



**Universidade Federal de Itajubá**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia**

**TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**  
em  
**Subestações de Alta Tensão Desabrigadas**

*LAERTE DOS SANTOS*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

**Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni**

Itajubá  
2006

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

S237t

Santos, Laerte dos  
Termografia infravermelha em subestações de alta tensão  
desabrigadas / Laerte dos Santos. -- Itajubá,(MG) : [s.n.], 2006.  
129 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1.Termografia. 2. Subestação. 3. Inspeção. 4. Alta tensão. I.  
Bortoni, Edson da Costa, orient. II. Universidade Federal de  
Itajubá. III. Título.

CDU 621.311.4(043)|

À minha esposa Luzia e aos meus filhos

Marco Túlio, Larissa,

Paulo, Patrícia

e Simone.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Senhor Deus, criador do universo. Aquele que nos apresenta pessoas e situações, que muitas vezes parecem estar em direção oposta ao objetivo tão desejado, mas que no tempo adequado se revelam como elementos essenciais para alcançá-lo.

À Minha mãe e ao meu já falecido pai, que se estivesse vivo teria o maior orgulho de seu filho.

À Minha esposa e aos meus filhos que renunciaram às poucas oportunidades de lazer que ainda têm, para serem meus maiores incentivadores e parceiros nesse trabalho.

À FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., empresa que acolheu meu pai, meus tios, meus irmãos e me acolhe desde 1982.

Ao Eng. Ricardo Medeiros, gerente da Superintendência de Engenharia de Manutenção – EM.O por possibilitar o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Eng. Luiz Antônio Gouvêa de Albuquerque, gerente do Centro Técnico de Ensaio e Medições – CTE.O. Administrador que vê na educação e no conhecimento diferenciais de um trabalho confiável e de qualidade. Meus agradecimentos por acreditar e apoiar esse trabalho, do início até a sua conclusão.

Ao Eng. Juarez Neves Cardoso, gerente do Laboratório de Medidas Elétricas e Eletrônicas - LAME.O pelo apoio e confiança nos resultados desse trabalho.

Ao Professor Doutor Edson da Costa Bortoni, meu orientador, que acreditou na proposta desse trabalho mesmo antes do mestrado ter se iniciado.

Ao meu irmão Donizeti e ao meu amigo José Geraldo, companheiros de mestrado e, principalmente, de incentivo mútuo para enfrentar os 600 km de estrada e 16 horas de aulas toda semana.

Aos meus amigos de Furnas, envolvidos com a termografia, com quem estou sempre aprendendo e descobrindo as novas possibilidades de aplicação desta técnica.

Aos amigos e companheiros de trabalho do Centro Técnico de Ensaios e Medições – CTE.O que me incentivaram durante o desenvolvimento dessa dissertação.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1. HISTÓRICO.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2. REVISÃO DA LITERATURA ESPECÍFICA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3. TEORIAS ENVOLVIDAS .....</b>	<b>29</b>
2.3.1. <i>Calor</i> .....	29
2.3.2. <i>Temperatura</i> .....	30
2.3.3. <i>Modos de Transferência de Calor</i> .....	30
2.3.3.1. <i>Condução</i> .....	30
2.3.3.2. <i>Convecção</i> .....	33
2.3.3.3. <i>Radiação</i> .....	34
2.3.3.3.1. <i>Radiação Infravermelha</i> .....	35
2.3.4. <i>Teoria da Radiação</i> .....	37
2.3.4.1. <i>Leis da Radiação para o Corpo Negro</i> .....	40
2.3.4.1.1. <i>Lei de Planck</i> .....	40
2.3.4.1.2. <i>Lei do deslocamento de Wien</i> .....	43
2.3.4.1.3. <i>Lei de Stefan-Boltzmann</i> .....	45
2.3.4.2. <i>Leis da Radiação para emissores reais</i> .....	46
2.3.4.2.1. <i>Efeito Cavidade</i> .....	49
<b>3. LIMITAÇÕES DA TERMOGRAFIA .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1. INSPETOR .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2. TERMOVISOR.....</b>	<b>54</b>

3.2.1. Tecnologias de detecção.....	55
3.2.2. Faixa de temperatura .....	57
3.2.3. Faixa espectral .....	58
3.2.4. Resolução espacial .....	60
3.2.5. Resolução de medida .....	62
3.2.6. Sensibilidade térmica .....	65
3.2.7. Taxa de repetição de quadro (Frame Rate) .....	65
3.2.8. Termovisor recomendado para inspeções em subestações de alta tensão.....	66
<b>3.3. EQUIPAMENTO / COMPONENTE SOB INSPEÇÃO.....</b>	<b>67</b>
3.3.1. Emissividade.....	67
3.3.1.1. Ângulo de visão .....	72
3.3.2. Corrente de carga.....	74
<b>3.4. CONDIÇÕES AMBIENTAIS.....</b>	<b>82</b>
3.4.1. Transmitância atmosférica.....	82
3.4.1.1. Absorção .....	83
3.4.1.2. Dispersão .....	83
3.4.1.3. Emissão.....	83
3.4.1.4. Turbulência.....	83
3.4.2. Atmosfera terrestre.....	84
3.4.2.1. Ensaio para verificação da atenuação atmosférica .....	86
3.4.3. Fatores Climáticos .....	90
3.4.3.1. Radiação solar .....	92
3.4.3.1.1. Carregamento solar.....	92
3.4.3.1.2. Reflexo Solar .....	95
3.4.3.2. Chuva e umidade .....	98
3.4.3.2.1. Resfriamento.....	99
3.4.3.2.2. Atenuação .....	100
3.4.3.3. Vento .....	101
3.4.3.4. Temperatura ambiente .....	105
<b>4. PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO .....</b>	<b>107</b>
<b>4.1. ESCOPO .....</b>	<b>107</b>
<b>4.2. OBJETIVOS .....</b>	<b>107</b>

<b>4.3. DEFINIÇÕES.....</b>	<b>108</b>
<b>4.4. RESPONSABILIDADES .....</b>	<b>110</b>
<b>4.5. INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA.....</b>	<b>111</b>
<b>4.6. SEGURANÇA NAS INSPEÇÕES.....</b>	<b>114</b>
<b>4.7. AVALIAÇÃO DA SEVERIDADE DAS ANOMALIAS TÉRMICAS ENCONTRADAS..</b>	<b>115</b>
<b>4.8. MODELO DE RELATÓRIO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA.....</b>	<b>121</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>122</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>124</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Evolução dos Termovisores .....	22
<b>Figura 2</b> – Chapa plana indicando a direção do fluxo de calor.....	31
<b>Figura 3</b> - Variação da condutividade térmica com a temperatura. ....	32
<b>Figura 4</b> – Transferência de calor por condução em uma seccionadora.....	33
<b>Figura 5</b> – Termograma de um TP e a visualização do nível de óleo.....	34
<b>Figura 6</b> – Espectro eletromagnético.....	35
<b>Figura 7</b> – Onda eletromagnética .....	38
<b>Figura 8</b> – Discrepância entre a distribuição espectral do Corpo Negro e as calculadas pela Lei de Wien e Lei de Rayleigh-Jeans. ....	39
<b>Figura 9</b> – Exitância radiante espectral de um Corpo Negro .....	41
<b>Figura 10</b> – Relação entre a temperatura ( $T$ ) e a exitância radiante espectral de um Corpo Negro ( $M_{\lambda,b}$ ) para diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ). ....	42
<b>Figura 11</b> – Curvas de Planck em escala semi-log.....	44
<b>Figura 12</b> – Comprimento de onda ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro ( $M_{bm\acute{a}x}$ ) em uma dada temperatura ( $T$ ).....	44
<b>Figura 13</b> – Exitância radiante total do Corpo Negro ( $M_b$ ) em uma dada temperatura ( $T$ ). ....	45
<b>Figura 14</b> – Radiação incidente em um objeto real e as possíveis frações de radiação absorvida ( $\alpha_\lambda$ ), refletida ( $\rho_\lambda$ ) e transmitida ( $\tau_\lambda$ ).....	47
<b>Figura 15</b> – Exitância radiante espectral dos três tipos de fontes de radiação. ....	48
<b>Figura 16</b> – Emissividade espectral dos três tipos de fontes de radiação. ....	48
<b>Figura 17</b> – Radiação incidindo em uma superfície de baixa emissividade.....	50
<b>Figura 18</b> – Inspeção termográfica em um equipamento de subestação. ....	51
<b>Figura 19</b> – Inspeção termográfica em um equipamento de subestação com as possíveis influências. ....	52
<b>Figura 20</b> – Diagrama simplificado de um Termovisor genérico.....	54
<b>Figura 21</b> - Esquema simplificado de um Termovisor com sistema de detecção por varredura.....	55

<b>Figura 22</b> – Esquema simplificado de um Termovisor com sistema fixo de detecção (FPA).....	56
<b>Figura 23</b> – Resposta espectral de alguns detectores de infravermelho. ....	57
<b>Figura 24</b> – Seccionadora com os contatos acima de 500° C, tornando visível parte da radiação emitida.....	58
<b>Figura 25</b> – Espectro eletromagnético e as faixas espectrais utilizadas na fabricação de Termovisores comerciais. ....	58
<b>Figura 26</b> – Energia disponível nas faixas de 3 a 5 µm e de 8 a 14 µm para um objeto a uma temperatura de 300 K (26,8° C). ....	59
<b>Figura 27</b> – Representação do Campo de Visão (FOV) e do Campo de Visão Instantâneo (IFOV) de um Termovisor.....	60
<b>Figura 29</b> - Grampo que fixa o cabo pára-raio na estrutura da torre. ....	64
<b>Figura 30</b> – Imagem visível e térmica da superfície de um ferro de passar roupa com diferentes emissividades.....	68
<b>Figura 31</b> – Conexão com alta temperatura e baixa emissividade .....	69
<b>Figura 32</b> – Percentagem de componentes defeituosos encontrados pela inspeção termográfica na CHESF.....	70
<b>Figura 33</b> - Percentagem de componentes defeituosos encontrados pela inspeção termográfica em FURNAS.....	70
<b>Figura 34</b> – Equipamentos e conexões apresentando maior emissividade nas áreas de cavidades.....	72
<b>Figura 35</b> – Conexão apresentando maior emissividade nas áreas oxidadas.....	72
<b>Figura 36</b> – Emissividade em função do ângulo de visão.....	73
<b>Figura 37</b> – O termografista deve buscar a visão mais perpendicular possível com a superfície do componente sob inspeção.....	73
<b>Figura 38</b> – Gráfico da corrente circulante pela seccionadora no período de 24 hs.....	75
<b>Figura 39</b> – Termogramas mostrando o efeito da corrente sobre a temperatura de uma seccionadora com alta resistência de contato e sobre a temperatura de uma seccioandora normal.....	76
<b>Figura 40</b> – Esquema do ensaio para determinar a variação da temperatura em uma conexão em função da corrente.....	78
<b>Figura 41</b> – Foto do experimento Temperatura x Corrente. ....	79

<b>Figura 41</b> – Gráfico da variação de Temperatura em função da Corrente em uma conexão defeituosa. ....	80
<b>Figura 43</b> – Transmissão da atmosfera para uma distância de 1,8 km ao nível do mar com 17 mm de precipitação de chuva. ....	85
<b>Figura 44</b> – Transmitância atmosférica para uma distância de 10 m. ....	86
<b>Figura 45</b> – Transmitância atmosférica para uma distância de 50 m. ....	86
<b>Figura 46</b> – Esquema do ensaio para a determinação da atenuação atmosférica. ..	87
<b>Figura 47</b> – Foto do ensaio para a determinação da atenuação atmosférica. ....	88
<b>Figura 48</b> – Gráfico da temperatura em função da distância - Referência (Corpo Negro) em 50° C. ....	89
<b>Figura 49</b> – Gráfico da temperatura em função da distância - Referência (Corpo Negro) em 100° C. ....	89
<b>Figura 51</b> – Esquema do ensaio para a monitoração das temperaturas das conexões (normal e defeituosa) e da influência de fatores climáticos. ....	91
<b>Figura 52</b> – Foto do ensaio para monitoração das temperaturas das conexões (normal e defeituosa) e da influência de fatores climáticos. ....	91
<b>Figura 53</b> – Termogramas de uma conexão defeituosa e uma conexão normal - (a) Sem carregamento solar (22:51 h).. - (b) Com carregamento solar (17:26 h).....	93
<b>Figura 54</b> – Energia do Sol tipicamente vista através da atmosfera da Terra. ....	93
<b>Figura 55</b> – Variação da temperatura das conexões durante períodos com e sem a incidência de radiação solar.....	94
<b>Figura 56</b> – Termogramas de um Transformador de Corrente, sob o Sol, obtidos de três posições distintas. ....	95
<b>Figura 57</b> – Esquema do ensaio realizado para demonstrar o efeito do reflexo solar .....	96
<b>Figura 58</b> – Reflexo solar provocando um falso ponto com alta temperatura em uma conexão de um Transformador de Corrente - TC .....	97
<b>Figura 59</b> – Saturação da água no ar em função da temperatura (ao nível do mar).98	
<b>Figura 60</b> – Efeito da chuva sobre a temperatura das conexões do ensaio da Figura 51. ....	99
<b>Figura 61</b> – Efeito da chuva sobre a temperatura das conexões do ensaio da Figura 51. ....	99

<b>Figura 62</b> – Dispersão em função do comprimento de onda para diferentes intensidades de neblina (nevoeiro) e para uma distância de 1 Km.....	100
<b>Figura 63</b> – Efeito do vento sobre a temperatura de um disjuntor a óleo. ....	101
<b>Figura 64</b> – Redução da temperatura do componente em função da velocidade do vento. ....	102
<b>Figura 65</b> – Variação da velocidade e direção do vento, monitorados por um período de 24 horas, em uma subestação de alta tensão desabrigada. ....	103
<b>Figura 66</b> – Efeito do vento sobre a temperatura de uma conexão defeituosa e uma normal. ....	104
<b>Figura 67</b> – Efeito do vento sobre a temperatura de uma conexão defeituosa e uma normal. ....	104
<b>Figura 68</b> – Variação da temperatura de uma conexão defeituosa e outra normal e da temperatura ambiente durante um período de aproximadamente 70 horas. ....	105

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Diferentes divisões propostas na literatura para a região de radiação infravermelha .....	36
<b>Tabela 2</b> – Divisão baseada em limites espectrais de detectores de infravermelho .	37
<b>Tabela 3</b> – Divisão da radiação infravermelha adotada pela ABNT .....	37
<b>Tabela 4</b> – Energia disponível nas faixas de comprimento de onda dos Termovisores .....	59
<b>Tabela 5</b> – Absorbância solar e emitância infravermelha para diferentes superfícies a uma temperatura próxima de 300 K (26,85° C) .....	71
<b>Tabela 6</b> – Resultados da variação da Temperatura em função da Corrente.....	79
<b>Tabela 7</b> – Aplicação da Equação 23 nos resultados da Tabela 6. ....	80
<b>Tabela 8</b> – Gases que formam a atmosfera.....	84
<b>Tabela 9</b> – Fator de correção para uma placa vertical.....	103
<b>Tabela 10</b> – Comparativo de critérios de severidade de algumas Normas internacionais. ....	117

## **RESUMO**

A Termografia Infravermelha, se corretamente utilizada, é uma excelente ferramenta de manutenção preditiva em subestações de alta tensão, detectando defeitos em seus estágios iniciais e evitando paradas não programadas, aumentando a segurança nas inspeções e aumentando o tempo entre as paradas para manutenção e conseqüentemente, aumentando a confiabilidade do Sistema Elétrico e reduzindo custos. Contudo, possui limitações, principalmente quando realizada em ambientes abertos, onde os resultados obtidos podem ser alterados consideravelmente por influências ambientais, dificultando a análise e o correto diagnóstico dos equipamentos inspecionados.

Essa dissertação de Mestrado tem como objetivo definir as principais limitações e influências sobre uma inspeção termográfica em subestações de alta tensão desabrigadas. Analisar, desde a influência de quem executa a inspeção (termografista), as limitações do equipamento utilizado para se fazer a inspeção (termovisor), as condições do equipamento sob inspeção, até as influências de fatores ambientais sobre a medição e a análise das anomalias térmicas encontradas. Apresentar de modo prático, através de ensaios em laboratório ou em campo, a implicação dessas influências e discutir meios de reduzi-las ou evitá-las. A partir daí, desenvolver uma metodologia de inspeção capaz de obter resultados mais confiáveis, possibilitando uma análise mais consistente dos defeitos encontrados.

## **ABSTRACT**

The Infrared Thermography, when correctly applied, is an excellent predictive maintenance tool for high voltage substations. Its utilization allows the detection of failures in their initial phases avoiding, therefore, undesired not programmed maintenances. Consequently there is an increasing in the inspections safety, time between maintenances and power system reliability, reducing costs. However, there are limitations in its applications, mainly when it is carried out in outdoor environments. In these conditions, the obtained results can be considerably influenced by environmental quantities, turning the analysis more difficult and diagnosis of inspected equipments less reliable.

The aim of this dissertation is at to define the main limitations and influences on a thermographic inspection on uncovered high voltage substations. It analyzes the influence from who executes the inspection (the thermographer), the limitations of equipment employed in the inspection (thermal camera) and the conditions of equipment under inspection. The influences of environmental factors over the measuring and the analysis of thermal anomalies identified are also considered. It presents the implications of these influences, through tests in laboratory and in field, proposing procedures to reduce or to avoid them. After that, the development of an inspection methodology in order to get more reliable results is made, enabling a more consistent analysis of the found failures.

---

## 1. INTRODUÇÃO

O Sistema elétrico nacional compreendendo a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica é parte fundamental na infra-estrutura brasileira. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o mercado de energia elétrica experimenta um crescimento da ordem de 4,5% ao ano, devendo ultrapassar a casa dos 100 mil MW em 2008, (ANEEL, 2006). Portanto, torna evidente a importância de se investir na expansão do Sistema Elétrico. Mas tão importante quanto a expansão, é a eficaz manutenção do Sistema instalado, proporcionando disponibilidade de energia com qualidade, continuidade e baixo custo, fatores vitais para o bom desempenho da economia brasileira. Sob esse ponto de vista, se faz necessário buscar a melhor estratégia para manter os equipamentos em operação e reduzir as falhas no Sistema Elétrico. Entre essas estratégias está a *Manutenção Preventiva*, que determina intervenções programadas e periódicas para a substituição ou reparo de componentes específicos em função de parâmetros como vida útil nominal e experiência anterior, além de dados históricos e estudos estatísticos, mas não a real condição de funcionamento dos equipamentos. Embora para o Sistema Elétrico possa ser melhor que uma *Manutenção Reativa*, na qual o componente só é substituído ou reparado quando ocorre a falha, a *Manutenção Preventiva* freqüentemente deixa sem manutenção componentes que deveriam ser reparados ou substituídos, ou são reparados ou substituídos componentes em bom estado de operação, (Abende, 2006). Outra abordagem para manter os equipamentos é a *Manutenção Preditiva*, que ao invés de realizar a manutenção em um intervalo regular, ela só é efetuada se a condição do equipamento requerer esta atividade. Na *Manutenção Preditiva*, falhas podem ser encontradas e corrigidas em seus estágios iniciais, antes que se tornem falhas potenciais capazes de provocar a interrupção no fornecimento da energia elétrica. Com ela é possível reduzir custos e o tempo de intervenção através do conhecimento prévio dos defeitos a serem corrigidos, aumentar a disponibilidade dos equipamentos para o fornecimento de energia, minimizando os riscos de acidentes e interrupções inesperadas.

Na manutenção preditiva, certos parâmetros dos componentes devem ser monitorados para identificar o início da falha e corrigi-la, (Okrasa et alii, 1997). Em

---

sistemas elétricos as falhas freqüentemente são precedidas de uma anormalidade térmica do componente elétrico, fato que faz da medição de temperatura um dos principais parâmetros de análise e diagnóstico, (Newport, 2002).

A medição de temperatura pode ser realizada por dois métodos:

- Medição por contato, na qual termômetros de líquido em vidro, termômetros de resistência e termopares são utilizados.
- Medição sem contato, na qual termômetros de infravermelho (radiômetros), pirômetros ópticos e Termovisores podem ser empregados, (Holst, 2000).

A escolha, de um ou de outro método, vai depender basicamente da aplicação.

Em sistemas elétricos, fatores como segurança, distância do objeto a ser medido, agilidade na obtenção da medida e o caráter não destrutivo do método, fazem da medição sem contato uma opção bastante atraente e, em certos casos, a única opção. Dentre as alternativas de medição sem contato, a termografia infravermelha possui a grande vantagem de ser um método visual e capaz de examinar grandes superfícies em pouco tempo (alto rendimento), ideal para locais com grande quantidade de equipamentos a ser inspecionada como é o caso de subestações de alta tensão, (Santos et alii, 2005).

A aplicação da Termografia Infravermelha em subestações de alta tensão possui limitações, principalmente quando realizada em ambientes abertos, onde os resultados obtidos podem ser alterados consideravelmente por influências ambientais, dificultando a análise e o correto diagnóstico dos equipamentos inspecionados. Contudo, se corretamente utilizada é uma excelente ferramenta de manutenção preditiva em subestações de alta tensão, detectando defeitos em seus estágios iniciais e evitando paradas não programadas, aumentando a segurança nas inspeções e aumentando o tempo entre as paradas para manutenção e, conseqüentemente, aumentando a confiabilidade do Sistema Elétrico e reduzindo custos.

---

A termografia infravermelha aplicada à área elétrica tem sido tema de estudo de muitas publicações internacionais e objeto para a elaboração de algumas normas. No entanto, grande parte destes trabalhos, apesar de dar conhecimento das várias influências envolvidas no processo de inspeção, não os leva em consideração na análise dos dados obtidos.

Essa Dissertação tem como objetivo investigar as limitações e influências envolvidas na aplicação da termografia infravermelha na inspeção de subestações de alta tensão desabrigadas. Considerando essas limitações e influências, apresentar uma metodologia de inspeção capaz de ponderá-las, possibilitando 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 de subestações e do Sistema Elétrico como um todo.

Essa dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo este o primeiro, introdutório. O capítulo 2 faz uma revisão da literatura, descrevendo fatos históricos importantes para o desenvolvimento da termografia infravermelha, desde a descoberta da radiação infravermelha até os dias atuais. Apresenta ainda, uma revisão da literatura particularmente direcionada às influências e limitações da termografia e se encerra apresentando os conceitos básicos das teorias envolvidas. No capítulo 3 são discutidas as limitações da termografia quando aplicada em inspeções de subestações de alta tensão desabrigadas. No capítulo 4 é descrito um procedimento de inspeção, elaborado a partir das melhores práticas de empresas do setor de energia e das limitações discutidas no capítulo 3. Finalmente, o capítulo 5 apresenta a conclusão desse trabalho, que serviu como estímulo inicial de trabalhos mais específicos, aprovados pela ANEEL e já em andamento.

---

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Histórico

A Termografia Infravermelha, 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 Herschel, astrônomo do rei inglês, George III, e descobridor do planeta Urano, (Maldague & 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 & 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 Negro*. 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).

Em 1829, Leopoldo Nobili inventou o primeiro termopar, sensor de contato formado pela junção de dois metais distintos e baseado no efeito termoelétrico descoberto em 1821 por Thomas Seebeck, (Rogalski & Chrzanowski, 2002).

---

Em 1830, Macedônio Melloni descobriu 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).

Em 1833, o mesmo Melloni foi responsável pela construção da primeira termopilha, (Maldague & Moore, 2001). Conectando vários termopares em série e focando a radiação sobre um lado das junções, conseguia detectar o calor liberado pelo corpo de uma pessoa a uma distância de aproximadamente 10 metros.

John Frederick William Herschel, filho de Sir William Herschel, 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 tinta a álcool colorido. As ondas de luz absorvidas pelo papel produziam diferentes taxas de evaporação da solução de tinta, o que resultava em uma rudimentar imagem térmica estampada no papel, (Richards, 2001). Foi a primeira imagem de infravermelho registrada. Esta técnica foi aprimorada em 1929 por Marianus Czerny que inventou o *Evaporograph*, (Holst, 2000). O *Evaporography* 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 consiste de uma ponte de *Wheatstone*, na qual é conectada a um dos seus braços uma fina tira de platina escurecida, cuja condutividade elétrica varia quando aquecida por uma radiação incidente, (Gaussorgues, 1994). Com esse bolômetro era possível detectar o calor emitido por uma vaca a uma distância de aproximadamente 400 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 esta técnica seria usada para a refrigeração de detectores de Termovisores, (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).

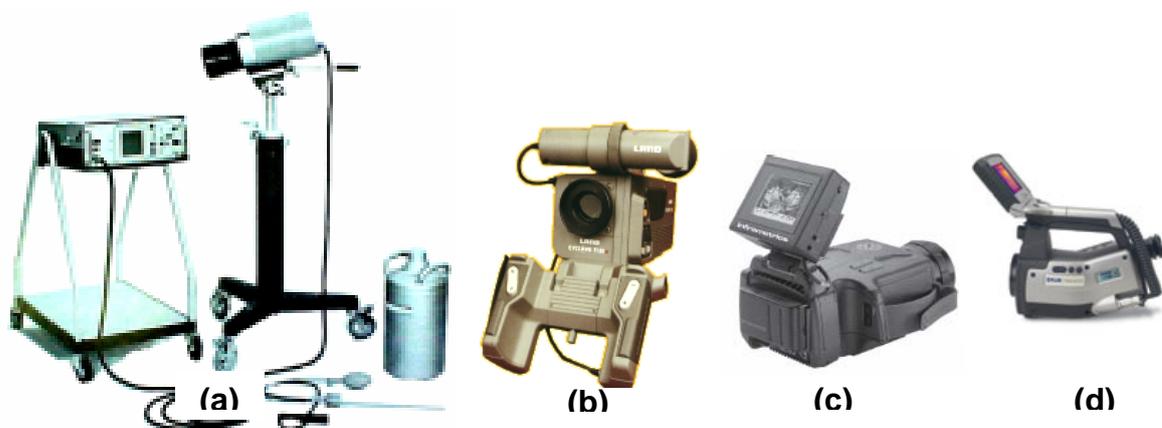
Em 1917, Case desenvolveu o primeiro fotodetector, dispositivo baseado na interação direta entre os fótons da radiação incidente com os elétrons do material e cuja sensibilidade e tempo de resposta eram superiores às do bolômetro, (Maldaque & Moore, 2001)

Com o desenvolvimento do fotodetector, programas de pesquisa militar na área de processamento de imagens térmicas se intensificaram e durante a II Guerra Mundial obteve grandes 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 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. Nesta ocasião se iniciou a comercialização de Termovisores, (Holst, 2000).

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

---

Rápidos avanços na tecnologia foram observados de 1970 até os nossos dias. Detectores de resfriamento criogênico evoluíram para resfriados eletricamente e, em seguida, para detectores sem resfriamento. Os sistemas de varredura óptico-mecânicos foram substituídos pela tecnologia de FPA (*Focal Plane Array*), o peso que nos anos 70 chegava próximo dos 40 kg diminuiu para menos de 2 kg (Figura 1), as leituras de temperatura passaram a ser mostradas diretamente no monitor do Termovisor 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 1** – Evolução dos Termovisores – (a) Detector resfriado a nitrogênio líquido, sistema de varredura óptico/mecânico, peso total de 37 kg – (b) Detector resfriado eletricamente, sistema de varredura óptico/mecânico, peso de 6,1 kg – (c) Detector não resfriado, FPA (*Focal Plane Array*), peso de 2,7 kg – (d) Detector não resfriado, FPA (*Focal Plane Array*), peso de 2,0 kg.

## 2.2. 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 & 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. Ferreti & Giorgi apresentam a nova tecnologia e suas vantagens na aplicação em plantas elétricas de alta tensão e, sobretudo, descrevem os resultados de uma investigação em aproximadamente

---

10.000 componentes de uma empresa de energia elétrica italiana. Nessa investigação, nove subestações de 220 kV e quinze de 132 kV foram avaliadas e 381 (3,81%) componentes foram detectados com sobreaquecimento. Foi utilizado um critério baseado na temperatura para a classificação dos componentes sobreaquecidos.

O trabalho de Brice (1978) mostra que um lado importante da operação de subestações de alta tensão é a manutenção preventiva de equipamentos elétricos energizados. Os problemas nestes equipamentos freqüentemente aparecem como pontos quentes devido a sobrecargas térmicas locais ou mau contato. Um excelente método de localização destes pontos quentes é a detecção remota da radiação infravermelha emitida. O trabalho faz uma revisão dos sistemas de detecção da radiação infravermelha aplicáveis a estes casos. A primeira parte do trabalho é uma breve introdução à detecção infravermelha e sistemas de imagem. Em seguida, a pesquisa de sistemas disponíveis comercialmente, adequados para a tarefa, é apresentada. O trabalho termina destacando os novos desenvolvimentos na tecnologia infravermelha.

Nessa mesma linha, 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. Veratti (1984) descreve a teoria básica da radiação e faz uma revisão dos sistemas infravermelhos, além de apresentar as várias aplicações da termografia.

Agema (1989) descreve as vantagens da utilização da termografia infravermelha em instalações elétricas e apresenta os resultados positivos obtidos por várias empresas de energia. Entre elas, três produtores de energia da Bélgica que após iniciarem a inspeção de subestações com a termografia infravermelha diminuiram, em seis anos, o número de falhas de 2,35% para 0,24% e uma empresa italiana, da região de Milão, que diminuiu o número de componentes sobreaquecidos de 1% para 0,5% em três anos.

---

Com a crise de energia nos Estados Unidos na década de 70, a termografia foi vista como uma importante ferramenta para detecção de perdas de calor. Em 1978 foi criada a primeira conferência dirigida ao uso comercial, industrial e científico da termografia, a *ThermoSense*, tendo em sua primeira edição grande parte dos trabalhos voltados para a conservação de energia, (Madding et alii, 2003).

No Brasil, a termografia foi uma das preocupações do então Grupo Coordenador para Operação Interligada – GCOI, que em 1985 reuniu nove empresas do setor elétrico brasileiro para desenvolver procedimentos de inspeção em subestações utilizando Termovisores, (GCOI, 1985).

Com a contínua evolução da tecnologia, tornando os equipamentos mais portáteis, com a introdução de equipamentos baseados em microprocessadores que realizavam medidas de temperatura em tempo real e o advento dos detectores de FPA (*Focal Plane Array*), os Termovisores tornaram-se mais fáceis de usar e aumentou o interesse pela aplicação da termografia. Apesar da facilidade de utilização dos Termovisores, a correta aplicação da termografia em sistemas elétricos necessitava de conhecimento. Na tentativa de estabelecer procedimentos de inspeção, algumas organizações criaram normas referentes à termografia infravermelha. Em meio a essas normas, algumas das mais difundidas são:

- *E1934 - Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography* desenvolvido pela *American Society for Testing and Materials – ASTM*.
- *MIL-STD-2194 - Military Standard Infrared Thermal Imaging Survey Procedure for Electrical Equipment* elaborado pela *United States Navy*.
- *NETA MTS - Maintenance Testing Specification for Electrical Power Distribution Equipment and Systems* da *InterNational Electrical Testing Association - NETA*.
- *TTCTTRAN.015 - Guidelines for Thermographic Inspection in Electrical Installations* desenvolvido pelo *Danish Technology Institute*.

---

No Brasil foi criada no ano de 2005, dentro do Organismo de Normalização Setorial (ONS 58) credenciado pela ABNT, a comissão de estudos CE 58:000.11, responsável pela elaboração das Normas Brasileiras de termografia.

Entre os muitos trabalhos orientados aos procedimentos de inspeção em sistemas elétricos e às suas limitações, encontramos Snell & Spring (1992) que 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 dados de temperatura, obtidos pela termografia infravermelha, 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 infravermelha, *National Electrical Testing Association - NETA*, *United States Navy - US NAVY, Infraspection Institute*, e *Nuclear Maintenance Applications Center - NMAC* e 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, mas 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 mudanças ambientais na medida de temperatura e a relação entre o calor 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 formalização do protocolo de inspeção termográfica em procedimentos escritos e considera que eles são vitais para produzir resultados consistentes e de alta qualidade e são essenciais para a segurança do inspetor de termografia, 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 infravermelha e de suas vantagens e limitações. Descreve estudos de caso, cita critérios para seleção de um Termovisor adequado e apresenta várias normas para determinar a urgência do reparo após a descoberta do defeito pela inspeção termográfica.

Snell & Fritz (1998) discutem o risco de ter a temperatura medida, através da termografia, como único parâmetro para prever uma falha, declarando 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 & Fritz detalham cada um desses fatores e apresentam técnicas importantes para melhorar os resultados obtidos com a termografia infravermelha em inspeções elétricas.

---

Snell (1998) reforça a idéia de treinamento das pessoas envolvidas com a termografia e a necessidade de implantação de um procedimento escrito como base para um programa termográfico de sucesso. Nesse artigo, Snell descreve o trabalho de duas grandes empresas no desenvolvimento de procedimentos escritos e termina apresentando uma recomendação de procedimento escrito para inspeções em sistemas elétricos, no qual são descritos os principais itens do documento, como o escopo, as referências utilizadas, as orientações de segurança, a qualificação dos inspetores, dados do Termovisor, os passos detalhados do procedimento de inspeção e a descrição do registro das anomalias térmicas encontradas.

Veratti (2000) aborda uma metodologia de análise de anomalias térmicas utilizando critérios de classificação de componentes aquecidos e o risco ao sistema produtivo.

Barreto Jr. et al (2001) apresenta um estudo parcial para o diagnóstico da condição de defeito em equipamentos instalados em subestações de 138kV, no qual pretende estabelecer limites máximos de temperatura admissível utilizando a técnica de termovisão.

Snell (2001) volta a opinar contra a metodologia que define a prioridade dos reparos em equipamentos baseando apenas no valor da temperatura medida por termografia e propõe uma interessante alternativa, na qual uma matriz contendo vários fatores como segurança, importância do equipamento, corrente de carga, convecção, etc, são analisados e ponderados para a definição da prioridade de reparo.

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

Niancang (1998) que discute algumas técnicas para diagnosticar problemas relacionados às falhas internas em equipamentos de uma subestação, através da termografia infravermelha.

---

Madding & Lyon Jr. (1999) fazem uma revisão dos fatores que influenciam na avaliação de um resultado obtido por termografia infravermelha, desde a corrente de carga a fatores ambientais.

Madding & 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 a taxas menores. Mostram também que a quantidade de resfriamento não depende somente da velocidade do vento, mas da potência dissipada no ponto aquecido. Madding & 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 ( $\Delta T$ ) correm o risco de diagnósticos incorretos e que podem levar a falso senso de segurança, falha de equipamento, fogo 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, sugerem uma variação do expoente  $x$  utilizado na Equação 1, 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, Equações 2 e 3.

---

$$T = T_1 \cdot \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^x \quad (1)$$

$$T_{\min} = T_1 \cdot \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{1,5} \quad (2)$$

$$T_{\max} = T_1 \cdot \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{1,8} \quad (3)$$

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 e modelos térmicos sob todos os tipos de condições ambientais.

Newport (2002) cita que antes mesmo do termo *Manutenção Preditiva* ser usado, a termografia já era utilizada como ferramenta preditiva e menciona como exemplo o caso da *Swedish Power Board*, que no ano de 1965 inspecionou 150.000 componentes com a termografia infravermelha.

## **2.3. Teorias envolvidas**

Uma vez que a termografia é utilizada em sistemas elétricos para analisar a distribuição térmica e medir temperaturas de equipamentos e conexões através da detecção da radiação infravermelha, é importante a revisão dos conceitos de calor, temperatura e dos modos de transferência de calor. Uma atenção especial é dada à teoria da radiação.

### **2.3.1. Calor**

Calor é a transferência de energia de uma região para outra como resultado de uma diferença de temperatura entre elas. Essa energia se origina da agitação das moléculas das quais a matéria é constituída e sua transferência se processa da região mais quente para a mais fria. O calor é, portanto, um fenômeno transitório, que cessa quando não existe mais uma diferença de temperatura, (Holst, 2000).

---

### **2.3.2. Temperatura**

Se dois objetos estão em equilíbrio térmico com um terceiro objeto, então eles estão em equilíbrio térmico um com o outro. Em consequência disso, existe um certo atributo ou propriedade de estado que descreve os estados termodinâmicos dos objetos que estão em equilíbrio térmico um com o outro, e isto é denominado de temperatura, (Chrzanowski, 2001).

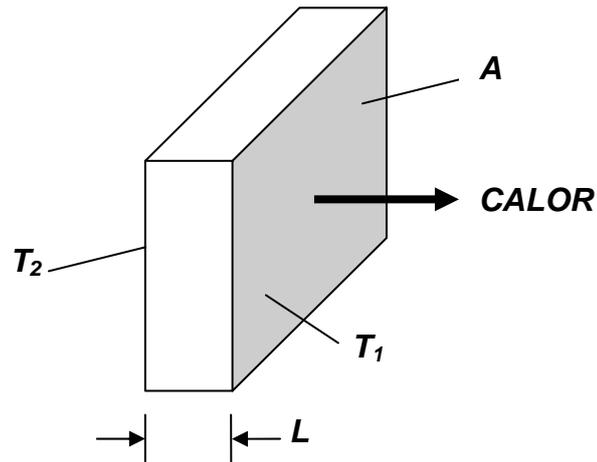
### **2.3.3. Modos de Transferência de Calor**

Existem três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Todos os processos de transferência de calor ocorrem através de um ou mais desses três modos. A termografia infravermelha é baseada na medição do fluxo de calor por radiação e está, portanto muito relacionada ao modo de transferência de calor por radiação.

#### **2.3.3.1. Condução**

A condução pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. Este mecanismo pode ser visualizado como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas de uma substância devido a interações entre elas, (Quites & Lia, 2005). A fonte de calor excita diretamente as partículas que transferem parte de suas energias a partículas vizinhas e essas por sua vez transferem a outras partículas. A intensidade do fluxo depende da condutividade térmica do material, sendo que metais têm alta condutividade térmica e isoladores têm baixa condutividade térmica.

A quantidade de calor por unidade de tempo através de uma chapa plana é representada pela Figura 2 e expressa pela lei de Fourier na Equação 4.



**Figura 2** – Chapa plana com a seta indicando a direção do fluxo de calor.

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{k.A.(T_2 - T_1)}{L} \quad (4)$$

Na qual,

$Q/\Delta t$  [ $J.s^{-1}$ ] é o fluxo de calor por condução.

$k$  [ $J.s^{-1}.m^{-1}.K^{-1}$ ] é o coeficiente de condutividade térmica do material.

$A$  [ $m^2$ ] é área da seção através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo;

$T_2 - T_1$  [K] é o gradiente de temperatura na seção.

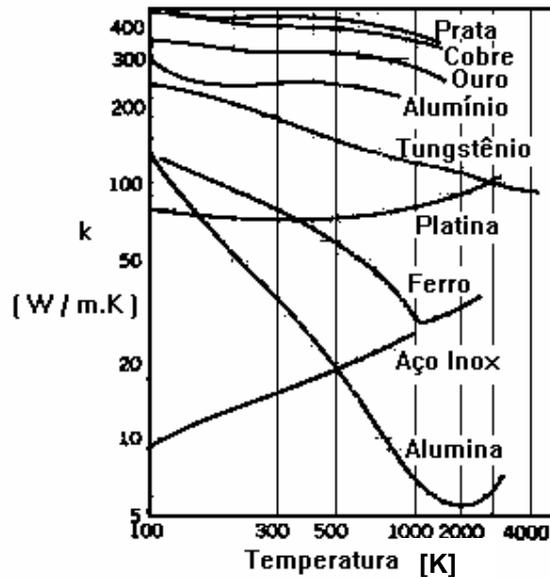
$L$  [m] é a espessura da seção.

O fator de proporcionalidade  $k$  (condutividade térmica) que surge da equação de Fourier é uma propriedade de cada material e exprime a maior ou menor facilidade que um material apresenta à condução de calor. Os valores numéricos de  $k$  variam em extensa faixa dependendo da constituição química, estado físico e temperatura dos materiais. Quando o valor de  $k$  é elevado o material é considerado condutor térmico e, caso contrário, isolante térmico. Em alguns materiais como o alumínio e o cobre, o  $k$  varia muito pouco com a temperatura, porém em outros,

---

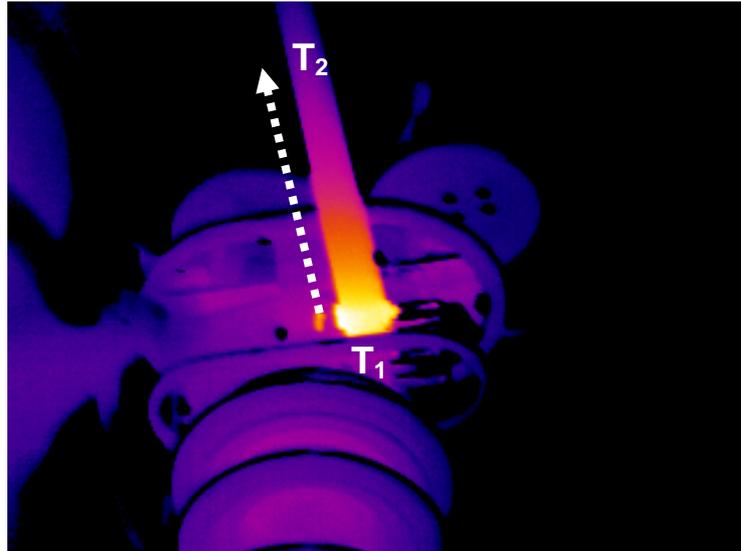
como alguns aços, o  $k$  varia significativamente com a temperatura. Nestes casos, adota-se, como solução de engenharia, um valor médio de  $k$  em um intervalo de temperatura.

A variação, para alguns materiais, da condutividade térmica com a temperatura é mostrada na Figura 3.



**Figura 3** - Variação da condutividade térmica com a temperatura.

A Figura 4 apresenta um exemplo de transferência de calor por condução, na qual uma seccionadora com alta resistência de contato tem um aumento de temperatura no ponto  $T_1$  (onde ocorre a falha) e o calor se dissipa para áreas de menor temperatura  $T_2$ .



**Figura 4** – Transferência de calor por condução em uma seccionadora. A seta indica a direção do fluxo de calor, do ponto de mais alta temperatura  $T_1$ , para áreas de menor temperatura  $T_2$ .

### 2.3.3.2. Convecção

A convecção pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido através da ação combinada de: condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura, (Quites & Lia, 2005).

O óleo de transformadores e a água de sistemas de refrigeração são exemplos de fluidos que produzem resfriamento convectivo. O ar, forçado ou não, que sopra os equipamentos de uma subestação é outro exemplo de fluido que pode afetar drasticamente a temperatura desses equipamentos.

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:

$$\frac{Q}{\Delta t} = h.A.(T_1 - T_2) \quad (5)$$

Na qual,

$Q/\Delta t$  [ $J.s^{-1}$ ] é o fluxo de calor transferido por convecção.

---

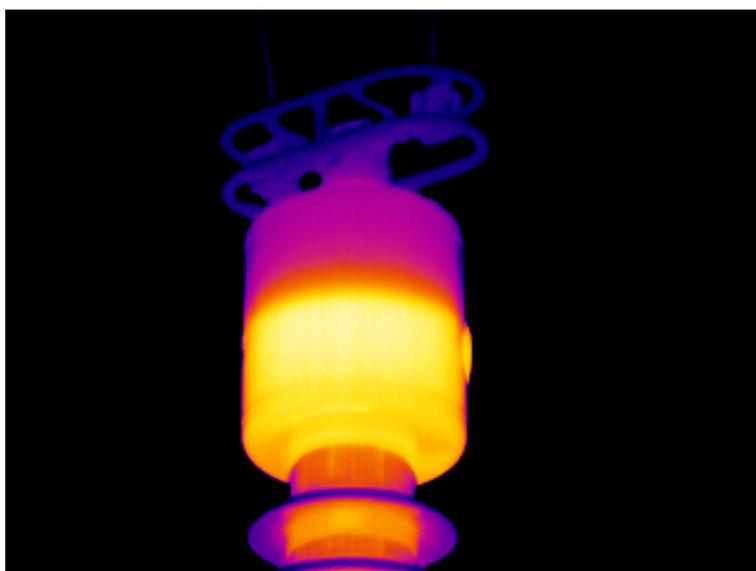
$h$  [ $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

$A$  [ $\text{m}^2$ ] é área de transferência de calor.

$T_1 - T_2$  [K] é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido.

O coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$  dependente de vários fatores como: a orientação da superfície, tipo de fluido, velocidade do fluido e tipo de superfície.

A Figura 5 mostra a imagem térmica (termograma) de um Transformador de Potencial (TP) e a visualização do seu nível de óleo, exemplo de um meio onde ocorre a transferência de calor por convecção.



**Figura 5** – Termograma de um Transformador de Potencial e a visualização do nível de óleo.

#### 2.3.3.3. Radiação

A radiação pode ser definida como o processo pelo qual o calor é transferido de uma superfície de alta temperatura para uma superfície de temperatura mais baixa quando tais superfícies estão separadas no espaço, ainda que exista vácuo entre elas. A energia assim transferida é chamada radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas que viajam na velocidade da luz.

---

A transferência de calor por radiação é fundamento para a medição de temperatura através da termografia infravermelha, que detecta a radiação proveniente do objeto sob inspeção, mais especificamente a radiação infravermelha.

#### 2.3.3.3.1. Radiação Infravermelha

Todos os objetos acima do zero absoluto (0 K ou -273,16° C) emitem radiação térmica devido à agitação térmica de átomos e moléculas dos quais são constituídos. Quanto maior essa agitação, mais quente se encontra o objeto e mais radiação ele emite.

A radiação térmica pode ser emitida nas faixas de ultravioleta, visível, infravermelho e até na faixa de microondas do espectro eletromagnético. Entretanto, para temperaturas típicas encontradas na Terra, a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho, (Chrzanowski, 2001). Assim sendo, os Termovisores são fabricados com detectores que respondem a essa faixa do espectro.

A termografia detecta a radiação infravermelha emitida pelo objeto inspecionado, que é invisível ao olho humano, e a transforma em imagens térmicas visíveis, com a possibilidade de convertê-la em leituras de temperatura, (Maldague & Moore, 2001).

Dentro do espectro eletromagnético, Figura 6, a radiação infravermelha está localizada entre a região de radiação visível e a região de radiação de microondas. Essas regiões são divididas arbitrariamente, dependendo dos métodos utilizados para produção e detecção da radiação.



Figura 6 – Espectro eletromagnético

A radiação Infravermelha, assim como as radiações das diferentes regiões do espectro eletromagnético, basicamente obedecem às mesmas leis. Propagam-se em linha reta, refletem, refratam, são absorvidas, interferem, apresentam espalhamento de feixe, podem ser enfocadas e viajam, no vácuo, a uma velocidade de aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s.

O espectro infravermelho pode ainda ser dividido em sub-regiões e várias são as propostas publicadas na literatura, como apresentada em parte por Chrzanowski (2001) e reproduzida na Tabela 1.

**Tabela 1-** Diferentes divisões propostas na literatura para a região de radiação infravermelha

	<b>FONTE</b>	<b>PROPOSTA</b>
1	<i>International Lighting Vocabulary of CIE</i>	IR-A – 0,78 $\mu\text{m}$ - 1,4 $\mu\text{m}$ IR-B - 1,4 $\mu\text{m}$ - 3 $\mu\text{m}$ IR-C - 3 $\mu\text{m}$ - 1000 $\mu\text{m}$
2	<i>Guide for Spectroscopy -Catalog, Jobin Yvon, 1993.</i>	Near IR - 0,65 $\mu\text{m}$ - 1,5 $\mu\text{m}$ Middle IR - 1,5 $\mu\text{m}$ - 5 $\mu\text{m}$ Far IR >5 $\mu\text{m}$
3	<i>The Photonics Spectrum Reference Wall Chart, Photonics Spectra, 1995.</i>	Near IR - 0,68 $\mu\text{m}$ -3 $\mu\text{m}$ Middle IR - 3 $\mu\text{m}$ - 30 $\mu\text{m}$ Far IR - 30 $\mu\text{m}$ -1000 $\mu\text{m}$
4	<i>Hudson R.D., Infrared System Engineering, John Wiley&amp;Sons, 1969.</i>	Near IR - 0, 76 $\mu\text{m}$ –3 $\mu\text{m}$ Middle IR - 3 $\mu\text{m}$ - 6 $\mu\text{m}$ Far IR - 6 $\mu\text{m}$ -15 $\mu\text{m}$ Extremely Far IR >15 $\mu\text{m}$
5	<i>Mc Graw-Hill Encyclopedia of Physics, ed. Sybil P. Parker, 1993. P. 570</i>	IR radiation: 1 $\mu\text{m}$ -1000 $\mu\text{m}$
6	<i>Ed. Robert M. Besancon, The encyclopedia of physics, Van Nostrand Reinhold Company, 1974</i>	IR radiation: 0,7 $\mu\text{m}$ -1000 $\mu\text{m}$ Near IR - 0,7-1,5 $\mu\text{m}$ Intermediate IR - 1,5-20 $\mu\text{m}$ Far IR - 20-1000 $\mu\text{m}$
7	<i>www.FSI.com/meas.html</i>	Near IR - 0,75 $\mu\text{m}$ - 3 $\mu\text{m}$ Middle IR - 3 $\mu\text{m}$ -6 $\mu\text{m}$ Far IR - 6 $\mu\text{m}$ -15 $\mu\text{m}$ Extreme IR - 15 $\mu\text{m}$ -100 $\mu\text{m}$

Rogalski & Chrzanowski (2002) apresentam outra proposta baseada em limites espectrais de detectores de infravermelho comumente utilizados.

**Tabela 2** - Divisão baseada em limites espectrais de detectores de infravermelho

<b>Região (abreviação)</b>	<b>Faixa de Comprimento de Onda</b>
<i>Near Infrared (NIR)</i>	0,78 $\mu\text{m}$ – 1 $\mu\text{m}$
<i>Short Wavelength IR (SWIR)</i>	1 $\mu\text{m}$ – 3 $\mu\text{m}$
<i>Medium Wavelength IR (MWIR)</i>	3 $\mu\text{m}$ – 6 $\mu\text{m}$
<i>Long Wavelength IR (LWIR)</i>	6 $\mu\text{m}$ – 15 $\mu\text{m}$
<i>Very Long Wavelength IR (VLWIR)</i>	15 $\mu\text{m}$ – 1000 $\mu\text{m}$

Os fabricantes de equipamentos de termografia infravermelha confundem ainda mais esta questão, denominando equipamentos que trabalham na faixa de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$  de Ondas Longas (Long-Wave – LW) e equipamentos na faixa de 3  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$  de Ondas Curtas (Short-Wave – SW).

Existe ainda a utilização dos termos, Infravermelho Refletido para radiações que vão de 0,75  $\mu\text{m}$  a 1,2  $\mu\text{m}$  e Infravermelho Térmico para radiações de vão além de 2  $\mu\text{m}$ .

A proposta da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, (ABNT, 1991), segue o *International Lighting Vocabulary of CIE*, na qual o espectro infravermelho é subdividido em:

**Tabela 3** – Divisão da radiação infravermelha adotada pela ABNT

<b>Região (abreviação)</b>	<b>Faixa de Comprimento de Onda</b>
IR-A	0,78 $\mu\text{m}$ – 1,4 $\mu\text{m}$
IR-B	1,4 $\mu\text{m}$ – 3 $\mu\text{m}$
IR-C	3 $\mu\text{m}$ – 1000 $\mu\text{m}$

#### **2.3.4. Teoria da Radiação**

Gustav Robert Kirchhoff em 1860 propôs o termo *Corpo Negro* como sendo um corpo capaz de absorver toda radiação incidente, independente de seu comprimento de onda, sua direção de incidência e sua polarização. A radiação por ele emitida teria uma distribuição espectral dependente apenas de sua temperatura. Para tal corpo estar em equilíbrio termodinâmico, ele deveria irradiar energia na

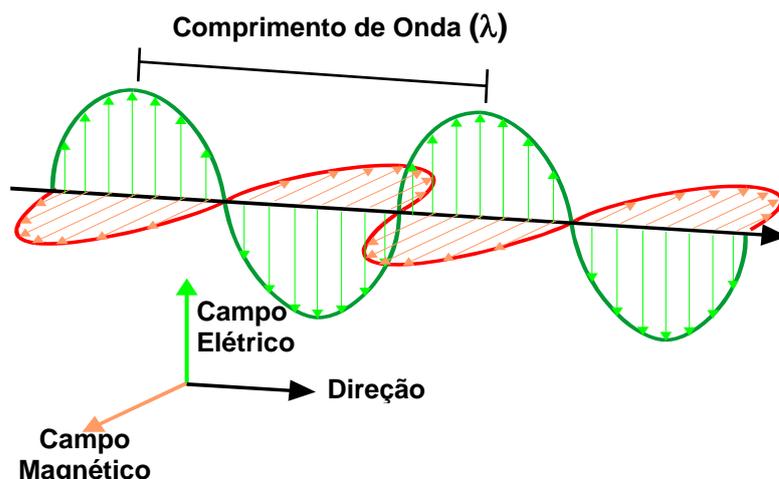
---

mesma taxa em que a absorve, (AGA, 1969). Portanto, um Corpo Negro, além de ser um absorvedor perfeito, é também um emissor perfeito, (Groote, 2004).

Em 1879, Josef Stefan concluiu através de medidas experimentais que a quantidade total de energia irradiada por um Corpo Negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta, mesma conclusão obtida por meios teóricos por Ludwig Eduard Boltzmann em 1884, resultando na *Lei de Stefan-Boltzmann*.

Em 1865, o inglês James Clerk Maxwell, supondo que um campo magnético variável produz um campo elétrico e que um campo elétrico variável produz um campo magnético e que este processo pode se propagar pelo espaço, previu teoricamente a existência de ondas eletromagnéticas (Figura 7) e propôs sua igualdade com ondas de luz após verificar a coincidência entre o valor calculado da velocidade das ondas eletromagnéticas e o valor medido da velocidade das ondas luminosas.

O alemão Heinrich Rudolf Hertz, através do fenômeno da indução eletromagnética, confirmou em 1887 as teorias de Maxwell, detectando ondas eletromagnéticas em laboratório e demonstrando que elas propagam com a mesma velocidade das ondas de luz.



**Figura 7** – Onda eletromagnética

---

A relação entre o comprimento de onda e a frequência de radiação é dada por:

$$c = \lambda \cdot f \quad (6)$$

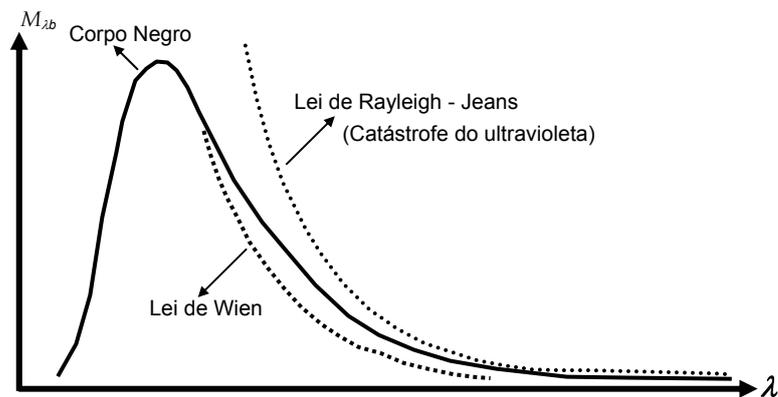
Na qual,

$c$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] é a velocidade de propagação no meio (no vácuo  $c = 2,99792458 \times 10^8$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]),

$\lambda$  [m] é o comprimento de onda.

$f$  [Hz] é a frequência da onda.

As tentativas de determinar a curva de distribuição espectral da radiação de um Corpo Negro, utilizando apenas os conhecimentos da teoria eletromagnética, não foram bem sucedidas. Como exemplo, as experiências de Wilhelm Wien, cuja fórmula era válida apenas para comprimentos de onda curtos e de John William Strutt (Lord Rayleigh) e James Hopwood Jeans, que obtiveram uma expressão que funcionava bem para comprimentos de onda longos, mas que se afastava muito dos resultados experimentais a partir de comprimentos de onda próximos ao ultravioleta, como mostra a Figura 8.



**Figura 8** – Discrepância entre a distribuição espectral do Corpo Negro e as calculadas pela Lei de Wien e Lei de Rayleigh-Jeans.

---

Em função dessas e outras teorias que apresentavam resultados que não concordavam com resultados experimentais, o físico alemão Max Karl Ernst Ludwig Planck, em 1900, formulou uma teoria para explicar o comportamento da radiação emitida por Corpos Negros.

Max Planck, ao expor seu trabalho diante da Sociedade de Física de Berlim, apresentou uma fórmula concordante com os resultados experimentais introduzindo uma hipótese: o movimento térmico dos átomos e das moléculas, responsável pela geração das ondas eletromagnéticas, pode oscilar livremente em qualquer frequência, mas a emissão de radiação decorrente desta oscilação se dá de forma descontínua, ou seja, através de pulsos, chamados *quanta* e a energia emitida por eles é proporcional à frequência de oscilação das partículas, na forma:

$$E = h \cdot f \tag{7}$$

Na qual,

$E$  [J] é a energia.

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

$f$  [Hz] é a frequência de oscilação.

#### 2.3.4.1. Leis da Radiação para o Corpo Negro

##### 2.3.4.1.1. Lei de Planck

Com a quantização da energia, a lei de Planck pôde descrever a distribuição espectral da radiação ( $M_{\lambda b}$ ) emitida por um Corpo Negro ( $b$ ) em uma dada temperatura ( $T$ ), por unidade de área, por unidade de comprimento de onda ( $\lambda$ ):

$$M_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \tag{8}$$

Na qual:

---

$M_{\lambda b}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ] é a exitância radiante espectral do Corpo Negro.

$h$  [ $\text{J}\cdot\text{s}$ ] é a constante de Planck =  $6,6260755 \times 10^{-34}$  [ $\text{J}\cdot\text{s}$ ].

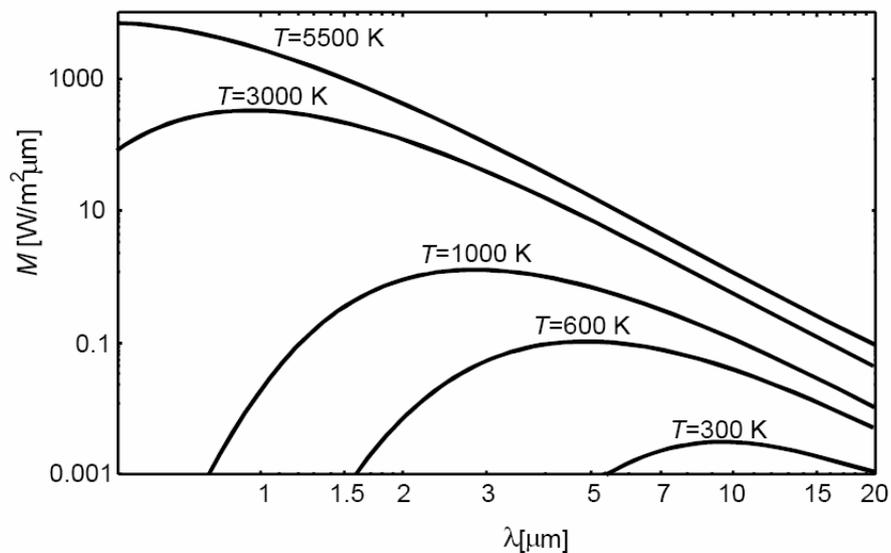
$c$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] é a velocidade da luz no vácuo =  $2,99792458 \times 10^8$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

$\lambda$  [ $\text{m}$ ] é o comprimento de onda.

$k$  [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ] é a constante de Boltzmann =  $1,380658 \times 10^{-23}$  [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ].

$T$  [ $\text{K}$ ] é a temperatura absoluta do Corpo Negro.

Utilizando a fórmula de Planck e levantando o gráfico para várias temperaturas obtém-se uma família de curvas como mostrado na Figura 9.



**Figura 9** – Exitância radiante espectral de um Corpo Negro para temperaturas de 300 K a 5500 K conforme a lei de Planck.

Observa-se pela Figura 9, que a energia irradiada é zero para comprimentos de onda próximos de zero, aumentando até um valor máximo e voltando a se aproximar de zero para comprimentos de onda mais longos.

A lei de Planck permite o cálculo da exitância radiante espectral de um Corpo Negro ( $M_{\lambda b}$ ) a determinados comprimentos de onda ( $\lambda$ ), porém, em certos casos

pode ser interessante determinar a temperatura ( $T$ ) quando é conhecida a exitância ( $M_{\lambda b}$ ). Isto pode ser feito utilizando a Equação 10.

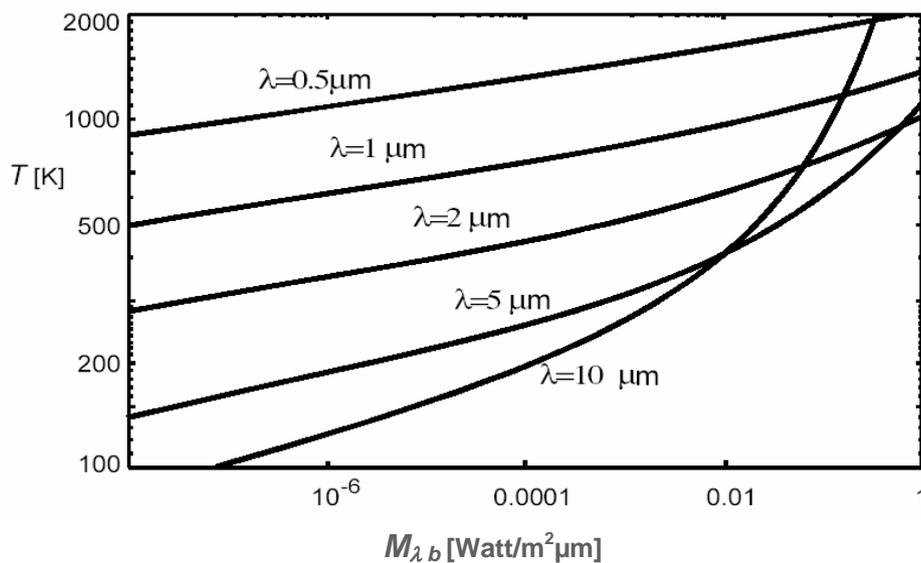
$$T = \frac{c_2}{\ln \left[ \frac{(c_1 + \lambda^5 M_{\lambda b})^\lambda}{(\lambda^5 M_{\lambda b})^\lambda} \right]} \quad (10)$$

Na qual,

$$c_1 = 3,741832 \times 10^4 \text{ [W.cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4\text{]}$$

$$c_2 = 14387,86 \times 10^4 \text{ [\mu m.K]}$$

Esta equação pode ser usada para calcular a temperatura de um objeto quando medindo a exitância ( $M_{\lambda b}$ ) em uma estreita faixa do espectro. O gráfico da Figura 10 mostra a temperatura ( $T$ ) em função da exitância ( $M_{\lambda b}$ ) para diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ).



**Figura 10** – Relação entre a temperatura ( $T$ ) e a exitância radiante espectral de um Corpo Negro ( $M_{\lambda b}$ ) para diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ).

---

#### 2.3.4.1.2. Lei do deslocamento de Wien

Ainda pela Figura 9 pode-se notar que quando a temperatura aumenta, a quantidade de radiação por unidade de área aumenta, assim como o comprimento de onda em que a intensidade de irradiação é máxima, desloca para comprimentos de onda mais curtos.

Derivando a fórmula de Planck com relação ao comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a resolvendo para o resultado máximo, obtém-se uma simples relação entre o comprimento de onda ( $\lambda_{máx}$ ), no qual a exitância radiante do Corpo Negro ( $M_b$ ) é máxima, e a temperatura do Corpo Negro:

$$\lambda_{máx} \cdot T = 0,0028978 \quad (11)$$

ou

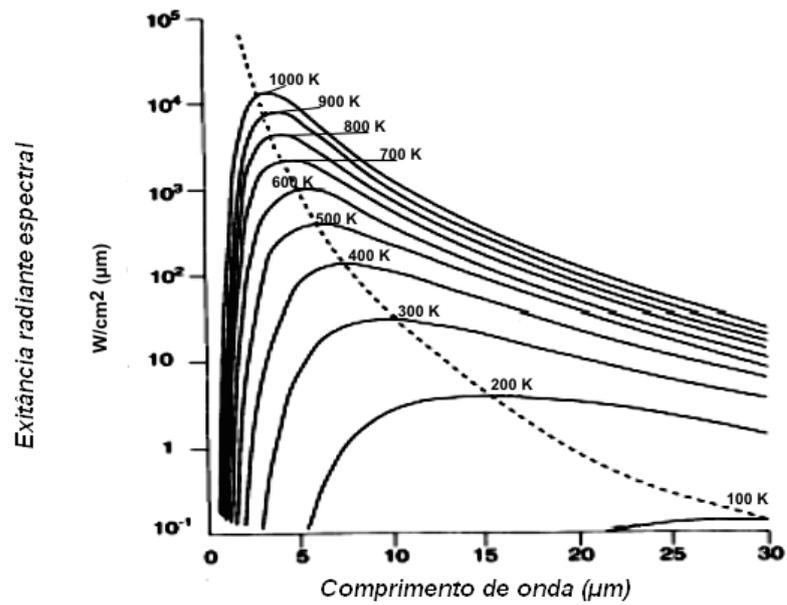
$$\lambda_{máx} = \frac{0,0028978}{T} \quad (12)$$

Na qual,

$\lambda_{máx}$  [m] é o comprimento de onda em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro em uma determinada temperatura  $T$ .

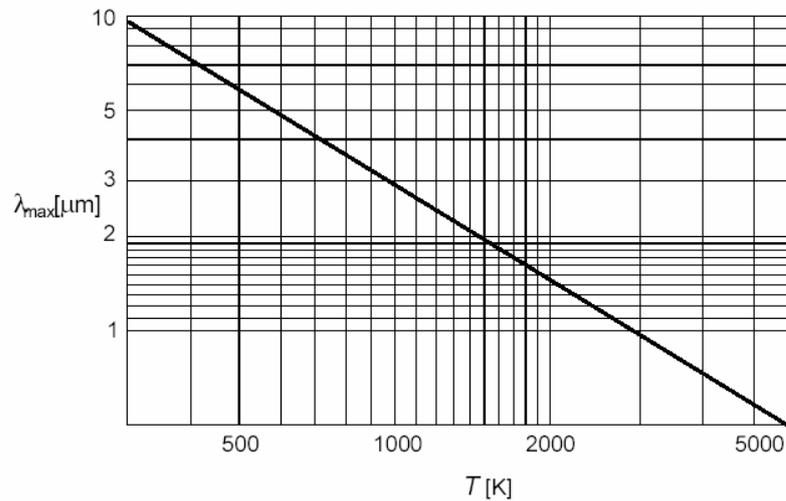
$T$  [K] é a temperatura absoluta do Corpo Negro.

Essa equação encontrada empiricamente por Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien em 1893, mostra que, à medida que  $T$  aumenta,  $\lambda_{máx}$  diminui. Desta maneira se explica porque ao aumentar a temperatura de um radiador térmico, ele torna-se primeiro vermelho e depois laranja ou amarelo.



**Figura 11** – Curvas de Planck em escala semi-log. A linha pontilhada representa o lugar geométrico da exitância radiante máxima ( $M_{b\text{máx}}$ ) para diferentes temperaturas ( $T$ ), de acordo com a lei do deslocamento de Wien.

A Figura 12 apresenta o gráfico do comprimento de onda em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) em função da temperatura  $T$ .



**Figura 12** – Comprimento de onda ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) em que ocorre a máxima exitância radiante do Corpo Negro ( $M_{b\text{máx}}$ ) em uma dada temperatura ( $T$ ).

---

### 2.3.4.1.3. Lei de Stefan-Boltzmann

A exitância radiante total ( $M_b$ ) de um Corpo Negro pode ser obtida integrando a fórmula de Planck sobre o comprimento de onda  $\lambda = 0$  até o comprimento de onda  $\lambda = \infty$ .

$$M_b = \int_0^{\infty} W_{\lambda b} d\lambda \quad (13)$$

Resultando em:

$$M_b = \sigma T^4 \quad (14)$$

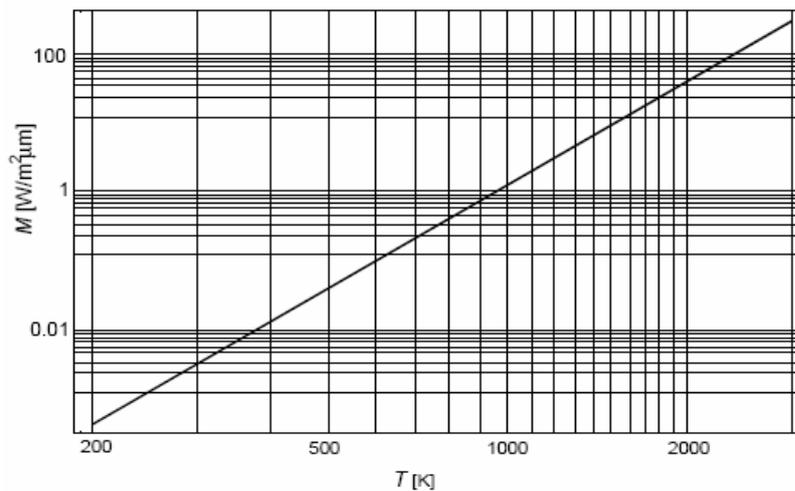
Na qual,

$M_b$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ] é a exitância radiante total.

$\sigma$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ] é a constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67051 \times 10^{-8}$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ].

$T$  [K] é a temperatura absoluta.

Graficamente, a exitância radiante total ( $M_b$ ) representa a área abaixo da curva de Planck para uma temperatura específica. A Figura 13 mostra a exitância radiante total do Corpo Negro ( $M_b$ ) em uma dada temperatura ( $T$ ).



**Figura 13** – Exitância radiante total do Corpo Negro ( $M_b$ ) em uma dada temperatura ( $T$ ).

---

#### 2.3.4.2. Leis da Radiação para emissores reais

As leis de radiação descritas até o momento se referem apenas 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  $\alpha$ .
- Uma fração da radiação incidente pode ser refletida  $\rho$ .
- Uma fração da radiação incidente pode ser transmitida  $\tau$ .

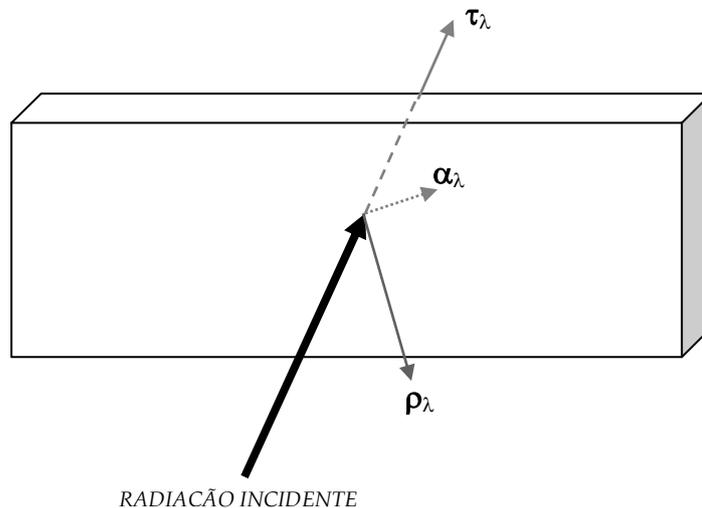
A intensidade desses fenômenos depende do comprimento de onda da radiação incidente, portanto:

- A absorção espectral  $\alpha_\lambda$  é a relação da energia espectral absorvida por um corpo pela radiação incidente sobre ele.
- A reflexão espectral  $\rho_\lambda$  é a relação da energia espectral refletida por um corpo pela radiação incidente sobre ele.
- A transmissão espectral  $\tau_\lambda$  é a relação da energia espectral transmitida por um corpo pela radiação incidente sobre ele.

A soma dos três coeficientes  $\alpha_\lambda$ ,  $\rho_\lambda$  e  $\tau_\lambda$  para um mesmo comprimento de onda  $\lambda$ , resulta na radiação total:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (15)$$

A Figura 14 mostra a radiação incidente em um objeto real e as possíveis frações de radiação absorvida ( $\alpha_\lambda$ ), refletida ( $\rho_\lambda$ ) e transmitida ( $\tau_\lambda$ ).



**Figura 14** – Representação gráfica da radiação incidente em um objeto real e as possíveis frações de radiação absorvida ( $\alpha_\lambda$ ), refletida ( $\rho_\lambda$ ) e transmitida ( $\tau_\lambda$ ).

Para objetos opacos,  $\tau_\lambda = 0$  e a relação se simplifica para:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (16)$$

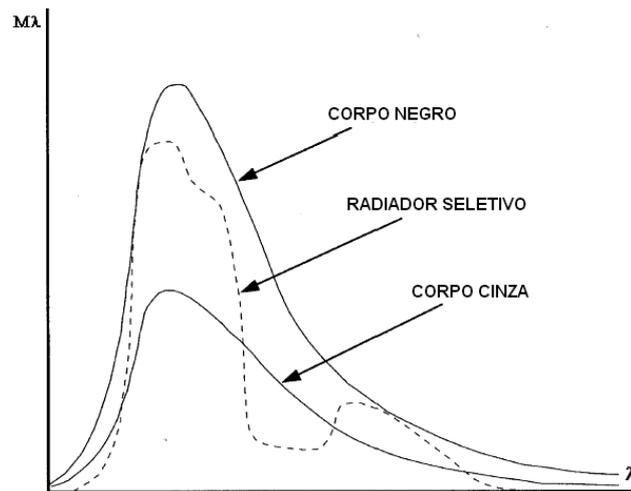
Uma outra propriedade chamada de emissividade ( $\epsilon$ ) descreve a fração da exitância radiante produzida por uma superfície qualquer em relação com a produzida por um Corpo Negro à mesma temperatura, logo a emissividade espectral ( $\epsilon_\lambda$ ) é a relação da exitância radiante espectral de uma superfície pela exitância radiante de um Corpo Negro à mesma temperatura e comprimento de onda:

$$\epsilon_\lambda = \frac{M_{\lambda o}}{M_{\lambda b}} \quad (17)$$

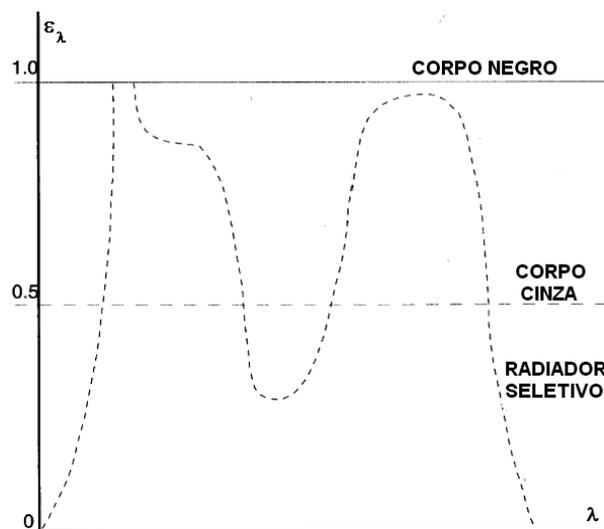
De modo geral, existem três tipos de fontes de radiação, caracterizados pelo modo como a exitância radiante espectral varia com o comprimento de onda:

- 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  $\varepsilon$  varia com comprimento de onda.

As curvas da distribuição espectral e a emissividade espectral dessas três fontes de radiação são apresentadas na Figura 15 e na Figura 16, respectivamente.



**Figura 15** – Densidade radiante espectral dos três tipos de fontes de radiação.



**Figura 16** – Emissividade espectral dos três tipos de fontes de radiação.

---

De acordo com a lei de Kirchhoff, a capacidade de um corpo em absorver energia incidente em um determinado comprimento de onda  $\lambda$  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 em emitir e absorver radiação.

#### 2.3.4.2.1. Efeito Cavidade

Cada vez que a radiação é refletida, sua intensidade  $I$  é reduzida pela refletância  $\rho$  de sua superfície. Se a radiação é refletida  $N$  vezes, a intensidade resultante é:

$$I = I_o \cdot \rho^N \quad (18)$$

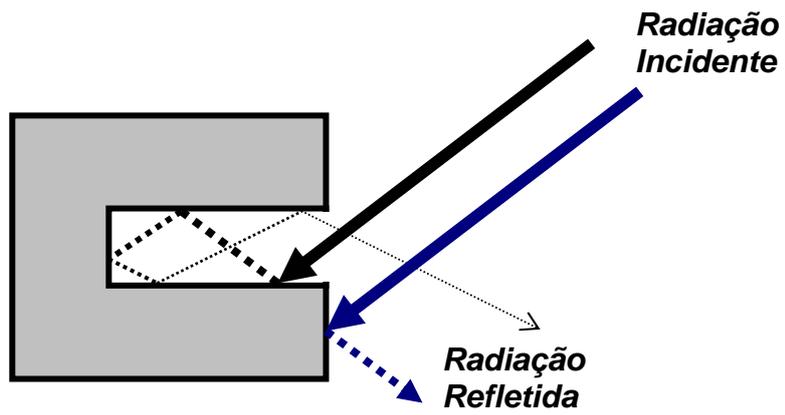
Na qual,

$I$  [W.s<sup>-1</sup>] é a intensidade final.

$I_o$  [W.s<sup>-1</sup>] é a intensidade inicial

$N$  é o número de vezes que a radiação é refletida.

Múltiplas reflexões têm um enorme efeito na intensidade refletida, (Holst, 2000). Esse fato, conhecido como “efeito cavidade”, funciona como um meio de aumentar a emissividade de superfícies de baixa emissividade como é ilustrado na Figura 17.



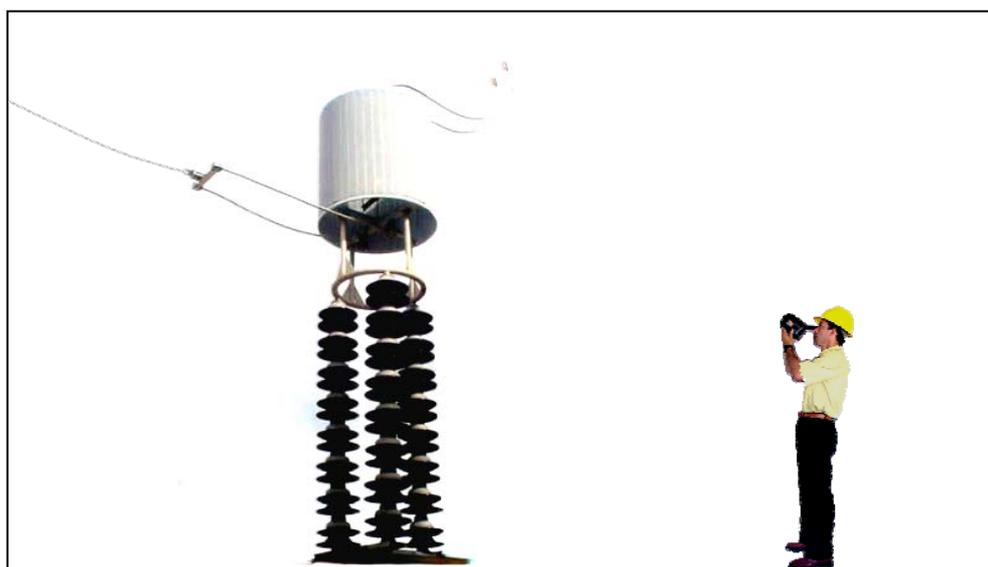
**Figura 17** – Radiação incidindo em uma superfície de baixa emissividade.

---

### 3. LIMITAÇÕES DA TERMOGRAFIA

Equipamentos de uma subestação de energia elétrica tipicamente podem passar por problemas relacionados com alta resistência elétrica, curto circuitos, circuitos abertos, aquecimento indutivo, harmônicos, desbalanceamento de carga, sobrecarga e componentes instalados incorretamente. Problemas que geralmente são detectados pela termografia.

A Figura 18 apresenta uma típica cena de uma inspeção termográfica em subestação de alta tensão, na qual estão presentes os principais personagens dessa ação: Inspetor, Termovisor, equipamento sob inspeção e o meio que os envolve.

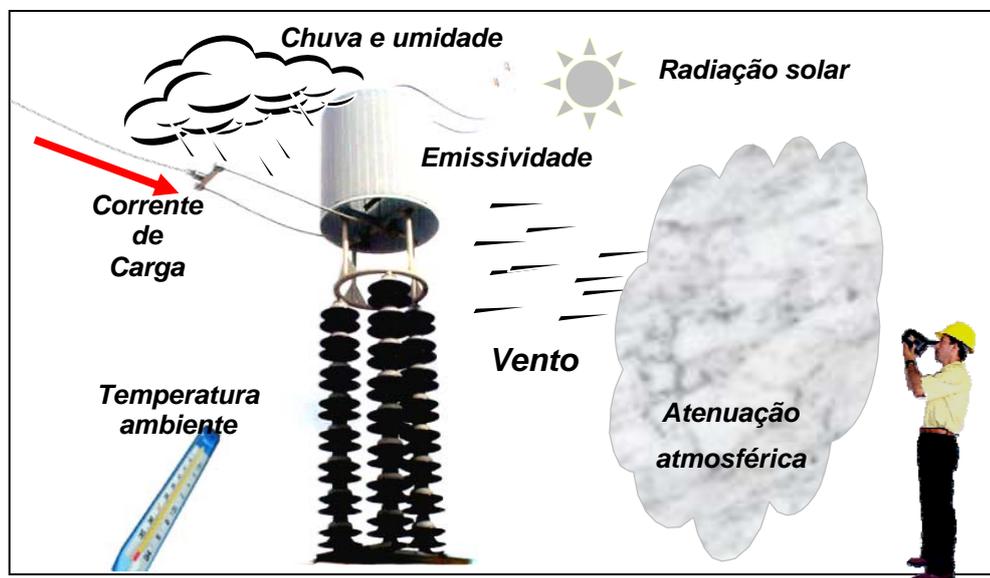


**Figura 18** – Inspeção termográfica em um equipamento de subestação.

Uma atividade aparentemente simples, na qual o inspetor opera o Termovisor, aponta-o para o equipamento sob inspeção e detecta o defeito através da análise do termograma obtido. Porém, existem influências e limitações neste processo que podem induzir a um diagnóstico incorreto ou até mesmo incapacitar a detecção do defeito. A baixa emissividade dos componentes sob inspeção, a variação da corrente de carga do equipamento inspecionado e componentes de pequena dimensão a grandes distâncias são exemplos de fatores que dificultam a inspeção termográfica. Em ambientes abertos, além dos fatores citados, influências ambientais como a radiação solar, a atenuação atmosférica, o vento, mudanças na

---

temperatura ambiente, chuva e umidade podem estar presentes. Levando tudo isso em consideração, uma representação mais detalhada de uma inspeção termográfica é mostrada na Figura 19.



**Figura 19** – Inspeção termográfica em um equipamento de subestação com as possíveis influências.

Também é importante ressaltar que, Termovisores não medem temperatura diretamente, eles detectam a radiação térmica que atinge seu detector, que por sua vez, gera um sinal de saída, em função dessa radiação, que é processado e transformado em imagens visíveis e leituras de temperatura. Porém, a radiação detectada pode se originar não apenas do objeto sob inspeção, mas de outras fontes envolvidas no meio em que o objeto está inserido. Além disso, o valor da intensidade do sinal de saída, gerado pelo detector, associado a alguns parâmetros fornecidos pelo operador do Termovisor, como emissividade, distância objeto ao Termovisor e outros parâmetros relativos ao ambiente são necessários para o cálculo da temperatura do objeto sob inspeção. Assim sendo, a exatidão da medida de temperatura depende da calibração do Termovisor e da exatidão dos parâmetros informados pelo operador.

Nesse cenário mais complexo, as limitações e características dos personagens envolvidos na inspeção termográfica devem ser consideradas para uma análise consistente e confiável das anomalias térmicas encontradas.

---

### 3.1. Inspetor

Talvez o principal fator de limitação da inspeção termográfica seja o próprio inspetor de termografia (Termografista). Sua motivação para a realização da inspeção pode interferir diretamente nos resultados, tanto com relação à quantidade de anormalidades encontradas, bem como na qualidade das imagens térmicas obtidas. Além disso, ele deve conhecer a operação e as características do Termovisor utilizado, assim como o funcionamento dos equipamentos sob inspeção. Deve ter ciência da forte influência da radiação solar, do vento e da chuva e como eles afetam drasticamente a distribuição térmica dos objetos em ambientes abertos. Deve conhecer a teoria básica que envolve a radiação infravermelha e os princípios de transferência de calor, conhecimentos essenciais para uma análise correta dos termogramas e do funcionamento dos equipamentos inspecionados. Resumindo, para obter resultados consistentes, o inspetor deve estar motivado e ser qualificado para a inspeção, ter um alto nível de treinamento e conhecimento, para que possa ser capaz de detectar todas as falhas possíveis e discernir entre um defeito real e uma falsa anomalia, o que pode economizar milhares de Reais em paradas não programadas e/ou paradas e manutenções desnecessárias, (Santos, 2005). Portanto, o investimento em treinamento e qualificação torna-se importante e necessário na redução dos erros inseridos pelo inspetor de termografia nos resultados da inspeção.

Com a finalidade de orientar no treinamento, qualificação e certificação de inspetores de termografia e reduzir suas limitações, normas têm sido criadas, dentre elas pode-se citar:

- ISO-9712 – The International Organization for Standardization - ISO
- ISO -18436 – The International Organization for Standardization - ISO
- SNT-TC-1A – American Society for Nondestructive Testing – ASNT

Em 2005 foi formado no Brasil o Grupo de Trabalho responsável pela elaboração da norma brasileira para certificação de inspetores de termografia. A entidade responsável pela coordenação do Grupo de Trabalho é a Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos – ABENDE, credenciada pela Associação

---

Brasileira de Normas Técnicas – ABNT para elaboração de normas relativas a ensaios não destrutivos.

### 3.2. Termovisor

O Termovisor é o principal instrumento de uma inspeção termográfica. Através dele a radiação infravermelha emitida pelo objeto é detectada e convertida em imagem visível e em leituras de temperatura (Figura 20).

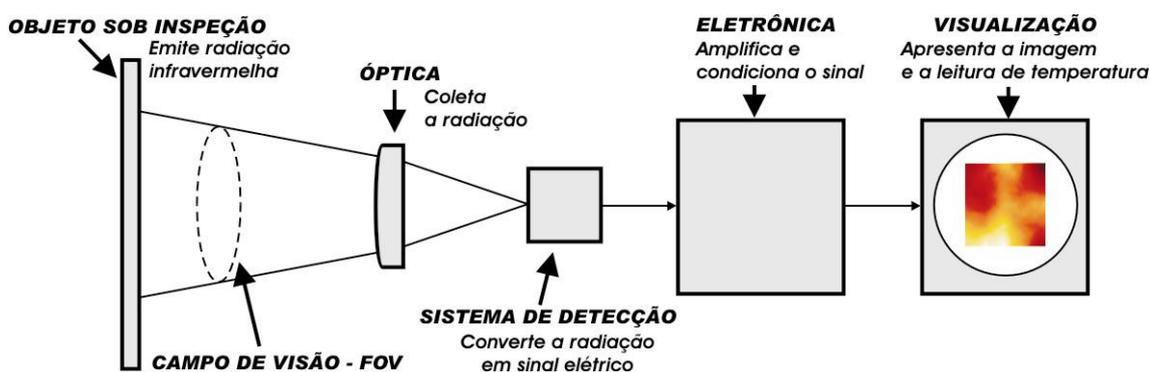


Figura 20 – Diagrama simplificado de um Termovisor genérico.

A escolha correta do Termovisor para a inspeção em subestações depende do conhecimento de certas características técnicas do Termovisor, do ambiente onde ele será utilizado e do tipo de componente que será inspecionado. Por exemplo:

- A temperatura do objeto a ser inspecionado define a faixa de temperatura e a melhor faixa de comprimento de onda que o Termovisor deve responder.
- A distância e dimensão do objeto a ser inspecionado define a resolução espacial e de medida.
- A temperatura do ambiente de inspeção define a faixa de temperatura de operação do Termovisor; etc.

Assim sendo, é importante conhecer as características do Termovisor e direcioná-las à aplicação em questão, que nesse caso é a inspeção em subestações de alta tensão em ambientes abertos.

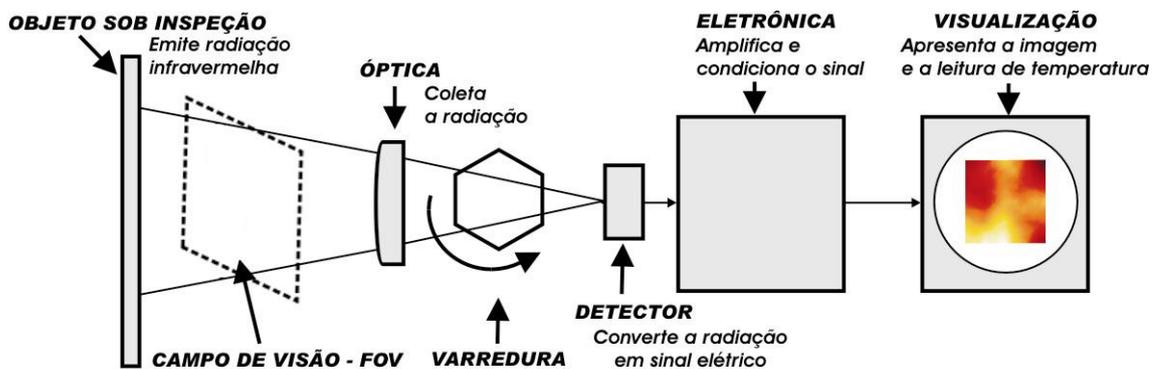
---

### 3.2.1. Tecnologias de detecção

Os Termovisores podem se utilizar basicamente de dois tipos de tecnologias de detecção:

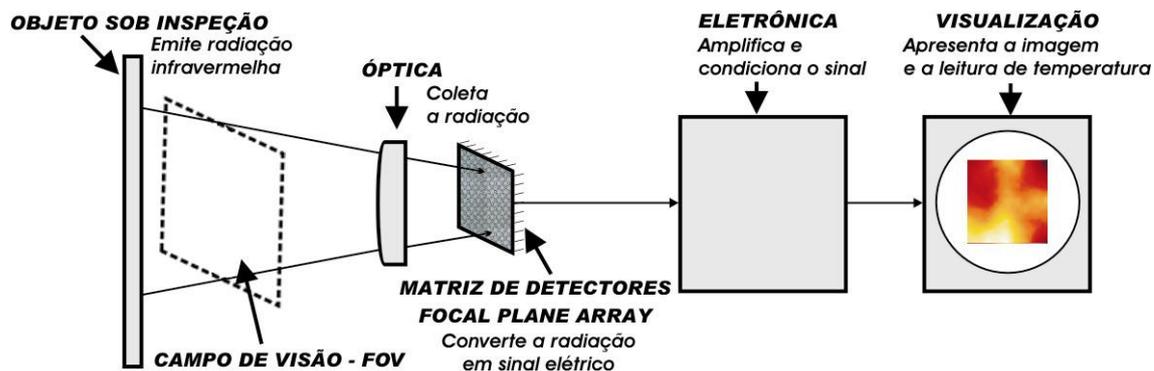
- Sistema de detecção por varredura (*Scanning system*).
- Sistema fixo de detecção ou sem varredura (*Staring system*).

O sistema de detecção por varredura 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 (Figura 21). Por outro lado, essa varredura limita a taxa de repetição dos quadros (*Frame Rate*) e prejudica a qualidade da imagem.



**Figura 21** - Esquema simplificado de um Termovisor com sistema de detecção por varredura.

O sistema fixo de detecção ou sem varredura, também conhecido como Matriz de plano focal (*Focal Plane Array – FPA*) utiliza-se de uma matriz bi-dimensional 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 & Moore, 2001). A Figura 22 mostra o esquema simplificado de um Termovisor com sistema de detecção fixo (FPA).



**Figura 22** – Esquema simplificado de um Termovisor com sistema fixo de detecção (FPA).

Dos componentes que compõem o Termovisor, o detector de infravermelho é o mais importante e é fator limitante para o desempenho do Termovisor. 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 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 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).

A Figura 23 apresenta a resposta espectral de alguns detectores de infravermelho.

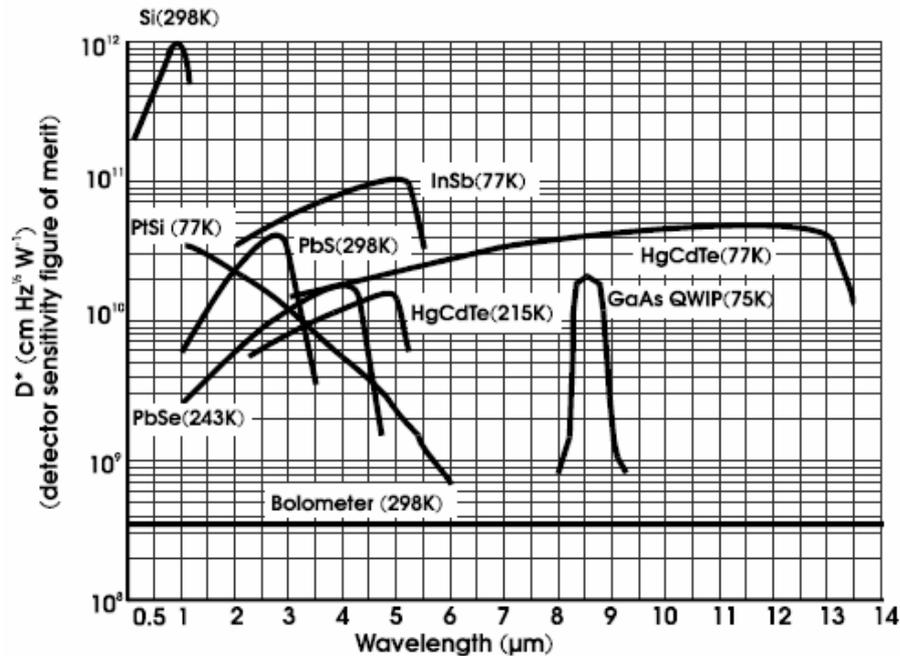
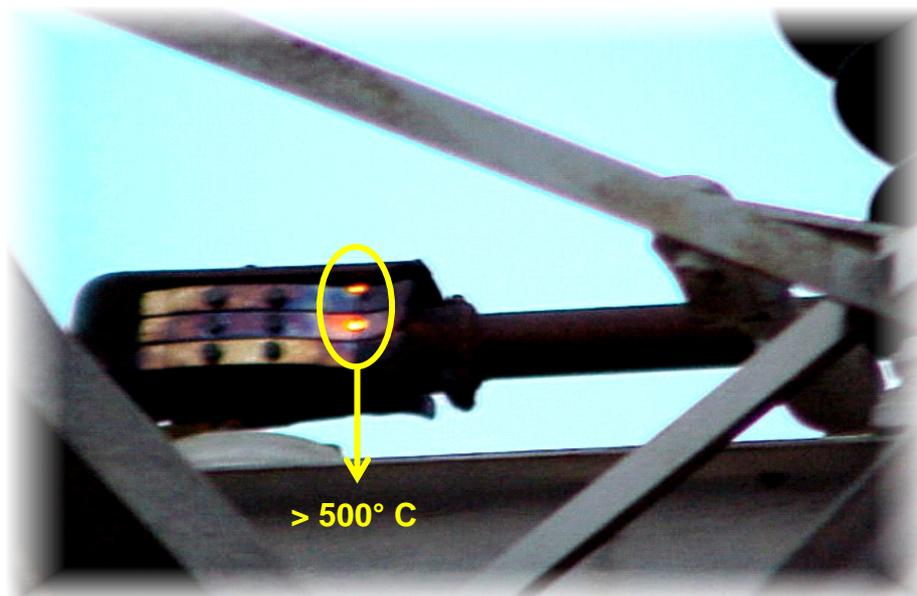


Figura 23 – Resposta espectral de alguns detectores de infravermelho.

### 3.2.2. Faixa de temperatura

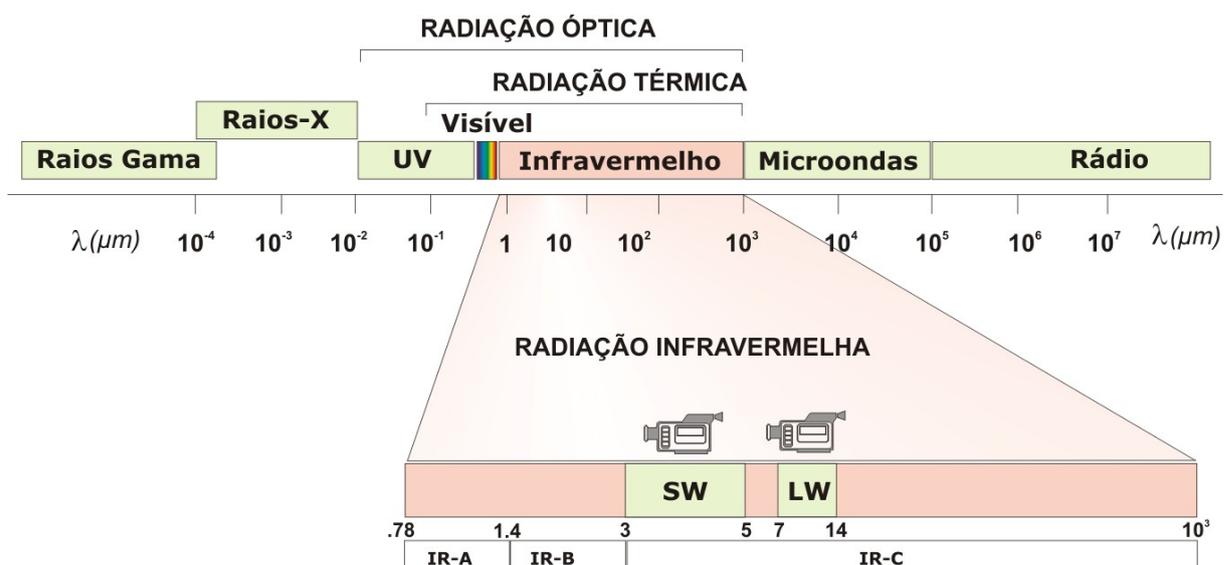
É a faixa de medição de temperatura do Termovisor. No caso de subestações de alta tensão, a menor temperatura encontrada nos equipamentos e conexões vai estar próxima à temperatura ambiente e a maior pode chegar, em casos extremos, à temperatura de fusão dos metais utilizados (ex.: alumínio = 657,7° C). Apesar disso, a faixa de -20° C a 500° C, normalmente comercializada, é suficiente para as inspeções em subestações. A razão é que raramente o limite máximo da faixa (500° C) será atingido, além de ser uma temperatura muito alta e que deve ser evitada em sistemas elétricos, acima dessa temperatura parte da radiação emitida pelo objeto começa a entrar na faixa de comprimento de onda visível (lei de deslocamento de Wien), podendo ser detectada sem o auxílio de um Termovisor. Na Figura 24 é apresentado um exemplo dessa condição.



**Figura 24** – Seccionadora com os contatos acima de 500° C tornando visível parte da radiação emitida.

### 3.2.3. Faixa espectral

As faixas de comprimento de onda utilizadas para a fabricação de Termovisores aplicáveis ao sistema elétrico são de 3  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$  e de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ , como pode ser visto na Figura 25.



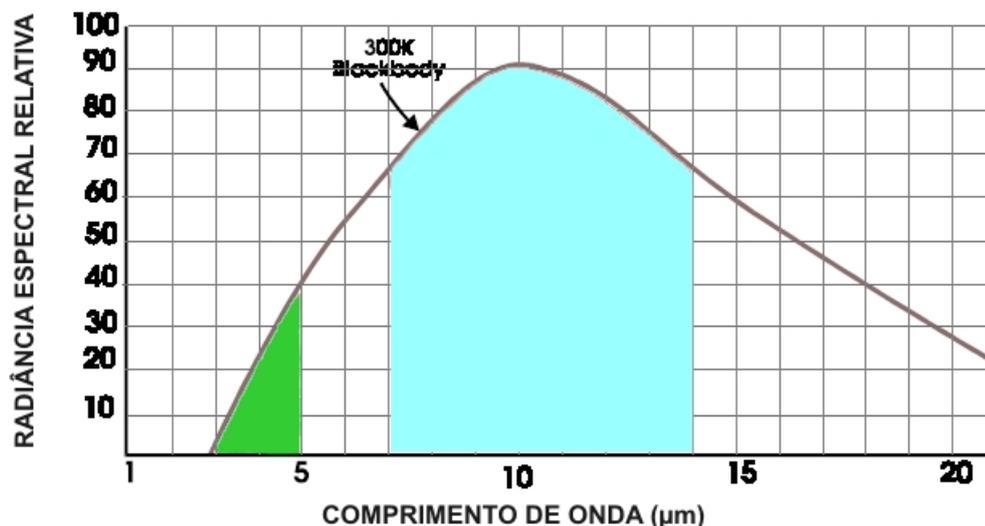
**Figura 25** – Espectro eletromagnético e as faixas espectrais utilizadas na fabricação de Termovisores comerciais.

Nessas faixas a transmitância da atmosfera à radiação infravermelha é alta. Dentre elas, a faixa de 8 a 14  $\mu\text{m}$  é a mais recomendada por apresentar uma transmitância ainda maior, (Ghosh & Galeski, 1994). Além disso, essa faixa é menos sensível a falsos pontos de alta temperatura resultantes do reflexo solar e para as temperaturas normalmente encontradas em sistemas elétricos, a radiação emitida nessa faixa é maior, como pode ser observado na Tabela 4, (Rogalski & Chrzanowski, 2002).

**Tabela 4** – Energia disponível nas faixas de comprimento de onda dos Termovisores

<b>Região de infravermelho (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Radiação solar ao nível do solo (<math>\text{W}/\text{m}^2</math>)</b>	<b>Emissão de um Corpo Negro a 290 K (<math>\text{W}/\text{m}^2</math>)</b>
3 a 5	24	4,1
8 a 13	1,5	127

A Figura 26 mostra a radiação emitida por um objeto a uma temperatura de 300 K (26,8° C) em função do comprimento de onda e destaca as faixas de 3 a 5  $\mu\text{m}$  e 8 a 14  $\mu\text{m}$  e suas respectivas energias disponíveis, (Kaplan, 2000).

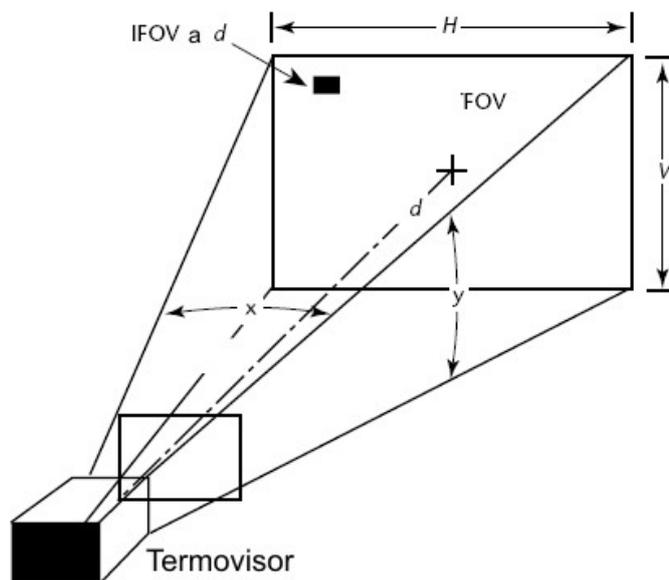


**Figura 26** – Energia disponível nas faixas de 3 a 5  $\mu\text{m}$  e de 8 a 14  $\mu\text{m}$  para um objeto a uma temperatura de 300 K (26,8° C).

---

### 3.2.4. Resolução espacial

Define o menor detalhe de imagem que pode ser percebido. 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 (Figura 27). Geralmente o FOV é declarado em graus pelo fabricante.



**Figura 27** – Representação do Campo de Visão (FOV) e do Campo de Visão Instantâneo (IFOV) de um Termovisor.

O IFOV pode ser calculado a partir da Equação 19.

$$IFOV = \frac{FOV}{Pix} \quad (19)$$

Na qual,

*IFOV* [mrad] é o Campo de Visão Instantâneo.

*FOV* [mrad] é o Campo de Visão.

---

*Pix* é o número de pixels.

Por exemplo, um Termovisor com Campo de Visão – FOV igual a 24° x 18° e 320 x 240 pixels tem um IFOV igual a:

$$IFOV_{\text{horizontal}} = 24 \times 17,45 / 320 = 1,3 \text{ mrad}$$

$$IFOV_{\text{vertical}} = 18 \times 17,45 / 240 = 1,3 \text{ mrad}$$

O IFOV é um parâmetro geralmente fornecido pelos fabricantes e possibilita, por meio da Equação 20, o cálculo da distância máxima que um objeto de tamanho determinado pode ser detectado, (Snell, 2005).

$$Dist_d = \frac{D}{IFOV} \quad (20)$$

Na qual,

$Dist_d$  [m] é a distância máxima que um objeto de tamanho  $D$  pode ser detectado pelo Termovisor.

$D$  [m] é o tamanho do objeto sob inspeção.

$IFOV$  [rad] é o Campo de Visão Instantâneo.

Por exemplo, um Termovisor com IFOV igual a 1,3 mrad pode detectar um objeto de 0,05 m x 0,05 m a uma distância máxima de:

$$Dist_d = 0,05 / 1,3 \times 10^{-3} = 38,46 \text{ m.}$$

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 essa resolução, em contrapartida estreitam o campo de visão do Termovisor, como mostrado na Figura 28.



**Figura 28** – Filtro de onda observado a uma mesma distância com lentes com Campo de Visão de 24°, 12° e 7°.

### 3.2.5. Resolução de medida

Define o menor objeto que pode ter sua temperatura medida com exatidão a uma determinada distância. Raramente é declarado 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 estará fora da sua resolução de medida. Quando fornecido pelo fabricante é especificado em radianos e definido como “Campo de Visão Instantâneo de Medida” (Measuring Instantaneous Field of View – MIFOV ou IFOV<sub>m</sub>). 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 severidade do defeito (Snell, 2005).

Para o cálculo da distância máxima em que um objeto de tamanho determinado pode ter sua temperatura lida com exatidão, a Equação 21 pode ser utilizada.

$$Dist_m = \frac{D}{MIFOV} \quad (21)$$

Na qual,

$Dist_m$  [m] é a distância máxima que um objeto de tamanho  $D$ , pode ter sua temperatura medida com exatidão.

---

$D$  [m] é o tamanho do objeto sob inspeção.

$MIFOV$  [rad] é o Campo de Visão Instantâneo de Medida.

Aproveitando o exemplo anterior, no qual um Termovisor possui IFOV igual a 1,3 mrad e supondo que a resolução de medida é três vezes inferior à resolução espacial, um objeto de 0,05 m x 0,05 m só poderá ter sua temperatura medida com exatidão a uma distância máxima de:

$$Dist_m = 0,05 / 1,3 \times 10^{-3} / 3 = 12,8 \text{ m}$$

Portanto, no exemplo apresentado, o mesmo objeto pôde ser detectado por um Termovisor de IFOV igual a 1,3 mrad a uma distância de 38,46 m, mas para ter sua temperatura medida com exatidão será necessário encurtar a distância para apenas 12,8 m. Essa situação, muitas vezes desconhecida dos Termografistas, leva a grandes erros na medida de temperatura e conseqüentemente na análise e diagnóstico do defeito.

Existem duas alternativas para eliminar a influência da distância devido à resolução de medida.

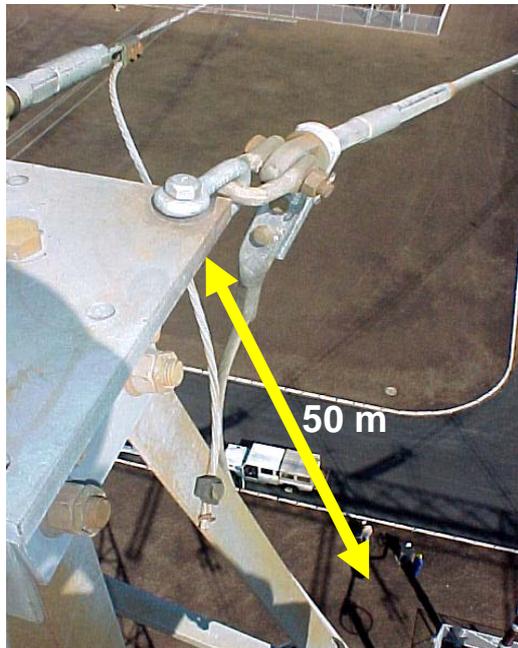
A primeira é aproximar-se do componente sob inspeção até a uma distância na qual a temperatura possa ser medida com exatidão. Em subestações de alta tensão isso nem sempre é possível porque distâncias limites de segurança devem ser respeitadas.

A segunda alternativa é melhorar a resolução de medida com o uso de lentes telescópicas que podem ser definidas através da Equação 21. Abaixo é apresentada uma situação para cálculo da lente.

Supondo que o ponto mais alto, sujeito a defeito, que pode ser encontrado nas subestações de alta tensão, seja o grampo que fixa o cabo pára-raio na estrutura da torre (Figura 29) e considerando que o grampo mais alto pertença às subestações de 750 kV, foram utilizados os dados de projeto de uma subestação de 750 kV, pertencente ao sistema de transmissão de Itaipu, para o cálculo de uma

---

lente telescópica que pudesse atender a todas inspeções termográficas nas subestações brasileiras.



**Figura 29** - Grampo que fixa o cabo pára-raio na estrutura da torre.

Dados:

Distância do solo ao grampo do pára-raio = 50 metros

Diâmetro da conexão do grampo = 0,07 metros

Supondo que o Termografista tenha uma altura de 1,7 metros e esteja a uma distância de 2 metros da base da torre resulta em:

$$Dist = (50 - 1,7)^2 + 2^2 = 52,3 \text{ m}$$

$$Dist = \frac{D}{MIFOV} \Rightarrow MIFOV = \frac{D}{Dist} = 0,07 / 52,3 = 1,34 \text{ mrad}$$

Logo, considerando um Termovisor com o IFOV três vezes menor que o MIFOV e com 320 x 240 pixels, a lente telescópica que deve ser usada pode ser calculada utilizando a Equação 19.

---

$$\text{FOV}_{\text{horizontal}} = (1,34 / 3) \times 320 / 17,45 = 8,2^\circ$$

$$\text{FOV}_{\text{vertical}} = (1,34 / 3) \times 320 / 17,45 = 8,2^\circ$$

Comercialmente pode ser encontrada a lente de  $7^\circ \times 5,3^\circ$  que atenderia o caso extremo que foi calculado e praticamente todas as situações encontradas nas subestações de alta tensão brasileiras. Em situações normalmente encontradas, em que a distância não ultrapassa os 40 metros e as conexões inspecionadas têm uma dimensão da ordem de 0,1 m x 0,1 m, ou maior, a lente de  $12^\circ \times 9^\circ$  seria suficiente.

### **3.2.6. Sensibilidade térmica**

Refere-se a menor diferença de temperatura que pode ser detectada. Depende das propriedades do sistema óptico, da resposta do detector e do nível de ruído do 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*).

A sensibilidade térmica é inversamente proporcional à temperatura em que o componente 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  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$  tendem a ter sua sensibilidade mais prejudicada do que Termovisores com resposta espectral de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ , (Holst, 2000).

### **3.2.7. Taxa de repetição de quadro (Frame Rate)**

É o número de vezes que uma imagem completa da cena observada é atualizada pelo Termovisor em um segundo. Baixas taxas de repetição de quadro produzem uma imagem borrada quando existe um movimento relativo entre o Termovisor e o objeto sob inspeção.

---

### **3.2.8. Temperatura de operação**

É a faixa de temperatura em que o fabricante garante as especificações fornecidas e o adequado funcionamento do Termovisor. Com relação à inspeção em subestação em ambientes abertos deve-se observar a variação da temperatura ambiente. No Brasil, onde a temperatura máxima não ultrapassa os 44° C e a mínima raramente desce abaixo dos -14° C, (Barsa, 1993), a faixa de temperatura de -15° C a 50° C, geralmente comercializada, atende adequadamente.

### **3.2.8. Termovisor recomendado para inspeções em subestações de alta tensão**

Observando as características citadas anteriormente recomenda-se que um Termovisor utilizado em inspeção de subestações de alta tensão possua as especificações abaixo:

- Ser portátil e leve para não causar a fadiga do inspetor, o que poderia limitar a duração e a qualidade da inspeção em grandes áreas.
- Sistema fixo de detecção (Detector de Matriz de Plano Focal - *Focal Plane Array*), evitando as partes móveis e mecânicas utilizadas no sistema de detecção por varredura.
- Detector de microbolômetro, menor consumo de energia e operação do detector em temperatura ambiente, não havendo necessidade de resfriamento a temperaturas abaixo de zero e eliminando o uso de refrigerantes líquidos.
- Faixa de temperatura de -20° C a 500°C.
- Faixa espectral de 8 µm a 14µm.
- Resolução espacial e de medida devem atender às distâncias e dimensões dos alvos encontrados na subestação. Na maioria das situações a lente de 12° x 9° seria suficiente.
- Sensibilidade térmica de 80 mK (0,08° C).
- Taxa de repetição dos quadros (Frame Rate) de 60 Hz.
- Temperatura de operação de -15° C a 50° C.

---

A capacidade de armazenar imagens e voz é também importante na agilização da inspeção e no pós-processamento dos dados.

### **3.3. Equipamento / componente sob inspeção**

A necessidade de uma operação confiável, segura e contínua dos equipamentos de uma subestação é o motivo principal da realização de uma inspeção termográfica. O bom resultado da inspeção depende, em grande parte, do conhecimento do funcionamento do equipamento sob inspeção e do comportamento térmico de seus componentes. Sem esse conhecimento, torna-se difícil determinar o que está dentro da normalidade e o que é um problema. Portanto, influências relacionadas ao equipamento sob inspeção, como a emissividade e a corrente de carga devem ser discutidos.

#### **3.3.1. Emissividade**

Metais como alumínio, cobre e aço são muito utilizados em equipamentos de uma subestação devido às suas características de condutividade, sendo o alumínio o preferido em ambientes abertos pela alta resistência à corrosão atmosférica e menor custo em relação ao cobre, (Burndy, 1995). Entretanto, esses metais geralmente possuem uma superfície de baixa emissividade, dificultando a inspeção com a termografia infravermelha.

A emissividade é uma propriedade de superfície que determina a capacidade dessa superfície em emitir radiação. Os valores de emissividade vão de zero (refletor perfeito) a um (emissor perfeito - Corpo Negro). A emissividade pode variar com a qualidade da superfície, com o comprimento de onda, com o formato do objeto, com a temperatura e com o ângulo de visão, (Epperly, 1997). Como os Termovisores não medem temperatura diretamente e sim radiação, as leituras de temperatura fornecidas pelo Termovisor tornam-se muito dependentes dessa propriedade, como mostra a Equação 22 que representa a radiância emitida por um objeto opaco e medida pelo Termovisor, (Madding, 2002).

$$L_m = \varepsilon.L.(T_{objeto}) + (1 - \varepsilon).L.(T_{fundo}) \quad (22)$$

---

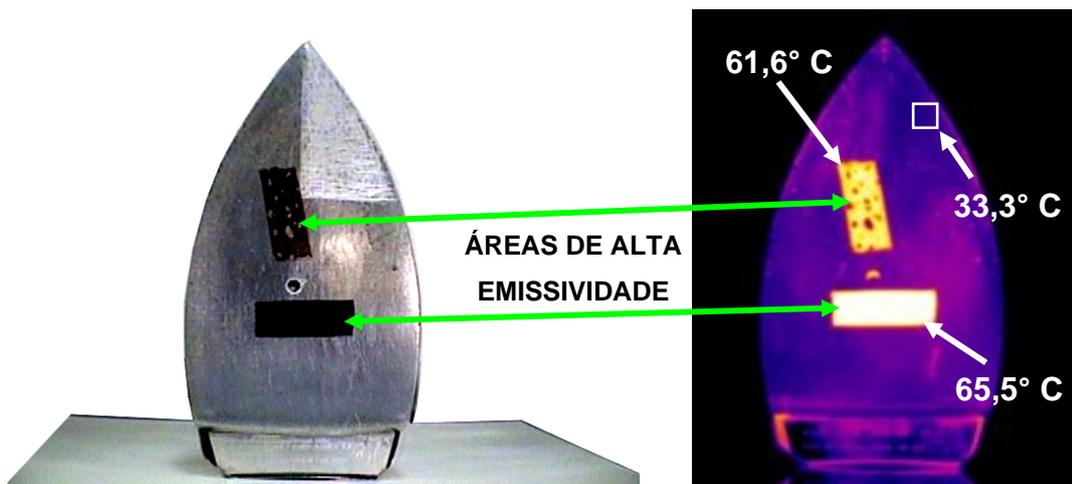
Na qual,

$L_m [W.m^{-2}.sr^{-1}]$  é a radiância medida pelo Termovisor.

$\varepsilon.L.(T_{objeto}) [W.m^{-2}.sr^{-1}]$  é a radiância emitida pelo objeto.

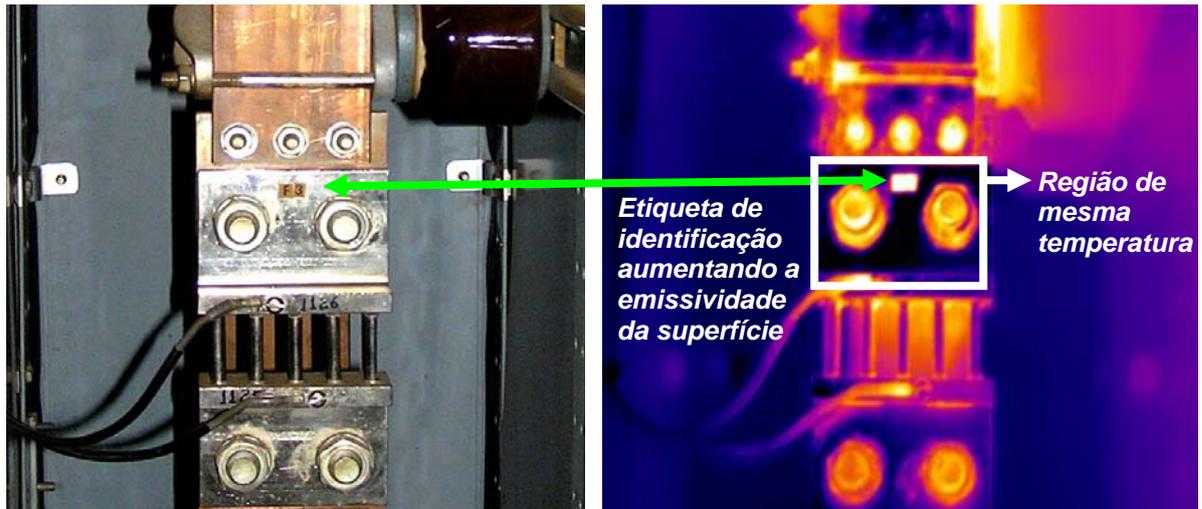
$(1-\varepsilon).L.(T_{fundo}) [W.m^{-2}.sr^{-1}]$  é a radiância refletida pelo objeto.

O efeito da emissividade na radiação emitida por uma superfície e detectada por um Termovisor pode ser observado na Figura 30, na qual um ensaio realizado em laboratório mostra a superfície de um ferro de passar roupa com a emissividade de algumas áreas alterada pela mudança do material de superfície ou pelo seu estado (polida, suja ou áspera). Nota-se que apesar de toda a superfície estar à mesma temperatura, as áreas com maior emissividade se apresentam na imagem termográfica com maior temperatura (áreas mais claras).



**Figura 30** – Imagem visível e térmica da superfície de um ferro de passar roupa com diferentes emissividades.

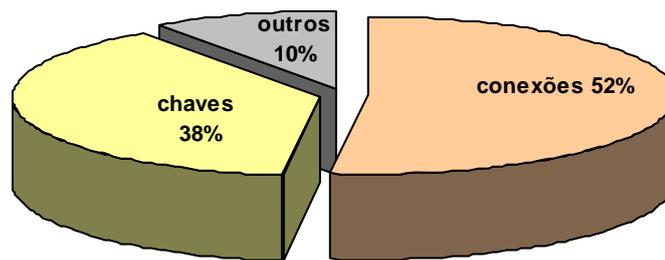
A Figura 31 mostra uma situação real de uma conexão com alta temperatura e baixa emissividade, na qual se pode observar o aumento da emissividade de uma pequena área com a aplicação de uma fita de identificação. É importante lembrar, que toda a região demarcada se encontra em uma mesma temperatura.



**Figura 31** – Conexão com alta temperatura e baixa emissividade

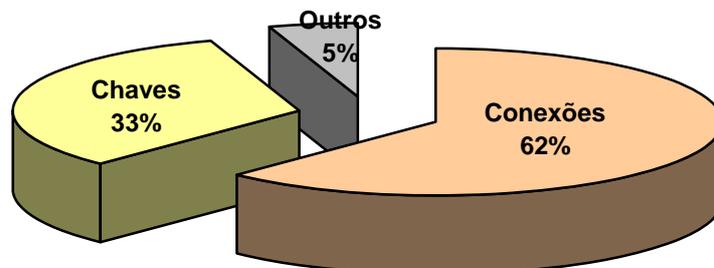
Como pode ser observado nas figuras acima, a emissividade é um fator que deve ser fortemente considerado nas inspeções. Embora os Termovisores tenham um ajuste de emissividade para compensar essa influência, em subestações de alta tensão existe uma grande dificuldade em determinar a emissividade correta dos vários equipamentos e conexões envolvidos. Além disso, o valor da emissividade pode sofrer uma grande variação dependendo de fatores como sujeira, oxidação, corrosão, etc. Assim sendo, o melhor modo de reduzir essa influência seria o incremento da emissividade dos componentes inspecionados para um valor o mais próximo possível da unidade. Antes, porém, de apresentar uma proposta para atingir esse objetivo, é importante mostrar duas pesquisas realizadas por duas grandes empresas do setor elétrico brasileiro, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – Chesf e Furnas Centrais Elétricas – FURNAS. Nessas pesquisas um estudo sobre os principais componentes defeituosos encontrados pela inspeção termográfica é apresentado.

Na Chesf, em 4379 inspeções realizadas, os resultados encontrados foram os seguintes:



**Figura 32** – Percentagem de componentes defeituosos encontrados pela inspeção termográfica na Chesf, (Galindo, 2005).

Em FURNAS, em um levantamento realizado em um período de 3 anos e com 530 ocorrências, os resultados obtidos foram:



**Figura 33** - Percentagem de componentes defeituosos encontrados pela inspeção termográfica em FURNAS, (Barbosa, 2005).

Pode-se observar com esses resultados que são as conexões os principais componentes defeituosos detectados através da termografia infravermelha, ficando em segundo as chaves seccionadoras e em terceiro, equipamentos como Pára-raios, Transformadores de Corrente (TCs), Transformadores de Potencial (TPs), Disjuntores, etc.

Com base nessas pesquisas, torna-se importante buscar junto aos fabricantes um meio de viabilizar o aumento da emissividade desses componentes, principalmente para as conexões utilizadas nas subestações, que geralmente são fabricadas com material de baixa emissividade. No entanto, o incremento da emissividade deve ser seletivo, isto é, deve-se evitar que a emissividade seja alta na faixa de comprimento de onda da radiação solar, evitando a elevação de

---

temperatura do componente durante o dia devido à absorção da radiação do sol, o que prejudicaria sua operação e diminuiria sua vida útil. Por outro lado, a emissividade precisa ser alta na faixa de comprimento de onda na qual os Termovisores respondem, geralmente de 3  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ , aumentando a exatidão das leituras de temperatura e conseqüentemente aprimorando a análise e o diagnóstico dos problemas detectados.

Uma proposta para se alcançar o resultado acima seria a utilização de uma tinta branca a base de materiais chamados de refletores solares seletivos. Esses materiais possuem uma baixa absorbância para a radiação solar e uma alta emitância para a radiação infravermelha o que proporcionaria um melhor resultado da inspeção termográfica, um resfriamento mais eficaz e um menor aquecimento do componente durante dias ensolarados. A Tabela 5 mostra que apesar do cobre e o alumínio possuírem baixa absorbância solar, eles também possuem baixa emitância infravermelha, dificultando a inspeção termográfica e impedindo uma melhor transferência do calor pela radiação. A absorbância solar e a emitância infravermelha da tinta branca acrílica e a base de óxido de zinco também é apresentada, (Lienhard, 2004).

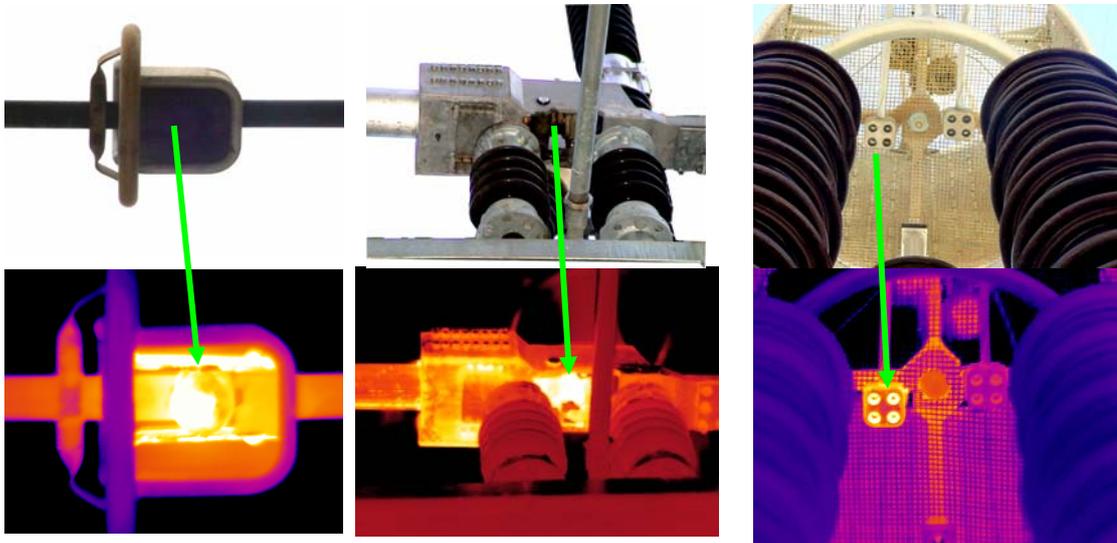
**Tabela 5** – Absorbância solar e emitância infravermelha para diferentes superfícies a uma temperatura próxima de 300 K (26,85° C)

<b>Superfície</b>	<b>Absorbância Solar</b>	<b>Emitância Infravermelha</b>
Alumínio puro	0,09	0,10
Cobre polido	0,30	0,04
Tinta Branca (Acrílica)	0,26	0,90
Tinta Branca (óxido de Zinco)	0,12 – 0,18	0,93

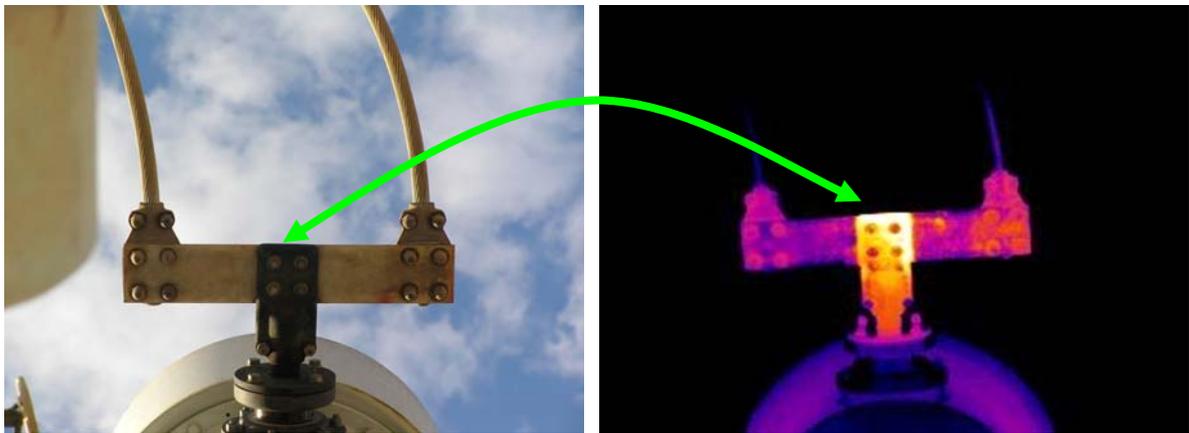
Na impossibilidade de se colocar em prática esse método, o inspetor deve buscar fazer a medição de temperatura nas áreas dos componentes onde apresentem cavidades (Figura 34), aproveitando-se do incremento da emissividade pelo “efeito cavidade” ou buscar áreas com oxidação, corrosão ou sujeira (Figura 35)

---

que também provocam o aumento da emissividade e conseqüentemente da exatidão da medida realizada por um Termovisor.



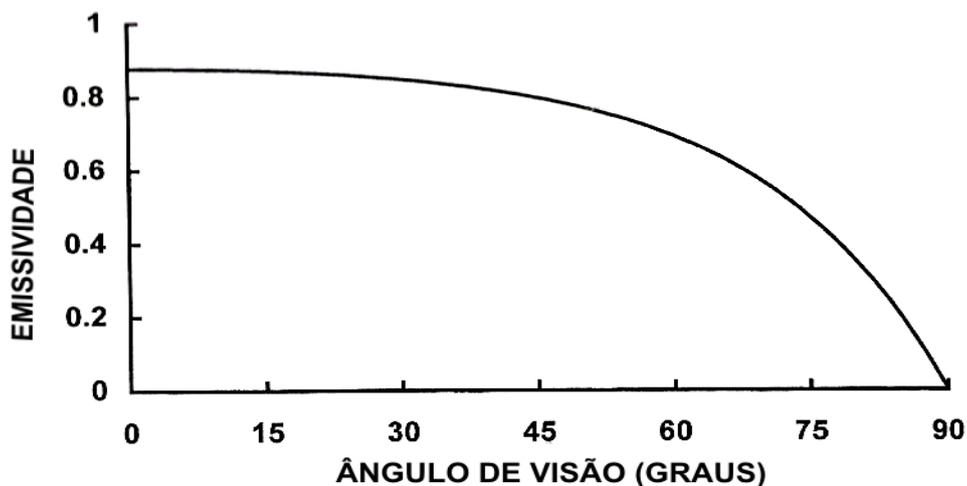
**Figura 34** – Equipamentos e conexões apresentando maior emissividade nas áreas de cavidades.



**Figura 35** – Conexão apresentando maior emissividade nas áreas oxidadas.

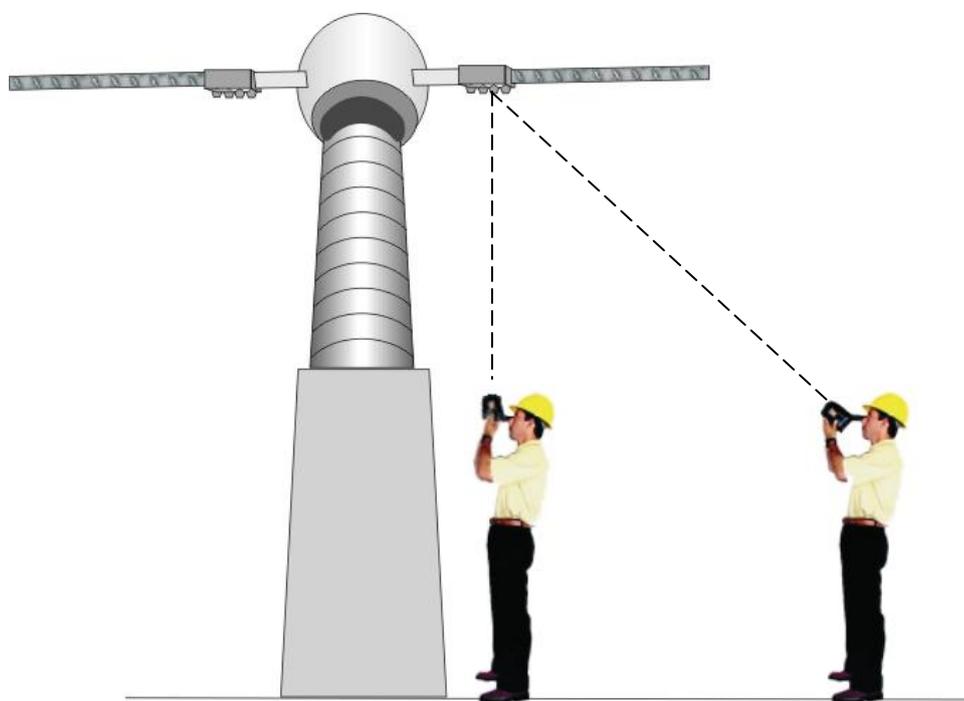
### 3.3.1.1. Ângulo de visão

A emissividade de uma superfície diminui quando o ângulo de visão aumenta com relação a sua normal, sendo que medidas de temperatura exatas somente podem ser feitas com ângulos abaixo de 30°. De 30° a 60° um pequeno erro é introduzido e a partir de 60° o erro se torna muito grande, (Holst, 2000), como mostra o gráfico da Figura 36.



**Figura 36** – Emissividade em função do ângulo de visão.

Em subestações de alta tensão a maioria dos componentes a serem inspecionados está localizada a uma altura superior a do Termografista e frequentemente a leitura de temperatura é realizada em um ângulo diferente da linha normal. Para reduzir e até mesmo eliminar os erros devido ao ângulo de visão, o Termografista deve buscar a visão mais perpendicular possível com a superfície do componente sob inspeção como mostra a Figura 37.



**Figura 37** – O termografista deve buscar a visão mais perpendicular possível com a superfície do componente sob inspeção.

---

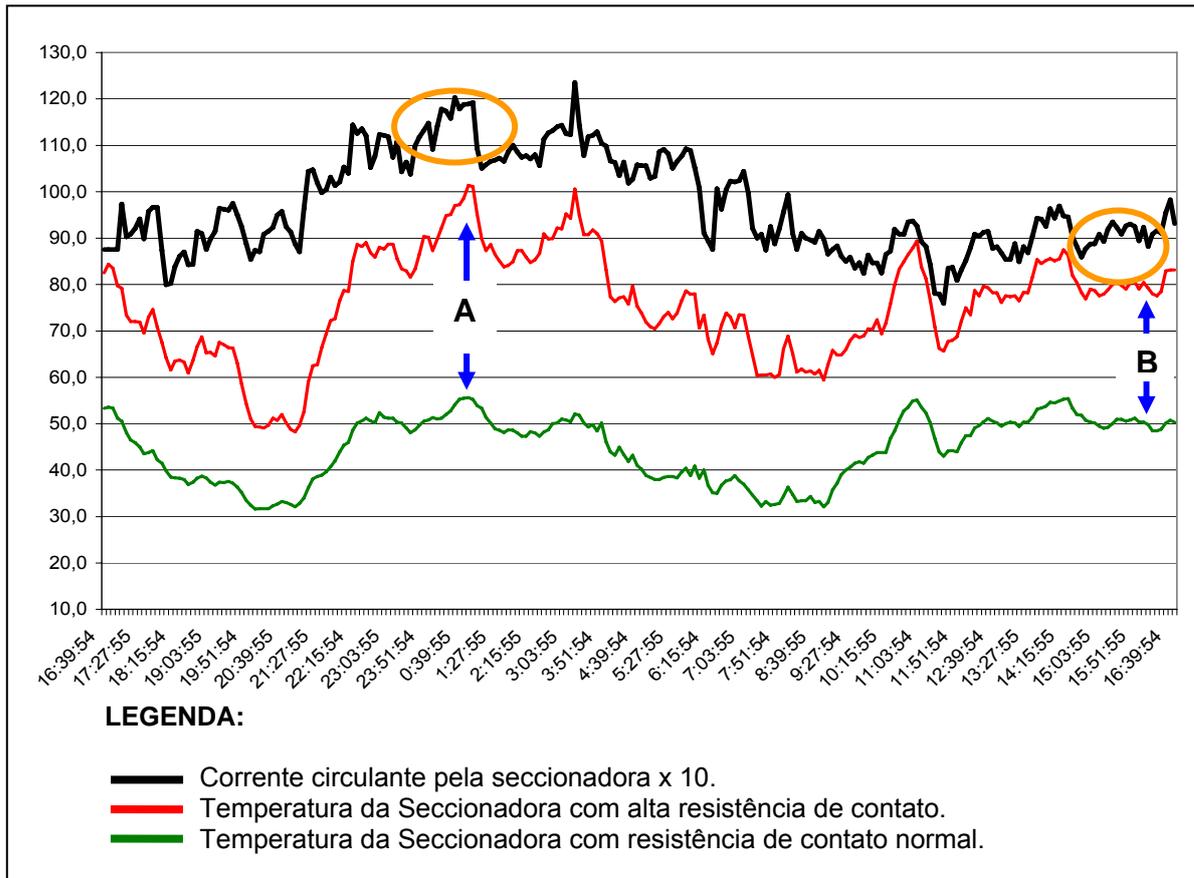
### **3.3.2. Corrente de carga**

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

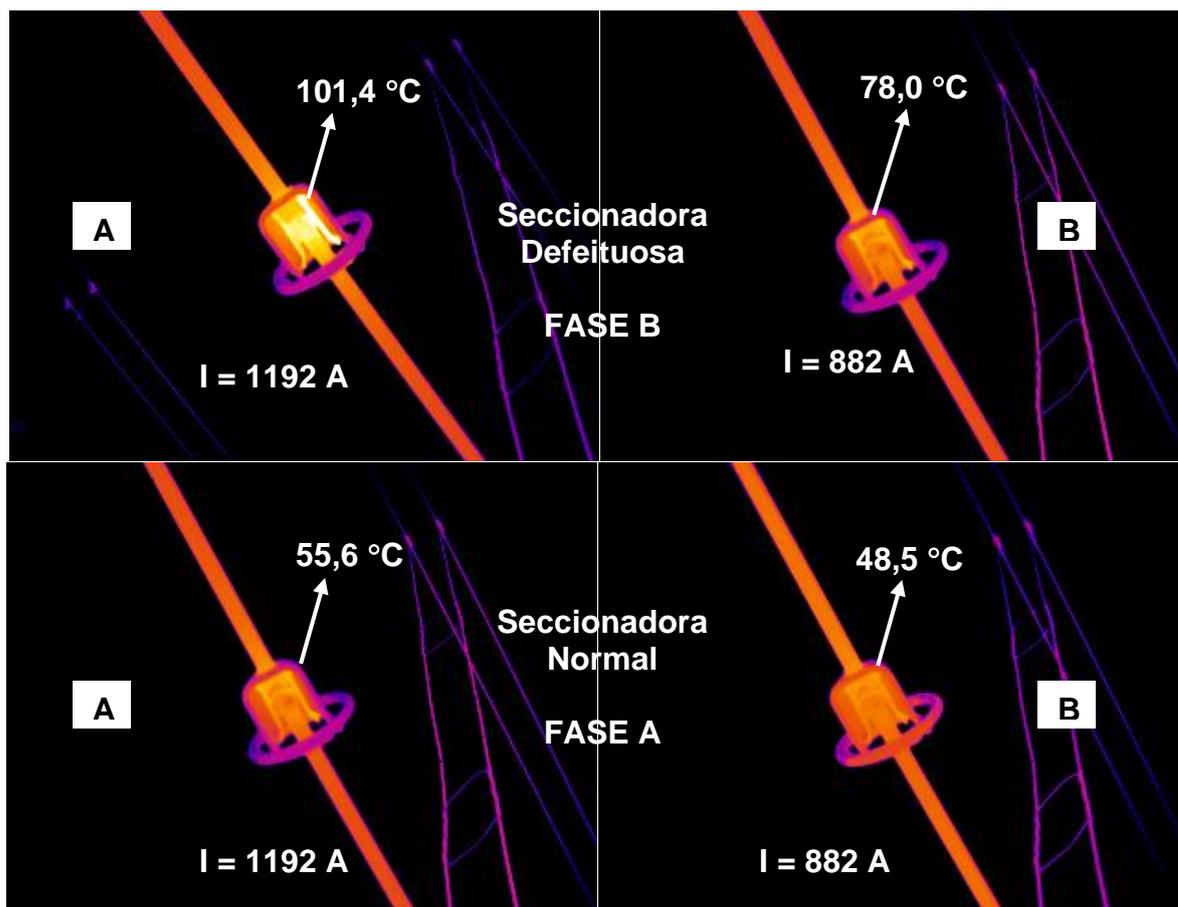
Durante sua operação, o equipamento pode sofrer de freqüentes variações de carga que podem influenciar no resultado da inspeção, logo a corrente de carga é outro fator que deve ser considerado em inspeções termográficas de sistemas elétricos.

A corrente circulante pelo componente sob inspeção não é responsável por erros na medida de temperatura, ela pode interferir sim, na análise e diagnóstico do defeito. Por exemplo, em casos em que a corrente é baixa, certas falhas podem não ser percebidas ou defeitos graves podem ser subestimados.

Em ensaio realizado em uma subestação de 345 kV, a temperatura e a corrente de uma chave seccionadora com alta resistência de contato foram monitoradas por 24 horas. Para a medida de temperatura foi utilizado um Termovisor posicionado a uma distância de 4 metros da chave em questão. Os valores de corrente foram obtidos através de dados fornecidos pelo sistema de supervisão e controle da subestação, Sage (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia). Dois instantes foram selecionados para mostrar o efeito da corrente na temperatura. Na Figura 38 é apresentado na forma de gráfico e na Figura 39 através de termogramas. Nesses dois instantes, variáveis como velocidade do vento, temperatura ambiente e umidade relativa do ar permaneceram praticamente constantes e foi escolhido um período, de aproximadamente uma hora, em que a corrente teve pequena variação para se obter a estabilização térmica.



**Figura 38** – Gráfico da corrente circulante pela seccionadora no período de 24 horas – As setas indicam o momento em que foram capturadas as imagens da Figura 39.



**Figura 39** – Termogramas mostrando o efeito da corrente sobre a temperatura de uma seccionadora com alta resistência de contato e sobre a temperatura de uma seccionadora normal.

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, no entanto isso nem sempre é possível devido à variação da corrente circulante em função da carga requerida pelo Sistema, como pode ser visto na Figura 38. Em ocasiões em que a inspeção termográfica esteja sendo realizada com a corrente de carga abaixo de 100% da máxima, a maior parte dos trabalhos aqui revisados orienta pela utilização de uma equação, com a qual se pretende prever a temperatura do componente quando a corrente for máxima, fornecendo mais subsídios para uma melhor análise do equipamento sob inspeção. A equação geralmente recomendada é:

$$\Delta T_c = \Delta T_m \cdot \left( \frac{I_{m\acute{a}x}}{I_m} \right)^2 \quad (23)$$

Na qual,

---

$\Delta T_C$  [°C] é a elevação da temperatura acima de uma temperatura de referência quando a corrente atinge o valor máximo  $I_{m\acute{a}x}$ .

$\Delta T_m$  [°C] é a elevação da temperatura acima de uma temperatura de referência quando medida com a corrente  $I_m$ .

$I_{m\acute{a}x}$  [A] é a corrente máxima permitida.

$I_m$  [A] é a corrente circulante no momento da medida.

Aplicando a Equação 23 para o exemplo real da Figura 39 e supondo que a inspeção foi realizada no instante em que a corrente era 882 A, o cálculo da elevação de temperatura acima da temperatura de referência será:

$$I_{m\acute{a}x} = 1192 \text{ A} \quad I_m = 882 \text{ A}$$

$$\Delta T_m = 78 - 48,5 = 29,5^\circ \text{ C}$$

$$\Delta T_C = 29,5 \cdot \left( \frac{1192}{882} \right)^2$$

$$\Delta T_C = 53,9^\circ \text{ C}$$

Resultado 17,7% maior que o valor real:

$$\Delta T = 101,4 - 55,6 = 45,8^\circ \text{ C}$$

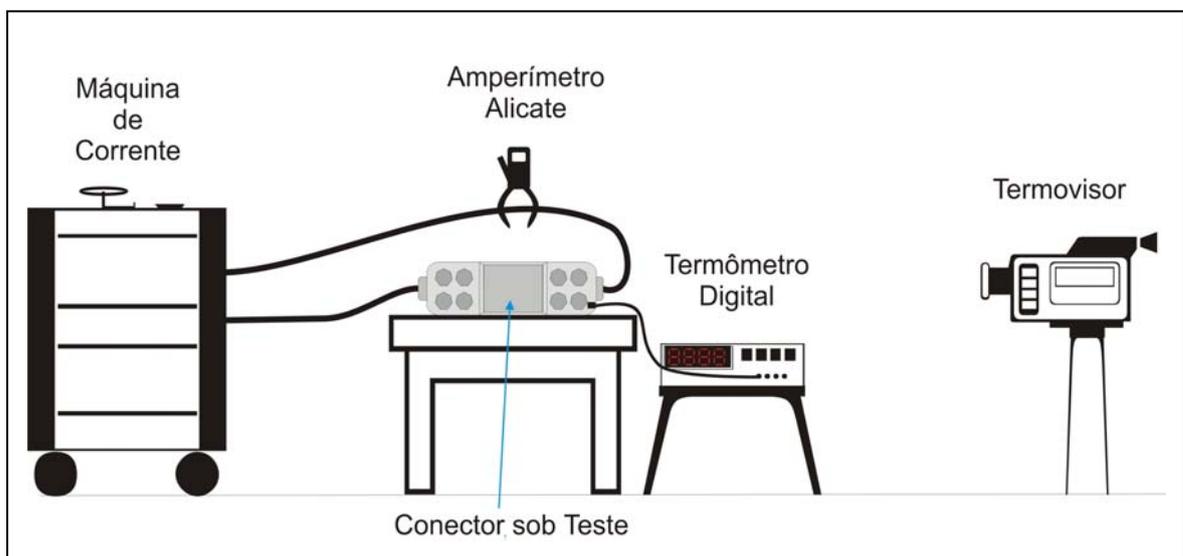
Para uma melhor observação da relação entre temperatura e corrente, um experimento em laboratório foi realizado, no qual uma conexão com defeito real foi utilizada.

Nesse experimento foram empregados os seguintes equipamentos:

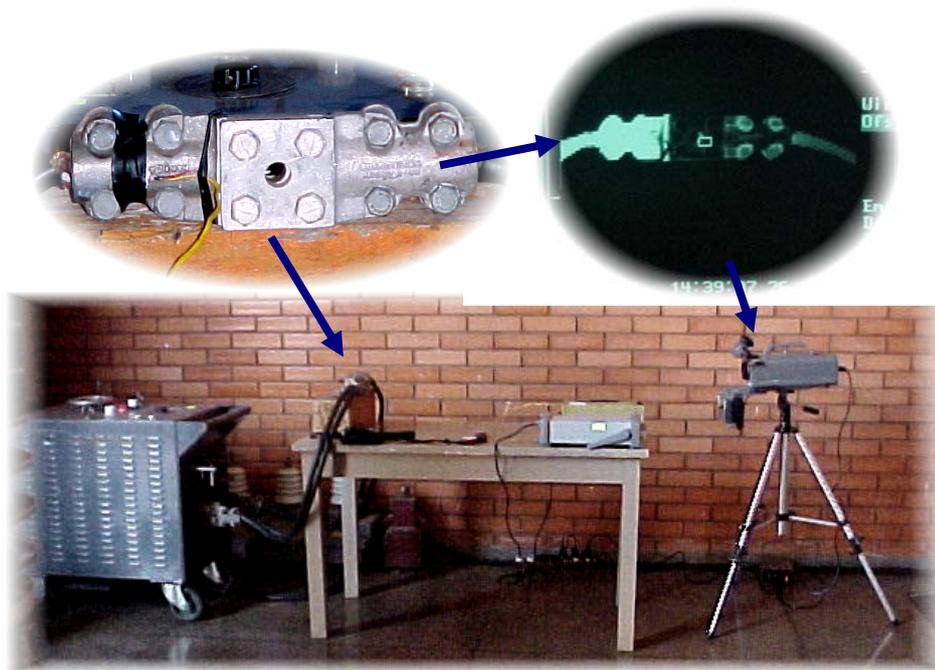
- Termovisor – Fabricante LAND, modelo TI-35, série 346681/QE/74.
- Termômetro Digital de contato – Fabricante Fluke, modelo 2190A, série 2750064.

- Amperímetro alicate – Fabricante Trub-Tauber, série 931.
- Máquina de corrente – Fabricante Eltra, modelo 13704, série 29220.
- Termo-higro-anemômetro – Fabricante Kestrel, modelo 3000, série 352417.
- Multímetro Digital – Fabricante Hewlett-Packard, modelo 34401A, série US36076659.

A máquina de corrente serviu como fonte para a variação de corrente através da conexão, como mostra o esquema da Figura 40 e a foto da Figura 41.



**Figura 40** – Esquema do ensaio para determinar a variação da temperatura em uma conexão em função da corrente.



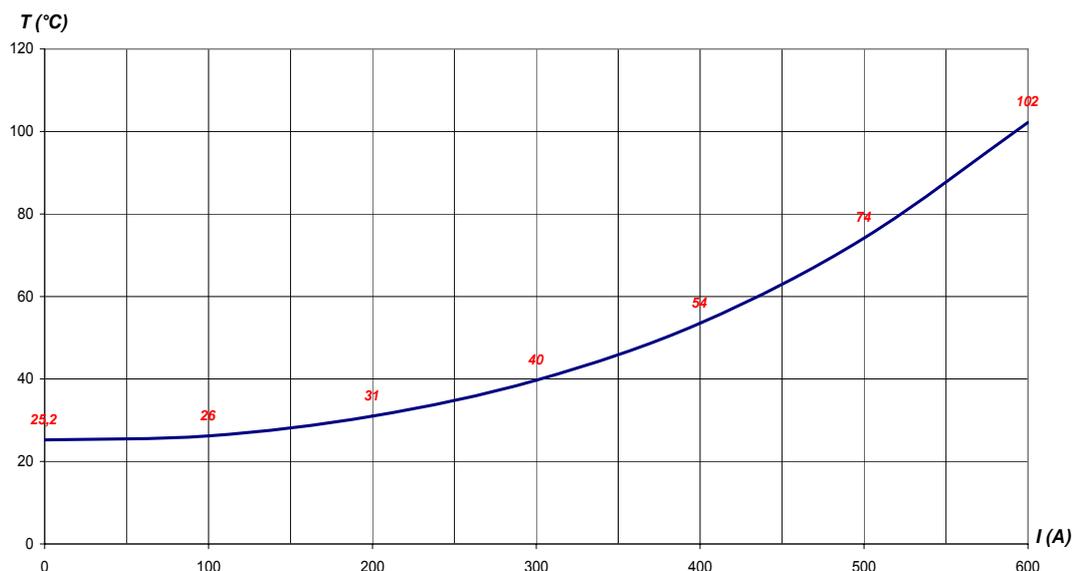
**Figura 41** – Foto do experimento Temperatura x Corrente.

O experimento foi realizado em ambiente fechado, com uma variação da temperatura ambiente de 24,6° C a 26,9° C e da umidade relativa do ar de 44% a 55%. A distância entre a conexão e o Termovisor foi de 1,5 m. A corrente aplicada foi de 100 A a 600 A em intervalos de 100 A. O tempo para estabilização da temperatura foi de aproximadamente uma hora a cada incremento de corrente.

Os dados obtidos são apresentados na Tabela 6 e no gráfico da Figura 42.

**Tabela 6** – Resultados da variação da Temperatura em função da Corrente.

$I_{\text{Conexão}}$	$I_{\text{Conexão}}$	$T_{\text{Conexão}}$	$T_{\text{Referência}}$
(A)	%	(°C)	(°C)
0	0,0%	25,2	25,2
100	16,7%	26,2	26,0
200	33,3%	31,0	26,2
300	50,0%	39,7	27,0
400	66,7%	53,5	33,8
500	83,3%	74,1	43,8
600	100,0%	102,2	51,9



**Figura 41** – Gráfico da variação de Temperatura em função da Corrente em uma conexão defeituosa.

Aplicando a Equação 23 nos dados da Tabela 6 para o cálculo da elevação de temperatura acima da temperatura de referência ( $\Delta T_C$ ):

**Tabela 7** – Aplicação da Equação 23 nos resultados da Tabela 6.

$I_{Conexão}$ (A)	$T_{Conexão}$ (°C)	$t_{referência}$ (°C)	$\Delta T_m (T_{Conexão} - T_{amb})$ (°C)	$\Delta T_C$ (°C)
100	26,2	25,5	0,7	25,2
200	31,0	26,2	4,8	43,2
300	39,7	27,0	12,7	50,8
400	53,5	33,8	19,7	44,3
500	74,1	43,8	30,3	43,6
600	102,2	51,9	50,3	50,3

Diferentemente dos resultados obtidos no exemplo da seccionadora, os resultados de laboratório apontam para valores abaixo do real. A explicação para essa divergência pode estar no fato de que esse ensaio foi realizado em laboratório, com componente distinto e em condições controladas e estáveis, o que difere do comportamento da seccionadora em ambiente aberto e exposta a diferentes influências simultaneamente. Cabe lembrar também, que a Equação 23 é uma equação prognóstica que visa simplificar um fenômeno complexo. Por essa razão,

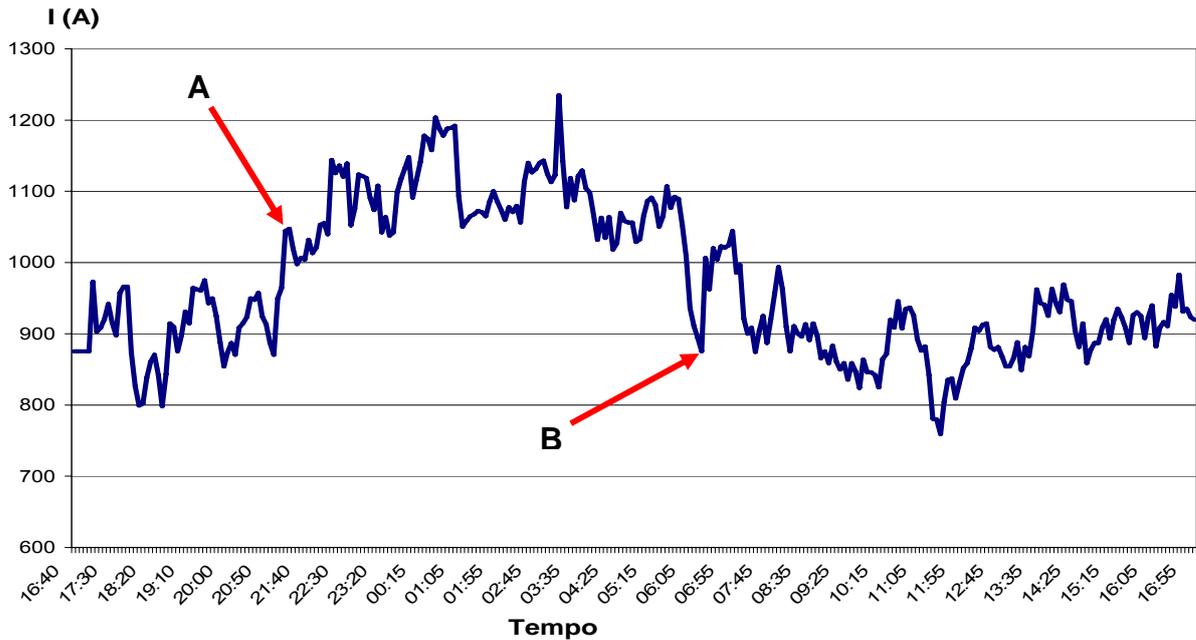
---

quando utilizada, deve servir apenas para auxiliar o termografista na compreensão do impacto da corrente sobre a temperatura do objeto sob inspeção.

Ainda com relação ao efeito da corrente sobre a temperatura, é importante observar que existe uma inércia térmica, isto é, após um incremento ou decremento da corrente é necessário um período para a estabilização da temperatura. Considerando o ensaio da Figura 40, o tempo de estabilização da temperatura após um incremento de corrente foi de aproximadamente 60 minutos, enquanto para o ensaio realizado por Lyon et al (2002) foi de aproximadamente 45 minutos.

No caso de grande parte dos equipamentos de subestação a corrente circulante varia constantemente, sendo possível que em certas situações a corrente no momento da inspeção possa estar totalmente diferente da corrente no instante anterior e o uso da Equação 23, que leva em consideração apenas a corrente do momento, levaria a erros consideráveis, uma vez que ela não contempla a resposta térmica do componente sob inspeção.

O gráfico da Figura 42 mostra a variação da corrente registrada na seccionadora da Figura 39 em um período de 24 horas. Os pontos A e B indicam alguns dos vários momentos em que a análise do defeito, levando em consideração apenas o valor da corrente no momento da inspeção, poderia levar a um diagnóstico equivocado, assim como a utilização da Equação 23 para a previsão da elevação da temperatura ( $\Delta T_C$ ) para a corrente máxima ( $I_{máx}$ ).



**Figura 42** – Variação da corrente em uma seccionadora em um período de 24 horas.

### 3.4. Condições ambientais

O ambiente em que é realizada a inspeção termográfica exerce um importante papel nos resultados obtidos. A transmitância atmosférica, a radiação emitida pelo sol, a temperatura ambiente, o vento, a chuva e a umidade relativa do ar podem afetar de maneiras diferentes a distribuição térmica dos componentes sob inspeção, bem como a quantidade de radiação infravermelha que chega ao Termovisor.

#### 3.4.1. Transmitância atmosférica

A transmitância atmosférica varia com a temperatura, umidade relativa do ar e com a quantidade de partículas suspensas no ar (poeira, poluição, neblina e névoa).

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

- Absorção
- Dispersão
- Emissão

- 
- Turbulência

#### 3.4.1.1. Absorção

A absorção provoca a atenuação da radiação e pode ser de dois tipos:

- Absorção molecular.
- Absorção aerossol.

Por causa dos diversos componentes menores da atmosfera, a absorção molecular é uma fonte de atenuação da propagação da radiação muito mais significativa que a absorção aerossol.

#### 3.4.1.2. Dispersão

O fenômeno da dispersão provoca a redistribuição do fluxo incidente em todas as direções de propagação e diminui o fluxo na direção original. Existem dois tipos distintos de dispersão atmosférica, a dispersão molecular (Rayleigh) e a dispersão aerossol (Mie). 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 na fumaça é muito maior para o infravermelho na faixa de 8 a 14  $\mu\text{m}$  do que para a faixa de 3  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ .

#### 3.4.1.3. Emissão

O fenômeno da emissão soma uma radiação adicional à radiação emitida pelo componente sob inspeção. Para efeito de inspeção por termografia em subestações, a emissão pode ser considerada desprezível, já que a emissividade atmosférica é freqüentemente baixa e a temperatura da atmosfera na maior parte das inspeções é menor que a temperatura do componente sob inspeção.

#### 3.4.1.4. Turbulência

O fenômeno da turbulência é causado por movimentos irregulares do ar. Ele aparece 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

---

imperfeição da imagem gerada pelo sistema óptico. Em inspeções de subestações, cujas distâncias componente -Termovisor raramente ultrapassam os 50 metros, o efeito desse fenômeno pode ser desprezado, (Chrzanowski, 2001).

### 3.4.2. Atmosfera terrestre

A atmosfera da terra é uma mistura de muitos gases. Os gases nela contidos variam com a altitude, hora e espaço, todavia para uma típica e clara atmosfera pode-se considerar os gases da tabela 8.

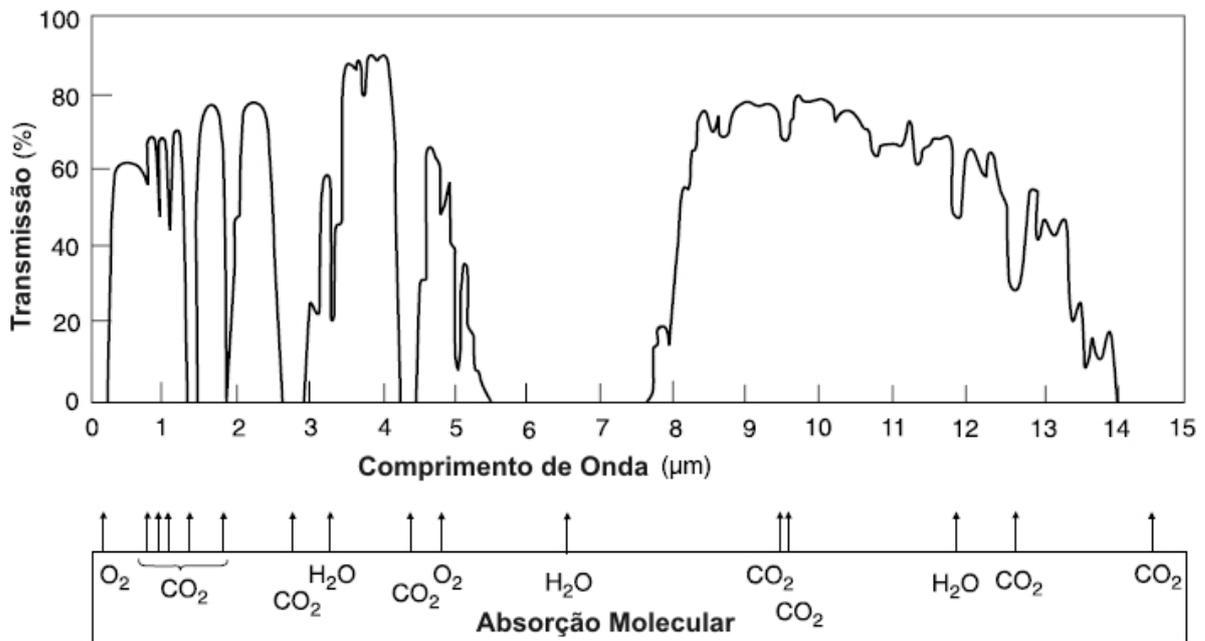
**Tabela 8** – Gases que formam a atmosfera

<b>Gás Constituinte</b>	<b>Conteúdo (% por volume)</b>
N <sub>2</sub>	78,084
O <sub>2</sub>	20,9476
Ar	0,934
CO <sub>2</sub>	$3 \times 10^{-2}$
H <sub>2</sub> O	$10^{-5}$ a $10^{-2}$
Ne	$1,81 \times 10^{-3}$
HE	$5,2 \times 10^{-4}$
CH <sub>4</sub>	$2 \times 10^{-4}$
Kr	$1,14 \times 10^{-4}$
H <sub>2</sub>	$5 \times 10^{-3}$
N <sub>20</sub>	$5 \times 10^{-5}$
CO	$7 \times 10^{-6}$
O <sub>3</sub>	0 a $7 \times 10^{-6}$
NO	0 a $2 \times 10^{-6}$

Observa-se que o Nitrogênio (N<sub>2</sub>) e o Oxigênio (O<sub>2</sub>) são os principais componentes na composição da atmosfera e que a concentração dos outros gases é muito menor, entretanto dois deles têm papel importante na transmitância da radiação infravermelha:

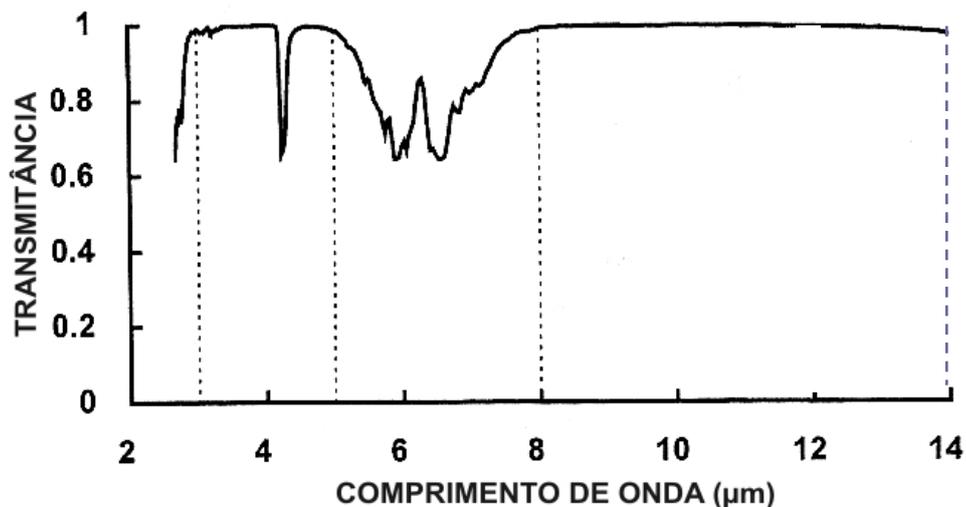
- O vapor de água (H<sub>2</sub>O) que depende muito da altitude, estação do ano, localização geográfica, hora do dia, condições meteorológicas e está sujeito a grandes flutuações.
- O Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) que existe em maior concentração em áreas industriais e de vegetação do que em oceanos e desertos.

A Figura 43 mostra graficamente a transmitância atmosférica em função do comprimento de onda, bem como as áreas de maior absorção dos gases e as chamadas “janelas” infravermelhas de 3 a 5  $\mu\text{m}$  e de 8 a 14  $\mu\text{m}$ , (Rogalski & Chrzanowski, 2002).

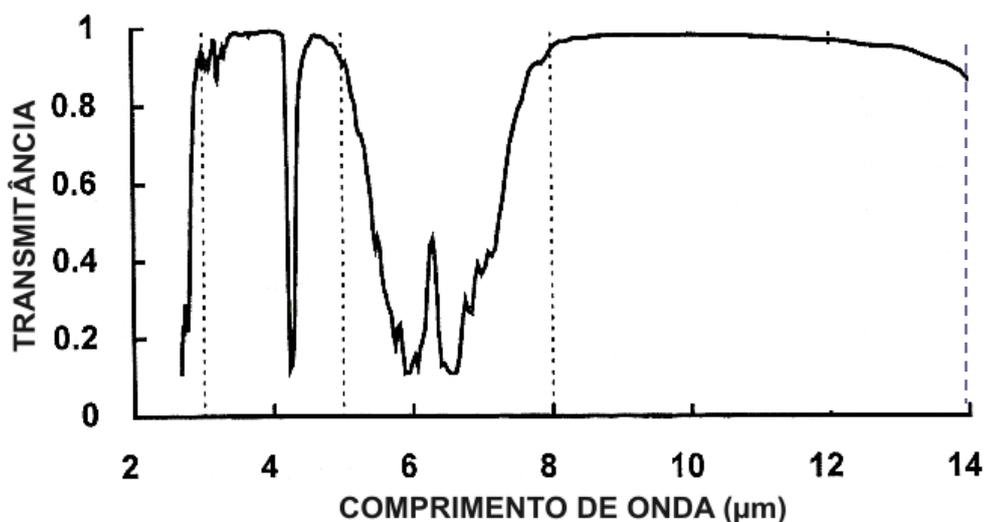


**Figura 43** – Transmitância da atmosfera para uma distância de 1,8 km ao nível do mar com 17 mm de precipitação de chuva.

A transmitância atmosférica é função do comprimento de onda e da distância, sendo que quanto maior a distância componente-Termovisor menor a transmitância atmosférica. As Figuras 44 e 45 representam a transmitância atmosférica para a faixa de comprimento de onda normalmente utilizada pelos Termovisores e para distâncias geralmente encontradas em inspeções de subestações de alta tensão.



**Figura 44** – Transmitância atmosférica para uma distância de 10 m.



**Figura 45** – Transmitância atmosférica para uma distância de 50 m.

Observa-se pelas Figuras 44 e 45 que a atenuação atmosférica é baixa para distâncias abaixo dos 50 metros nas chamadas “janelas” infravermelhas. Para ratificar essa baixa atenuação, o ensaio descrito abaixo foi realizado.

#### 3.4.2.1. Ensaio para verificação da atenuação atmosférica

Foi utilizado como referência de temperatura um *Corpo Negro* com uma grande área de medição (0,2 m X 0,2 m) para tentar evitar o erro devido ao sistema óptico do Termovisor e avaliar apenas a influência atmosférica. O levantamento dos

---

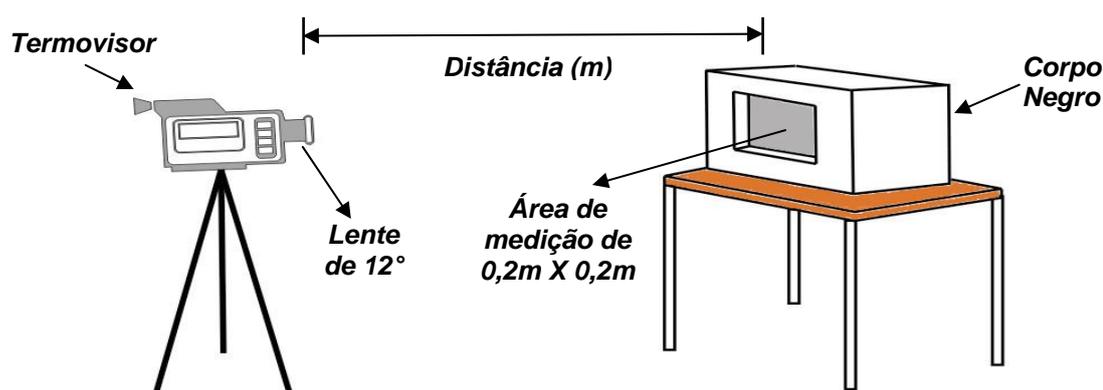
dados foi realizado com duas temperaturas distintas, de 50° C e 100° C, escolhidas por serem representativas das tipicamente encontradas em defeitos detectados em inspeções de subestações de alta tensão.

Um Termovisor com faixa de comprimento de onda de 7,5  $\mu\text{m}$  a 13  $\mu\text{m}$  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 um ajuste de distância para compensar a atenuação atmosférica. Também com o objetivo de reduzir o erro devido ao sistema óptico uma lente de campo de visão de 12° foi acoplada ao Termovisor.

As distâncias foram medidas entre a lente do Termovisor e a área de medição do *Corpo Negro*. Uma Trena Laser foi usada para esse propósito.

O ensaio foi realizado no outono, no período das 10:00 horas às 11:20 horas, em uma altitude aproximada de 700 metros, latitude 'W 46° 19', longitude S 20° 40', com uma temperatura ambiente variando de 20,5° C a 23° C, umidade relativa do ar variando de 66% a 68%, céu nublado e atmosfera livre de poluição industrial.

A Figura 46 e a Figura 47 mostram o diagrama e a foto do ensaio realizado, respectivamente.



**Figura 46** – Esquema do ensaio para a determinação da atenuação atmosférica.

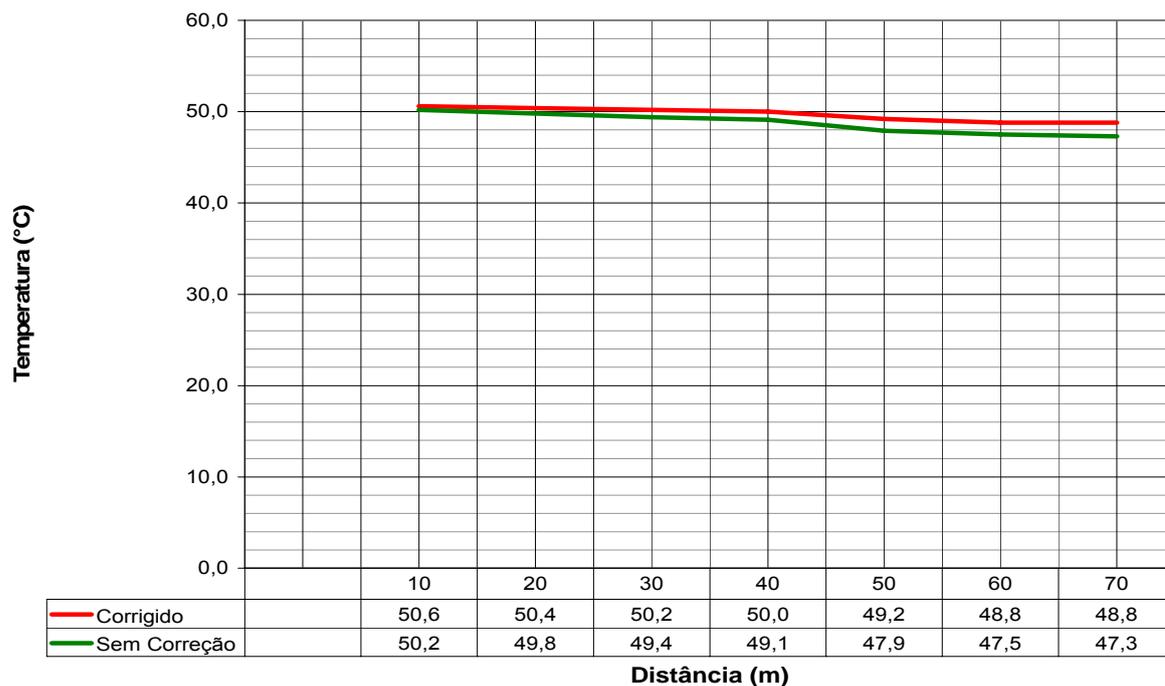


**Figura 47** – Foto do ensaio para a determinação da atenuação atmosférica.

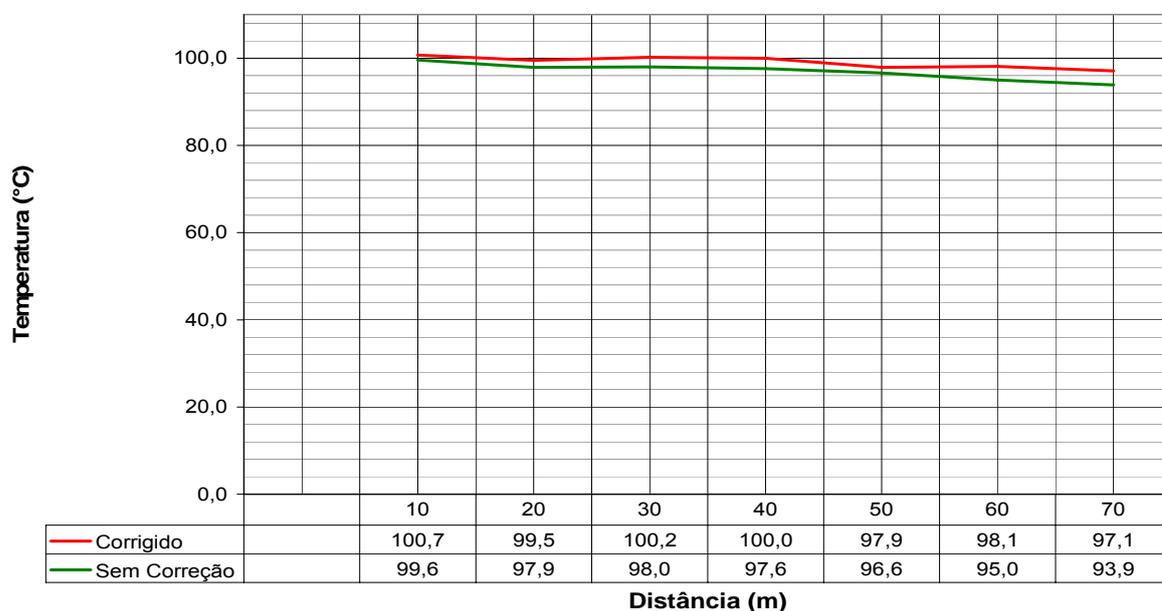
Instrumentos utilizados:

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

Os dados obtidos através do ensaio confirmam que a atenuação atmosférica abaixo de 50 metros de distância é baixa e que o ajuste de distância embutido no Termovisor reduz ainda mais o erro da leitura de temperatura. Os gráficos das Figuras 48 e 49 mostram esses resultados.



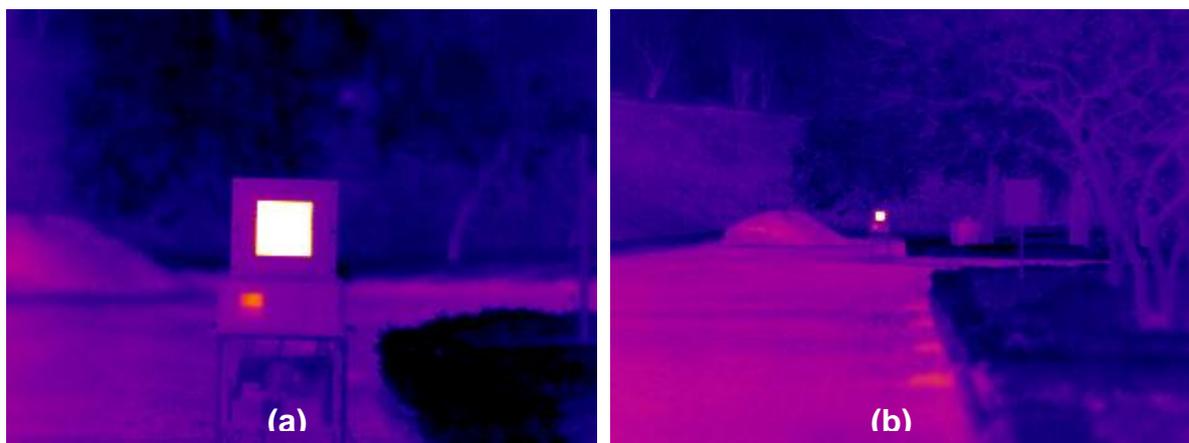
**Figura 48** – Gráfico da temperatura em função da distância - Referência (Corpo Negro) em 50° C.



**Figura 49** – Gráfico da temperatura em função da distância - Referência (Corpo Negro) em 100° C.

---

A Figura 50 mostra duas imagens térmicas do ensaio descrito acima.

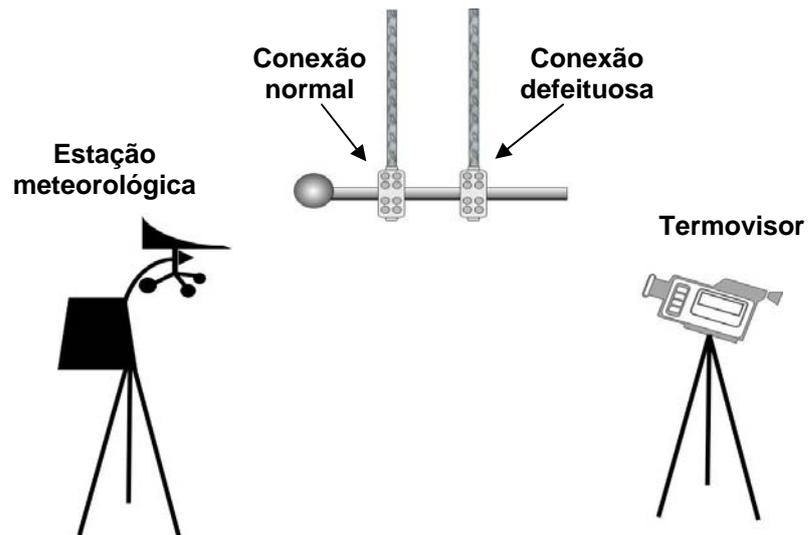


**Figura 50** – Termograma do Corpo Negro a 10 m (a) e a 70 m (b) do Termovisor (lente de 12°).

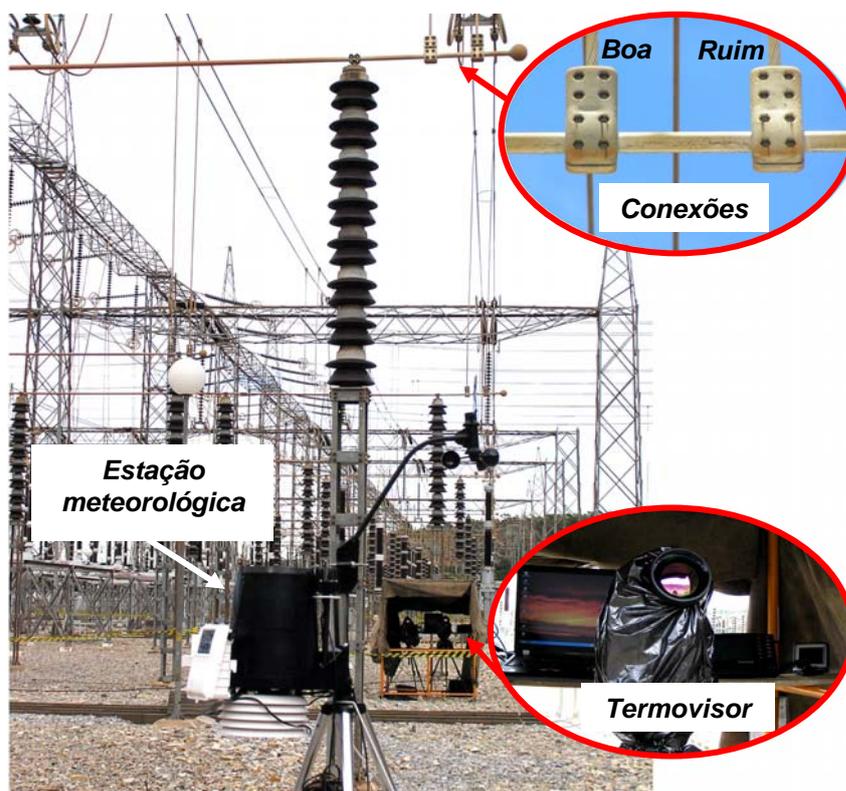
Apesar da baixa influência da atmosfera em inspeções de subestações de alta tensão, deve-se procurar a menor distância possível entre o Termovisor e o componente sob inspeção, buscando eliminar por completo essa influência e principalmente a influência da parte óptica que geralmente é a mais atuante.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

### **3.4.3. Fatores Climáticos**

Para avaliar a influência de fatores como a radiação solar, temperatura ambiente, vento, chuva e umidade relativa do ar na inspeção termográfica, foram utilizados, durante o período de aproximadamente 70 horas, um Termovisor e uma estação meteorológica para monitorar uma conexão defeituosa e a variação do clima próximo a essas conexões, conforme o esquema da Figura 51 e a foto da Figura 52. O ensaio foi realizado no verão, compreendendo períodos noturnos e diurnos, com e sem incidência de sol, e períodos chuvosos.



**Figura 51** – Esquema do ensaio para a monitoração das temperaturas das conexões (normal e defeituosa) e da influência de fatores climáticos.



**Figura 52** – Foto do ensaio para monitoração das temperaturas das conexões (normal e defeituosa) e da influência de fatores climáticos.

Instrumentos utilizados:

- Termovisor – Fabricante FLIR, modelo P60, série 21802350.

- 
- Estação meteorológica – Fabricante Davis, modelo Vantage Pro, série A41119A79.
  - Termohigroanemômetro – Fabricante Kestrel, modelo 3000, série 352417
  - Computador – Fabricante IBM, modelo ThinkPad G40, série 82561L1.

Após localizar uma conexão com defeito em uma subestação de 345 kV, um Termovisor utilizando lente de 12° foi empregado para monitorar a temperatura da mencionada conexão. 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. O Termovisor foi montado a uma distância de 15 metros da conexão e sob abrigo para evitar a incidência direta da umidade e da chuva em sua lente. Os valores da corrente circulante pela conexão foram obtidos através de dados fornecidos pelo sistema de supervisão e controle da subestação, Sage (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia).

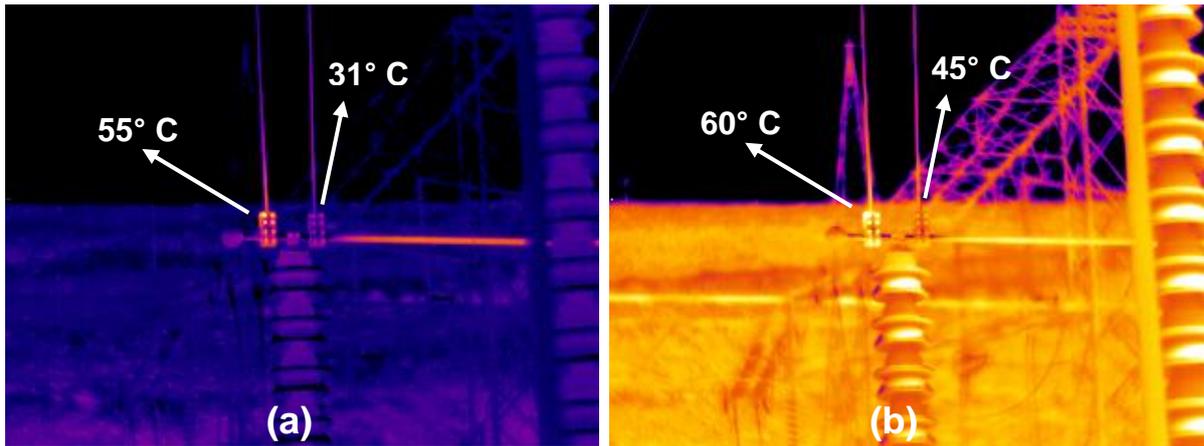
#### *3.4.3.1. Radiação solar*

A maior parte dos equipamentos e componentes de uma subestação de alta tensão desabrigada fica exposta à radiação solar. Ela pode influenciar de duas maneiras a inspeção termográfica:

- Pelo carregamento solar
- Pelo reflexo solar

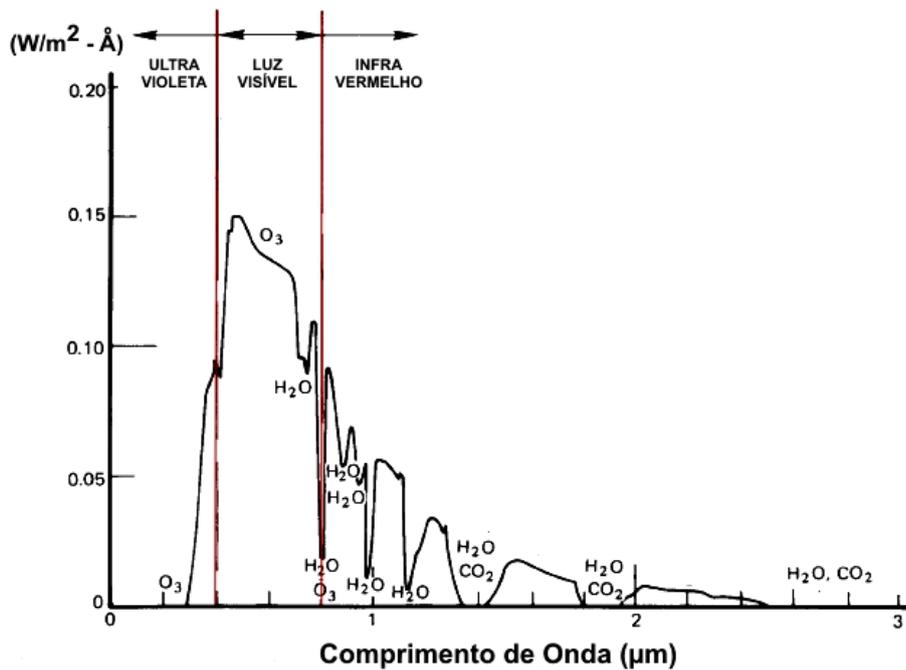
##### *3.4.3.1.1. Carregamento solar*

O carregamento solar afeta os componentes de uma subestação de uma maneira geral, aumentando suas temperaturas e dificultando a distinção, pela termografia, de um componente defeituoso e um normal, Figura 53. Isto é particularmente verdadeiro quando o defeituoso apresenta uma pequena diferença de temperatura com relação ao componente normal. Além disso, a radiação solar pode elevar a temperatura de componentes defeituosos, que já estão com temperaturas críticas, fazendo com que evoluam mais rapidamente para a falha.



**Figura 53** – Termogramas de uma conexão defeituosa e uma conexão normal - (a) Sem carregamento solar (22:51 h) - (b) Com carregamento solar (17:26 h)

Todas as superfícies expostas à radiação solar e que possuem alta absorção na região do espectro solar (Figura 54) tendem a aquecer.

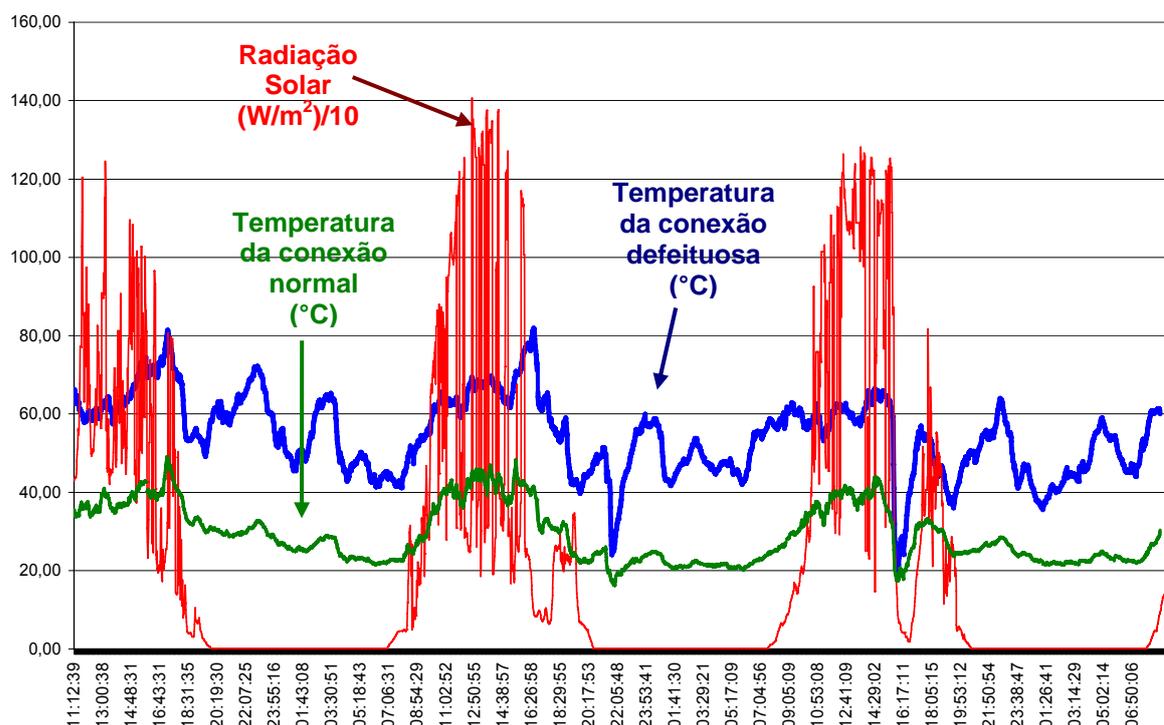


**Figura 54** – Energia do Sol tipicamente vista através da atmosfera da Terra.

A temperatura dependerá da relação entre a absorção no comprimento de onda do sol e da emissão no comprimento de onda do infravermelho, faixa na qual será emitida a maior parte da energia absorvida. Quanto maior essa relação, maior o aquecimento da superfície em função à exposição ao Sol.

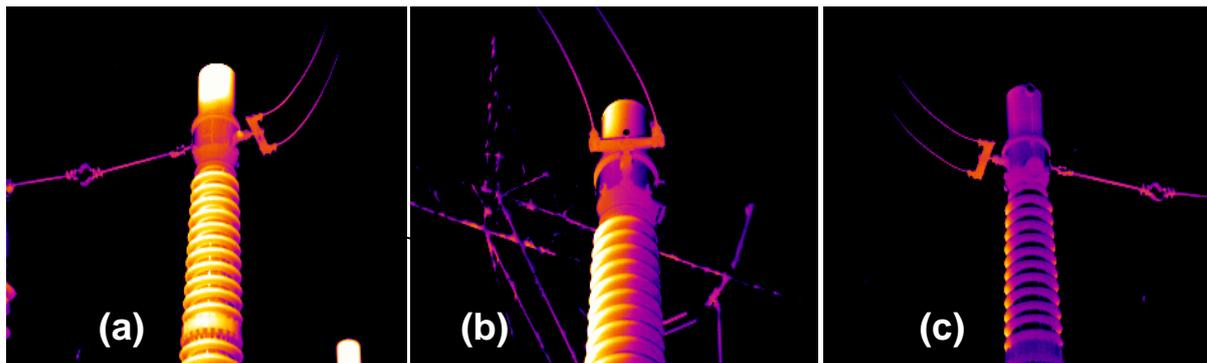
O nível de carregamento solar depende da estação do ano, sendo no verão o período de máxima exposição, mas em países tropicais como o Brasil, praticamente o ano inteiro existe um alto nível de carregamento solar.

A Figura 55 apresenta graficamente a variação da temperatura das conexões, monitoradas no ensaio da Figura 51, durante períodos com e sem a incidência de radiação solar.



**Figura 55** – Variação da temperatura das conexões durante períodos com e sem a incidência de radiação solar.

Recomenda-se que a inspeção termográfica seja realizada em horários livres da radiação solar, ou seja, entre o por do sol e as primeiras horas do dia, ou em dias com o céu nublado. Entretanto, deve-se levar em consideração, para efeito de análise e diagnóstico dos defeitos encontrados na inspeção, que as temperaturas medidas no período livre do carregamento solar poderão aumentar durante o dia devido à exposição ao Sol. A Figura 56 abaixo mostra claramente a influência do carregamento solar sobre equipamentos de uma subestação de alta tensão.



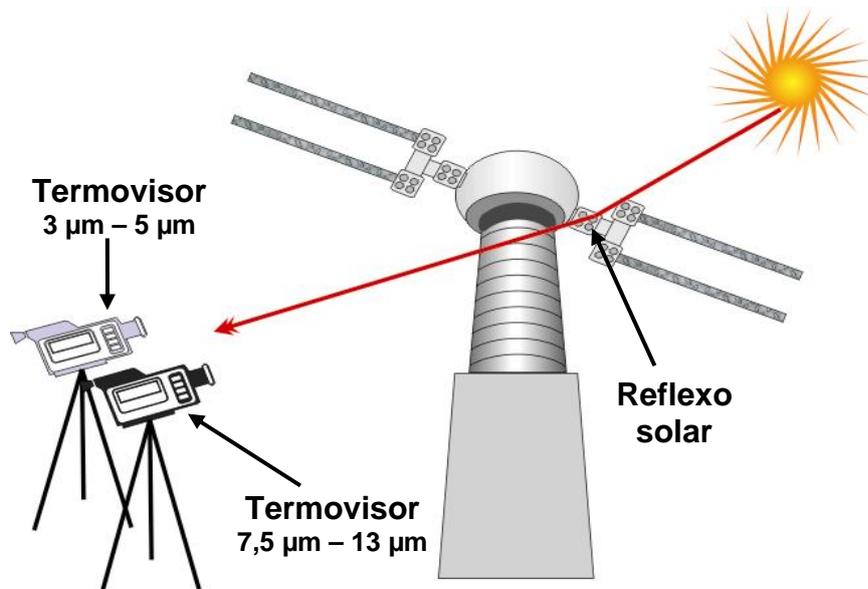
**Figura 56** – Termogramas de um Transformador de Corrente, sob o Sol, obtidos de três posições distintas. (a) A favor do Sol – (b) Intermediária entre a favor e contra o Sol – (c) Contra o Sol.

Na necessidade de realização da inspeção termográfica em dias com alto carregamento solar, o efeito do carregamento pode ser minimizado realizando a leitura de temperatura na superfície do componente oposta à incidência do Sol, isso pode ser observado na Figura 56 – (c). É importante lembrar que componentes defeituosos, com pequenas diferenças de temperatura em relação a componentes normais, podem passar despercebidos.

#### 3.4.3.1.2. Reflexo Solar

Os metais utilizados em subestações tipicamente possuem uma emissividade muito baixa, tanto para a radiação solar quanto para a radiação infravermelha, principalmente quando novos e polidos, como apresentado na Tabela 5. Como a transmitância desses metais é nula nesses comprimentos de onda, a refletância é alta, conforme a Equação 16. 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 pela superfície do componente.

O esquema da Figura 57 representa o ensaio montado para demonstrar o efeito do reflexo solar na inspeção termográfica.



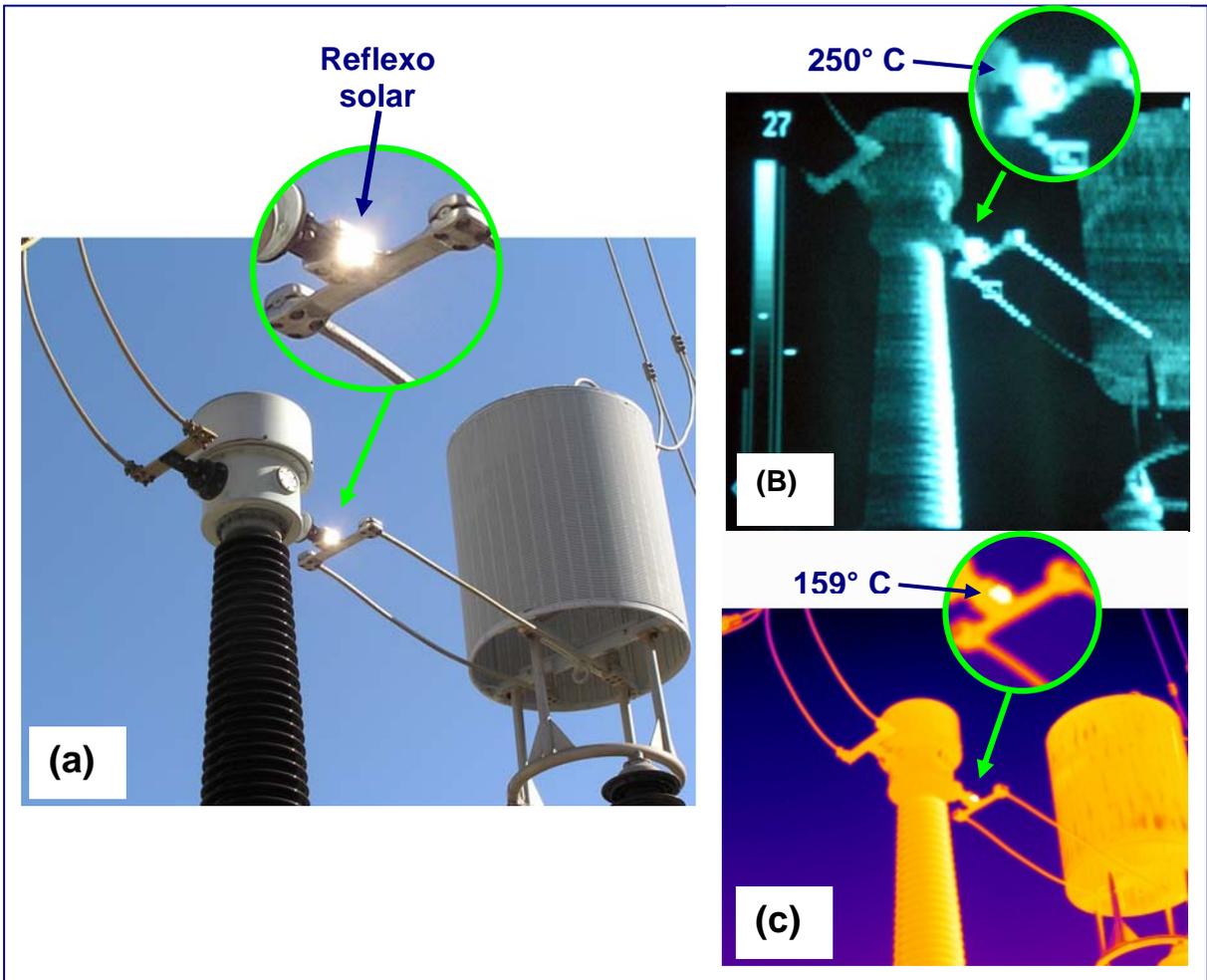
**Figura 57** – Esquema do ensaio realizado para demonstrar o efeito do reflexo solar

***Instrumentos utilizados:***

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

Após localizar, em uma subestação de 345 kV, 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  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$  e outro na faixa de 7,5  $\mu\text{m}$  a 13  $\mu\text{m}$  foram posicionados em um ângulo no qual a radiação solar era refletida pela superfície da conexão diretamente às suas lentes.

Apesar da conexão estar normal e com temperatura real próxima a temperatura ambiente, os termogramas obtidos pelos dois Termovisores apresentaram uma leitura de temperatura alta em razão do reflexo solar, Figura 58.



**Figura 58** – Reflexo solar provocando um falso ponto com alta temperatura em uma conexão de um Transformador de Corrente - TC - (a) Imagem visível - (b) Imagem obtida por Termovisor (3  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ ) - (c) Imagem obtida por Termovisor (7,5  $\mu\text{m}$  a 13  $\mu\text{m}$ )

O Termovisor com resposta espectral de 7,5  $\mu\text{m}$  a 13  $\mu\text{m}$  apresentou menor sensibilidade ao reflexo solar que o Termovisor que responde de 3  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ , mas o ensaio mostrou que ambas as faixas de comprimento de onda não estão livres dessa adversidade.

Como pode ser observado na Figura 58, o reflexo solar pode levar o inspetor inexperiente a diagnosticar situações normais como uma falha iminente e, com isso, solicitar um desligamento desnecessário do circuito para a manutenção de urgência.

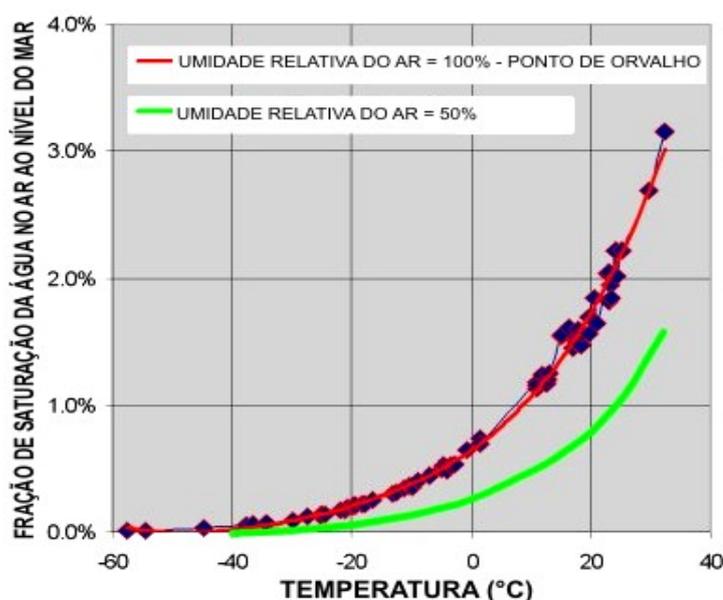
Para eliminar a influência do reflexo solar, recomenda-se executar a inspeção em períodos noturnos ou em dias com o céu nublado. Caso a inspeção seja

---

realizada sob o sol e reflexos solares prejudiquem a inspeção, aconselha-se a mudança de ângulo, entre o Termovisor e o componente sob inspeção, para eliminar o problema.

### 3.4.3.2. Chuva e umidade

A umidade é a concentração de vapor de água no ar. Como qualquer outra substância, o ar tem um limite de absorção, este limite se denomina saturação. Acima do limite de saturação (ponto de orvalho) a quantidade de água em excesso se precipita em forma de neblina ou de pequenas gotas de água (chuva). A quantidade de água que o ar absorve antes de atingir a saturação depende da temperatura e aumenta progressivamente com ela, como mostra o gráfico da Figura 59 (wikipedia, 2006).



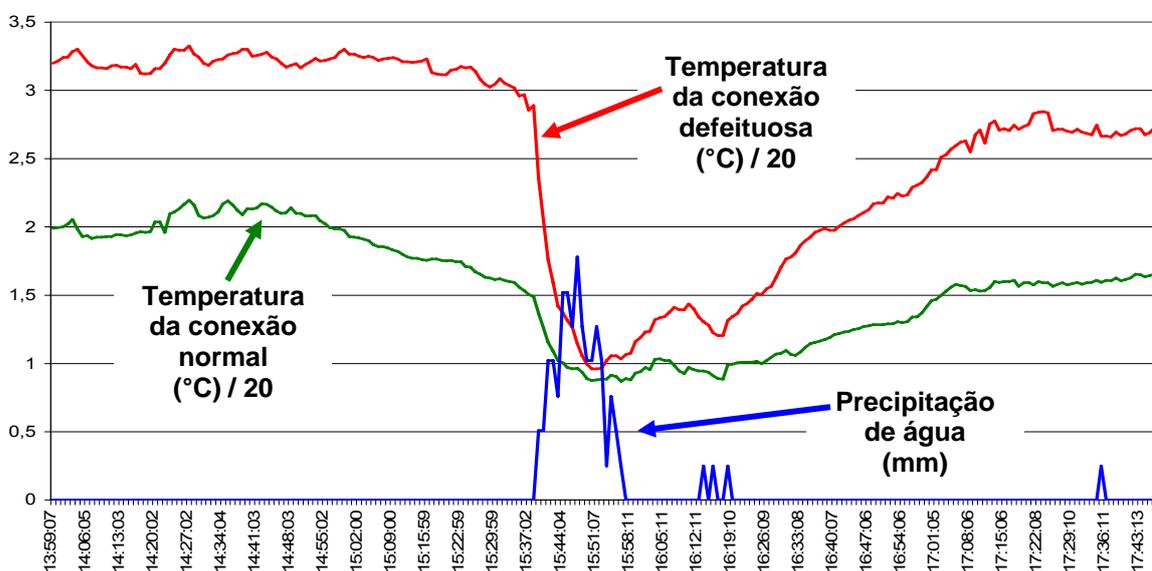
**Figura 59** – Saturação da água no ar em função da temperatura (ao nível do mar).

A alta umidade do ar age sobre a inspeção termográfica de duas maneiras:

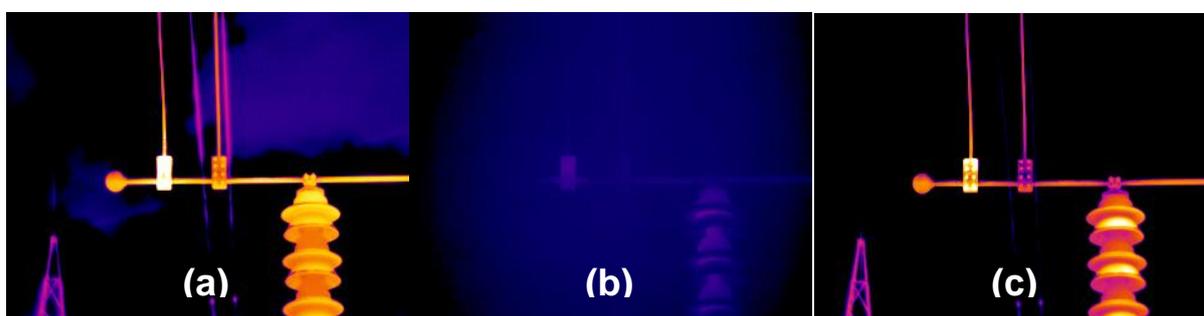
- Resfriando o componente, dificultando a detecção, análise e o diagnóstico do defeito.
- Atenuando a radiação infravermelha, emitida pelo componente sob inspeção, que chega ao detector do Termovisor.

### 3..4.3.2.1. Resfriamento

Em ambientes com alta umidade em razão de precipitação atmosférica de água, a alta condutividade térmica da água ajuda na dissipação do calor produzido e o resfriamento por evaporação reforça o processo de arrefecimento. O resultado é uma forte redução na temperatura do componente sob inspeção, assim como de toda cena envolvida, como pode ser visto no gráfico da Figura 60 e na imagem (b) da Figura 61, que mostra o efeito da chuva sobre o resultado de uma inspeção termográfica em uma conexão defeituosa e outra normal. Os dados e as imagens foram obtidos do ensaio descrito anteriormente e apresentado na Figura 51.



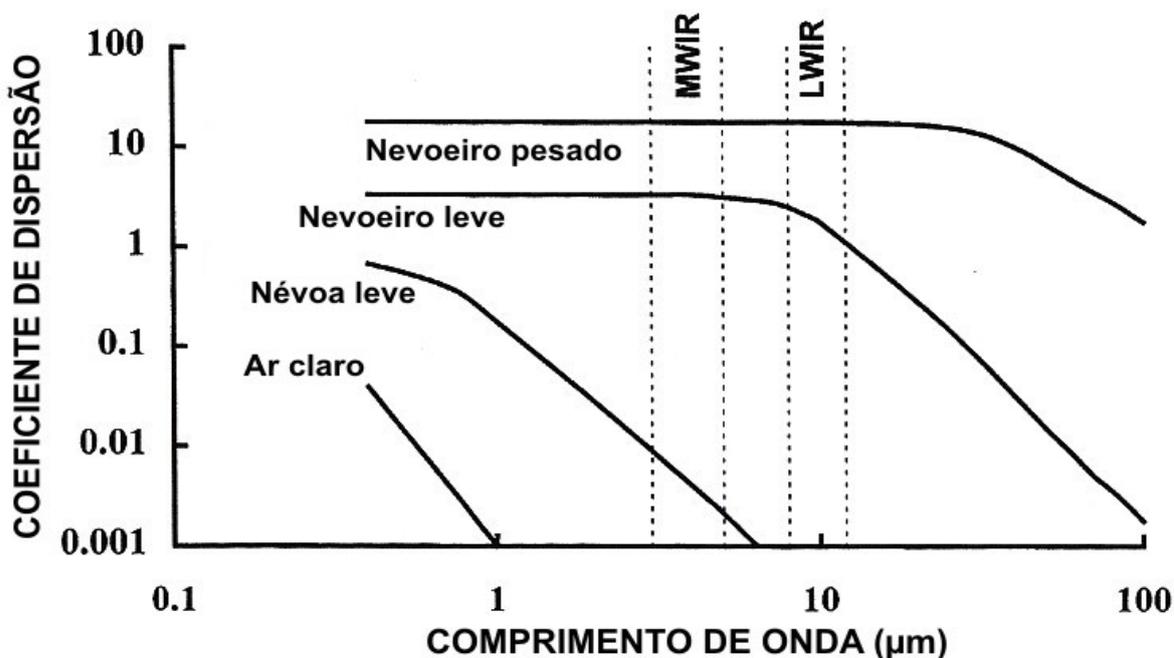
**Figura 60** – Efeito da chuva sobre a temperatura das conexões do ensaio da Figura 51.



**Figura 61** – Efeito da chuva sobre a temperatura das conexões do ensaio da Figura 51. (a) Uma hora antes do início da Chuva - (b) Durante a chuva - (c) Uma hora após o término da chuva

### 3.4.3.2.2. Atenuação

O vapor d'água presente na atmosfera provoca a absorção da radiação infravermelha reduzindo a transmitância atmosférica. Quando a concentração de água na atmosfera aumenta, a transmitância diminui. Em casos de neblina, a atenuação maior é causada pela dispersão da radiação devido aos aerossóis (partículas suspensas no ar). 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, (Host, 2000). O gráfico da Figura 62 mostra o coeficiente de dispersão em função do comprimento de onda para diferentes intensidades de neblina (diferentes dimensões de partículas) e para uma distância de 1 km.



**Figura 62** – Dispersão em função do comprimento de onda para diferentes intensidades de neblina (nevoeiro) e para uma distância de 1 Km.

Em inspeções termográficas de subestações de alta tensão, cujas distâncias dificilmente ultrapassam 50 metros, a atenuação devido à dispersão é mínima.

Para reduzir a influência da chuva e umidade sobre os resultados da inspeção termográfica, recomenda-se não realizar inspeções termográficas sob chuva, garoa, neblina ou com umidade relativa do ar muito alta. Inspeções termográficas,

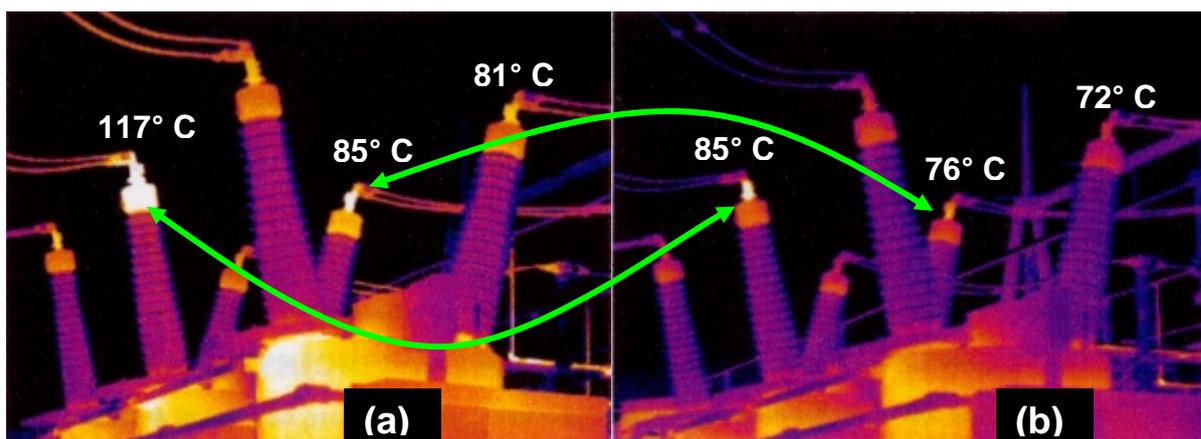
---

imediatamente após a ocorrência de chuva, devem ser evitadas em razão da forte redução da temperatura do componente sob inspeção, como pode ser conferido nos resultados do gráfico da Figura 60. É conveniente que a inspeção tenha início com, no mínimo, uma hora após o término da chuva, Figura 61 (c).

#### 3.4.3.3. Vento

O vento é considerado como ar em movimento. Resultado do deslocamento de massas de ar, derivado dos efeitos das diferenças de pressão atmosférica entre duas regiões distintas, que têm uma origem térmica e diretamente relacionadas com a radiação solar e os processos de aquecimento das massas de ar, (Wikipedia, 2006).

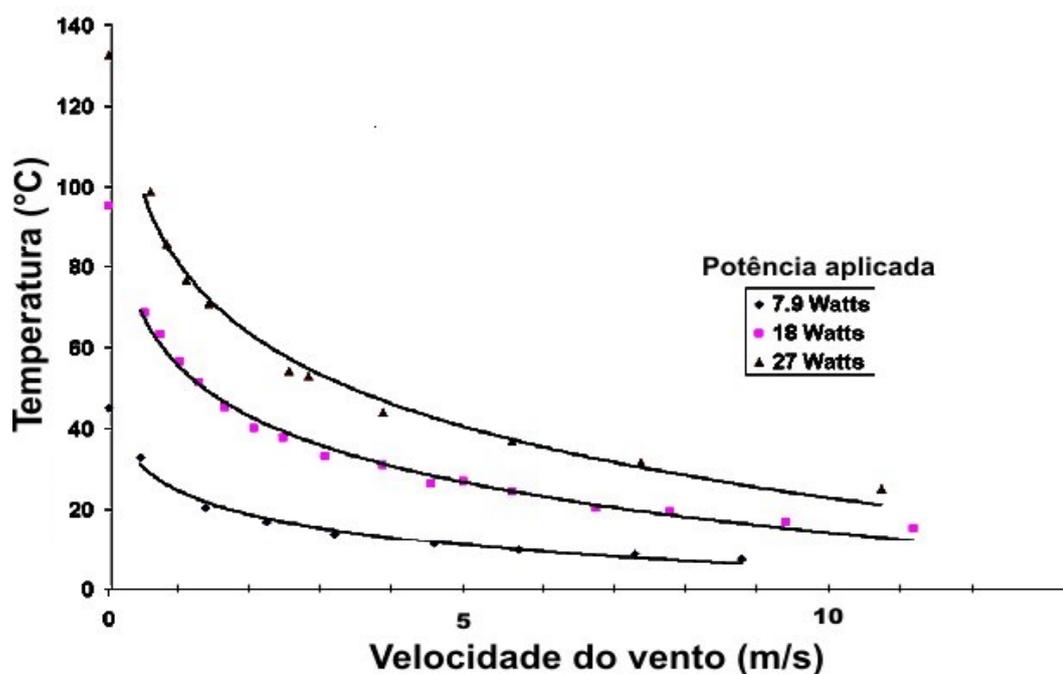
Em inspeções termográficas realizadas em ambientes abertos, o vento exerce um papel importante no resultado final da inspeção. Ventos com velocidade relativamente baixa podem afetar consideravelmente a temperatura do objeto inspecionado. Sérios defeitos podem ter sua temperatura reduzida e aparentar, em uma imagem térmica, um problema sem maior gravidade. Por outro lado, defeitos em estágios iniciais, apresentando pequenos aumentos de temperatura, podem simplesmente não ser detectados pela inspeção, (Snell, 2001). A Figura 63 mostra um exemplo em que as duas situações descritas ocorrem.



**Figura 63** – 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.

---

Em experimentos realizados em laboratório, com condições estáveis e controladas, Madding & Lyon (2000), utilizando uma Chave Fusível como amostra, demonstram que as maiores reduções na temperatura do componente ocorrem nas baixas velocidades de vento, continuando em queda nas altas velocidades, mas a uma taxa muito menor, Figura 64.



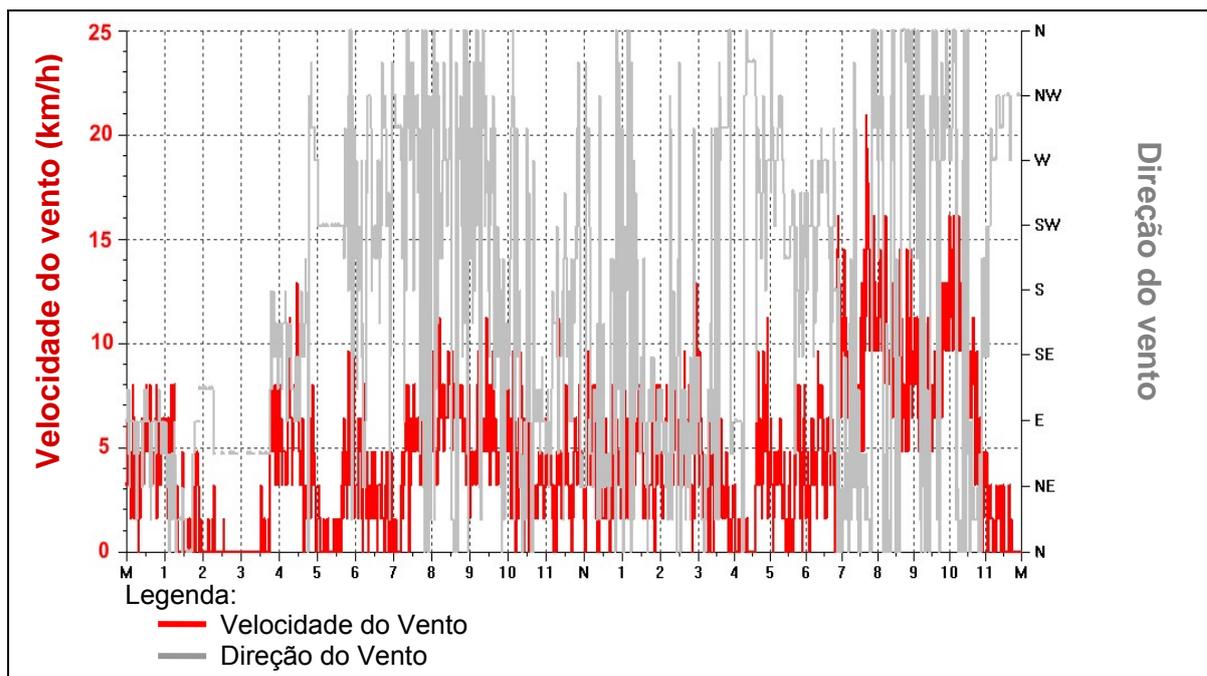
**Figura 64** – Redução da temperatura do componente em função da velocidade do vento.

O efeito do vento sobre a temperatura do componente sob inspeção depende de vários fatores. Entre eles, a potência que está sendo dissipada pelo componente em questão, a velocidade, direção e duração do vento, a área e o formato do componente e as estruturas e construções que estão à sua volta, (Madding & Lyon, 1999). Embora trabalhos, como o de Kaplan (1999), apresentem tabelas de fatores de conversão da temperatura em função da velocidade do vento – (Tabela 9), um simples fator multiplicativo de correção é impraticável em situações reais de inspeção em ambientes abertos.

**Tabela 9** – Fator de correção para uma placa vertical

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
8	28,8	2,50

O gráfico da Figura 65 apresenta um exemplo de como uma subestação de alta tensão em ambiente aberto pode estar sujeita à variação da velocidade e da direção do vento. Os dados foram retirados do ensaio apresentado na Figura 51.



**Figura 65** – Variação da velocidade e direção do vento, monitorados por um período de 24 horas, em uma subestação de alta tensão desabrigada.

Ainda utilizando os dados do ensaio esquematizado na Figura 51 e selecionando um período no qual a corrente teve uma pequena variação, pode-se observar pelo gráfico da Figura 66 e pelas imagens da Figura 67, o forte efeito do

vento sobre a temperatura de uma conexão defeituosa e uma normal, mesmo sendo a baixas velocidades.

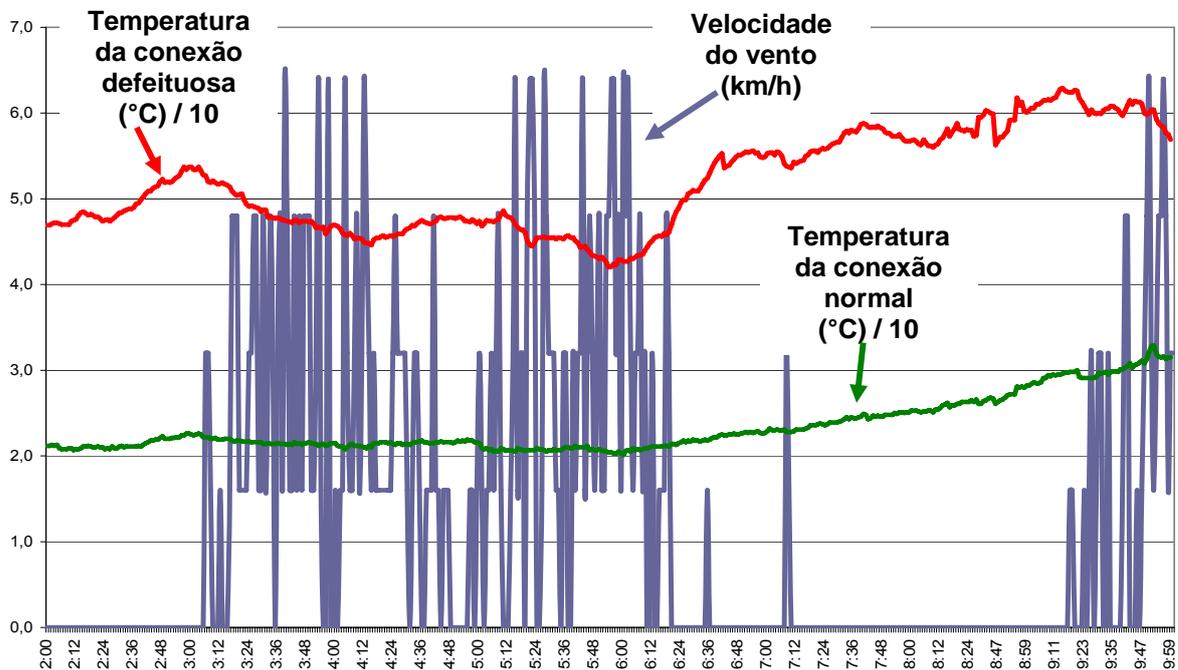


Figura 66 – Efeito do vento sobre a temperatura de uma conexão defeituosa e uma normal.

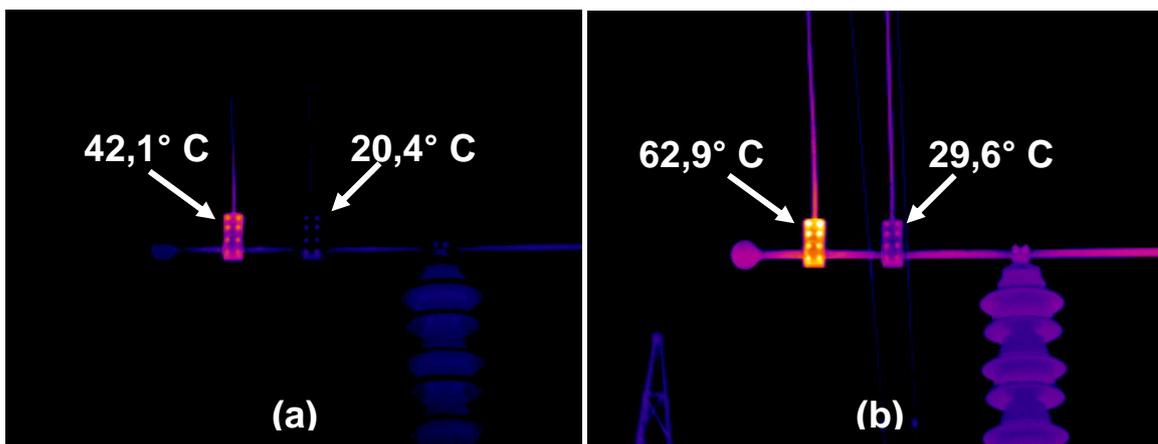


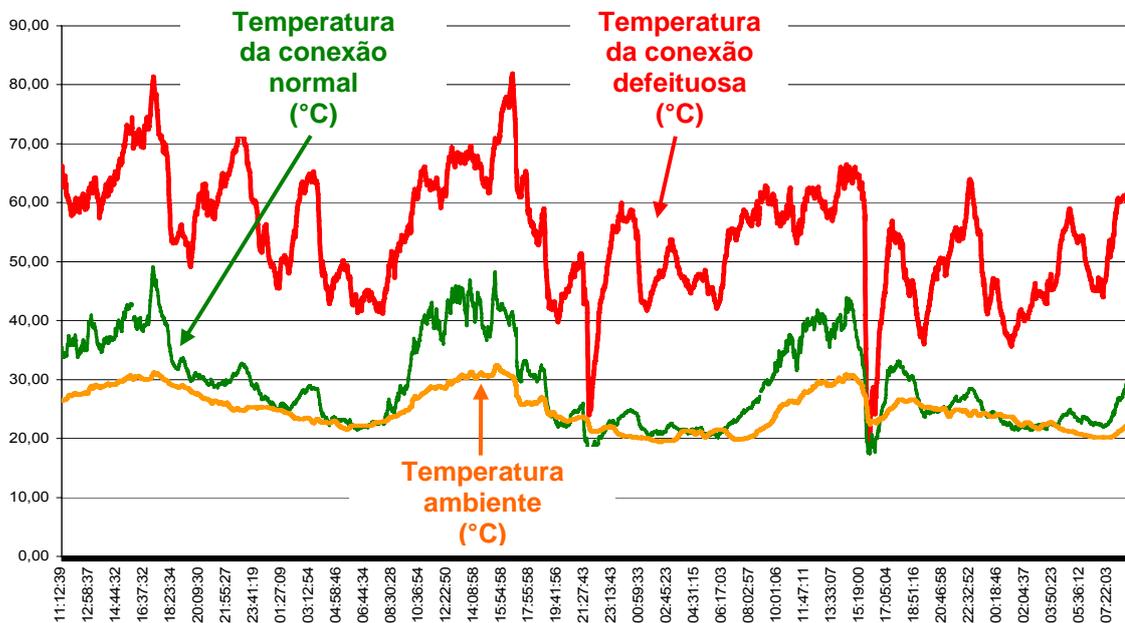
Figura 67 – Efeito do vento sobre a temperatura de uma conexão defeituosa e uma normal. (a) Com velocidade do vento de 6,4 km/h (5:55 h) - (b) Com velocidade do vento igual a 0 km/h (9:14 h).

O efeito do vento sobre a inspeção termográfica é importante e geralmente difícil de evitar. Fatores de correção da temperatura em função da velocidade do

vento para ambientes abertos são impraticáveis. Portanto, resta ao inspetor de termografia ter conhecimento da influência do vento sobre a temperatura do componente sob inspeção e tentar realizar as medidas de temperatura nos intervalos de menor velocidade de vento possível. Para ajudar na análise e diagnóstico das imagens térmicas, Madding & Lyon (2002) recomendam fazer a leitura de temperatura, quando possível, na superfície do componente oposta à incidência do vento, para que o seu efeito seja minimizado.

#### 3.4.3.4. Temperatura ambiente

Inspeções termográficas em ambientes abertos devem levar em conta a temperatura ambiente, especialmente nos extremos do verão e do inverno. Considerando as outras influências estáveis, um aumento da temperatura ambiente resultará em um aumento da temperatura do componente (Figura 68), portanto falhas têm uma maior probabilidade de ocorrerem durante dias quentes. Por outro lado, defeitos que comumente apresentariam um ligeiro aumento de temperatura, em dias frios podem simplesmente não ser detectados, (Maldague & Moore, 2001).



**Figura 68** – Variação da temperatura de uma conexão defeituosa e outra normal e da temperatura ambiente durante um período de aproximadamente 70 horas.

---

Sempre que possível, a inspeção deve ser realizada sob as piores condições. Se a periodicidade de inspeção for anual, o período do ano escolhido deve ser o mais quente, ou seja, durante o verão.

---

## **4. PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO**

Diante de todas as influências e limitações da aplicação da termografia descritas e demonstradas nesse trabalho, da carência de publicações e normas nacionais sobre o assunto e a importância que a termografia tem alcançado no setor de energia elétrica, é fundamental que um procedimento de inspeção dirigido à aplicação da termografia em subestações localizadas em ambientes abertos seja aqui apresentado. Procedimento que poderá servir como base de procedimentos mais específicos de cada empresa, lembrando que um procedimento escrito não substitui e nem elimina a necessidade de Termografistas treinados e capacitados para a inspeção, mas que tem como finalidade orientá-los a proceder de um modo seguro, padronizado e repetitivo na busca de resultados consistentes e confiáveis, extraindo o máximo benefício da técnica.

O procedimento descrito a seguir é produto da revisão de diversos artigos publicados, de normas internacionais dirigidas à termografia, da observação da Norma Regulamentadora N° 10 - NR 10, de procedimentos de inspeção adotados por empresas do setor de energia brasileiro (PETROBRÁS, FURNAS, ELETRONUCLEAR, CHESF, ELEKTRO, CTEEP, ALCOA) e dos resultados obtidos pelos ensaios apresentados nesse trabalho.

### **4.1. Escopo**

Inspeções utilizando a termografia infravermelha em Subestações de Alta Tensão localizadas em ambientes abertos.

### **4.2. Objetivos**

Definir os procedimentos para a execução de inspeções utilizando a termografia infravermelha em Subestações de Alta Tensão localizadas em ambientes abertos, bem como fornecer um modelo de registro das anomalias térmicas encontradas e prover critérios para avaliação da severidade das anomalias térmicas.

---

### 4.3. Definições

#### **Anomalia Térmica**

Componente, conexão ou condutor que apresente uma indicação de temperatura que se desvie do esperado.

#### **Corrente Histórica**

Média das correntes máximas dos últimos 12 meses, eliminando as contingências.

#### **Delta Tref ( $\Delta T_{ref}$ )**

Módulo da diferença entre a leitura da temperatura do Ponto com Anomalia Térmica (*Pat*) e a leitura da temperatura do Ponto de Referência (*Pref*):

$$\Delta T_{ref} = | T_{Pat} - T_{Pref} |$$

Na qual,

$\Delta T_{ref}$  = Diferença entre a temperatura do *Pat* e a temperatura do *Pref*.

$T_{PTA}$  = Leitura da temperatura do *Pat*.

$T_{Pref}$  = Leitura da temperatura do *Pref*.

#### **Delta Tamb ( $\Delta T_{amb}$ )**

Diferença entre a leitura da temperatura do Ponto com Anomalia Térmica (*Pat*) e a leitura da temperatura ambiente:

$$\Delta T_{amb} = T_{Pat} - T_{amb}$$

Na qual,

$\Delta T_{amb}$  = Diferença entre a temperatura do *Pat* e a temperatura ambiente.

---

$T_{Pat}$  = Leitura da temperatura do *Pat*.

$T_{amb}$  = Leitura da temperatura ambiente.

### ***Emissividade***

Relação variável entre a energia total irradiada por uma dada superfície em uma dada temperatura e a energia total irradiada por um Corpo Negro à mesma temperatura.

A emissividade é um fenômeno de superfície que depende da composição e da condição desta superfície. Materiais polidos têm menor emissividade que materiais ásperos ou corroídos.

A faixa de valores de emissividade varia entre 0, para um refletor perfeito, e 1,0, para um Corpo Negro.

### ***Ponto com Anomalia Térmica (Pat)***

Ponto de maior temperatura da anomalia térmica.

### ***Ponto de Referência (Pref)***

Ponto que possua o mesmo material e esteja sob as mesmas condições de operação e carga do Ponto com Anomalia Térmica (*Pat*) que está sendo avaliado. Preferencialmente em outra fase e que apresente temperatura dentro dos valores normais esperados.

### ***Responsável pela Inspeção Termográfica***

É o profissional que solicitou a inspeção termográfica.

### ***Rota de Inspeção***

Caminho que o inspetor deve seguir para realizar as inspeções. Deve relacionar os equipamentos a serem inspecionados, observando questões de segurança, importância dos equipamentos no Sistema e eficiência relacionada a possíveis manutenções.

---

### ***Termografista***

É o profissional capacitado a realizar e a documentar inspeções termográficas. Em função de sua capacitação, pode também, analisar e gerenciar trabalhos de inspeções termográficas.

### ***Termograma***

Imagem térmica obtida a partir da radiação térmica (infravermelha), naturalmente emitida pelos corpos, em função de sua temperatura e sua emissividade.

## **4.4. Responsabilidades**

### ***Termografista***

- Conhecer a operação do termovisor utilizado e suas limitações para o tipo de inspeção requerida.
- Ter conhecimento suficiente para entender os padrões de radiação térmica observados.
- Observar e saber ponderar os efeitos das condições ambientais e da condição dos equipamentos sob inspeção, no momento da inspeção.
- Obter autorização para trabalhar na área a ser inspecionada.
- Realizar, em conjunto com o Responsável pela Inspeção Termográfica, uma avaliação prévia dos riscos (APR). Estudar e planejar as atividades e ações a serem desenvolvidas de forma a atender a todos os requisitos de segurança aplicáveis à área a ser inspecionada (NR 10 – 10.7.5).
- Seguir a Rota de Inspeção elaborada pelo Responsável pela Inspeção Termográfica.
- Registrar, conforme modelo, as anomalias térmicas encontradas.

### ***Responsável pela Inspeção Termográfica***

- Elaborar a Rota de Inspeção.

- 
- Realizar, em conjunto com o Termografista, uma avaliação prévia dos riscos (APR). Estudar e planejar as atividades e ações a serem desenvolvidas de forma a atender a todos os requisitos de segurança aplicáveis à área a ser inspecionada (NR 10 – 10.7.5).
  - Fornecer ao Termografista a autorização para trabalhar na área a ser inspecionada.

#### **4.5. Inspeção Termográfica**

##### ***Pré-requisitos***

- Realizar a inspeção com, no mínimo, um Termografista e um trabalhador autorizado a trabalhar em instalações elétricas (NR 10 – 10.7.3).
- Obter autorização para trabalhar na área a ser inspecionada.
- Abrir ordem de serviço específica para data e local, assinada pelo responsável pela área a ser inspecionada (NR 10 – 10.7.4).

##### ***Equipamentos e Materiais Necessários para a Inspeção***

- Termovisor.
- Termo-higro-anemômetro.
- Máquina fotográfica digital.
- Lanterna de alta potência (inspeções noturnas).
- Rádio para comunicação com o centro de operação (NR 10 – 10.7.9).

Obs.: A câmera térmica e o termo-higro-anemômetro devem estar com a calibração dentro do prazo de validade. (NR 10 – 10.7.8)

##### ***Precauções***

- Observar as normas de segurança comuns à área a ser inspecionada.
- Observar as especificações e os cuidados descritos no manual do fabricante referente aos equipamentos utilizados.

---

## **Recomendações**

As recomendações abaixo devem ser observadas, embora a inspeção possa ser realizada em ocasiões em que seja difícil alcançar todas as condições desejadas. Entretanto, o Termografista deve ter em mente que tal opção pode influenciar consideravelmente os resultados obtidos.

- Evitar inspeções termográficas diurnas para não haver influências do reflexo e do carregamento solar.
- Evitar inspeções com velocidade do vento acima de 20 km/h.
- Evitar inspeções com corrente abaixo de 40% da corrente histórica.
- Não realizar inspeções com umidade relativa do ar acima de 90%.
- Após a ocorrência de chuva esperar, no mínimo, 1 hora para iniciar a inspeção.
- Para obter as leituras de temperatura, os equipamentos sob inspeção deverão estar em carga no período que antecede a inspeção de, no mínimo uma hora, para que seja possível alcançar a estabilidade térmica.
- O ângulo entre a lente do termovisor e o ponto inspecionado deve ser o mais perpendicular possível para se evitar a redução da emissividade por ângulos de observação muito agudos.

## **Procedimento Detalhado**

- Iniciar a inspeção, preferencialmente, uma hora após o por do Sol. Na necessidade de inspeções diurnas, recomenda-se que sejam realizadas preferencialmente até no máximo 2 horas após o nascer do sol ou em dias nublados para evitar o carregamento solar.
- Adaptar ao termovisor, a lente telescópica adequada às distâncias e às dimensões dos pontos a serem inspecionados, não esquecendo que essas lentes têm uma distância mínima focal. Na maioria das situações encontradas nas subestações brasileiras uma lente de campo de visão de 12° é suficiente.

- 
- Ajustar a emissividade do termovisor para 0,75.
  - Realizar a inspeção de acordo com a Rota de Inspeção pré-estabelecida.
  - Ao localizar algum ponto com provável anomalia:
    - aproximar-se o máximo possível (sempre respeitando as distâncias limites de segurança) para obter a imagem e a leitura de temperatura;
    - ajustar o foco da câmera para a melhor condição, a fim de se evitar erros de leitura;
    - procurar medir a temperatura nos pontos de maior emissividade do objeto sob inspeção, isto é, nas áreas pintadas ou com cavidades, ou atacadas por corrosão ou oxidação ou poluição;
    - realizar e registrar as medidas de velocidade do vento, temperatura ambiente e umidade relativa do ar;
    - obter e registrar a corrente média no ponto no período de uma hora anterior à inspeção;
    - identificar e registrar os dados do ponto, como dados de placa, fase ou nº do circuito e faixa de tensão;
    - obter a imagem térmica e visível do ponto com anomalia, bem como a imagem e a leitura de temperatura do Ponto de Referência.
  - Ao final da inspeção comunicar à Sala de Controle.
  - Para cada anomalia encontrada:
    - Responder às perguntas do item 4.7 para determinar as providências a serem adotadas.
    - Preencher o relatório apresentado no item 4.8 e dar conhecimento ao setor encarregado da manutenção para programar a data do reparo em função das respostas às perguntas do item 4.7.
  - Após a equipe de manutenção ter feito o reparo, deve ser realizada outra inspeção para assegurar que as anomalias foram sanadas. Caso o ponto ainda esteja apresentando problemas, outro relatório deve ser emitido, com a observação de que o ponto já foi relatado anteriormente.

---

## **Periodicidade**

A periodicidade da inspeção termográfica em subestações de alta tensão deve ser definida de acordo com as particularidades de cada empresa, mas deve ser levado em consideração que inspeções realizadas com periodicidades curtas favorecem a detecção de anomalias térmicas em estágios iniciais, possibilitando uma manutenção programada, ao passo que, inspeções com periodicidades longas podem encontrar anomalias em estágios críticos exigindo uma manutenção de urgência.

Pode-se estabelecer uma periodicidade inicial de três meses e futuramente definir a periodicidade ideal para a subestação, levando em consideração a observação anterior.

### **4.6. Segurança nas Inspeções**

#### ***Orientações gerais***

- Uma das grandes vantagens da termografia é a realização da inspeção sem a interrupção da produção, isto é, com os equipamentos em pleno funcionamento (energizados e sob carga), por essa razão o cumprimento das normas de segurança comuns à área a ser inspecionada deve ser rigorosamente observado. Um cuidado especial deve ser tomado quando existe a necessidade de abertura de painéis e a aproximação de equipamentos energizados, situações em que o Termografista está exposto a grandes riscos.
- Outra observação importante é com relação ao caminho percorrido. Em subestações o terreno geralmente é irregular e a visão através do termovisor não dá a noção de profundidade. Britas, valas e diferenças de níveis podem causar a queda do Termografista com a câmera. É importante um prévio conhecimento do caminho a ser percorrido ou que o Termografista que caminha com a câmera seja orientado das irregularidades do terreno pelo parceiro de inspeção.

- 
- Antes de iniciar os trabalhos de inspeção, o Responsável pela Inspeção Termográfica em conjunto com o Termografista devem realizar uma avaliação prévia dos riscos (APR), estudar e planejar as atividades e ações a serem desenvolvidas de forma a atender a todos os requisitos de segurança aplicáveis à área a ser inspecionada (NR 10 – 10.7.5).

### ***Acesso à Subestação***

O inspetor de termografia deve fazer uma varredura, com o termovisor, nos equipamentos da subestação, antes mesmo de transpor o portão da subestação. Equipamentos em processo de deterioração e prestes a explodir geralmente apresentam altas temperaturas que podem ser detectadas pelo termovisor a distâncias relativamente grandes.

### ***Equipamento de Proteção Individual (EPI):***

#### *Inspeção em Ambientes Abertos da Subestação*

- Capacete.
- Óculos de segurança.
- Bota de segurança com solado para riscos elétricos.
- Vestimentas aprovadas.

#### *Inspeção em Painéis e Cubículos Blindados*

- Capacete.
- Óculos de segurança.
- Bota de segurança com solado para riscos elétricos.
- Luvas de malha de Nomex.
- Traje de proteção contra arco elétrico

## **4.7. Avaliação da Severidade das Anomalias Térmicas Encontradas**

Uma análise da severidade das anomalias térmicas encontradas deve ser realizada para se determinar a urgência dos reparos. Infelizmente pouco se sabe sobre a relação entre temperatura e o tempo para a ocorrência de falhas causadas

---

por alta resistência em pequenas superfícies de contato, mas valores de temperatura, nos quais os metais (utilizados em condutores e conexões) oxidam, recozem ou fundem, podem ser tomados como limites de temperatura e como dados iniciais de análise. Por exemplo:

- A temperatura para o cobre não deve exceder a 80° C, pois a partir dessa temperatura, a taxa de oxidação do cobre na presença de ar aumenta rapidamente e pode produzir um acumulativo e excessivo aquecimento local nas conexões e contatos. Com base nesse fato, as normas da American Institute of Electrical Engineers – AIEE e National Electric Manufacturers – NEMA especificam como limites de operação para condutores descobertos um aumento de temperatura de 30° C acima de uma temperatura ambiente de 40° C, (Burndy, 1995).
- Para muitas ligas utilizadas em condutores e conexões, o recozimento pode ocorrer caso a temperatura se mantenha acima de 93° C por um período de 30 dias. Após o recozimento, ocorre uma alteração nas características do material, com a perda da resistência, o que aumenta consideravelmente a probabilidade de falhas, (Snell, 2001). Além disso, temperaturas acima de 93° C podem degradar os compostos comumente utilizados para proteger as conexões da oxidação, acelerando o processo de envelhecimento e diminuindo a vida útil da conexão, (IEEE, 2004).

A maioria das Normas e Orientações internacionais baseia seus critérios de avaliação da severidade das anomalias térmicas no aumento de temperatura acima de uma temperatura de referência (componente similar e sob mesma carga,  $\Delta T_{ref}$ ) ou acima da temperatura ambiente ( $\Delta T_{amb}$ ). A Tabela 10 faz uma comparação entre algumas das Normas mais conhecidas.

**Tabela 10** – Comparativo de critérios de severidade de algumas Normas internacionais.

Severidade	Ref.	NETA <sup>1</sup> (° C)	US NAVY <sup>2</sup> (° C)	NMAC <sup>3</sup> (° C)	Nuclear <sup>4</sup> (° C)	CES <sup>5</sup> (° C)
Baixa	ΔTref	1 – 3	10 – 24	0,5 – 8	5 – 15	14 – 20
	ΔTamb	1 – 10				
Média	ΔTref	4 – 15	25 – 39	9 – 28	16 – 35	21 – 60
	ΔTamb	11 – 20				
Alta	ΔTref	NA	40 – 69	29 – 56	36 – 75	
	ΔTamb	21 – 40				
Crítica	ΔTref	> 15	> 70	> 56	> 75	> 61
	ΔTamb	> 40				

<sup>1</sup> NETA – NETA MTS-2001, “Maintenance Testing Specifications for Electric Power Distribution Systems”, NETA – InterNational Electrical Testing Association, (Snell, 2001).

<sup>2</sup> US NAVY – MIL-STD-2194 (SH) “Infrared Thermal Imaging Survey Procedure for Electrical Equipment”; Naval Sea Systems Command 02/1988; (Snell, 2001).

<sup>3</sup> NMAC – Nuclear Maintenance Applications Center – Infrared Thermography Guide (NP-6973), EPRI Research Reports Center. (Snell, 2001).

<sup>4</sup> Nuclear – Nuclear industry guidelines - (IR-F/H/V-200, Rev. 1); (Rogers, 2002).

<sup>5</sup> CES Guidelines - Overhead electrical wiring; (Rogers, 2002).

Ainda com referência à Tabela 10, a ação a ser tomada e o prazo para executá-la são definidos como descrito a seguir:

- Severidade Baixa - Verificar na próxima manutenção programada.
- Severidade Média - Corrigir na próxima manutenção programada.
- Severidade Alta - Intervenção de urgência observando as restrições operativas do Sistema.
- Severidade Crítica - Intervenção imediata.

---

A aplicação das Normas citadas acima deve ser feita com precaução quando em subestações em ambientes abertos, visto que, os critérios de severidade se fundamentam em leituras de temperatura (Delta T) e não levam em consideração as várias influências descritas nesse trabalho. Assim sendo, podem levar a análises equivocadas e a diagnósticos errados.

Em seu artigo “Prioriting Based on all Relevant Factors”, Snell (2003) adota um método que se utiliza de várias perguntas direcionadas ao termografista, cuja finalidade é a avaliação, através das respostas fornecidas, da severidade das anomalias térmicas em função dos vários fatores relevantes em uma inspeção termográfica. A partir dessa avaliação é definida a ação a ser tomada e o prazo para executá-la. Baseado nesse método e dando um enfoque a subestações de alta tensão em ambientes abertos foram elaboradas as questões abaixo.

### **Estágio 1**

- Existe aquecimento visível ou derretimento evidente?
- A temperatura absoluta é maior que 93° C? (*Medidas feitas em superfícies de alta emissividade próximas da fonte de aquecimento*).
- O delta T entre a anomalia térmica e uma temperatura de referência (componente similar e sob mesma carga,  $\Delta T_{ref}$ ) é maior que 35° C? (*Medidas feitas em superfícies de alta emissividade próximas da fonte de aquecimento*).
- O aquecimento é de origem interna e o delta T entre a anomalia térmica e a temperatura de referência (componente similar e sob mesma carga,  $\Delta T_{ref}$ ) é maior que 10° C? (*Conexões dentro de dispositivos a óleo, pára-raios, conectores prensados, etc*).

Se qualquer uma das questões tiver resposta positiva existe uma alta probabilidade de falha e as ações a serem tomadas podem ser:

- Intervir imediatamente.
- Monitorar o componente continuamente até ser possível a intervenção.

---

Se nenhuma das perguntas tiver resposta positiva o termografista passa a responder o Estágio 2.

## **Estágio 2**

- O delta T entre a anomalia térmica e uma temperatura de referência (componente similar e sob mesma carga,  $\Delta T_{ref}$ ) é maior que 10° C? (*Medidas feitas em superfícies de alta emissividade próximas da fonte de aquecimento*).
- Existe a possibilidade da corrente de carga dobrar antes do reparo?
- A emissividade do componente é muito baixa?
- A velocidade do vento é maior que 10 km/h? (*Medidas da velocidade do vento feitas próximas da anomalia*).
- Existe um histórico de falhas para este componente?
- O componente está sujeito a um severo ciclo de trabalho? (*Excessiva vibração, poeira, poluição, agentes corrosivos ou oscilação de carga*).

Se duas ou mais questões tiverem resposta positiva, a anomalia térmica é classificada com tendo uma moderada probabilidade de falha. Nesse caso uma avaliação por parte do gerente da manutenção ou da subestação ajudará a definir qual ação deve ser tomada.

As perguntas abaixo auxiliam o gerente nessa tarefa:

- Existe grande risco de acidentes pessoais caso a falha ocorra?
- Qual é a importância do equipamento / circuito para o Sistema no momento atual?
- Existe a possibilidade de reduzir o risco de falha por meio de manobras de circuitos e/ou diminuição da corrente de carga?
- Existem pessoal e sobressalente disponíveis para o reparo no período estabelecido para a intervenção?

---

Com base nas respostas, as ações podem ser:

- Intervir com urgência observando as restrições operativas do Sistema.
- Corrigir na próxima manutenção programada.
- Monitorar o componente periodicamente até ser possível o reparo.
- Executar outros testes de diagnóstico.
- Reduzir a corrente de carga do componente.

Caso uma ou nenhuma pergunta do Estágio 2 tiver resposta positiva, a anomalia é classificada como tendo uma baixa probabilidade de falha e as ações podem ser as seguintes:

- Corrigir na próxima manutenção programada.
- Verificar na próxima manutenção programada.
- Executar outros testes de diagnóstico.



---

## 5. CONCLUSÃO

A despeito de ser uma excelente ferramenta de auxílio na prevenção de falhas do Sistema Elétrico, a inspeção utilizando a termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas 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. Essa Dissertação procurou apresentar essas influências e limitações, comprová-las de maneira prática e especialmente dirigida às subestações de alta tensão desabrigadas, fornecendo material para suprir a carência deste tipo de informação a nível nacional.

A pesquisa das limitações e influências tratadas no capítulo 3 e a realização de ensaios para comprová-las, resultaram em observações, embora simples, ainda não abordadas em nenhum dos documentos aqui revisados e de grande importância na análise dos resultados da inspeção termográfica. Observações como o período pós-chuva restritivo à inspeção e a utilização equivocada da corrente instantânea versus a corrente máxima do circuito para a análise do defeito em sistemas com grande variação de carga, desconsiderando a resposta térmica. Ainda no capítulo 3 é proposto um aumento seletivo da emissividade das conexões para aprimorar o resultado da inspeção termográfica, sendo que alguns trabalhos, aqui mencionados, incentivam apenas o aumento da emissividade, não levando em consideração o comprimento de onda. O Procedimento de Inspeção, apresentado no Capítulo 4 e elaborado a partir de práticas de várias empresas, trabalhos aqui referenciados e principalmente das influências e limitações aqui discutidas e avaliadas, pode servir como um documento base para procedimentos padronizados mais específicos de empresas do setor de energia, tornando-se um elemento importante na aquisição de dados sobre bases confiáveis e repetitivas.

Essa Dissertação procurou abordar de forma geral as limitações da aplicação da Termografia Infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas. Desse trabalho surgiu o interesse por trabalhos mais específicos, que já estão sendo desenvolvidos. Um deles busca quantificar as influências físicas sobre as inspeções

---

utilizando a termografia e outro procura desenvolver um sistema de auxílio à tomada de decisões e interpretação dos termogramas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abende, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção; “Fatores Críticos para o Sucesso da Manutenção Preditiva”; Revista Abende, N° 14, Ano II, pág. 35 – Junho 2006.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas; “TB-23/91 Lighting Terminology”; Dez/1991.
- AGA; “Thermovision System 680/102B – Operating Manual, Publication 556.053”; AGA 1969.
- Agema infrared Systems; “Monitoring Hot Spots using Thermographic Inspection of Electrical Instalations”; AGART1/H 1989.
- ALCOA; “Alta Tensão / Manutenção Elétrica - Doc. 50001098 00”; ALCOA, 1998.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; “Informações do Setor Elétrico” [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br), 2006.
- ASNT, The American Society for Nondestructive Testing; “Recommended Practice N° SNT-TC-1A”; ASNT 2001 Edition.
- 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.
- Barsa, Enciclopédia; Encyclopaedia Britannica do Brasil Publicações Ltda.; Volume 4, pág. 225, 1993.

- 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.
- 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.
- 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, Mikael; “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.
- Eletronuclear, Usina Nuclear de Angra dos Reis; “Manutenção Preditiva por Termografia - PN-T 12 Rev. 01” UNAR, 1999.
- Epperly, R.A.; Hebertain, 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 – April 8, 2003.
- 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.
- Galindo, T. C. L.; "Gestão da Técnica Preditiva de Termovisão"; Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF, 2005.
- Gaussorgues, G.; "La Thermographie Infrarouge – Principes, technologies, Applications"; English language edition; Chapman & Hall 1994.
- GCOI, Grupo Coordenador para Operação do Sistema Subcomitê de Manutenção; "Utilização do Termovisor na Manutenção 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 início da Teoria Quântica"; UNESP, 2004.
- Holst, G. C.; "Common Sense to Approach to Thermal Imaging"; JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 2000.
- 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.
- Infraspection Institute; "Guideline for Infrared Inspection of Electrical and Mechanical Systems"; Infraspection Institute, 2000.
- ISO, The International Organization for Standardization; "ISO9712, Non-Destructive Testing – Qualification and Certification of Personnel"; Third Edition 2005.
- 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<sup>a</sup> Edition SPIE Press Vol. TT34 1999.

- 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 P.; “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 2000.
- 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](http://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, Richard; “Preventive Maintenance Handbook”; Second - Edition, Ontario Hydro, Dezembro 1997.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico; “Conheça o Sistema - Operação do SIN em 2005”; [www.ons.gov.br](http://www.ons.gov.br), 2006.
- Petrobrás, “Inspeção Termográfica em Sistemas Elétricos – N-2475 – Rev. C”; Petrobrás, Fev/2005.
- 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; Barbosa, Luiz 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.
- 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 Tchnology 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; “Prioriting 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.
- Veratti, A. B.; “Termografia – Princípios e Aplicações”; AGA, 1984.
- Veratti, Attílio Bruno; “A Termografia Aplicada à Industria Petroquímica”; Revista C&I Pág. 2 a 6 – Março de 1981.
- Wikipedia; [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com) , 2006.
- Wolfe, William L.; “Introduction to Infrared System Design”; Tutorial Texts in Optical Engineering, Vol. TT 24, SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1996.