

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Laerte dos Santos

Classificação e Modelagem de Fatores de
Influência sobre Inspeções Termográficas em
Ambientes Desabrigados

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:

Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Dr. Edson da Costa Bortoni

Coorientador: Dr. Guilherme Sousa Bastos

Outubro de 2012

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Laerte dos Santos

Classificação e Modelagem de Fatores de
Influência sobre Inspeções Termográficas em
Ambientes Desabrigados

Tese aprovada por banca examinadora em 29 de outubro de 2012, conferindo ao autor o título de **Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Prof. Dr. Guilherme Sousa Bastos

Prof. Dr. José Antonio Jardini

Prof. Dr. Ronaldo Rossi

Prof. Dr. Claudio Ferreira

Prof. Dr. Jamil Haddad

Prof. Dr. Jeremias Barbosa Machado

Itajubá

2012

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

S237c

Santos, Laerte dos

Classificação e modelagem de fatores de influência sobre ins_
peções termográficas em ambientes desabrigados / Laerte dos
Santos. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2012.

160 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni.

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Souza Bastos.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Termografia. 2. Infravermelho. 3. Classificação de influên_
cias. 4. Modelagem. 5. Alta tensão. I. Bortoni, Edson da Costa,
orient. II. Bastos, Guilherme Souza, coorient. III. Universidade
Federal de Itajubá. IV. Título.

DEDICATÓRIA

Para minha família, meu maior incentivo, meu maior orgulho:

Luzia Catarina,

Marco Túlio, Larissa,

Paulo, Patrícia,

Simone e

Gabrielle

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor nosso Deus, que nos conduz a conquistas, antes nem imaginadas e hoje concretizadas. A Ele toda honra e toda glória, é dele a vitória.

Aos meus pais, José Alves dos Santos (*in memorian*) e Maria Conceição dos Reis Santos e aos meus irmãos, Donizeti, Duerdete, Joserdete, Gorete, Silvio e Sérgio.

Ao Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni, mais que um Orientador, um amigo que aprendi a admirar e a respeitar. Personagem essencial na elaboração e conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Guilherme Sousa Bastos, meu Coorientador, ao Prof. Dr. Luiz Edival de Souza e ao Me. Marco Antonio Conti Craveiro, parceiros em projeto de Pesquisa e Desenvolvimento que foi parte importante desta tese.

À Eletrobras Furnas pelo suporte financeiro neste doutorado. Empresa pioneira na aplicação da termografia no Brasil e sempre à frente na busca de novas tecnologias capazes de otimizar seus custos e aumentar sua eficiência. Necessidades essenciais para uma empresa estatal, em cujo sistema passa mais de 40% de toda a energia consumida no Brasil.

Ao Superintendente de Engenharia da Manutenção – EM.O, Eng. Ricardo Medeiros, por autorizar e possibilitar este trabalho que aspira contribuir com as atividades de manutenção da Eletrobras Furnas e, por consequência, do sistema elétrico nacional.

Ao Gerente do Centro Técnico de Ensaios e Medições – CTE.O, Luiz Antônio Gouvea de Albuquerque que proporciona meios de qualificar seus colaboradores para realizar, com propriedade, as atribuições do Departamento. Dentre elas, dar suporte técnico, com competência, às diversas áreas da Eletrobras Furnas.

Ao Gerente do Laboratório de Medidas Elétricas e Eletrônicas – LAME.O, Juarez Neves Cardoso, pelo apoio e compreensão nas necessidades próprias de um doutorado.

Aos amigos do CTE.O que apoiaram, incentivaram e ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores, Dr. Cláudio Ferreira, Dr. Jamil Haddad, Dr. José Antônio Jardini e Dr. Ronaldo Rossi pelas significantes sugestões para melhoria do trabalho de tese.

Por fim, é importante salientar que toda conquista envolve muitas pessoas, de diferentes formas, com diferentes objetivos, mas todas fundamentais na sua construção e concretização. É impossível citar todas elas. Portanto, deixo aqui o meu muito obrigado a todas que ajudaram ou participaram de algum modo.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS.....	IV
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XV
RESUMO.....	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
1. INTRODUÇÃO	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1. BREVE HISTÓRICO DA TERMOGRAFIA	24
2.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	28
<i>2.2.1. Espectro Eletromagnético</i>	<i>29</i>
<i>2.2.2. Lei de Planck.....</i>	<i>30</i>
<i>2.2.3. Lei do Deslocamento de Wien</i>	<i>32</i>
<i>2.2.4. Lei de Stefan-Boltzmann.....</i>	<i>34</i>
<i>2.2.5. Leis da Radiação para emissores reais.....</i>	<i>35</i>
2.3. REVISÃO DA LITERATURA ESPECÍFICA.....	38
3. PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS	43
3.1. INFLUÊNCIAS DE QUALIFICAÇÃO PESSOAL.....	43
<i>3.1.1. Aptidão Física</i>	<i>44</i>
<i>3.1.2. Treinamento.....</i>	<i>44</i>
<i>3.1.3. Experiência.....</i>	<i>44</i>
<i>3.1.4. Normatização e Certificação.....</i>	<i>44</i>
3.2. INFLUÊNCIAS TÉCNICAS	47
<i>3.2.1. Características do termovisor</i>	<i>47</i>
<i>3.2.1.1. Tecnologias de detecção e tipos de detectores</i>	<i>48</i>
<i>3.2.1.2. Faixa espectral</i>	<i>49</i>
<i>3.2.1.3. Faixa de temperatura</i>	<i>50</i>

3.2.1.4. Temperatura de operação.....	50
3.2.1.5. Resolução espacial.....	51
3.2.1.6. Resolução de medida.....	52
3.2.1.7. Sensibilidade térmica.....	53
3.2.1.8. Taxa de repetição de quadro (Frame Rate).....	53
3.2.2. <i>Condições do equipamento sob inspeção</i>	53
3.2.2.1. Localização.....	53
3.2.2.2. Corrente de carga.....	54
3.2.2.3. Condição da superfície - Emissividade	55
3.3. INFLUÊNCIAS ATMOSFÉRICAS.....	56
3.3.1. <i>Temperatura ambiente</i>	57
3.3.2. <i>Radiação solar</i>	58
3.3.2.1. Carregamento solar.....	58
3.3.2.2. Reflexo Solar	60
3.3.3. <i>Vento</i>	62
3.3.4. <i>Transmitância atmosférica (umidade, névoa, nevoeiro e chuva)</i>	65
3.3.4.1. Absorção.....	66
3.3.4.2. Dispersão	68
3.3.4.3. Turbulência (flutuação do índice de refração).....	69
3.3.4.4. Emissão.....	69
3.3.4.5. Lei de Beer-Lambert.....	70
3.3.4.6. Umidade do ar	70
4. VERIFICAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS EM CAMPO E LABORATÓRIO.....	73
4.1. ENSAIOS EM CAMPO.....	76
4.1.1. <i>Radiação solar</i>	79
4.1.1.1. Carregamento solar (aquecimento devido à radiação solar).....	79
4.1.1.2. Reflexo Solar	82
4.1.2. <i>Chuva</i>	85
4.1.3. <i>Atenuação atmosférica</i>	86
4.1.4. <i>Nevoeiro</i>	89
4.2. ENSAIOS EM LABORATÓRIO	92
4.2.1. <i>Conector ensaiado</i>	92
4.2.2. <i>Sistema desenvolvido para os ensaios em laboratório</i>	94
4.2.2.1. Câmara de testes e seus elementos	95

4.2.2.2. Sistema Supervisório	104
4.2.3. <i>Ensaios realizados</i>	113
4.2.3.1. Variação da radiação solar.....	113
4.2.3.2. Variação da temperatura ambiente	115
4.2.3.3. Variação da corrente de carga	117
4.2.3.4. Variação da velocidade do vento.....	119
5. MODELAGEM MATEMÁTICA DE FATORES DE INFLUÊNCIA	123
5.1. MODELAGEM DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE CARGA	123
5.1.1. <i>Desenvolvimento de Modelo Térmico</i>	125
5.1.2. <i>Modelo Autorregressivo</i>	127
5.1.3. <i>Aplicação da Metodologia</i>	129
5.2. MODELAGEM DA INFLUÊNCIA DO VENTO	133
5.2.1. <i>Aplicação da metodologia proposta</i>	137
6. CONCLUSÕES	144
REFERÊNCIAS.....	148
ANEXO - EXEMPLO NUMÉRICO DA MODELAGEM DA CORRENTE.....	156
A.1. ANÁLISE COM CORRENTE DE CARGA DE COMPORTAMENTO CRESCENTE ..	156
A.2. ANÁLISE COM CORRENTE DE CARGA DE COMPORTAMENTO DECRESCENTE	
.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução dos termovisores	28
Figura 2.2 – Espectro eletromagnético (Santos, 2006).	29
Figura 2.3 – Exitância radiante espectral de um Corpo Negro (Chrzanowski, 2001).31	
Figura 2.4 – Comprimento de onda ($\lambda_{\text{máx}}$) em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro (M_b) em uma dada temperatura (θ_{cn}) (Chrzanowski, 2001).	33
Figura 2.5 – Exitância radiante total do Corpo Negro em uma dada temperatura (Chrzanowski, 2001).	34
Figura 2.6 – Representação gráfica da radiação incidente em um objeto real e as possíveis frações de radiação absorvida (α), refletida (ρ) e transmitida (γ).	35
Figura 2.7 – Exitância radiante espectral dos três tipos de fontes de radiação (Flir, 2003).	37
Figura 2.8 – Emissividade espectral dos três tipos de fontes de radiação (Flir, 2003).	37
Figura 3.1 – Energia disponível nas faixas de 3 a 5 μm e de 8 a 14 μm para um Corpo Negro a uma temperatura de 300 K (26,8 °C) (Kaplan, 2000).	50
Figura 3.2 – Representação do FOV e do IFOV de um termovisor (Kaplan, 1999). .	51
Figura 3.3 – Filtro de onda observado de uma mesma distância com termovisor de 320x240 e lentes de 24°, 12° e 7°	52
Figura 3.4 – (a) Termograma capturado sem carregamento solar - (b) Termograma capturado com carregamento solar	58
Figura 3.5 – Típico espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra (Incropera, 2011).	59
Figura 3.6 – Termogramas de um Transformador de Corrente, sob o Sol, obtidos no mesmo horário, mas de posições opostas. (a) A favor do Sol – (b) Contra o Sol.	60
Figura 3.7 – Reflexo solar em uma conexão de baixa emissividade. (a) Reflexo solar no visível. (b) Reflexo solar no infravermelho provocando uma falsa alta temperatura no termograma.	61
Figura 3.8 – Efeito do vento sobre a temperatura de um disjuntor a óleo. (a) Com velocidade do vento igual a 0 km/h – (b) Com velocidade do vento moderada (Snell, 2001).	63
Figura 3.9 – Variação da velocidade e orientação do vento, monitorados por um período de 24 horas, em uma subestação de alta tensão desabrigada.	64

Figura 3.10 – Efeito do vento sobre a temperatura de uma conexão defeituosa e uma normal. (a) Com a velocidade do vento nula - (b) Com velocidade do vento de 6,4 km/h.	65
Figura 3.11 – Transmissão atmosférica: distância de 1,8 km, nível do mar e 17 mm de água precipitável. (Rogalski e Chrzanowski, 2002).....	67
Figura 3.12 – Transmitância atmosférica para uma distância de 10 m (Holst, 2000).	67
Figura 3.13 – Transmitância atmosférica para uma distância de 50 m (Holst, 2000).	68
Figura 3.14 – Dispersão em função do comprimento de onda para diferentes intensidades de nevoeiro e para uma distância de 1 km (Holst, 2000).	69
Figura 3.15 – Saturação de água no ar em função da temperatura, ao nível do mar (Holst, 2000).....	71
Figura 3.16 – Efeito da chuva sobre a transmitância atmosférica e sobre a temperatura das conexões. (a) Um minuto antes do início da chuva - (b) Durante o pico máximo da chuva - (c) Uma hora após o término da chuva.....	72
Figura 4.1 – Percentagem dos defeitos detectados em subestações pela termografia infravermelha	73
Figura 4.2 – Visão microscópica da junção de duas superfícies e suas áreas de contato.	74
Figura 4.3 – (a) Aumento da resistência de contato (termograma) – (b) condutores rompidos devido à alta temperatura do conector.	75
Figura 4.4 - Esquema dos ensaios em campo.	78
Figura 4.5. Foto de um ensaio em campo.	78
Figura 4.6 – Variação da temperatura dos conectores durante períodos com e sem a incidência de radiação solar.....	80
Figura 4.7 – Sequência de termogramas em dia de céu nublado e ainda com carregamento solar.	81
Figura 4.8 – Gráfico das temperaturas obtidas sob céu nublado	82
Figura 4.9 – Esquema do ensaio realizado para demonstrar o efeito do reflexo solar.	83
Figura 4.10 – Reflexo solar provocando uma falsa anomalia térmica em uma conexão de um Transformador de Corrente - TC - (a) Imagem visível - (b) Imagem obtida por termovisor de 3 μm a 5 μm - (c) Imagem obtida por termovisor de 7,5 μm a 13 μm	84

Figura 4.11 – Efeito da chuva sobre a temperatura das conexões do ensaio da Figura 4.5.....	85
Figura 4.12 – Esquema do ensaio para a determinação da atenuação atmosférica.....	87
Figura 4.13 – Foto do ensaio para a determinação da atenuação atmosférica.....	87
Figura 4.14 – Gráfico da temperatura em função da distância - Referência (Corpo Negro) em 50 °C.	88
Figura 4.15 – Gráfico da temperatura em função da distância - Referência (Corpo Negro) em 100 °C.	88
Figura 4.16 – Termogramas do Corpo Negro a 10 m (a) e a 70 m (b) do termovisor (lente de 12°).....	89
Figura 4.17 – Foto do ensaio com nevoeiro de baixa visibilidade.	91
Figura 4.18 – Termogramas do ensaio com nevoeiro.....	91
Figura 4.19 – Gráfico com os resultados do ensaio com nevoeiro.....	91
Figura 4.20 – Conectores NAR45A-4N-90 utilizados nos ensaios em laboratório. ...	92
Figura 4.21 – Vista parcial da fábrica de conectores FCI/Burndy.....	93
Figura 4.22 – Preparação dos conectores para os ensaios.	94
Figura 4.23 – Sistema desenvolvido para os ensaios em laboratório.	95
Figura 4.24 – Estrutura da câmara de testes.	96
Figura 4.25 – Equipamento de ar condicionado.....	97
Figura 4.26 – Soprador axial à esquerda e Inversor de frequência à direita.	98
Figura 4.27 – Umidificador de ar	98
Figura 4.28 – Lâmpada Infravermelha	99
Figura 4.29 – Fonte de corrente, vista frontal (esquerda) e traseira (direita).	100
Figura 4.30 – Sistema do transmissor de temperatura.....	100
Figura 4.31 – Sonda a fio quente para medição de velocidade de vento.....	101
Figura 4.32 – Termo-higrômetro Gulton, modelo GTIUT-A.	101
Figura 4.33 – Amperímetro alicate	101
Figura 4.34 – Módulo de aquisição de dados.....	102
Figura 4.35 – Circuito eletrônico de potência.....	103

Figura 4.36 – Fotos da câmara de testes.	103
Figura 4.37 – Primeira tela do supervisório.	104
Figura 4.38 – Programação dos indicadores de temperatura.	105
Figura 4.39 – Programação das chaves “Min-max” e “Frio-quente”.	106
Figura 4.40 – Programação do indicador de velocidade do vento.	107
Figura 4.41 – Programação do indicador de umidade.	107
Figura 4.42 – Programação da chave de acionamento manual do umidificador.	108
Figura 4.43 – Programação das chaves de acionamento manual do ar condicionado e da lâmpada infravermelha.	108
Figura 4.44 – (a) Programação da chave de acionamento manual do soprador - (b) Programação do dial de seleção de velocidade do soprador.	109
Figura 4.45 – Programação da chave e da lógica de umidade controlada.	110
Figura 4.46 – Programação do gráfico das variáveis.	110
Figura 4.47 – Programação do botão de sincronia e tempo entre amostras.	111
Figura 4.48 – Programação da agenda da temperatura interna.	112
Figura 4.49 – Fitas adesivas de alta emissividade.	113
Figura 4.50 – Variação da temperatura do conector sob radiação infravermelha e sem corrente aplicada.	114
Figura 4.51 – Variação da temperatura do conector sob radiação infravermelha e corrente de 500 A.	115
Figura 4.52 – Variação da temperatura do conector em função da variação da temperatura ambiente (corrente nula).	116
Figura 4.53 – Variação da temperatura do conector em função da variação da temperatura ambiente (corrente 200 A)	117
Figura 4.54 – Temperatura e degraus de corrente no tempo.	118
Figura 4.55 – Corrente em circuito da subestação de Poços de Caldas, 345 kV-Eletrôbras Furnas.	118
Figura 4.56 – Corrente e temperatura no tempo.	119
Figura 4.57 – Variação da velocidade do vento e da temperatura do conector no tempo (corrente constante = 600 A e com intervalos de desligamento do soprador).	120

Figura 4.58 – Variação da velocidade do vento e da temperatura do conector no tempo (Corrente constante = 600 A e sem o desligamento do soprador).....	121
Figura 4.59 – Variação da velocidade do vento e temperatura no tempo (corrente constante = 400 A).....	121
Figura 4.60 – Variação da velocidade do vento, temperatura ambiente e corrente no tempo.	122
Figura 5.1 – Termogramas, corrente de carga e temperatura de um conector em teste	124
Figura 5.2 – Degraus de corrente aplicados em laboratório.....	126
Figura 5.3 – Corrente e temperatura durante os testes em laboratório.....	129
Figura 5.4 – Temperaturas observadas e estimadas	130
Figura 5.5 – Registro de dados obtidos em campo	131
Figura 5.6 – Elevação de temperatura observada e estimada das 20 às 5 horas...	132
Figura 5.7 – Interpretação física dos coeficientes do modelo vento-temperatura. ..	134
Figura 5.8 – Relação entre o fator k e a temperatura para vento nulo.	136
Figura 5.9 – Comparação entre resultados de ensaio ($\Delta\theta^{\text{®}}$) e a metodologia proposta ($\Delta\theta^{\text{©}}$) (600A).....	138
Figura 5.10 – Comparação entre resultados de ensaio ($\Delta\theta^{\text{®}}$) e a metodologia proposta ($\Delta\theta^{\text{©}}$) (400 A).....	139
Figura 5.11 – Comparação entre resultados de Frate e outros (2000) e a metodologia proposta.	140
Figura 5.12 – Comparação entre resultados de Snell e Renowden (2000) e a metodologia proposta.....	141
Figura 5.13 – Comparação entre resultados de Kaplan (1999) e a metodologia proposta.	142
Figura 5.14 – Comparação entre resultados de Madding e Bernard (2002) e a metodologia proposta.....	143
Figura A.1 – Corrente de carga crescente no tempo.....	156
Figura A.2 – Corrente de carga decrescente no tempo.....	159

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Divisão da radiação infravermelha adotada pela ABNT NBR 15572:2008	29
Tabela 3.1 – Energia disponível nas faixas de comprimento de onda dos termovisores.....	49
Tabela 3.2 – Fator de correção para uma placa vertical (Kaplan, 1999).....	63
Tabela 5.1 – Características térmicas do conector	127
Tabela 5.2 – Coeficientes determinados para os modelos autorregressivos (ensaio de laboratório).....	129
Tabela 5.3 – Comparação de elevação final de temperatura	130
Tabela 5.4 – Coeficientes determinados para os modelos autorregressivos (ensaio de campo)	132
Tabela 5.5 – Resultados para corrente de 600 A.....	137
Tabela 5.6 – Resultados para corrente de 400 A.....	138
Tabela 5.7 – Análise com dados de Frate e outros (2000).....	140
Tabela 5.8 – Análise com dados de Snell e Renowden (2000).....	141
Tabela 5.9 – Análise com dados de Kaplan (1999).....	142
Tabela 5.10 – Análise com dados de Madding e Bernard (2002).....	143
Tabela A.1 – Primeiro período selecionado para análise	157
Tabela A.2 – Segundo período selecionado para análise	159

LISTA DE SÍMBOLOS

a_i – coeficientes constantes obtidos pelo algoritmo dos mínimos quadrados ($^{\circ}\text{C}/\text{A}^2$)

c – velocidade da luz no meio; no vácuo = $2,99792458 \times 10^8$ (m/s)

c_1 – constante = $3,741832 \times 10^4$ ($\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}^4$)

c_2 – constante = $14387,86 \times 10^4$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)

f – frequência da onda (Hz)

F_R – fator de redução da temperatura final de um componente imposta pelo vento

h – constante de Planck – $6,6260755 \times 10^{-34}$ (J.s)

I – corrente de carga (A)

I_1 – corrente de carga do componente no momento da inspeção (A)

I_2 – corrente de carga máxima do componente (A)

k – máxima redução possível de ser imposta pelo vento, para cada componente.

k_B – constante de Boltzmann – $1,380658 \times 10^{-23}$ (J/K)

l – distância (m)

L_m – radiância medida pelo termovisor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)

M_b – exitância radiante total do Corpo Negro ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{m}$)

$M_{b\lambda}$ – exitância radiante espectral de um Corpo Negro ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{m}$)

$M_{o\lambda}$ – exitância radiante espectral de uma superfície real ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{m}$)

$Q/\Delta t$ – fluxo de calor transferido por convecção (J/s)

t – duração do período estudado (s)

V – constante de velocidade (km/h)

v – velocidade do vento (km/h)

x – expoente com valor entre 1,5 e 1,8

α – fração absorvida da radiação incidente sobre um corpo

$\alpha_{A\lambda}$ – absorção atmosférica espectral

α_{λ} – fração espectral absorvida da radiação incidente sobre um corpo

α_{sol} – coeficiente de absorção na faixa de comprimento de onda da radiação solar

Γ – coeficiente de proporcionalidade por unidade de área (J/s.K)

γ – fração transmitida da radiação incidente sobre um corpo

$\gamma_{A\lambda}$ – transmitância atmosférica espectral

γ_{λ} – fração espectral transmitida da radiação incidente sobre um corpo

$\Delta\theta$ – elevação de temperatura sobre a temperatura ambiente (°C)

$\Delta\theta_0$ – elevação de temperatura final do período anterior (°C)

$\Delta\theta_1$ – elevação de temperatura medida para a corrente de carga I_1 (°C)

$\Delta\theta_2$ – elevação de temperatura estimada para a corrente de carga I_2 (°C)

$\Delta\theta_{@}$ – elevação de temperatura calculada (°C)

$\Delta\theta_F$ – elevação de temperatura final que, em condição de operação do período atual, o componente deve atingir o estado de equilíbrio (°C)

$\Delta\theta_{@}$ – elevação de temperatura registrada (°C)

$\Delta\theta_{sf}$ – diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (K)

$\Delta\theta_t$ – elevação de temperatura no instante t ($^{\circ}\text{C}$)

$\delta_{A\lambda}$ – dispersão atmosférica espectral

ε – emissividade

ε_{IV} – emissividade de uma superfície na faixa do infravermelho

ε_{λ} – emissividade espectral

θ_{cn} – temperatura absoluta do Corpo Negro (K)

θ_{fundo} – temperatura do meio em que o objeto está inserido (K)

θ_{max} – temperatura máxima estimada para uma determinada corrente de carga I_2 ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{min} – temperatura mínima estimada para uma determinada corrente de carga I_2 ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{objeto} – temperatura da superfície do objeto sob inspeção (K)

θ_1 – temperatura medida para uma determinada corrente de carga I_1 ($^{\circ}\text{C}$)

θ_2 – temperatura estimada para uma determinada corrente de carga I_2 ($^{\circ}\text{C}$)

λ – comprimento de onda (m)

λ_{max} – comprimento de onda em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro (m)

ρ – fração refletida da radiação incidente sobre um corpo

ρ_{λ} – fração espectral refletida da radiação incidente sobre um corpo

σ – constante de Stefan-Boltzmann - $5,67051 \times 10^{-8}$ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)

τ – constante de tempo de aquecimento (s)

RESUMO

A termografia por infravermelho é atualmente uma das mais importantes tecnologias de manutenção preditiva aplicadas ao sistema elétrico. Através dela é possível detectar defeitos em estágios iniciais, programar o reparo para o momento mais adequado ao sistema e evitar interrupções não previstas. Além disso, o uso da termografia permite inspecionar um equipamento sem a necessidade de contato, a uma distância segura e sem nenhuma interferência na operação dos equipamentos. Vantagens importantes em um mercado que exige alta confiabilidade, continuidade e com regras que penalizam a concessionária pela indisponibilidade dos ativos. Apesar das vantagens, a termografia possui limitações em função da qualificação do termografista, das características técnicas dos equipamentos envolvidos e das condições atmosféricas do ambiente em que está se realizando a inspeção, dificultando a análise e o correto diagnóstico dos equipamentos inspecionados. Esta tese define, agrupa e propõe a classificação das principais influências sobre uma inspeção termográfica. Apresenta, por meio de ensaios em laboratório e em campo, as implicações dessas influências e discute meios de reduzi-las ou evitá-las. A partir desses ensaios, modelos matemáticos são desenvolvidos para duas das principais influências: corrente de carga e velocidade do vento.

ABSTRACT

Nowadays infrared thermography is one of the most important technologies of predictive maintenance applied to the electrical systems. Through it is possible to detect faults in the initial stages, schedule and repair them at the most appropriate time to the system and avoid unplanned outages. Furthermore, thermography is able to inspect with no contact, at a safe distance and without interference on the operation of the equipment. Important advantages into a market that requires high reliability, continuity and which has rules that penalize the utility for the unavailability of its assets. Despite its advantages, thermography has limitations due qualifications of the thermographer, technical characteristics of the equipment involved and due to atmospheric conditions of the environment on which an inspection is taking place. Consequently, the analysis and accurate diagnosis of the equipment inspected becomes more complex. This thesis defines groups and proposes a classification of the main influences on thermographic inspection. It presents, by means of laboratory and field testing, the implications of these influences and discusses methods to reduce them or avoid them. From these tests, mathematical models are developed for two major influences: load current and wind speed.

1. INTRODUÇÃO

Desde 2003, o Brasil tem melhorado sua estabilidade macroeconômica e experimentado um crescimento de sua economia. Durante a recente crise mundial, o Brasil foi um dos primeiros mercados emergentes a iniciar uma recuperação, voltou a crescer no segundo trimestre de 2009 e concluiu 2010 com um PIB de 7,5% (Santos et al., 2011). Apesar do PIB ter reduzido para 2,7% em 2011 (IBGE, 2012) e a previsão para 2012 ser ainda menor, o Brasil, diante da crise mundial atual, ainda está em uma melhor condição, se comparado à situação de muitos países no restante do mundo.

Para dar sustentação e ajudar a impulsionar o cenário econômico, a energia cumpre um papel fundamental e, nos últimos 10 anos, o Brasil expandiu sua capacidade de geração de energia elétrica em aproximadamente 50% e para os próximos anos está prevista uma adição de mais de 48.000 MW proveniente de 171 empreendimentos em construção e mais 560 outorgados. Mas tão importante quanto a expansão, é a eficaz manutenção do sistema elétrico instalado, que em meados de 2012 contava com 2.645 empreendimentos com a capacidade de produzir 118.342 MW através de uma rede básica composta de mais de 95.000 km de linhas de transmissão (Aneel, 2012). Esses dados mostram a dimensão do sistema elétrico em operação e a importância que deve ser dada à sua manutenção, para garantir um crescimento sustentável da economia brasileira.

Sob esse ponto de vista, é altamente justificável a aplicação das mais avançadas tecnologias para manter os equipamentos em operação, reduzir as falhas no sistema elétrico e buscar índices de confiabilidade cada vez mais altos.

Entre as várias tecnologias utilizadas, a termografia por infravermelho se destaca na área preditiva, com a capacidade de detectar defeitos em estágios iniciais, realizar inspeções com os equipamentos em operação e a distâncias seguras e possuir uma grande agilidade na aquisição das medidas. Todas essas características a tornaram uma importante ferramenta de manutenção dentro do sistema elétrico.

Além das características citadas anteriormente, as mudanças ocorridas no sistema elétrico brasileiro e descritas no parágrafo seguinte, fizeram da termografia uma tecnologia cada vez mais requisitada.

Na década de 80, o sistema elétrico brasileiro tinha suas atividades centralizadas no Estado. Na década de 90 foram transferidas, em parte, para a iniciativa privada e, na década de 2000, o Governo Federal lançou o novo modelo para o sistema elétrico brasileiro, sustentado pelas Leis nº 10.847 e 10.848, de 15 de março de 2004, e pelo Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004 (Queles et al., 2007).

O novo modelo visa garantir a segurança do suprimento de energia elétrica com a modicidade tarifária e a universalização de atendimento (CCEE, 2011). Em 2007 entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL Nº 270/2007, na qual, as indisponibilidades dos ativos de transmissão das concessões não licitadas passaram a sofrer descontos da Receita Anual Permitida. Essas mudanças impuseram novos requisitos de desempenho às empresas e aumentaram ainda mais a competitividade do setor, deixando evidente a direta relação entre manutenção do sistema e receita.

Para reduzir ou eliminar o impacto da Parcela Variável na receita, as empresas têm buscado reparar os defeitos sem desligar as instalações, ou seja, executando os reparos com os equipamentos e linhas de transmissão energizados. Na impossibilidade dessa ação, elas têm procurado realizar desligamentos programados e com o menor tempo possível de interrupção. Com tudo isso, a termografia tornou-se ainda mais presente, visto que, com ela é possível realizar a inspeção com os equipamentos em operação, identificar os defeitos a serem corrigidos e fornecer, à manutenção, dados de localização e severidade. Com esse prévio conhecimento, a manutenção pode preparar ou adquirir os sobressalentes, prever o tempo que será gasto no reparo e ainda, escolher qual o melhor profissional para aquele serviço específico. Tudo isso é de suma importância, tanto no reparo com os equipamentos energizados como, na impossibilidade dessa ação, na redução do tempo das intervenções.

A recém-publicada Medida Provisória Nº 579, de setembro de 2012, que trata

da redução dos encargos na tarifa e da renovação das concessões, sinaliza para uma manutenção ainda mais eficiente, uma vez que a remuneração cobrirá apenas os custos com operação, manutenção e encargos, sendo que o lucro deverá ser retirado desse montante (D.O.U., 2012), portanto a concessionária terá que maximizar sua eficiência operacional para obter ganhos reais.

Embora a aplicação da termografia no sistema elétrico tenha sido sempre muito vantajosa e, no atual cenário, praticamente indispensável, seus resultados sempre foram muito dependentes da qualificação do termografista e de vários fatores físicos envolvidos na inspeção. Consequentemente, esforços têm sido realizados para garantir um alto nível de qualificação dos termografistas e estudos, visando reduzir os erros de medição e erros na análise dos resultados obtidos por termografia, vêm sendo desenvolvidos. Alguns desses estudos, como de Snell (1995), Snell e Fritz (1998), Madding e Lion Jr. (1999) e Lyon et al. (2002) estão sintetizados no Item 2.3 deste trabalho.

No Brasil, como parte dos esforços para orientar e qualificar os termografistas, normas e guias estão sendo elaborados pela Comissão de Estudos de Termografia (CE-58:000.11) e publicados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A CE-58:000.11 foi constituída em 2005 dentro da Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI). A ABENDI é certificada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT como o Organismo de Normalização Setorial (ONS-58) para preparar as normas brasileiras de Ensaio Não Destrutivos.

Paralelamente, foi criado o Grupo de Estudos responsável pela elaboração da norma brasileira de qualificação e certificação de pessoas em termografia de termografia (NA-009). O principal objetivo da certificação é comprovar, através da emissão de um certificado, a aptidão física, o treinamento e a experiência necessários ao termografista para realizar suas tarefas.

Como parte dos esforços visando reduzir os erros de medição e erros na

análise dos resultados obtidos por termografia, este trabalho, parcialmente desenvolvido dentro de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D da Eletrobras Furnas, pretende contribuir com modelos matemáticos capazes de ponderar as influências envolvidas na aplicação da termografia por infravermelho. Através desses modelos, possibilitar uma análise mais consistente dos dados obtidos, com um consequente aumento da confiabilidade nos resultados da aplicação da termografia e favorecimento de uma contínua operacionalidade do sistema elétrico como um todo.

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo este o primeiro, introdutório.

O Capítulo 2 descreve fatos históricos importantes para o desenvolvimento da termografia por infravermelho, desde a descoberta da radiação infravermelha até os dias atuais, revê os conceitos fundamentais aplicados à termografia e, apresenta ainda, uma revisão da literatura direcionada aos estudos de redução dos erros envolvidos na medição e análise das imagens térmicas.

No Capítulo 3, são descritas, agrupadas e proposta uma classificação das influências, sobre as quais, a inspeção termográfica está exposta.

No Capítulo 4 é mostrado, por meio de ensaios em campo e laboratório, como as influências interferem nas inspeções termográficas e sugere métodos de redução e/ou eliminação dessas influências a partir das observações resultantes desses ensaios.

O Capítulo 5 apresenta os modelos matemáticos desenvolvidos para a corrente de carga e velocidade do vento, duas das principais influências discutidas no Capítulo 3.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta a conclusão deste trabalho, suas contribuições e propostas de desenvolvimento.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Breve Histórico da Termografia

A Termografia por Infravermelho, tal como é conhecida hoje, com termovisores portáteis capazes de detectar e converter, em tempo real, a radiação infravermelha em imagens visíveis e com a possibilidade de medição de temperatura, só foi possível devido a diversos estudos e descobertas, das quais algumas das mais importantes, a partir da descoberta da radiação infravermelha, são descritas abaixo.

Em 1800, o alemão Friedrich Wilhelm Herschel, mais conhecido por Sir William Frederick Herschel, astrônomo do rei inglês, George III, e descobridor do planeta Urano (Maldague e Moore, 2001), procurava um meio de proteger seus olhos quando observava o Sol através de telescópios e, ao testar amostras de vidros coloridos, observou que algumas deixavam passar mais calor que outras.

Na tentativa de descobrir um único material, que pudesse atenuar o calor e proteger seus olhos do brilho do sol, repetiu a experiência que Marsilio Landriani havia realizado em 1777 (Rogalski e Chrzanowski, 2002). Com o auxílio de um prisma e três termômetros de mercúrio com os bulbos pintados de preto, Herschel mediu a temperatura das várias componentes de cor da luz do sol refratados através do prisma e incididos em um anteparo. Notou um aumento de temperatura da cor violeta para a cor vermelha, como havia sido observado anteriormente por Landriani, entretanto, observou também que o maior pico de temperatura ocorria na região escura, além do vermelho. Com isso concluiu que existia, naquela região, luz invisível aquecendo os termômetros. À região deu o nome de *Espectro Termométrico* e à radiação o nome de *Calor Escuro*.

Décadas mais tarde essa região do espectro eletromagnético passou a ser chamada de *Região Infravermelha* e a radiação, de *Radiação Infravermelha* (Richards, 2001). Herschel publicou os resultados dos seus experimentos em um artigo para a *Philosophical Transactions of Royal Society* (AGA, 1969).

Vinte e um anos depois da descoberta da radiação infravermelha, Thomas Johann Seebeck descobriu o efeito termoelétrico, que levou Leopoldo Nobili, em 1829, à invenção do termopar. O termopar é baseado na premissa de que uma tensão é produzida quando dois metais diferentes entram em contato e que ela varia, de uma forma previsível, com a variação da temperatura.

Em 1833, Macedônio Melloni construiu a primeira termopilha conectando vários termopares em série (Maldague e Moore, 2001). Focando a radiação sobre um lado das junções da termopilha, era possível detectar o calor liberado pelo corpo de uma pessoa a uma distância de aproximadamente 10 metros (Hellier, 2001). Foi o primeiro detector desenvolvido para a radiação infravermelha.

Também é creditada a Melloni, a descoberta, em 1830, que o cloreto de sódio (NaCl) é transparente ao infravermelho (Veratti, 1984). Esse foi o principal material óptico para infravermelhos até a década de 30, época em que os cristais sintéticos começaram a ser criados (Flir Systems, 2003).

A primeira imagem de infravermelho foi registrada por John Frederick William Herschel, filho de Sir William Herschel. Ele publicou em 1840 um artigo no qual descrevia um arranjo usado para gravar imagens infravermelhas do espectro solar. Esse arranjo consistia de um prisma que projetava a luz do sol sobre um papel preto, muito fino, imerso em uma solução de tintura a álcool colorido. As ondas de luz absorvidas pelo papel produziam diferentes taxas de evaporação da solução de tintura, o que resultava em uma rudimentar imagem térmica estampada no papel (Richards, 2001).

A técnica de John Herschel foi aprimorada em 1929 por Marianus Czerny que inventou o *Evaporograph* (Holst, 2000). O *Evaporograph* era um sistema de processamento de imagens infravermelhas que utilizava uma fina película de óleo volátil aplicado a uma fina membrana absorvente e se baseava na evaporação diferencial do óleo (Richards, 2001).

Em 1880, o bolômetro foi inventado por Samuel Pierpont Langley e aperfeiçoado por Charles Greeley Abbot. Um bolômetro é um detector térmico que,

diferente da termopilha que produzia uma diferença de potencial com a incidência de radiação; ele consiste de um material, cuja resistência elétrica varia quando aquecido por uma radiação incidente (Gaussorgues, 1994). Com esse bolômetro era possível detectar o calor emitido por uma vaca a uma distância de mais de 300 metros (Flir Systems, 2003).

No ano de 1892, Sir James Dewar introduziu o uso de gases liquefeitos como agentes de refrigeração e inventou um recipiente isolado a vácuo, conhecido como frasco *Dewar*, no qual era possível armazenar gases liquefeitos por dias inteiros. Anos mais tarde essa técnica de refrigeração seria usada para melhorar o desempenho de detectores de infravermelho (AGA, 1969).

A partir de 1900, muitas patentes relacionadas a dispositivos de detecção por infravermelho foram emitidas, mas o grande desenvolvimento da termografia foi resultado do interesse militar que já na I Guerra Mundial desenvolvia sistemas experimentais de detecção do inimigo. Um sistema de infravermelho testado naquela época permitia detectar um avião a uma distância de 1500 metros ou uma pessoa a mais de 300 metros (AGA, 1969). Também nessa ocasião, mais especificamente em 1917, Theodore Willard Case desenvolveu o primeiro fotodetector, dispositivo com fotocondutores (sulfeto de tálio), baseado na interação direta entre os fótons da radiação incidente e os elétrons do material, possibilitando a conversão direta de radiação em sinal elétrico. Esse fotodetector possuía sensibilidade e tempo de resposta superiores às do bolômetro (Maldague e Moore, 2001).

Com o desenvolvimento do fotodetector, programas de pesquisa militar na área de processamento de imagens térmicas se intensificaram e, durante a II Guerra Mundial, a descoberta, por cientistas alemães, que o resfriamento do detector melhorava seu desempenho, foi fundamental para a rápida expansão da tecnologia de infravermelho (Hellier, 2001). Nesse período, foram grandes os avanços no desenvolvimento da visão noturna, mísseis guiados pelo calor e do primeiro *scanner* de linha (Tavares, 2003), equipamento que fornece o perfil de temperatura ao longo de uma linha e que para formar uma imagem bidimensional necessita do movimento relativo do objeto sob inspeção.

Com a inclusão, em 1954, de um sistema de varredura óptico-mecânico ou eletrônico, os equipamentos podiam diretamente formar uma imagem bidimensional; mesmo assim, um termovisor levava 45 minutos para criar uma imagem e só em meados da década de 60 é que foi lançado o primeiro termovisor de tempo real, capaz de produzir 20 imagens por segundo. Nessa ocasião se iniciou a comercialização de termovisores (Holst, 2000).

No início da década de 70, chegaram ao Brasil os primeiros termovisores. Nessa época, eles empregavam detectores resfriados a nitrogênio líquido, sistemas de varredura óptico-mecânicos para formar as imagens térmicas e a temperatura do objeto inspecionado era obtida através de cálculos (Santos et al., 2005).

Rápidos avanços na tecnologia foram observados de 1970 até os nossos dias. Detectores de resfriamento criogênico, utilizando gás comprimido ou liquefeito, evoluíram para detectores resfriados termoeletricamente e, em seguida, para os detectores “sem resfriamento”. Sistemas baseados em tubos *pyroelectric vidicon* (PEV) também foram desenvolvidos e produzidos como uma opção aos sistemas de varredura óptico-mecânicos. Embora não radiométricos, PEVs eram leves, portáteis e podiam funcionar sem refrigeração.

Na década de 80, uma nova tecnologia, a matriz de plano focal (Focal Plane Array - FPA), foi liberada da área militar para a área comercial. O FPA utiliza uma grande quantidade de detectores de semicondutores termicamente sensíveis, semelhantes aos CCDs (*Charge Coupled Device*) das filmadoras de vídeo. Essa foi uma melhoria significativa em relação a um único elemento detector e o resultado foi um excepcional aumento na qualidade de imagem e resolução espacial (Hellier, 2001). O peso dos termovisores que nos anos 70 chegava próximo dos 40 kg, diminuiu para menos de 1 kg (Figura 2.1), as leituras de temperatura passaram a ser mostradas diretamente no monitor do termovisor (sistemas radiométricos) e a sensibilidade térmica aumentou consideravelmente.

Atualmente os termovisores são portáteis, podem ser conectados ao computador e possuem *softwares* para análise das imagens, facilitando ainda mais a aplicação da termografia em sistemas elétricos.

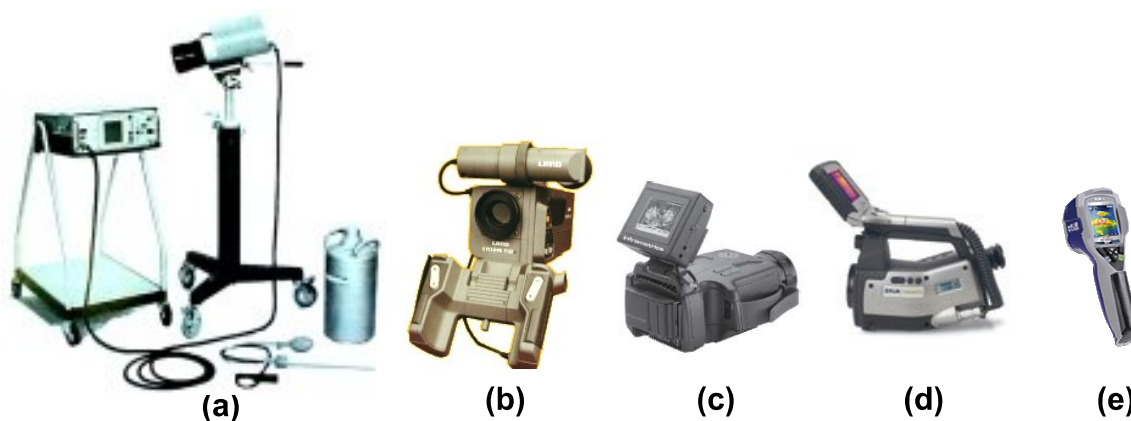


Figura 2.1 – Evolução dos termovisores

- (a) Detector resfriado a nitrogênio líquido, sistema de varredura óptico/mecânico, peso total de 37 kg (Santos et al., 2005)
- (b) Detector resfriado eletricamente, sistema de varredura óptico/mecânico, peso de 6,1 kg (Santos et al., 2005)
- (c) Detector “não resfriado”, FPA (Focal Plane Array), peso de 2,7 kg (Inframetrics, 1996)
- (d) Detector “não resfriado”, FPA (Focal Plane Array), peso de 2,0 kg (Flir, 2003)
- (e) Detector “não resfriado”, FPA (Focal Plane Array), peso de 0,34 kg (Flir, 2009)

2.2. Conceitos Fundamentais

A termografia por infravermelho baseia-se no fenômeno físico de que todo objeto, com temperatura acima de zero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$), emite radiação eletromagnética em função da excitação das moléculas das quais é constituído.

Quanto maior for a temperatura, maior é a excitação molecular e, conseqüentemente, maior é a intensidade da radiação emitida. Assim, a temperatura de um objeto pode ser determinada pela intensidade da radiação emitida por sua superfície, fato utilizado pela termografia para realizar medidas de temperatura e visualizar a distribuição térmica de uma determinada superfície, sem a necessidade de contato físico.

A radiação eletromagnética, especificamente a radiação térmica, pode ser emitida nas faixas de ultravioleta, visível, infravermelho e até na faixa de micro-ondas do espectro eletromagnético. Entretanto, para temperaturas típicas encontradas em equipamentos elétricos, a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho (Chrzanowski, 2001). Por essa razão, os

termovisores utilizados no sistema elétrico são fabricados com detectores que respondem a essa faixa do espectro, mais especificamente de 3 a 5 μm ou de 8 a 14 μm , sendo a última faixa ainda mais adequada às temperaturas e condições encontradas em uma inspeção de equipamentos de alta tensão desabrigados. Algumas características dessas faixas são descritas no Capítulo 3, Item 3.2.1.2.

2.2.1. Espectro Eletromagnético

Dentro do espectro eletromagnético, a radiação infravermelha está localizada entre a região de radiação visível e a região de radiação de micro-ondas, como pode ser visto na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Espectro eletromagnético (Santos, 2006).

O espectro infravermelho pode ainda ser dividido em sub-regiões e a proposta da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (ABNT, 2008), é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Divisão da radiação infravermelha adotada pela ABNT NBR 15572:2008

Região	Faixa de Comprimento de Onda
Infravermelho muito próximo	0,78 μm – 1,1 μm
Infravermelho próximo	1,1 μm – 3 μm
Infravermelho médio	3 μm – 6 μm
Infravermelho distante	6 μm – 15 μm
Infravermelho muito distante	15 μm – 1000 μm

A radiação Infravermelha, basicamente obedece às mesmas leis das radiações nas diferentes regiões do espectro eletromagnético. Propaga-se em linha reta, é absorvida, refletida, refratada, apresenta espalhamento de feixe, pode ser enfocada e viaja, no vácuo, à velocidade da luz, aproximadamente 3×10^8 m/s.

A propagação da radiação se dá através de um conjunto de partículas conhecidas por fótons ou quanta ou, alternativamente, pode ser considerada como a propagação de ondas eletromagnéticas. Em ambos os casos pode-se atribuir para a radiação as propriedades de frequência (f) e de comprimento de onda (λ), cuja relação é mostrada na Equação 2.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Onde:

c (m/s) é a velocidade de propagação no meio (no vácuo $c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s);

λ (m) é o comprimento de onda;

f (Hz) é a frequência da onda.

A radiação térmica emitida por sólidos é geralmente tratada em termos do conceito de Corpo Negro, cuja definição é de um objeto hipotético capaz de absorver toda radiação que incide sobre ele, independente do comprimento de onda e direção. Além disso, para uma dada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um Corpo Negro (Incropera et al., 2008).

2.2.2. Lei de Planck

A emissão de radiação por um Corpo Negro é descrita pela lei de Planck, na qual é relacionada a distribuição espectral da radiação emitida por um Corpo Negro ($M_{b\lambda}$) em uma dada temperatura (θ_{cn}), por unidade de área, por unidade de comprimento de onda (λ), como mostrado na Equação 2.2.

$$M_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B \theta_{cn}} - 1)} \quad (2.2)$$

Onde:

$M_{b\lambda} \left(\frac{W / m^2}{m} \right)$ é a exitância radiante espectral do Corpo Negro;

h (J.s) é a constante de Planck = $6,6260755 \times 10^{-34}$;

c (m/s) é a velocidade da luz no meio;

k_B (J/K) é a constante de Boltzmann = $1,380658 \times 10^{-23}$;

θ_{cn} (K) é a temperatura absoluta do Corpo Negro.

Utilizando a lei de Planck e levantando o gráfico para várias temperaturas obtém-se uma família de curvas apresentadas na Figura 2.3.

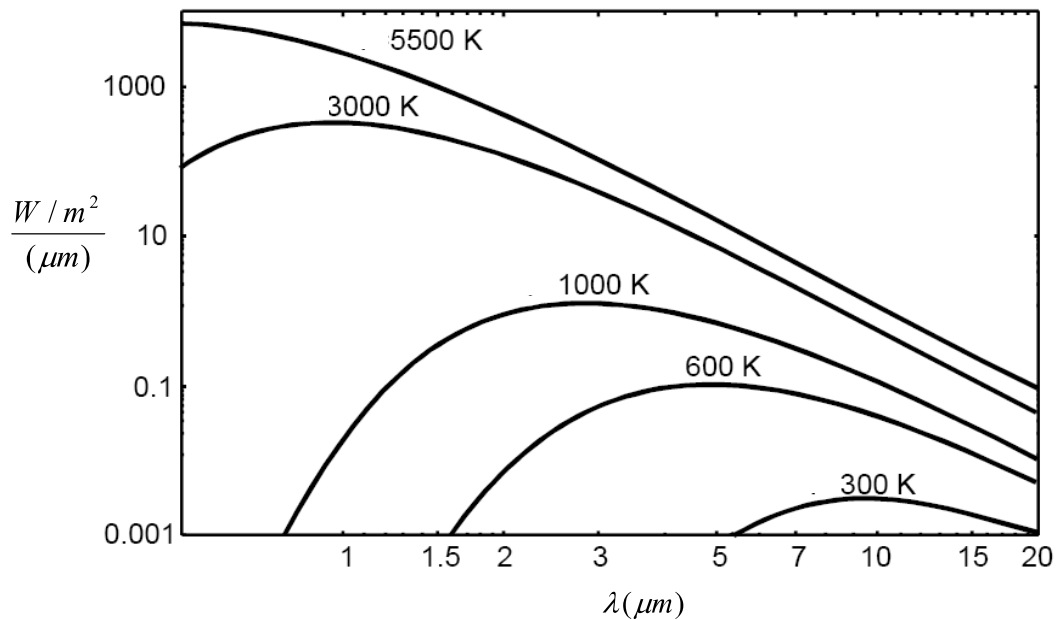


Figura 2.3 – Exitância radiante espectral de um Corpo Negro (Chrzanowski, 2001).

Pelo gráfico da Figura 2.3, observa-se que:

- A energia emitida varia continuamente com o comprimento de onda;
- em qualquer comprimento de onda, a intensidade da radiação emitida aumenta com o aumento da temperatura;
- o comprimento de onda, no qual ocorre a máxima radiação, diminui com o aumento da temperatura (Incropera et al., 2008).

Para determinar a temperatura (θ_{cn}) quando é conhecida a exitância (M_b) é possível utilizar a Equação 2.3.

$$\theta_{cn} = \frac{c_2}{\ln \left[\frac{(c_1 + \lambda^5 M_{b\lambda})^\lambda}{(\lambda^5 M_{b\lambda})^\lambda} \right]} \quad (2.3)$$

Onde:

$$c_1 = 3,741832 \times 10^4 \left(\frac{W / cm^2}{(\mu m)^4} \right);$$

$$c_2 = 14387,86 \times 10^4 (\mu m.K).$$

2.2.3. Lei do Deslocamento de Wien

Derivando a fórmula de Planck com relação ao comprimento de onda e a resolvendo para o resultado máximo ($dM/d\lambda=0$), obtém-se uma simples relação entre o comprimento de onda (no qual a exitância radiante do Corpo Negro é máxima) e a temperatura do Corpo Negro (Equações 2.4 e 2.5).

$$\lambda_{m\acute{a}x} \cdot \theta_{cn} = 0,0028978 \quad (2.4)$$

ou

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{0,0028978}{\theta_{cn}} \quad (2.5)$$

Onde:

$\lambda_{m\acute{a}x}$ (m) é o comprimento de onda em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro;

θ_{cn} (K) é a temperatura absoluta do Corpo Negro.

Conhecida como lei do deslocamento de Wien, essa função mostra que, à medida que θ_{cn} aumenta, $\lambda_{m\acute{a}x}$ diminui.

A Figura 2.4 apresenta o gráfico do comprimento de onda em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro ($\lambda_{m\acute{a}x}$) em função da temperatura θ_{cn} .

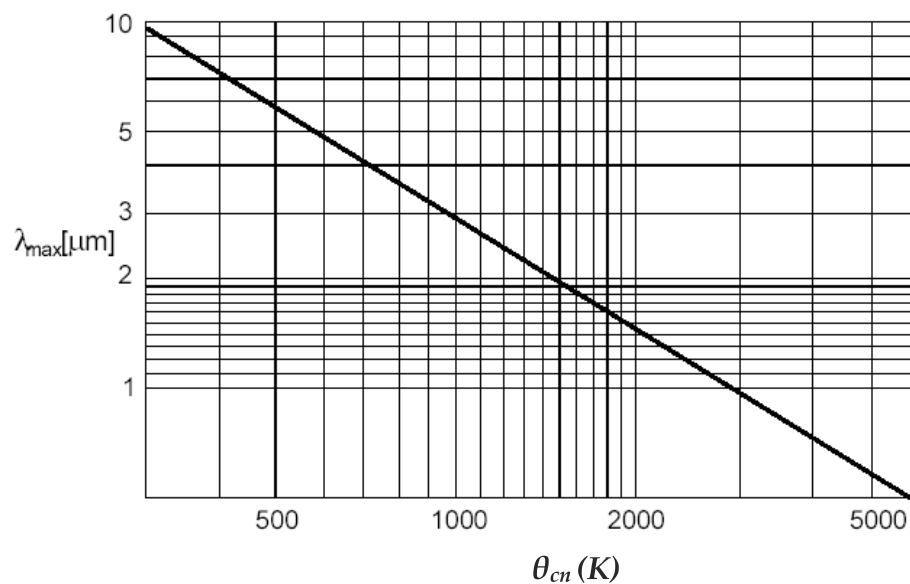


Figura 2.4 – Comprimento de onda ($\lambda_{m\acute{a}x}$) em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro (M_b) em uma dada temperatura (θ_{cn}) (Chrzanowski, 2001).

2.2.4. Lei de Stefan-Boltzmann

A exitância radiante total (M_b) de um Corpo Negro, Equação 2.6, pode ser obtida integrando a fórmula de Planck sobre o comprimento de onda $\lambda = 0$ até ∞ , como mostra a Equação 2.7.

$$\int_0^{\infty} M_b d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k\theta_{cn}} - 1)} d\lambda \quad (2.6)$$

resultando em:

$$M_b = \sigma \cdot \theta_{cn}^4 \quad (2.7)$$

Onde:

$\sigma \left(\frac{W/m^2}{K^4} \right)$ é a constante de Stefan-Boltzmann = $5,67051 \times 10^{-8}$.

Graficamente, a exitância radiante total (M_b) representa a área abaixo da curva de Planck para uma temperatura específica. A Figura 2.5 mostra a exitância radiante total do Corpo Negro (M_b) em uma dada temperatura (θ_{cn}).

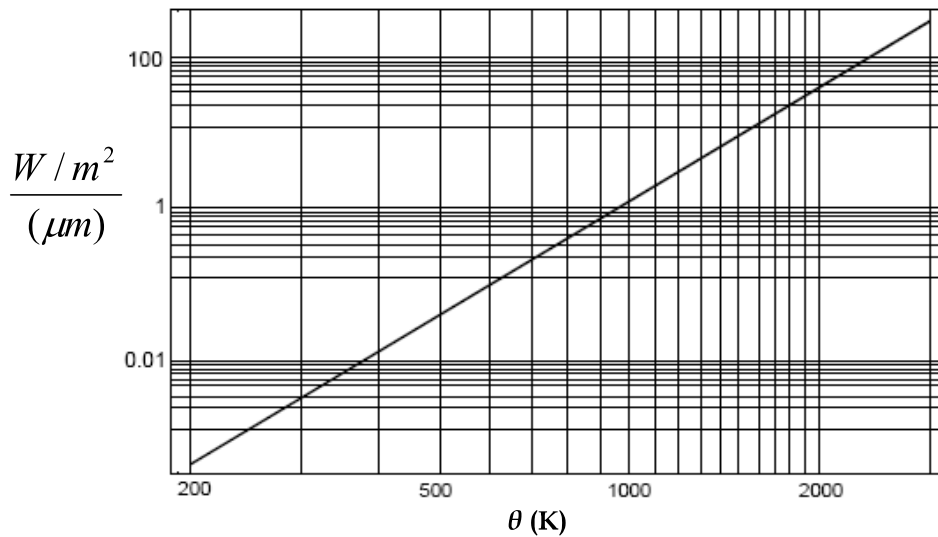


Figura 2.5 – Exitância radiante total do Corpo Negro em uma dada temperatura (Chrzanowski, 2001).

2.2.5. Leis da Radiação para emissores reais

As leis de radiação descritas até o momento se referem ao Corpo Negro. Objetos do mundo real não seguem essas leis em grande parte do espectro, embora possam se aproximar do comportamento de um Corpo Negro em certos intervalos de comprimentos de onda.

A exitância radiante de objetos reais é menor que a de um Corpo Negro e é necessário caracterizar algumas propriedades radiativas de tais objetos.

Existem duas relações entre as propriedades radiativas dos materiais que são muito importantes. A primeira é a que relaciona absorptância, refletância e transmitância no balanço da energia radiativa, e a segunda é a lei de Kirchhoff que relaciona absorptância e emissividade.

Um corpo real quando atingido por uma radiação pode apresentar os seguintes fenômenos:

- Uma fração da radiação incidente pode ser absorvida (α).
- Uma fração da radiação incidente pode ser refletida (ρ).
- Uma fração da radiação incidente pode ser transmitida (γ).

A soma das três frações resulta na radiação total, como mostra a Figura 2.6.

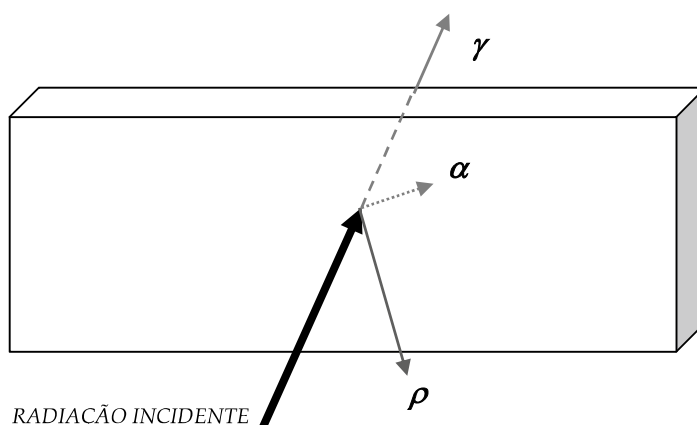


Figura 2.6 – Representação gráfica da radiação incidente em um objeto real e as possíveis frações de radiação absorvida (α), refletida (ρ) e transmitida (γ).

A intensidade desses fenômenos depende do comprimento de onda da radiação incidente, portanto:

- A absorção espectral α_λ é a relação da energia espectral absorvida por um corpo pela radiação incidente sobre ele.
- A reflexão espectral ρ_λ é a relação da energia espectral refletida por um corpo pela radiação incidente sobre ele.
- A transmissão espectral γ_λ é a relação da energia espectral transmitida por um corpo pela radiação incidente sobre ele.

Como é apresentado na Equação 2.8, a soma dos três coeficientes α_λ , ρ_λ e γ_λ para um mesmo comprimento de onda λ , é igual a unidade.

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \gamma_\lambda = 1 \quad (2.8)$$

Para objetos opacos, $\gamma_\lambda = 0$, a relação se simplifica para a Equação 2.9.

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (2.9)$$

Outra propriedade, chamada de emissividade (ε), descreve a fração da exitância radiante produzida por uma superfície qualquer, em relação com a produzida por um Corpo Negro à mesma temperatura. Logo, a emissividade espectral (ε_λ), apresentada na Equação 2.10, é a relação da exitância radiante espectral de uma superfície ($M_{o\lambda}$) pela exitância radiante de um Corpo Negro ($M_{b\lambda}$) à mesma temperatura e comprimento de onda:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_{o\lambda}}{M_{b\lambda}} \quad (2.10)$$

De modo geral, existem três tipos de fontes de radiação, caracterizados pelo modo como a exitância radiante espectral varia com o comprimento de onda:

- Corpo Negro, para o qual $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$.
- Corpo cinza, para o qual $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = \text{constante}$ e menor que 1.
- Radiador seletivo, para o qual ε varia com comprimento de onda.

As curvas da distribuição espectral e da emissividade espectral dessas três fontes de radiação são apresentadas na Figura 2.7 e na Figura 2.8, respectivamente.

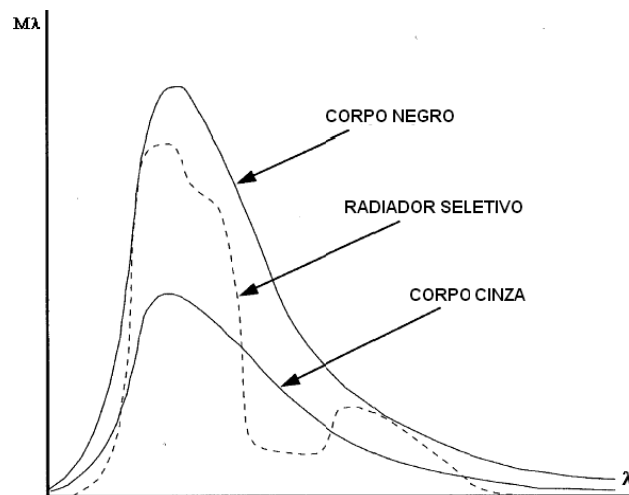


Figura 2.7 – Exitância radiante espectral dos três tipos de fontes de radiação (Flir, 2003).

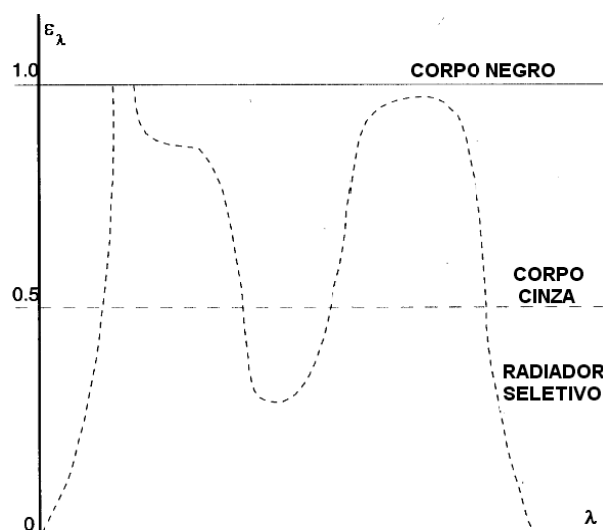


Figura 2.8 – Emissividade espectral dos três tipos de fontes de radiação (Flir, 2003).

De acordo com a lei de Kirchhoff, a capacidade de um corpo em absorver energia incidente em um determinado comprimento de onda é equivalente à capacidade deste corpo em emitir energia no mesmo comprimento de onda.

Para uma melhor compreensão, considere um objeto opaco que está em equilíbrio térmico. Sua temperatura permanece constante e, de acordo com a lei de Kirchhoff, para que isto aconteça, a radiação emitida deve estar balanceada com a radiação absorvida. Por outro lado, se a radiação emitida é maior que a radiação absorvida, o objeto se resfriará. Se a radiação absorvida for maior do que a radiação emitida, o objeto se aquecerá.

A capacidade de uma superfície em emitir e absorver radiação, em um determinado comprimento de onda, está relacionada à emissividade espectral, sendo que superfícies com alta emissividade têm maior capacidade de emitir e absorver radiação do que superfícies com baixa emissividade.

2.3. Revisão da Literatura específica

Posteriormente à comercialização dos primeiros termovisores, em meados da década de 60, alguns trabalhos começaram a ser desenvolvidos e publicados. Inicialmente trabalhos preocupados em apresentar a nova tecnologia à sociedade civil e como ela poderia ser aplicada às diversas áreas do conhecimento humano. Entre eles, o trabalho de Ferreti e Giorgi (1969), no qual cita a possibilidade de aplicação da termografia em várias áreas e aponta a área médica e a área elétrica como áreas típicas para sua utilização.

Com a aplicação da nova tecnologia, começaram a surgir trabalhos preocupados com os resultados obtidos. Veratti (1981) descreve a aplicação da termografia em indústrias petroquímicas e em inspeções elétricas. Cita critérios de temperatura para priorizar as manutenções, lembrando de correlacioná-los com a corrente do circuito, importância da linha, tipo de componente e a sua tolerância.

Snell e Spring (1992) apresentam alguns fatores importantes para o sucesso de um programa de inspeção termográfica, dentre eles o treinamento e a segurança do pessoal envolvido, a escolha do termovisor adequado, a definição da

periodicidade de inspeção, a necessidade de relatórios detalhados e um banco de dados para armazenar os dados das inspeções. Discutem ainda, como esses fatores devem ser incluídos em um programa de inspeção utilizando a termografia.

Snell (1995) discute a validade de se usar as leituras de temperatura, obtidas pela termografia, para determinar a severidade de um problema em sistemas elétricos. Segundo Snell, o pouco conhecimento em medidas radiométricas de grande parte dos inspetores de termografia, as variações das condições de campo, as limitações inerentes à medida radiométrica e a escassa pesquisa científica sobre a relação entre a elevação de temperatura do componente e o tempo esperado de sua falha, são algumas das razões para não confiar nesta metodologia. Snell apresenta quatro normas americanas para inspeção elétrica utilizando termografia: *National Electrical Testing Association* - NETA, *United States Navy* - US NAVY, *Infraspection Institute*, e *Nuclear Maintenance Applications Center* – NMAC. A respeito delas observa que todas possuem critérios para priorizar reparos baseados em temperatura, mas que permitem ao inspetor de termografia mudar esta prioridade de acordo com sua avaliação pessoal e com pouca orientação de como isso deve ser feito. Snell mostra as diversas variáveis que influenciam nos resultados de uma inspeção termográfica quantitativa para reafirmar o uso de uma termografia qualitativa. Por outro lado, apresenta ações para melhorar a confiabilidade de inspeções termográficas quantitativas e afirma que se a relação entre corrente e temperatura, o impacto das influências atmosféricas na medida de temperatura e a relação entre o aquecimento e o tempo relativo à falha do componente fossem mais bem compreendidos, a inspeção termográfica quantitativa ganharia mais credibilidade.

Snell (1996) aborda a necessidade de uma padronização na inspeção termográfica através de procedimentos escritos e considera que eles são vitais para produzir resultados consistentes e de alta qualidade, além de auxiliar na segurança do termografista, por essa razão, pode vir a ser solicitado por agências regulatórias. Snell faz uma revisão das normas e procedimentos existentes para inspeções termográficas, assim como, das normas para qualificação e certificação de inspetores de termografia. Expõe a preocupação de entidades, como a *American*

Society of Testing and Materials - ASTM, Electric Power Research Institute - EPRI e American Society for Nondestructive Testing – ASNT, no desenvolvimento de normas específicas para inspeções em sistemas elétricos. Apresenta ainda, uma metodologia geral de como desenvolver um procedimento escrito e avalia que o investimento no seu desenvolvimento pode ser alto, mas que o retorno é significativamente maior.

O trabalho de Epperly et al. (1997) aborda a questão de que um programa de inspeção termográfica utilizando equipamento adequado e pessoal devidamente treinado pode ser extremamente efetivo para prevenir falhas potenciais em sistemas elétricos. O artigo faz uma breve descrição da termografia por infravermelho e de suas vantagens e limitações. Descreve estudos de caso, cita critérios para seleção de um termovisor adequado e apresenta vários critérios e recomendações para determinar a urgência do reparo após a descoberta do defeito pela inspeção termográfica.

Snell e Fritz (1998) discutem o risco de predizer uma falha simplesmente através da medida temperatura pela termografia. Alegam que vários fatores tornam a medida radiométrica muito imprecisa. Fatores como a baixa emissividade dos componentes inspecionados, as variações na corrente de carga, o efeito da convecção natural e forçada, as mudanças na temperatura ambiente e o fato de que, na maioria das vezes, o ponto medido está na superfície do componente e não no ponto em que está realmente a fonte do aquecimento. Snell e Fritz detalham cada um desses fatores e apresentam técnicas importantes para melhorar os resultados obtidos com a termografia por infravermelho em inspeções elétricas.

Abordagens mais detalhadas, focando fatores específicos de influência nos resultados de uma inspeção termográfica, são encontradas em trabalhos como:

Madding e Lyon Jr. (1999) fazem uma revisão dos fatores que influenciam na avaliação de um resultado obtido por termografia por infravermelho, desde a corrente de carga a elementos climáticos.

Madding e Lyon Jr. (2000) mostram, através de um ensaio em laboratório,

que baixas velocidades do vento têm uma forte influência em pontos aquecidos e que o resfriamento continua com o aumento da velocidade, mas em taxas menores. Mostram também que a quantidade de resfriamento não depende somente da velocidade do vento, mas da potência dissipada no ponto aquecido. Madding e Lyon Jr. advertem que, na tentativa de corrigir os efeitos do vento na medida de temperatura, algumas empresas têm usado simples fatores multiplicativos e afirma que essa prática não é correta. Eles lembram que o resfriamento por convecção depende de muitos fatores, entre eles, o tamanho, a forma, a orientação do vento e as estruturas que envolvem o ponto sob análise.

O artigo de Lyon Jr. et al. (2002) discute a relação entre a corrente e a temperatura de uma conexão defeituosa, bem como a resposta térmica em função da corrente de carga. Afirma que procedimentos, baseados apenas na medida de temperatura absoluta ou na elevação da temperatura, correm o risco de diagnósticos incorretos e que podem levar a falso senso de segurança, falha de equipamentos e até danos pessoais. Comenta a necessidade de conhecimento dos fatores envolvidos nos diagnósticos, sendo um deles a corrente de carga, que tem um drástico efeito sobre a temperatura do componente sob inspeção. Esse efeito sobre a temperatura é complexo e depende dos processos de transferência de calor por radiação, condução e convecção e as muitas variáveis envolvidas. Nesse artigo é apresentado um ensaio realizado em laboratório em condições controladas, no qual é simulado um defeito nos contatos de uma Chave Fusível. A elevação da temperatura e a corrente foram monitoradas e, através dos dados obtidos, Lyon Jr. et al. (2002) sugerem uma variação do expoente x , utilizado na Equação 2.11, entre um valor de 1,5 e 1,8. Essa variação seria para se estimar a faixa de aumento da temperatura em função da corrente. Portanto, a Equação 2.12 define a temperatura mínima e a Equação 2.13 define a temperatura máxima alcançada.

$$\theta_2 = \theta_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^x \quad (2.11)$$

$$\theta_{\min} = \theta_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^{1,5} \quad (2.12)$$

$$\theta_{\max} = \theta_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^{1,8} \quad (2.13)$$

O trabalho de Madding (2002) aponta como a emissividade afeta a medida de temperatura e discute técnicas para sua medição. Madding propõe a fabricantes que seus equipamentos sejam revestidos por materiais de alta emissividade e possuam informação a respeito de assinaturas térmicas (distribuição térmica, típica de um determinado objeto) e modelos térmicos sob todos os tipos de condições ambientais.

3. PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS

A termografia é um método não destrutivo e não invasivo. Através de um termovisor é capaz de detectar, à distância, a radiação emitida pelo objeto sob análise e convertê-la em uma imagem bidimensional. Essa imagem ou termograma cria um mapa das radiações vindas da superfície do objeto (emitida, refletida e/ou transmitida) e que devidamente tratadas podem ser relacionadas ao seu mapa térmico e convertidas em leituras de temperatura. Apesar de parecer um procedimento simples, a aquisição e análise dos termogramas, bem como a obtenção de leituras corretas dependem do conhecimento e ponderamento de várias influências inerentes ou inseridas ao processo. Essas influências podem estar relacionadas ao termografista, ao termovisor, ao equipamento sob inspeção e às condições do meio em que a inspeção está se desenvolvendo. Neste capítulo é proposto, para estudo e uma melhor compreensão, o agrupamento e classificação dessas influências em três categorias: Qualificação Pessoal, Técnica e Atmosférica.

3.1. Influências de Qualificação Pessoal

A Qualificação Pessoal está relacionada à pessoa que faz a inspeção, ou seja, o termografista. Atualmente os resultados obtidos pela inspeção termográfica são consideravelmente dependentes do termografista. Por essa razão, a Qualificação Pessoal talvez seja uma das influências mais significativas, visto que, um termografista não qualificado pode, inicialmente, ter dificuldade de saber o que e onde inspecionar. Posteriormente, ter dificuldades em capturar termogramas de qualidade e, por fim, faltar conhecimento para realizar uma correta análise do termograma (Santos, 2011).

Para reduzir ou eliminar a influência de Qualificação Pessoal, é fortemente recomendável que o termografista tenha aptidão física, seja treinado e possua um nível adequado de experiência. A normatização de todo o processo, procedimentos de inspeção e qualificação do termografista, também podem ajudar a reduzir a influência de Qualificação Pessoal.

3.1.1. Aptidão Física

Por se tratar de um método que se utiliza de visores e monitores, para a visualização de imagens, é necessário que o termografista apresente boa acuidade visual próxima, seja ela, natural ou corrigida. É necessário também, que o termografista seja capaz de fazer a diferenciação correta das cores para a análise de termogramas coloridos. No caso de uma deficiência na percepção das cores, o termografista deve ter conhecimento dessa deficiência e substituir as imagens coloridas por imagens em tons de cinza.

3.1.2. Treinamento

É importante que o termografista seja treinado e que seu treinamento contenha informações sobre a operação e as características do termovisor utilizado, a teoria básica dos fenômenos físicos que envolvem a termografia e os procedimentos de inspeção e análise dos componentes e equipamentos sob inspeção.

3.1.3. Experiência

Mesmo sendo treinado, é recomendável que o termografista, sob uma supervisão qualificada, adquira experiência até estar apto a realizar inspeções com resultados confiáveis.

3.1.4. Normatização e Certificação

Para que os resultados alcançados pela termografia possam ter um tratamento sistêmico e com níveis de repetibilidade aceitáveis, é importante que procedimentos padronizados sejam estabelecidos tanto para a aplicação do método, como para a qualificação do termografista (aptidão física, treinamento e experiência). Nesse sentido, para o benefício e com a cooperação das entidades interessadas, diversas normas internacionais foram criadas.

Como exemplos de procedimentos de aplicação, podem ser citadas as normas:

-
- ISO 18434-1 – *Condition monitoring and diagnostics of machines - Thermography - Part 1: General procedures* publicada pela International Organization for Standardization (ISO) (ISO, 2011).
 - ASTM E1934 - *Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography* publicada pela ASTM International (ASTM, 1999).

Entre os exemplos de recomendações e normas para a qualificação de pessoas, que contemplam a termografia, estão:

- Recommended Practice No. SNT-TC-1A - *Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing* publicada pela American Society for Nondestructive Testing (ASNT) (ASNT, 2006).
- EN 473 - *Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel - General principles* publicada pelo European Committee for Standardization (CEN) (CEN, 2011)
- ISO 9712 - *Non-destructive testing - Qualification and certification of personnel* publicada pela International Organization for Standardization (ISO) (ISO, 2011).
- ISO 18436 - *Condition monitoring and diagnostics of machines - Requirements for qualification and assessment of personnel - Part 7: Thermography* publicada pela International Organization for Standardization (ISO) (ISO, 2011).

No Brasil, a normatização relacionada à termografia teve início em 2005. Naquele ano a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI), entidade certificada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como Organismo de Normalização Setorial (ONS-58) e responsável pela elaboração das normas brasileiras de Ensaios Não Destrutivos, constituiu a Comissão de Estudos de termografia - CE-58:000.11 para preparar as normas relativas à termografia (Santos, 2011).

Através da CE-58:000.11 foram criadas, até o final de 2011, cinco normas relacionadas ao método de termografia (ABNT, 2011):

- ABNT NBR 15424 - Ensaaios não destrutivos - Termografia – Terminologia.
- ABNT NBR 15572 - Ensaaios não destrutivos - Termografia por infravermelho - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos.
- ABNT NBR 15718 - Ensaaios não destrutivos - Termografia - Guia para verificação de termovisores.
- ABNT NBR 15763 - Ensaaios não destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência.
- ABNT NBR 15866 - Ensaaios não destrutivos - Termografia - Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos.

Paralelamente à CE-58:000.11, a ABENDI formou um Grupo de Trabalho e iniciou a criação da norma para sistematizar a qualificação e certificação de pessoal em termografia.

A ABENDI é acreditada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro sob a norma ABNT NBR ISO/IEC 17024, como Organismo de Certificação de Pessoas – OPC. Essa acreditação tem como escopo a certificação de inspetores de ensaios não destrutivos para Ensaio Visual, Líquido Penetrante, Partículas Magnéticas, Ultra Som, Ensaaios Radiográficos (Raios Gama e Raios X) e Correntes Parasitas (Santos, 2011).

Através do Grupo de Trabalho a ABENDI busca a acreditação para ensaios de termografia e como parte das ações necessárias elaborou a norma:

- NA-009 – Qualificação e Certificação de pessoas em termografia (ABENDI, 2011).

A partir da NA-009, a ABENDI pretende iniciar a certificação brasileira de termografistas em 2012.

3.2. Influências Técnicas

As influências Técnicas estão relacionadas às características (especificações) do termovisor utilizado e às condições do equipamento sob inspeção.

3.2.1. Características do termovisor

O termovisor selecionado para uma determinada inspeção é elemento fundamental na qualidade e na confiabilidade dos resultados obtidos. Suas características devem ser adequadas às condições do componente a ser inspecionado e às condições do meio onde acontece a inspeção. Por exemplo:

- A faixa de temperatura de medição e a faixa de comprimento de onda que o termovisor deve responder estão relacionadas às temperaturas dos objetos a serem inspecionados.
- A resolução espacial e a resolução de medida precisam ser adequadas à distância e ao tamanho do objeto a ser inspecionado.
- A faixa de temperatura de operação do termovisor deve atender à variação da temperatura do local onde se desenvolve a inspeção; etc.

Assim sendo, é importante conhecer e saber escolher o termovisor com as melhores características para uma determinada inspeção e diminuir essa influência nos resultados. Entre as características mais importantes e que devem ser observadas, estão:

- Tecnologias de detecção e tipos de detectores
- Faixa espectral
- Faixa de temperatura
- Temperatura de operação
- Resolução espacial e resolução de medida
- Sensibilidade térmica
- Taxa de repetição de quadro (*Frame Rate*)

3.2.1.1. Tecnologias de detecção e tipos de detectores

Os termovisores comerciais se utilizam basicamente de dois tipos de tecnologias de detecção:

- Sistema de detecção por varredura (*Scanning system*). Faz uso de um conjunto eletromecânico de espelhos e/ou prismas rotativos com os quais faz a varredura da cena de interesse. A vantagem dessa configuração é a utilização de apenas um detector ou de um arranjo linear de detectores. Por outro lado, essa varredura limita a taxa de repetição dos quadros (*Frame Rate*) e prejudica a resolução da imagem.
- Sistema fixo de detecção ou sem varredura (*Staring system*). Um dos mais utilizados, a Matriz de plano focal (*Focal Plane Array – FPA*) é composta de uma matriz bidimensional de detectores, na qual a radiação infravermelha proveniente da cena de interesse atinge diretamente. Como não existe a necessidade de varredura, a taxa de repetição dos quadros (*Frame Rate*) pode ser alta e cada elemento de detecção pode monitorar continuamente a emissão de radiação vinda do objeto sob inspeção (Maldague e Moore, 2001).

Dos componentes que compõem o termovisor, o detector de infravermelho é um dos mais importantes e fator limitante de desempenho.

Os detectores podem ser divididos em duas grandes categorias:

- Detectores térmicos: Respondem a uma mudança de temperatura com uma variação de alguma propriedade física, como por exemplo, a variação de sua resistência. Operam na temperatura ambiente e têm uma resposta espectral ampla e uniforme. Comparados aos fotodetectores possuem uma sensibilidade baixa e tempo de resposta lento (da ordem de milissegundos). Os detectores térmicos mais comuns são os Bolômetros (muito utilizados nos termovisores atuais) e as termopilhas.
- Detectores de fótons ou fotodetectores: Respondem diretamente à incidência de radiação liberando cargas elétricas. Geralmente operam em

temperaturas abaixo de zero para reduzir a relação sinal/ruído e melhorar o desempenho. Para isso, necessitam de resfriamento criogênico ou resfriamento por processo elétrico. Possuem uma resposta espectral limitada, alta sensibilidade e rápido tempo de resposta (da ordem de microssegundos). O detector de Mercúrio-Cádmio-Telúrio (HgCdTe) é um exemplo de fotodetector (Wolfe, 1996).

3.2.1.2. Faixa espectral

As faixas de comprimento de onda mais utilizadas para a fabricação de termovisores aplicáveis ao sistema elétrico são de 3 μm a 5 μm e de 8 μm a 14 μm . Nessas faixas a transmitância da atmosfera à radiação infravermelha é alta. Dentre elas, a faixa de 8 μm a 14 μm é a mais recomendada por apresentar uma transmitância ainda maior (Ghosh e Galeski, 1994). Além disso, essa faixa é menos sensível a falsos pontos de alta temperatura resultantes do reflexo solar, como pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Energia disponível nas faixas de comprimento de onda dos termovisores (Rogalski e Chrzanowski, 2002)

Região de infravermelho (μm)	Radiação solar ao nível do solo (W/m^2)	Emissão de um Corpo Negro a 290 K (W/m^2)
3 a 5	24	4,1
8 a 13	1,5	127

Outra vantagem é que, para as temperaturas normalmente encontradas em sistemas elétricos, a radiação emitida nessa faixa é maior.

O gráfico o gráfico da Figura 3.1 mostra a radiação emitida por um Corpo Negro a uma temperatura de 300 K (26,8 °C) em função do comprimento de onda e destaca as faixas de 3 μm a 5 μm e 8 μm a 14 μm com suas respectivas energias emitidas (Kaplan, 2000).