tipo e a superfície do material. O estado de conservação da superfície é avaliado visualmente pelo inspetor e varia conforme sua experiência causando dúvidas no momento de selecionar a emissividade do material.

A nova metodologia apresenta um único resultado de emissividade. Neste caso, o inspetor efetuará o teste obtendo apenas um único valor médio de emissividade, junto com a incerteza, sendo que o cálculo da emissividade é feito na própria temperatura do objeto inspecionado e no espectro que corresponde ao termovisor utilizado. Assim não há

necessidade do inspetor consultar a tabela de valores típicos de emissividade, bastando apenas executar os procedimentos descritos, tornando o resultado confiável e gerando menos dúvidas no momento da inspeção.

Para garantir resultados confiáveis, a metodologia proposta para estimar a emissividade foi testada em uma placa de aço galvanizado e os resultados obtidos foram comparados com o método de simulação de corpo negro na amostra (PERIN, 2009) na qual foram aplicadas as mesmas condições e amostra utilizada. Os resultados comprovaram com 95% de confiança que a emissividade média encontrada com o método novo proposto é igual à do método de simulação proposto por Perin (2009), tornando assim a metodologia proposta comparável a métodos consolidados na literatura técnica.

A metodologia proposta neste trabalho propicia de forma simplificada e prática a estimativa da emissividade de determinada superfície, no local em que ela se encontra, sem a necessidade de retirá-la do funcionamento normal, ou entrar em contato com a mesma.

8.2 Trabalhos Futuros

Com intuito de dar continuidade e aprimorar a pesquisa desenvolvida nesta dissertação, alguns temas de trabalhos futuros são sugeridos abaixo:

- Aplicar a metodologia proposta neste trabalho para outros materiais usados em manutenção elétrica tais como: cobre, alumínio, aço níquel, polímeros entre outros materiais comumente utilizados em equipamentos elétricos.
- Aperfeiçoar o *software* desenvolvido nesta dissertação inserindo uma interface gráfica com o usuário, entre outras melhorias.
- Aplicar a metodologia em ambientes fora de laboratório, em campo;
- Aplicar a metodologia proposta variando a distância entre o termovisor e o corpo de prova a fim de encontrar a melhor distância para estimar a emissividade.
- Modificar o ângulo existente entre a fonte de calor e o termovisor.
- Aplicar a metodologia com variação da temperatura do corpo de prova;
- Pesquisar sobre outros tipos de fonte de radiação que podem ser utilizadas na aplicação desta metodologia.

Referências Bibliográficas

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. DE. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Manole, 2008.

ÁLVARES, R. C. **Diagnóstico de Falhas em Pára-raios Utilizando Termografia**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica—Belo Horizonte, Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

ARCELOR MITTAL. **Chapas / Tiras / Blanks / Rolos Produtos Laminados a Quente Produtos Laminados a Frio**. Disponível em:

<<http://longos.arcelormittal.com.br/pdf/produtos/chapas-derivados/chapas-tiras-blanks-rolos/catalogo-chapas-tiras-blanks-rolos.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5891 - Regras de Arredondamento na Numeração Decimal** Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. 2ª. ed. [s.l.] Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5597 - Eletroduto de aço-carbono e acessórios, com revestimento protetor e rosca NPT — Requisitos** São Paulo, 2013.

AZEVEDO, L. C. S. DE; JUNIOR, A. M. G. DA S. Uso da Termografia na Manutenção Preditiva. **Revista de Divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 2, p. 155–158, 2012.

BLACK E DECKER. **Lanterna 1 milhão de velas** Callao Black e Deck, , 2007.

BRASIL. **NR 10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade** Brasília, Brasil Ministério do Trabalho e Emprego, , 2005.

BRASIL. **NR12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos** Brasília Ministério do Trabalho e Emprego, , 2011.

BUSSAB, W. DE O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 6ª. ed. [s.l.] Saraiva, 2010.

- CHRZANOWSKI, K. **Non-contact Thermometry - measurement errors**. 1^a. ed. Warsaw, Polonia: RDT Series, 2001. v. 7
- CONTEMP. **Adendo: Tabelas de Emissividade**. Disponível em: <http://www.contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela_de_Emissividades.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2015.
- DEL CAMPO, L. et al. Combined standard uncertainty in direct emissivity measurements. **Journal of Applied Physics**, v. 107, n. 11, 2010.
- EVERLIGHT. **Technical Data Sheet 5mm Infrared LED , T-1 3/4** Everlight Electronics Co. LTD Taiwan Everlight Electronics Corporation Ltd, , 2005.
- FLIR. **User's manual FLIR Tools** Flir Systems, , 2014.
- HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**. 8^a. ed. New York: Mc Graw Hill, 2011.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6^a. ed. Rio de Janeiro: John Wiley & Sons, 2007.
- JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). **Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement**, 2008.
- KAPLAN, H. **Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment**. 3. ed. Washington: The International Society for Optical Engineering, 2007.
- KERN, D. Q. **Processo de Transmissão de Calor**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1980.
- LIMA JUNIOR, P.; SILVEIRA, F. L. Sobre as incertezas do tipo A e B e sua propagação sem derivadas: uma contribuição para a incorporação de metrologia contemporânea aos laboratórios de física básica superior. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 2303, 2011.
- MALDAGUE, X. P. V.; MOORE, P. O. **Infrared and Thermal Testing (IR)**. 3. ed. Houston: Amer Society for Nondestructive, 2001.
- MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- MARTINS, M. A. F. **Contribuições para a avaliação da incerteza de medição no regime estacionário**. Dissertação de Mestrado Engenharia Industrial—Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2010.

MINIPA. **Digital thermo hygrometer MT-240**. Disponível em:

<<http://www.minipa.com.br/Content/Manuais/MT-240-1101-BR-EN-ES.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

MODEST, M. F. **Radiative Heat Transfer**. 2. ed. California: Elsevier Science, 2003.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5^a. ed. Arizona: Jhn Wiley & Sons, 2006.

MUNIZ, P. R. **Influência dos instrumentos, do ângulo de visada e do campo de visão do termovisor na execução de termografia por infravermelhos aplicada à manutenção elétrica**. Tese de Doutorado em Engenharia Industrial—Salvador, Brasil: Universidade Federal da Bahia, 2014.

MUNIZ, P. R. et al. Handy method to estimate uncertainty of temperature measurement by infrared thermography. **Optical Engineering**, v. 53, n. 7, p. 074101, 2014.

NAVROSKI, M. C. et al. Avaliação do isolamento Térmico de Três Diferentes Materiais Usados na Construção e Preenchimento de Paredes Externas. **Ciência da Madeira**, v. 01, n. 2177-6830, p. 41–51, maio 2010.

PERIN, A. L. **Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica—Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

RAUBER, R. **Caracterização de painéis aglomerados com madeira de eucalipto e sólidos granulares de poliuretano**. Dissertação Mestrado em Engenharia Florestal—Santa Maria, Brasil: UFSM, 2011.

SANTOS, L. DOS. **Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia—Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2006.

SANTOS, L. DOS. **Classificação e Modelagem de Fatores de Influência sobre Inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados**. Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica—Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2012.

TEIXEIRA, G. G. D. **Confiabilidade metrológica em termografia aplicada em sistemas elétricos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica—Belo Horizonte, Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

THE MATH WORKS. **MATLAB The Language of Technical Computing**, 2009.

VOLLMER, M.; MÖLLMANN, K.-P. **Infrared thermal imaging**. Weinheim: Wiley-VCH, 2010.

WOLFE, W. L. **Introduction to Infrared System Design**. 24. ed. Washington: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1996.