

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 memoriam*) 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 ($\lambda_{m\acute{a}x}$) 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-Eletronbras 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)

$\Delta\theta_{\odot}$ – 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)

$\Delta\theta_{\text{R}}$ – 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 conseqüente 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 Hershel, filho de Sir William Hershel. 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 Hershel 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.

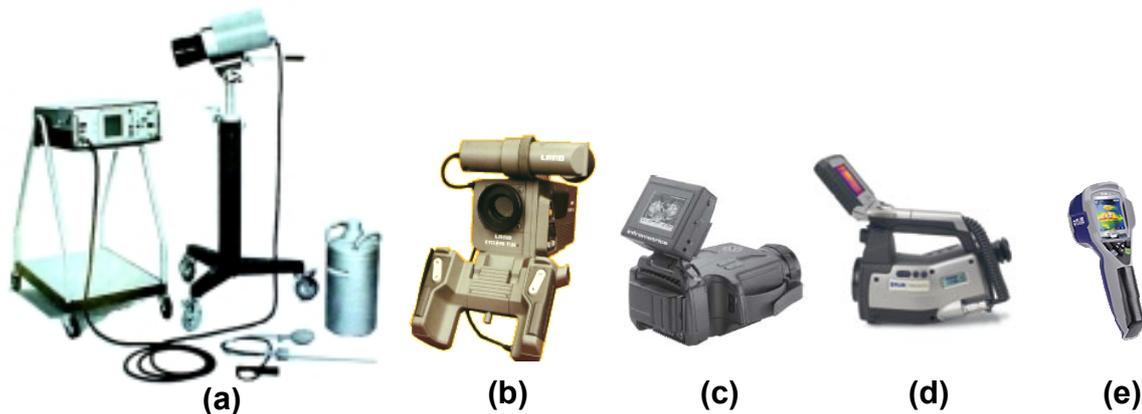


Figura 2.1 – Evolução dos termovisores

- (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 ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), 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:

$M_{b\lambda} \left(\frac{W/m^2}{\mu m} \right)$ 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.

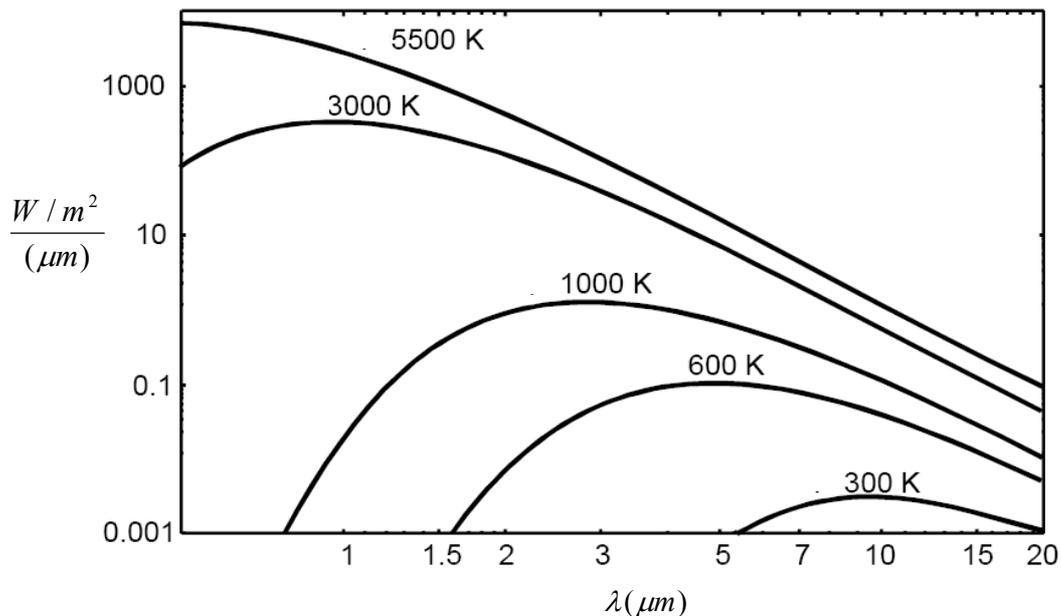


Figura 2.3 – Exitância radiante espectral de um Corpo Negro (Chrzanowski, 2001).

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} .

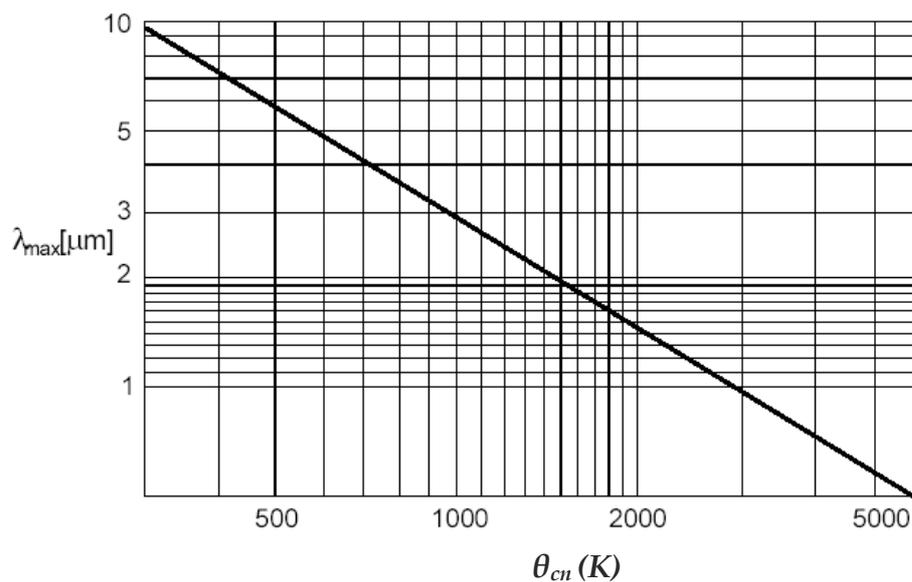


Figura 2.4 – Comprimento de onda ($\lambda_{m\acute{a}x}$) em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro (M_b) em uma dada temperatura (θ_{cn}) (Chrzanowski, 2001).

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:

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

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}).

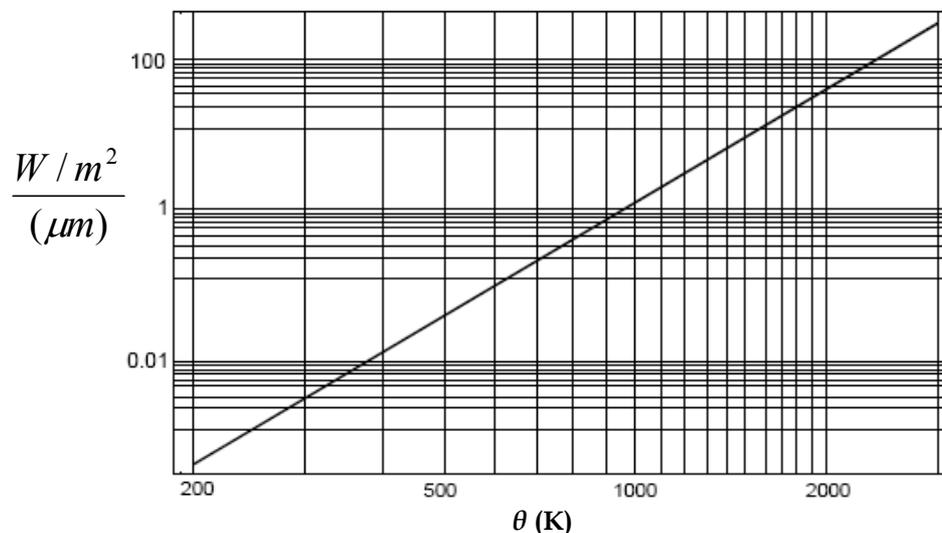


Figura 2.5 – Exitância radiante total do Corpo Negro em uma dada temperatura (Chrzanowski, 2001).

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 emitância 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 absorvância, refletância e transmitância no balanço da energia radiativa, e a segunda é a lei de Kirchhoff que relaciona absorvância 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.

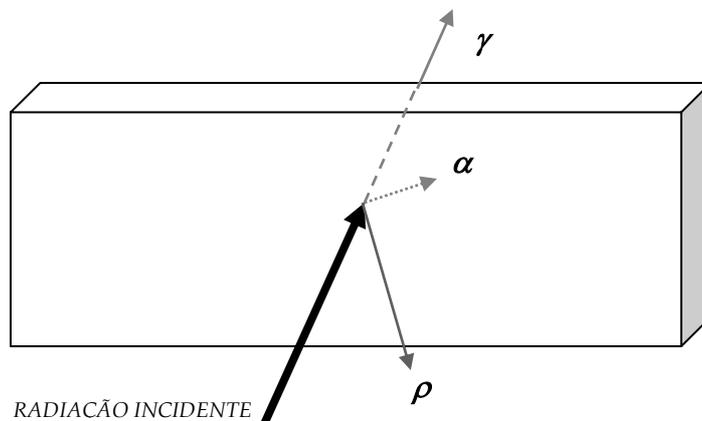


Figura 2.6 – Representação gráfica da radiação incidente em um objeto real e as possíveis frações de radiação absorvida (α), refletida (ρ) e transmitida (γ).

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.

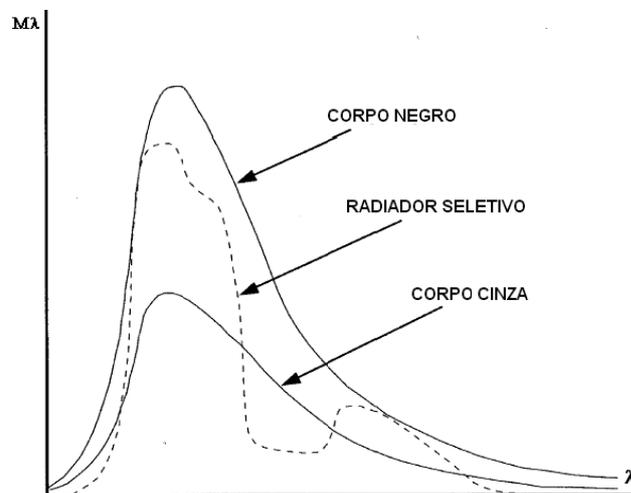


Figura 2.7 – Exitância radiante espectral dos três tipos de fontes de radiação (Flir, 2003).

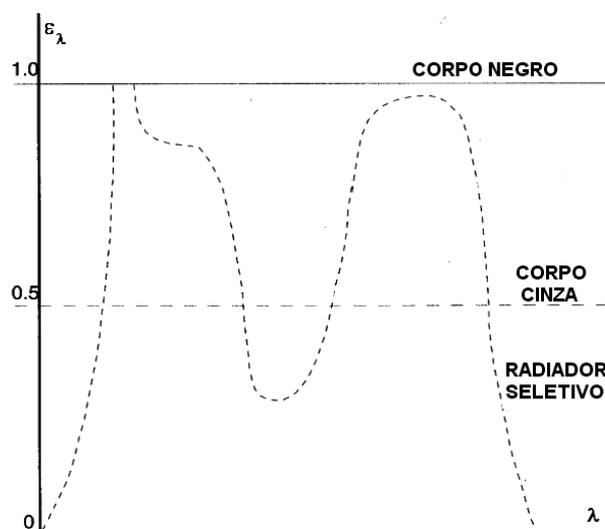


Figura 2.8 – Emissividade espectral dos três tipos de fontes de radiação (Flir, 2003).

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 prever 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 Ensaio 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 Ensaio 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 a 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).



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 $^{\circ}\text{C}$) (Kaplan, 2000).

3.2.1.3. Faixa de temperatura

É a faixa de temperatura na qual o termovisor é capaz de medir. A temperatura do objeto sob inspeção deve estar dentro dessa faixa.

No caso de subestações de alta tensão, geralmente, a menor temperatura encontrada nos equipamentos e conexões vai estar próxima à temperatura ambiente e a maior pode chegar, em casos extremos, à temperatura de fusão dos metais utilizados (ex.: alumínio = 657,7 $^{\circ}\text{C}$). Apesar disso, a faixa de -20 $^{\circ}\text{C}$ a 500 $^{\circ}\text{C}$, normalmente comercializada, já é suficiente para as inspeções em sistemas elétricos, visto que, o limite máximo da faixa (500 $^{\circ}\text{C}$) é uma temperatura muito alta e deve ser evitada em componentes elétricos. Além disso, acima dessa temperatura, parte da radiação emitida pelo objeto começa a entrar na faixa de comprimento de onda visível (conforme a lei de deslocamento de Wien), podendo ser detectada a olho nu e sem o auxílio de um termovisor. Outro motivo importante é a redução de custo do termovisor.

3.2.1.4. Temperatura de operação

É a faixa de temperatura na qual o termovisor pode operar e que o fabricante garante as especificações fornecidas.

A temperatura do ambiente em que se encontra o termovisor, durante a inspeção, deve estar dentro de sua temperatura de operação. A faixa de temperatura de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, geralmente comercializada, atende a maioria das aplicações.

3.2.1.5. Resolução espacial

Define o menor detalhe de imagem que pode ser percebido pelo termovisor. É função do tamanho do detector e da óptica do sistema. Na maioria das vezes é especificado em radianos e definido como “Campo de Visão Instantâneo” (*Instantaneous Field of View – IFOV*).

O IFOV é equivalente à projeção de um pixel na superfície observada e, a soma de todos os IFOVs forma o Campo de Visão (FOV), que é a área total que pode ser vista pelo termovisor, como pode ser visto na Figura 3.2. Geralmente o FOV é declarado em graus pelo fabricante.

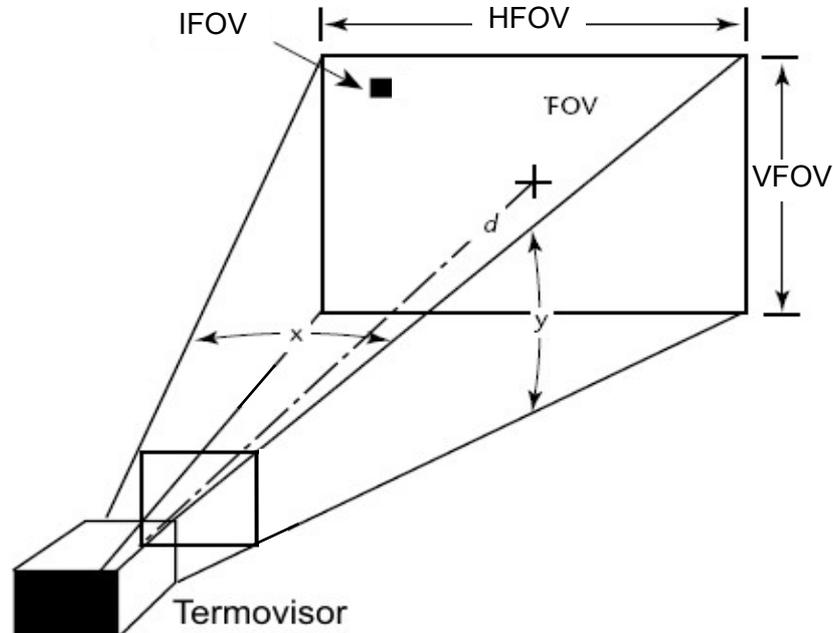


Figura 3.2 – Representação do FOV e do IFOV de um termovisor (Kaplan, 1999).

Em subestações de alta tensão, cujas distâncias do termovisor ao objeto são relativamente grandes e os diâmetros de cabos e dimensões das conexões são

relativamente pequenos, o Campo de Visão Instantâneo pode fazer a diferença entre localizar, ou não, um defeito.

Lentes telescópicas podem melhorar a resolução espacial, em contrapartida estreitam o campo de visão do termovisor, como mostrado na Figura 3.3.

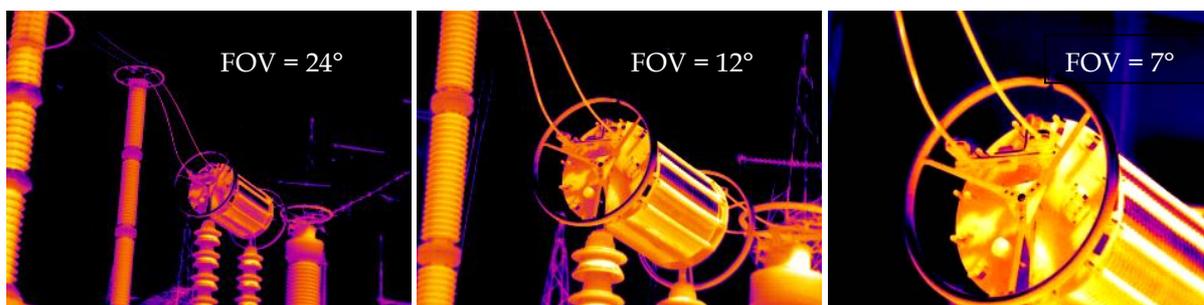


Figura 3.3 – Filtro de onda observado de uma mesma distância com termovisor de 320x240 e lentes de 24°, 12° e 7°.

3.2.1.6. Resolução de medida

Define o menor objeto que pode ter sua temperatura medida com exatidão a uma determinada distância.

Raramente a resolução de medida é declarada nas especificações do fabricante do termovisor, mas é tipicamente inferior a resolução espacial por um fator entre 2 e 4. Por essa razão, em muitas situações, o objeto poderá ser detectado pelo termovisor, mas a sua temperatura não poderá ser medida corretamente, isto é, dentro das especificações do fabricante.

A resolução de medida, quando fornecida pelo fabricante, é especificada em radianos e definida como “Campo de Visão Instantâneo de Medida” (*Measuring Instantaneous Field of View* – MIFOV ou IFOV_m).

Leituras de temperatura obtidas fora dos limites da resolução de medida normalmente serão menores que a leitura real, o que pode ter grande influência na análise da gravidade do defeito (Snell, 2005).

3.2.1.7. Sensibilidade térmica

Refere-se à menor temperatura que o termovisor pode diferenciar do ruído de seu sistema. Geralmente é especificada como a Diferença de Temperatura Equivalente ao Ruído (*Noise Equivalent Differential Temperature - NEDT ou Noise Equivalent Temperature Difference - NETD ou Noise Equivalent Temperature - NET*) que é definida como a diferença de temperatura entre um corpo negro e um fundo (*background*) corpo negro, sendo a relação sinal-ruído igual à unidade (ISO, 2010).

A sensibilidade térmica é inversamente proporcional à temperatura em que o objeto está envolvido, o que significa que o sistema torna-se mais ruidoso em baixas temperaturas e a resolução de temperatura diminui. Quando a temperatura ambiente cai, termovisores com resposta espectral na faixa de 3 μm a 5 μm tendem a ter sua sensibilidade mais prejudicada do que termovisores com resposta espectral de 8 μm a 14 μm (Holst, 2000).

3.2.1.8. Taxa de repetição de quadro (*Frame Rate*)

É o número de vezes que uma imagem completa (FOV) é atualizada pelo termovisor em um segundo (ISO, 2010). Baixas taxas de repetição de quadro produzem uma imagem borrada quando existe um movimento relativo entre o termovisor e o objeto sob inspeção, como é o caso de equipamentos rotativos.

3.2.2. Condições do equipamento sob inspeção

Durante uma inspeção termográfica, devem ser consideradas para a análise dos resultados:

- Localização
- Corrente de carga
- Condição da superfície (emissividade)

3.2.2.1. Localização

A localização do equipamento sob inspeção deve ser considerada quanto à sua distância em relação ao termovisor e, se existe ou não, uma visada direta entre a área a ser medida e o sistema óptico do termovisor.

Com relação à distância, duas características podem interferir nos resultados: a resolução espacial do termovisor e a atenuação atmosférica. A primeira é uma influência Técnica e está relacionada ao IFOV, já discutido anteriormente e pode ser reduzida ou eliminada utilizando lentes adequadas ou, se possível, diminuindo a distância entre o termovisor e o componente sob inspeção. A última é uma influência Atmosférica e será discutida no Item 3.3.4.

Com relação à visada direta, é importante observar que para detectar e analisar uma anomalia térmica em um equipamento, a melhor condição é quando a fonte dessa anomalia está sob visada direta do termovisor, ou seja, sem nenhum obstáculo entre a fonte e o termovisor. Obstáculos opacos ou parcialmente opacos ao infravermelho e, em alguns casos, transparentes na faixa do visível, podem impedir a detecção do defeito e/ou provocar uma má interpretação por parte do termografista. Para eliminar ou reduzir esse problema, o termografista deve avaliar a possibilidade de mudança de posição em relação à fonte da anomalia ou utilizar objetos de alta reflexão no infravermelho para refletir a radiação da anomalia para o termovisor. Utilizando esse procedimento deve-se considerar, na análise final, a perda de radiação, uma vez que o refletor nunca é ideal.

3.2.2.2. *Corrente de carga*

O aquecimento gerado em uma conexão defeituosa depende da corrente que passa através dela, sendo que a potência dissipada é proporcional ao quadrado da corrente ($P=i^2.R$). Para Lyon Jr. e Orlove (2002), a temperatura, apesar de aumentar com a corrente, segue um padrão mais complexo, entre uma taxa linear e geométrica.

Durante sua operação, o equipamento pode sofrer variações de carga que influenciam na sua temperatura e na análise dos resultados da inspeção. Assim sendo, a corrente de carga é um importante fator que deve ser considerado em inspeções termográficas de sistemas elétricos.

A corrente circulante pelo componente sob inspeção não causa erros na medida de temperatura realizada pelo termovisor, mas se não levada em consideração na análise do componente, pode induzir o termografista a um

diagnóstico equivocado. Por exemplo, em casos em que a corrente é baixa, certos defeitos podem não ser percebidos ou defeitos graves podem ser subestimados.

Para eliminar a influência da corrente de carga na inspeção termográfica, o ideal seria a realização da inspeção com os equipamentos operando em plena carga e por um tempo suficiente para a estabilização das temperaturas envolvidas; no entanto, essa condição dificilmente é alcançada no sistema elétrico devido à variação do consumo de energia. Apesar dessa dificuldade, a inspeção termográfica é essencial para ajudar a prevenir falhas e deve ser realizada, mesmo quando não se alcança a condição ideal. Porém, é necessário um método capaz de transformar os dados, obtidos em uma condição não ideal, em dados significativos para uma análise confiável. No Capítulo 5 é proposto um modelo matemático para auxiliar nas análises de defeitos em conectores sujeitos a um regime de corrente variável.

3.2.2.3. Condição da superfície - Emissividade

A condição da superfície do componente influencia na emissividade. A emissividade representa a capacidade de uma superfície de emitir mais ou menos radiação. Como os termovisores não medem temperatura diretamente e sim radiação, as leituras de temperatura fornecidas pelo termovisor tornam-se muito dependentes da emissividade, como mostra a Equação 3.1 que representa a radiância emitida por um objeto opaco e medida pelo termovisor (Madding, 2002).

$$L_m = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (\theta_{objeto})^4 + (1 - \varepsilon) \cdot \sigma \cdot (\theta_{fundo})^4 \quad (3.1)$$

Onde:

$L_m \left(\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right)$ é a radiância medida pelo termovisor;

ε é a emissividade da superfície do objeto sob inspeção;

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

θ_{objeto} (K) é a temperatura da superfície do objeto sob inspeção;

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

Lembrando que sr é o equivalente tridimensional do radiano, sendo definido como: “ângulo sólido subtendido no centro da esfera de raio r por uma porção de superfície de área r^2 ”.

Os valores de emissividade vão de 0 (zero), para um refletor perfeito, a 1 (um), para o emissor perfeito (Corpo Negro). A emissividade pode variar com a direção de observação relativa à superfície, com o comprimento de onda e com a temperatura da superfície (Gaussorgues, 1994).

Para realizar medidas corretas de temperatura, o termografista deve conhecer a emissividade da superfície e informar ao termovisor. Isso pode ser feito medindo a emissividade da superfície antes de se realizar a medição.

Em sistemas elétricos, principalmente de alta tensão, a medição de emissividade, durante a inspeção, se torna praticamente impossível. Para reduzir os erros relacionados com a emissividade, o termografista deve buscar fazer a medição de temperatura nas áreas da anomalia onde a emissividade é maior. Áreas com oxidação, corrosão, sujeira ou cavidades apresentam um incremento da emissividade e conseqüente aumento na exatidão da medida de temperatura realizada pelo termovisor. O termografista deve buscar também, uma visão mais perpendicular da superfície da anomalia, a fim de evitar os erros de emissividade devido ao ângulo de visão.

3.3. Influências Atmosféricas

O meio onde é realizada a inspeção termográfica pode alterar consideravelmente os resultados obtidos e, se não ponderado, levar a diagnósticos equivocados.

As influências Atmosféricas, aqui consideradas como o conjunto dos elementos climáticos e a atenuação atmosférica devido à distância envolvida entre o

termovisor e o componente sob inspeção, podem afetar a distribuição térmica dos componentes e a temperatura da anomalia térmica ou a quantidade de radiação que chega ao termovisor. Isso exige do termografista conhecimento e experiência na hora de avaliar a gravidade do defeito.

Dentro das influências Atmosféricas pode-se listar:

- Temperatura ambiente
- Radiação solar (carregamento solar e reflexo solar)
- Vento
- Atenuação atmosférica, umidade relativa do ar, nevoeiro e chuva

3.3.1. Temperatura ambiente

Análises de inspeções termográficas devem levar em conta a temperatura ambiente. Considerando as outras influências estáveis, um aumento da temperatura ambiente resultará em um aumento da temperatura da anomalia, assim sendo, falhas têm uma maior probabilidade de ocorrerem durante temperaturas ambiente mais altas.

Geralmente a temperatura ambiente é maior durante o dia, portanto, análises de inspeções realizadas durante a noite devem levar em consideração que, durante o dia, a temperatura da anomalia pode subir, tanto em função do carregamento solar, como em função do aumento da temperatura ambiente. Raciocínio semelhante deve ser feito quando inspeções são realizadas no inverno: em função de uma temperatura ambiente mais elevada, a temperatura da anomalia tenderá a subir nas outras estações do ano, principalmente no verão.

Outro fato a ser observado e já discutido anteriormente, é que a sensibilidade térmica do termovisor piora quando a temperatura ambiente diminui. O sistema de detecção torna-se mais ruidoso e a resolução de temperatura reduz (Holst, 2000).

3.3.2. Radiação solar

A radiação solar não impede que uma inspeção termográfica seja realizada, mas pode prejudicar muito a qualidade e a análise dos resultados. Dois são os problemas causados pela radiação solar:

- O carregamento solar, que é o aumento da temperatura do objeto em função da radiação solar absorvida.
- O reflexo solar, que é o reflexo causado pela radiação emitida pelo Sol na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético.

3.3.2.1. Carregamento solar

Como pode ser observado na Figura 3.4(b), o carregamento solar provoca o aumento da temperatura dos componentes de uma subestação de uma maneira geral, dificultando a distinção, pela termografia, de um componente defeituoso de um normal, especialmente quando a diferença de temperatura entre eles é pequena. Além disso, a radiação solar pode elevar a temperatura de um componente defeituoso, cuja temperatura já é crítica, e conduzi-lo mais rapidamente à falha.

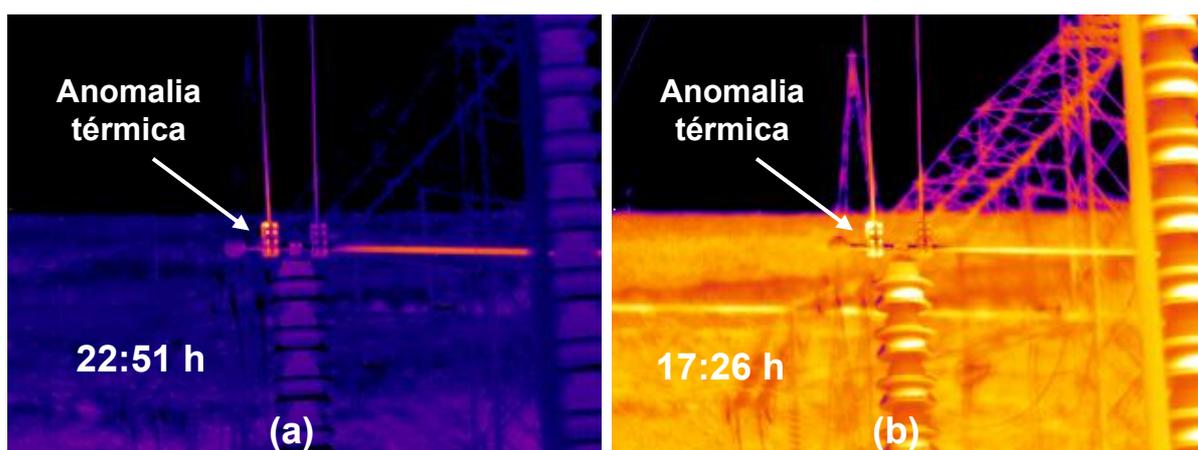


Figura 3.4 – (a) Termograma capturado sem carregamento solar - (b) Termograma capturado com carregamento solar

A radiação solar, que atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre, é composta de radiação ultravioleta, visível e infravermelha como mostra a Figura 3.5.

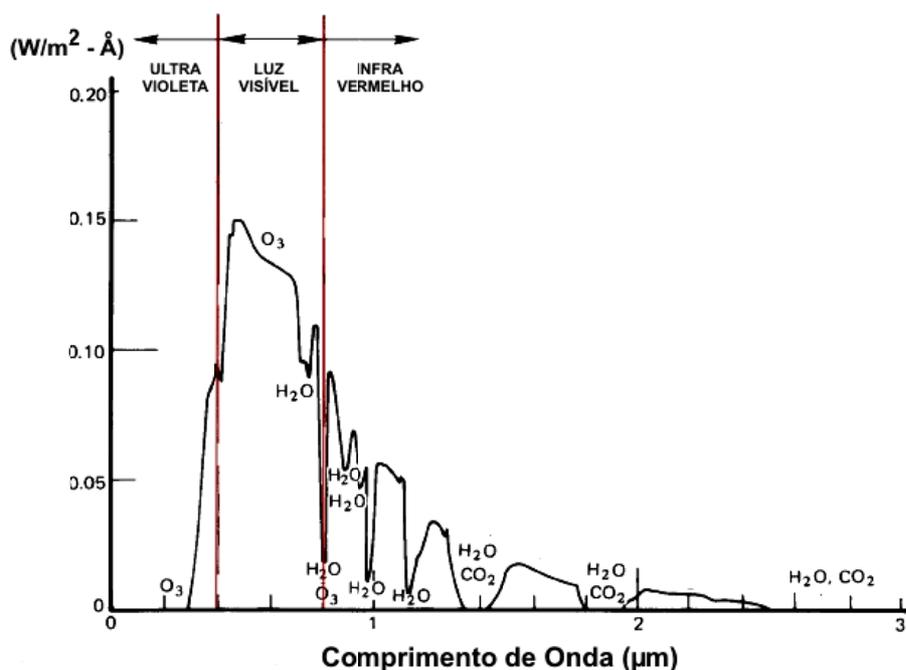


Figura 3.5 – Típico espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra (Incropera, 2011).

Todos os materiais, expostos a essa radiação e com alta absorção na região do espectro solar, tendem a aquecer. O quanto a temperatura irá aumentar dependerá de vários fatores, entre eles, o tempo de exposição ao Sol, da estação do ano, da hora do dia, da altitude e da relação entre o coeficiente de absorção na faixa de comprimento de onda da radiação emitida pelo Sol (α_{Sol}) e da emissividade da superfície (ϵ_{IV}) na faixa do comprimento de onda do infravermelho. Quanto maior essa relação ($\alpha_{Sol} / \epsilon_{IV}$), maior o aquecimento da superfície em função do carregamento solar (Holst, 2000).

A maior parte dos conectores utilizados em subestações é de liga de alumínio e possui uma relação $\alpha_{Sol} / \epsilon_{IV}$ alta. Por essa razão e como citado anteriormente, os conectores, quando expostos ao Sol, geralmente têm um aumento de temperatura considerável que, somado ao aquecimento gerado por uma anomalia, têm uma

maior probabilidade de falha do que quando não estão expostos à radiação solar.

Em função das dificuldades apresentadas para a detecção de anomalias térmicas durante o dia, recomenda-se que a inspeção termográfica seja realizada em horários livres do carregamento solar, ou seja, entre o por do sol e as primeiras horas do dia. Entretanto, deve-se levar em consideração, para efeito de análise e diagnóstico das anomalias térmicas, que as temperaturas medidas, no período livre do carregamento solar, poderão aumentar durante o dia devido à exposição ao Sol.

Na necessidade de realização da inspeção termográfica, durante dias ensolarados, o efeito do carregamento solar pode ser minimizado realizando a leitura de temperatura na superfície do componente oposta à incidência do Sol, como mostra a Figura 3.6(b). O problema é que esse procedimento nem sempre é possível dependendo da posição do componente sob inspeção.

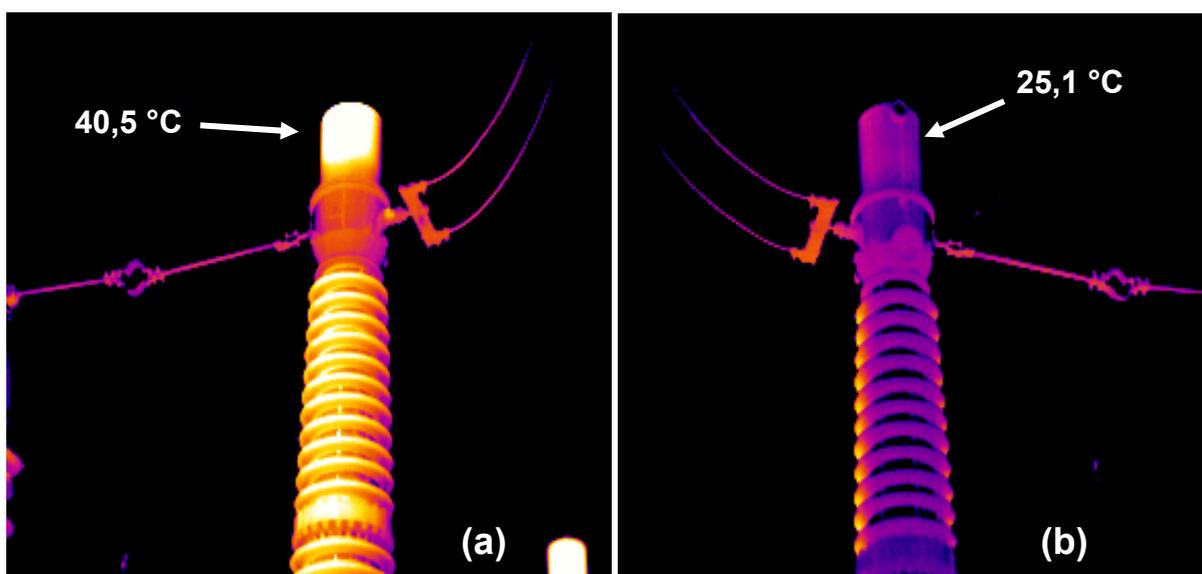


Figura 3.6 – Termogramas de um Transformador de Corrente, sob o Sol, obtidos no mesmo horário, mas de posições opostas. (a) A favor do Sol – (b) Contra o Sol.

3.3.2.2. Reflexo Solar

Metais utilizados em subestações, tipicamente, possuem uma emissividade baixa, tanto para a radiação solar quanto para a radiação infravermelha, principalmente quando novos e polidos. A transmitância desses metais é nula

nesses comprimentos de onda, logo a refletância é alta, como pode ser deduzido pelas equações 3.2, 3.3 e 3.4.

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \gamma_{\lambda} = 1 \quad (3.2)$$

Para objetos opacos $\gamma = 0$ então:

$$\rho_{\lambda} = 1 - \alpha_{\lambda} \quad (3.3)$$

Quando o objeto está em equilíbrio térmico $\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$, logo:

$$\rho_{\lambda} = 1 - \varepsilon_{\lambda} \quad (3.4)$$

Portanto, a radiação que chega ao detector do termovisor pode ser, em sua maior parte, de outra fonte de calor próxima ou até mesmo da radiação solar refletida na superfície do componente sob inspeção.

Ao contrário do carregamento solar, que provoca um real aumento da temperatura dos componentes, o reflexo solar não provoca um aquecimento do componente, mas pode induzir o termografista a registrar uma falsa alta temperatura, como é apresentado na Figura 3.7.

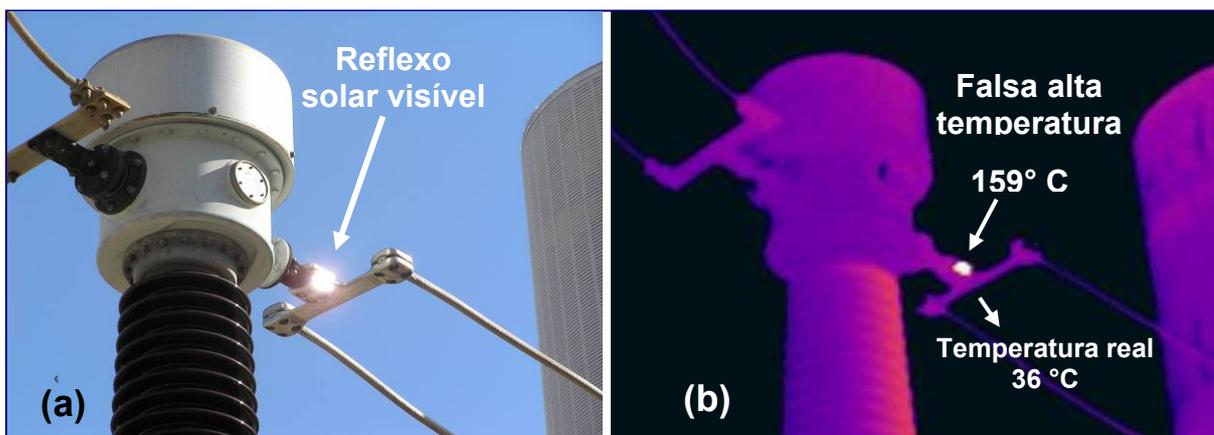


Figura 3.7 – Reflexo solar em uma conexão de baixa emissividade. (a) Reflexo solar no visível. (b) Reflexo solar no infravermelho provocando uma falsa alta temperatura no termograma.

Como observado na Figura 3.7, o reflexo solar pode levar o termografista inexperiente a diagnosticar situações normais como uma falha iminente e, com isso, solicitar um desligamento desnecessário do circuito para que uma manutenção de urgência seja realizada.

Para eliminar a influência do reflexo solar, recomenda-se executar a inspeção em períodos noturnos. Caso a inspeção seja realizada sob o sol e reflexos solares prejudiquem a inspeção, aconselha-se a mudança de ângulo entre o termovisor e o componente sob inspeção a fim de se evitar o problema.

3.3.3. Vento

O vento é resultado do deslocamento de massas de ar devido à diferença da pressão atmosférica entre duas regiões. Tem uma origem térmica relacionada com a radiação solar e os processos de aquecimento das massas de ar.

Os resultados dos ensaios, tanto em campo, como em laboratório, mostram que o vento de baixa velocidade pode reduzir consideravelmente a temperatura da anomalia térmica. A redução continua com o aumento da velocidade do vento, mas em um ritmo mais lento, até chegar a um ponto em que o aumento da velocidade praticamente não mais reduz a temperatura. A variação de temperatura em função da velocidade do vento se ajusta a uma curva de decaimento exponencial.

Em inspeções termográficas realizadas em ambientes abertos, o vento exerce um papel importante no resultado final da inspeção. Ventos com velocidade relativamente baixa podem afetar consideravelmente a temperatura do objeto inspecionado. Sérios defeitos podem ter sua temperatura reduzida e, em uma análise que não leve em consideração o efeito do vento, podem ser classificados como um problema sem maior gravidade. Além disso, defeitos em estágios iniciais, apresentando pequeno aumento de temperatura, podem simplesmente não ser detectados pela inspeção (Snell, 2001), (Madding e Lyon, 2002). A Figura 3.8 mostra um exemplo em que as duas situações descritas ocorrem.

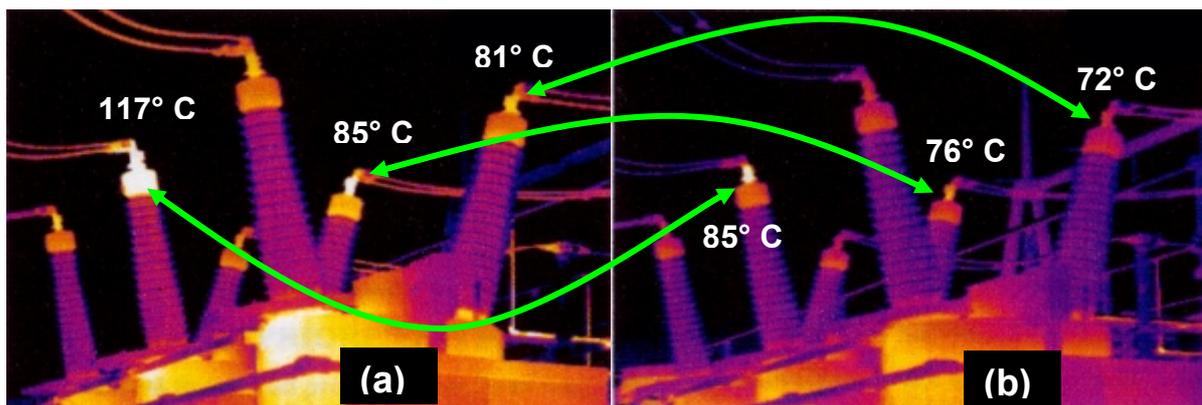


Figura 3.8 – Efeito do vento sobre a temperatura de um disjuntor a óleo. (a) Com velocidade do vento igual a 0 km/h – (b) Com velocidade do vento moderada (Snell, 2001).

O efeito do vento sobre a temperatura do componente sob inspeção depende de vários fatores (Madding e Lyon, 1999):

- A potência que está sendo dissipada pelo componente;
- a velocidade, orientação e duração do vento;
- a área e o formato do componente e
- as estruturas e construções que estão à volta do componente.

Devido às diversas variáveis envolvidas, trabalhos como o de Kaplan (1999), que apresentam tabelas de fatores de conversão da temperatura em função da velocidade do vento e com um simples fator multiplicativo de correção, como apresentado na Tabela 3.2, é de difícil aplicação em situações reais de inspeção em ambientes abertos.

Tabela 3.2 – Fator de correção para uma placa vertical (Kaplan, 1999)

Velocidade do Vento		Fator de Correção
m/s	km/h	
< 1	< 3,6	1,00
2	7,2	1,36
3	10,8	1,64
4	14,4	1,86
5	18,0	2,06
6	21,6	2,23
7	25,2	2,40

O gráfico da Figura 3.9 mostra um exemplo real da variação da velocidade e da orientação do vento em uma subestação de alta tensão, ratificando a dificuldade de usar um simples fator multiplicativo para corrigir a temperatura medida em função da velocidade do vento.

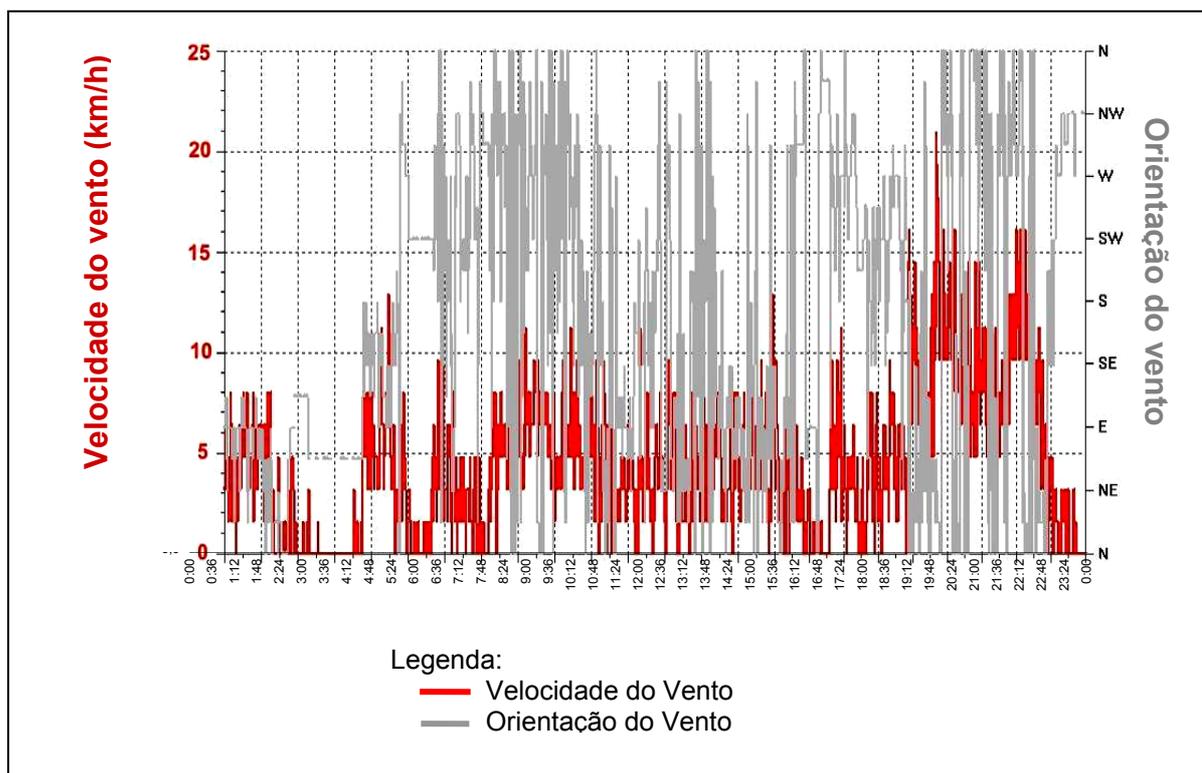


Figura 3.9 – Variação da velocidade e orientação do vento, monitorados por um período de 24 horas, em uma subestação de alta tensão desabrigada.

A Figura 3.10 mostra dois instantes de observação de um mesmo barramento. Em um primeiro instante nenhum vento incide sobre os conectores e, no segundo, incide um vento com velocidade de 6,4 km/h, no qual é visível a forte redução de temperatura da anomalia térmica.

Em um processo de análise, na qual a influência do vento não fosse considerada, o diagnóstico e o prognóstico para cada instante descrito anteriormente seriam diferentes, apesar de ser o mesmo defeito.

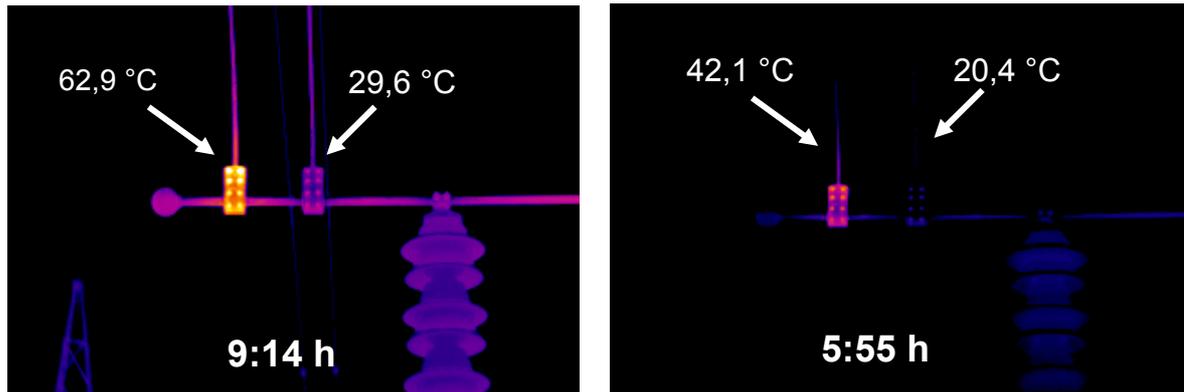


Figura 3.10 – Efeito do vento sobre a temperatura de uma conexão defeituosa e uma normal. (a) Com a velocidade do vento nula - (b) Com velocidade do vento de 6,4 km/h.

A influência do vento sobre a inspeção termográfica em ambientes abertos é importante e geralmente difícil de evitar. Nessa situação, diversas variáveis estão envolvidas e um simples fator multiplicativo, para corrigir a temperatura medida em função da velocidade do vento, é de difícil aplicação. Se utilizado, o termografista deve ter em mente que o fator foi obtido em laboratório e em condições controladas.

3.3.4. Transmitância atmosférica (umidade, névoa, nevoeiro e chuva)

O componente sob inspeção, em função de sua temperatura, emite mais radiação em uma determinada faixa espectral. Portanto, o termovisor utilizado na inspeção, deve possuir um sistema de detecção com faixa espectral adequada à radiação que está sendo emitida. Além disso, o meio, entre o componente e o termovisor, deve permitir a propagação da radiação entre os dois (Kaplan, 2000). Conseqüentemente, a atmosfera, que envolve esse meio, deve ter características espectrais que propiciem uma alta transmitância da radiação emitida.

A transmitância espectral atmosférica depende do comprimento de onda da radiação, das condições climáticas e da distância envolvida entre componente e termovisor (Gaussorgues, 1994).

Como é bem conhecido, chuva, névoa, nevoeiro, fumaça, poluição, entre outros, são elementos atmosféricos que afetam a visibilidade de objetos distantes. De maneira semelhante, esses mesmos elementos podem afetar a transmissão da

radiação infravermelha através da atmosfera e prejudicar uma inspeção termográfica.

A atmosfera pode atuar sobre a radiação infravermelha emitida pelos objetos por meio de quatro fenômenos:

- Absorção
- Dispersão
- Turbulência
- Emissão

3.3.4.1. Absorção

A absorção é um processo, dependente do comprimento de onda, no qual as moléculas da atmosfera absorvem a energia de fótons incidentes, provocando a atenuação da radiação.

Os principais responsáveis pela absorção da radiação infravermelha na atmosfera são o vapor de água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2). A quantidade de vapor de água na atmosfera está sujeita a grandes flutuações e depende muito da altitude, estação do ano, localização geográfica, hora do dia e condições meteorológicas. O Dióxido de Carbono existe em maior concentração em áreas industriais e de vegetação e menos em oceanos e desertos.

A absorção pode ser Molecular ou Aerossol, sendo a atenuação da absorção Molecular muito mais significativa que a absorção Aerossol.

A Figura 3.11 mostra a transmitância atmosférica em função do comprimento de onda e as áreas de maior absorção dos gases. Nota-se uma maior transmitância nas chamadas “janelas” infravermelhas de 3 μm a 5 μm e de 8 μm a 14 μm . Razão da utilização dessas faixas para os termovisores comerciais (Rogalski e Chrzanowski, 2002).

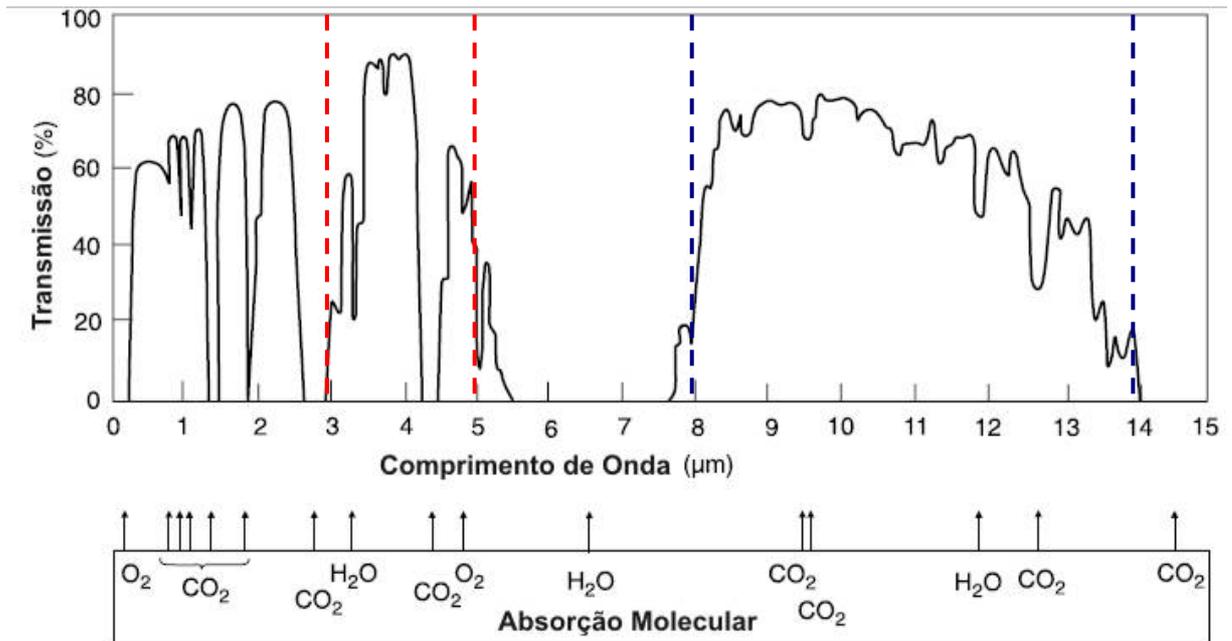


Figura 3.11 – Transmissão atmosférica: distância de 1,8 km, nível do mar e 17 mm de água precipitável. (Rogalski e Chrzanowski, 2002)

A transmitância atmosférica varia em função da distância entre o componente sob inspeção e o termovisor. As Figuras 3.12 e 3.13 mostram que para pequenas distâncias e comprimentos de onda, típicos de inspeções de subestações de alta tensão, a transmitância de uma atmosfera limpa e com baixa umidade é próxima da unidade (Holst, 2000).

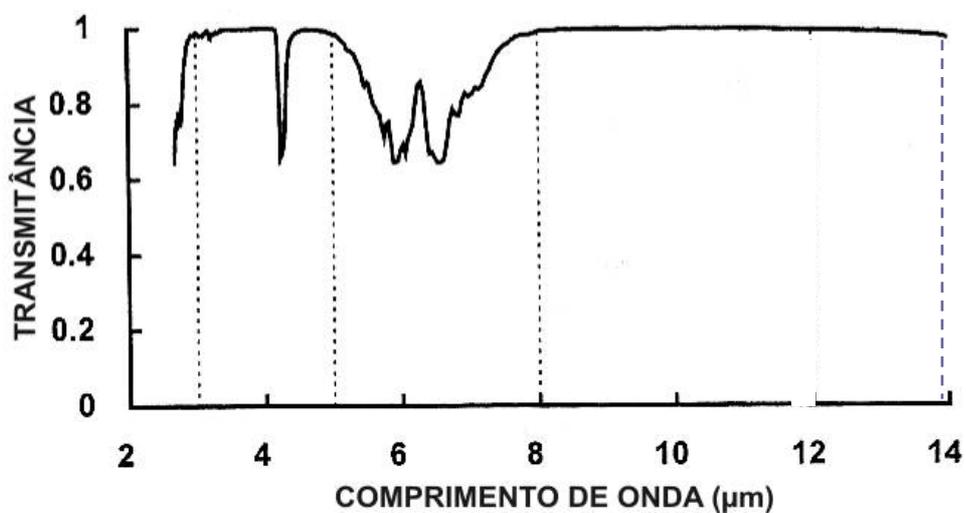


Figura 3.12 – Transmitância atmosférica para uma distância de 10 m (Holst, 2000).

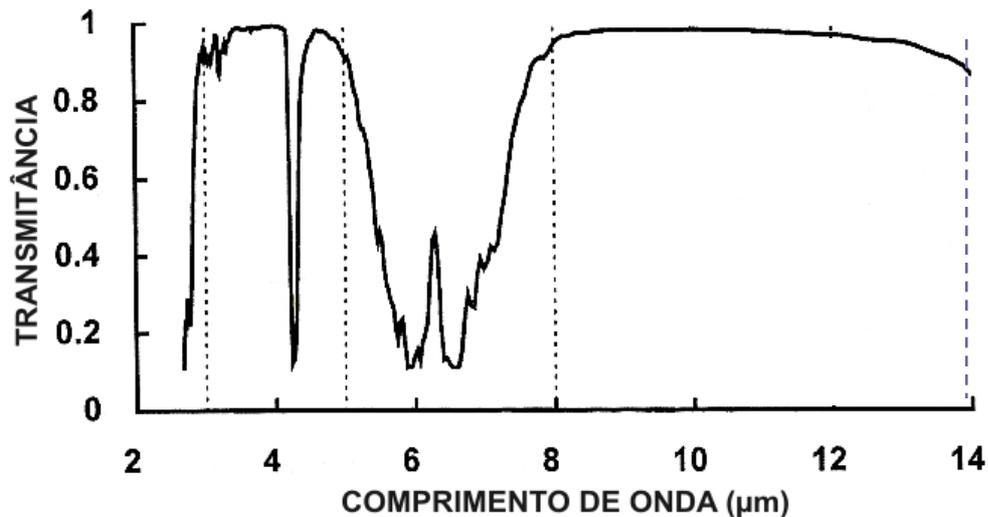


Figura 3.13 – Transmitância atmosférica para uma distância de 50 m (Holst, 2000).

3.3.4.2. Dispersão

É resultado da colisão dos fótons com partículas atmosféricas, provocando o espalhamento do fluxo incidente em todas as direções de propagação e diminuindo o fluxo na direção original.

Existem dois tipos distintos de dispersão atmosférica:

- Dispersão Molecular ou Rayleigh – causada por moléculas de ar e de névoa seca (névoa formada por pó ou partículas de sal, as quais não são visíveis a olho nu) menores que o comprimento de onda da radiação (λ). O coeficiente de dispersão é proporcional a λ^{-4} , sendo desprezível para comprimentos de onda maiores que 3 μm , portanto desprezível para a faixa utilizada nos termovisores utilizados no sistema elétrico.
- Dispersão Aerossol ou Mie – causada por partículas de tamanho semelhante ao comprimento de onda da radiação. A dispersão Aerossol afeta a transmitância atmosférica muito mais fortemente que a dispersão Molecular. Geralmente, o efeito da dispersão diminui quando o comprimento de onda de propagação da radiação aumenta. Portanto, a transmitância da fumaça e da névoa para o infravermelho, na faixa de 8 a 14 μm é maior do que para a faixa de 3 a 5 μm , a qual é maior que na faixa visível de 0,4 a 0,75 μm (Andrews, 2004).

O gráfico da Figura 3.14 mostra o coeficiente de dispersão, em função do comprimento de onda, para diferentes dimensões de partículas e para uma distância de 1 km.

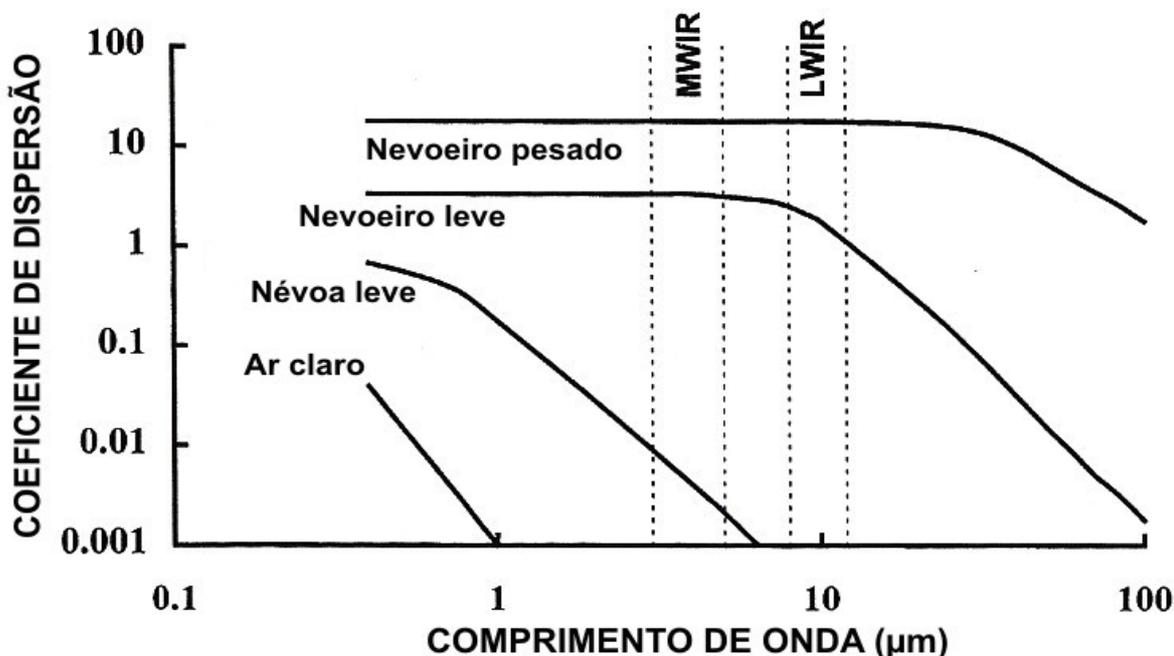


Figura 3.14 – Dispersão em função do comprimento de onda para diferentes intensidades de nevoeiro e para uma distância de 1 km (Holst, 2000).

3.3.4.3. Turbulência (flutuação do índice de refração)

O fenômeno da turbulência é causado por movimentos irregulares do ar. Ocorre quando moléculas do ar, de temperaturas levemente diferentes, são misturadas pelo vento e convecção. Do ponto de vista óptico, tal movimento significa a flutuação aleatória do índice de refração da atmosfera, o que resulta em uma variação da transmitância atmosférica. Em inspeções de subestações, cujas distâncias, do termovisor ao componente, raramente ultrapassam os 50 metros, o efeito desse fenômeno pode ser desprezado (Chrzanowski, 2001).

3.3.4.4. Emissão

A atmosfera emite sua própria radiação. Essa radiação é adicionada à radiação emitida pelo componente sob inspeção, mas para efeito de inspeção por

termografia em subestações, a emissão pode ser considerada desprezível, já que a emissividade atmosférica é frequentemente baixa e a temperatura da atmosfera, na maior parte das inspeções, é menor que a temperatura do componente sob inspeção.

3.3.4.5. Lei de Beer-Lambert

Como visto anteriormente, os dois fenômenos que mais afetam a transmitância atmosférica ($\gamma_{A\lambda}$) são a absorção ($\alpha_{A\lambda}$) e a dispersão ($\delta_{A\lambda}$), ambas dependentes do comprimento de onda (λ).

Pela lei de Beer-Lambert pode-se quantificar o efeito desses dois fenômenos e da distância (l) sobre a transmitância, como mostra a Equação 3.5.

$$\gamma_A = e^{-(\alpha_{A\lambda} + \delta_{A\lambda}) \cdot l} \quad (3.5)$$

Analisando a Equação 3.5, verifica-se que a transmitância reduz seu valor exponencialmente à proporção que o fluxo radiante se desloca espacialmente, ou seja, quanto maior a distância percorrida pela radiação, maior a atenuação (Curityba et al.).

Devido ao grande número de parâmetros, dos quais a transmitância atmosférica é dependente, modelos matemáticos foram desenvolvidos. Os três modelos numéricos mais populares são o LOWTRAN (*low atmospheric radiance and transmittance*), MODTRAN (*moderate resolution atmospheric radiance and transmittance*) e HITRAN (*high-resolution transmission molecular absorption*) (La torre et al., 2002), todos desenvolvidos pela *Air Force Research Laboratory (AFRL)*, organização de pesquisa científica operada pela Força Aérea Americana (USAF, 2012).

3.3.4.6. Umidade do ar

A umidade absoluta do ar é definida como a razão entre a massa de vapor de água e o volume do ar, ou simplificando, é a quantidade de vapor de água presente no ar.

O ar possui um limite de absorção de água que se denomina saturação. Acima do limite de saturação, a quantidade de água em excesso se precipita em forma de nevoeiro ou de chuva. A quantidade de água que o ar absorve, antes de atingir a saturação, depende da temperatura e aumenta progressivamente com ela.

Por outro lado, a umidade relativa do ar é a quantidade de vapor de água presente no ar, relacionada à quantidade de vapor de água necessária para atingir o ponto de saturação em uma temperatura específica. Assim, uma atmosfera com umidade relativa do ar de 80% e uma temperatura ambiente de 10 °C possui muito menos quantidade de vapor de água do que a mesma atmosfera a 80% e sob uma temperatura ambiente de 30 °C, como mostra a Figura 3.15.

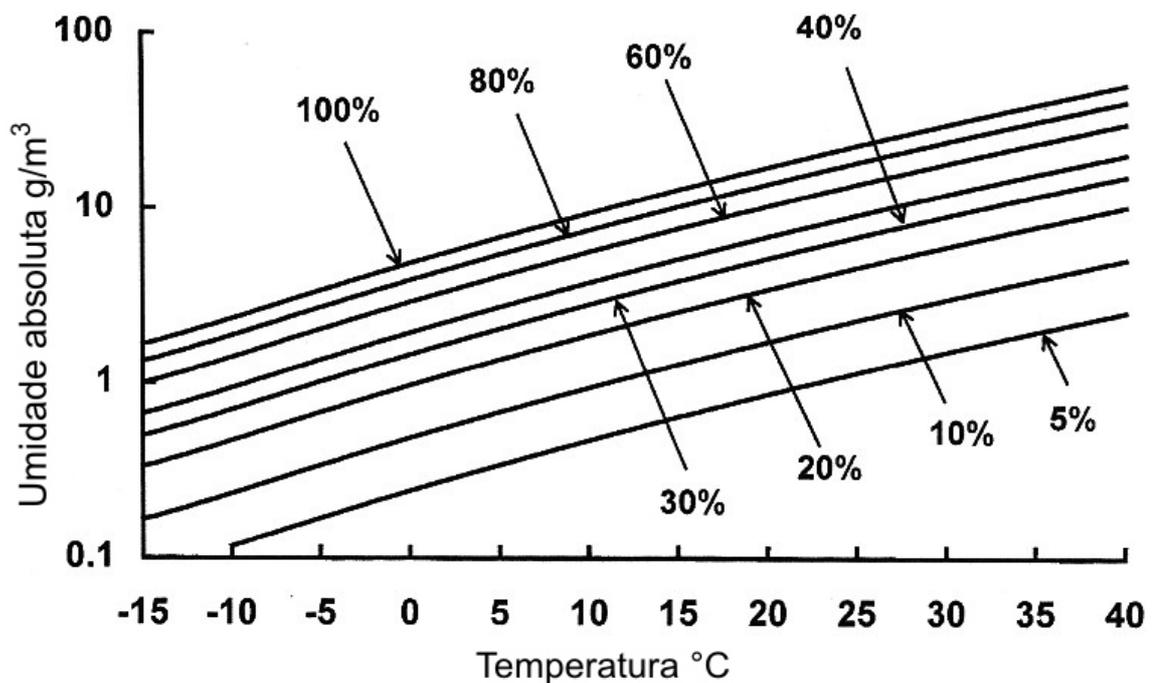


Figura 3.15 – Saturação de água no ar em função da temperatura, ao nível do mar (Holst, 2000).

A umidade do ar é um dos maiores responsáveis pela absorção da radiação infravermelha na atmosfera. Após a saturação, quando se transforma em névoa, nevoeiro ou chuva, as partículas de água crescem em tamanho e aumenta o coeficiente de dispersão, diminuindo ainda mais a transmitância.

A amplitude da dispersão depende da relação do diâmetro da partícula e o comprimento de onda. Quando essa relação é grande, a dispersão é significativa, caso contrário a dispersão é mínima, como mostrado na Figura 3.14 (Host, 2000).

Em ambientes com alta umidade e acima do limite de saturação (ocorrência de chuva), além da redução da transmitância atmosférica, acontece a redução da temperatura do componente e da anomalia térmica. Os motivos dessa redução são a alta condutividade térmica da água, que provoca a dissipação do calor produzido e o resfriamento por evaporação, que reforça o processo de arrefecimento. Tudo isso torna difícil uma inspeção termográfica confiável, pois a temperatura medida se torna incorreta em função da forte atenuação atmosférica e a análise do componente tende a ser equivocada devido à redução de temperatura da anomalia.

A Figura 3.16(b) mostra o efeito da chuva sobre o resultado de uma inspeção termográfica.

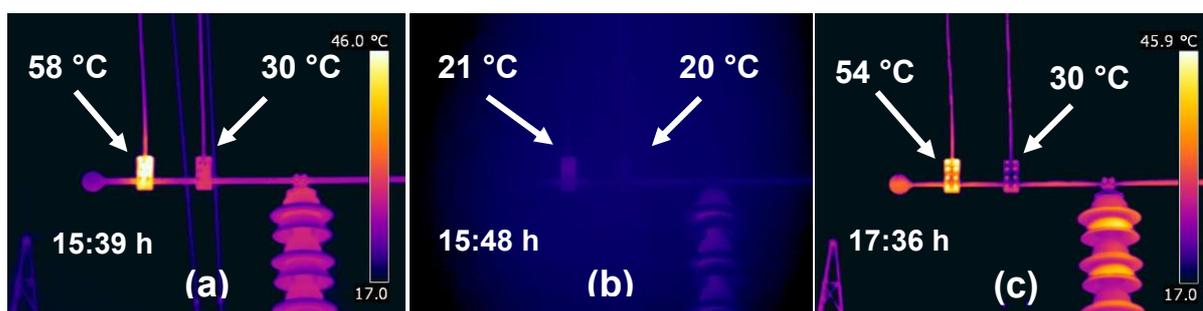


Figura 3.16 – Efeito da chuva sobre a transmitância atmosférica e sobre a temperatura das conexões. (a) Um minuto antes do início da chuva - (b) Durante o pico máximo da chuva - (c) Uma hora após o término da chuva

Para reduzir a influência da chuva e umidade sobre os resultados da inspeção termográfica, recomenda-se não realizar inspeções termográficas sob chuva, garoa ou nevoeiro e nem imediatamente após a ocorrência de chuva, pois a anomalia pode ainda estar sob os efeitos do arrefecimento provocado pela água.

4. VERIFICAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS EM CAMPO E LABORATÓRIO

Para verificar as influências citadas no capítulo 3 e obter dados específicos para inspeções termográficas em subestações de alta tensão, foram planejados ensaios em campo e ensaios em laboratório.

Os ensaios em campo foram realizados, parte em subestações desabrigadas e parte fora das subestações, mas também em áreas desabrigadas e expostas às influências climáticas. Ocorreram dentro de um período de 1 ano e nove meses, somando, efetivamente, um total de 112 horas e 14 minutos de monitoração contínua. Foram realizados e registrados sob as mais variadas condições: durante o dia, durante a noite, com céu claro, com céu nublado, chuva, nevoeiro, etc.

Os ensaios em laboratório tiveram início após a finalização dos ensaios em campo e ocorreram durante o período de 1 ano e cinco meses, somando, efetivamente, um total de 112 horas e 30 minutos de monitoração contínua.

Antes de iniciar os ensaios, foi necessário definir qual o componente monitorar em campo e ensaiar em laboratório. Era necessário que o componente selecionado representasse a maior percentagem das anomalias térmicas detectadas pela termografia infravermelha. Isso facilitaria a execução dos ensaios nas subestações e os dados obtidos resultariam em uma aplicação mais ampla dentro do sistema elétrico. Assim sendo, a escolha do componente foi baseada em duas pesquisas realizadas por duas grandes concessionárias brasileiras de energia. De acordo com elas, mais de 50% das anomalias térmicas, detectadas pela termografia infravermelha, são em conectores, como mostram os gráficos da Figura 4.1.

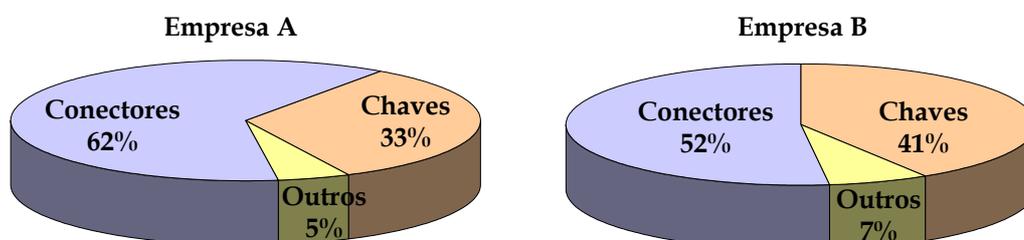


Figura 4.1 – Percentagem dos defeitos detectados em subestações pela termografia infravermelha

Isso pode ser explicado, em parte, pela enorme quantidade de conectores utilizados nas subestações e pelo fato do processo de deterioração desses componentes apresentar, na maioria dos casos, aquecimento em função do aumento da resistência de contato, conseqüentemente, detectável pela termografia.

A alta resistência de contato é um dos defeitos mais comuns relacionados aos conectores. Ela é responsável pelo incremento da potência dissipada ($P=R.I^2$) e do conseqüente aumento de temperatura na conexão que, a valores relativamente baixos, pode levar à perda de resistência mecânica e à falha por ruptura.

O aumento da resistência de contato tem início quando as áreas de contato do conector, representadas na Figura 4.2, reduzem de tamanho ou deixam de existir, devido à formação de compostos resistivos nos pontos de contato.

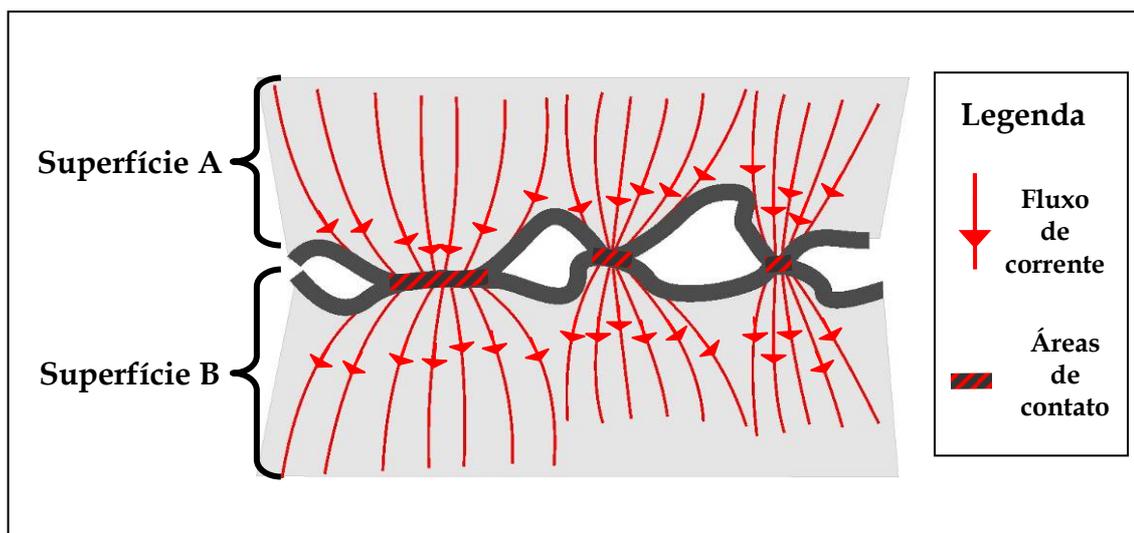


Figura 4.2 – Visão microscópica da junção de duas superfícies e suas áreas de contato.

Quando os pontos de contato de baixa resistência se esgotam, ocorre a chamada falha elétrica. Após a falha elétrica, a corrente força passagem através dos pontos de alta resistência provocando um aumento de temperatura no conector e iniciando a falha térmica. Nesse ponto o defeito já pode ser detectado pela termografia, pois a radiação infravermelha emitida pelo conector aumenta em função do acréscimo de sua temperatura, segundo a lei de Stefan e Boltzmann ($M= \varepsilon.\sigma.\theta^4$), como mostra a Figura 4.3(a).

Com a falha térmica, a tendência da resistência de contato é aumentar, aumentando ainda mais a temperatura, entrando em um “loop” que levará ao recozimento do metal, à redução da resistência mecânica e finalmente à falha mecânica (Slade, 1999). A Figura 4.3(b) mostra condutores rompidos devido à alta temperatura do conector.

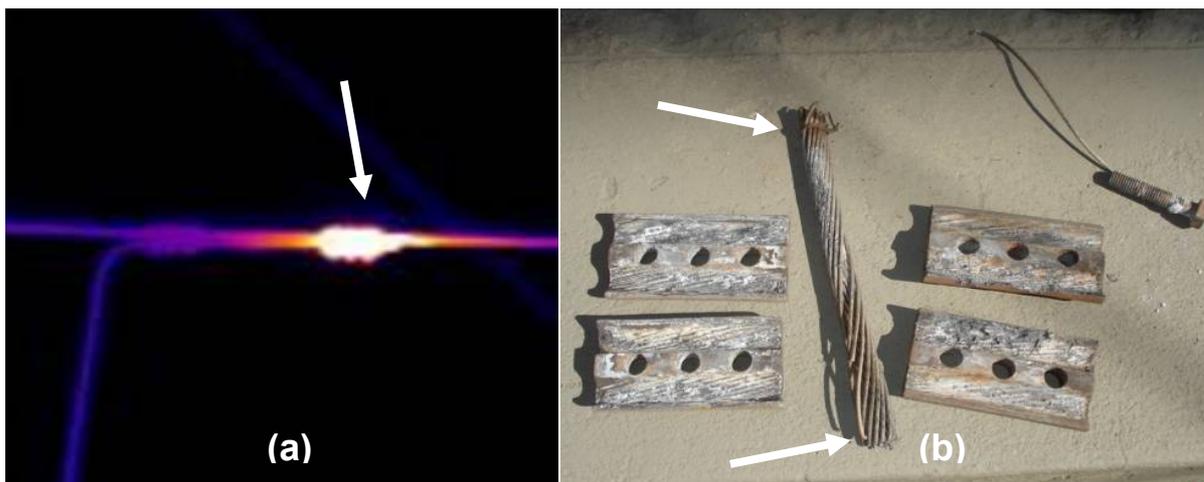


Figura 4.3 – (a) Aumento da resistência de contato (termograma) – (b) condutores rompidos devido à alta temperatura do conector.

Conhecendo esse processo, compreende-se porque a termografia é um método muito utilizado de inspeção preditiva. Ela torna possível a detecção do defeito em um estágio incipiente e com bastante antecedência à falha mecânica. Apesar disso, dentro do atual cenário do sistema elétrico brasileiro, a detecção do defeito não significa uma imediata intervenção para reparo ou substituição do componente. É necessária uma análise do risco de falha do componente e qual o melhor momento para se realizar a intervenção, evitando a falha e provocando o menor impacto possível ao sistema elétrico.

Para a análise do risco de falha, a temperatura do componente é um importante parâmetro a ser considerado. Embora a detecção do defeito pela termografia, por pessoal qualificado, seja relativamente simples, a análise do risco de falha, através da temperatura medida pelo termovisor, está longe de ser trivial.

O primeiro ponto a ser observado é que o termovisor não mede temperatura diretamente, ele mede radiação em uma estreita faixa do infravermelho, a partir da qual e, em conjunto com outros parâmetros, ele calcula a temperatura.

Outro ponto importante é que para uma melhor análise de um defeito, devido à alta resistência de contato, deve-se ter uma corrente de carga e condições de contorno estáveis e adequadas para a medição de temperatura do conector.

A grande dificuldade da aplicação da termografia no sistema elétrico é que dificilmente se consegue realizar inspeções nas condições consideradas adequadas. Portanto, é de grande valia o desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de converter as medições, obtidas em condições diferentes das consideradas adequadas, para valores similares aos obtidos nas condições apropriadas.

4.1. Ensaio em Campo

Para os ensaios nas subestações, a seguinte metodologia foi adotada:

Antes de iniciar os ensaios, uma varredura era realizada, na subestação selecionada, para encontrar um conector com anomalia térmica. A partir daí, o conector com anomalia e outro conector do mesmo tipo, em bom estado e sob as mesmas influências, eram monitorados por um período de, no mínimo, 24 horas.

Os ensaios consistiram na monitoração da corrente nos conectores e da temperatura na superfície dos mesmos, bem como das variáveis climáticas, tudo isso simultaneamente e com os relógios internos, dos equipamentos envolvidos, sincronizados. No final dos ensaios todos os dados eram armazenados no computador para pós-processamento e análise.

Os valores de corrente através dos conectores eram obtidos através de dados fornecidos pelo sistema de supervisão e controle da subestação Sage (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia). A temperatura de superfície dos conectores era monitorada por um termovisor utilizando lente telescópica e colocado a uma distância adequada às especificações de sua resolução espacial. Para a monitoração de dados referentes à radiação solar, temperatura ambiente, vento,

chuva e umidade relativa do ar, foi instalada, próxima à conexão, uma estação meteorológica portátil.

Nos ensaios realizados dentro das subestações foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Termovisor – FLIR, modelo P60, série 21802350 com lente de 12°
- Estação meteorológica – Davis, modelo Vantage Pro, série A41119A79
- Termo-higro-anemômetro – Kestrel, modelo 3000, série 352417
- Computador – IBM, modelo ThinkPad G40, série 82561L1

As subestações selecionadas para os ensaios em campo foram:

- Subestação da Eletrobras Furnas - 750 kV e 500 kV- Foz do Iguaçu – PR
- Subestação da CEMIG - 500 kV - Itajubá 3 – Itajubá – MG
- Subestação da Eletrobras Furnas - 345 kV – São José da Barra – MG
- Subestação da Eletrobras Furnas - 138 kV - Poços de Caldas – MG

Para definir as subestações para os ensaios, o principal critério foi o nível de tensão. Assim, os ensaios puderam ser realizados em subestações de 138 kV, 345 kV, 500 kV e 750 kV.

Cada ensaio foi realizado em uma estação do ano, tornando possíveis ensaios com temperaturas ambiente de 14 °C até 33 °C, velocidades de vento de 0 km/h a 26 km/h, umidades relativas do ar de 38% a 100% e radiação solar de até 1406 W/m².

A Figura 4.4 apresenta o esquema dos ensaios em campo e a Figura 4.5 mostra a foto de um dos ensaios, realizado na subestação de Furnas (345 kV), localizada em Minas Gerais.

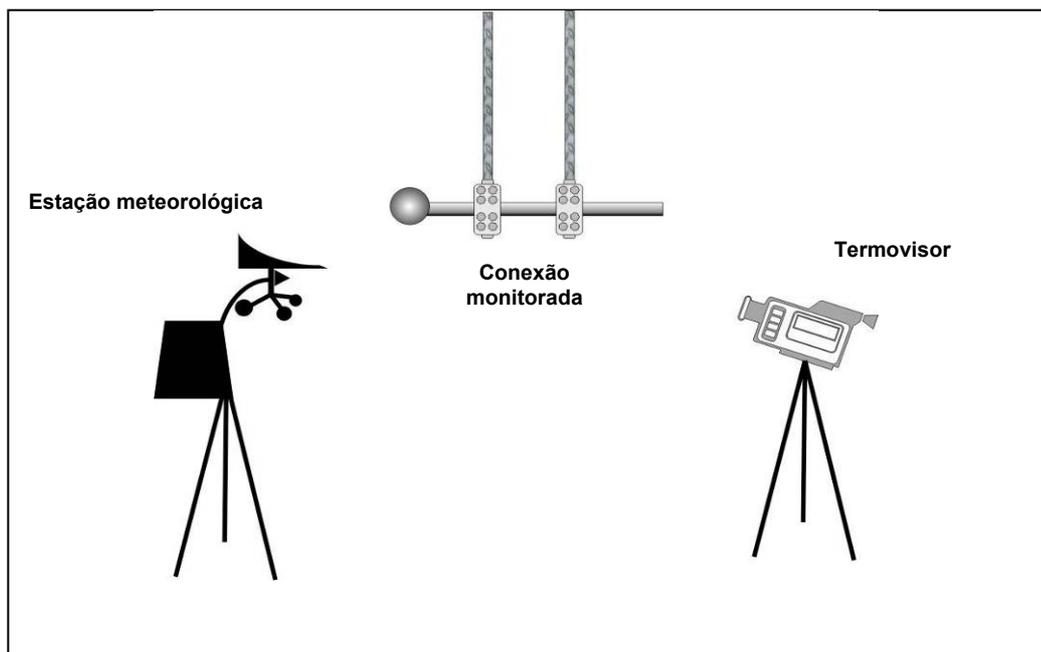


Figura 4.4 - Esquema dos ensaios em campo.

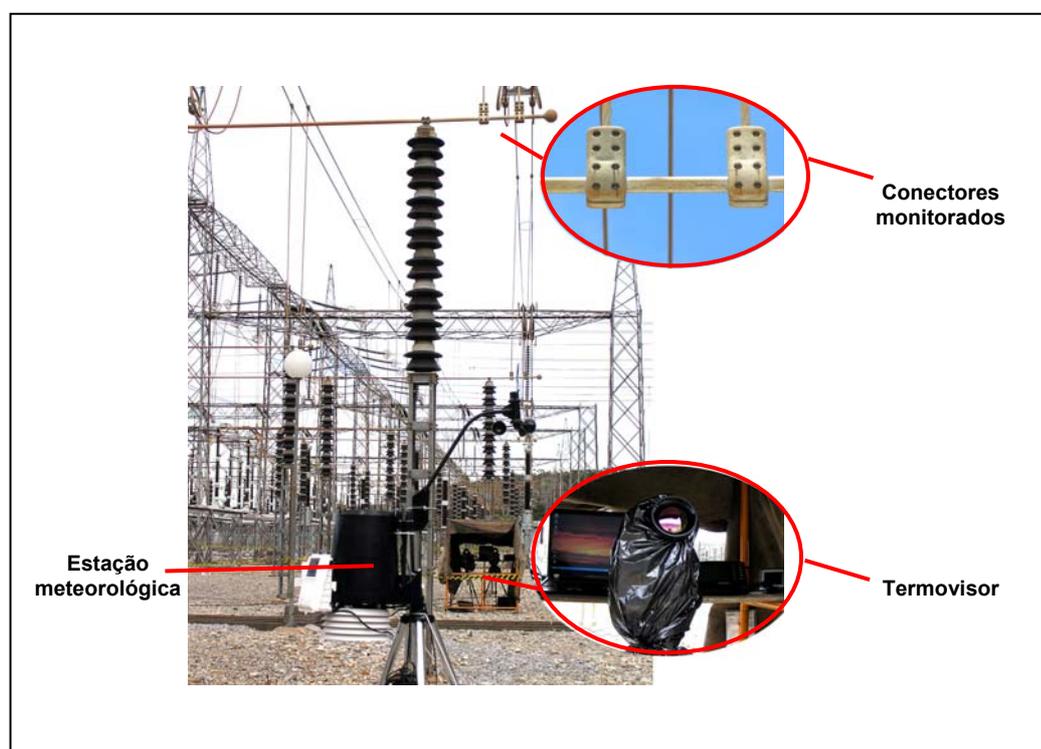


Figura 4.5. Foto de um ensaio em campo.

Observações simples, mas muito importantes para a análise termográfica, foram feitas durante os ensaios em campo. Observações que, além de auxiliar na análise termográfica, podem fornecer um melhor entendimento sobre o comportamento dos conectores expostos às influências Técnicas e Ambientais. Algumas delas são apresentadas na sequência.

4.1.1. Radiação solar

Como já discutido no capítulo 3, a radiação solar pode influenciar nos resultados obtidos, pela termografia, através de dois modos distintos:

- Carregamento solar
- Reflexo solar

4.1.1.1. Carregamento solar (aquecimento devido à radiação solar)

Como já discutido no Item 3.3.2.1, quanto maior a relação $\alpha_{Sol} / \epsilon_{IV}$, maior o aquecimento da superfície do componente em função do carregamento solar (Holst, 2000).

Como a maior parte dos conectores, utilizados em subestações de alta tensão, são confeccionados de liga de alumínio e com uma alta relação $\alpha_{Sol} / \epsilon_{IV}$, quando expostos ao Sol, geralmente têm um aumento considerável de temperatura.

Nos ensaios realizados em campo foi observado um aumento da temperatura de um conector, em função da radiação solar absorvida, de até 18 °C.

A Figura 4.6 apresenta o resultado de um dos ensaios realizados, o qual mostra o aumento da temperatura dos conectores nos períodos de incidência da radiação solar.

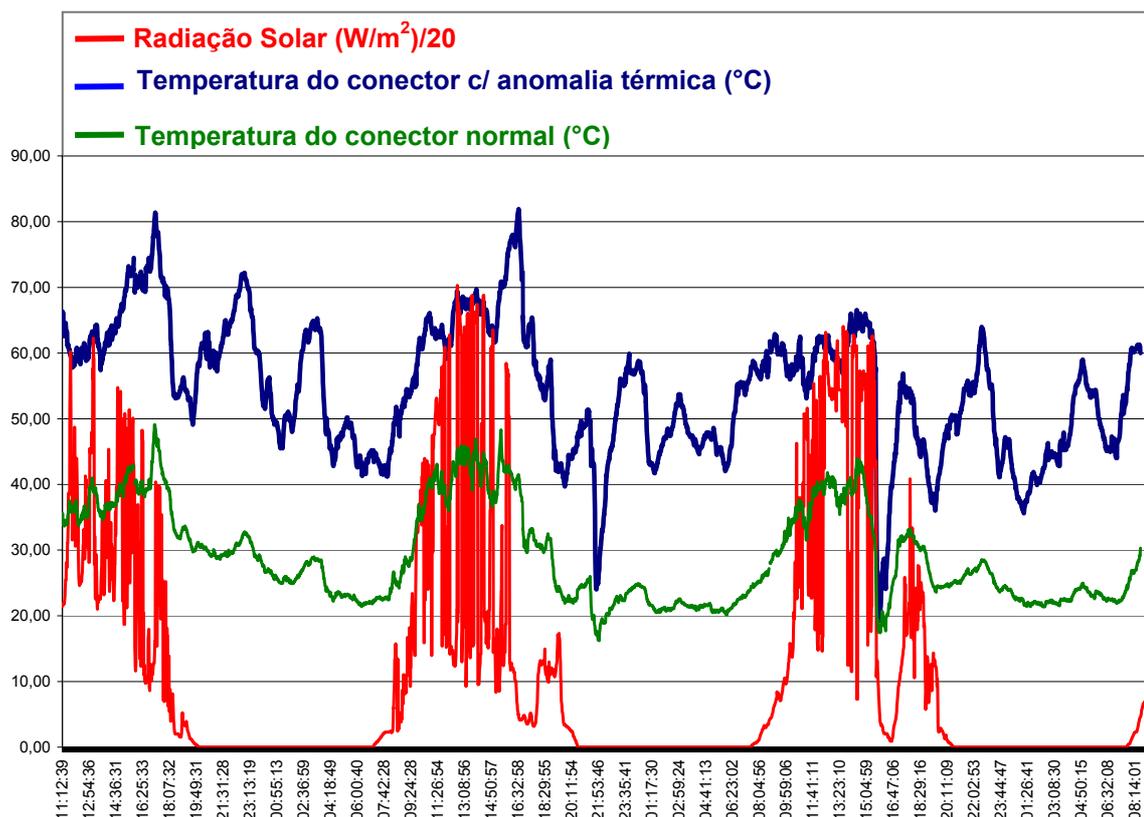


Figura 4.6 – Variação da temperatura dos conectores durante períodos com e sem a incidência de radiação solar.

Outro dado importante, observado durante os ensaios em campo, é que pode ocorrer o carregamento solar, mesmo em dias com o céu nublado.

O aumento da temperatura, devido ao carregamento solar, vai depender, além dos elementos já citados anteriormente, da transmitância, à radiação solar, das nuvens que cobrem o céu. Um céu nublado, porém com nuvens pouco espessas reduzirá, mas não evitará o carregamento solar. Ao contrário, um céu nublado durante um longo período de tempo e com nuvens muito densas, praticamente elimina o carregamento.

Os termogramas da Figura 4.7 e os resultados mostrados no gráfico da Figura 4.8 foram obtidos em ensaio realizado em equipamentos do Centro de Treinamento de Furnas – MG.

O ensaio foi realizado no verão (mês de janeiro), com ocorrência de chuva na

noite anterior ao ensaio, com céu totalmente nublado e com os equipamentos desligados, portanto, sem nenhum aquecimento devido à corrente de carga, apenas sob efeito do carregamento solar.

Os instrumentos utilizados foram:

- Termovisor – FLIR, modelo P640, série 404000532.
- Termômetro de infravermelho – Fluke, modelo 574, série 9560-007.

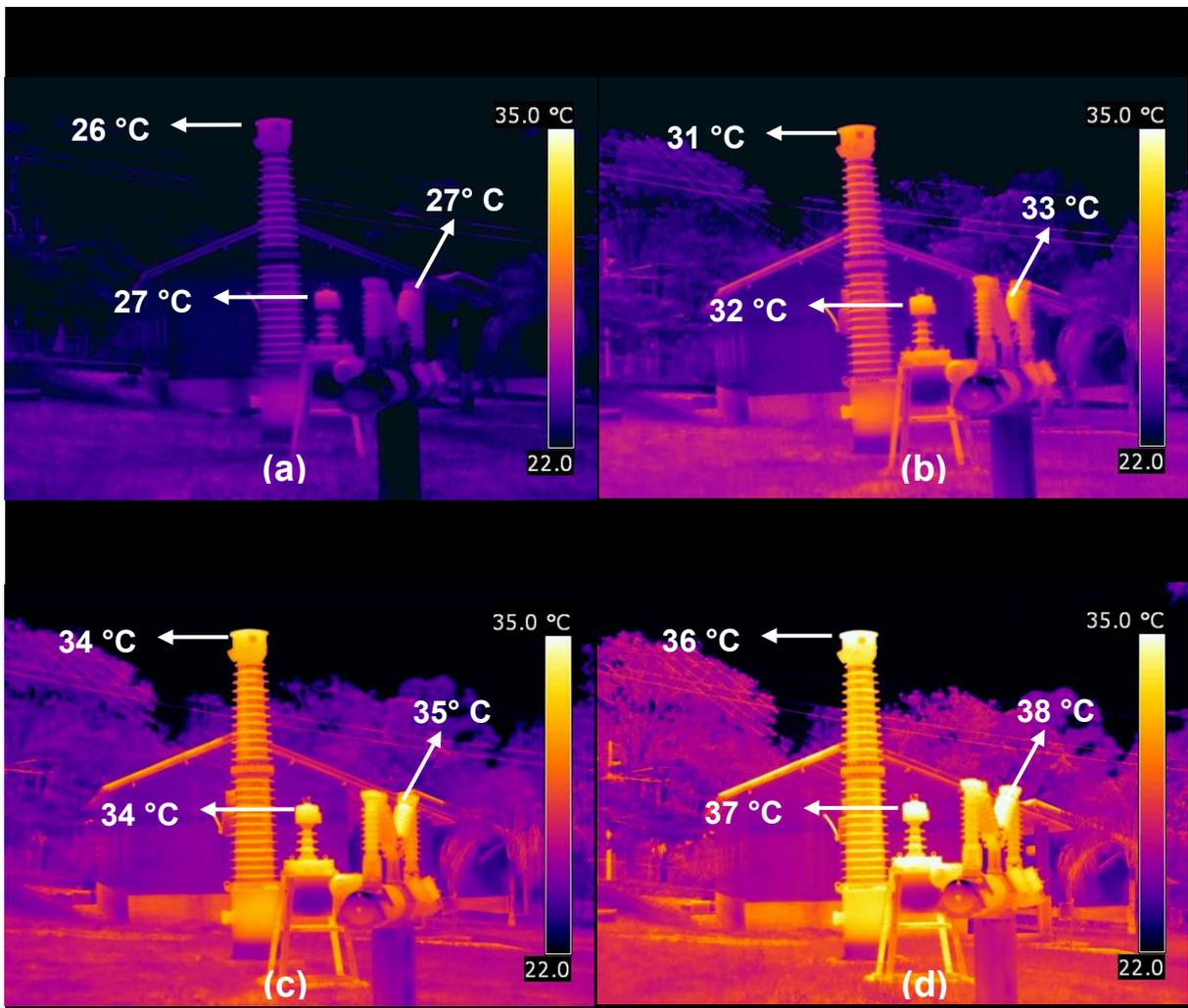


Figura 4.7 – Sequência de termogramas em dia de céu nublado e ainda com carregamento solar.

(a) 10:00 h – (b) 11:00 h – (c) 12:00 h – (d) 13:00 h

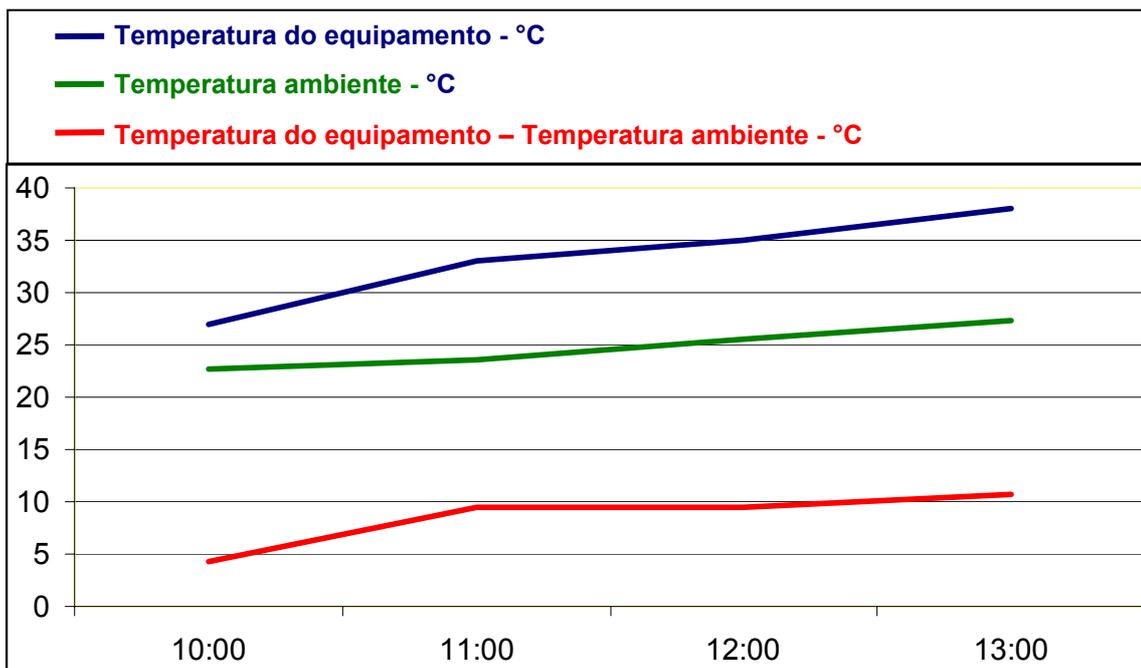


Figura 4.8 – Gráfico das temperaturas obtidas sob céu nublado

4.1.1.2. Reflexo Solar

No ensaio em campo, descrito a seguir, é analisada a influência do reflexo solar nas inspeções termográficas.

Os resultados do ensaio confirmaram a já conhecida influência do reflexo solar em termovisores de comprimento de onda de 3 μm a 5 μm . Além disso, comprovou também, a influência em termovisores operando na faixa de 8 μm a 14 μm , fato não muito divulgado por fabricantes e geralmente desconhecido, até mesmo por termografistas experientes.

Instrumentos utilizados no ensaio:

- Termovisor – Fabricante FLIR, modelo P60, série 21802350.
- Termovisor – Fabricante LAND, modelo TI-35, série 346681/QE/74.

O esquema da Figura 4.9 representa o ensaio planejado para demonstrar o efeito do reflexo solar na inspeção termográfica.

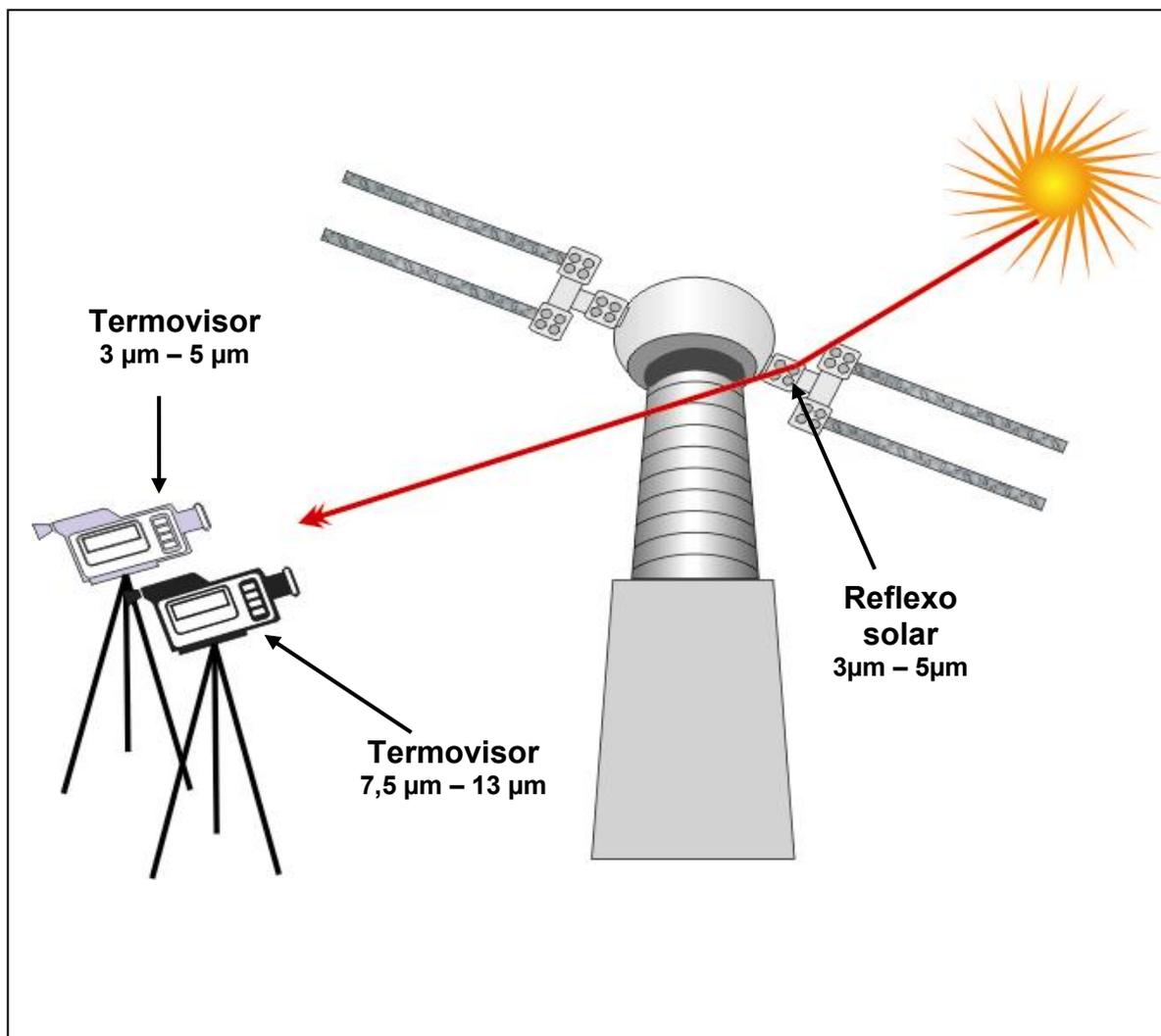


Figura 4.9 – Esquema do ensaio realizado para demonstrar o efeito do reflexo solar.

O ensaio foi realizado na subestação de Furnas (345 kV), em um Transformador de Corrente (TC), cuja conexão tipo *T* apresentava superfície bastante polida e com baixa emissividade.

Dois termovisores, um com resposta espectral na faixa de 3 μm a 5 μm e outro na faixa de 7,5 μm a 13 μm foram posicionados em um ângulo, no qual a radiação solar era refletida pela superfície da conexão, diretamente às suas lentes.

Apesar de a conexão estar normal e com temperatura real, próxima a temperatura ambiente (21,5 °C), os termogramas obtidos pelos dois termovisores apresentaram uma leitura de temperatura alta em razão do reflexo solar, Figura 4.10.

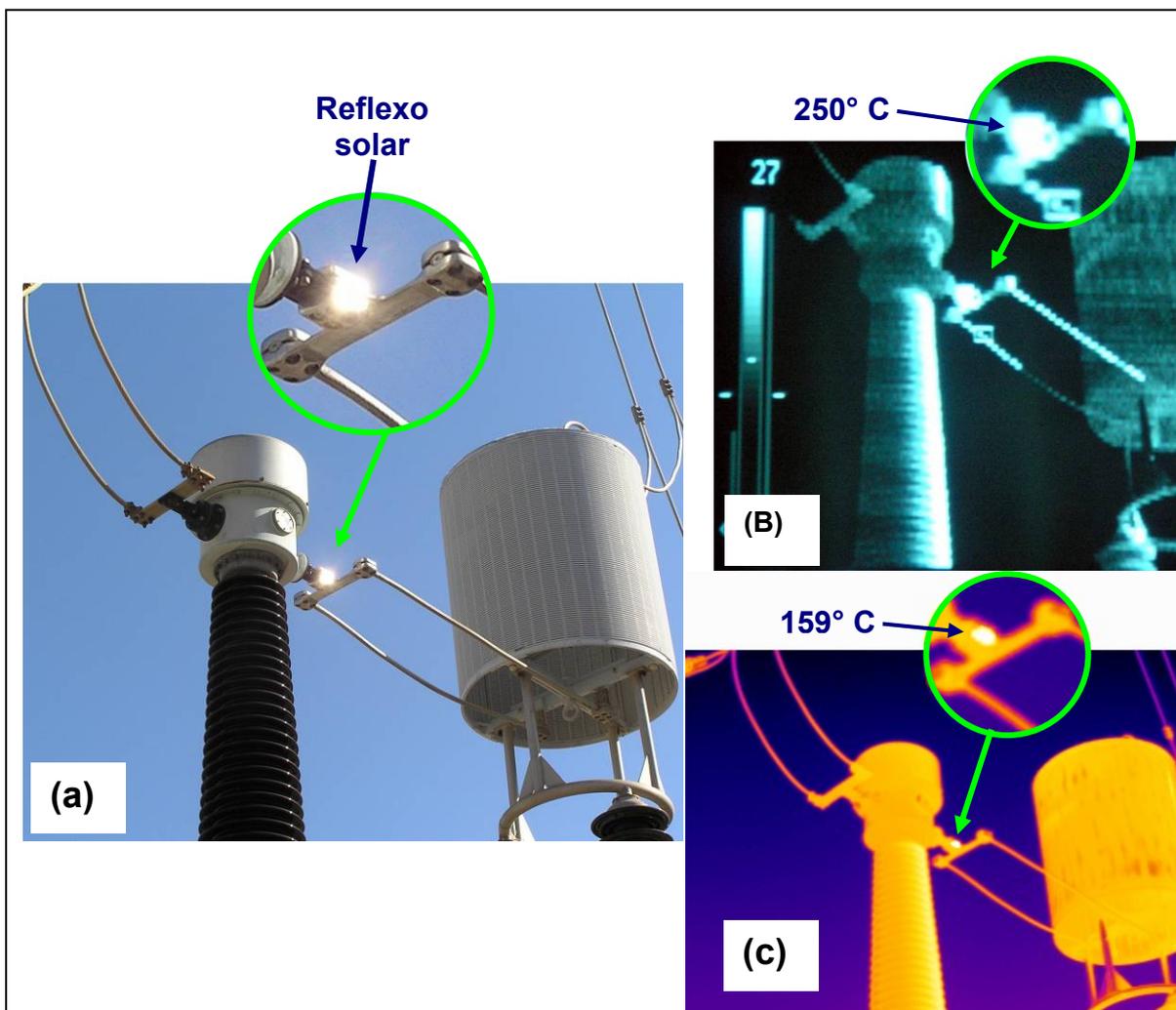


Figura 4.10 – Reflexo solar provocando uma falsa anomalia térmica em uma conexão de um Transformador de Corrente - TC - (a) Imagem visível - (b) Imagem obtida por termovisor de 3 μm a 5 μm - (c) Imagem obtida por termovisor de 7,5 μm a 13 μm

O termovisor com resposta espectral de 7,5 μm a 13 μm apresentou uma menor sensibilidade ao reflexo solar quando comparado ao termovisor que responde de 3 μm a 5 μm , mas o ensaio mostrou que ambas as faixas de comprimento de onda não estão livres dessa influência.

Como pode ser observado na Figura 4.10, o reflexo solar pode levar o termografista inexperiente a diagnosticar situações normais como uma falha iminente e, com isso, solicitar um desligamento desnecessário do circuito para que uma manutenção de urgência seja realizada.

4.1.2. Chuva

Os resultados dos ensaios em campo comprovaram, o que já era bem conhecido, que a chuva provoca uma forte redução na temperatura do componente sob inspeção, assim como de todos os equipamentos envolvidos, como pode ser visto no gráfico da Figura 4.11. Entretanto, um dado simples, mas muito importante e não observado pelos termografistas em geral, pode ser extraído dos ensaios:

- A inspeção não deve ser executada imediatamente após o término da chuva.

Logo após a chuva, as temperaturas dos componentes ainda estão sob a influência do resfriamento provocado por ela. Corre-se o risco de não detectar pequenas anomalias ou de realizar uma análise equivocada em função das baixas temperaturas.

No ensaio realizado, as temperaturas dos conectores envolvidos voltaram a ter uma temperatura, próxima da temperatura anterior à chuva, após um período de aproximadamente uma hora, como mostra o gráfico da Figura 4.11.

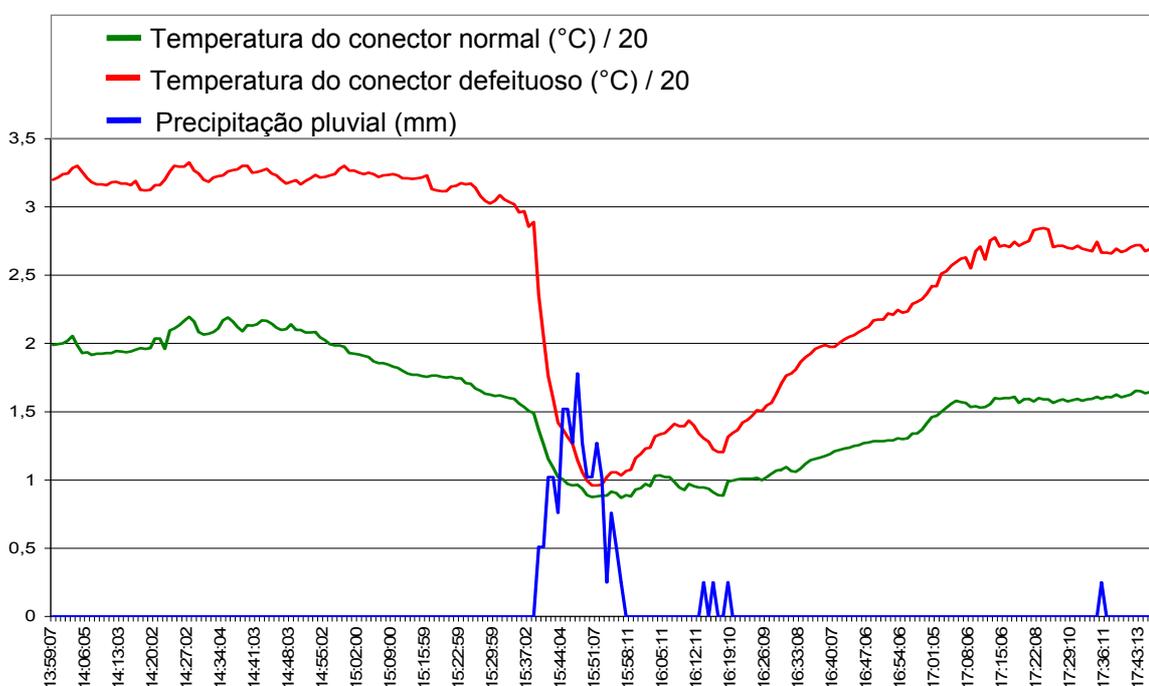


Figura 4.11 – Efeito da chuva sobre a temperatura das conexões do ensaio da Figura 4.5.

4.1.3. Atenuação atmosférica

Para verificar a influência da atenuação atmosférica em distâncias típicas das encontradas em subestações, o ensaio descrito abaixo foi realizado.

Instrumentos utilizados:

- Corpo Negro – Fabricante Mikron, modelo 315, série M0000382.
- Termovisor – Fabricante FLIR, modelo P60, série 21802350.
- Trena Laser – Fabricante Bosch, modelo DLE 150, série 587279842.
- Termo-higro-anemômetro – Fabricante Kestrel, modelo 3000, série 352417.

Foi utilizado como referência de temperatura um *Corpo Negro* com uma grande área de medição (0,2 m X 0,2 m) para evitar o erro devido à resolução espacial do termovisor e avaliar apenas a influência atmosférica.

As medições foram realizadas em duas etapas. Em uma, o *Corpo Negro* foi ajustado para a temperatura de 50 °C e em outra, ajustado para 100 °C. As temperaturas foram escolhidas por serem representativas das tipicamente encontradas em anomalias térmicas de subestações de alta tensão.

Um termovisor com faixa de comprimento de onda de 7,5 µm a 13 µm foi usado para medir a temperatura do *Corpo Negro* a distâncias entre 10 metros e 70 metros, em intervalos de 10 metros.

O termovisor utilizado possuía ajustes para compensar a atenuação atmosférica. Também com o objetivo de reduzir o erro devido à resolução espacial uma lente de campo de visão (FOV) de 12° foi acoplada ao termovisor.

O ensaio foi realizado no Centro Técnico de Ensaio e Medições (CTE.O), em São José da Barra – MG, no outono, no período das 10:00 horas às 11:20 horas, em uma altitude aproximada de 700 metros, latitude 20°40'58.S, longitude 46°19'50.O, com uma temperatura ambiente variando de 20 °C a 23 °C, umidade relativa do ar variando de 66% a 68%, umidade absoluta de 12,1 g/m³ a 13,6 g/m³, céu nublado e

atmosfera livre de poluição industrial.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram o diagrama e a foto do ensaio realizado, respectivamente.

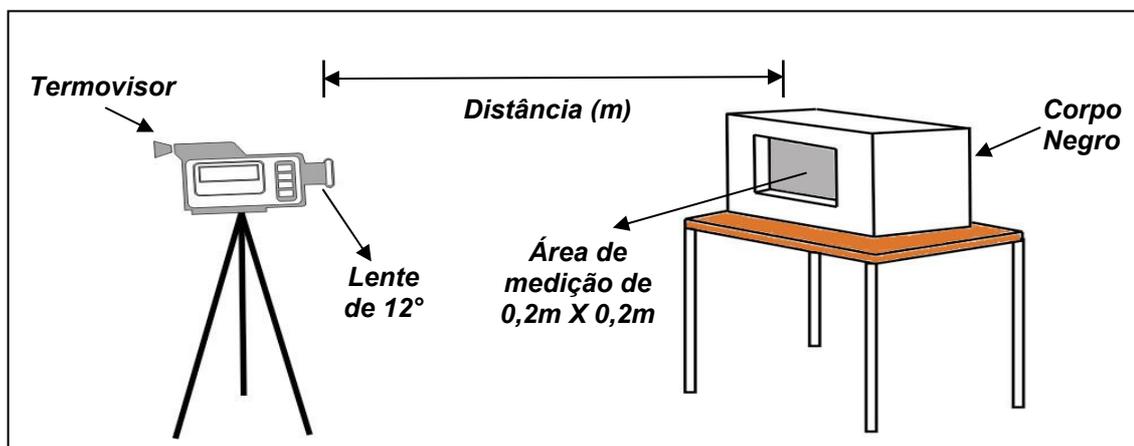


Figura 4.12 – Esquema do ensaio para a determinação da atenuação atmosférica.



Figura 4.13 – Foto do ensaio para a determinação da atenuação atmosférica.

Os dados obtidos mostram que a atenuação atmosférica abaixo de 50 metros pode ser considerada baixa, para fins de inspeção de subestação, e que a correção introduzida pelo termovisor auxilia na redução do erro da leitura de temperatura. Os gráficos das Figuras 4.14 e 4.15 mostram esses resultados.

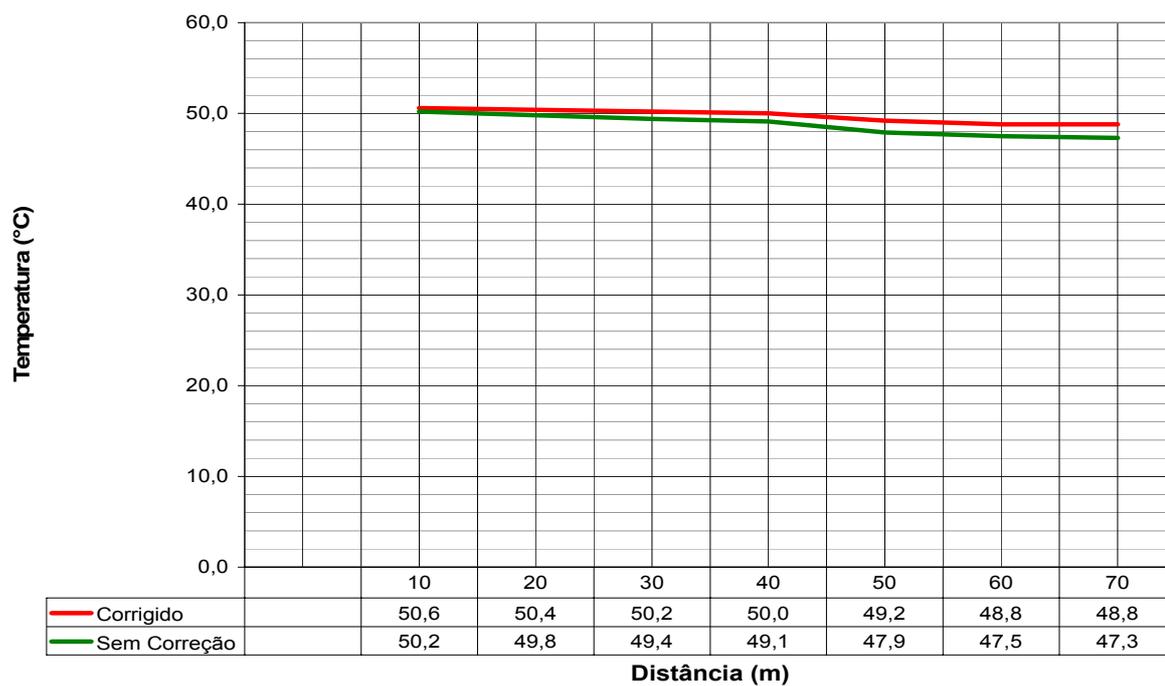


Figura 4.14 – Gráfico da temperatura em função da distância - Referência (Corpo Negro) em 50 °C.

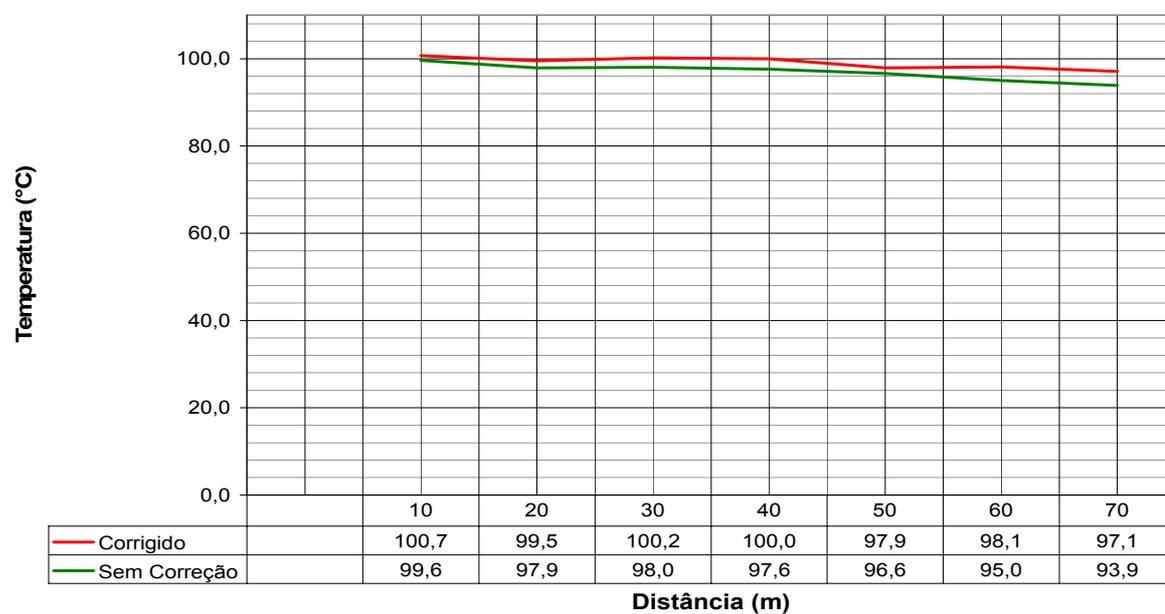


Figura 4.15 – Gráfico da temperatura em função da distância - Referência (Corpo Negro) em 100 °C.

A Figura 4.16 mostra duas imagens térmicas do ensaio descrito anteriormente.

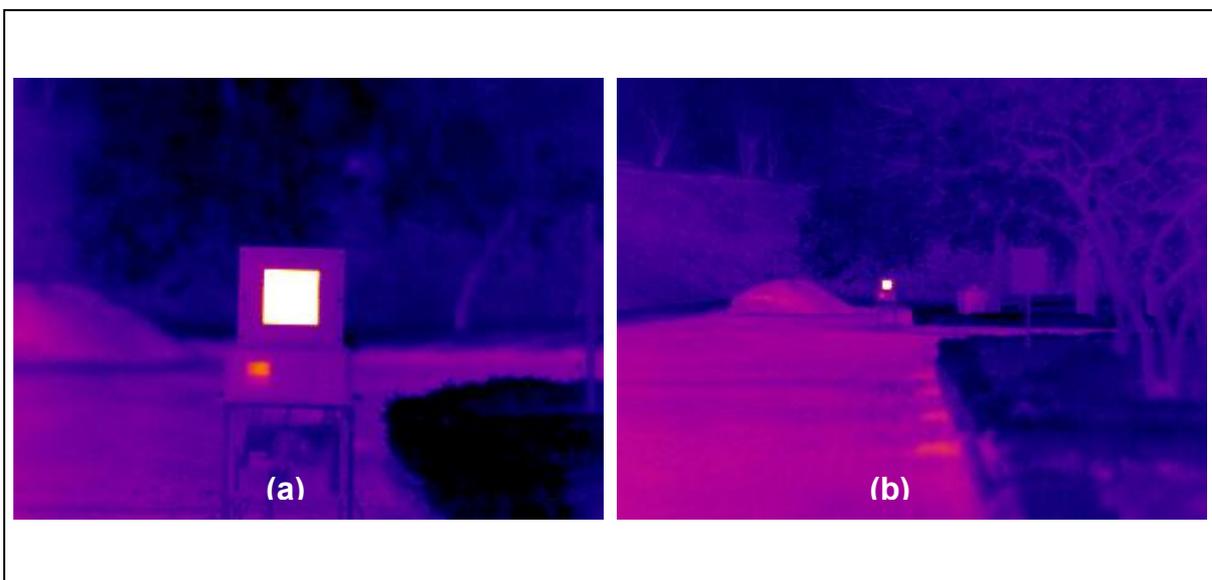


Figura 4.16 – Termogramas do Corpo Negro a 10 m (a) e a 70 m (b) do termovisor (lente de 12°).

Apesar da baixa influência de uma atmosfera, clara e com baixa umidade, em inspeções de subestações de alta tensão, deve-se procurar a menor distância possível entre o termovisor e o componente sob inspeção, buscando eliminar por completo essa influência e principalmente a influência da resolução espacial que geralmente é a mais atuante. Cabe lembrar que as distâncias limites de segurança devem ser sempre respeitadas.

4.1.4. Nevoeiro

Como discutido no Item 3.3.4.6, a umidade do ar é um dos maiores responsáveis pela absorção da radiação infravermelha na atmosfera e, após a saturação, quando se transforma em névoa, nevoeiro ou chuva, as partículas de água crescem em tamanho e o coeficiente de dispersão aumenta, diminuindo ainda mais a transmitância da radiação.

O ensaio a seguir mostra a influência de um nevoeiro, com visibilidade de aproximadamente 150 metros, para distâncias de até 70 metros.

Instrumentos utilizados:

- Corpo Negro – Fabricante Mikron, modelo 315, série M0000382.
- Termovisor – Fabricante FLIR, modelo P60, série 21802350.
- Trena Laser – Fabricante Bosch, modelo DLE 150, série 587279842.
- Termo-higro-anemômetro – Fabricante Kestrel, modelo 3000, série 352417.

Foi utilizado como referência de temperatura um *Corpo Negro* com uma grande área de medição (0,2 m X 0,2 m) para evitar o erro devido à resolução espacial do termovisor e avaliar apenas a influência do nevoeiro.

O Corpo Negro foi ajustado para a temperatura de 60 °C.

Um termovisor com faixa de comprimento de onda de 7,5 µm a 13 µm foi usado para medir a temperatura do *Corpo Negro* a distâncias entre 5 metros e 70 metros.

O termovisor utilizado possuía ajustes para compensar a atenuação atmosférica.

Com o objetivo de reduzir o erro, devido à resolução espacial, uma lente de campo de visão (FOV) de 12° foi acoplada ao termovisor.

O ensaio foi realizado no Centro Técnico de Ensaios e Medições (CTE.O), em São José da Barra – MG, no final de outono, no período das 8:31 horas às 8:35 horas, em uma altitude aproximada de 700 metros, latitude 20°40'58.S, longitude 46°19'50.O, com uma temperatura ambiente de 17 °C, umidade relativa do ar de 90%, umidade absoluta de 13,0 g/m³, visibilidade de aproximadamente 150 metros e atmosfera livre de poluição industrial.

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram a foto e três termogramas do ensaio realizado, respectivamente. A Figura 4.19 apresentam os resultados obtidos.



Figura 4.17 – Foto do ensaio com nevoeiro de baixa visibilidade.



Figura 4.18 – Termogramas do ensaio com nevoeiro.

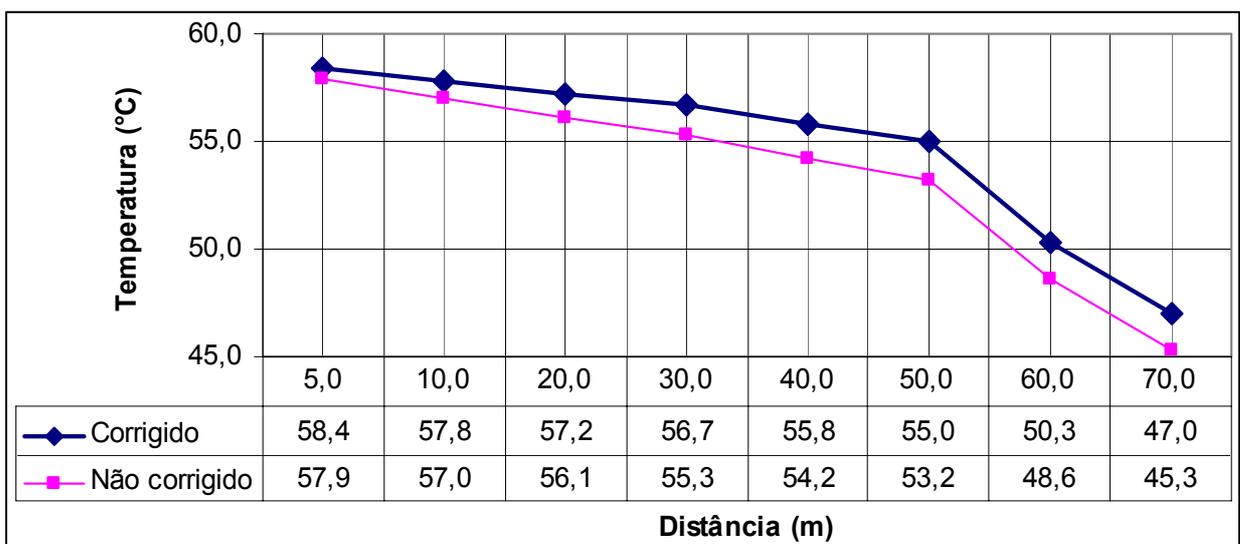


Figura 4.19 – Gráfico com os resultados do ensaio com nevoeiro.

As medições de temperatura, realizadas com um nevoeiro de baixa visibilidade, revelaram que a atenuação atmosférica observada até os 50 metros é ligeiramente maior do que a atenuação com a atmosfera clara do Item 4.1.3. Entretanto, acima dos 50 metros a atenuação aumenta rapidamente. A correção introduzida pelo termovisor reduz o erro da leitura de temperatura, mas que continua sendo alto para distâncias acima de 50 metros.

A recomendação é semelhante a do Item 4.1.3. O termografista deve procurar a menor distância possível entre o termovisor e o componente sob inspeção, procurando eliminar por completo a influência do nevoeiro, mas também deve ser considerado o fato de que a condensação da água, sobre o componente, irá reduzir a temperatura da anomalia, devido sua alta condutividade térmica e o resfriamento por evaporação.

4.2. Ensaios em Laboratório

4.2.1. Conector ensaiado

O componente escolhido para ser ensaiado foi o conector Burndy NAR45A-4N-90, fabricado em liga de alumínio, aparafusado e para ser usado com cabos ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) de 715 a 1113 MCM (26,6 a 32 mm), Figura 4.20 (Burndy, 1995).



Figura 4.20 – Conectores NAR45A-4N-90 utilizados nos ensaios em laboratório.

Com o objetivo de conhecer mais detalhadamente o processo de produção dos conectores utilizados, as características técnicas e os procedimentos de testes realizados pelo fabricante, foi realizada uma visita à fábrica de conectores FCI/Burndy (Figura 4.21), localizada na cidade de São Paulo.



Figura 4.21 – Vista parcial da fábrica de conectores FCI/Burndy.

Para realizar os ensaios, dois conectores NAR45A-4N-90 foram ligados em série, Figura 4.22(d), e um cabo ACSR, tipo *BlueJay* (32 mm, 1092 A) foi utilizado para fazer a conexão entre eles e a fonte de corrente (Alcan cable, 2008).

Antes dos ensaios foram realizados os procedimentos de limpeza com escova de aço, aplicação de pasta antióxido (Penetrox) e torque adequado, Figura 4.22(b).

Para alcançar o torque correto foi usado o torquímetro Gedore, dremometer, Série: 47982. O aperto dos parafusos foi feito em cruz, aplicando um torque de 4,7 kgf.m especificado para parafusos de aço de 10 mm, Figura 4.22 (c).

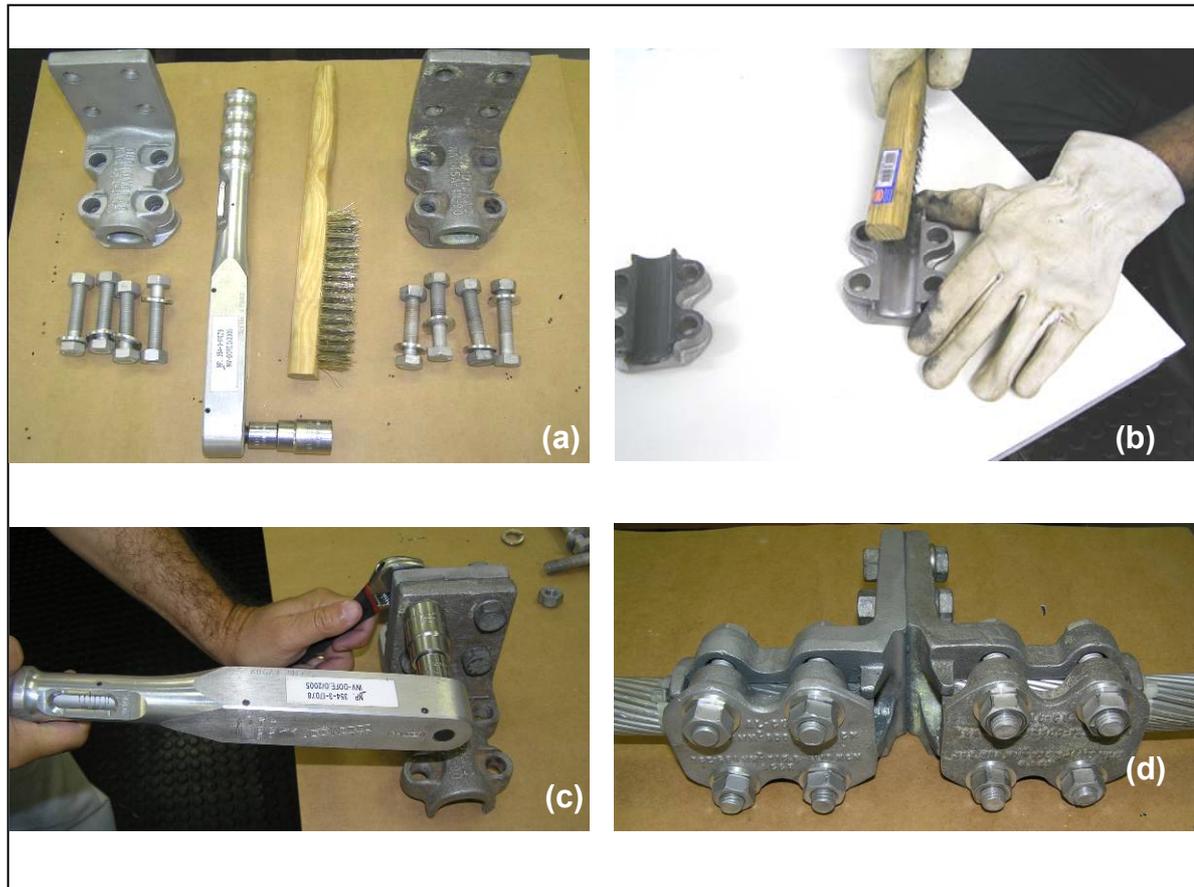


Figura 4.22 – Preparação dos conectores para os ensaios.

4.2.2. Sistema desenvolvido para os ensaios em laboratório

Nos ensaios em campo foi possível observar as várias influências atuando sobre a anomalia térmica, mas na maior parte do tempo de forma simultânea, raramente era observada uma influência atuando separadamente.

Para uma melhor análise, era necessário avaliar o efeito, sob o componente e sob a temperatura da anomalia, de cada influência em separado. Para isso, foi projetado e desenvolvido o sistema mostrado no esquema da Figura 4.23.

O sistema desenvolvido, além de simular, sob condições controladas, as influências encontradas em campo, é capaz de monitorar todas as variáveis de interesse, através de um sistema supervisorio desenvolvido especificamente para esse fim (descrito em 4.2.2.2).

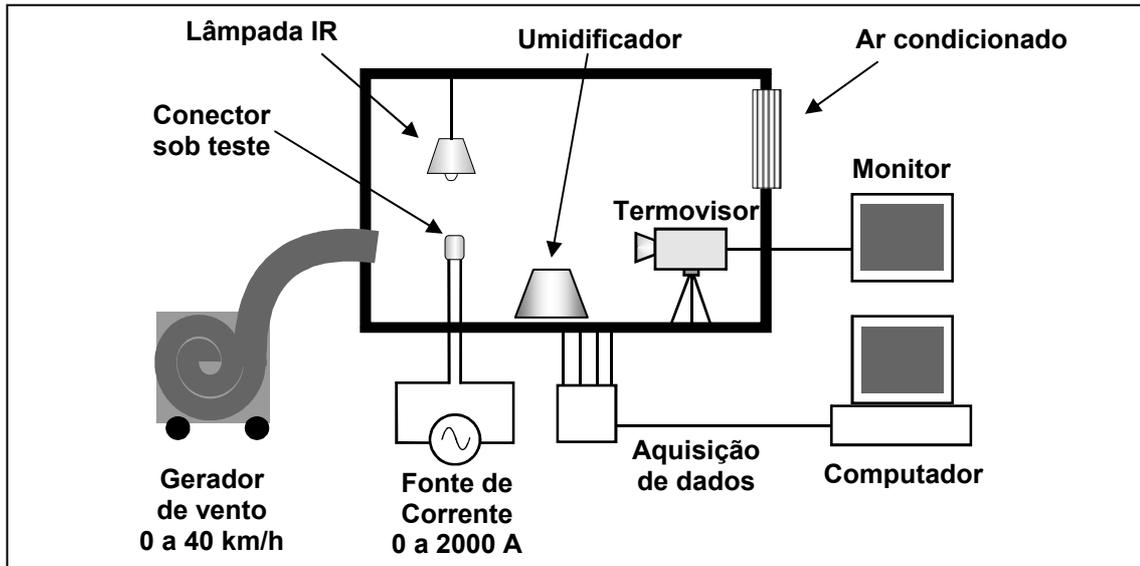


Figura 4.23 – Sistema desenvolvido para os ensaios em laboratório.

4.2.2.1. Câmara de testes e seus elementos

A câmara de testes é a peça principal do sistema desenvolvido. Ela permite avaliar o comportamento térmico de um componente sob as várias influências Atmosféricas (temperatura ambiente, vento, umidade e radiação infravermelha incidente) de modo controlado e independente, bem como, sob a influência de vários níveis de corrente.

Principais características da câmara desenvolvida:

- Dimensões internas suficientes para a instalação do conector a ser analisado e dos equipamentos necessários às simulações e análises.
- Capaz de simular e controlar, separadamente ou simultaneamente, a temperatura ambiente, a velocidade de vento, a umidade relativa do ar e a radiação infravermelha incidente no conector.
- Capaz de aplicar ao conector, valores de corrente similares aos valores reais de operação em campo.
- Capaz de coletar, em tempo real e via computador, dados de temperatura do conector (através de termômetros de contato) e das influências Atmosféricas envolvidas.

Para alcançar as características citadas, a estrutura da câmara foi feita em perfis de alumínio e, para se obter um melhor isolamento térmico, suas paredes foram feitas de placas de policarbonato com 10 mm de espessura. As dimensões finais da câmara ficaram com 2,0 m de comprimento por 0,8 m de largura e 1,0 m de altura. O suporte da câmara, também montado em perfis de alumínio, ficou com uma altura de 0,8 m em relação ao piso. A Figura 4.24 mostra detalhes da estrutura da câmara.

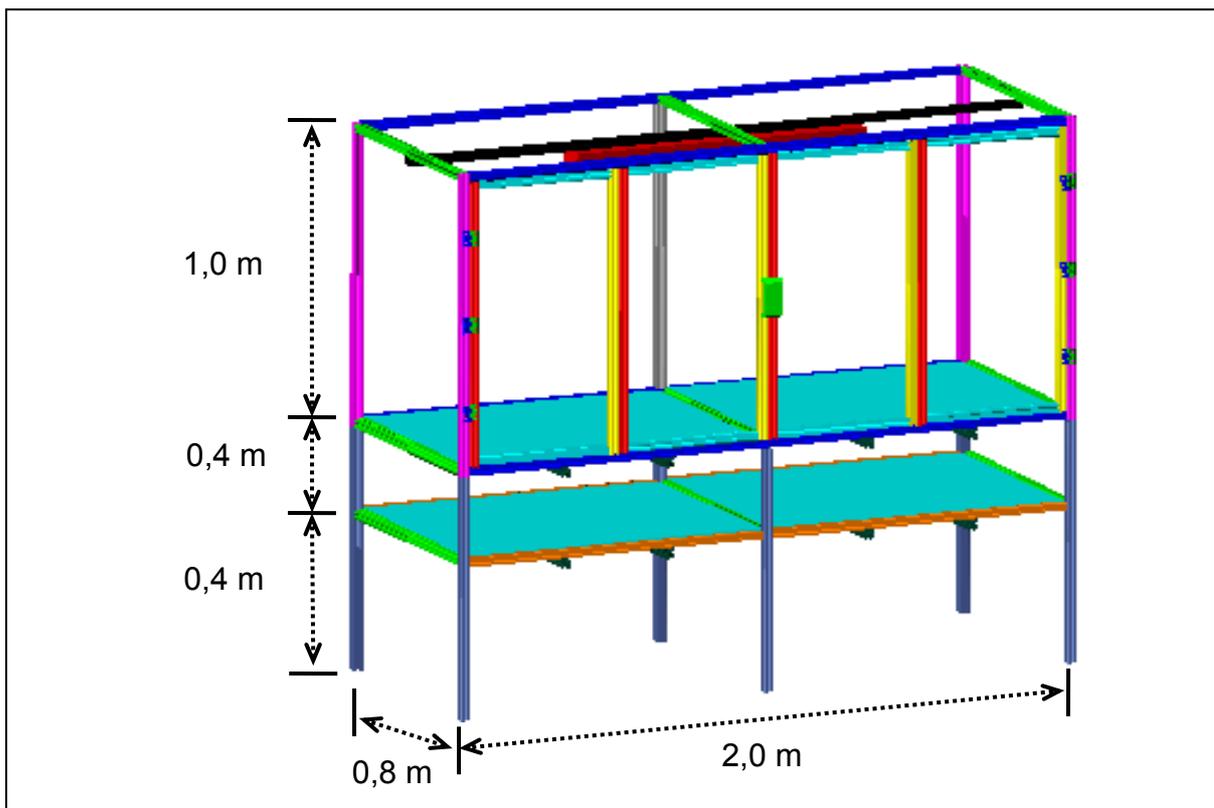


Figura 4.24 – Estrutura da câmara de testes.

Equipamentos e instrumentos utilizados na câmara de testes:

- 01 Termovisor – Fabricante FLIR, modelo P60, série 21802350.
- 01 Termovisor – Fabricante NEC, modelo TH9100,
- 01 Fonte de corrente – Triel, modelo TC03, NP 355-2-25473.
- 04 Termômetros de contato – Fabricante Markare, modelo PT-100.

-
- 01 Lâmpada infravermelha – Fabricante Osram, potência 250W.
 - 01 Anemômetro a fio quente – Fabricante Dwyer, série 640.
 - 01 Soprador (exaustor centrífugo) – Fabricante Brasfaiber, modelo E/28-V.
 - 01 Inversor de frequência – Fabricante Weg, modelo CFW10.
 - 01 Umidificador – Fabricante Mallory, modelo Pollaris.
 - 01 Ar-condicionado quente/frio – Fabricante Springer, modelo Silentia.
 - 01 Termo-higrômetro – Fabricante Gulton, série GTIUT-A.
 - 04 Fontes de alimentação 24V – Fabricante Impac, 1,5 A.
 - 04 Módulos de aquisição de dados – Fabricante National Instruments, modelo NI USB-6008.

Para a variação da temperatura dentro da câmara foi utilizado um ar condicionado quente/frio (Figura 4.25) modificado para permitir o controle de suas funções através do programa supervisor.

A faixa de temperatura possível de ser ajustada dentro da câmara foi de aproximadamente 10 °C a 45 °C com uma temperatura externa à câmara de 23 °C.



Figura 4.25 – Equipamento de ar condicionado.

Para a simulação do vento, um soprador axial movido por um motor trifásico e acionado por um inversor de frequência (Figura 4.26) foi utilizado, permitindo seu controle a partir do programa supervisor. Com esse sistema foi possível variar a velocidade do vento, incidente no conector, de 0 a 40 km/h.



Figura 4.26 – Soprador axial à esquerda e Inversor de frequência à direita.

Para a variação da umidade relativa do ar foi empregado um umidificador de ar (Figura 4.27) em conjunto com um circuito baseado em relés e controlado pelo programa supervisor.



Figura 4.27 – Umidificador de ar

Uma lâmpada infravermelha (Figura 4.28) em conjunto com um *dimmer* e acionada por um circuito baseado em relés foram utilizados para simular a radiação solar. O controle da lâmpada também foi possível através do programa supervisorio.



Figura 4.28 – Lâmpada Infravermelha

Para aplicar ao conector, valores de corrente similares aos valores reais de operação em campo, foi utilizada uma fonte de corrente alternada (Figura 4.29), capaz de fornecer até 2000 A. O conector sob teste foi ligado à fonte através de um cabo ACSR do tipo *BlueJay* e corrente nominal de 1092 A (Alcan Cables, 2008).

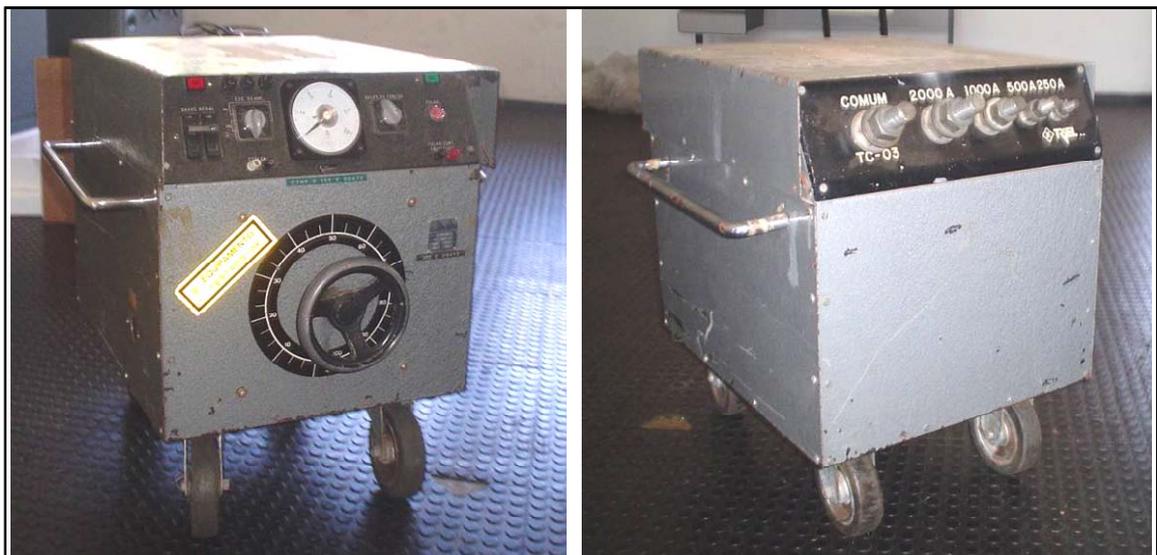


Figura 4.29 – Fonte de corrente, vista frontal (esquerda) e traseira (direita).

Para a medição de temperatura do conector sob teste foi utilizado um conjunto de transmissores de temperatura Pt100 de 0 a 150 °C (Figura 4.30). Todos os transmissores foram alimentados por uma fonte de corrente contínua de 24 V.

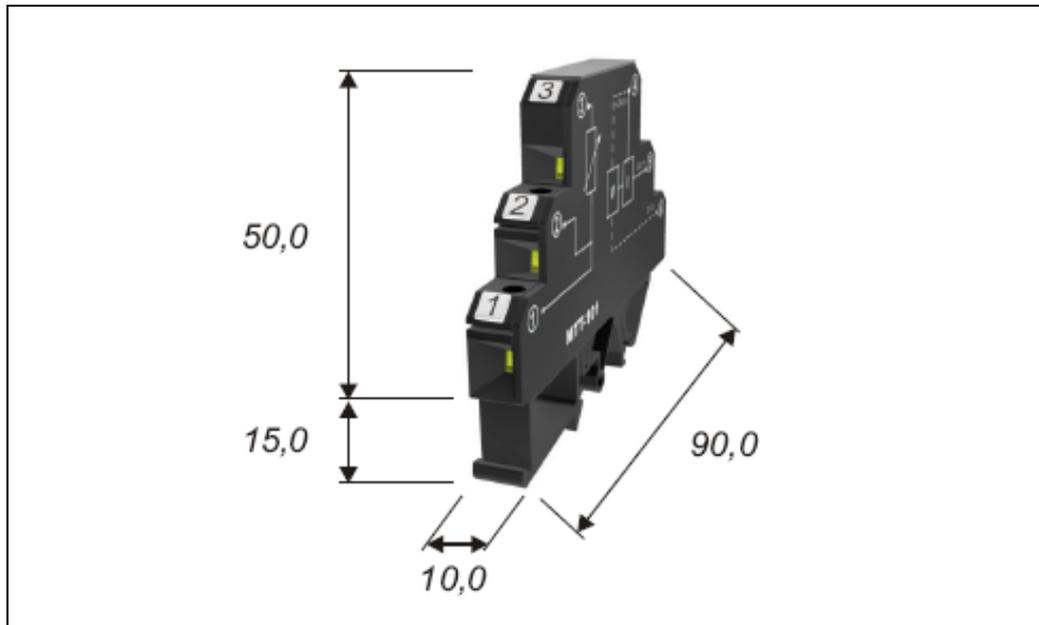


Figura 4.30 – Sistema do transmissor de temperatura.

Um transmissor com sonda a fio quente foi usado para medição da velocidade do vento, como mostra a Figura 4.31.



Figura 4.31 – Sonda a fio quente para medição de velocidade de vento.

Para a medição da umidade relativa do ar e da temperatura interna à câmara foi utilizado um termo-higrômetro Gulton, modelo GTIUT-A de saída de 4 a 20 mA (Figura 4.32).



Figura 4.32 – Termo-higrômetro Gulton, modelo GTIUT-A.

Um amperímetro alicate Minipa, modelo ET-3200A foi utilizado para medição da corrente aplicada ao conector (Figura 4.33).



Figura 4.33 – Amperímetro alicate

A plataforma de supervisor escolhida foi o *LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)* da National Instruments. Foi também utilizado o módulo de aquisição de dados do mesmo fabricante (Figura 4.34).



Figura 4.34 – Módulo de aquisição de dados

O módulo de aquisição foi dimensionado para sete entradas analógicas, das quais, cinco são dos transmissores de temperatura, uma é do transmissor de umidade e outra do transmissor de velocidade do vento.

Uma saída analógica foi usada para o controle de velocidade do soprador, três saídas digitais para o ar-condicionado (acionamento, potência e função), e mais três digitais para acionamento da lâmpada infravermelha, acionamento do soprador e para o acionamento do umidificador.

Cinco circuitos eletrônicos de potência, como o da Figura 4.35, foram utilizados para aumentar a potência do módulo de aquisição de dados.

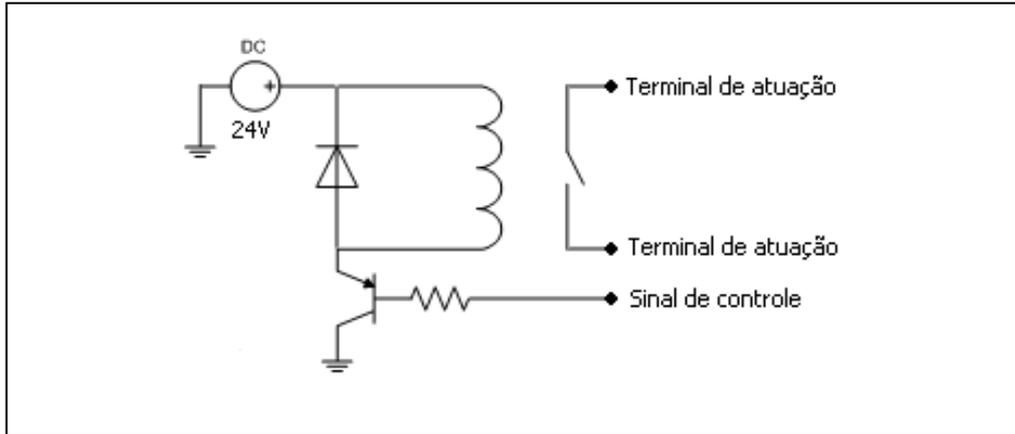


Figura 4.35 – Circuito eletrônico de potência.

A Figura 4.36 mostra fotos da montagem da câmara com os equipamentos instalados. Observa-se que todo o interior da câmara foi pintado de preto fosco para reduzir, ao máximo, possíveis influências da radiação refletida.

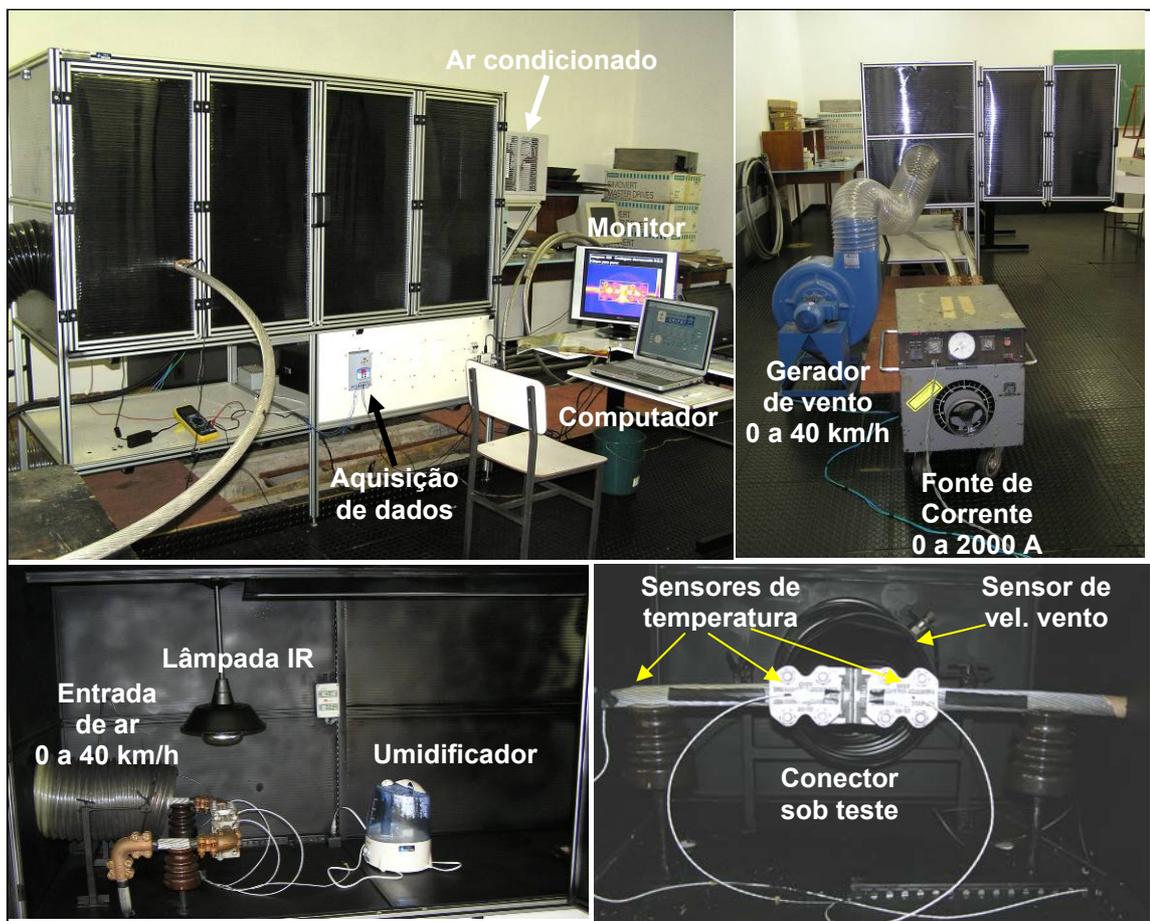


Figura 4.36 – Fotos da câmara de testes.

4.2.2.2. Sistema Supervisório

Optou-se pela plataforma *LabView* para controle, operação e interface da automação da câmara, posto que este possui muitos recursos para aplicações em laboratórios, além de apresentar um ambiente de programação amigável.

A programação na plataforma *LabView* se dá de forma visual e por blocos, em uma estrutura macro do *software* chamada de “*flat sequency structure*”, isto é, cada *frame* (quadro) é executado em sequência.

No primeiro *frame* foram programadas as condições iniciais do *software*. No segundo tem-se as suas funcionalidades e o terceiro *frame* é o responsável pela finalização dos procedimentos, encerrando-se as funcionalidades, onde todos os equipamentos como ar condicionado, soprador, lâmpada infravermelha e umidificador se encontrem desligados, evitando desta forma eventuais problemas de natureza elétrica.

Na primeira tela (Figura 4.37) estão as funções de controle do sistema, além de indicadores das variáveis medidas.

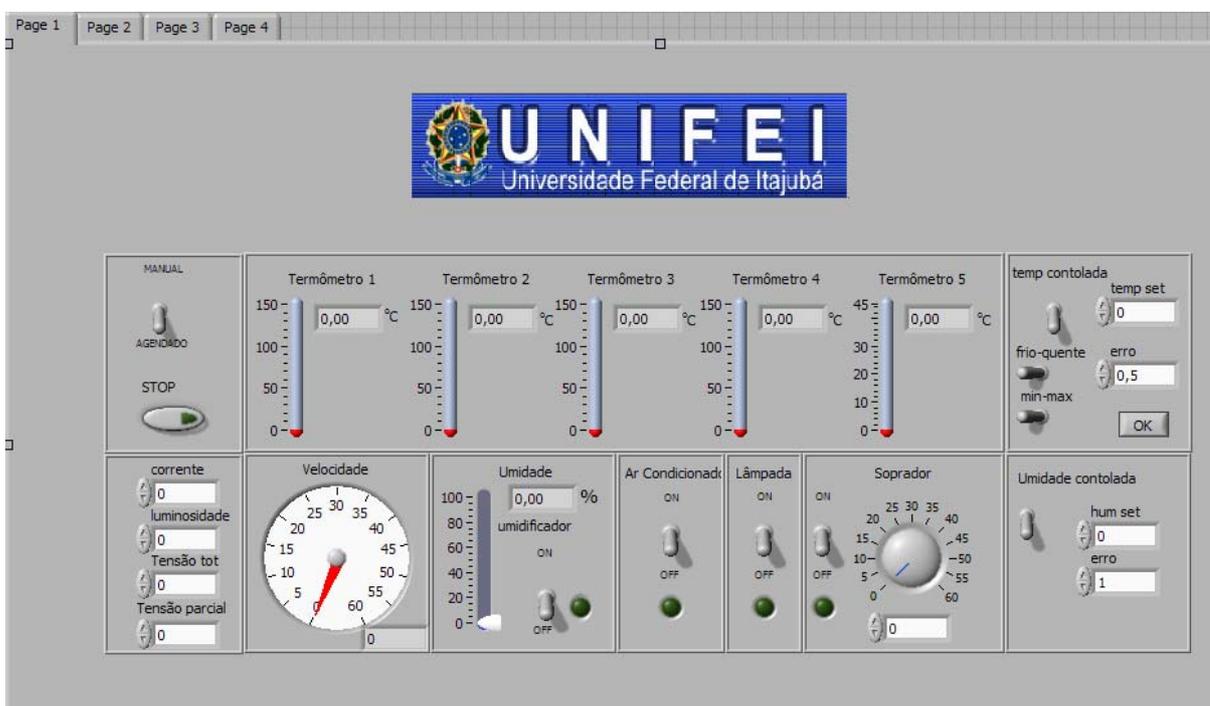


Figura 4.37 – Primeira tela do supervisório.

A chave de seleção de modo seleciona entre o modo “Manual” e “Agendado”. No modo “Manual” é necessária a intervenção do operador para ativar as saídas controladas pelo programa durante um ensaio. No modo “Agendado” é possível agendar ações em dia e horário predeterminados.

Os indicadores de temperatura permitem a visualização de forma gráfica e numérica dos valores das temperaturas (Figura 4.38). Os termômetros de 1 a 4 informam a temperatura do conector sob teste e o termômetro 5 informa a temperatura interna da câmara.

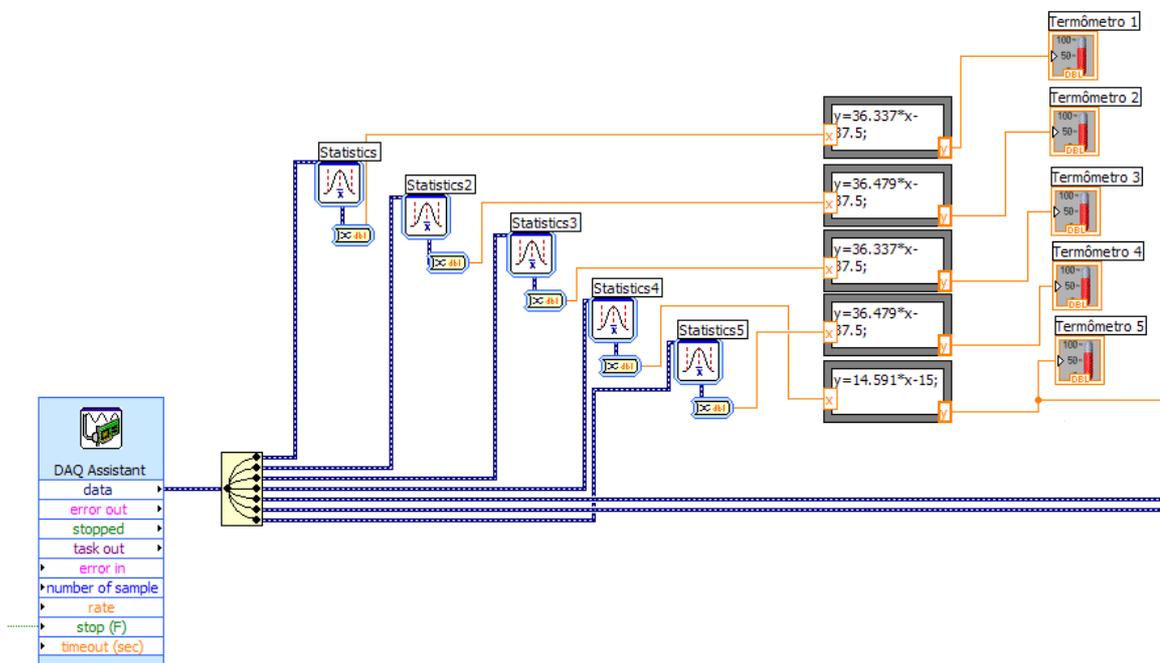


Figura 4.38 – Programação dos indicadores de temperatura.

A função de “Temp Controlada” permite realizar o controle da temperatura interna da câmara através do acionamento do ar-condicionado. Para tanto é necessário que o operador coloque no campo “Temp Set” a temperatura que se deseja manter no interior da câmara, levante a chave “Temp Controlada” e em seguida acione o botão “OK”. A partir do acionamento do botão “OK”, as chaves “Frio-quente” e “Min-max” passam a ser operadas pelo sistema de controle e, portanto, acionadas automaticamente. A Figura 4.39 apresenta a programação das chaves “Min-max” e “Frio-quente”.

A programação do controle de temperatura tem como entrada a informação da temperatura ambiente simulada (termômetro 5) e como saídas, ações sobre o ar condicionado. A partir da adaptação realizada, pode ser controlado não somente o estado “Ligado\desligado” (chave de acionamento manual do ar condicionado), como também sua função e potência via supervisor, evitando assim a abertura da câmara para a alteração física desses parâmetros, o que acarretaria em trocas de calor.

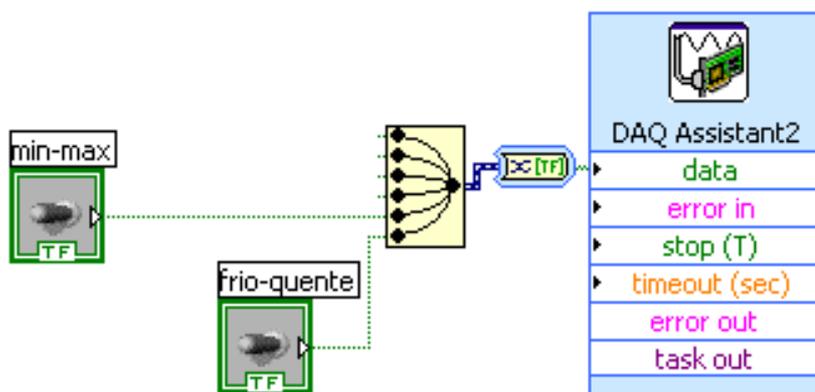


Figura 4.39 – Programação das chaves “Min-max” e “Frio-quente”.

Os campos “Corrente”, “Luminosidade”, “Tensão Tot” e “Tensão Parcial” são utilizados para permitir a entrada de dados, cujas medições são realizadas com equipamentos que não possuem comunicação com o supervisor.

O campo “Corrente” recebe, via teclado, a informação da corrente fornecida pela fonte de corrente e medida no amperímetro alicate.

O campo “Luminosidade” recebe a informação da posição do controle de intensidade da lâmpada infravermelha.

O campo “Tensão Tot” recebe a informação da diferença de potencial existente entre as extremidades do conector sob teste.

O campo “Tensão Parcial” recebe a informação da diferença de potencial existente entre uma extremidade e um segundo ponto determinado pelo roteiro de ensaio.

Os valores presentes nos quatro campos descritos são inseridos na tabela gerada pelo supervisor e apresentados na segunda tela, junto com os dados do ensaio.

O indicador “Velocidade” permite a visualização da velocidade do vento, tanto na forma analógica, como na forma digital. A programação do indicador de velocidade é apresentada na Figura 4.40.

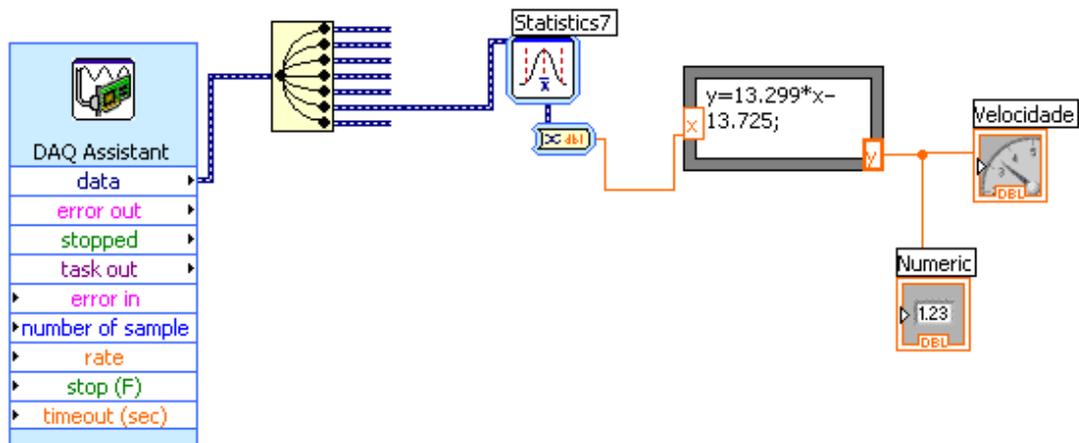


Figura 4.40 – Programação do indicador de velocidade do vento.

O indicador “Umidade” mostra a umidade relativa do ar no interior da câmara, tanto na forma analógica, como na forma digital. A programação do indicador de umidade é apresentada na Figura 4.41.

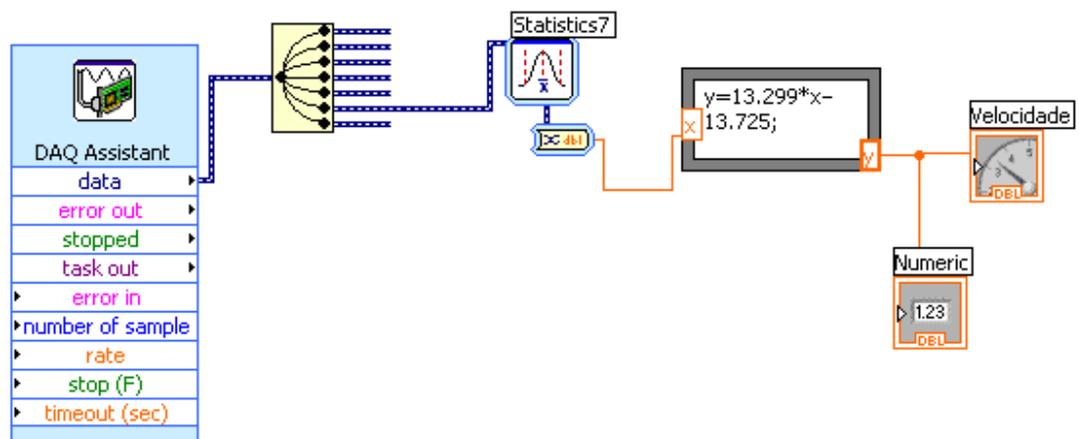


Figura 4.41 – Programação do indicador de umidade.

A chave “Umidificador” possibilita o acionamento manual do umidificador. A Figura 4.42 mostra a programação da chave de acionamento manual do umidificador.

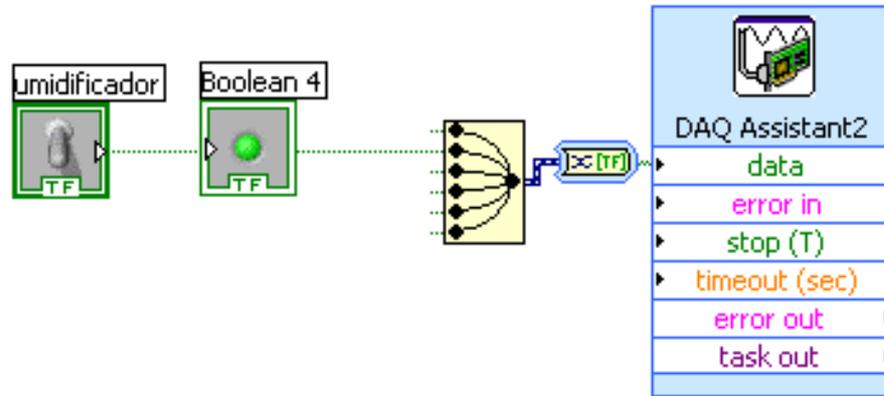


Figura 4.42 – Programação da chave de acionamento manual do umidificador.

As chaves “Ar Condicionado” e “Lâmpada” acionam manualmente o estado “ligado\desligado” do ar condicionado e da lâmpada infravermelha, respectivamente. A Programação é apresentada na Figura 4.43.

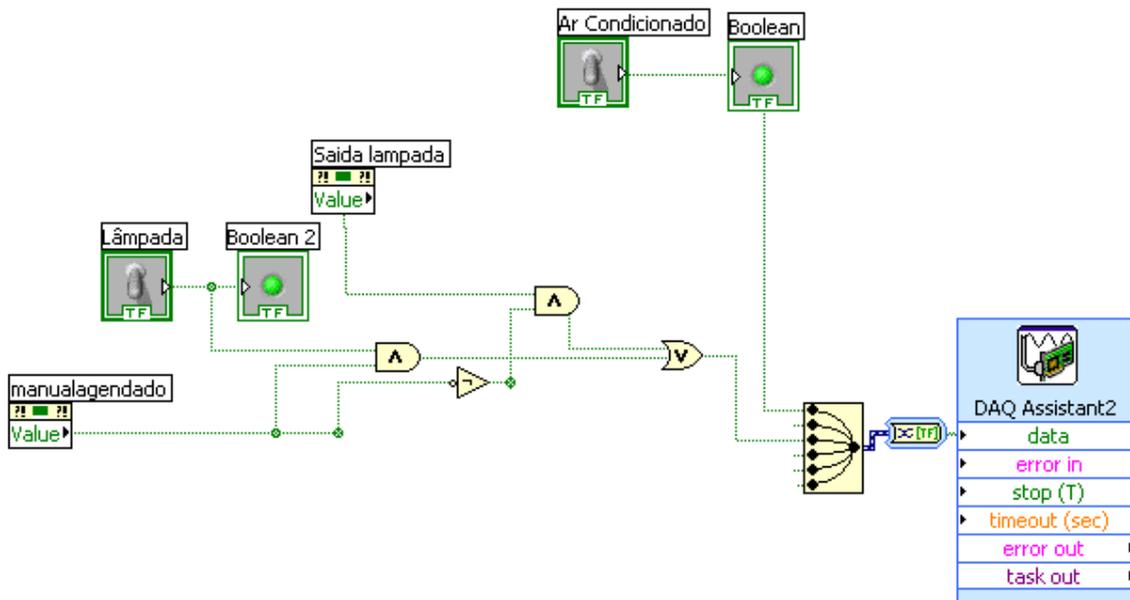
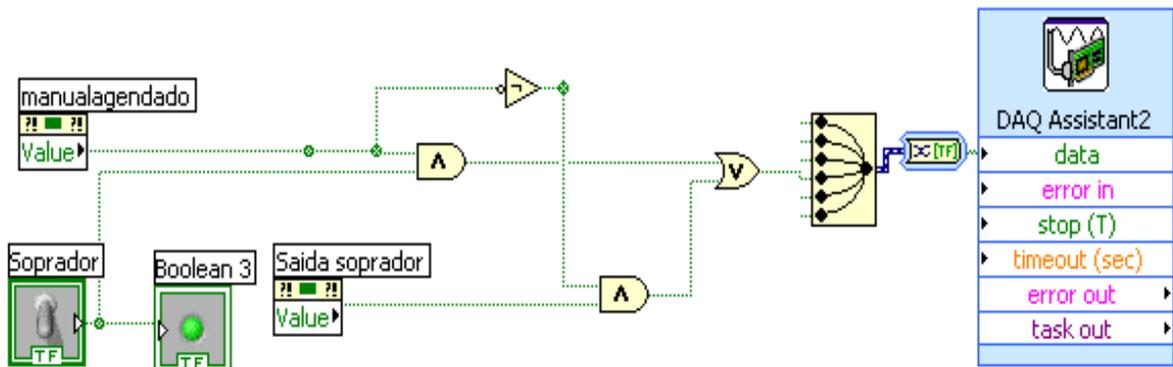
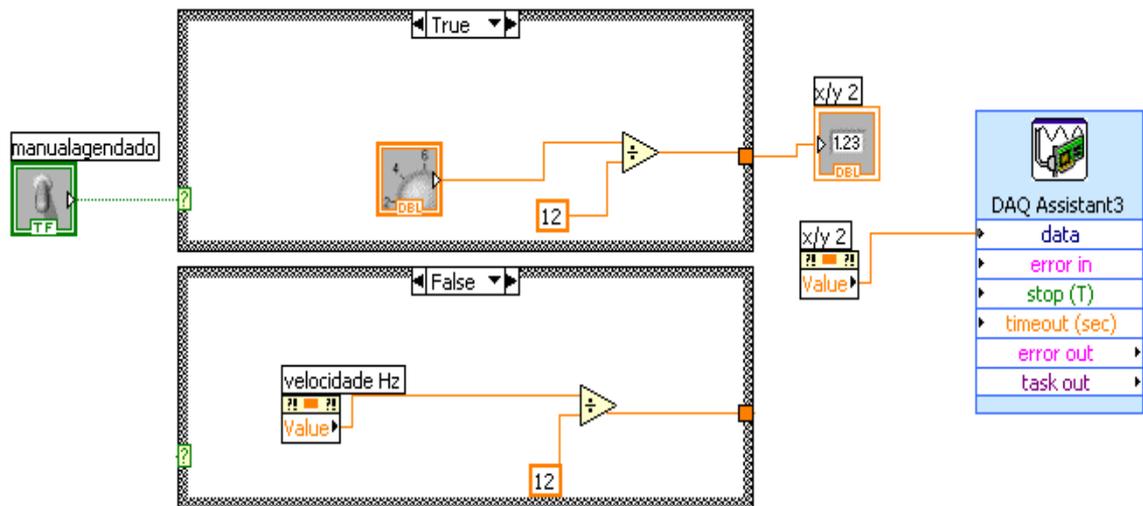


Figura 4.43 – Programação das chaves de acionamento manual do ar condicionado e da lâmpada infravermelha.

A chave “Soprador” faz o acionamento manual do estado “ligado/desligado” do soprador. A Figura 4.44 mostra a programação da chave de acionamento manual e do dial de seleção de velocidade do soprador.



(a)



(b)

Figura 4.44 – (a) Programação da chave de acionamento manual do soprador - (b) Programação do dial de seleção de velocidade do soprador.

A função “Umidade Controlada” tem o objetivo de ligar ou desligar automaticamente o umidificador no interior da câmara a partir do valor informado no campo “Hum Set”. A Figura 4.45 mostra a programação da chave e da lógica de umidade controlada.

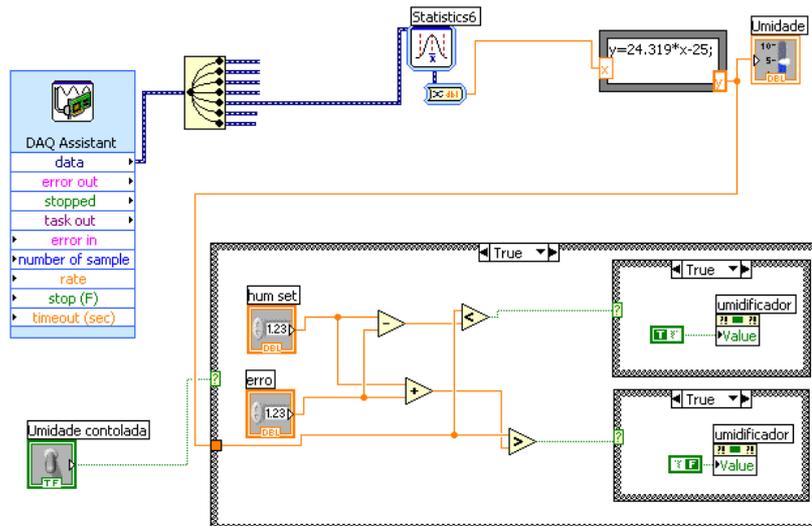


Figura 4.45 – Programação da chave e da lógica de umidade controlada.

A segunda tela do supervisor apresenta um gráfico e uma tabela das variáveis envolvidas. Além disso, possui um botão de sincronização e um campo para determinar o intervalo de tempo entre as amostras. O gráfico das variáveis apresenta um gráfico em tempo real das variáveis do ensaio. A Figura 4.46 mostra a programação do gráfico.

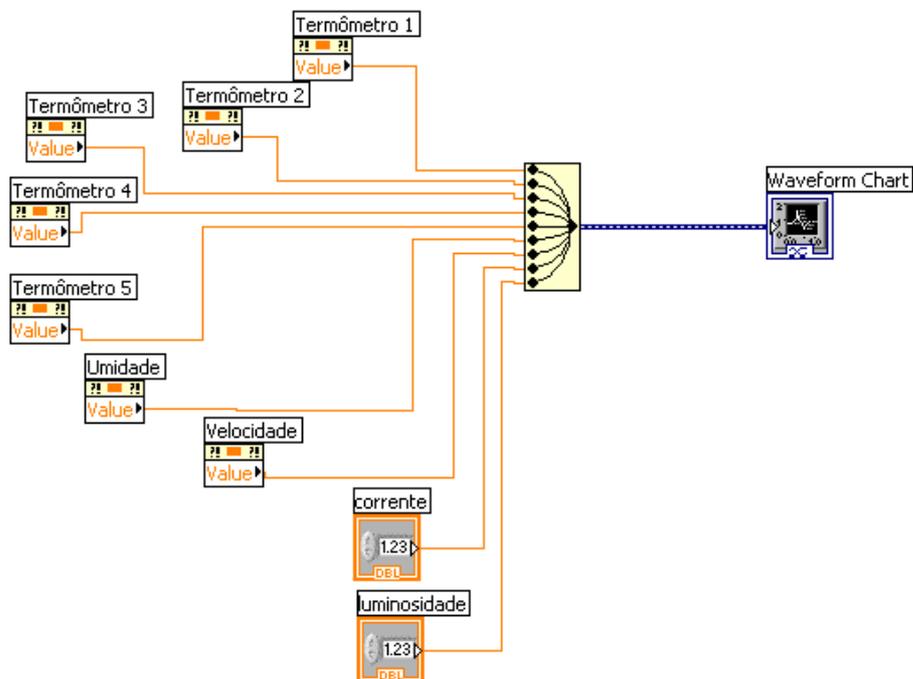


Figura 4.46 – Programação do gráfico das variáveis.

O botão de “Reset” e “Tempo de Amostras” serve para sincronizar as aquisições do programa com a captura das imagens pelo termovisor para análises posteriores. A programação do botão de sincronia e tempo entre amostras é apresentada na Figura 4.47.

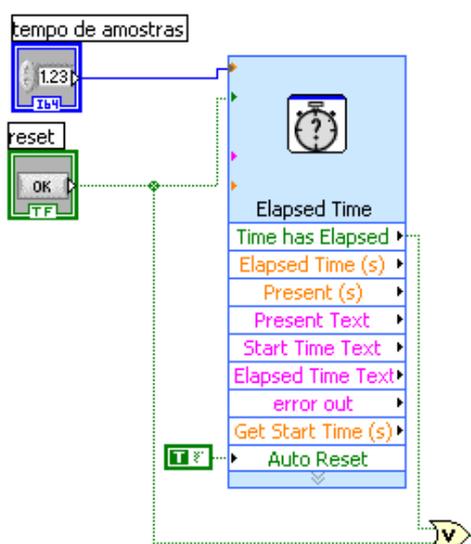


Figura 4.47 – Programação do botão de sincronia e tempo entre amostras.

A tabela “Coleta de Dados” permite a visualização numérica dos valores das variáveis aquisitadas. Ela é responsável também por armazenar esses valores para que ao final do ensaio sejam gravados em forma de planilha do *Excel*.

A terceira tela do supervisor é destinada ao agendamento de tarefas. A partir dela é possível agendar ações com os equipamentos controlados pelo supervisor.

Os campos “Data Atual” e “Hora Atual” informam ao operador a data e a hora do relógio interno do computador. Os indicadores “Saída Soprador” e “Saída Lâmpada” informam o estado do soprador e da lâmpada infravermelha, respectivamente, quando o supervisor está operando em modo agendado.

A função “Agenda”, com as abas “Temperatura Agendada”, “Ventilador”, “Umidade Agendada” e “Lâmpada”, foi desenvolvida com o objetivo de minimizar a presença do operador durante os ensaios. Ela funciona de modo que o primeiro

horário marcado liga e o segundo, desliga o equipamento desejado. É possível agendar vários horários, porém sempre nessa ordem: horário de ordem par liga e de ordem impar, desliga. A função “Agenda” só realiza as ações quando a chave “Manual/Agendado” está na posição “Agendado”.

A agenda do ventilador, além de ligar e desligar o equipamento, possui um componente a mais, o agendamento da velocidade do soprador através do campo “Velocidade Hz”. Na agenda de umidade é possível o agendamento da umidade através do campo “Hum Set”. A Figura 4.48 ilustra a programação da agenda da temperatura interna da câmara.

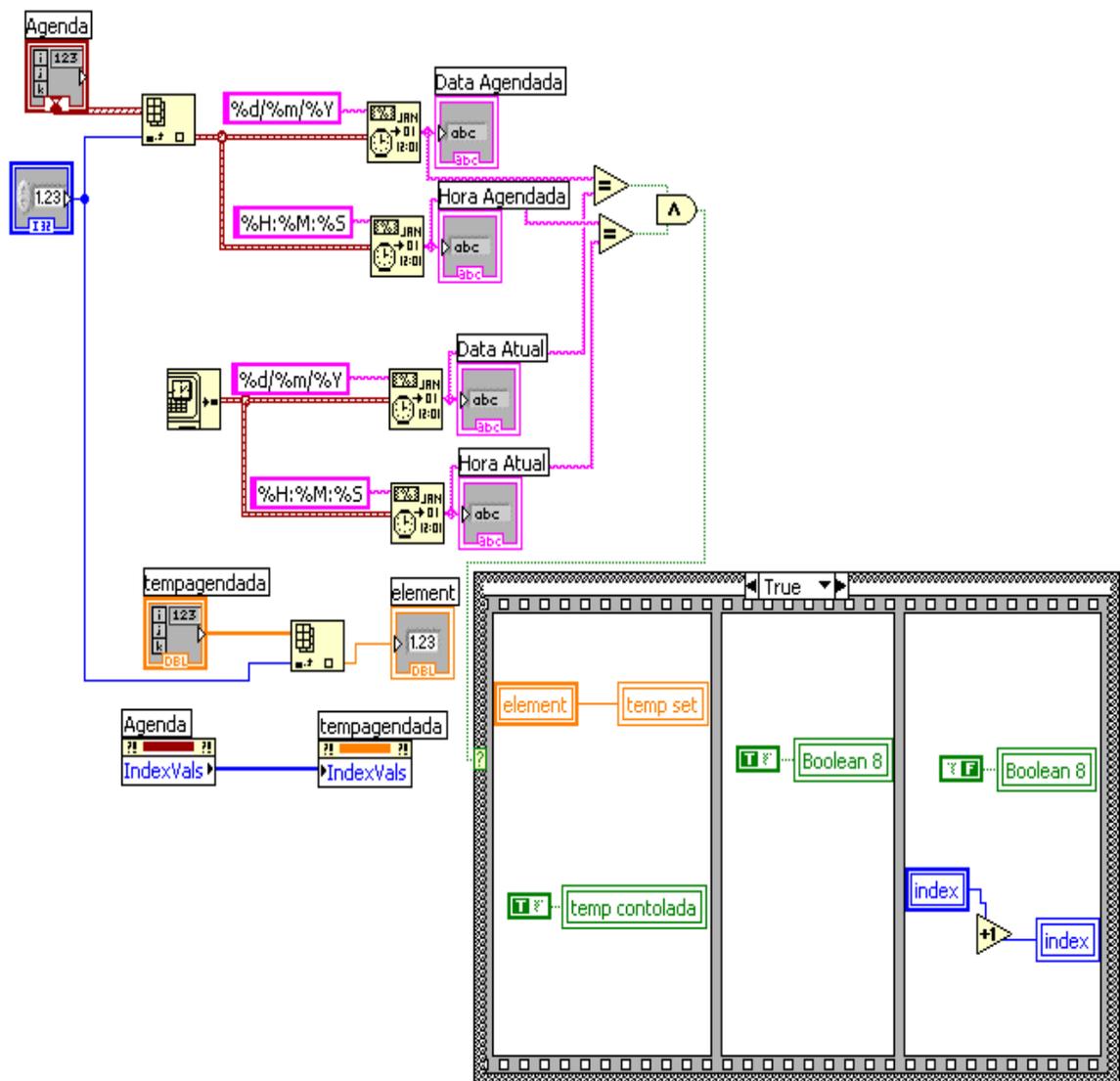


Figura 4.48 – Programação da agenda da temperatura interna.

A quarta tela do supervisorio exibe os gráficos das temperaturas obtidas pelos termômetros de contato acoplados ao equipamento sob teste, separadamente. Apesar da segunda tela do supervisorio já disponibilizar gráficos com esses dados, a visualização independente foi considerada importante para facilitar a observação de ocorrências de variações de menor amplitude.

4.2.3. Ensaios realizados

As influências de corrente, radiação solar, temperatura ambiente, vento e umidade relativa do ar foram simuladas na câmara de testes. Para cada ensaio foi adotado um procedimento, mas basicamente, em todos eles os dados climáticos foram monitorados por um sensor específico e as temperaturas do conector foram monitoradas por termômetros de contato e por um termovisor.

Para obter uma maior exatidão na medição de temperatura por termografia, fitas adesivas, de alta emissividade e de valor conhecido, foram colocadas na superfície do conector e do cabo ACSR, como mostra a Figura 4.49.

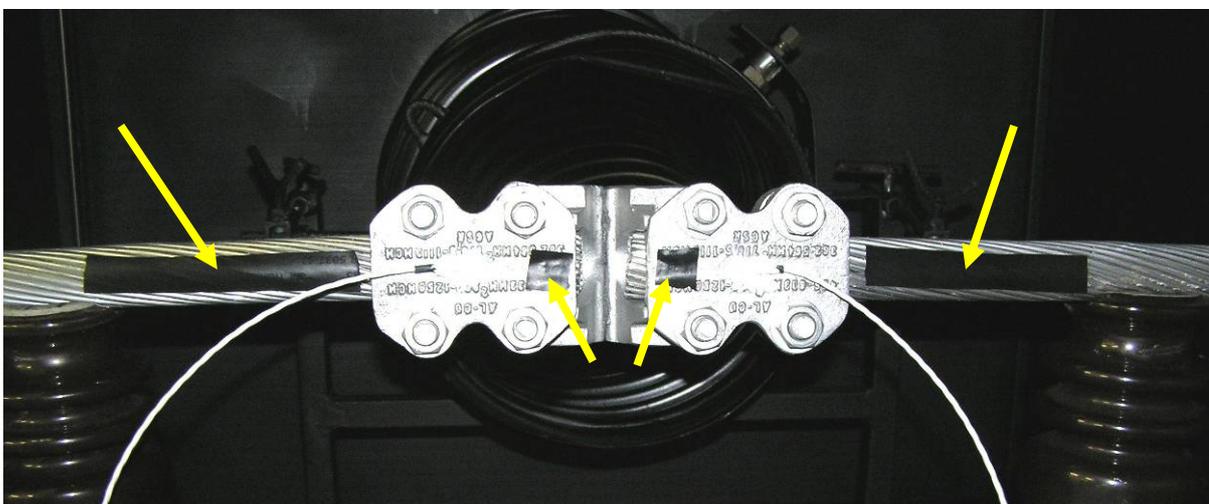


Figura 4.49 – Fitas adesivas de alta emissividade.

4.2.3.1. Variação da radiação solar

Uma lâmpada de infravermelho foi utilizada para simular a radiação solar. A finalidade deste ensaio foi observar a variação de temperatura do conector exposto à radiação infravermelha, estando ele à temperatura ambiente ou aquecido devido

ao efeito Joule. Semelhante aos resultados obtidos em campo, foi observada uma considerável elevação da temperatura do conector em função da radiação absorvida.

O gráfico da Figura 4.50 mostra os resultados, sem corrente aplicada e com a temperatura inicial do conector igual à temperatura ambiente, 17 °C. Após a aplicação da radiação infravermelha, a temperatura alcançou 41 °C, resultando em um acréscimo de temperatura de 24 °C.

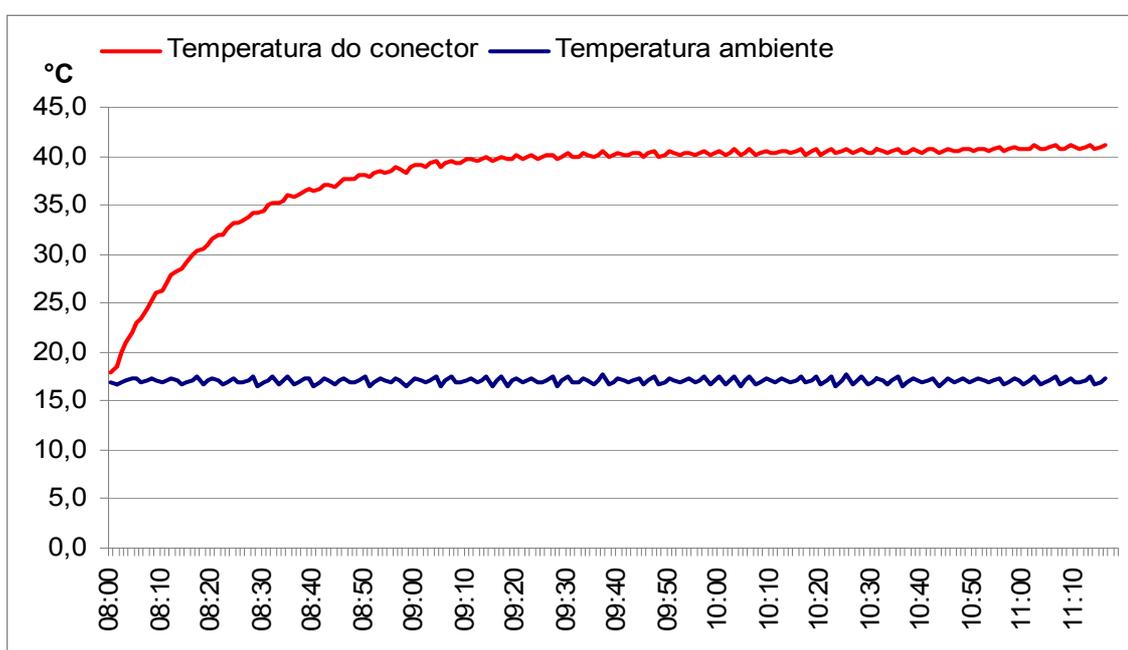


Figura 4.50 – Variação da temperatura do conector sob radiação infravermelha e sem corrente aplicada.

Nos resultados apresentados na Figura 4.51, antes de aplicar a radiação infravermelha, o conector foi submetido a uma corrente de 500 A por um período suficiente para que sua temperatura se estabilizasse. A temperatura de estabilização ficou próxima dos 41 °C. Após a estabilização, o conector foi submetido à mesma intensidade de radiação infravermelha do ensaio anterior. A temperatura final do conector alcançou 64 °C, resultando em um acréscimo de 23 °C sobre a temperatura inicial, praticamente a mesma do ensaio sem corrente aplicada.

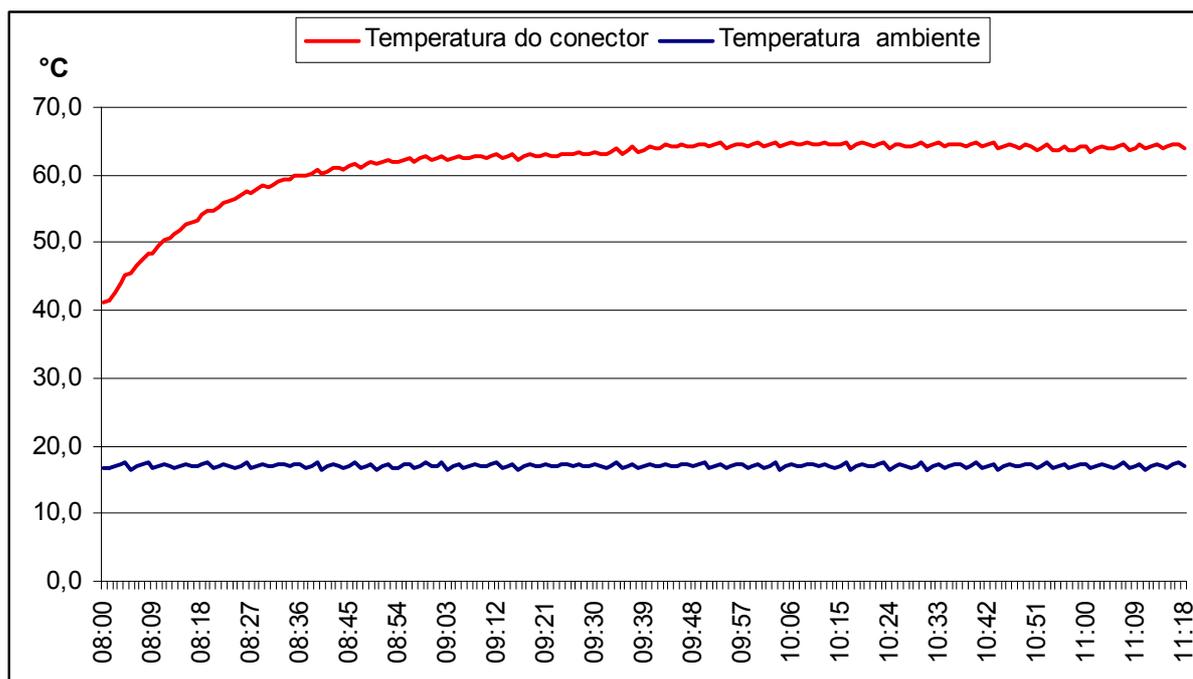


Figura 4.51 – Variação da temperatura do conector sob radiação infravermelha e corrente de 500 A.

Esses resultados mostram que o carregamento solar provoca aproximadamente o mesmo aumento de temperatura no conector, independente de sua temperatura em função da corrente. Essa observação é importante, pois em uma análise, em que se deseja avaliar apenas a temperatura devido à corrente, pode-se medir a elevação da temperatura ocasionada pelo carregamento solar e subtraí-la do valor total.

É importante lembrar que a medição da elevação de temperatura, devido ao carregamento solar, deve ser realizada em um componente do mesmo tipo, que esteja em condição de emissividade similar e sob a mesma incidência de radiação solar do componente analisado.

4.2.3.2. Variação da temperatura ambiente

Neste ensaio a finalidade foi observar a variação da temperatura do conector em função da temperatura ambiente.

Em uma primeira etapa, a variação de temperatura foi medida sem a aplicação de corrente no conector. O esperado seria o conector alcançar a

temperatura ambiente depois de um período necessário para entrar em equilíbrio térmico com o ambiente, mas como pode ser visto no gráfico da Figura 4.52, a temperatura do conector se igualou à ambiente apenas na temperatura de 20 °C. Isto pode ser explicado pelo fato do ensaio ter sido realizado com o conector ligado aos cabos ACSR e parte deles estar fora da câmara de testes a uma temperatura de aproximadamente 20 °C. Com a diferença das temperaturas interna e externa à câmara, houve um fluxo de calor, ora de dentro para fora (temperatura interna maior do que a externa), ora de fora para dentro (temperatura interna menor do que a interna). Esse fluxo de calor fez com que a temperatura do conector se estabilizasse em um valor diferente da temperatura ambiente interna.

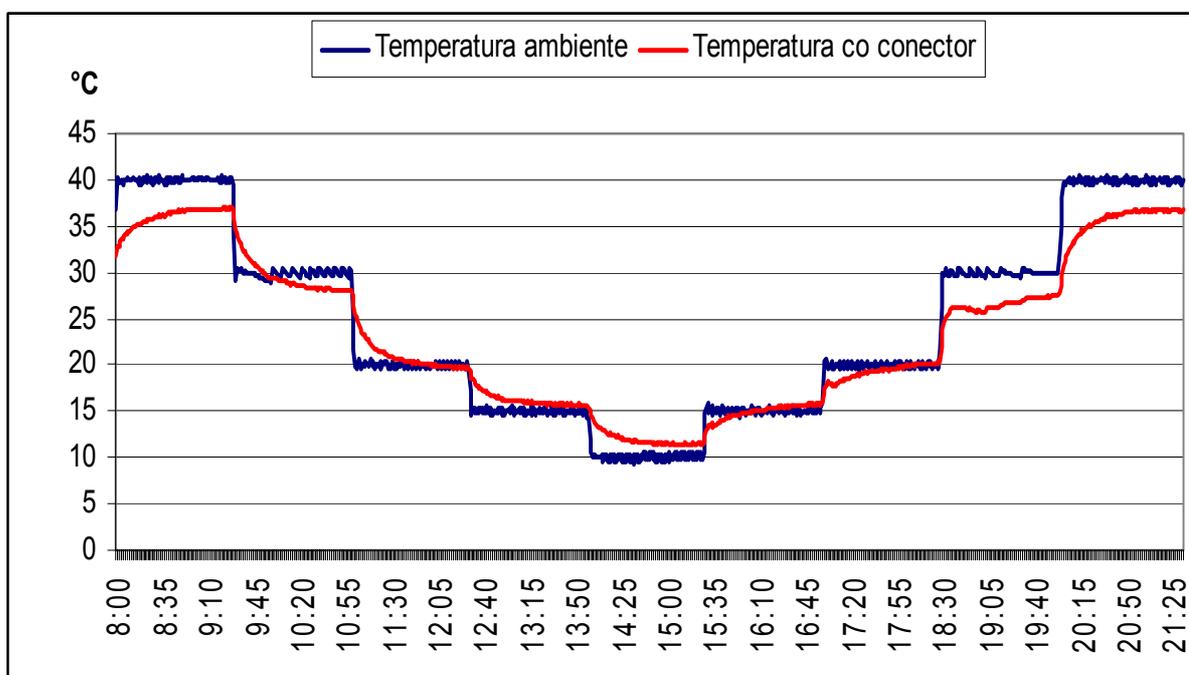


Figura 4.52 – Variação da temperatura do conector em função da variação da temperatura ambiente (corrente nula).

Em uma segunda etapa, a variação de temperatura do conector foi medida com a aplicação de uma corrente de 200 A. Nesse caso é possível observar a influência direta da temperatura ambiente na variação de temperatura do conector, Figura 4.53.

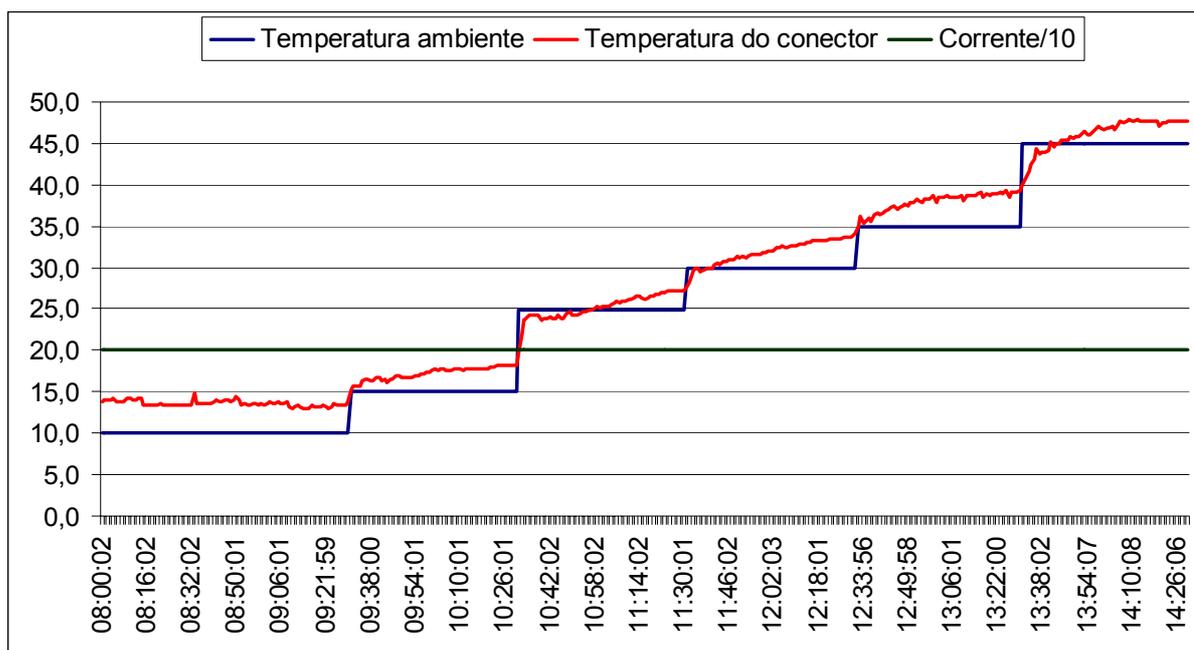


Figura 4.53 – Variação da temperatura do conector em função da variação da temperatura ambiente (corrente 200 A)

4.2.3.3. Variação da corrente de carga

Vários ensaios para verificar a influência da corrente de carga foram realizados. Foram experimentadas variações de torque e limpeza do conector para conseguir a variação da resistência de contato e aplicada corrente de modo contínuo e variável para observar o comportamento da temperatura em função da resistência.

A seguir são apresentados dois importantes ensaios para verificar o comportamento da temperatura no conector, um com diferentes amplitudes de corrente, mas com tempo de estabilização em cada nível e outro com corrente variável.

No primeiro ensaio a temperatura interna da câmara foi mantida em 20 °C. Foi utilizado um conector novo, escovado, com pasta antioxidante e torque correto.

Foram aplicadas correntes em amplitudes crescentes, sendo que, para cada amplitude, a corrente era mantida por um período de duas horas para se alcançar a estabilização de temperatura. O resultado é mostrado na Figura 4.54 e, como

esperado, ocorreu a variação da temperatura para cada amplitude de corrente aplicada, descrevendo uma curva com comportamento exponencial no tempo.

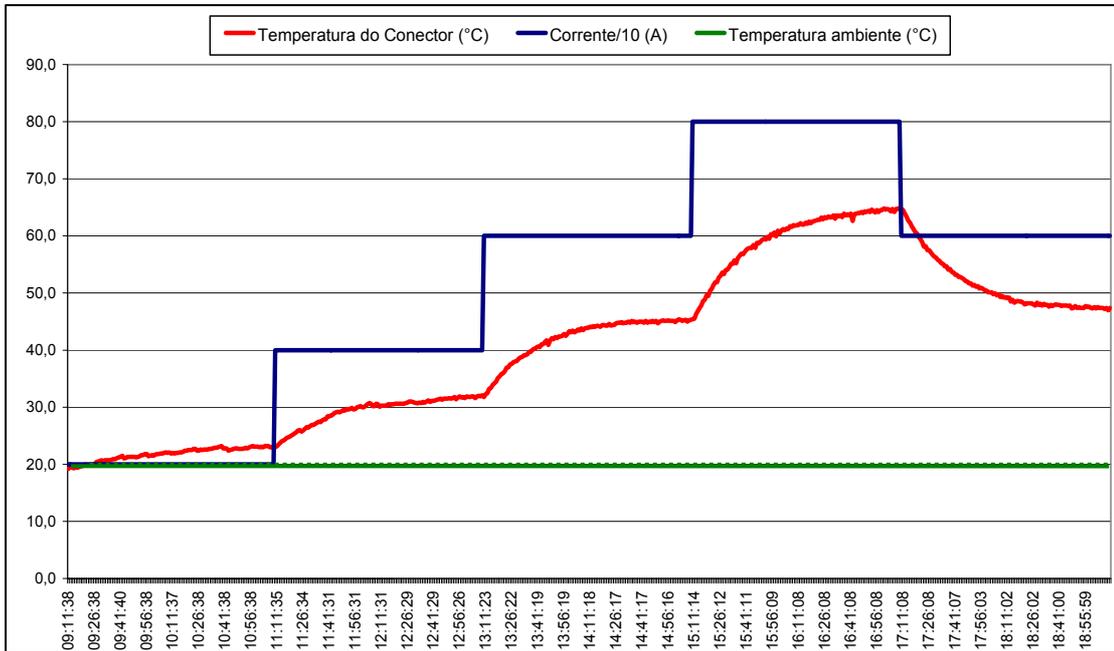


Figura 4.54 – Temperatura e degraus de corrente no tempo.

Com o objetivo de simular as condições de variação de carga encontradas no sistema elétrico (Figura 4.55), outro ensaio foi realizado sob a mesma temperatura ambiente e com o conector nas mesmas condições, mas com uma corrente de amplitude variável e por um tempo de aproximadamente 20 minutos, sem esperar a estabilização da temperatura. A Figura 4.56 mostra o resultado obtido.

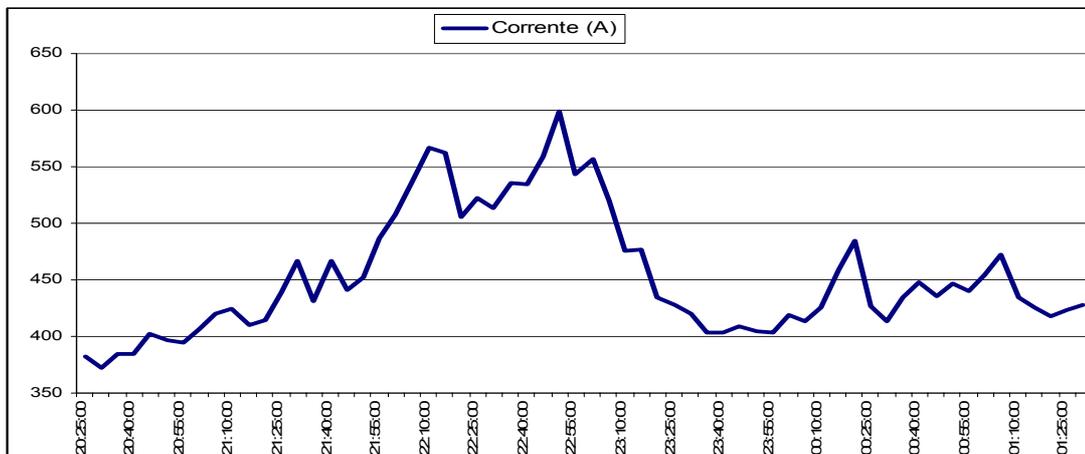


Figura 4.55 – Corrente em circuito da subestação de Poços de Caldas, 345 kV- Eletrobras Furnas

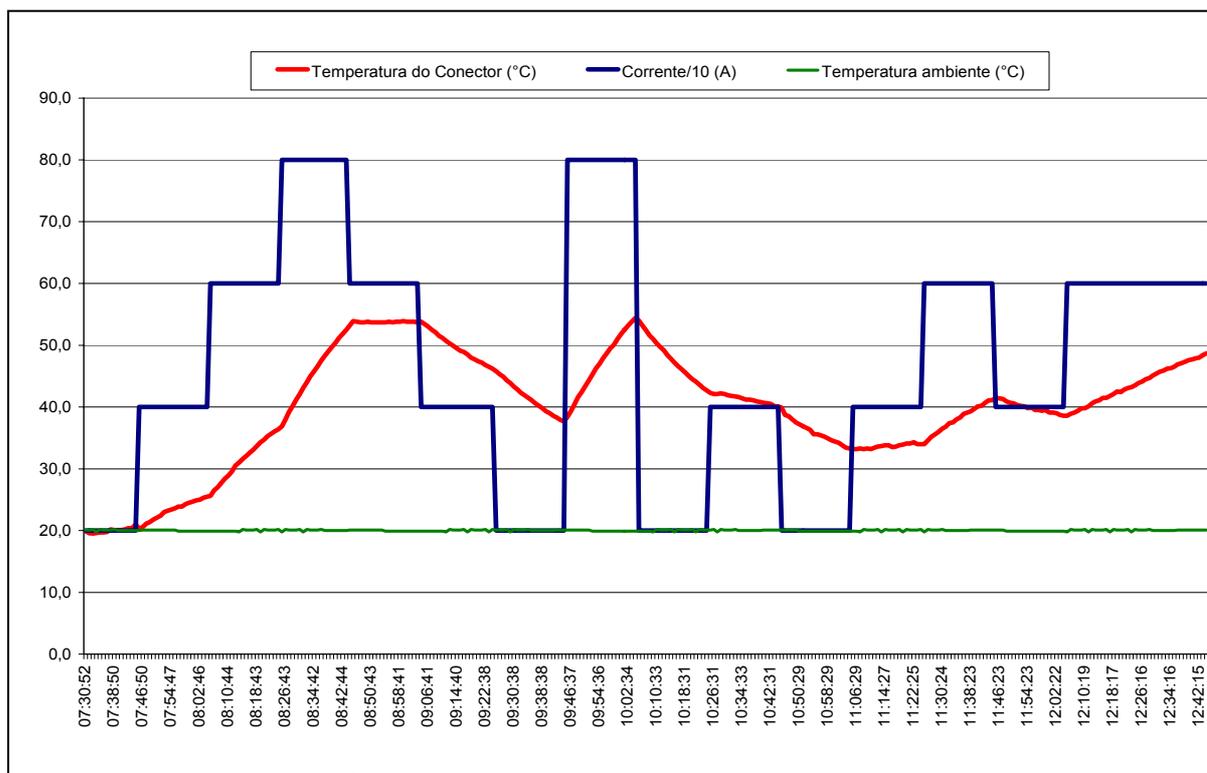


Figura 4.56 – Corrente e temperatura no tempo.

Os resultados obtidos nesses ensaios são novamente discutidos e utilizados, no Capítulo 5, para a modelagem da influência da corrente de carga.

4.2.3.4. Variação da velocidade do vento

Para a verificação dos efeitos do vento sobre a temperatura do conector foram realizados vários ensaios. Três deles são apresentados em separado nos gráficos das Figuras 4.57, 4.58 e 4.59. No gráfico da Figura 4.60 todos os ensaios de vento são apresentados simultaneamente.

No primeiro ensaio a corrente do conector foi fixada em 600 A. Diferentes velocidades do vento foram aplicadas ao conector. A cada velocidade, o vento foi mantido durante 1 hora e desligado por 1 hora e 20 minutos para que a temperatura retornasse à temperatura inicial (sem vento e corrente de 600A). A temperatura interna da câmara foi mantida em 20 °C.

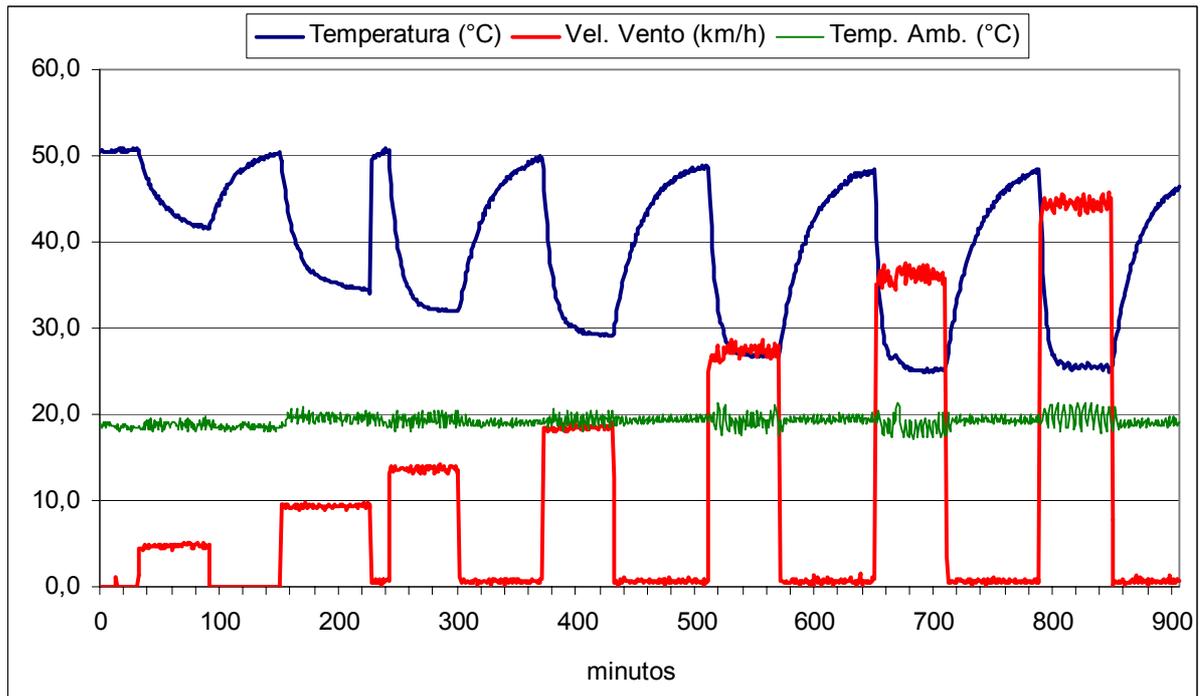


Figura 4.57 – Variação da velocidade do vento e da temperatura do conector no tempo (corrente constante = 600 A e com intervalos de desligamento do soprador).

Em uma análise rápida do gráfico da Figura 4.57, observa-se a forte influência do vento sobre a temperatura do conector, chegando neste caso, a uma queda de 25 °C, ou seja, 50% da temperatura com vento nulo.

Analisando a diferença entre a temperatura do conector e a temperatura ambiente, têm-se uma queda de 25 °C para 5 °C ($\Delta\theta$). A temperatura do conector tende a chegar próxima da temperatura ambiente para ventos mais fortes. Acima de 35 km/h, a variação na temperatura do conector é praticamente nula.

Outra observação importante é que com uma velocidade de vento considerada baixa (10 km/h), a queda de temperatura no conector já é importante, ficando em torno de 16 °C, ou seja, 32% da temperatura com vento nulo.

O próximo ensaio é semelhante ao anterior, com a diferença de que na variação de velocidade do vento não houve o desligamento do soprador para que a temperatura do conector retornasse à situação de vento nulo. A corrente aplicada no conector foi de 600 A e a temperatura interna da câmara foi mantida em 20 °C.

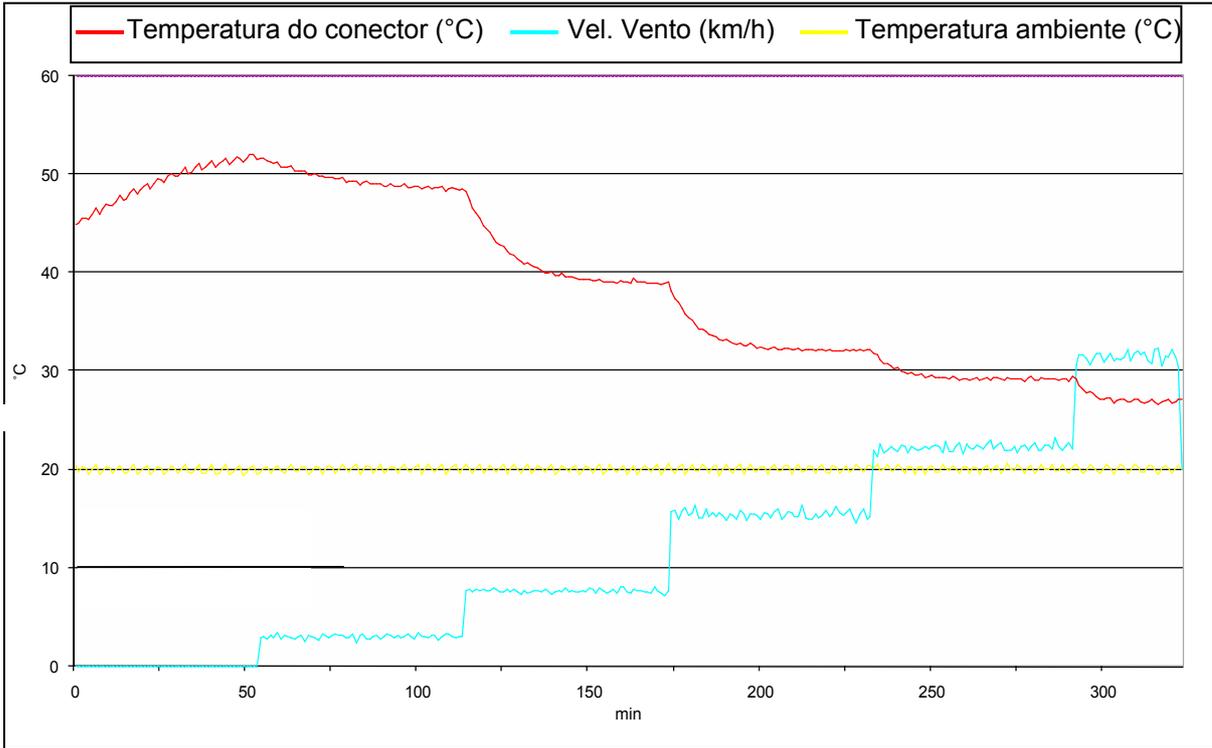


Figura 4.58 – Variação da velocidade do vento e da temperatura do conector no tempo (Corrente constante = 600 A e sem o desligamento do soprador)

O ensaio seguinte foi realizado com uma corrente de 400 A e temperatura interna à câmara de 20 °C. A velocidade do vento foi aplicada em degraus crescentes e decrescentes .

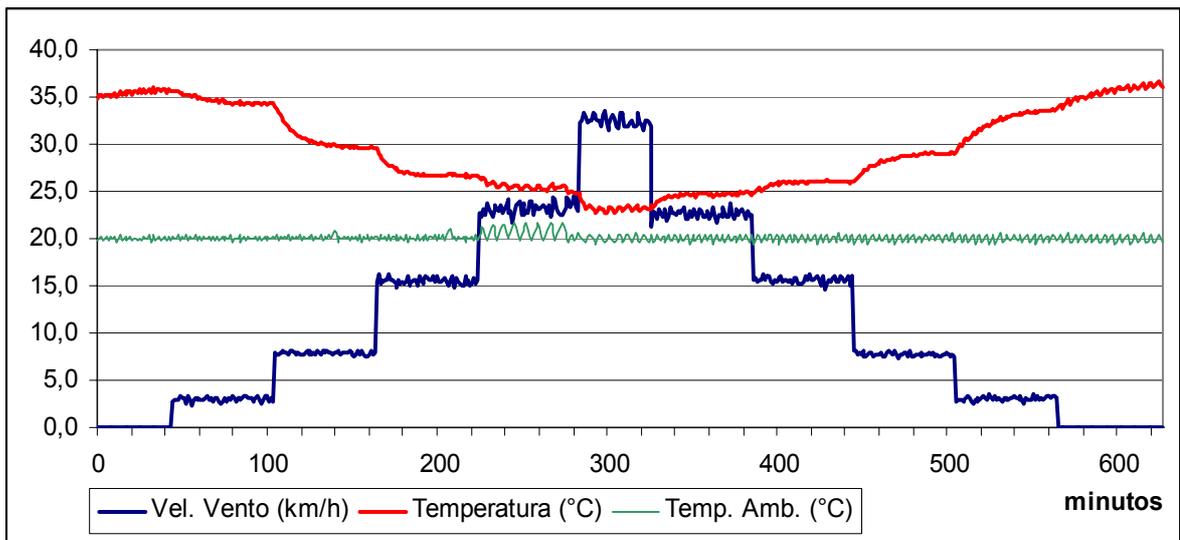


Figura 4.59 – Variação da velocidade do vento e temperatura no tempo (corrente constante = 400 A)

O gráfico da Figura 4.60 apresenta simultaneamente os vários ensaios realizados.

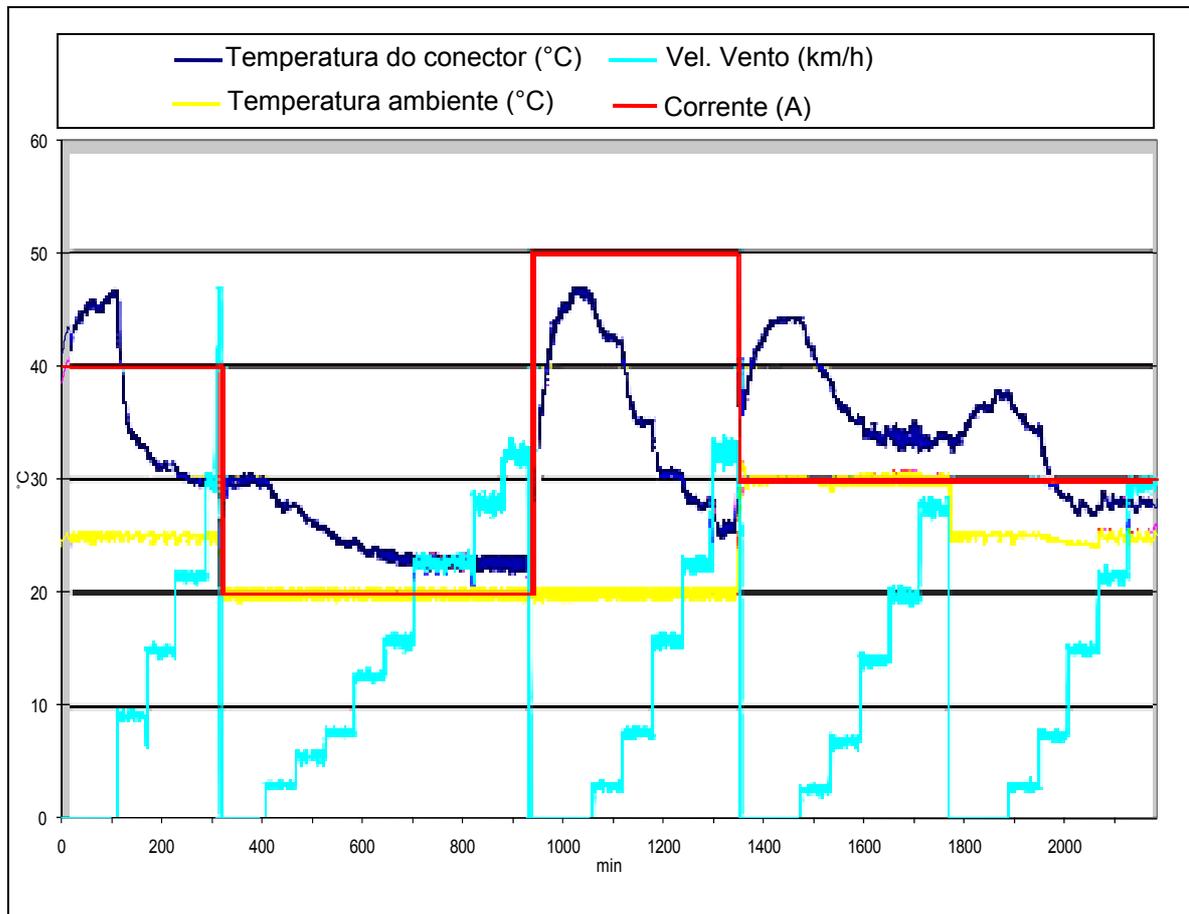


Figura 4.60 – Variação da velocidade do vento, temperatura ambiente e corrente no tempo.

5. MODELAGEM MATEMÁTICA DE FATORES DE INFLUÊNCIA

Em meio às influências discutidas e verificadas nos capítulos anteriores, duas foram selecionadas, para o desenvolvimento matemático, por exercerem forte efeito sobre os resultados:

- Corrente de carga
- Velocidade do vento

5.1. Modelagem da Influência da Corrente de Carga

É bem conhecido que a temperatura de um conector é proporcional ao quadrado de sua corrente de operação. Com o objetivo de avaliar sua condição operacional, é desejável conhecer sua temperatura quando estiver operando sob a corrente nominal. Porém, essa condição nem sempre é alcançada durante as inspeções em campo. Assim sendo, o procedimento, geralmente utilizado pela maioria dos termografistas, é medir a temperatura, devido à corrente do momento da inspeção e, através da Equação 5.1, estimar a elevação de temperatura para o momento da passagem da máxima corrente. A partir da temperatura estimada é realizada a análise do conector.

$$\Delta\theta_2 = \Delta\theta_1 \cdot \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 \quad (5.1)$$

Onde,

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

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

I_2 (A) é a corrente de carga máxima;

I_1 (A) é a corrente de carga no momento da inspeção.

Para provar que o procedimento descrito anteriormente, não é adequado para um sistema elétrico com carga variável, um teste foi realizado empregando a câmara de testes desenvolvida. Uma corrente de carga com valores variáveis foi aplicada a um conector em teste e a temperatura foi medida em instantes diferentes, mas com o mesmo valor de corrente. Os dados obtidos são apresentados na Figura 5.1.

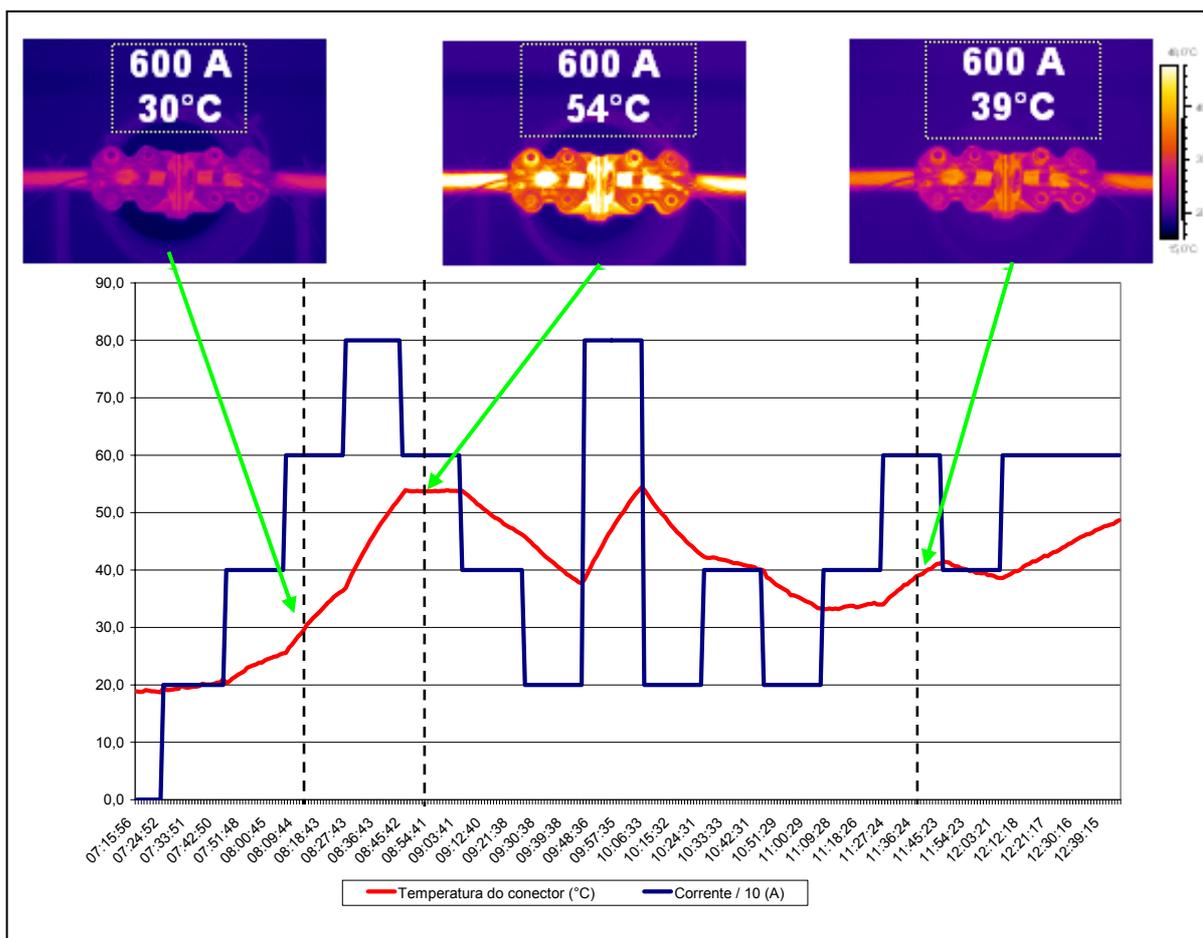


Figura 5.1 – Termogramas, corrente de carga e temperatura de um conector em teste

Nota-se, na Figura 5.1, que nos três instantes, nos quais os termogramas foram capturados, apesar da corrente no conector ser de mesmo valor e igual a 600 A, as temperaturas medidas eram diferentes: 30 °C, 54 °C e 39 °C.

Se aplicada a Equação 5.1 para se estimar a elevação de temperatura para a corrente de 800 A, os resultados encontrados seriam 17,7 °C, 60,4 °C e 33,7 °C, respectivamente. Nenhum dos valores iguais a 51,9 °C, o qual é valor correto encontrado em laboratório, cujo resultado é mostrado no gráfico da Figura 5.2.

Sabe-se que esta técnica pode ser aplicada para correntes constantes, nunca em situações com corrente variável, fato comum no sistema elétrico, principalmente em subestações de alta tensão.

De modo a superar as limitações deste método, dois modelos de temperatura foram ajustados para estimar a temperatura para a corrente máxima, como será apresentado a seguir.

5.1.1. Desenvolvimento de Modelo Térmico

Encontrar um modelo térmico preciso é uma tarefa complexa. Apesar disso, um modelo térmico simples pode ser construído assumindo-se que a elevação de temperatura é uma função do quadrado da corrente de operação e que a elevação de temperatura sobre a temperatura ambiente é a principal variável associada à troca de calor.

Por esta razão, considerando o objeto em análise como um corpo homogêneo, a elevação de temperatura sobre a temperatura ambiente em um período de tempo é o resultado da soma de dois componentes. Um componente incremental relacionado ao presente período de carga e um componente decremental da temperatura final do período anterior:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_F \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + \Delta\theta_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (5.2)$$

Onde:

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

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

$\Delta\theta_0$ (°C) é a elevação de temperatura final do período anterior;

t (s) é a duração do período estudado;

τ (s) é a constante de tempo de aquecimento.

Este modelo foi aplicado para identificar as características térmicas do componente, por exemplo, sua constante de tempo de aquecimento e dependência da elevação de temperatura com o quadrado da corrente de operação. Um teste foi realizado em laboratório utilizando a câmara de testes.

Neste caso, apenas a corrente de operação foi objeto de variação, mantendo constantes as outras variáveis. A Figura 5.2 apresenta os resultados gráficos da corrente aplicada com as respectivas temperaturas obtidas.

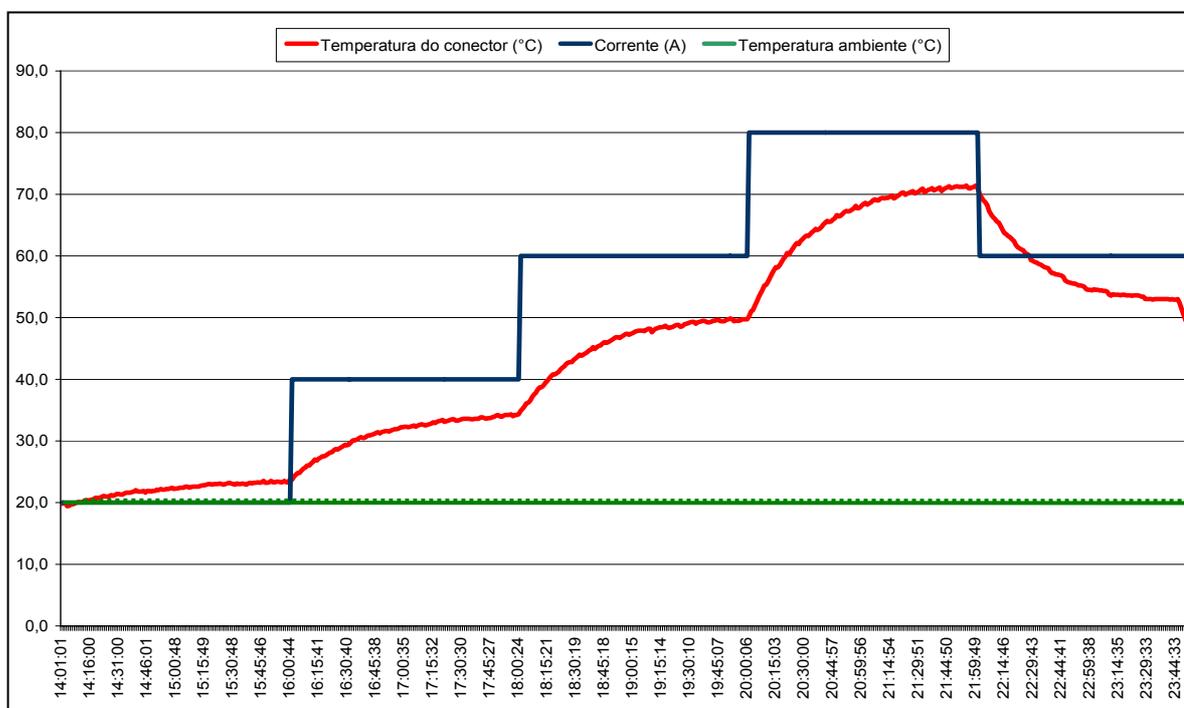


Figura 5.2 – Degraus de corrente aplicados em laboratório

Por inspeção e empregando o algoritmo dos mínimos quadrados, é possível se obter a constante de tempo dos conectores em análise.

A elevação final de temperatura para cada corrente aplicada é mostrada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Características térmicas do conector

I (A)	$\Delta\theta_F$ (°C)	τ (min.)
200	4,70	39,1
400	15,2	36,7
600	30,6	33,5
800	51,9	33,9

Estes resultados permitem obter duas equações lineares que descrevem a dependência da elevação final de temperatura com o quadrado da corrente aplicada. A primeira, Equação 5.2, sem intercepto, mais aderente à realidade, com coeficiente de correlação $R^2 = 0,99401$ e a segunda, Equação 5.3, com intercepto, porém com um maior coeficiente de correlação ($R^2 = 0,99937$).

$$\Delta\theta_F = 0,8272 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 \quad (5.2)$$

$$\Delta\theta_F = 2,152 + 0,781 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 \quad (5.3)$$

Estas expressões são de grande importância, dado que apresentam a elevação máxima de temperatura para qualquer corrente aplicada neste componente.

5.1.2. Modelo Autorregressivo

Apesar de o método anterior permitir o conhecimento da elevação final de temperatura para qualquer corrente aplicada no componente em teste, ele não é útil para propostas práticas, dado que a corrente varia de acordo com a carga do sistema.

Para estas situações, outro modelo é proposto, o modelo autorregressivo. A ideia por trás desse modelo é que, negligenciando a influência atmosférica, a elevação atual de temperatura não é só função da corrente atual, mas é também influenciada por correntes do passado, como apresentada na Equação 5.4.

$$\Delta\theta_t = a_0 \cdot I_{t_0 \cdot \Delta t}^2 + a_1 \cdot I_{t_1 \cdot \Delta t}^2 + \dots + a_n \cdot I_{t_n \cdot \Delta t}^2 \quad (5.4)$$

Em uma forma geral:

$$\Delta\theta_t = \sum_{i=0}^n a_i \cdot I_{t_i \cdot \Delta t}^2 \quad (5.5)$$

Onde:

$\Delta\theta_t$ (°C) é a elevação de temperatura no instante t (s);

a_i (°C/A²) são coeficientes constantes obtidos pelo algoritmo dos mínimos quadrados;

I (A) é a corrente de operação no período $ti \cdot \Delta t$.

O modelo é adequado para se determinar a elevação de temperatura para qualquer corrente, mesmo com variação em períodos anteriores. Porém, considerando-se que a corrente de carga é constante e igual a corrente de interesse, a elevação final de temperatura para uma dada corrente I , é dada por:

$$\Delta\theta_F = I^2 \cdot \sum_{i=0}^n a_i \quad (5.6)$$

A definição correta do intervalo de tempo (Δt) e do número de intervalos anteriores (n) merece algumas considerações e depende dos dados disponíveis e da constante de tempo do dispositivo em análise.

A constante de tempo depende não só da massa do corpo e material, mas também onde o aquecimento é gerado. Dado que câmeras de infravermelho detectam a radiação baseadas na temperatura e emissividade da superfície, se o aquecimento é gerado internamente, o tempo necessário para se ter a informação térmica se torna maior. Por outro lado, o calor gerado na superfície irá resultar em

uma menor constante de tempo. Após alguns testes, nota-se que três intervalos dentro do período de uma constante de tempo são suficientes para se obter resultados confiáveis.

5.1.3. Aplicação da Metodologia

A Figura 5.3 apresenta o comportamento da corrente e da temperatura durante os testes em laboratório. Os dados foram coletados com um intervalo de um minuto durante aproximadamente cinco horas.

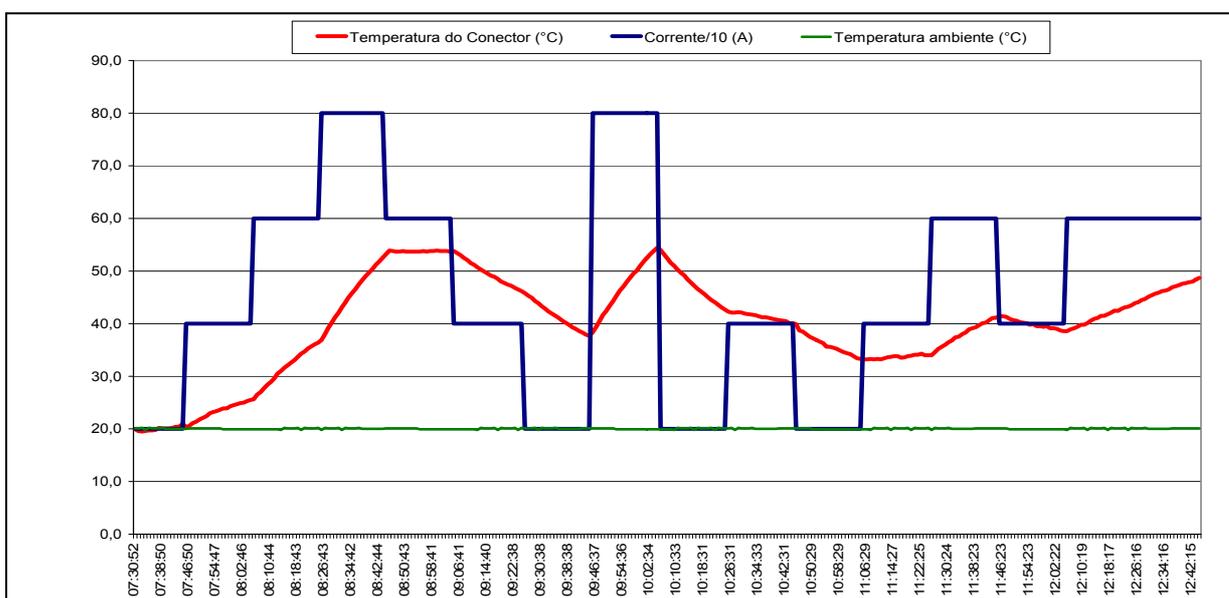


Figura 5.3 – Corrente e temperatura durante os testes em laboratório

Dado que a constante de tempo de aquecimento média do dispositivo estudado é de 35,8 minutos, dois modelos autorregressivos foram testados considerando 6 e 3 intervalos passados. O primeiro modelo considera correntes passadas de 60 minutos (quase o dobro da constante de tempo de aquecimento) e o outro, leva em consideração, correntes passadas de 30 minutos. Os coeficientes encontrados são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Coeficientes determinados para os modelos autorregressivos (ensaio de laboratório)

Modelo	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	Σa
6x10	0,0439	0,1847	0,1851	0,0986	0,146	0,0457	0,1439	0,8479
3x10	0,2356	0,2120	0,1037	0,2371	-	-	-	0,7884

A Tabela 5.3 apresenta uma comparação da elevação final de temperatura de acordo com os modelos estudados, enquanto que a Figura 5.4 apresenta as temperaturas observadas e estimadas.

Tabela 5.3 – Comparação de elevação final de temperatura

Corrente (A)	Elevação de temperatura final (°C)			
	Modelo Térmico		Modelo AR 6x10	Modelo AR 3x10
	Com intercepto	Sem intercepto		
200	5,28	3,31	3,39	3,15
400	14,65	13,23	13,5	12,6
600	30,27	29,78	30,5	28,4
800	52,14	52,94	54,2	50,5

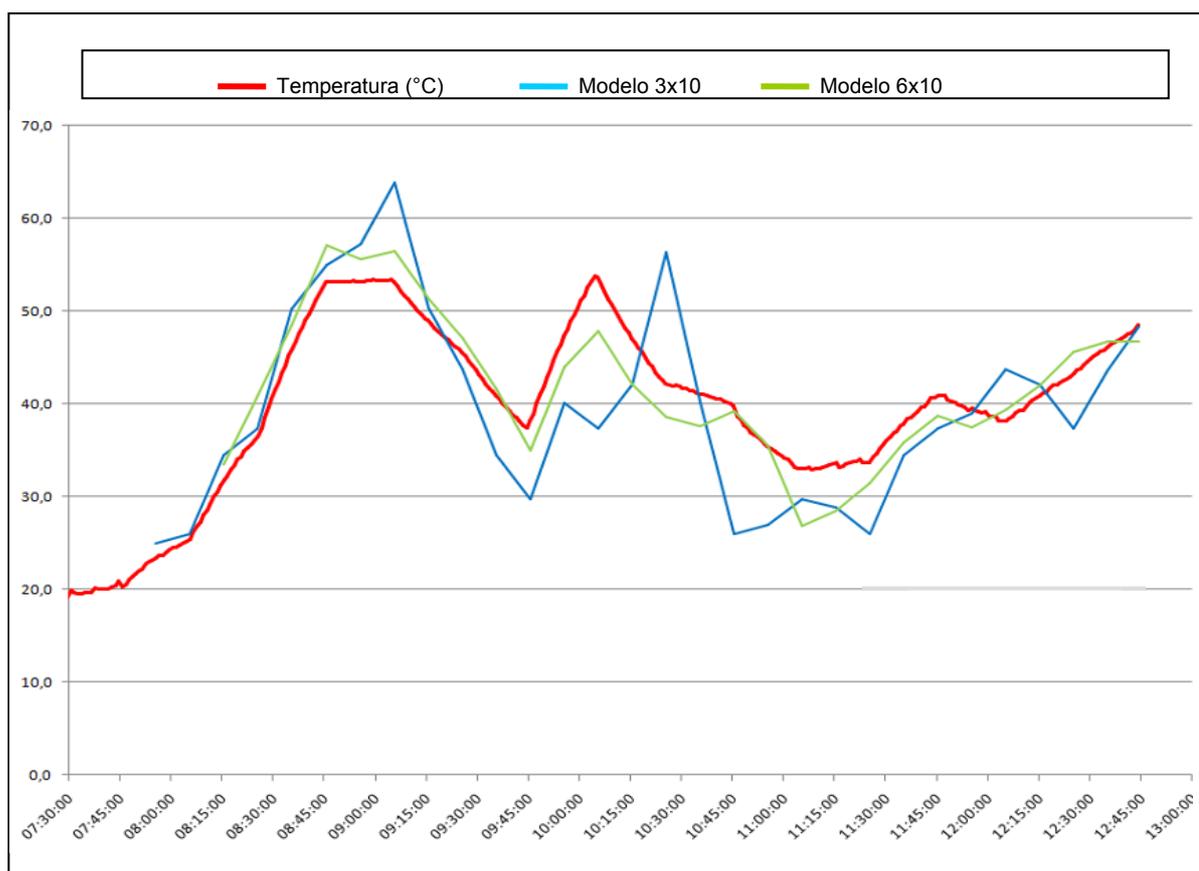


Figura 5.4 – Temperaturas observadas e estimadas

Esta mesma metodologia foi aplicada para dados obtidos em campo, representando uma situação real.

Uma inspeção foi realizada na subestação de alta tensão de FURNAS, em Poços de Caldas. Informações sobre a corrente de carga, temperaturas ambiente e da conexão, radiação solar e velocidade do vento, foram adquiridas simultaneamente, durante aproximadamente 36 horas, em intervalos de 5 minutos. Os resultados são apresentados na Figura 5.5.

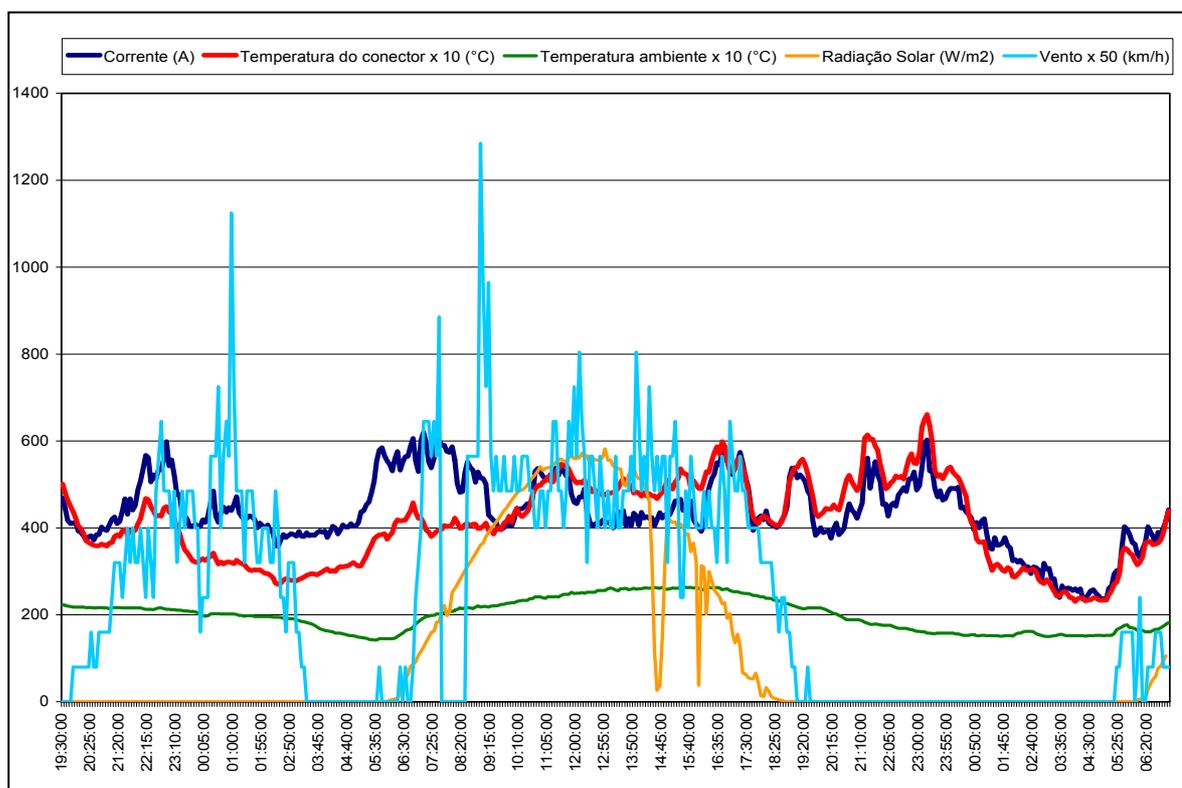


Figura 5.5 – Registro de dados obtidos em campo

Modelos autorregressivos 1x30, 2x30 e 4x30 foram aplicados às informações de temperatura e corrente no intervalo entre 20:00 e 5:00 horas, onde a radiação solar e velocidade do vento apresentados tiveram pouca influência sobre a temperatura da conexão. A Tabela 5.4 apresenta os coeficientes dos modelos determinados.

Tabela 5.4 – Coeficientes determinados para os modelos autorregressivos (ensaio de campo)

Modelo	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	Σa
1x30	0,3813	1,0934	-	-	-	1,4747
2x30	0,1872	0,1733	1,1186	-	-	1,4791
4x30	0,0955	-0,0927	0,1417	-0,0394	1,3733	1,4784

Nota-se que a soma dos coeficientes dos modelos autorregressivos apresentam um valor médio de 1,477. Assim, a elevação final de temperatura para qualquer corrente pode ser obtida pela multiplicação desta constante pelo quadrado da corrente dada. A comparação da elevação de temperatura estimada dos modelos com as temperaturas medidas é apresentada na Figura 5.6.

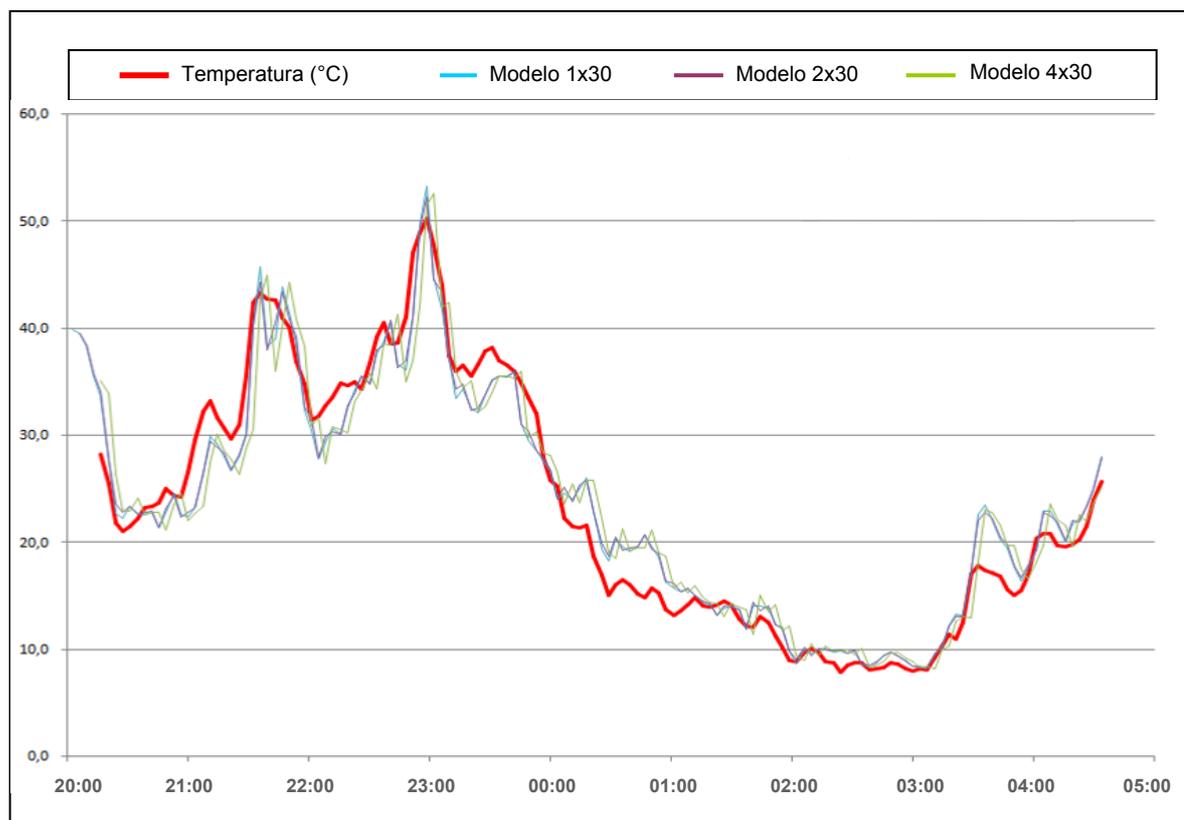


Figura 5.6 – Elevação de temperatura observada e estimada das 20 às 5 horas

5.2. Modelagem da Influência do Vento

Nas seções anteriores foi desenvolvido e apresentado um modelo para determinação da elevação de temperatura de um componente elétrico em relação à temperatura ambiente. Essa elevação guarda, basicamente, uma relação quadrática com a corrente de carga, e varia com o tempo, segundo a constante de tempo do próprio componente.

Por outro lado, sabe-se que esta elevação de temperatura também é influenciada por outras variáveis, notadamente as atmosféricas, tais como vento, radiação solar, umidade e outras.

Existem vários modelos para previsão e correção da influência do vento sobre a temperatura superficial de um corpo. Entretanto, propõe-se aqui um modelo mais adequado aos equipamentos elétricos de uma subestação, o qual considera que o vento impõe uma redução à elevação de temperatura final devido à condição de carga. Essa redução é expressa através de um Fator de Redução (F_R) dado pela Equação 5.7.

$$F_R = \frac{\Delta\theta|_{v=v}}{\Delta\theta|_{v=0}} = 1 - k \cdot \left(1 - e^{-\frac{v}{V}}\right) \quad (5.7)$$

Onde:

k e V são coeficientes determinados para cada componente;

v (km/h) é a velocidade do vento.

É importante salientar que os coeficientes k e V também possuem interpretações físicas. O coeficiente k expressa a máxima redução possível de ser imposta pelo vento. Observa-se que há uma saturação na redução de temperatura, mesmo para os ventos mais fortes. Esta característica é expressa pelo coeficiente k , como ilustrado na Figura 5.7.

Por outro lado, o parâmetro V está relacionado ao grau de influência de uma determinada intensidade de vento sobre a temperatura final a ser atingida pelo elemento sob observação, de maneira homogênea, em equilíbrio térmico. Fazendo-se uma analogia com um sistema dinâmico de primeira ordem, esta constante poderia ser chamada “constante de velocidade”.

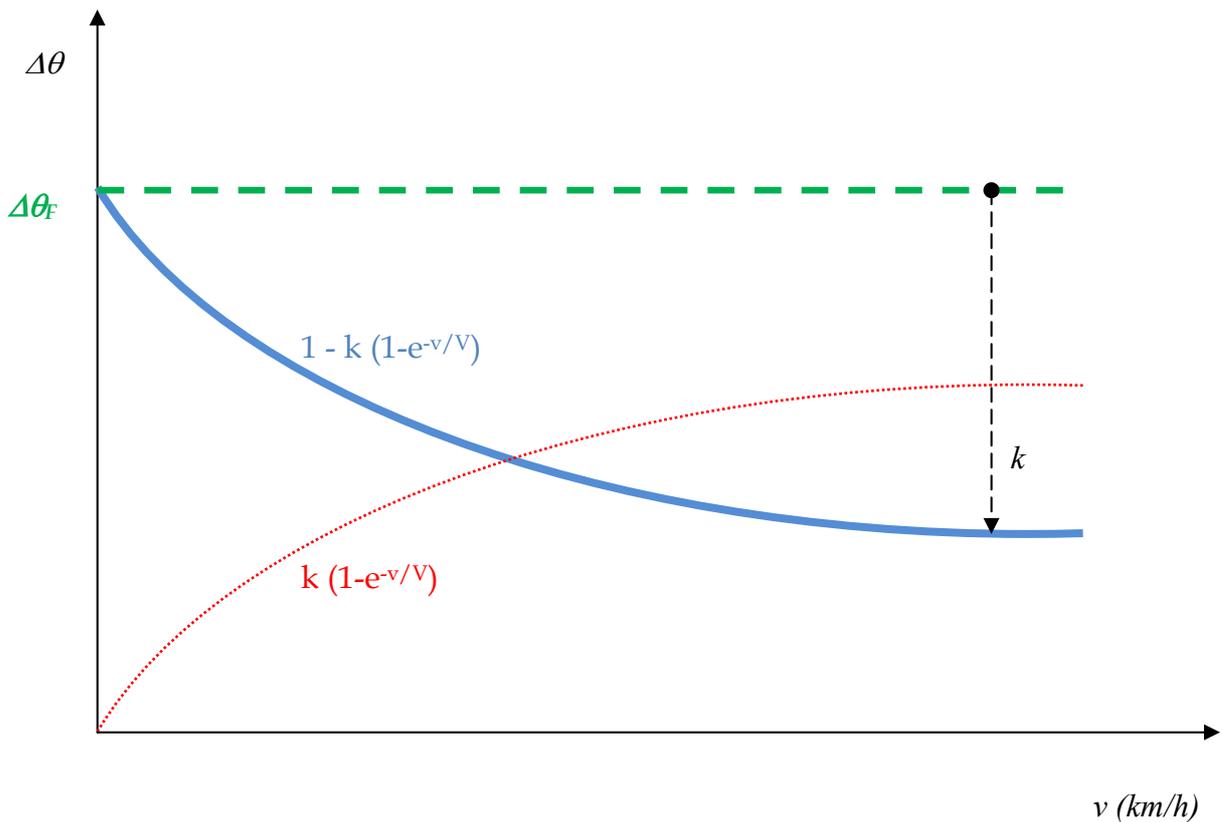


Figura 5.7 – Interpretação física dos coeficientes do modelo vento-temperatura.

A determinação do parâmetro k pode ser realizada, pelo menos, de três maneiras. A primeira, baseada na relação entre as temperaturas a vento nulo e a vento com velocidade limite, como mostra a Equação 5.8. Considera-se aqui, velocidade limite como sendo aquela necessária para obter-se saturação na redução de temperatura. Nada impede, entretanto, que o objeto sob estudo esteja sujeito a velocidades de vento maiores do que esta.

$$k = 1 - \frac{\Delta\theta|_{v=v_{lim}}}{\Delta\theta|_{v=0}} \quad (5.8)$$

O segundo método se baseia na teoria de transferência de calor por convecção. Sabe-se que o calor transferido por convecção, na unidade de tempo, entre uma superfície e um fluido não possui uma equação simples, mas uma aproximação pode ser conseguida através da relação proposta por Isaac Newton e expressa na Equação 5.9.

$$\frac{Q}{\Delta t} = \Gamma \cdot \Delta\theta_{sf} \quad (5.9)$$

Onde:

$\frac{Q}{\Delta t}$ (J/s) é fluxo de calor transferido por convecção;

Γ (J/s.K) é o coeficiente de proporcionalidade por unidade de área;

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

Esta expressão mostra que o fluxo de calor transferido por convecção, é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. Sendo assim, quanto maior a diferença de temperatura para vento nulo, maior será a transferência de calor por convecção e, por isso, maior será a redução relativa de temperatura.

Utilizando-se dados experimentais disponíveis nas publicações técnicas de Frate e outros (2000), Snell e Renowden (2000), Kaplan (1999) e Madding e Bernard (2002), pode-se obter uma relação linear, apresentada na Equação 5.10, para o cálculo do parâmetro k em função da diferença de temperatura observada (calculada) para vento nulo, com coeficiente de correlação 98,85%.

$$k = 3,6402 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta\theta|_{v=0} + 7,4634 \cdot 10^{-1} \quad (5.10)$$

A Figura 5.8 mostra graficamente a relação, entre o fator k e a temperatura para vento nulo.

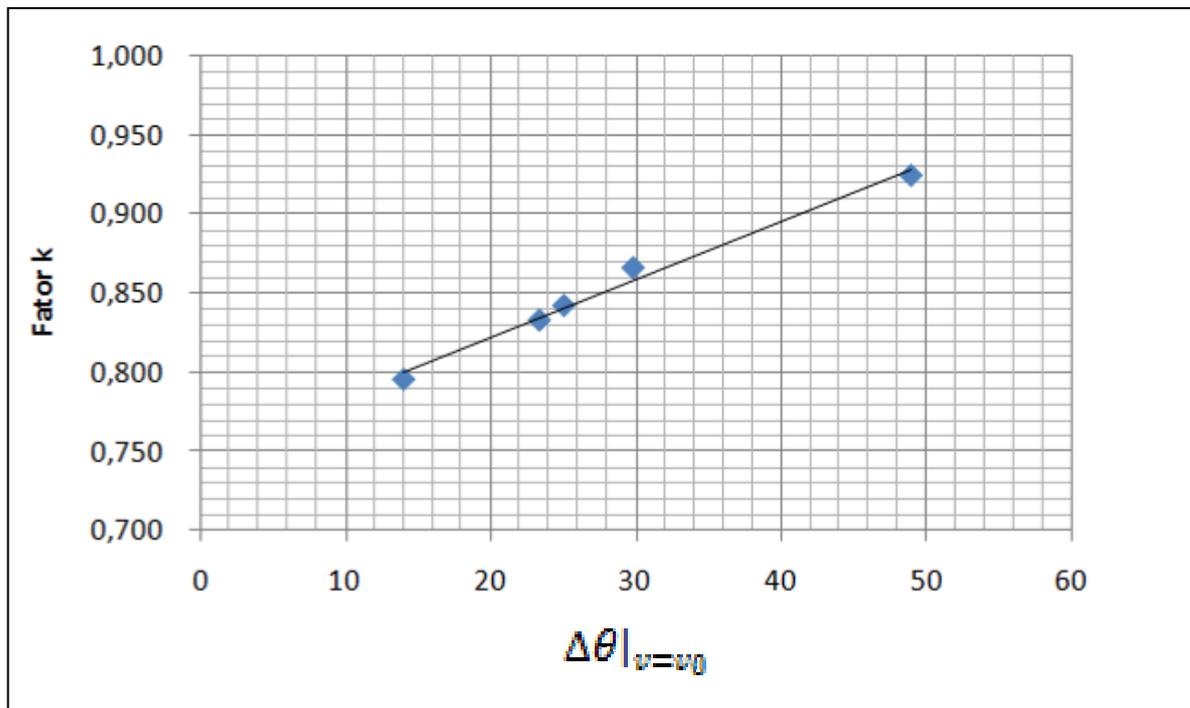


Figura 5.8 – Relação entre o fator k e a temperatura para vento nulo.

Aproveitando-se da analogia da redução de temperatura com um sistema dinâmico de primeira ordem, a constante de velocidade, V , poderá teoricamente ser obtida pela relação entre o impacto de velocidade, isto é, a diferença de velocidade do vento entre dois períodos de tempo, e a taxa de variação de temperatura com o vento, como apresentada na Equação 5.11.

$$V = \frac{\Delta\theta|_{v=v_0+\Delta v} - \Delta\theta|_{v=v_0}}{d\Delta\theta/dv|_{v=v_0}} \quad (5.11)$$

O terceiro procedimento emprega técnicas de identificação de parâmetros e otimização, empregando o método dos mínimos quadrados, utilizada para identificar

parâmetros que conduzam à máxima verossimilhança entre os resultados práticos obtidos em ensaios (ou por outros autores, como será visto a seguir) com os obtidos pelos modelos.

5.2.1. Aplicação da metodologia proposta

A metodologia apresentada foi aplicada a dados obtidos em ensaios na câmara de testes.

A tabela 5.5 mostra que para uma corrente constante e igual a 600 A e uma temperatura ambiente de 20,07 °C, a elevação de temperatura medida, sem vento, foi de 29,74 °C. Os resultados obtidos, com o incremento da velocidade do vento, das elevações de temperatura registrada (R) e calculada (C) também são apresentados, bem como, os erros absolutos entre os resultados, para fins de comparação. Ainda na Tabela 5.5, são mostradas as constantes k, k' e k'' obtidas utilizando os métodos apresentados.

Tabela 5.5 – Resultados para corrente de 600 A.

Vento	T_final	$\Delta\theta$ ®	$\Delta\theta$ ©	e	ΔT_{Vo}	29,74
0,00	49,81	29,74	29,74	0,00	K	0,85
4,74	41,05	20,98	20,49	0,49	V	10,32
9,34	33,85	13,78	14,70	-0,92		
13,67	31,35	11,28	11,12	0,15	K'	0,87
18,46	28,78	8,71	8,54	0,17	V'	10,65
27,26	26,66	6,59	5,98	0,61		
36,03	24,90	4,83	4,86	-0,04	K''	0,87
44,36	24,06	3,99	4,39	-0,40	V''	10,64

A Figura 5.9 mostra graficamente uma comparação entre os resultados obtidos através da metodologia proposta e os resultados dos ensaios. Pode-se observar que os erros são inferiores a 1 °C.

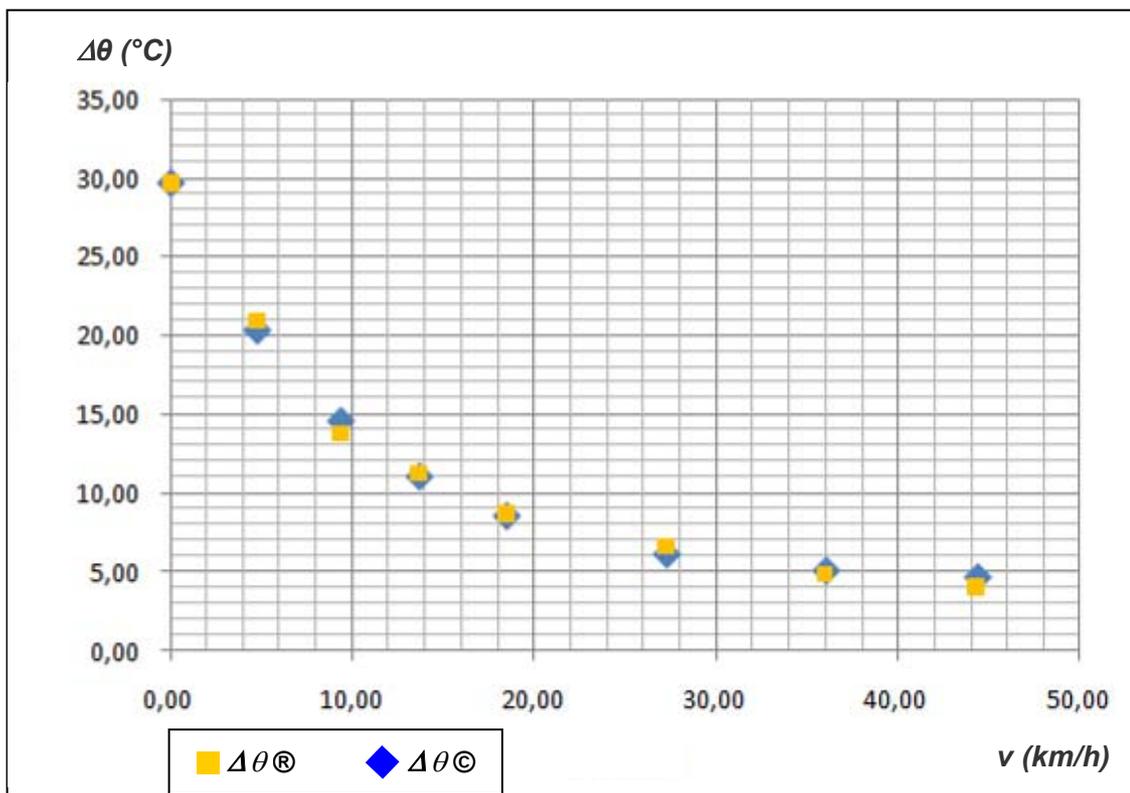


Figura 5.9 – Comparação entre resultados de ensaio ($\Delta\theta^{\text{®}}$) e a metodologia proposta ($\Delta\theta^{\text{©}}$) (600A).

A mesma análise comparativa foi realizada para uma corrente constante de 400 A e uma temperatura ambiente de 20,10 °C. A elevação de temperatura medida, sem vento, foi de 13,99 °C. As elevações de temperatura registrada (R) e calculada (C) são apresentadas na Tabela 5.6, bem como os erros absolutos entre os resultados obtidos. As constantes K, K' e K'' também são apresentadas nesta tabela.

Tabela 5.6 – Resultados para corrente de 400 A.

Vento	T_final	$\Delta\theta^{\text{®}}$	$\Delta\theta^{\text{©}}$	e	ΔT_{Vo}	
0,00	34,06	13,99	13,99	0,00	13,99	
3,00	32,00	11,93	11,75	0,18	K	0,80
7,78	29,19	9,12	9,09	0,03	V	13,43
15,39	26,25	6,18	6,38	-0,20	K'	0,72
23,48	24,89	4,82	4,78	0,04	V'	10,76
32,26	24,00	3,93	3,85	0,08	K''	0,79
					V''	13,25

A Figura 5.10 mostra graficamente uma comparação entre os resultados obtidos através da metodologia proposta e os resultados dos ensaios. Pode-se observar que os erros não são maiores que $\pm 0,2$ °C.

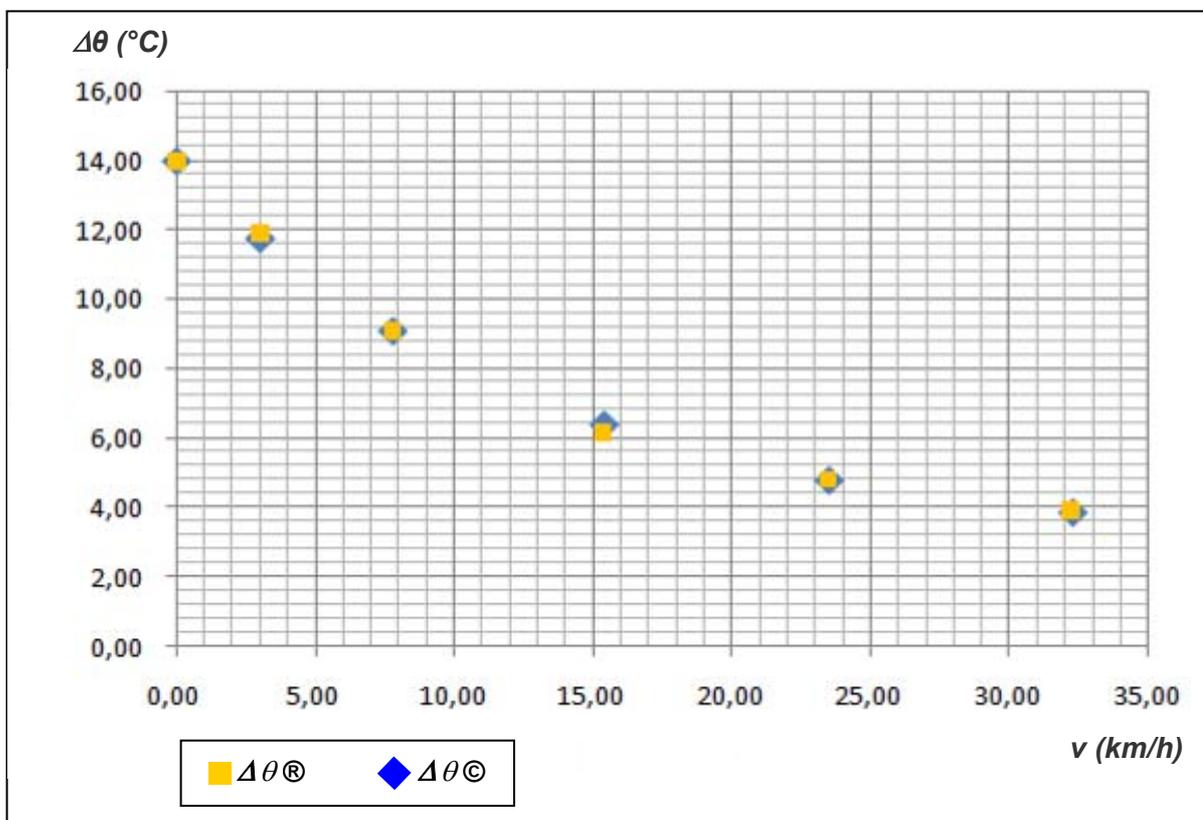


Figura 5.10 – Comparação entre resultados de ensaio ($\Delta\theta^{\text{®}}$) e a metodologia proposta ($\Delta\theta^{\text{©}}$) (400 A).

A fim de consolidar a metodologia proposta, a mesma foi também aplicada a dados disponibilizados em artigos de vários autores.

Frate e outros (2000) apresentam resultados de levantamentos termográficos em uma conexão de linha de transmissão utilizando equipamentos de alta definição.

A Tabela 5.7 mostra os dados apresentados, bem como os resultados da aplicação da metodologia proposta. Observa-se que, neste caso, o maior erro é de 2,25 °C.

A Figura 5.11 mostra graficamente a comparação entre os resultados obtidos através da metodologia proposta e os resultados dos ensaios.

Tabela 5.7 – Análise com dados de Frate e outros (2000).

Vento	T_final	$\Delta\theta^{\text{®}}$	$\Delta\theta^{\text{©}}$	e	$\Delta\theta_{Vo}$	48,86
0	63,86	48,86	48,86	0,00	K	0,92
10	27,51	12,51	13,90	-1,39	V	6,73
20	23,16	8,16	6,02	2,14		
30	21,5	6,5	4,25	2,25	K'	0,92
40	20,33	5,33	3,85	1,48	V'	6,71
50	19,7	4,7	3,76	0,94		
60	19,06	4,06	3,74	0,32	K''	0,90
70	18,73	3,73	3,73	0,00	V''	5,99

Graficamente, tem-se:

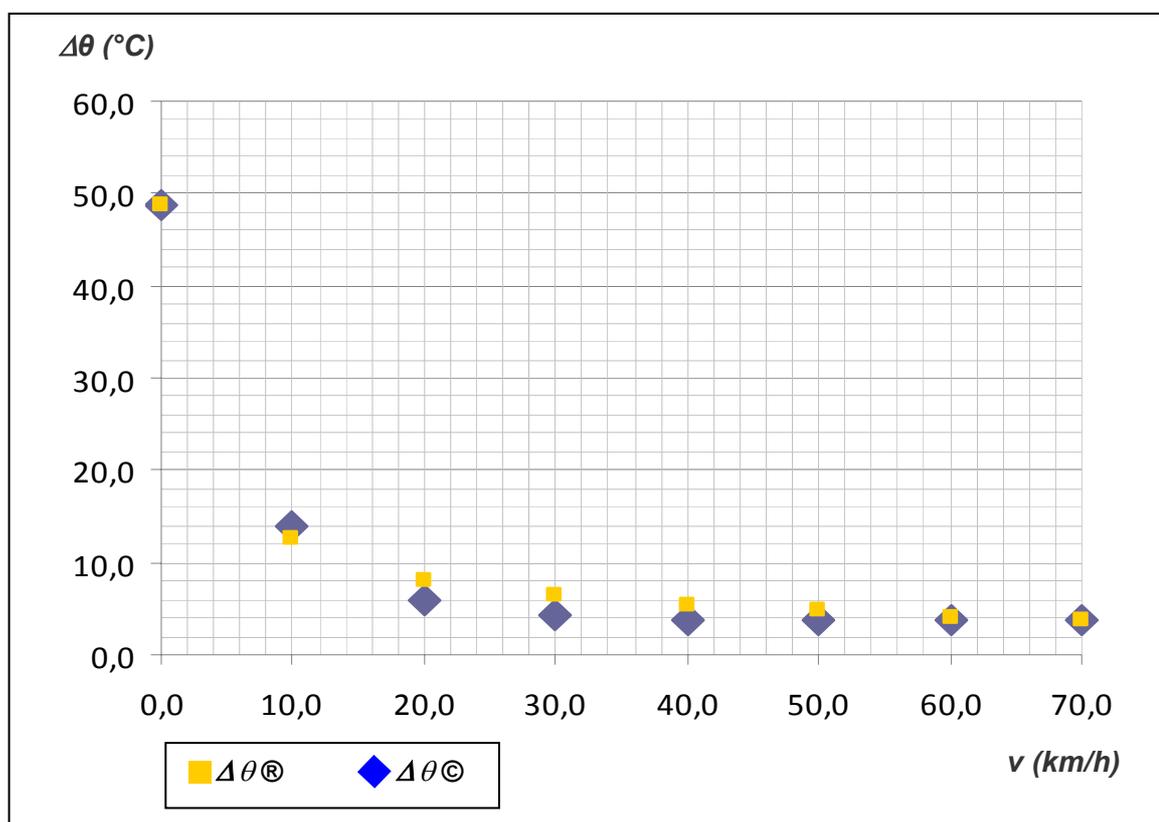


Figura 5.11 – Comparação entre resultados de Frate e outros (2000) e a metodologia proposta.

Snell e Renowden (2000) fazem um estudo aplicado a sistemas de distribuição e de transmissão, apresentando uma análise comparativa dos resultados de levantamentos termográficos com normas de ampacidade do IEEE.

A Tabela 5.8 mostra os dados apresentados, além dos resultados da aplicação da metodologia proposta, com erros entre $-0,91^{\circ}\text{C}$ e $1,34^{\circ}\text{C}$.

Tabela 5.8 – Análise com dados de Snell e Renowden (2000).

Vento	T_final	$\Delta\theta^{\text{®}}$	$\Delta\theta^{\text{©}}$	e	$\Delta\theta_{\text{Vo}}$	25,6
0,00	49,51	25,61	25,61	0,00	K	0,81
1,61	41,56	17,67	18,57	-0,91	V	3,68
3,22	37,22	13,32	13,84	-0,52		
6,44	32,70	8,81	8,51	0,30	K'	0,84
11,26	30,68	6,78	5,45	1,34	V'	4,06
16,09	29,41	5,52	4,52	1,00	K''	0,79
19,31	28,79	4,89	4,29	0,60	V''	3,46

A Figura 5.12 ilustra graficamente os resultados.

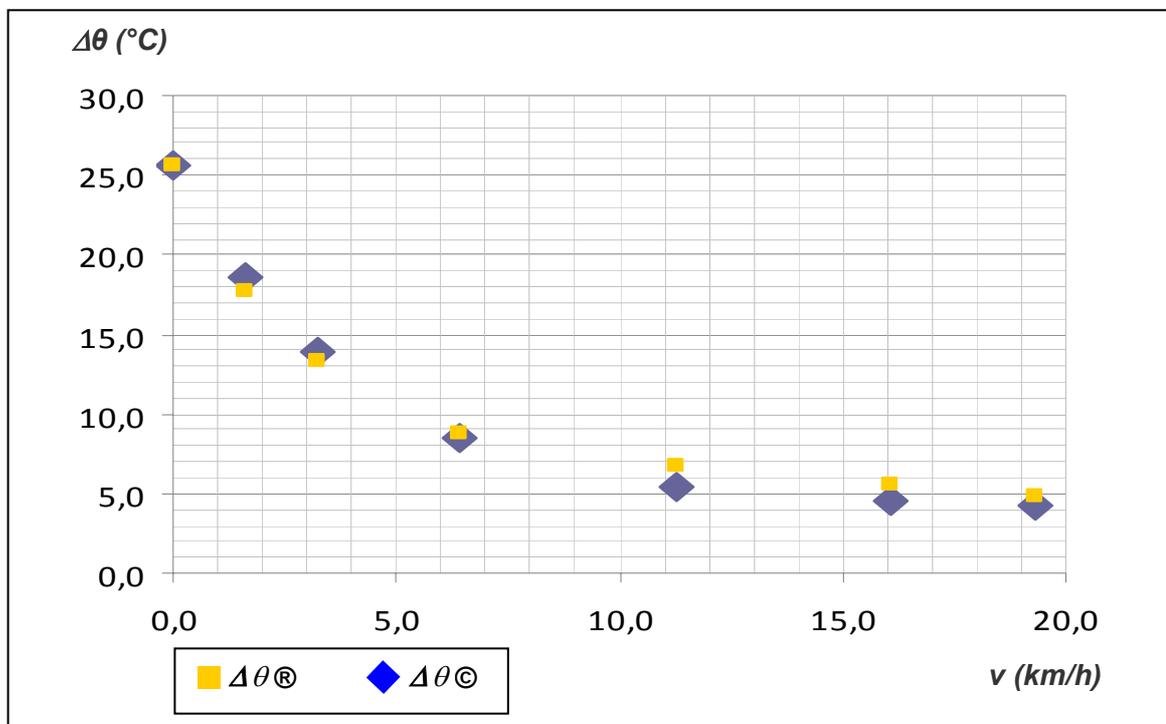


Figura 5.12 – Comparação entre resultados de Snell e Renowden (2000) e a metodologia proposta.

Também foram utilizados dados disponibilizados por Kaplan (1999) em seu livro. Neste caso, Kaplan (1999) apresenta uma análise adimensional, através da aplicação de fatores de redução em função da velocidade do vento, para correção da temperatura. A Tabela 5.9 mostra os dados apresentados, juntamente com resultados da aplicação da metodologia proposta. Os erros encontrados foram da ordem de centésimos.

Tabela 5.9 – Análise com dados de Kaplan (1999).

Vento	$\Delta\theta \text{ ®}$	$\Delta\theta \text{ ©}$	e	$\Delta\theta_{Vo}$	1,00
0,00	1,000	1,000	0,00	K	0,75
7,20	0,735	0,644	-0,09	V	13,00
10,80	0,610	0,543	-0,07		
14,40	0,538	0,473	-0,07	K'	0,69
18,00	0,485	0,424	-0,06	V'	13,33
21,60	0,448	0,390	-0,06		
25,20	0,417	0,367	-0,05	K''	0,60
28,80	0,400	0,350	-0,05	V''	9,86

A Figura 5.13 ilustra graficamente os resultados.

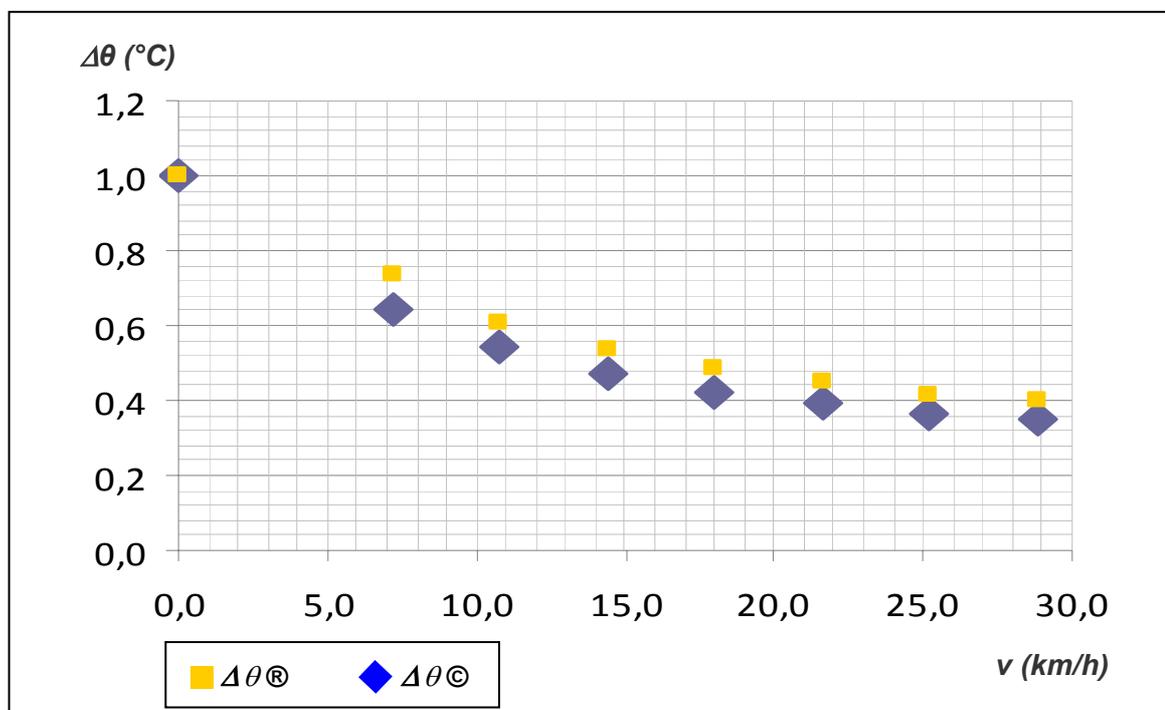


Figura 5.13 – Comparação entre resultados de Kaplan (1999) e a metodologia proposta.

Madding e Bernard (2002) apresentam resultados de ensaios termográficos em uma conexão aquecida por uma resistência elétrica. Esses ensaios foram realizados com a dissipação de três potências diferentes. Embora esta metodologia seja discutível, haja vista que as características elétricas do componente sob análise não influenciam no resultado, a mesma teve seus resultados comparados com a metodologia proposta, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.10, para a potência de 7,9 W. Neste caso, os erros verificados ficaram entre -1,31 °C e 1,27 °C.

Tabela 5.10 – Análise com dados de Madding e Bernard (2002).

Vento	$\Delta\theta$ ®	$\Delta\theta$ ©	e
0,00	24,98	24,98	0,00
1,66	18,22	19,44	1,22
4,86	11,27	12,55	1,27
7,93	9,39	8,86	-0,54
11,31	7,70	6,62	-1,08
16,29	6,39	5,08	-1,31
20,50	5,45	4,53	-0,92
26,25	4,69	4,22	-0,47
31,58	3,94	4,12	0,18

$\Delta\theta_{Vo}$	24,98
K	0,84
V	5,38
K'	0,84
V'	4,65
K''	0,76
V''	5,64

Graficamente, tem-se:

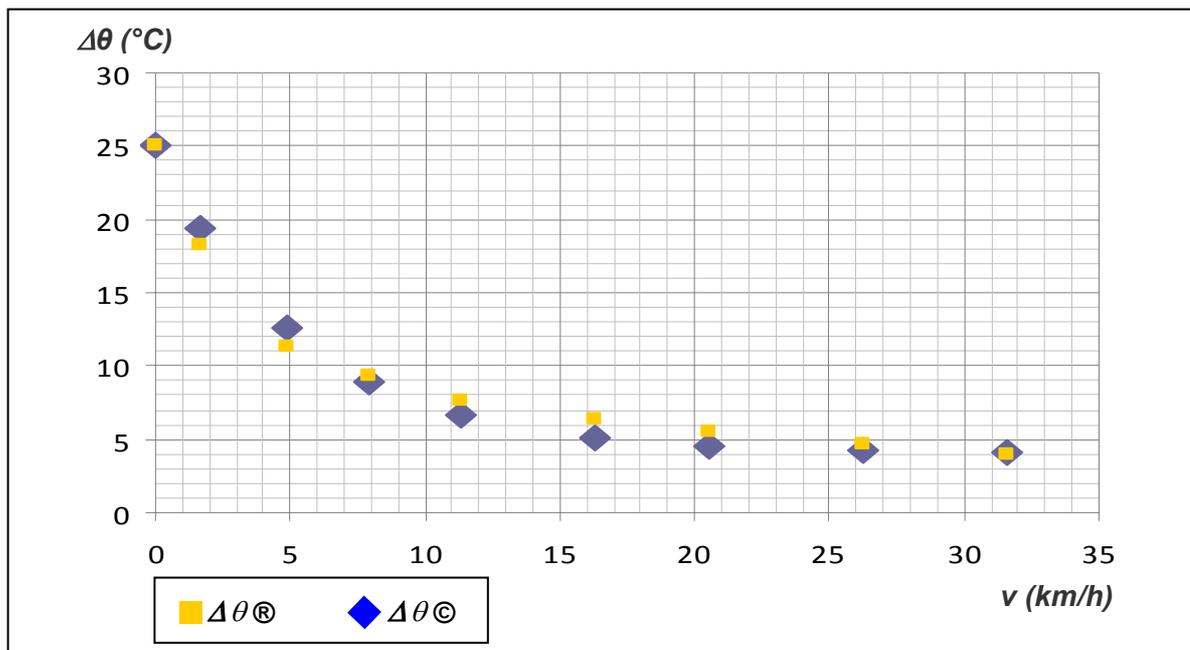


Figura 5.14 – Comparação entre resultados de Madding e Bernard (2002) e a metodologia proposta.

6. CONCLUSÕES

A termografia por infravermelho é atualmente uma importante ferramenta de manutenção preditiva dentro do sistema elétrico. Características como 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, se adequaram inteiramente às necessidades de um mercado de energia competitivo, com grande exigência na redução de custos e no aumento da confiabilidade.

A despeito de ser uma excelente ferramenta de auxílio na prevenção de falhas do sistema elétrico, a inspeção utilizando a termografia por infravermelho pode estar subordinada a muitas influências e limitações. Mesmo sendo a maioria delas difícil de quantificar, é possível, tendo um conhecimento prévio, reduzi-las ou evitá-las. Sendo assim, muito ainda pode ser alcançado com esforços na melhoria contínua da qualificação dos termografistas, no avanço da tecnologia e em estudos para o aprimoramento das medições realizadas pela termografia.

Este trabalho, além de discutir os assuntos anteriormente citados, apresenta as várias influências sobre as inspeções termográficas, amplamente tratadas na literatura. Contudo, direciona os vários ensaios, em campo e em laboratório, para uma verificação particular dos efeitos dessas influências sobre as inspeções realizadas em sistemas elétricos de potência. Esses ensaios resultaram em observações de grande importância na análise dos resultados da inspeção termográfica, como: a restrição do período pós-chuva, no qual a temperatura do componente ainda não estabilizou e, portanto, dificulta uma correta análise; a possibilidade de ocorrer o carregamento solar mesmo em dias com o céu nublado; a grande dependência da temperatura medida no momento da inspeção com as correntes dos períodos anteriores ao da inspeção. O modelo térmico e autorregressivo, desenvolvidos nesta tese, originaram dessa última observação.

Para a realização dos ensaios em laboratório, foi projetada e desenvolvida uma câmara de testes capaz de avaliar o comportamento térmico de um componente sob as várias influências Atmosféricas (temperatura ambiente, vento,

umidade e radiação infravermelha incidente) de modo controlado e independente, bem como, sob a influência de diferentes valores de corrente, similares aos valores reais de operação em campo. Um supervisor, com interface gráfica, também foi desenvolvido para controlar e coletar os dados das influências Atmosféricas via computador.

Para estudo e uma melhor compreensão dos fatores de influências sobre as inspeções termográficas, uma proposta de agrupamento e classificação dessas influências é apresentada: as influências de Qualificação Pessoal que estão relacionadas à aptidão física, treinamento e experiência do termografista; as influências Técnicas que são referentes às características (especificações) do termovisor utilizado e às condições do equipamento sob inspeção; as influências Atmosféricas que estão associadas ao conjunto dos elementos climáticos e à atenuação atmosférica.

Em meio às influências discutidas e verificadas nos capítulos 3 e 4, duas foram selecionadas, para o desenvolvimento matemático, por exercerem forte efeito sobre os resultados: a corrente de carga e a velocidade do vento.

Para a influência da corrente de carga, duas metodologias são apresentadas para estimar a elevação de temperatura de um componente em função da corrente de carga: o modelo térmico e o modelo autorregressivo.

O modelo térmico é adequado para aplicações de laboratório, onde uma corrente constante pode ser aplicada, possibilitando obter os valores exatos dos parâmetros e a determinação da constante de tempo.

O modelo autorregressivo é adequado para aplicações em campo, visto que não depende do tipo de componente, da constante de tempo, de corrente constante e outras limitações. Por outro lado, a informação de correntes anteriores e da temperatura do componente é necessária, carecendo de um maior tempo para a aquisição dos dados. Portanto, esse modelo não necessariamente é para ser aplicado em todas as anomalias térmicas encontradas, mas é extremamente interessante para as anomalias de equipamentos e circuitos importantes ao sistema

e que necessitam de uma análise mais consistente para decidir a ação a ser tomada. Um bom exemplo está na escolha entre uma manutenção programada e uma não programada de uma anomalia térmica, cujo circuito alimenta áreas essenciais, lembrando que em uma manutenção programada é descontado o valor de 10 vezes a receita equivalente ao período de indisponibilidade e em uma manutenção não programada o valor é de 150 vezes.

Enquanto os métodos comumente utilizados por grande parte dos termografistas são adequados para correntes de carga constante, a proposta, aqui apresentada, pode ser aplicada em correntes de carga variáveis, como as encontradas no sistema elétrico de potência. O objetivo principal do modelo proposto é estimar, para períodos em que a corrente através do componente é variável e está abaixo da máxima, a temperatura quando da passagem da máxima corrente pelo componente. Essa estimativa é necessária para que uma análise da condição operativa do componente seja realizada, não só para o momento da inspeção, mas principalmente para a condição de carga em que o componente é mais exigido, isto é, na máxima corrente. O modelo proposto mostrou boa concordância quando aplicado, tanto em laboratório, como em campo, permitindo uma melhoria dos procedimentos de campo atuais.

Para a influência do vento, este trabalho apresenta uma proposta de modelagem mais adequada aos sistemas elétricos de potência, na qual um fator de redução foi desenvolvido e aplicado para estimar a temperatura do componente na ausência de vento. Nessa condição, o componente alcança sua maior temperatura em função do vento e é quando ele é mais exigido. Essa ideia é análoga à utilizada para desenvolver o modelo de influência da corrente.

O modelo de influência do vento foi aplicado aos dados obtidos em laboratório, na câmara de testes. Os resultados da aplicação do modelo desenvolvido mostraram boa concordância quando comparado com os resultados laboratoriais.

O modelo desenvolvido faz uso de apenas dois parâmetros para caracterizar a influência do vento, que podem ser determinados por equações teóricas ou

através do emprego de técnicas de identificação de parâmetros sobre os dados coletados.

Os resultados da aplicação do modelo, além de mostrar boa concordância quando comparados com os resultados laboratoriais, também mostraram boa concordância com os resultados obtidos a partir de outros pesquisadores, provando ser suficientemente flexível para ser amplamente aplicado.

Ambos os modelos propostos nesta tese, o de influência da corrente de carga e de o de influência do vento mostraram boa concordância com resultados obtidos em laboratório, campo ou com dados de outros pesquisadores. Conseqüentemente, a aplicação desses modelos possibilita uma análise mais consistente dos dados obtidos nas inspeções termográficas, auxiliando no aumento da confiabilidade, na maximização da disponibilidade dos ativos e favorecendo uma contínua operacionalidade do sistema elétrico de potência como um todo.

Uma proposta de trabalho futuro é o desenvolvimento de modelos para ponderar a influência das outras variáveis Atmosféricas, bem como eliminar ou reduzir a influência da emissividade de conexões e componentes.

Outra proposta é o desenvolvimento de um modelo de apoio à análise e tomada de decisão que incluísse as técnicas aqui apresentadas e outras que vierem a ser desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas; “TB-23/91 Lighting Terminology”; Dez/1991.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas; “ABNT NBR 15572:2008 - Ensaios não destrutivos - Termografia por infravermelho - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos”; abril/2008.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas; <http://www.abntcatalogo.com.br/>, visualizado em 11/2011.
- ABENDI, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção; <http://www.abende.org.br>, visualizado em 11/2011.
- AGA; “Thermovision System 680/102B – Operating Manual, Publication 556.053”; AGA 1969.
- Agema infrared Systems; “Monitoring Hot Spots using Thermographic Inspection of Electrical Installations”; AGART1/H 1989.
- ALCAN Cables; “Bare Overhead Transmission and Distribution Conductors”; Alcan Cables, 2008.
- Andrews, L.; “Field Guide to Atmospheric Optics”; Vol. FG02, SPIE Field Guides, 2004.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; “Relatório ANEEL 2010”; ANEEL, 2011.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; “Banco de Informações de Geração - BIG”; <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil>, visualizado em 11/07/2012
- ASNT, The American Society for Nondestructive Testing; “Recommended Practice N° SNT-TC-1A”; ASNT, 2006.
- ASTM, American Society for Testing and materials; “Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography – E1934-99a”; ASTM, 1999.

-
- Barbosa, L. C.; “Análise dos Resultados da Termografia no DRM.O”; V Seminário Interno DRM.O – FURNAS, 2005.
- Barreto Jr, J. T.; Carvalho, S. G.; Oliveira, M. J.; Martins, H. J. A.; Silva, A. N.; “Diagnóstico de Campo da Condição Operativa de Subestações 138kV através de Termovisão”; CEPEL, 2001.
- BINDT, The British Institute of Non-Destructive Testing; “ISO18436, CM/GEN Appendix B - Specific Requirements for Qualification and Certification of Condition Monitoring and Diagnostic Personnel for Infrared Thermography”; The British Institute of Non-Destructive Testing 2003.
- Bortoni, Edson C.; Bastos, Guilherme S.; Santos, Laerte; Souza, Luiz E.; “Wind influence modeling for outdoor thermographic surveys”; Proceedings of SPIE, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXII, edited by Ralph B. Dinwiddie, Morteza Safai, 2010.
- Bortoni, Edson C.; Bastos, Guilherme S.; Souza, Luiz E.; Craveiro, Marco A. C.; Santos, Laerte; “Development of an acclimatized chamber for IR based diagnostic research”; QIRT10 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 2010.
- Bortoni, Edson C.; Santos, Laerte; Bastos, G. S.; “A Model to Extract Wind Influence from Outdoor IR Thermal Inspections”; IEEE Power Engineering Letters, 2012.
- Bortoni, Edson C.; Santos, Laerte; Bastos, Guilherme S.; Souza, Luiz E.; Craveiro, Marco A. C.; “Extracting Load Current Influence From Infrared Thermal Inspections”; IEEE Transactions on Power Delivery, V. 26, p. 501 – 506, 2011.
- Bortoni, Edson C.; Santos, Laerte; “Development of models to extract ambient variables influence from outdoor thermographic inspections”; QIRT10 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 2010.
- Brice, C. W.; “Infrared detection of hot spots in energized transmission and distribution equipment”; Electric Power Systems Research, Volume 1, Issue 2, April 1978, pp 127-130.
- Burndy; “Connectors for Substation, Distribution and Industrial Applications”; Framatome Connections International, 1995.

-
- CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica; “O Setor Elétrico Brasileiro”; www.ccee.org.br, visualizado em 11/2011.
- CEN, European Committee for Standardization; <http://www.cen.eu> visualizado em 11/2011.
- Chesf, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco; “Norma de Manutenção – MSE-NM-MN-SE-S.001 01/04/2002”; Chesf, 2002.
- Chrzanowski, K.; “Non-Contact Thermometry - Measurement errors”; SPIE PL, Research and development Treaties, Vol. 7, Warsaw, 2001.
- Cronholm, M.; “Geometry Effects; Hedging your Bet on Emissivity”; Inframation 2003.
- CTEEP, Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista; “Análise de Procedimentos TE/013/2002”; CTEEP, 2002.
- Curityba, A. G. S.; Santos, R. A. T.; Alves, F. D. P.; Amorim Filho, J.; “Atenuação Atmosférica da Radiação Infravermelha: Influência de Elevados Níveis Higrométricos no Desempenho Operacional de Mísseis ar-ar”;
- Eletronuclear, Usina Nuclear de Angra dos Reis; “Manutenção Preditiva por Termografia - PN-T 12 Rev. 01” UNAR ,1999.
- Epperly, R.A.; Hebertin, G.E.; Eads, L.G.; “A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography”; IEEE IAS 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Sept. 1997, pág. 59 a 68.
- Ferreti, Giorgio; Giorgi, Alberto; “A New Type of Pyrometer Employed for Preventive Maintenance in Electric Utilities”, L’Energia Elettrica, Número 12, 1969.
- Flir Systems, “ThermaCAM™ P60 Operator's manual”; Publ. No. 1 557 527 [EN: ENGLISH] Rev. D, 2003.
- Flir Systems, “Flir I5, I7 - User's manual”; Publ. No. T559 382 Rev. A358, 2009.
- Furnas, Furnas Centrais Elétricas S.A.; “Inspeção em Subestações Utilizando Termovisor”; Módulo 99.17.ZZZ.00/01-R0, FURNAS 2002.
- Furnas, Furnas Centrais Elétricas S.A.; “Medição de Temperaturas com o Equipamento Termográfico – DAT.O/LAME.O -009”; FURNAS, 1974.

-
- Furnas; UNIFEI; “Relatório Final do projeto de P&D: Desenvolvimento de Metodologias para a Determinação da Influência de Fatores Físicos sobre as Medições de Temperatura à Distância usando Termografia Infravermelha”; 2009.
- Frate, J. ; Gagnon, D.; Vilandr , R.; Dansereau, R.; “Evaluation of overhead line and joint performance with high-definition thermography”, Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance (ESMO), pp 145-151, 2000.
- Galindo, T. C. L.; “Gest o da T cnica Preditiva de Termovis o”; Companhia Hidro El trica do S o Francisco – CHESF, 2005.
- Gaussorgues, G.; “Infrared Thermography”; Microwave Technology Series 5; Chapman & Hall, 1994.
- GCOI, Grupo Coordenador para Opera o do Sistema Subcomit  de Manuten o; “Utiliza o do Termovisor na Manuten o SCM/GTMS 010”; GCOI - 1985.
- Ghosh, Soumitra K.; Galeski, Paul J.; “Criteria for Selection of Infrared Camera System”; Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE 1994.
- Groote, J. J.; “Max Planck e o in cio da Teoria Qu ntica”; UNESP, 2004.
- Hellier, C.; “Handbook of nondestructive evaluation”; McGraw-Hill Professional, 2001.
- Holst, G. C.; “Common Sense to Approach to Thermal Imaging”; JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 2000.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estat stica; “Em 2011, PIB cresce 2,7% e totaliza R\$ 4,143 trilh es”; <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/>; visualizado em setembro de 2012.
- IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc; “Guide for Determining the Effects of High-Temperature Operation on Conductors, Connectors, and Accessories”; IEEE Std 1283 – 2004.
- Incropera, Frank P.; Bergman, Theodore L.; Lavine, Adrienne S.; DeWitt, David P.; “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”; John Wiley & Sons, 2011.

-
- Inframetrics, Inc.; “ThermaCAM Ultra Models PM395, PM295, PM195, SC2000 - Operating Instructions”; Document 14883-000 Rev A, Inframetrics, Inc., 1996.
- Infraspection Institute; “Guideline for Infrared Inspection of Electrical and Mechanical Systems”; Infraspection Institute, 2000.
- ISO, The International Organization for Standardization; “ISO 9712, Non-Destructive Testing – Qualification and Certification of Personnel”; Third Edition 2005.
- ISO, The International Organization for Standardization; <http://www.iso.org/>, visualizado em 11/2011.
- ISO, The International Organization for Standardization; “ISO/DIS 10878 - Non-destructive testing - Infrared thermography - Vocabulary”; ISO/TC 135/SC 8, 2010.
- Kaplan, H.; Scanlon, T.; “A Thermographer’s Guide to Infrared Detectors”; Inframation, 2001.
- Kaplan, H.; “Infrared spectral bands - The Importance of Color in the Infrared”; Inframation, 2000.
- Kaplan, H.; “Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment”; 2^a Edition SPIE Press Vol. TT34, 1999.
- Latorre, M.; Carvalho Júnior, O. A.; Carvalho, A. P. F.; Shimabukuro, Y. E.; “Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos”; Espaço & Geografia, Vol.5, Nº 1, 2002.
- Lienhard IV, J. H.; Lienhard V, J. H.; “A Heat Transfer Textbook”; 3rd Edition, Cambridge, MA – Phlogiston Press, 2004.
- Lyon Jr, Bernard R.; Orlove, Gary L.; Peters Donna L.; “The Relationship between Current Load and Temperature for Quasi-Steady State and Transient Conditions”; Infrared Training Center 2002.
- Madding, Robert; “Emissivity Measurement and Temperature Correction Accuracy Considerations”; Infrared Training Center 2002.

Madding, Robert; “Thermographer-Friendly Equipment Design for Predictive Maintenance Baseline Thermograms, Thermal Modeling, Emissivity”; Infrared Training Center 2002.

Madding, Robert; Lyon Jr., Bernard; “Environmental Influences on IR Thermography Surveys”; Maintenance Technology 1999.

Madding, Robert; Lyon Jr., Bernard; “Wind Effects on Electrical Hot Spots – Some Experimental IR Data”; Infrared Training Center 2002.

Madding, Robert; Orlove, Gary; Kaplan, Herbert; “Twenty Five Years of ThermoSense: an Historical and Technological Retrospective”; Proc. SPIE 2003.

Maldague, Xavier P. V.; Moore, Patrick O.; “Infrared and Thermal Testing”; Vol. 3 ASNT 2001.

Mamede, J. P.; Veratti, A. B.; “Facilitando o Processo de Inspeção de Sobreaquecimento no Sistema Elétrico de Distribuição”; XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI 2004.

MME – Ministério das Minas e Energia; “Brasil registra recorde histórico de consumo de energia elétrica”; www.mme.gov.br, 2006.

Newport, Ron; “Electrical System Reliability utilizing Infrared Thermography”; Newport Solutions 2002.

Niancang, Hou; “The Infrared Thermography Diagnostic Technique of High-Voltage Electrical Equipments with Internal Faults”; pág. 110 a 115 - IEEE 1998.

NR 10, Norma Regulamentadora N° 10; “Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade”, D.O.U de 08/12/2004 – Seção I.

Okrasa, R.; “Preventive Maintenance Handbook”; 2nd Edition, Ontario Hydro, 1997.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico; “Conheça o Sistema - Operação do SIN em 2005”; www.ons.gov.br, 2006.

Petrobrás, “Inspeção Termográfica em Sistemas Elétricos – N-2475 – Rev. C”; 2005.

D.O.U., Diário Oficial da União - Seção 1, N° 177; “Medida Provisória N° 579”; ISSN 1677-7042, 12/09/2012.

-
- Queles, André F.; Almeida, Dagoberto A.; Ferreira, João R.; “Programas de Manutenção: A Metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade e os Desafios da Remuneração por Parcela Variável no Setor Eletroenergético Brasileiro”; Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP, 2007.
- Quites, Eduardo E. C.; Lia, Luiz R. B.; “Introdução à Transferência de Calor”; Unisanta, 2005.
- Richards, A.; “Alien Vision – Exploring the Eletromagnetic Spectrum with Imaging Technology”; SPIE Press 2001.
- Rogalski, A; Chrzanowski; “Infrared Devices and Techniques”; Opto-Electronics Rev.10, n° 2, 2002.
- Santos, Laerte; ”Termografia em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas”; Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá, 2006.
- Santos, Laerte; Barbosa, L. C.; Araújo, R. A.; Sinescalchi, R. T.; “As Diferentes Visões sobre a Aplicação da Termografia no Sistema Elétrico de Furnas e as Ações Adotadas para Buscar a Convergência entre Elas, com a Máxima Operacionalidade, Produtividade e Confiabilidade do Sistema”; XVIII SNPTEE 2005.
- Santos, Laerte; Bortoni, Edson C.; Barbosa, Luiz C.; Araújo, Reyler A.; “Centralized vs. decentralized thermal IR inspection policy: Experience from a major Brazilian electric power company”; Conference 5782 Thermosense XXVII Proceedings of SPIE, vol. 5782, 2005.
- Santos, Laerte; Bortoni, Edson C.; Souza, Luiz E.; Guilherme S.; Craveiro, Marco A. C.; “Infrared thermography applied for outdoor power substations”; Proceedings of SPIE, Vol. 6939, Thermosense XXX, edited by Vladimir P. Vavilov and Douglas D. Burleigh, 2008.
- Santos, Laerte; Alves, Luiz M.; Bortoni, Edson C.; “Implementation of Thermographers’ Certification in Brazil”; Proceedings of SPIE, Vol. 8013, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIII, edited by Morteza Safai and Jeff R. Brown, 2011.

-
- Slade, Paul G.; "Electrical contacts: principles and applications"; Marcel Dekker, 1999.
- Snell, J.; "A Different Way to Determine Repair Priorities Using a Weighted Matrix Methodology"; Snell Infrared, 2001.
- Snell, J.; "Developing Written Inspection Procedures for Thermal / Infrared Thermography"; SPIE Vol. 2766 1996.
- Snell, J.; "Developing Written Thermographic Procedures: Two Case Studies"; P/PM Technology 1998.
- Snell, J.; "Problems Inherent to Quantitative Thermographic Electrical Inspections"; SPIE Vol. 2473 1995.
- Snell, J.; Fritz J.; "Improving Measurements for Electrical Inspections"; Machinery Reliability Conference, Charlotte 1998.
- Snell, J.; Renowden J.; "Improving Results of Thermographic Inspections of Electrical Transmission and Distribution Lines"; Thermosense XXII – Vol. 4020 – 2000.
- Snell, J.; Spring, R. W.; "Developing Operational Protocol for Thermographic Inspection Programs"; SPIE Vol. 1682 1992.
- Snell, John; "Best Practices for Using Infrared Thermography for Condition Monitoring of Oil-filled Utility Assets"; Snell Infrared, 2005.
- Snell, John; "Prioritizing Based on all Relevant Factors"; Snell Infrared, 2003.
- Tavares, S. G.; Andrade, R. M.; "Metodologia de Ensaio e Análise de Incerteza na Aplicação da Termografia"; Metrologia, 2003.
- USAF - United States Air Force; "Air Force Research Laboratory"; <http://www.af.mil/information/factsheets/>, visualizado em agosto de 2012.
- Veratti, A. B.; "Termografia – Princípios e Aplicações"; AGA, 1984.
- Veratti, A. B.; "A Termografia Aplicada à Indústria Petroquímica"; Revista C&I, Pág. 2 a 6, 1981.
- Wolfe, William L.; "Introduction to Infrared System Design"; Tutorial Texts in Optical Engineering, Vol. TT 24, SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1996.

ANEXO

Exemplo Numérico da Modelagem da Influência da Corrente

Este exemplo mostra, em um sistema elétrico com carga variável, como pode ser utilizado o modelo autorregressivo para prever a máxima elevação de temperatura de um componente.

O ensaio foi realizado na subestação da Usina de Furnas (345 kV), localizada em Minas Gerais. O objeto de ensaio foi uma seccionadora com alta resistência de contato, cuja corrente máxima é de 1200 A. A seccionadora foi monitorada durante 24 horas. Foram selecionados dois períodos, com diferentes comportamentos da corrente de carga, em horário noturno, para a aplicação do modelo.

O modelo aplicado foi o AR 4x30 com leituras de corrente e temperatura a cada 30 minutos, durante 2 horas e apenas de corrente por mais 2 horas.

A.1. Análise com corrente de carga de comportamento crescente

A Tabela A.1 mostra os resultados do primeiro período selecionado, no qual a corrente de carga apresenta um comportamento crescente com ao longo do tempo, como pode ser visto na Figura A.1.

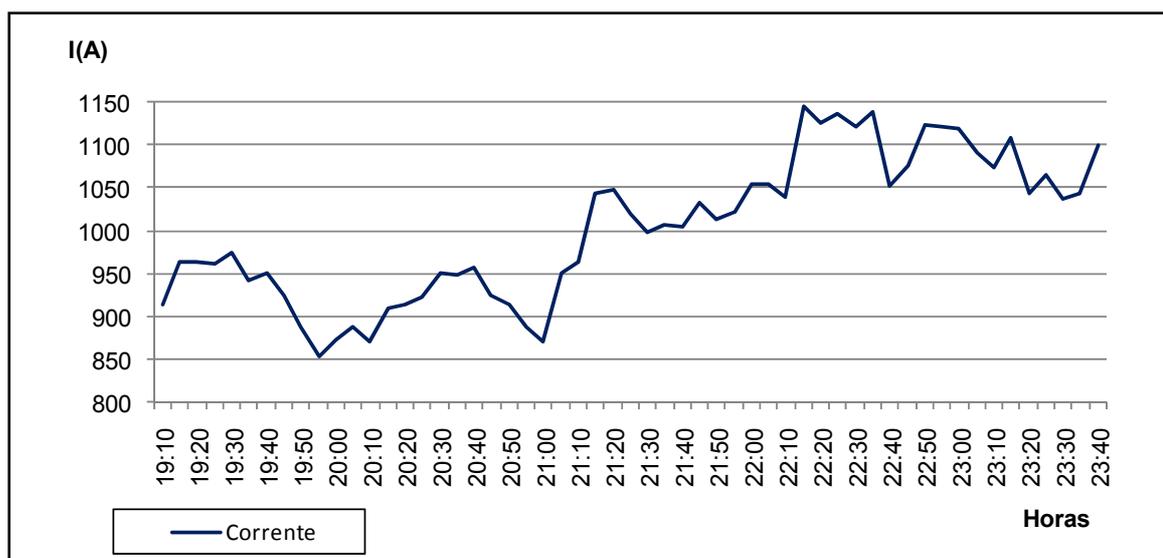


Figura A.1 – Corrente de carga crescente no tempo.

Tabela A.1 – Primeiro período selecionado para análise

Hora	$I_{ti,\Delta t}$ (A)	$\Delta\theta_t$ (°C)
23:40	1099	83,3
23:10	1074	88,7
22:40	1052	86,8
22:10	1040	78,5
21:40	1004	69,4
21:10	964	-
20:40	958	-
20:10	871	-
19:40	950	-

A partir desses dados é possível extrair as equações para o modelo autorregressivo de 4x30 e determinar os coeficientes necessários para o cálculo da elevação de temperatura para a corrente de interesse, ou seja, a máxima. O processo é mostrado a seguir:

$$\Delta\theta_t = a_0 \cdot I_{t_0,\Delta t}^2 + a_1 \cdot I_{t_1,\Delta t}^2 + a_2 \cdot I_{t_2,\Delta t}^2 + a_3 \cdot I_{t_3,\Delta t}^2 + a_4 \cdot I_{t_4,\Delta t}^2$$

$$83,3 = a_0 \cdot (1099)^2 + a_1 \cdot (1074)^2 + a_2 \cdot (1052)^2 + a_3 \cdot (1040)^2 + a_4 \cdot (1004)^2$$

$$88,7 = a_0 \cdot (1074)^2 + a_1 \cdot (1052)^2 + a_2 \cdot (1040)^2 + a_3 \cdot (1004)^2 + a_4 \cdot (964)^2$$

$$86,8 = a_0 \cdot (1052)^2 + a_1 \cdot (1040)^2 + a_2 \cdot (1004)^2 + a_3 \cdot (964)^2 + a_4 \cdot (958)^2$$

$$78,5 = a_0 \cdot (1040)^2 + a_1 \cdot (1004)^2 + a_2 \cdot (964)^2 + a_3 \cdot (958)^2 + a_4 \cdot (871)^2$$

$$69,4 = a_0 \cdot (1004)^2 + a_1 \cdot (964)^2 + a_2 \cdot (958)^2 + a_3 \cdot (871)^2 + a_4 \cdot (950)^2$$

Resolvendo pelo método dos mínimos quadrados no *MATLAB*:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \text{lsqlin} \left(\begin{bmatrix} 1207801 & 1153476 & 1106704 & 1081600 & 1008016 \\ 1153476 & 1106704 & 1081600 & 1008016 & 929296 \\ 1106704 & 1081600 & 1008016 & 929296 & 917764 \\ 1081600 & 1008016 & 929296 & 917764 & 758641 \\ 1008016 & 929296 & 917764 & 758641 & 902500 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 83,3 \\ 88,7 \\ 86,8 \\ 78,5 \\ 69,4 \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0944 \cdot 10^{-3} \\ 0,2112 \cdot 10^{-3} \\ 0,1223 \cdot 10^{-3} \\ -0,0891 \cdot 10^{-3} \\ -0,0847 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

Para se obter a elevação de temperatura para qualquer corrente, considerando-a constante, faz-se o somatório dos coeficientes (a_i) e multiplica-se pelo quadrado da corrente desejada. Para a análise da condição operacional da seccionadora, a corrente de interesse é a máxima corrente, 1200 A.

$$\sum_{i=0}^4 a_i = 6,5391 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta\theta_t = \sum_{i=0}^4 a_i \cdot I_{\max}^2$$

$$\Delta\theta_t = 6,5391 \cdot 10^{-5} \times 1200^2 = 94,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Logo, para a corrente de 1200 A, a elevação de temperatura estimada é de 94,2 °C.

A.2. Análise com corrente de carga de comportamento decrescente

A Tabela A.2 mostra os resultados do segundo período selecionado, no qual a corrente de carga apresenta um comportamento decrescente ao longo do tempo, como visto na Figura A.2.

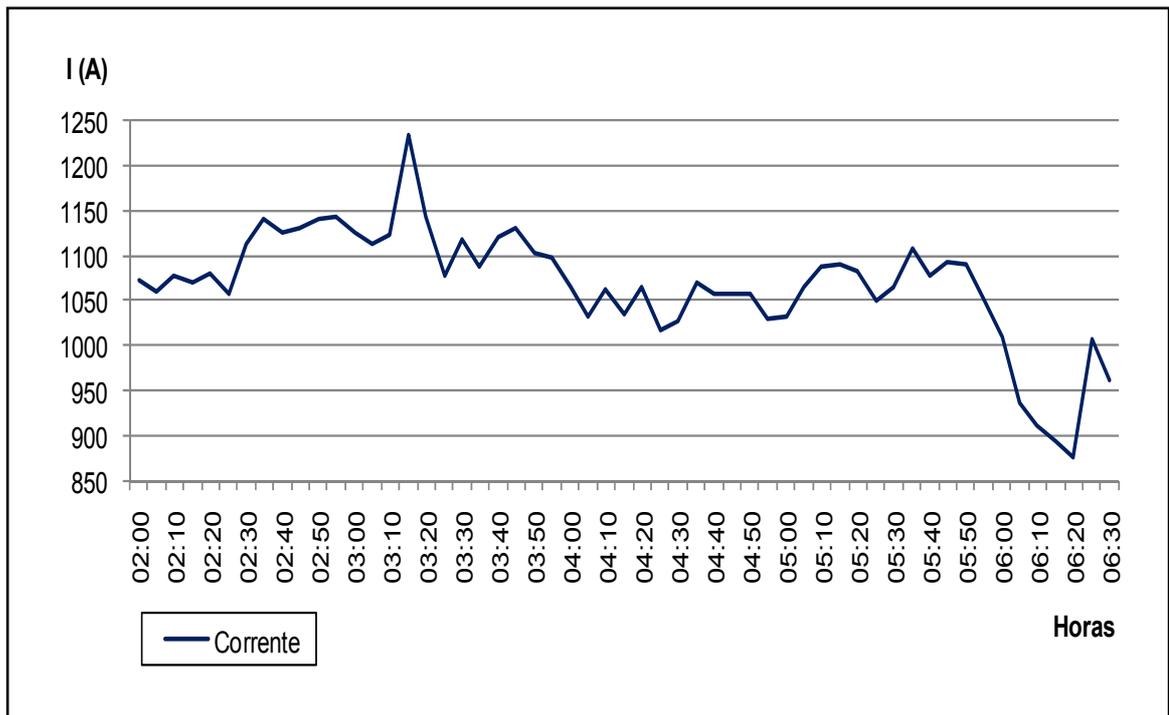


Figura A.2 – Corrente de carga decrescente no tempo.

Tabela A.2 – Segundo período selecionado para análise

Hora	$I_{ti,\Delta t}$ (A)	$\Delta\theta_t$ (°C)
06:30	962	67,4
06:00	1008	78,0
05:30	1065	72,6
05:00	1033	70,9
04:30	1027	75,8
04:00	1066	-
03:30	1119	-
03:00	1125	-
02:30	1114	-

$$\Delta\theta_t = a_0 \cdot I_{t_0 \cdot \Delta t}^2 + a_1 \cdot I_{t_1 \cdot \Delta t}^2 + a_2 \cdot I_{t_2 \cdot \Delta t}^2 + a_3 \cdot I_{t_3 \cdot \Delta t}^2 + a_4 \cdot I_{t_4 \cdot \Delta t}^2$$

$$67,4 = a_0 \cdot (962)^2 + a_1 \cdot (1008)^2 + a_2 \cdot (1065)^2 + a_3 \cdot (1033)^2 + a_4 \cdot (1027)^2$$

$$78,0 = a_0 \cdot (1008)^2 + a_1 \cdot (1065)^2 + a_2 \cdot (1033)^2 + a_3 \cdot (1027)^2 + a_4 \cdot (1066)^2$$

$$72,6 = a_0 \cdot (1065)^2 + a_1 \cdot (1033)^2 + a_2 \cdot (1027)^2 + a_3 \cdot (1066)^2 + a_4 \cdot (1119)^2$$

$$70,9 = a_0 \cdot (1033)^2 + a_1 \cdot (1027)^2 + a_2 \cdot (1066)^2 + a_3 \cdot (1119)^2 + a_4 \cdot (1125)^2$$

$$75,8 = a_0 \cdot (1027)^2 + a_1 \cdot (1066)^2 + a_2 \cdot (1119)^2 + a_3 \cdot (1125)^2 + a_4 \cdot (1114)^2$$

$$\sum_{i=0}^4 a_i = 6,5867 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta\theta_t = \sum_{i=0}^4 a_i \cdot I_{\max}^2$$

$$\Delta\theta_t = 6,5867 \cdot 10^{-5} \times 1200^2 = 94,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Observa-se que para este período selecionado e para a corrente de 1200 A, a elevação de temperatura estimada é de 94,8 °C, valor praticamente o mesmo do período anterior, em que elevação de temperatura estimada é de 94,2 °C.