

Dissertação de Mestrado

**Diagnóstico de Falhas em Pára-raios Utilizando
Termografia**

Ricardo Costa Álvares

Universidade Federal de Minas Gerais

Outubro de 2008

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Diagnóstico de Falhas em Pára-raios Utilizando Termografia

Ricardo Costa Álvares

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Peterson de Resende

Co-Orientador: Prof. José Luiz Silvino

Belo Horizonte – MG

Outubro de 2008

Folha de Aprovação a ser anexada

*À minha esposa Kátia e filhas
Larissa e Lorena.
Símbolo de compreensão,
amizade e harmonia.*

*“A persistência é o caminho do êxito”
Charles Chaplin*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me dar sabedoria para entender que a vida é um eterno aprendizado. Nos momentos de tristeza e desânimo, me faz descobrir que tudo é passageiro e me torna cada vez mais fiel a sua doutrina. Agradeço ao meu senhor por ter conquistado esse objetivo que há anos parecia impossível e se tornou realidade.

Agradeço ao meu Orientador, o Professor Peterson de Resende pela paciência, confiança, persistência e amizade ao conduzir este trabalho.

Ao Professor José Luiz Silvino pela confiança, apoio, incentivo aos meus estudos e valiosas sugestões.

A minha esposa e filhas que renunciaram a poucas horas de lazer que tinham para me incentivar e por participarem deste trabalho.

Ao Professor e amigo Eduardo de Queiroz Braga, pela amizade, compreensão, paciência e sempre disponibilidade quando eu precisava.

A Nilton Soares pela paciência e valiosas informações.

Ao colega Breno Gurgel pelo apoio e compreensão.

Agradeço a Herbert Geovane de Carvalho, onde tudo começou...

Aos representantes da CEMIG pela liberação, quando foi preciso dentre eles: Ivan de Mello Alves, Júlio César Freitas, José Luiz Pereira, Eduardo Miguel Raposo e Edmilson Martins Gomes.

À equipe da DC/MC de Termografia (Cláudio, Claudinei, Gilvan e Joversino) pelo apoio nas experiências realizadas em campo.

Ao Eng. José Vicente Pereira Duarte por transmitir confiança, sabedoria e orientações relevantes ao trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma me incentivaram e valorizaram este trabalho.

Resumo

Pára-raios são dispositivos construídos para absorver e drenar para a terra a energia proveniente de sobretensões no sistema elétrico que, do contrário, danificariam os equipamentos em uma subestação. Comporta-se como um circuito aberto em condições normais, e como um curto-circuito enquanto existirem sobretensões. Porém, estes dispositivos sofrem degradação por diversos agentes ao longo do tempo, mais notadamente poluição e umidade. Esta degradação pode atingir um estado em que o dispositivo não mais consegue se manter como um circuito aberto em condições normais, fato que pode provocar a sua explosão. Este evento é crítico, tanto pela extensão dos danos materiais (que podem até danificar seriamente um equipamento), quanto pelo perigo que representa para a segurança das pessoas. Buscando minimizar tais ocorrências, fez-se necessário a padronização de uma metodologia de inspeção em pára-raios de subestações. Na presente dissertação, foi investigada a metodologia baseada em termografia que é atualmente empregada pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) na inspeção de seus pára-raios, que consiste em avaliar as diferenças de temperatura encontradas ao longo do corpo do dispositivo, com imagens tomadas em no mínimo três ângulos de visão distintos. Foram realizadas inspeções termográficas em subestações de 138 kV da CEMIG, avaliando a metodologia no que tange à influência da radiação solar, a presença de obstáculos físicos impedindo a aquisição de imagens em ângulos iguais, a escolha do coeficiente de emissividade do material, a quantidade de ângulos de visão adotados e da posterior análise dos termogramas, considerando o número de subáreas em que o dispositivo é dividido e os critérios de diferença de temperatura que são considerados críticos.

Abstract

Surge arresters are devices built to absorb and to drain to the earth the energy originated from lightning in the electric system that, otherwise, would damage the equipments in a substation. It behaves as an open circuit in normal conditions, and as a short circuit while lightning exists. However, these devices could degrade because of many agents along the time, especially pollution and humidity. Depending on the level of degradation it can damage the device resulting in a situation, which it does not get to maintain itself as an open circuit in normal conditions, what could cause an explosion. This event is critical, not only because of the extension of the damages caused to the equipment, but also because of the dangerous situation for the people's safety. Looking into minimize these occurrences it is necessary the standardization of an inspection methodology in surge arrester of substations. In the present dissertation, the methodology was investigated based in thermography currently used by CEMIG (Energy Company of Minas Gerais) in the inspection of its surge arrester that consists of evaluating the temperature differences found along the body of the device, with images taken in at least three different angles of vision. Were accomplished thermographic inspections in substations of 138 kV of CEMIG, evaluating the methodology according to the influence of the solar radiation, the presence of physical obstacles blocking the acquisition of images in same angles, the choice of the coefficient of emissivity of the material, the amount of vision angles adopted and the subsequent analysis of the termograms, the number of sub areas in what the device is divided and also according to the temperature's difference which are considered critical.

Lista de Figuras

Figura 1: Evolução dos dispositivos de proteção (CEPEL, 1977).	19
Figura 2: Características dos pára-raios de ZnO e SiC (adaptado de MEISTER, 2005).....	19
Figura 3: Pára-raios com invólucro de porcelana (ABB, 2004).....	21
Figura 4: Pára-raios instalado em um sistema elétrico (MACEDO et al. 2006).....	23
Figura 5: Relação da amplitude da tensão com o tempo de duração (MEISTER, 2005).....	23
Figura 6: Característica de proteção ideal contra sobretensões (MACEDO et al. 2006).....	24
Figura 7: Pára-raios com centelhadores usado em redes de distribuição (CEMIG, 2002).....	26
Figura 8: 1 - Encapsulamento de cerâmica, 2 - Resistores não lineares de silício (SOBRINHO et al., 2000).	27
Figura 9: (A) Composição interna de um pára-raios de ZnO (SOBRINHO et al., 2000); (B) Pára-raios de óxido de zinco sem centelhador usado em redes de distribuição (CEMIG,2002)	28
Figura 10: Diferença entre as estruturas dos grãos de ZnO (MAXWELL et al.,1995).....	30
Figura 11: - Exemplo de curva não-linear de pára-raios de óxido de zinco (adaptado de ELFWING, 2002).	31
Figura 12: Modelo elétrico do pára-raios de ZnO (SOBRINHO et al.,2000)	36
Figura 13: Diagrama fasorial da corrente de fuga (MACEDO et al., 2006).	37
Figura 14: Modelo de defeito atômico (MENTA & BLITZKOW, 2003).....	38
Figura 15: Detecção antecipada de falha em pára-raios: (a) imagem real do sistema, (b) Termograma com anomalia térmica.	40
Figura 16: Corpo com absorção (α), reflexão (r) e transmissão (τ) (Adaptado de VERATTI et al.,1997).....	42
Figura 17: Corpo Negro absorvendo toda a radiação incidindo sobre ele (Adaptado de VERATTI et al.,1997).....	43
Figura 18: Corpo Negro ($\epsilon=1$), corpo opaco ($r=1$) e corpo transparente ($\tau=1$) para um mesmo comprimento de onda (Adaptado de VERATTI et al.,1997).	44
Figura 19: Cavidade em um corpo ligada ao exterior por um pequeno orifício.....	44
Figura 20: Distribuição espectral de um Corpo Negro (OMEGA, 1998).	45
Figura 21: Comprimento de onda para materiais e temperaturas diferentes (Adaptado de VERATTI et al.,1997).....	47
Figura 22: Espectro eletromagnético, na faixa entre 0,7 to 15 μm utilizado para propósitos de medição e análise térmicas (MIOTTO, 2007).....	48
Figura 23: Sensibilidade relativa de detectores infravermelhos (OMEGA, 1998).....	51
Figura 24: Classificação dos fotodetectores	53
Figura 25: Formação de um par elétron lacuna provocado pela radiação na faixa do infravermelho (Adaptado de VERATTI et al.,1997).....	53
Figura 26: Detectores de PbS e PbSe e um detector de Antimoneto de índio (InSb) da Litton (Adaptado de VERATTI et al.,1997)	54
Figura 27: Esquema da junção p-n (Adaptado de VERATTI et al.,1997).....	54
Figura 28: Detectores Fotovoltaicos - Antimoneto de índio (InSb) e Cadmo telureto(MCT) (Adaptado de VERATTI et al.,1997).	55
Figura 29: Configuração experimental para a caracterização de parâmetros microbolômetro utilizando um instrumento eletrônico (adaptado de GU, X. et al., 1998).....	57
Figura 30: Esquema de um detector térmico de radiação de banda espectral mostrando os elementos básicos da sua construção e operação (MIOTTO, 2007).	60
Figura 31: Escala de cinza (MOURA, 2006).	61

Figura 32: Janelas atmosféricas nos principais comprimentos de onda do espectro eletromagnético (Adaptado de BATISTA & DIAS, 2005)	70
Figura 33: Conjunto de três premissas empregadas no programa de inspeção termográfica (Adaptado de VERATTI et al.,1997)	71
Figura 34: Inspeção termográfica com três posições com ângulos de 120 graus (SILVA, 2007).....	75
Figura 35: Pára-raios de 120kV, 10kA fabricante Hitachi.....	75
Figura 36: Pára-raios com anomalia térmica.....	78
Figura 37: Configuração das posições para a inspeção realizada na subestação 01.....	79
Figura 38: Análise dos termogramas na posição 05 da subestação 01.....	80
Figura 39: Configuração das posições para a inspeção realizada na subestação 02.....	81
Figura 40: Análise dos termogramas na posição 01 da subestação 02.....	82
Figura 41: Análise dos termogramas na posição 01 da subestação 03.....	83
Figura 42: Configuração das posições quando da aquisição das imagens na subestação 03. ...	84
Figura 43: Configuração das posições quando da aquisição das imagens na subestação 04. ...	85
Figura 44: Análise dos termogramas na posição 05 da subestação 04.....	86
Figura 45: Análise da interferência da radiação solar para as posições 02 e 05.....	89
Figura 46: Influência da reflexão solar na posição 04 para o PRAZ.....	90
Figura 47: Comparação entre a subárea AR04 da posição 01 para os três pára-raios.....	92
Figura 48: Área correta, (A) – Posicionamento incorreto das áreas, (B) – Área maior.....	94
Figura 49: (A) Pára-raios a 6m do termovisor, (B) Pára-raio a 2m do termovisor.	97

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características elétricas dos pára-raios

Tabela 3: Parâmetros dos Detectores

Tabela 4: Dados da Inspeção 2 da subestação

Tabela 5: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da Subestação 01

Tabela 6: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da subestação 02 (com $\varepsilon=0,75$)

Tabela 7: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da subestação 02 com $\varepsilon=0,92$

Tabela 8: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da subestação 03 em °C.

Tabela 9: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da inspeção 1

Tabela 10: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da inspeção 2

Tabela 11: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições da inspeção 1 para $\varepsilon= 0,94$

Tabela 12: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições da inspeção 2 para $\varepsilon=0,94$

Sumário

Agradecimentos	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	13
1.1 Objetivos	15
1.2 Organização da Dissertação	15
2 Pára-raios	17
2.1 Introdução	17
2.2 Aspectos Construtivos	18
2.3 Características	22
2.3.1 Pára-raios de Carboneto de Silício (SiC)	25
2.3.2 Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO)	27
2.4 Fatores de degradação	33
2.4.1 Fatores de degradação em pára-raios de SiC	33
2.4.2 Fatores de degradação em pára-raios de ZnO	35
3 Termografia	39
3.1 Introdução	39
3.2 Princípios da termografia	39
3.2.1 Alguns conceitos físicos	42
3.2.2 O espectro eletromagnético na faixa do infravermelho	48
3.3 Detectores de infravermelho	49
3.3.1 Detectores fotônicos – QWIP	52
3.3.2 Detectores térmicos de termopilha	56
3.3.3 Detectores térmicos microbolômetros	56
3.4 Câmera de Infravermelho	59
3.5 A formação da imagem digital infravermelho	60
4 Base de Dados de Imagens Termográficas	66
4.1 Introdução	66
4.2 Conceitos básicos em imagens termográficas	67
4.3 Criação de banco de dados	71
4.4 Descrição das inspeções realizadas	78
4.4.1 Inspeção nos pára-raios da Subestação 01	79
4.4.2 Inspeção nos pára-raios da Subestação 02	81
4.4.3 Inspeção nos pára-raios da Subestação 03	83
4.4.4 Inspeção nos pára-raios da subestação 04	85
5 Análise da Base de Dados	88
5.1 Introdução	88
5.2 Análise da inspeção na Subestação 01	88
5.3 Análise da inspeção na Subestação 02	89
5.4 Análise da inspeção na Subestação 03	92
5.5 Análise da inspeção na Subestação 04	94
6 Conclusões e Propostas de Continuidade	98
6.1 Conclusões	98
6.2 Propostas para Trabalhos Futuros	100
Referências Bibliográficas	101

Anexo A - Definições de Termos Técnicos.....	104
Anexo B - Referências Comerciais de Arranjos de Detectores do Tipo Matriz de Plano Focal (FPA)	110
Anexo C - Referências Comerciais em Sistemas de Infravermelho.....	111
Anexo D - Técnicas de Processamento de Imagens	112

1 Introdução

Os equipamentos de uma subestação podem ser solicitados por sobretensões provenientes de ocorrências no sistema ou de descargas atmosféricas. Com o objetivo de impedir que estes equipamentos sejam danificados é necessária a instalação de dispositivos de proteção contra sobretensões, sendo os pára-raios os equipamentos mais adequados para esta finalidade. Atuam como limitadores de tensão, impedindo que valores acima de um determinado nível preestabelecido possam alcançar os equipamentos para os quais fornecem proteção (por exemplo, transformadores, reatores, banco de capacitores etc.).

De uma forma geral, pode-se afirmar que o pára-raios é um equipamento bastante simples do ponto de vista construtivo. Um pára-raios é constituído de um elemento resistivo não linear associado ou não a um centelhador em série. Em operação normal, o pára-raios é semelhante a um circuito aberto. Quando ocorre uma sobretensão, o centelhador dispara e uma corrente circula pelo resistor não linear, impedindo que a tensão nos seus terminais ultrapasse um determinado valor. É possível a eliminação do centelhador, utilizando-se somente o resistor não linear, se o material não linear apresentar uma característica de não linearidade acentuada.

A presente dissertação constitui uma continuidade natural do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) "Novas Técnicas de Manutenção Preditivas em Pára-Raios". Desenvolvido entre a equipe do LRC (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas), DA EEUFMG (Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais), e pela equipe da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). O objetivo do projeto foi investigar os aspectos de envelhecimento dos pára-raios no ambiente de subestações e as técnicas para previsão do final de sua vida útil. O desenvolvimento da investigação concluiu que, dentre outros resultados, que a linha mais promissora de predição de envelhecimento consiste na aplicação da termografia¹. Deste modo, a presente dissertação constitui a continuidade natural do projeto citado.

¹ TERMOGRAFIA - técnica em que as medições de temperatura são realizadas na faixa do espectro infravermelho.

A termografia se destaca dos demais métodos devido à ausência de contato físico de instrumentos de medição com as instalações, além de evitar a interferência na produção, uma vez que o trabalho é realizado com os equipamentos em pleno funcionamento. Acrescenta-se também como vantagem a possibilidade de realizar a inspeção em um número razoável de dispositivos em um curto período de tempo.

Dentre os fatores que contribuem para a degradação dos pára-raios podemos destacar a perda de estanqueidade e penetração de umidade; a contaminação externa do invólucro; a degradação dos resistores de equalização; as descargas parciais internas e as descargas de longa duração ou as de curta duração com alta intensidade. Alguns destes fatores, contribuindo isoladamente ou em conjunto - como a combinação de poluição com umidade - podem provocar a atuação do dispositivo para a tensão operativa do sistema, provocando a explosão ou queima do dispositivo.

Devido ao registro de diversas ocorrências envolvendo a danificação intempestiva dos pára-raios de subestação na tensão de operação do sistema, instalados no sistema de distribuição da CEMIG, fez-se necessária a padronização de uma metodologia de inspeção nesses dispositivos.

Na presente dissertação, foram realizadas diversas inspeções de pára-raios em operação em subestações, tomando imagens termográficas, para formação de um banco de dados que, em seguida, foi utilizado para a análise da degradação dos pára-raios. Foi investigada a coerência de resultados obtidos utilizando a termografia, usando a metodologia de inspeção proposta por SILVA (2007) e evidenciada por ALVARES *et al.* (2008).

1.1 **Objetivos**

O objetivo do presente trabalho é o estudo de uma metodologia de inspeção em pára-raios de subestações usando uma técnica de aquisição de termogramas em ângulos diferentes através do uso da inspeção termográfica para identificar a iminência de falhas em pára-raios.

1.2 **Organização da Dissertação**

O texto desta dissertação é dividido em seis capítulos, iniciando com a presente *Introdução*.

No segundo capítulo, *Pára-raios* é apresentada uma descrição das características dos pára-raios, junto com uma exposição dos fatores de degradação deste dispositivo. Apresenta-se, sobretudo, uma revisão de literatura nos aspectos relativos às características dos pára-raios de óxido de zinco (ZnO) e de carboneto de silício (SiC), incluindo detalhes construtivos. Apresenta-se também uma explanação sobre o desempenho dos pára-raios segundo suas características tensão \times corrente.

No terceiro capítulo, *Termografia*, é apresentado um levantamento dos equipamentos e produtos vinculados à área de Termografia, disponíveis no mercado global, bem como uma descrição da formação da imagem digital infravermelho. Com relação à Termografia, são mencionados alguns conceitos físicos enfocados através da conceituação da radiação térmica emitida por um corpo como resultado de sua temperatura. É apresentada a faixa de espectro eletromagnético que compreende o infravermelho e são apontadas as subdivisões que se adotam atualmente para esta faixa do espectro. São descritos os detectores de infravermelho, ressaltando aqueles designados para operação no infravermelho térmico. Finalmente, é descrita a formação da imagem digital infravermelho (em termos de coordenadas e de quantização em níveis-de-cinza), a partir de imagens térmicas obtidas por câmeras de infravermelho, enfatizando as câmeras que utilizam microbolômetros como elementos detector.

O quarto capítulo, *Base de Dados de Imagens Termográficas*, descreve o procedimento de criação do banco de dados de imagens termográficas para dispositivos pára-raios de subestações. São apresentados alguns conceitos físicos, os procedimentos de inspeção e os

critérios para abertura de relatório termográfico. Finalmente são descritas as inspeções realizadas em quatro subestações, para criação dos dados de imagens termográficas deste trabalho.

O quinto capítulo, *Análise do Banco de Dados*, apresenta os resultados da análise dos dados obtidos nas inspeções dos pára-raios das quatro subestações relatadas no quarto capítulo, com o objetivo de avaliar a metodologia proposta.

No sexto capítulo, *Conclusões e Proposta de Continuidade*, são apresentadas as conclusões finais desta dissertação, decorrentes dos resultados e análises realizados nos Capítulos 4 e 5. Finalmente são tratados os possíveis desdobramentos relativos às propostas de continuidade.

Em *Referências Bibliográficas*, são listados todos os trabalhos que auxiliaram na elaboração desta dissertação, fornecendo dados e conhecimentos importantes.

O *Anexo A*, apresenta definições de termos utilizados no decorrer do trabalho. Os Anexos B e C apresentam referências comerciais de arranjos de sensores matriciais que detectam a faixa do espectro referente ao infravermelho. O anexo D descreve os principais campos de processamento de imagem digitalizada.

2 Pára-raios

2.1 *Introdução*

O registro de diversas ocorrências envolvendo a danificação intempestiva de pára-raios nas subestações de energia elétrica, em alguns casos com explosão do dispositivo, tem constituído motivo de grande preocupação das empresas concessionárias de energia. Portanto, é grande o interesse na disponibilidade de técnicas capazes de estimar a proximidade do fim de vida útil de pára-raios nas subestações de energia elétrica. No presente capítulo, são apresentadas as características do dispositivo juntamente com uma descrição dos fatores de degradação de pára-raios.

Além das exposições às mais diversas condições climáticas, os pára-raios sofrem solicitações de natureza elétrica e térmica, que podem se conjugar com fatores ambientais como, por exemplo, a poluição. Em muitas situações a perigosa combinação de “poluição com umidade” pode causar o disparo individual de um ou mais “centelhadores” nos pára-raios de Carboneto de Silício (SiC) e, por desequilíbrio do circuito de equalização, a atuação de todo o pára-raios para a tensão operativa do sistema, o que pode resultar em sua explosão ou queima, por incapacidade da interrupção da corrente subsequente de frequência industrial (60 Hz). No caso dos os pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO), esta combinação acarretará aumento da corrente resistiva de fuga, vindo provocar a avalanche térmica e, conseqüentemente, resultando em sua explosão ou queima.

Neste capítulo interessa realçar, de forma objetiva, os aspectos construtivos dos pára-raios, suas características e os fatores que influenciam na degradação desses dispositivos.

2.2 *Aspectos Construtivos*

O primeiro dispositivo utilizado como pára-raios foi um simples centelhador conectado entre um condutor e terra do sistema, conforme representado na Figura 1 (A). Entretanto, este dispositivo apresentou alguns pontos negativos em relação a sua utilização, entre os quais a ocorrência de curto-circuito acidental e a incapacidade de interromper a corrente subsequente. Esta proveniente do sistema, após a ocorrência da disrupção. Centelhadores do tipo “chifre” foram construídos, eles apresentavam uma redução da ocorrência de curto-circuito acidental em relação a um simples centelhador, porém sua incapacidade de interrupção de corrente subsequente permanecia inalterada. Melhoramentos posteriores ocorreram com a conexão de resistores lineares em série com os centelhadores, conforme representado na Figura 1 (B). Posteriormente foram desenvolvidos resistores não-lineares a base de Carboneto de Silício (SiC) e, posteriormente, os centelhadores com limitadores de corrente, como mostrado na Figura 1 (C). Com isto, surgiu o pára-raios convencional. Apesar de melhorias sucessivas, a presença dos centelhadores com limitadores de corrente na construção do pára-raios, tornou-se indesejada, principalmente pelo fato de que a ocorrência da disrupção dos centelhadores representa um transitório na tensão. Este transitório ao atingir o equipamento a ser protegido poderia causar uma sollicitação entre espiras muito severa, devido a uma elevada variação da tensão em relação ao curto espaço de tempo provocando um aumento da corrente nas espiras do equipamento protegido (CEPEL, 1977). Ficou evidenciada a necessidade de utilização de um material altamente não-linear, que na faixa de operação do sistema apresentasse uma resistência elevada de tal maneira a evitar a necessidade do uso destes centelhadores. A Figura 1 (D) mostra um pára-raios sem centelhadores.

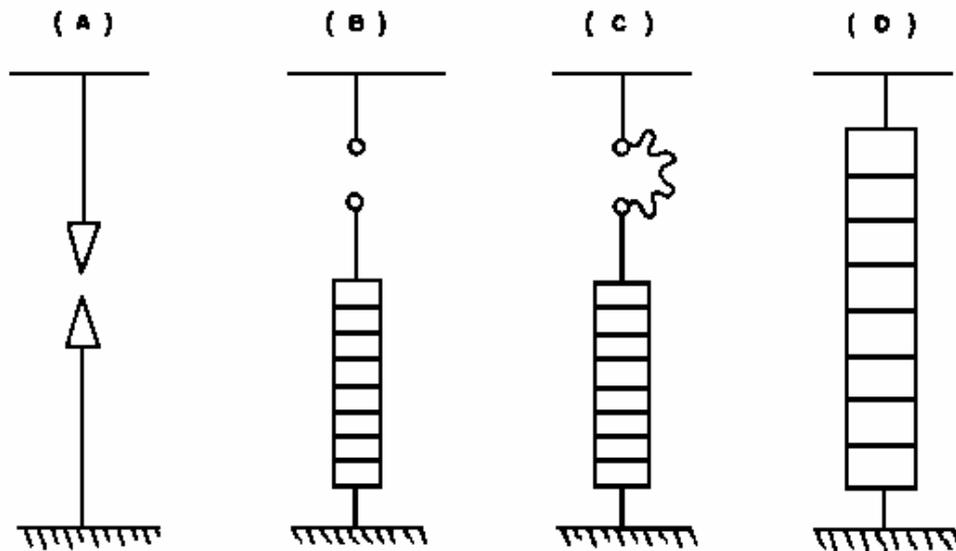


Figura 1: Evolução dos dispositivos de proteção (CEPEL, 1977).

A tecnologia dos resistores de SiC persistiu sem concorrência até o final da década de 60, quando um novo tipo de dispositivo utilizado para a proteção contra sobretensões foi desenvolvido pela Matsushita Electrical Co.Ltd (CEPEL, 1977). Este novo tipo de dispositivo é formado por elementos cerâmicos a base de Óxido de Zinco (ZnO), e pequenas quantidades de outros óxidos metálicos, tais como: Bismuto, antimônio e manganês (ARAÚJO *et al.*, 2006). Ele oferece um alto grau de não linearidade na sua característica ‘tensão × corrente’, proporcionando baixos valores de corrente na região de operação, associado a uma boa estabilidade quando continuamente solicitados pela tensão normal de operação (FRANCO, 2001; MEISTER, 2005) conforme é mostrado na Figura 02.

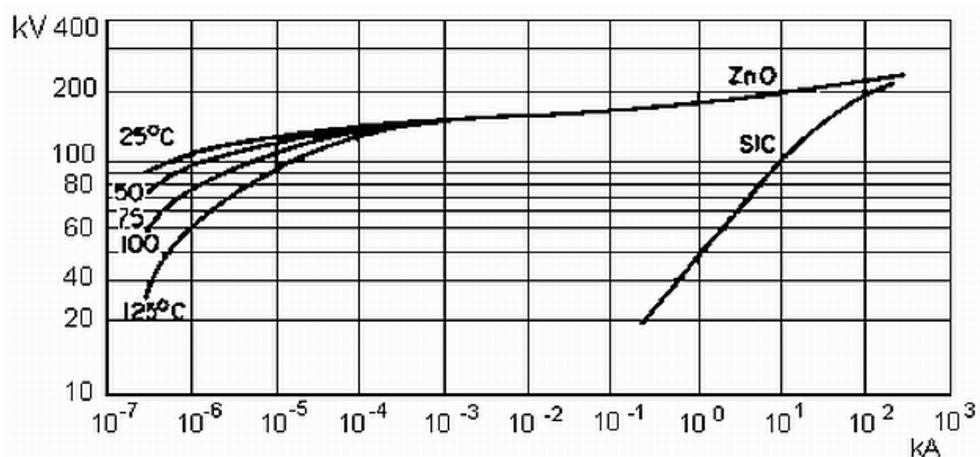


Figura 2: Características dos para-raios de ZnO e SiC (adaptado de MEISTER, 2005)

As propriedades dos materiais usados nesses resistores não lineares são altamente dependentes da sua microestrutura, sendo assim, são dependentes também da sua composição química e das condições de tratamento térmico (sinterização) a que são submetidos.

Os pára-raios ZnO sem centelhadores são constituídos basicamente por varistores (constituem materiais não-ohmicos, ou seja, não obedecem a Lei de Ohm) revestidos por um invólucro de porcelana ou invólucro polimérico. Na técnica de construção do pára-raios empregando invólucro de porcelana, o processo de montagem deve ser tal que os elementos de ZnO se mantenham concentricamente localizados dentro do invólucro, com uma geometria definida para minimizar os efeitos de ionização interna mesmo sob condições severas de poluição externa. Mecanismos de alívio de sobrepressão devem ser incorporados dentro dos flanges terminais, de modo a evitar a fragmentação ou a explosão violenta do invólucro em caso de uma eventual falha do pára-raios, seguida da passagem da corrente de curto-circuito. Os perfis das saias da porcelana devem garantir uma distância de escoamento e características elétricas do invólucro compatíveis com as características de proteção do pára-raios. Geralmente, o pára-raios com invólucro de porcelana, para aplicação em subestações, apresenta distâncias de escoamento de 20 mm/kV (FRANCO, 2001).

A Figura 3 representa os componentes de um pára-raios de ZnO com invólucro de porcelana.

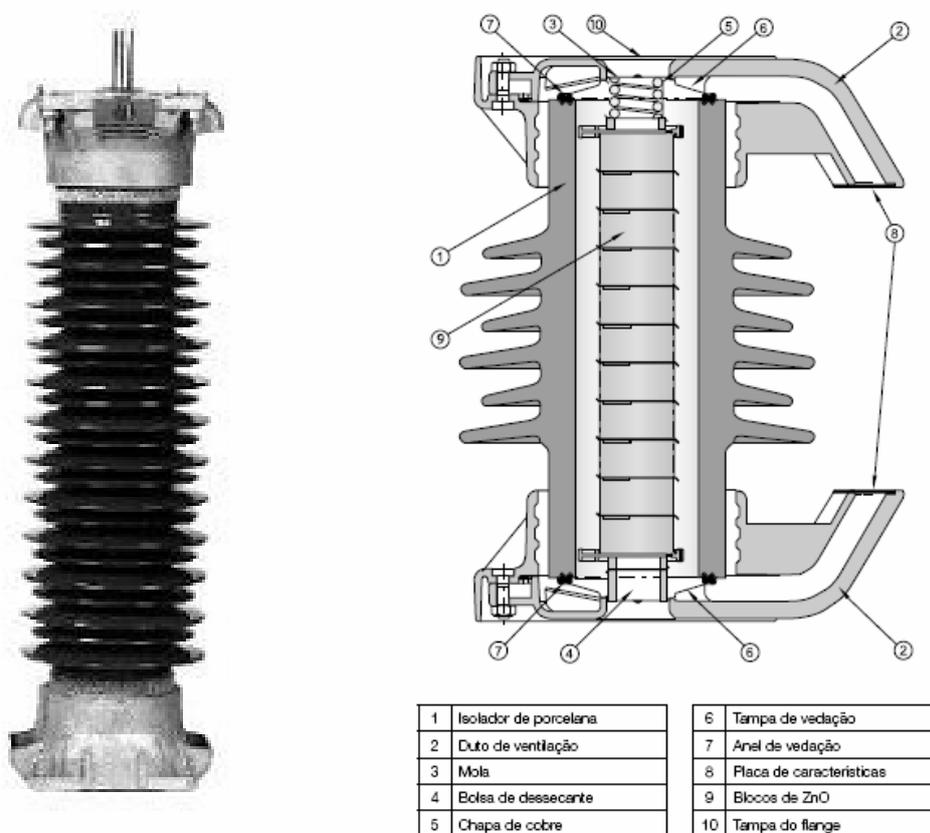


Figura 3: Pára-raios com invólucro de porcelana (ABB, 2004).

Outra técnica de construção de pára-raios emprega invólucros poliméricos. Apesar das diferenças construtivas entre os diferentes fabricantes, existem basicamente duas concepções de projeto. Na primeira concepção, utilizada pela maioria dos fabricantes, o invólucro polimérico é injetado diretamente sobre o conjunto de blocos de ZnO que podem ser encapsulados em um material de fibra de vidro impregnado em resina epóxi. Essa concepção apresenta como principal vantagem a eliminação quase total da possibilidade de penetração de umidade no interior do pára-raios. Também não necessita de dispositivos de alívio de sobrepressão, em caso de uma eventual falha do pára-raios. Esta maneira tem se mostrado mais confiável em relação à estanqueidade e à suportabilidade de correntes de falta. O encapsulamento dos blocos em material de fibra de vidro, impregnado em resina epóxi, tem como funções básicas garantir a suportabilidade mecânica necessária em caso de uma eventual falha do pára-raios e facilitar o processo de montagem. Na segunda concepção, os projetos são mecanicamente equivalentes ao pára-raios de porcelana. O invólucro polimérico é moldado e posteriormente o conjunto de blocos de ZnO é inserido dentro do invólucro. Na interface entre os blocos de ZnO e a parte interna do invólucro polimérico, um tubo de fibra

de vidro pode ser inserido de modo a proteger os blocos. Este tipo de concepção apresenta um espaçamento interno de ar entre a parte interna do polímero e os blocos de ZnO, sendo necessária a utilização de dispositivos de alívio de sobrepressão para evitar o deslocamento dos elementos de ZnO em caso de uma eventual falha do pára-raios (FRANCO, 2001).

Para sistemas que requerem uma capacidade maior de absorção de energia, alguns fabricantes vêm optando pela montagem de pára-raios multi-colunas. Neste caso, os pára-raios são compostos por dois ou mais conjuntos de elementos de ZnO em paralelo, os quais podem estar dentro de um mesmo invólucro ou em invólucros separados. Para construção dentro de um mesmo invólucro ou em invólucros diferentes, cuidados especiais devem ser tomados nos procedimentos de fabricação e de montagem desse tipo de pára-raios, de modo a se prever repartição de corrente mais uniforme possível através dos conjuntos em paralelo (FRANCO, 2001).

Geralmente, o pára-raios instalado em subestações é provido de acessórios que podem ser acrescentados ao dispositivo. Entre os acessórios que podem ser acrescentados ao pára-raios, destacam-se: o contador de descarga (usado para contagem do número de operações do dispositivo para corrente acima de certa amplitude e duração), mili-amperímetros inseridos no próprio contador e o indicador de descargas (usado para mostrar a operação do pára-raios).

2.3 ***Características***

Ao serem instalados entre um condutor fase de um determinado sistema elétrico e o neutro ou a terra, os pára-raios têm a função de limitar, a valores pré-estabelecidos, a amplitude das sobretensões transitórias, protegendo assim os equipamentos elétricos instalados neste condutor que estiverem suficientemente próximos. Na Figura 4 é mostrado um esboço de uma aplicação do pára-raios em um sistema elétrico.

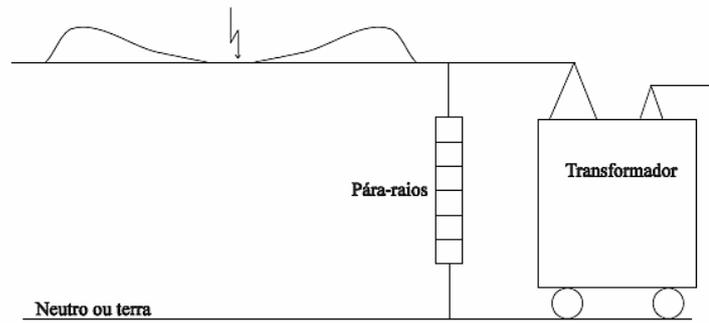


Figura 4: Pára-raios instalado em um sistema elétrico (MACEDO et al. 2006)

Deste modo, dependendo da amplitude e do tempo das sobretensões resultantes do sistema ou de descarga atmosférica, a atuação do pára-raios limita a tensão sobre o equipamento, de forma a reduzir a probabilidade de danos nos mesmos.

A Figura 5 mostra no eixo das abscissas a classificação da sobretensão em função do seu tempo de duração, enquanto que no eixo das ordenadas identifica a amplitude da tensão associada. Assim, para sobretensões de manobra ou atmosféricas, a atuação dos pára-raios limita a tensão sobre o equipamento.

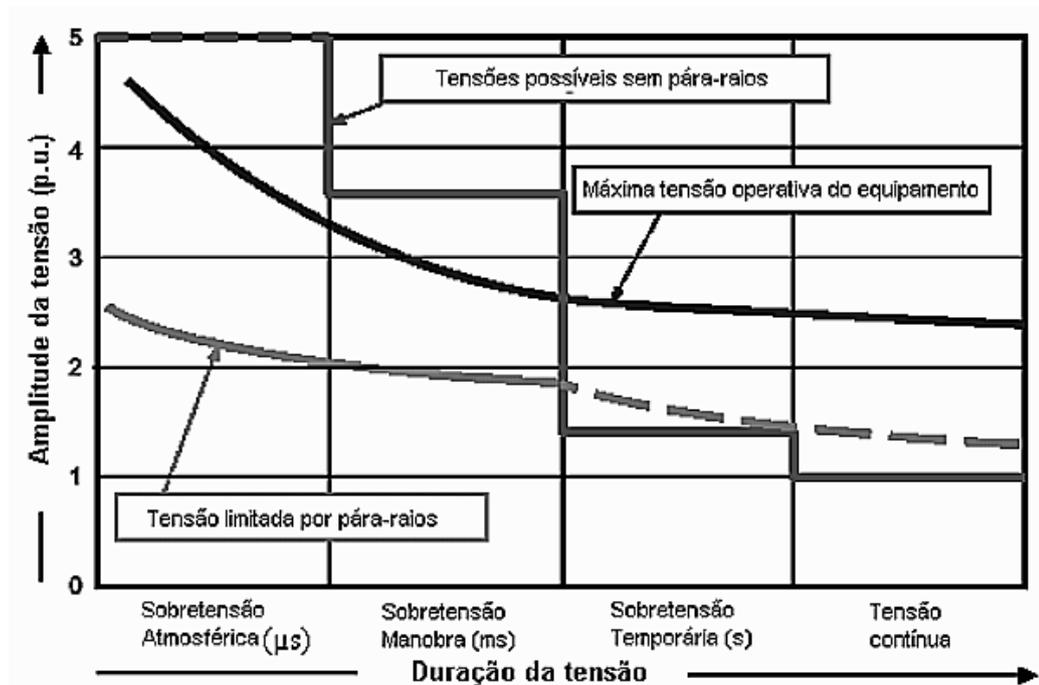


Figura 5: Relação da amplitude da tensão com o tempo de duração (MEISTER, 2005).

No caso dos varistores a corrente não varia linearmente com o aumento do potencial aplicado.

Para os varistores esta relação pode ser estabelecida pela equação 1.

$$I = (U/C)^\alpha \quad (1)$$

Onde I é a corrente no varistor, C é a constante de resistência não-ôhmica (não obedece a lei de ohm), α é o coeficiente de não linearidade que indica a qualidade do varistor, quanto maior seu valor, mais sensível é o dispositivo no que se refere a pequena mudança no potencial elétrico aplicado, e, portanto, melhor é o varistor (ELFWING, 2002) e U é a tensão aplicada.

No caso de pára-raios SiC o coeficiente de não linearidade apresenta valores entre 4 a 6 e, no caso de pára-raios ZnO, este coeficiente pode variar entre 20 a 25. Além disso, os pára-raios devem possuir uma grande capacidade de absorção de energia, capacidade esta que os fabricantes normalmente indicam como a capacidade máxima de energia em kJ por kV de tensão nominal, sendo esta capacidade em função da tensão nominal e da corrente de condução do pára-raios (CTEEP, 2000). Essas características os tornam capazes de serem utilizados como dispositivos de proteção contra surtos de sobretensão.

Cumprir notar que o desempenho ótimo de pára-raios seria descrito pelas seguintes características ‘tensão × corrente’: Em situação de tensão normal de serviço, deveria ter impedância infinita, não afetando a operação do sistema, isto é, não absorvendo energia; Na incidência de sobretensão, sua impedância deveria variar rapidamente sob uma característica ‘tensão x corrente’ altamente não-linear para manter invariável a tensão nos terminais do equipamento; Assim que a tensão do sistema retornasse ao seu estado normal de serviço, a condução deveria ser interrompida, ou seja, retornada a condição de circuito aberto (MACEDO *et al.*, 2006). É interessante ressaltar que os pára-raios ZnO possibilitam uma relação ‘tensão × corrente’ que se aproxima deste desempenho ótimo. A Figura 06 mostra característica de um dispositivo de proteção ideal contra sobretensões.

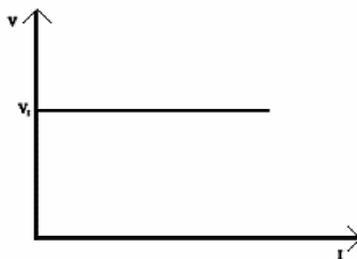


Figura 6: Característica de proteção ideal contra sobretensões (MACEDO et al. 2006)

Um detalhamento das características dos dispositivos SiC e ZnO é descrita a seguir.

2.3.1 Pára-raios de Carboneto de Silício (SiC)

A estrutura destes dispositivos apresenta um conjunto de centelhadores montados em série com blocos de resistores não-lineares de SiC. Os centelhadores têm como objetivo isolar, em regime permanente, os resistores não-lineares de SiC (que não podem ficar energizados continuamente) da tensão fase-terra, evitando perdas ôhmicas apreciáveis e aquecimento nos blocos de SiC. Os centelhadores são projetados para apresentar um comportamento estável (valores de tensão disruptiva com faixa estreita de variação). De acordo com FRANCO (2001) os centelhadores auxiliam na extinção da corrente subsequente que flui através dos resistores não-lineares.

Na Figura 7 é mostrado um pára-raios com centelhadores usado em redes de distribuição e seus componentes.

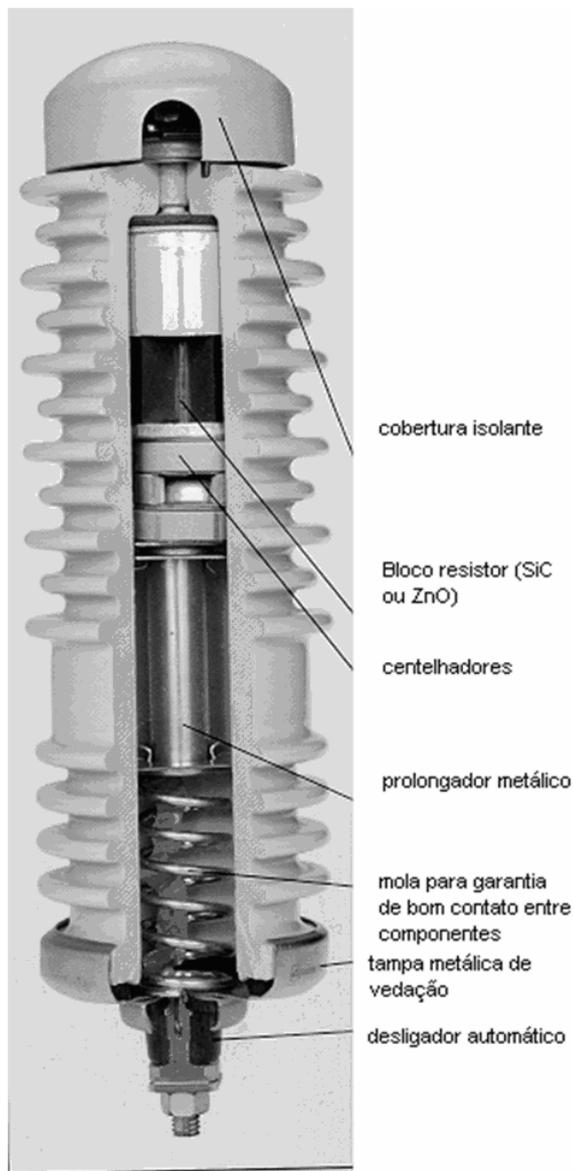


Figura 7: Pára-raios com centelhadores usado em redes de distribuição (CEMIG, 2002).

Com relação ao encapsulamento cerâmico do dispositivo, conforme mostrado na Figura 8, este deve funcionar como um bom isolante evitando o aparecimento de corrosão nos eletrodos devido à umidade e também como um compartimento de proteção mecânica aos blocos de SiC e aos centelhadores, já que o pára-raios é instalado geralmente em ambientes externos, sujeito a condições atmosféricas diversas. Uma descrição detalhada das partes principais de um pára-raios de SiC, pode ser encontrada em CEPTEL (1977). É importante acrescentar que,

devido a idade avançada de instalação nas subestações e sua construção rudimentar, os pára-raios de SiC estão mais susceptíveis à degradação de seus componentes internos principalmente a falta de estanqueidade ou penetração de umidade.

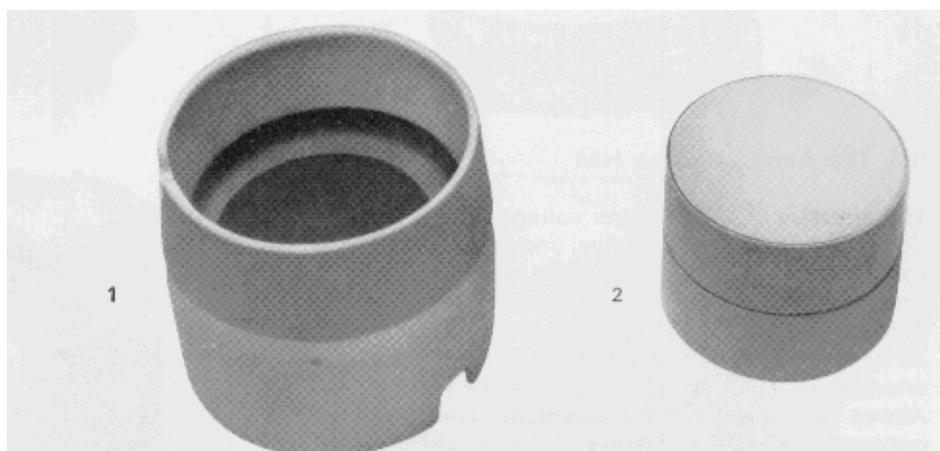


Figura 8: 1 - Encapsulamento de cerâmica, 2 - Resistores não lineares de silício (SOBRINHO et al., 2000).

2.3.2 Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO)

Os pára-raios de ZnO são constituídos basicamente por um conjunto de resistores não-lineares à base de ZnO dispostos em série. Devido à alta não-linearidade na característica ‘tensão \times corrente’, esse tipo de pára-raios dispensa a utilização dos centelhadores, tornando-o mais vantajoso para sistemas de neutro aterrado, pois eles oferecem uma melhor proteção contra sobretensões com taxa de crescimento de frente lenta, além de oferecer ao sistema inúmeras vantagens de aspectos de proteção e operação (IEC, 2001).

Dentre as principais vantagens deste dispositivo destaca-se a simplicidade de construção, que aumenta a confiabilidade, o nível de proteção melhor definido, um melhor desempenho sob contaminação, uma maior capacidade de absorção de energia, entra e sai de condução suavemente e uma melhor capacidade de dissipação de calor, melhorando suas propriedades térmicas. A Figura 9 mostra a composição interna e externa de um pára-raios de ZnO.

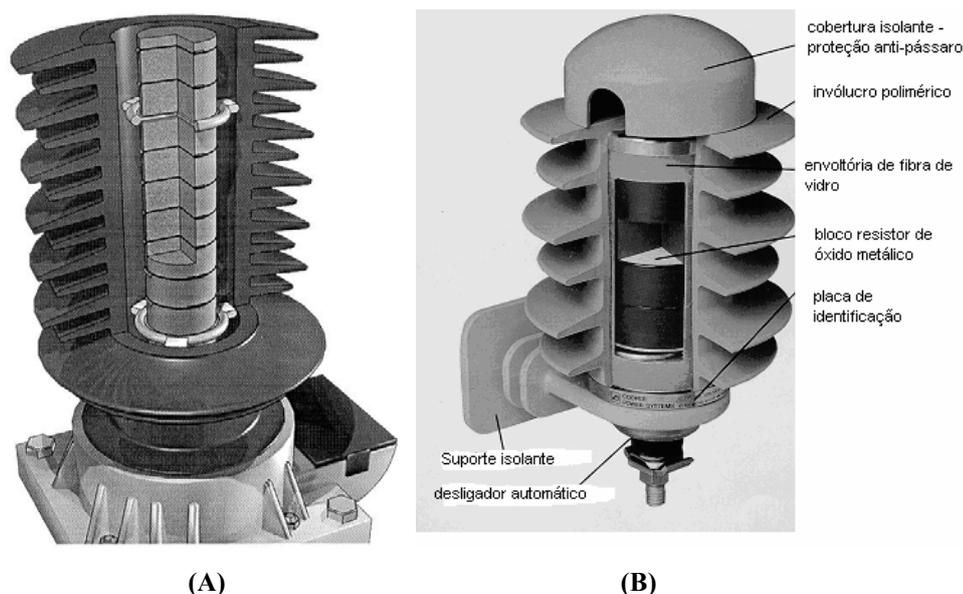


Figura 9: (A) Composição interna de um pára-raios de ZnO (SOBRINHO *et al.*, 2000); (B) Pára-raios de óxido de zinco sem centelhador usado em redes de distribuição (CEMIG,2002)

Uma minuciosa descrição dos critérios de seleção e da aplicação de pára-raios pode ser obtida em IEC, (2001). A seguir, são descritos as principais parâmetros do pára-raios ZnO.

Tensão nominal (kV rms): valor máximo da tensão na frequência industrial aplicada aos seus terminais no ensaio de ciclo de serviço, para a qual o pára-raios foi projetado e tem condições de operar satisfatoriamente durante o ensaio. O valor da tensão nominal é utilizado como um parâmetro de referência para a especificação de suas características de operação.

Tensão máxima de operação em regime contínuo (kV rms): maior valor de tensão em 60Hz para o qual o pára-raios é projetado de modo a operar continuamente com esta tensão aplicada a seus terminais.

Capacidade de sobretensão temporária: definida em função da característica de suportabilidade ‘tensão × duração’, onde é indicada a duração de tempo para a qual é permitida a aplicação de uma tensão superior à tensão máxima de operação em regime contínuo nos terminais do pára-raios.

Capacidade de absorção de energia: valor da maior quantidade de energia, em condições preestabelecidas, a que pode ser submetido o pára-raios, sem que as suas características

sofram alterações significativas após o retorno às condições normais de operação. A capacidade de absorção de energia tem que ser adequadamente especificada de forma a evitar conseqüências sérias aos equipamentos do sistema elétrico, incluindo os próprios pára-raios de ZnO.

Nível de proteção a impulso de manobra (kV pico): esta característica depende da corrente de condução no pára-raios, a qual aumenta à medida que o valor do impulso de tensão aumenta. Com o intuito de definir o nível de proteção a impulso de manobra, geralmente é estabelecido um valor para a corrente de longa duração a ser aplicado ao pára-raios.

Tensão residual (kV pico): tensão que aparece no pára-raios quando da passagem de uma corrente de impulso na forma $8 \times 20\mu\text{s}$. Normalmente os ensaios são realizados para impulsos de corrente de valor 1,5; 3; 5; 10; 15; 20 e 40 kA. A tensão residual depende da forma de onda do impulso aplicado. É importante considerar que o fabricante indica as tensões residuais máximas e mínimas para cada corrente de condução. A diferença entre estas duas características é geralmente menor do que 5%. Os fabricantes consideram que esta pequena variação na característica residual da tensão é inerente ao processo de fabricação. Alguns afirmam que, para um lote específico de fabricação, a característica residual da tensão se mantém numa determinada característica mais definida, sendo a tolerância máxima indicada apenas como a delimitação da variação máxima permissível entre diferentes lotes de fabricação. Outro aspecto importante que deve ser ressaltado é que a tensão residual também pode ser modificada pelo fabricante para projetos especiais com a finalidade de atender exigências muito específicas de determinada aplicação.

Na Tabela 1 é mostrado um exemplo de características elétricas de um pára-raios de 120kV fornecidas por um fabricante.

Tabela 1: Características elétricas do pára-raios de 120kV (INAEL, 2000).

Tensão Nominal Vn kV(rms)	Tensão Contínua Vc* kV(rms)	ST**		Equivalente frente de onda *** kV(pico)	Máxima Sobretensão de Manobra **** kV(pico)	Tensão residual máxima(kV pico), usando uma onda de corrente de 8/20µs				
		1s	10s			1,5	3	5	10	15
		kV(rms)	kV(rms)							
120	98	142	136	273	224	243	251	258	271	288

*Tensão máxima de funcionamento contínuo. **Sobretensões temporárias em pára-raios novos. ***Tensão residual equivalente a frente de onda com valor máximo correspondente a uma onda de corrente de impulso de 5 kA, que produza uma onda de tensão cuja crista alcance 0,5µs. ****Baseado em uma onda do tipo 45/90µs com os seguintes valores de corrente: 500A para as tensões compreendidas entre 3kV e 96kV, 1kA para as tensões compreendidas entre 120kV e 240kV.

O resistor não-linear de ZnO constitui-se em um corpo de material cerâmico denso, apresentando um alto grau de não-linearidade na sua característica 'tensão × corrente'. A microestrutura desse material cerâmico é constituída de grãos de óxido de zinco que possuem baixa resistividade, circundados por um material inter-granular que apresenta uma elevada resistividade (FRANCO, 1993). É apresentado na Figura 10 a microestrutura do grão de ZnO.

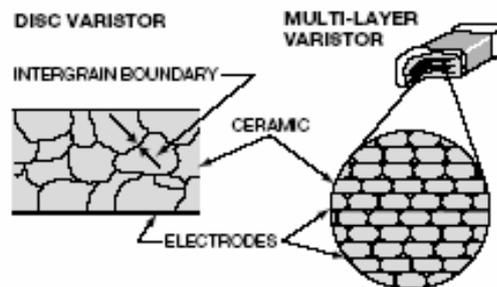


Figura 10: Diferença entre as estruturas dos grãos de ZnO (MAXWELL *et al.*,1995)

Para um melhor entendimento do pára-raios ZnO, é importante descrever a microestrutura do ZnO, que é resumida a seguir.

Durante o processo de tratamento térmico chamado de sinterização, são formados grãos na estrutura do ZnO. Vários elementos químicos são distribuídos, de modo a tornar a região de contorno de grão altamente resistiva (ρ entre 10^{10} a 10^{12} $\Omega \cdot \text{cm}$) e no interior do grão prevalece uma elevada condutividade (ρ entre 0,1 a 10 $\Omega \cdot \text{cm}$). Uma grande queda de resistividade no sentido do contorno de grão para o grão é observada a uma separação de 50 a

100 nm, sendo esta região conhecida como camada de depleção. Ou seja, para cada contorno de grão, existem duas camadas de depleção, situadas nos grãos adjacentes.

A ação dos varistores é baseada na existência desta camada. Quando um surto de tensão surge externamente, uma queda de tensão aparece nos contornos de grão. Esta tensão é proporcional ao número de contornos de grão do material sinterizado e inversamente proporcional ao tamanho do grão de ZnO. Normalmente, o tamanho de grão situa-se na faixa de 5 a 30 μm , em varistores comerciais. Este tamanho depende da composição do material, da temperatura e tempo de sinterização. Na Figura 11 está representado o campo elétrico *versus* densidade de corrente, característico de sistemas varistores. Desta curva são obtidos os valores de tensão de ruptura e o coeficiente de não linearidade (α).

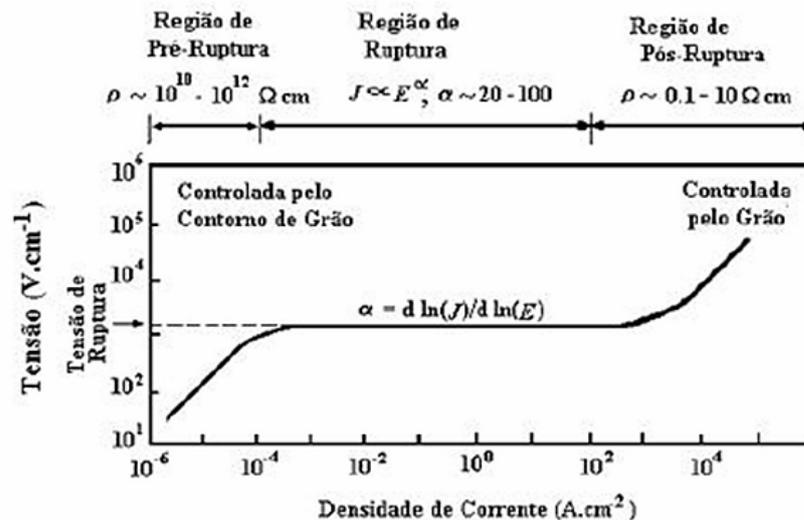


Figura 11: - Exemplo de curva não-linear de pára-raios de óxido de zinco (adaptado de ELFWING, 2002).

Três regiões distintas podem ser identificadas na Figura 11: região linear de pré-ruptura (ou baixa corrente), região de ruptura e região linear de alta corrente.

A *região linear de pré-ruptura* fica abaixo da tensão de limiar. Esta região é dependente da temperatura, sendo determinada pela impedância dos contornos do grão do ZnO. É nessa faixa de corrente que o pára-raios opera quando submetido a sua tensão contínua de operação.

A *região de ruptura* é a mais importante do varistor. Ela fica compreendida entre correntes da ordem de 100 e 1000 A/cm^2 . Nesta região, um grande aumento de corrente implica em uma pequena variação de tensão, sendo independente da temperatura.

A *região linear de alta corrente* fica situada acima de 100-1000 A/cm². A característica V-I retorna a ser linear, com aumento substancial da tensão, sendo controlada pela impedância dos grãos do ZnO (ELFWING, 2002).

O mecanismo de condução dos varistores ainda é tema de constantes estudos e discussões, sendo que vários modelos têm sido propostos a fim de esclarecer as propriedades dos varistores de ZnO. O principal modelo é uma analogia ao modelo barreira Schottky. A Barreira Schottky é formada normalmente em uma região onde há contato entre um metal e um semicondutor tipo-n e corresponde a uma diferença de energia entre o metal e o semicondutor. A concentração de energia devido aos elétrons é maior no semicondutor. Quando são colocados em contato, há uma transferência de elétrons do semicondutor para o metal, até que ocorra o equilíbrio. Esta transferência resulta na formação da camada de depleção. Assim sendo, o modelo considera a existência de uma dupla camada de depleção, nos contornos de grão. Aplicando este mesmo modelo aos varistores, as camadas de depleção nos contornos de grão do ZnO podem ser descritas como duas Barreiras Schottky conectadas.

O principal componente utilizado para a produção de varistores de ZnO é o próprio óxido de zinco com alto grau de pureza, entretanto, têm sido introduzidos nas composições dos varistores pequenas quantidades de outros óxidos, tais como os óxidos de Bismuto, Cobalto, Cromo, Antimônio, Manganês, Níquel, Alumínio, Silício, Gálio, Lítio, Praseodímio (FRANCO,1993).

Na fase inicial de desenvolvimento de pára-raios ZnO para redes de distribuição, alguns fabricantes adicionaram centelhadores em série com os resistores não lineares de ZnO, com a função principal de ‘isolar’ o pára-raios do sistema sob condições de regime permanente, reduzindo a degradação dos resistores não lineares de ZnO. Entretanto, este tipo apresenta características inferiores àquele que constitui o pára-raios sem centelhadores (FRANCO 2001).

Atualmente, quase todos os pára-raios adquiridos pelas empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais para novos projetos de subestações, para ampliações de subestações existentes ou para substituição dos pára-raios convencionais são do tipo Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores (FRANCO, 2001).

As inspeções realizadas neste trabalho foram realizadas na Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) que tem aproximadamente 65% de pára-raios de SiC e 35% de pára-raios ZnO em suas 361 subestações entre 34,5kV e 161kV.

2.4 **Fatores de degradação**

Em condições normais de operação os pára-raios sofrem solicitações de natureza elétrica e térmica, que podem se conjugar com fatores ambientais como, por exemplo, a poluição.

A combinação de poluição com umidade pode causar o disparo individual de um ou mais centelhadores e, devido ao desequilíbrio do circuito de equalização, pode levar o pára-raios a disrupção para a tensão operativa do sistema e resultar em sua explosão ou queima por incapacidade da interrupção da corrente subsequente de frequência industrial (60 Hz). Esta situação é característica do pára-raios de SiC. Para o pára-raios de ZnO, fatores relacionados também às condições climáticas e de natureza elétrica acarretarão o aumento da corrente resistiva de fuga, vindo provocar a avalanche térmica, e conseqüentemente resultando em sua explosão ou queima (CTEEP, 2000).

É importante detalhar os diversos fatores que podem causar a falha do pára-raios de SiC e do pára-raios de ZnO, podendo assim ratificar a importância do uso de métodos de inspeção preditiva como, por exemplo, a Termografia.

2.4.1 **Fatores de degradação em pára-raios de SiC.**

Com relação à parte externa do pára-raios, o grau de poluição, bem como sua influência no desempenho do dispositivo, varia amplamente dependendo da fonte de contaminação, da natureza química da contaminação e do grau de umidade. A superfície contaminada, quando úmida, apresenta baixa resistividade e a corrente de fuga que flui pela sua superfície atinge valores altos em relação à superfície seca, podendo atingir valores da ordem de 50 a 100 mA (CEPEL, 1977). Há grande desequilíbrio na distribuição da tensão na superfície isolante externa, tornando-se iminente uma descarga disruptiva.

Outro fator de degradação está relacionado à perda de estanqueidade e penetração de umidade. Nesta situação pode ocorrer condensação de umidade e corrosão dos seus componentes metálicos, principalmente os *centelhadores*, alterando suas tensões de disparo. A absorção de umidade pelos resistores de equalização afeta a distribuição equitativa do potencial ao longo dos *centelhadores*, resultando, em disparos não uniformes de alguns deles. Segundo JUNQUEIRA *et al.* (1993); BARGIGIA *et al.* (1989) e LAT (1988) a absorção de umidade pelos resistores principais (SiC) pode comprometer a capacidade destes componentes em interromper a corrente subsequente de frequência industrial, provocando a condução sucessiva de corrente, em semi-ciclos de 60 Hz, através do pára-raios, até sua falha por sobreaquecimento. A penetração de umidade é crítica em pára-raios com invólucros de porcelana. A infiltração se inicia por trincas que se formam ao longo do tempo na cimentação entre porcelanas e flanges, principalmente por ressecamento das gaxetas de vedação dos dispositivos de alívio de sobrepressão devido a variações bruscas de temperatura (JUNQUEIRA *et al.*, 1993). Cabe acrescentar que a alteração das características dos componentes (resistores e capacitores) do circuito de equalização com a umidade e ou sobreaquecimento degradando-os, podendo assim provocar a operação indevida dos *centelhadores*, quando ocorrem solicitações por sobretensões na frequência industrial (JUNQUEIRA *et al.*, 1993).

Outro fator de degradação ocorre em decorrência de descargas internas resultando na liberação de gases que prejudicam as propriedades químicas e dielétricas do material isolante que recobre a superfície dos resistores principais. Deste modo, as correntes de surto são desviadas para as superfícies dos resistores, comprometendo a atuação destes elementos na limitação e eliminação das correntes de 60 Hz subsequentes aos disparos para os surtos de tensão. Tal fato pode comprometer o desempenho do pára-raios.

Acrescenta-se o fator de degradação decorrente de descargas de longa duração ou de alta intensidade e curta duração. Situações de chaveamentos de grandes bancos de capacitores ou de linhas longas em vazio podem solicitar severamente os pára-raios, quando dimensionados ou projetados inadequadamente, acarretando queima ou rachaduras nos resistores. Impulsos de alta intensidade e de curta duração podem concentrar-se num único ponto, perfurando os resistores (JUNQUEIRA *et al.*, 1993).

2.4.2 Fatores de degradação em pára-raios de ZnO

Em condições normais de operação, os pára-raios de ZnO, além da exposição às mais adversas condições climáticas, podem ser submetidos a diferentes solicitações, que impostas ao pára-raios sozinhas ou em conjunto podem acarretar no envelhecimento destes (ARAÚJO *et al.*, 2006). Estas solicitações são descritas a seguir.

A própria tensão normal de operação. Esta solicitação consiste em um aumento gradual da parcela resistiva da corrente de fuga que pode conduzir a instabilidade térmica. A aplicação de tensão alternada ou contínua ininterruptamente sobre os varistores gera um aquecimento devido às perdas por efeito Joule. Uma vez atingida determinada temperatura, ocorre o processo cíclico: aumento da temperatura, da corrente resistiva, da potência, da temperatura. Esta ocorrência poderá se desenvolver até levar a falha no varistor (FRANCO, 2001).

Descargas de longa duração (surto de manobra) ou de alta intensidade e curta duração (surto atmosférico). A degradação proveniente de solicitações transitórias está relacionada com o balanço entre a energia gerada pelo varistor devido ao surto e a capacidade do varistor em dissipar esta energia. Este tipo de degradação provoca uma redução gradual na máxima temperatura para o qual o varistor tem a capacidade de dissipar as energias provenientes de surtos, ou seja, diminui gradualmente a capacidade de absorção de energia dos varistores. Se a energia absorvida pelos varistores for maior do que a sua capacidade de dissipação, poderá ocorrer o fenômeno de instabilidade térmica (FRANCO, 1993).

Depósitos de resíduos nas superfícies dos invólucros dos pára-raios podem causar uma elevação da corrente de fuga pelo invólucro, provocando uma distribuição de tensão não uniforme ao longo dos pára-raios, com conseqüente aquecimento excessivo e envelhecimento em todos ou alguns dos blocos de ZnO. A contaminação do invólucro gera o fenômeno de ionização interna. Investigações no campo têm mostrado que qualquer variação de tensão nos resistores, resultante de chuva, fumaça ou poluição, é capaz de gerar descargas internas que produzem alterações irreversíveis na composição interna do gás (caso de pára-raios com resistores imersos em gás), através de reações químicas no gás de enchimento, queima de oxigênio e criação de componentes químicos. A ausência de oxigênio e a criação de novos gases químicos gerados pelas descargas parciais são responsáveis pelo envelhecimento

acelerado de todos ou alguns blocos de ZnO. O efeito da poluição externa torna-se mais crítico em pára-raios com invólucros de porcelana, sendo atenuado para pára-raios com invólucros poliméricos (SCHEI & FRANCO, 1988).

A penetração de umidade tem sido a causa mais freqüente de falhas em pára-raios. Pode resultar em condensação de vapor d'água e corrosão de seus componentes metálicos. A absorção de umidade pelos blocos de ZnO altera significativamente a característica 'tensão × corrente', aumentando a componente resistiva na tensão de operação do pára-raios, bem como os seus níveis de proteção, compromete o isolamento externo, e reduz a sua capacidade de absorção de energia (SCHEI & FRANCO, 1988).

O pára-raios de ZnO sem centelhadores série, quando conectados ao sistema elétrico, estão sempre conduzindo correntes que variam de alguns miliamperes a centenas de Amperes. A corrente de fuga total (I_t) é composta de uma componente resistiva (I_r) e outra capacitiva (I_c), conforme é mostrado na Figura 12.

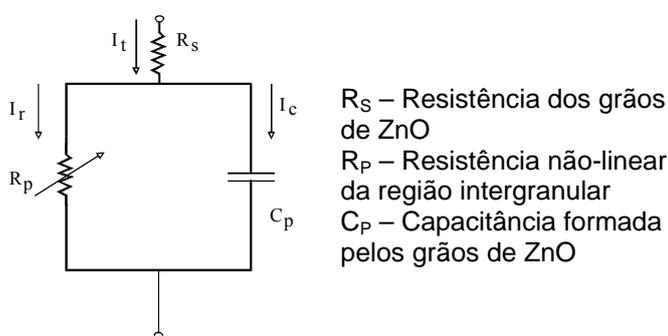


Figura 12: Modelo elétrico do pára-raios de ZnO (SOBRINHO *et al.*,2000)

A corrente resistiva com característica não-linear é responsável pelas perdas elétricas e um dos fatores do envelhecimento dos blocos de ZnO. Ela tem um valor baixo quando comparado a componente resistiva e, segundo SOBRINHO *et al.* (2000), a corrente resistiva representa de 10% a 20% da corrente total.

Segundo NETO (1985) e SCHEI & FRANCO (1988) o envelhecimento dos varistores provoca um aumento gradual da componente resistiva da corrente de fuga com o tempo. O aumento sem controle da componente resistiva da corrente pode conduzir à instabilidade térmica do pára-raios e sua falha completa

O valor da corrente de fuga resistiva pode ser obtido a partir da medição da corrente de fuga total e do defasamento entre a mesma e a tensão aplicada, conforme ilustra o diagrama fasorial mostrado na Figura 13 e as duas equações dadas a seguir (MACEDO *et al.*, 2006).

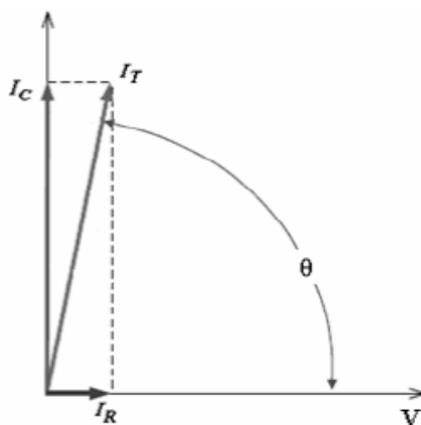


Figura 13: Diagrama fasorial da corrente de fuga (MACEDO *et al.*, 2006).

$$\hat{I}_T = \hat{I}_R + \hat{I}_C \quad (2)$$

$$I_R = I_T \cdot \cos(\Theta) \quad (3)$$

Quando do início da degradação dos blocos, a componente resistiva de corrente aumenta. A evolução da corrente resistiva com o tempo pode ser dividida em três regiões. Uma primeira região se coloca onde inicia a aplicação da tensão e o elemento de óxido de zinco não está deteriorado. A região seguinte estabelece-se onde o elemento de óxido de zinco gradualmente é deteriorado com o tempo e onde a componente resistiva da corrente de descarga gradualmente cresce. A outra região é onde o elemento de óxido de zinco já está no estado deteriorado, iniciando um processo de avalanche térmica. O aumento da corrente de fuga provocará a perda do elemento de óxido de zinco. O aumento na corrente pode ser detectado devido à mudança não-linear na componente resistiva da corrente (SHIRAKAWA, 1988).

A maioria dos estudos considera a degradação como um fenômeno ocorrido nos contornos de grão, através do movimento de íons na *camada de depleção*. Este mecanismo é baseado nos defeitos atômicos existentes na estrutura do varistor, o qual possui íons positivos móveis nos contornos de grão e uma interface negativa nas bordas do contorno de grão. Esta estrutura é ilustrada na Figura14.

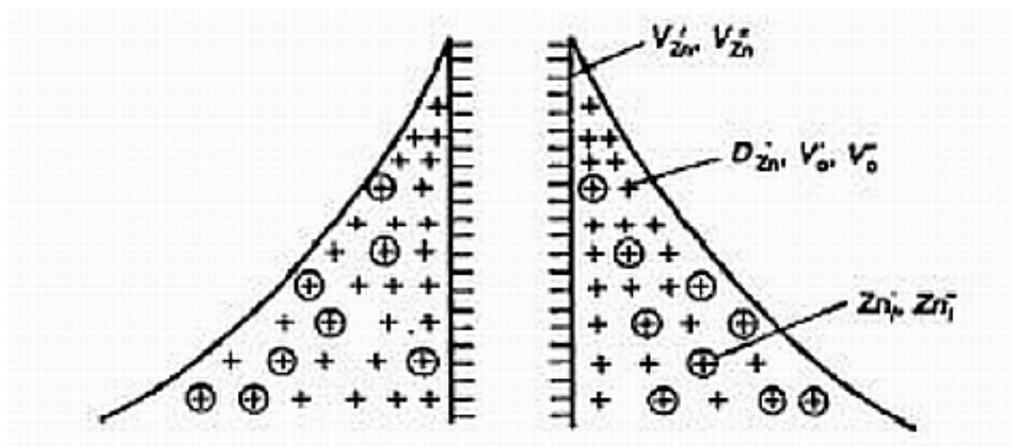


Figura 14: Modelo de defeito atômico (MENTA & BLITZKOW, 2003).

Quando uma tensão é aplicada, os íons positivos movem-se em direção ao contorno negativo, causando uma reação de neutralização entre as cargas positivas e negativas. Com o uso contínuo, o acúmulo de elementos neutros aumenta, causando uma queda da barreira de potencial no varistor. Isto causa também um aumento da corrente, a qual contribui para a diminuição da vida útil do dispositivo (BLITZKOW, 2003).

No próximo capítulo é apresentada uma técnica de manutenção preditiva que envolve medição radiométrica de temperaturas, objetivando identificar a proximidade de falhas nos pára-raios provocados pelos fatores descritos na Seção 2.4.

3 Termografia

3.1 *Introdução*

No presente capítulo é apresentado um estudo na área da Termografia e tratamento de imagens objetivando proporcionar embasamento teórico e técnico para subsidiar a aplicação de uma metodologia de inspeção em pára-raios de subestações baseada na aquisição de imagens em ângulos diferentes. As imagens são tomadas por sistema infravermelho² imageador, dotado de recurso para a análise e medição da temperatura superficial do objeto na forma de imagens que são os termogramas.

3.2 *Princípios da termografia*

Criada na década de 60, a Termografia é a ciência de aquisição e análise de informações térmicas a partir de dispositivos de obtenção de imagens térmicas. É a técnica que estende o conceito de visão humano através do espectro infravermelho, que constitui uma faixa de frequência eletromagnética naturalmente emitida por qualquer corpo, com intensidade que de alguma forma tem relação com a sua temperatura.

São designadas como termogramas as imagens que permitem a visualização da distribuição de temperatura da superfície focalizada. Esta técnica estabelece uma modalidade de manutenção preditiva³ através da inspeção termográfica em sistemas mecânicos, elétricos e de processos; pode ser executada com a emissão de laudos técnicos, indicando as distorções operacionais, ilustradas com os respectivos termogramas e registros fotográficos. Como procedimento subsequente, pode-se ainda empregar técnicas de processamento de imagem para o aprimoramento da análise. Assim a termografia pode contribuir apontando as ações corretivas atinentes.

² SISTEMA INFRAVERMELHO - conjunto composto pelo termovisor, acessórios e aplicativos de análise termográfica dos registros efetuados.

³ MANUTENÇÃO PREDITIVA é realizada a qualquer tempo, visando corrigir uma fragilidade percebida antecipadamente à ocorrência de um problema. É a manutenção realizada quando se prevê que há iminência da ocorrência de uma falha.

Devido à ausência de contato físico de instrumentos de medição com as instalações, a Termografia estabelece um processo de coleta e análise de dados térmicos dotado de total segurança. Este método evita a interferência na produção uma vez que o trabalho é feito com os equipamentos em pleno funcionamento. Acrescenta-se também como vantagem um bom rendimento de inspeção, pois possibilita a cobertura de um número razoável de dispositivos em um curto período de tempo.

O princípio do uso da termografia pode ser percebido observando a Figura 15a. Nela é mostrada a imagem de dois pára-raios de 12kV/10kA. A Figura 15b apresenta o termograma correspondente, tomado na mesma posição. O termograma é apresentado na forma de pseudocolorização (ver Anexo D) que fornece uma relação de cor com temperatura, mostrada na barra gráfica colocada ao lado. Pelo termograma percebe-se facilmente a temperatura no pára-raios da direita, podendo indicar o prenúncio de ocorrência de falha.

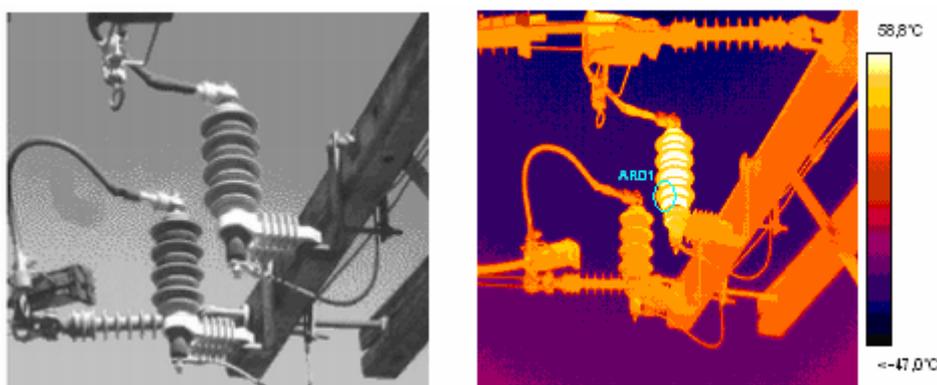


Figura 15: Detecção antecipada de falha em pára-raios: (a) imagem real do sistema, (b) Termograma com anomalia térmica.

A inspeção por termografia avalia o estado de normalidade do funcionamento do equipamento de acordo com a natureza deste. Assim, alguns equipamentos elétricos e eletrônicos em operação apresentam algum tipo de aquecimento natural, de acordo com seu projeto, características construtivas e carga no instante da inspeção. Alguns equipamentos como colunas de isoladores, pára-raios, buchas de transformadores e as muflas devem ter perfis térmicos em seu estado normal baseados em critérios pré-definidos.

Neste sentido, a aplicação da inspeção termográfica em equipamentos elétricos é capaz de apresentar os seguintes benefícios:

Manutenção preditiva: permite prevenir danos que possam causar elevados custos nos reparos.

Estoques: prevenção de problemas em potencial permite menor investimento na estocagem;

Consumo de energia: permite corrigir problemas que causam perda e consumo de energia em excesso; todo sobreaquecimento gera consumo anormal.

Tempo: inspeção de uma grande quantidade de equipamentos em menor período de tempo;

Avaliação das cargas nos painéis: simplificação do diagnóstico durante o funcionamento do equipamento.

Apoio à equipe de manutenção: avaliação da qualidade de serviços executados.

Planejamento: permite um prévio planejamento antes da conclusão do serviço otimizando tempo.

Vida útil: ao detectar o problema, evita-se a queima ou perda desnecessária de dispositivos.

O equipamento utilizado para realizar a aquisição dos termogramas neste trabalho chama-se termovisor⁴ ele é capaz de produzir uma imagem destacando o perfil térmico de um componente, possibilitando detecção de qualquer aquecimento anormal, fora do padrão térmico do objeto. Para especificar em termos de custo e desempenho um termovisor apropriado para uma determinada aplicação é importante o conhecimento de certas definições técnicas utilizadas na área de termografia

Em resumo, através da interpretação dos termogramas, consegue-se identificar amplas faixas de temperatura. Neste contexto está inserido o uso da termografia usada para identificar a proximidade de ocorrência de falhas em pára-raios de subestações.

⁴ TERMOVISOR - sistema infravermelho imageador, dotado de recurso para a análise e medição de distribuições térmicas na superfície de um objeto na forma de imagens, chamadas termogramas.

3.2.1 Alguns conceitos físicos

A radiação emitida por um corpo como resultado de sua temperatura é denominada radiação térmica. Pode-se dizer que todos os corpos emitem esta radiação aos corpos adjacentes e absorve tal radiação destes. Se um corpo está inicialmente com uma temperatura maior que seus adjacentes, este diminuiria a temperatura devido ao fato de sua taxa de emissão de energia excede a taxa de absorção. Quando as taxas de emissão e absorção são iguais o equilíbrio térmico é alcançado.

A matéria em estado condensado, sólido ou líquido, emite um espectro contínuo de radiação. Os detalhes do espectro são fortemente dependentes da temperatura. Em temperaturas ordinárias a maioria dos corpos é percebida pela visão humana pela luz que refletem e não pela luz emitida. Mesmo em temperatura da ordem milhares de Kelvin mais de 90% da irradiação térmica não é percebida pela visão humana. Corpos muito quentes, como exemplos, o sol ou um filamento luminoso, são autoluminosos. De um modo geral a forma detalhada do espectro da radiação térmica emitida por um corpo depende em algo da composição do corpo.

Quando a radiação atinge um corpo qualquer, pode ocorrer o fenômeno mostrado na Figura 16, uma porção dessa radiação será absorvida, outra porção será refletida e, se o corpo não for opaco, outra porção será transmitida através dele.

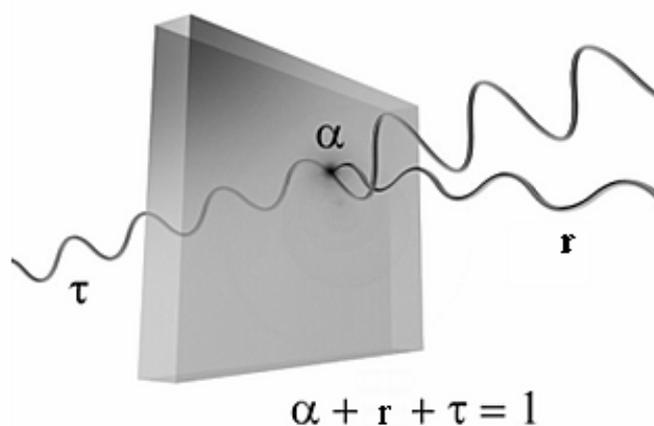


Figura 16: Corpo com absorção (α), reflexão (r) e transmissão (τ) (Adaptado de VERATTI *et al.*,1997).

A soma dessas três partes individuais deve ser igual ao valor inicial da radiação emitida pela fonte, conforme equação 4.

$$\alpha + r + \tau = 1 \quad (4)$$

Onde α é a fração da radiação que pode ser absorvida, r a fração da radiação que é refletida e τ a fração da radiação que é transmitida.

Entretanto, experimentos mostram que existe uma classe de corpos que emitem espectro térmico ou espectro de um corpo negro⁵ de característica universal. Na Figura 17 é mostrado um corpo negro cuja superfície absorve toda radiação térmica incidente sobre ele. O corpo não reflete luz e parece negro quando sua temperatura é baixa o suficiente para que não seja autoluminoso. Esse corpo possui emissividade⁶ (ϵ), igual a um, e irradia o máximo de energia possível. Apresenta refletividade e transmissividade iguais à zero.

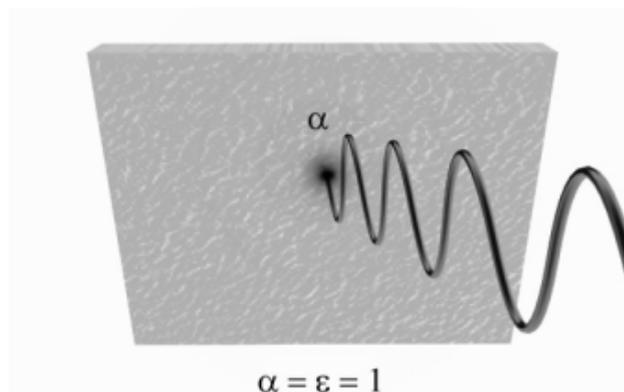


Figura 17: Corpo Negro absorvendo toda a radiação incidindo sobre ele (Adaptado de VERATTI *et al.*,1997)

⁵ CORPO NEGRO - objeto ideal que apresenta emissividade igual a 1. Absorve toda a energia eletromagnética que incide sobre ele, enquanto possui transparência e refletividade nulas.

⁶ EMISSIVIDADE - relação entre a energia irradiada por um corpo real e a que seria irradiada por um corpo ideal com máxima capacidade de emissão (emissividade igual a 1).

Na Figura 18 é apresentado três objetos constituídos de materiais diferentes para um mesmo comprimento de onda. Nela podemos observar um corpo com α igual a 1 se comportando como um corpo negro, um corpo opaco que não transmite a onda eletromagnética, entretanto reflete ou absorve a maioria desta e um corpo transparente que pode transmitir toda a onda eletromagnética, o restante pode ser absorvido ou refletido.

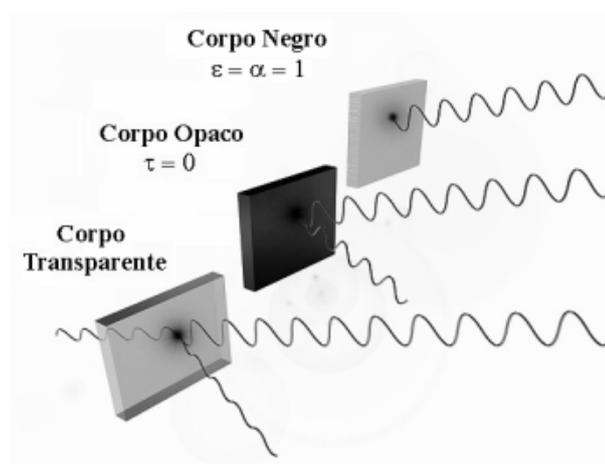


Figura 18: Corpo Negro ($\epsilon=1$), corpo opaco ($r=1$) e corpo transparente ($\tau=1$) para um mesmo comprimento de onda (Adaptado de VERATTI *et al.*,1997).

Independente de sua constituição é conhecido que todo o corpo-negro em uma mesma temperatura emite radiação térmica com o mesmo espectro. Um exemplo de um corpo quase negro seria qualquer objeto pintado com uma camada de pigmento negro fosco. Um corpo negro utilizado em laboratório é representado conforme a Figura 19.

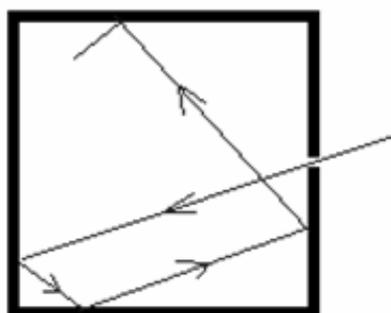


Figura 19: Cavidade em um corpo ligada ao exterior por um pequeno orifício.

A radiação térmica que incide sobre o orifício vindo do exterior entra na cavidade e é refletida repetidas vezes pelas suas paredes sendo eventualmente por elas absorvida. Se a área do

orifício for muito pequena comparada com a área da superfície interna da cavidade, uma quantidade desprezível da radiação incidente será refletida para fora da cavidade. Toda radiação incidente sobre o orifício é absorvida, portanto, o orifício deve ter propriedades da superfície de um corpo negro (EISBERG, 1994).

Se as paredes da cavidade estiverem uniformemente aquecidas a uma temperatura T , elas emitirão radiação térmica que vai preencher a cavidade. A pequena fração dessa radiação vinda do interior que incide sobre o orifício irá atravessá-lo. Portanto, este atua como um emissor de radiação térmica que deve ter um espectro de um corpo negro, mas como o orifício está nos dando uma amostra da radiação existente dentro da cavidade, a radiação dentro dela também deve ter um espectro de um corpo negro (EISBERG, 1994).

A distribuição espectral da radiação do corpo negro é especificada pela quantidade denominada poder emissivo, representada neste trabalho por $E_{\lambda b}(\lambda)$, conforme é mostrado na Figura 20. O poder emissivo é definido de forma que $E_{\lambda b}(\lambda)d\lambda$ seja igual à energia emitida por unidade de tempo em radiação de comprimento de onda compreendido no intervalo de λ a $\lambda+d\lambda$ por unidade de área de uma superfície a temperatura absoluta T .

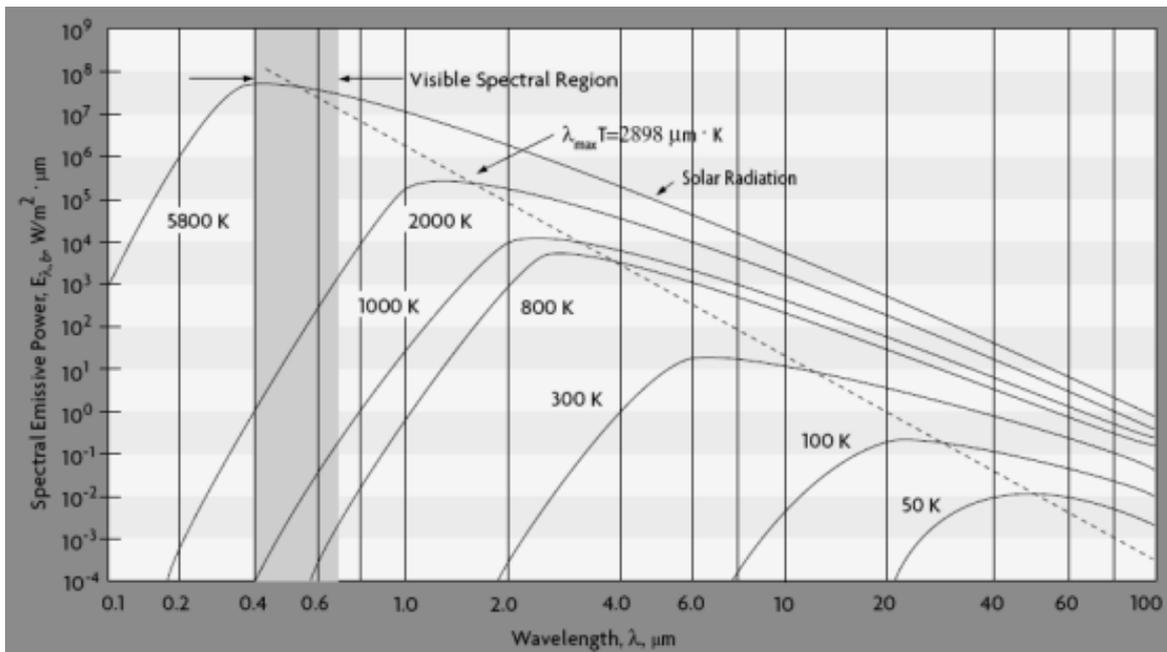


Figura 20: Distribuição espectral de um Corpo Negro (OMEGA, 1998).

A integral do poder emissivo, ao longo de todos os comprimentos de onda (λ) é a energia total emitida por unidade de tempo e por unidade de área a partir de um corpo negro em uma dada temperatura.

$$E_{\lambda b} = \int_0^{\infty} E_{\lambda b}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

Mostra-se que esta integral cresce rapidamente com a temperatura. A potência total irradiada pelo corpo a uma temperatura particular é dada pela área sob a curva para essa temperatura.

Por uma relação empírica, a poder emissivo de um corpo negro é diretamente relacionada à quarta potência da temperatura com fator de multiplicação denominado constante de Stefan-Boltzmann (σ) (EISBERG, 1994), conforme a equação 06.

$$E_{\lambda b} = \sigma T^4 \quad (6)$$

Onde $E_{\lambda b}$ é o poder emissivo em W/m^2 , $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ watt/ (m^2K^4) a constante de Boltzmann e T a temperatura em kelvin. Para objetos reais o poder emissivo leva em conta a emissividade, que é uma característica própria de cada superfície. Superfícies com alta emissividade têm maior capacidade para absorver e emitir radiação.

Mostra-se, ainda, que o espectro desloca na direção de altas frequências quando a temperatura aumenta (resultado conhecido como deslocamento de Wihelm Wien) indicando que, para uma temperatura particular, a frequência na qual o poder emissivo atinge o valor máximo, denominada frequência principal, desloca-se para um valor maior de frequência principal com o aumento da temperatura (EISBERG, 1994).

Os picos sucessivos das curvas mostrados na Figura 20 (denominadas curvas de Planck) seguem a relação especificada pela Lei de Wien, sobre a relação entre a temperatura do corpo e o máximo comprimento de onda emitido.

Na Figura 21 podemos observar o aumento da frequência e conseqüentemente um menor comprimento de onda em relação ao aumento da temperatura para três corpos constituídos de materiais distintos.

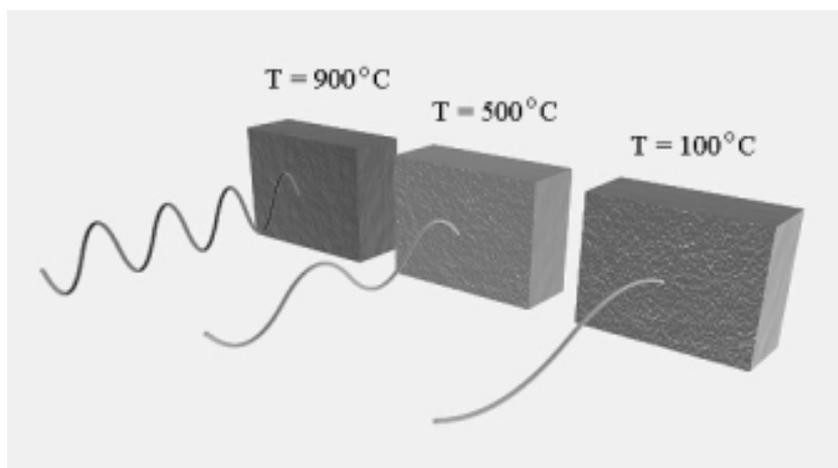


Figura 21: Comprimento de onda para materiais e temperaturas diferentes (Adaptado de VERATTI *et al.*,1997).

A equação do comprimento de onda máxima para uma determinada temperatura é dada a seguir.

$$\lambda_{\max} = d/T \quad (7)$$

Onde, λ_{\max} é o comprimento de onda, em metros, no pico de emissão, T é a temperatura do corpo negro em K e $d = 2,897\ 7685 \times 10^{-3}$ m K é denominada constante de deslocamento de Wien.

3.2.2 O espectro eletromagnético na faixa do infravermelho

A vibração de campos elétricos e magnéticos que se propagam no espaço a velocidade da luz, gera uma onda eletromagnética, e o conjunto de ondas eletromagnéticas formam o espectro eletromagnético. Na Figura 22 é apresentado o espectro eletromagnético onde pode-se observar que a faixa do infravermelho inicia-se imediatamente abaixo da região do visível e abrange comprimentos de onda que vão desde $0,78\mu\text{m}$ até $1100\mu\text{m}$.

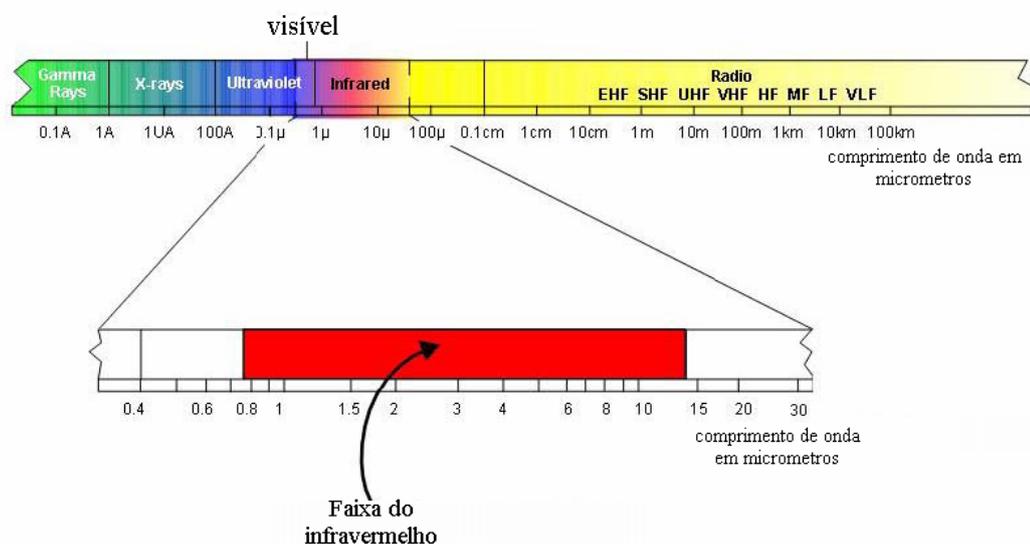


Figura 22: Espectro eletromagnético, na faixa entre $0,7$ to $15\mu\text{m}$ utilizado para propósitos de medição e análise térmicas (MIOTTO, 2007).

Os fabricantes de equipamentos infravermelhos denominam como *near infrared*, *short-wave infrared*, *mid-wave infrared* e *long-wave infrared* a faixa compreendida entre $0,7$ a $1,0\mu\text{m}$, $1,0$ e $3,0\mu\text{m}$, $3,0$ a $5,0\mu\text{m}$, $5,0$ a $13\mu\text{m}$, respectivamente.

Adota-se, atualmente segundo ABNT (2006), uma classificação da faixa do infravermelho em cinco subfaixas de comprimento de onda (podendo, entretanto, apresentar pequenas variações em algumas referências), como descritas pela Tabela 2.

Tabela 2: Classificação da faixa do infravermelho (ABNT, 2006)

Faixa	Comprimento de onda (μm)
<i>Infravermelho muito próximo</i>	0,78 a 1,1
<i>Infravermelho próximo</i>	1,1 a 3,0
<i>Infravermelho médio</i>	3,0 e 6,0
<i>Infravermelho distante</i>	6,0 a 15,0
<i>Infravermelho muito distante</i>	15 a 1000

Deve-se ressaltar que tanto as tecnologias utilizadas como as classificações através das quais os produtos e equipamentos são comercializados, são determinadas pelas respectivas subfaixas do infravermelho.

3.3 **Detectores de infravermelho**

Os detectores são dispositivos destinados a reconhecer a presença ou intensidade de um fenômeno físico, transformando esse dado em informação passível de ser processada. A função dos detectores infravermelhos é converter a energia radiante captada pelo sistema em outra forma mensurável de energia, geralmente um sinal elétrico (VERATTI *et al.*, 1997).

Os elementos detectores para as faixas do *near infrared* e *short-wave infrared* trabalham principalmente com luz refletida. As faixas *mid-wave infrared* e *long-wave infrared* são designadas como infravermelho térmico. As tecnologias de fabricação de elementos detectores, justamente pelas propriedades físicas de cada subfaixa, apresentam diferentes composições de material (ver Anexo A). A Tabela 3 mostra, sucintamente, os principais materiais utilizados para a fabricação de sensores nas respectivas subfaixas de infravermelho.

Tabela 3: Parâmetros dos Detectores

Faixa	Comprimento de onda (μm)	Detectores
<i>near infrared</i>	0,7 a 1,0	Si, InGaAs
<i>short-wave infrared</i>	1,0 e 3,0	InGaAs, HgCdTe
<i>mid-wave infrared</i>	3,0 e 5,0	InSb ,
<i>long-wave infrared</i>	7,5 e 13	HgCdTe, QWIP, Microbolômetro

Basicamente, os detectores de infravermelho são classificados em duas classes: detectores de fótons e detectores térmicos, que são descritas a seguir.

Nos detectores da primeira classe, detectores de fótons, a radiação é absorvida pelo material do elemento detector interagindo com os elétrons do mesmo. O sinal elétrico observado resulta de uma mudança na distribuição da energia eletrônica. Estes detectores de fótons apresentam uma dependência seletiva do comprimento de onda, uma ótima relação sinal/ruído e resposta muito rápida. Mas para apresentar este desempenho eles necessitam de resfriamento criogênico (capaz de produzir baixas temperaturas). Esta necessidade de resfriamento constitui grande obstáculo para seu uso em sistemas infravermelho de larga escala, pois se tornam volumosos, pesados e dispendiosos [ROGALSKI, 2002]. A classe dos detectores de fótons pode ainda apresentar diferentes subdivisões, dependendo da natureza da interação.

Os detectores da segunda classe, detectores térmicos, podem ser do tipo bolômetro, piroelétrico ou termo-pilha. O princípio de funcionamento baseia-se no efeito da radiação incidente que é absorvida alterando a temperatura do material do elemento detector, resultando na mudança de alguma propriedade física do material que assim gera correspondentemente um sinal elétrico de saída.

Constituem como as principais características dos detectores térmicos, a larga faixa de sensibilidade espectral e tempo de resposta relativamente longos devido à inércia térmica dos

componentes. Em virtude dessas características, os detectores térmicos têm sido aplicados principalmente em sistemas que devam operar em diversas faixas espectrais e que não necessitam de altas frequências de medição (VERATTI *et al.*,1997). A Figura 23 mostra a sensibilidade relativa de detectores infravermelhos em relação ao sensor metal termopilha.

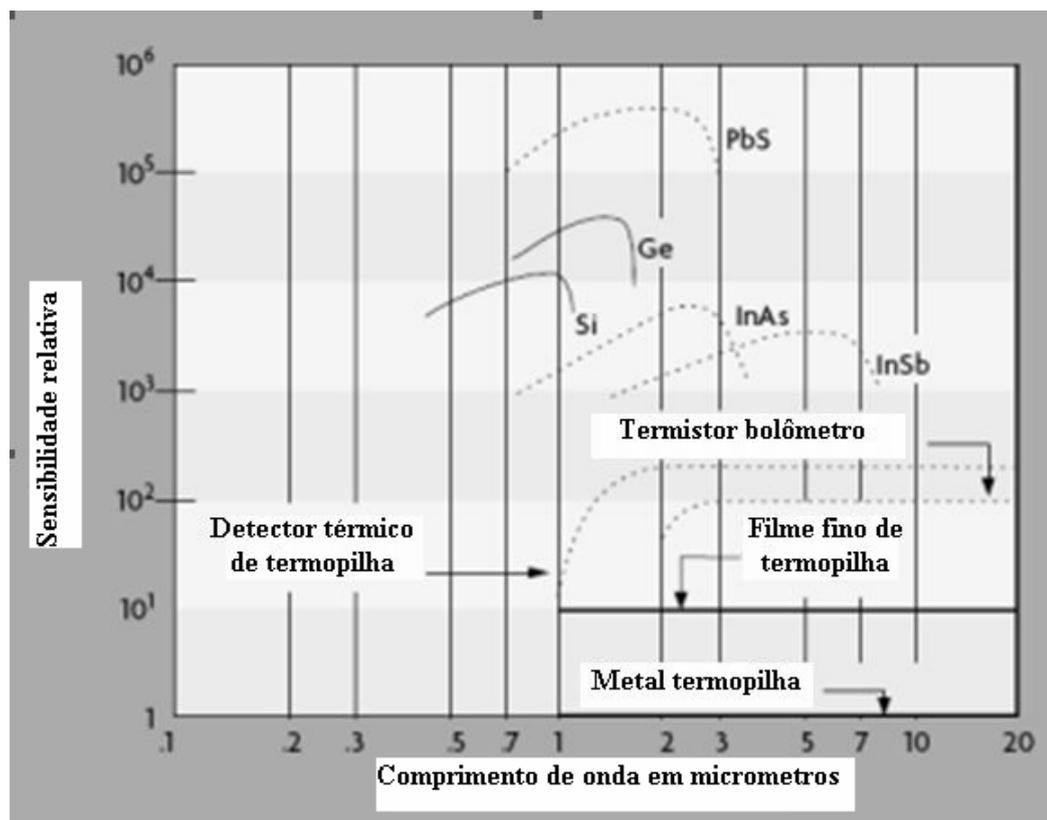


Figura 23: Sensibilidade relativa de detectores infravermelhos (OMEGA, 1998).

Os efeitos térmicos são geralmente independentes do comprimento de onda. Assim, o sinal de saída dependerá, sobretudo, da potência de radiação e não do conteúdo espectral. Nos detectores térmicos do tipo piroelétrico verifica-se uma mudança na polarização do detector, enquanto que nos bolômetros o que é medido é uma mudança na resistência elétrica e nos detectores térmicos do tipo termopilha o que é medido é a intensidade de energia irradiada através dos valores obtidos para diferença de potencial.

Até os anos 90 os detectores térmicos foram menos explorados em comparação com os detectores fotônicos, pois eram considerados como muito lentos e pouco sensíveis. Obtinham-se imagens de baixa resolução e sensibilidade e no final da década de 90 surgiram os atuais sensores infravermelhos de alta sensibilidade. O fator decisivo foi uma melhor sensibilidade e a detecção na faixa de *long-wave infrared* (7,5 – 13 μm), obtida por supersensores com arranjos do tipo FPA (*focal plane array*) e tipo QWIP (*quantum well infrared photodetector*).

Na década atual, entretanto, a tecnologia de sensores térmicos tem atingido consideráveis avanços e grandes arranjos de detectores térmicos não refrigerados produzem imagens de melhor qualidade. O Anexo A mostra uma lista de arranjos de detectores térmicos tipo FPA oferecidos pelos maiores fabricantes [ROGALSKI, 2002]. É interessante observar nesta tabela que apenas as FPA tipo microbolômetros e piroelétricos não necessitam de refrigeração.

3.3.1 Detectores fotônicos – QWIP

Os detectores fotônicos (também chamados detectores quânticos) operam pela interação direta entre os fótons da radiação incidente e os elétrons no material do detector. Por esse motivo, são mais sensíveis e possuem tempo de resposta mais curtos que os detectores térmicos. Nos detectores térmicos o sinal é proporcional ao total de energia absorvida, enquanto nos detectores fotônicos este depende do número de fótons que interagem com os elétrons (VERATTI *et al.*, 1997)..

Como mencionado anteriormente, os detectores fotônicos geralmente necessitam de resfriamento. Este requisito se deve ao fato de que a corrente de escuro decresce com a temperatura de operação. Na maioria dos casos os detectores de fótons necessitam de resfriamento a temperaturas criogênicas, 77K do nitrogênio líquido ou 4K do hélio líquido (ROGALSKI, 2002).

Os detectores de fótons podem ser classificados principalmente como intrínsecos e extrínsecos. Estas classificações são mostradas na Figura 24. Neste trabalho optou-se por destacar o uso dos detectores intrínsecos devido ao seu maior uso comercial.

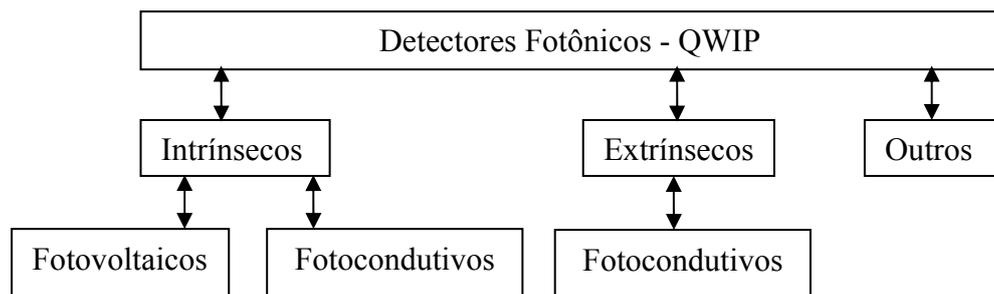


Figura 24: Classificação dos fotodetectores

Nos dispositivos do tipo intrínsecos fotocondutivos o efeito fotoelétrico é baseado na fotogeração de portadores, elétrons, lacunas ou pares elétrons-lacunas, que aumentam a condutividade do material conforme é apresentado na Figura 25. O aumento da condutividade é passível de ser medido através da variação da corrente elétrica que circulará no detector. Esses materiais são semicondutores com estreita faixa de abertura.

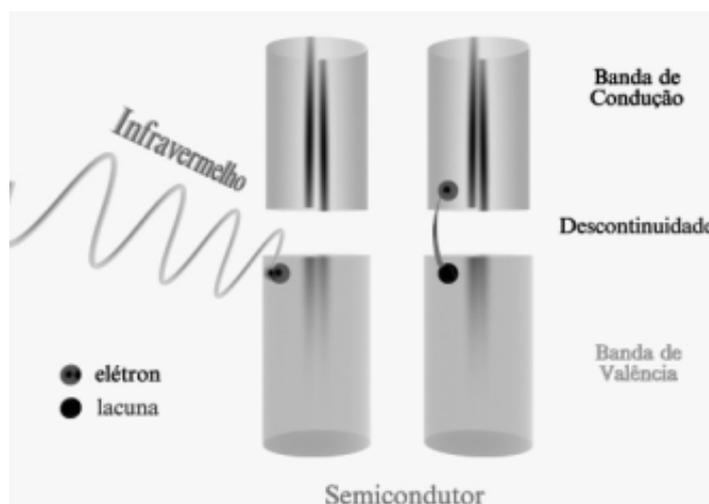


Figura 25: Formação de um par elétron lacuna provocado pela radiação na faixa do infravermelho (Adaptado de VERATTI *et al.*,1997).

Materiais possíveis de serem utilizados em detectores fotocondutivos são: antimoneto de índio (InSb), *quantum well infrared photodetector* (QWIP), *mercury cadmium telluride* (mercad, MCT), sulfeto de chumbo (PbS) e seleneto de chumbo (PbSe).

A Figura 26 mostra alguns detectores fotocondutivos.

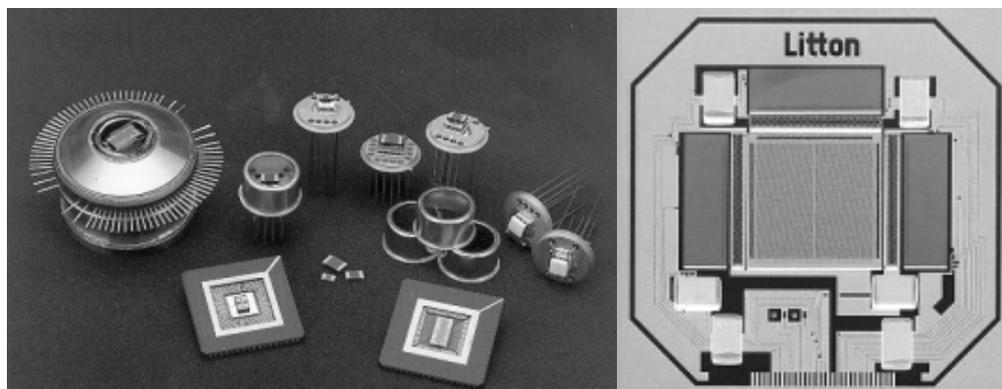


Figura 26: Detectores de PbS e PbSe e um detector de Antimoneto de índio (InSb) da Litton (Adaptado de VERATTI *et al.*,1997)

Nos dispositivos do tipo intrínsecos fotovoltaicos é requerida uma barreira de potencial interna de modo a separar o par elétron-lacuna que é foto-gerado. Como consequência da barreira de potencial os dispositivos fotovoltaicos exibem um comportamento de retificador, pois são polarizados.

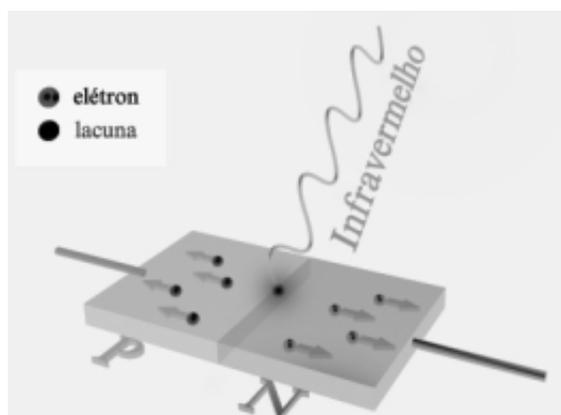


Figura 27: Esquema da junção p-n (Adaptado de VERATTI *et al.*,1997).

As junções p-n são produzidas a partir da introdução controlada de impurezas em semicondutores (dopagem), ocasionando o surgimento de níveis intermediários de energia entre as bandas de valência e de condução, facilitando assim aos elétrons a transposição da descontinuidade. Os semicondutores do tipo "p" contêm impurezas carentes de elétrons (positivas), enquanto os semicondutores do tipo "n" contêm impurezas com excesso de elétrons (negativas). Na fabricação das junções "p-n", parte do material é dopada

positivamente e parte negativamente. A incidência de fótons nos detectores fotovoltaicos provoca a formação de pares elétron-lacuna, como representado na Figura 27, gerando nos terminais da junção uma diferença de potencial diretamente proporcional à quantidade de fótons incidentes (VERATTI et al.,1997).

Materiais possíveis de serem utilizados em detectores fotovoltaicos são: antimoneto de índio (InSb), mercúrio, cadmo telureto (MCT) e siliceto de platina (PtSi). A Figura 28 mostra alguns tipos de detectores fotovoltaicos.

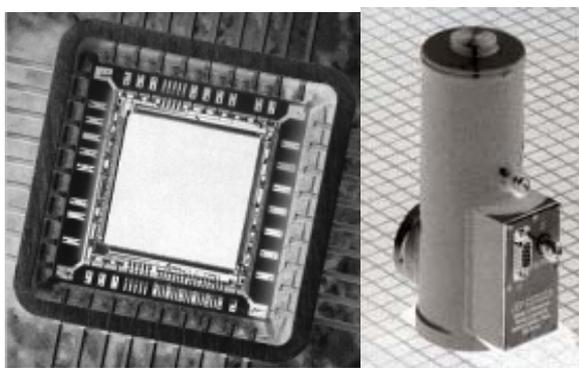


Figura 28: Detectores Fotovoltaicos - Antimoneto de índio (InSb) e Cadmo telureto(MCT) (Adaptado de VERATTI et al.,1997).

RESTREPO *et al.* (2005) relata que o detector de InSb tem uma alta sensibilidade, uma boa resolução espacial produzindo imagens alto nível e ganho.

O detector de mercúrio, cádmio e telúrio (HgCdTe) pode detectar radiação infravermelha na faixa *mid-wave infrared* e na faixa *long-wave infrared*. Devido ao alto custo o uso de HgCdTe tem sido restrito ao campo militar e à astronomia (ROGALSKI, 2002; SOUMATRI *et al.*, 1994).

Os sensores de infravermelho a poços quânticos *quantum well infrared photodetector array* (QWIP) foram desenvolvidos na última década. Estes constituem uma alternativa ao HgCdTe, sendo que apenas há alguns anos os primeiros sensores utilizando essa tecnologia começaram a ser comercializados. Estes sensores podem ser feitos sob medida para absorver radiação na faixa de 3 a 20 μ m. A tecnologia mais madura tem sido a combinação de materiais AlGaAs/GaAs, sendo usado o substrato de GaAs. O problema de detectores QWIP é sua corrente de escuro que é comparativamente alta. Para um detector responder na faixa de 8 a

9,5 μ m é necessário o resfriamento entre 70K a 73K de modo a reduzir a corrente de escuro a um nível suficientemente baixo. A temperatura BLIP (*temperature of background limitation*) é cerca de 72K. Uma descrição mais completa, com discussão sobre vantagens e desvantagens deste tipo de detector pode ser encontrada em [ROGALSKI, 2002].

3.3.2 Detectores térmicos de termopilha

Os termopares são dispositivos eletrônicos com larga aplicação para medição de temperatura. Um termopilha é um dispositivo que consiste numa coleção de termopares conectados em série e com algumas das extremidades expostas à radiação e as outras isoladas da radiação, de modo a se obterem medidas da intensidade de energia radiante através dos valores obtidos para diferença de potencial.

Avanços em fabricação de filmes finos do termopilha possibilitam melhoria no tempo de resposta, para variações de intensidade de radiação em torno de 10ms. Termopilhas fornecem sinal de saída mais intenso e é uma opção para escolha de detectores térmicos com ampla faixa de banda. É necessária a compensação da temperatura ambiente quando os termopilhas forem usados. Um encapsulamento com temperatura controlada é usado para compensar a temperatura ambiente (OMEGA, 1998).

3.3.3 Detectores térmicos microbolômetros

Atualmente, a tecnologia mais utilizada em detectores térmicos é a de microbolômetros. O uso de arranjo de microbolômetros em câmeras infravermelho de custo mais baixo tem sido cada vez mais difundido. Um bolômetro resistivo contém material cuja resistividade depende da temperatura. Contudo, para atingir alta sensibilidade o coeficiente de resistividade deve ser o maior possível e o ruído dos contatos com o material deve ser baixo. O elemento detector é suspenso sobre conexões de Si₃N₄ as quais são conectadas a um substrato de silício. As conexões de Si₃N₄ provêm de isolamento térmica entre o microbolômetro e o substrato com o estágio de leitura (ROGALSKI, 2002).

Segundo VERATTI *et al.* (1997) a variação da resistência elétrica é medida por uma ponte de Wheatstone, onde um par de elementos chamado "ativo" é atingido pela radiação incidente, enquanto um segundo par chamado "compensador" é protegido desta radiação. Os semicondutores usados são de silício ou óxido de vanádio ou composto de silício e platina. A ponte de Wheatstone também foi usada por GU, X. et al. (1998) para obter os parâmetros térmicos de um microbolômetro através de um circuito elétrico conforme é mostrado na Figura 29.

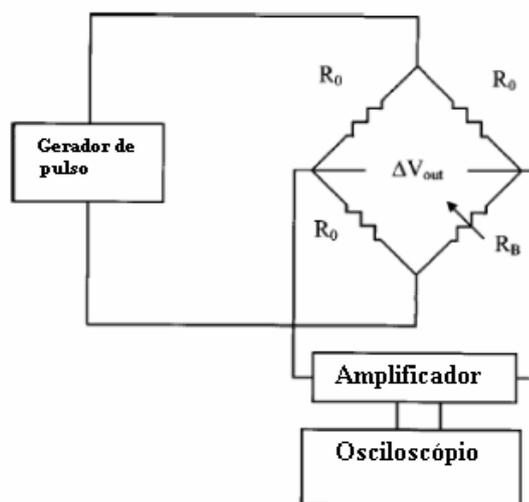


Figura 29: Configuração experimental para a caracterização de parâmetros microbolômetro utilizando um instrumento eletrônico (adaptado de GU, X. et al., 1998).

A medição dos parâmetros térmicos é obtida empregando uma ponte de wheatstone que consiste em um resistor (R_B) representando um microbolômetro e três resistores de referência (R_0) juntamente com um gerador de pulso, um amplificador e um osciloscópio. À temperatura ambiente, os resistores têm a mesma resistência e a tensão ΔV_{out} é igual à zero. Quando o pulso quadrado de tensão advindo do gerador de pulso é aplicado à ponte, a resistência R_B é alterada devido ao aumento de temperatura e ao elevado isolamento térmico, usado para maximizar a mudança de temperatura e para minimizar a dispersão térmica, enquanto as três resistências de referência permanecem praticamente iguais. A resposta térmica do microbolômetro pode ser demonstrada pela equação 8.

$$H \frac{d\Delta T}{dt} = \frac{V_B^2}{4R_0} - G\Delta T \quad (8)$$

Onde, V_B é a tensão do pulso aplicado à ponte, G é a condutância térmica, H é a capacitância vinculada ao aquecimento, R_0 é a resistência do microbolômetro à temperatura ambiente e Δt é o aumento da temperatura no sensor. A potência gerada pelo microbolômetro durante a aplicação da tensão é:

$$P = \frac{V_B^2}{4R_0} \quad (9)$$

Considerando a mudança da resistência do microbolômetro até os termos de primeira ordem de ΔT A temperatura do microbolômetro é como uma função no tempo e pode ser obtida pela equação 10.

$$\Delta TH = \frac{V_B^2}{4GR_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\kappa}\right) \right] \quad (10)$$

O aumento da temperatura do microbolômetro altera sua resistência, esta alteração depende do TCR (coeficiente de temperatura do resistor) A mudança na resistência produz uma tensão através da ponte, que é dada por:

$$\Delta V_{out} = \frac{\beta V_B^3}{16GR_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\kappa}\right) \right] \quad (11)$$

Onde, κ é a constante de tempo térmica do microbolômetro e é dada por $\kappa = H/G$, $\beta = (1 / R) (\Delta R / \Delta T)$ é a TCR do elemento sensor do microbolômetro. Um detalhamento do circuito da Figura 29 pode ser encontrado em GU, X. et al. (1998).

A empresa Honeywell tem licenciado esta tecnologia a várias companhias para produção de *Focal Plane Arrays* (FPAs) não resfriados para uso comercial e militar. Já no começo desta década câmeras compactas de FPA com arranjos de 320×240 microbolômetros eram produzidas por empresas americanas como Raytheon, Boeing e Lockheed Martin. Mais recentemente vários outros países como Japão, França e Inglaterra vêm desenvolvendo seus próprios sistemas. No Brasil, também sido realizadas pesquisas na área, como a pesquisa realizada no IME para desenvolvimento de bolômetro não resfriado (FINEP, 2006). Neste trabalho, as inspeções descritas no Capítulo 4 foram realizadas com termovisores utilizando o microbolômetro não resfriado como detector.

3.4 **Câmara de Infravermelho**

As câmeras modernas para inspeção infravermelha tendem para configurações de baixo custo utilizando FPAs de detectores térmicos não resfriados, sem obturador mecânico tornando-se mais leves e compactas. Atualmente encontram-se no mercado câmeras com detectores de termopilhas a valores de US\$5000 e espera-se que sistemas de infravermelho de alto desempenho possam chegar a custos inferiores a US\$1000 e, neste caso, uma considerável parcela do valor final do produto ficaria debitada ao custo das lentes. Isto se deve ao fato que o vidro é opaco a faixas de infravermelho; assim as lentes para infravermelho são construídas geralmente de materiais de germânio ou silício. Entretanto em versões mais baratas de lentes fabricadas em material sintético sejam disponíveis (SOUMATRI *et al.*, 1994).

Apresenta-se, no Anexo B, uma lista com dos principais fabricantes de equipamentos de infravermelho, obtida a partir de uma pesquisa sobre os equipamentos disponíveis no mercado.

O princípio básico de um detector térmico de banda espectral é filtrar e medir com um detector de sinal a radiação provinda de um objeto e enviar o sinal medido para um processador (INFRATEMP, 2006), como esquematizado na Figura 30. Nesta figura podemos observar o detector, que converte a radiação incidente em um sinal de natureza elétrica, um sistema óptico, que define o campo de visão do termômetro, FOV – *field of view* e o ângulo de aceitação do detector térmico. A lente é usada para focalizar a imagem de uma área do alvo; o filtro seleciona a banda de comprimento de onda para a qual o termômetro é sensível; um amplificador para a saída do detector; um indicador de temperatura analógico ou digital e um dispositivo para ajuste da emissividade.

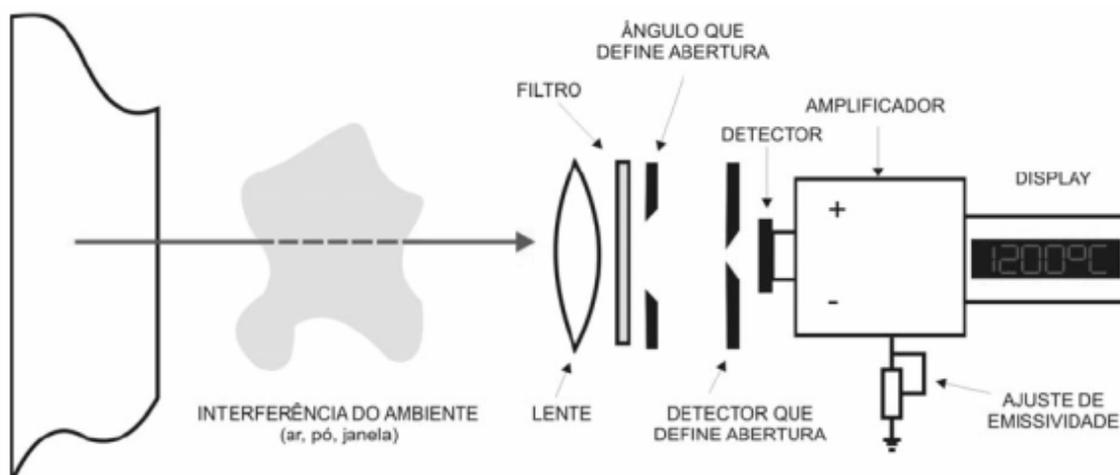


Figura 30: Esquema de um detector térmico de radiação de banda espectral mostrando os elementos básicos da sua construção e operação (MIOTTO, 2007).

Na aquisição do sistema de infravermelho é importante que se faça um estudo de custo e benefício. Os seguintes itens devem ser observados quando da especificação da câmera para uma determinada finalidade: determinação dos requisitos de imagem, determinação dos requisitos de medição, portabilidade, tolerância ao ambiente de utilização, requisitos de registro e processamento, disponibilidade de assistência técnica e custo.

3.5 *A formação da imagem digital infravermelho*

Uma imagem pode ser considerada como uma função espacial bidimensional, com argumentos em duas coordenadas, fornecendo valores de amplitude. A amplitude define um nível de cinza correspondente a cada par de coordenadas, formando assim um arranjo em duas dimensões. A imagem digital é usualmente obtida através de processos de digitalização tanto em termos de coordenadas quanto nos valores de amplitude. A digitalização em termos de amplitude é denominada quantização em nível-de-cinza. A Figura 31 mostra a relação entre valor numérico de 256 níveis e o respectivo nível-de-cinza.

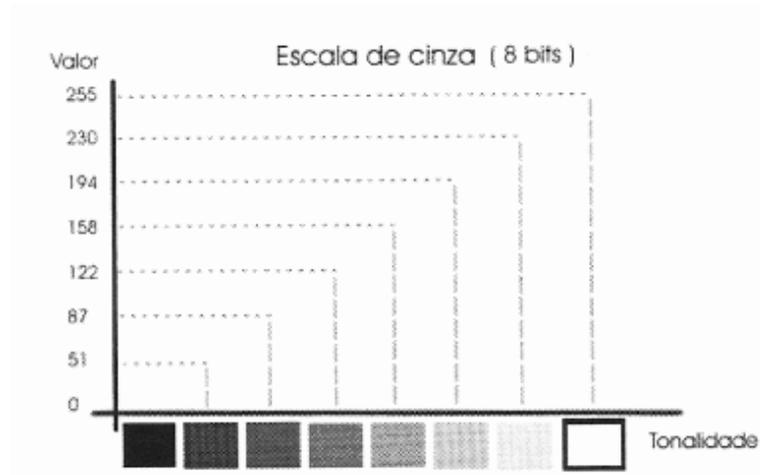


Figura 31: Escala de cinza (MOURA, 2006).

A digitalização em coordenadas espaciais é denominada amostragem da imagem e é determinada pela dimensão do arranjo e a resolução espacial. Com relação à quantização, uma possibilidade é a conversão do sinal de amplitude, naturalmente analógico, em sinal digital através de conversor analógico e digital.

BATISTA (2005) mostra que o detalhe discernível em uma imagem é dependente da resolução espacial do sensor e se refere ao menor tamanho de um objeto possível de ser detectado.

A resolução radiométrica descreve o conteúdo real de informação em uma imagem, ela descreve sua habilidade em separar diferenças muito pequenas de energia, ou seja, quanto melhor a resolução radiométrica de um sensor mais sensível ele será para pequenas diferenças de energia refletida ou emitida.

Em resumo, considera-se uma imagem digital como sendo uma matriz retangular, cujos índices de linhas e colunas identificam um ponto da imagem e o valor do elemento da matriz correspondente a estes índices representa o seu nível-de-cinza. O elemento da matriz assim definida é denominado *pixel*. Desta forma a imagem encontra-se apropriada para o processamento em computador (GONZALES & WINTZ, 1992).

No contexto desta dissertação, decidiu-se focar o processo de formação de imagens térmicas. Estas são obtidas por câmeras equipadas com sensores que detectam comprimentos de onda na faixa do infravermelho, enfatizando aquelas que utilizam microbolômetros como elementos detector.

A utilização de microbolômetro como elemento detector tem se tornado mais popular com o desenvolvimento tecnológico, já que opera em temperatura ambiente, reduzindo assim o custo da câmera e sua manutenção. Durante a exposição à superfície de interesse, cada elemento detector gera um sinal que é relacionado com o fluxo radiante total por unidade de área que incide sobre si (LUPO & BALERAK, 2000).

Este nível de sinal sofre ainda o efeito da eficiência quântica detectiva, que é definida como a transferência da relação sinal-ruído e que depende da área do elemento detector e sua eficiência de conversão (LUPO & BALERAK, 2000). Quando a energia radiante é focalizada sobre o microbolômetro e é absorvida, a temperatura do elemento detector aumenta e altera sua resistência. O elemento e o filme de absorção são isolados por uma cavidade do substrato para maximizar a mudança de temperatura e para minimizar a dispersão térmica. Isto possibilita a detecção de pequenas quantidades de potência radiante.

Observa-se que, em princípio, o valor de resistência do elemento detector fornece apenas uma informação relativa da temperatura, já que o que se tem é que uma ‘variação da relação entre a resistência elétrica com a potência dissipada’ é proporcional à ‘variação da resistência com a temperatura’, sendo o fator de proporcionalidade a impedância térmica. Portanto, para se obter uma medida absoluta de temperatura é necessária uma calibração periódica com uma fonte padrão para uma temperatura conhecida. Com este procedimento é possível, em uma câmera típica, obter medição de temperatura com precisão de aproximadamente 2% (LEWIS *et al.*, 1990). Vale ainda esclarecer que a resistência do elemento detector varia de forma não-linear com a temperatura. Ressalta-se também que a temperatura medida depende da distância da superfície de interesse até a câmera e, assim, de sua ampliação; a área da superfície que é focalizada sobre um elemento detector determina o fluxo total radiante sobre ele e o nível do sinal absorvido é interpretado como uma média de temperatura na sua superfície. Outra observação é que quando são requeridas observações quantitativas de imagens, é importante

que as imagens sejam tomadas sempre com a mesma distância da câmera de modo que o objeto cubra o mesmo número de elementos detectores (JONES & PLASSMANN, 2002).

A formação da imagem térmica de infravermelho é assim construída através da construção de um arranjo de elementos detectores dispostos adequadamente em um plano focal. Como resultado, cada elemento detector do arranjo ficará associado a um *pixel* da imagem formada. Com relação à amostragem da imagem, pode-se citar que, atualmente, têm-se adotado arranjos de microbolômetros em matrizes 160×120, 320×240 ou 640×480. Com relação à quantização, o *pixel* é digitalizado em 8, 12 ou 14 bits o que corresponde à quantização em 256, 4.096 ou 16.384 níveis, respectivamente (JONES & PLASSMANN, 2002).

Como a imagem digital é uma aproximação da imagem contínua, um dado importante é a resolução (grau de discernimento de detalhes) fornecida pela imagem digital. Quanto maior é o grau de amostragem e de quantização, melhor a aproximação da imagem original. A limitação encontra-se nos detalhes construtivos da câmera, na memória requerida e no processamento digital.

A análise da imagem infravermelha exige um entendimento do nível-de-cinza, que representa uma medida da resposta do detector de infravermelho à potência radiante infravermelho que é absorvida e integrada por todos os ângulos. Esta resposta é não linear e depende dos comprimentos de onda passados pelos filtros da câmera e também da temperatura ambiente. A potência radiante que recai sobre o elemento detector é uma função complexa da radiância da superfície do objeto e do ângulo sólido que depende do sistema ótico da câmera. Como o nível-de-cinza é obtido mais por uma integração do que por média, os arranjos de elementos sensores que incorporam um tempo de integração ajustável que permite também ajustar a faixa de temperatura (ou seja, estabelecendo-se o tempo de captura ajusta-se a faixa de temperatura). Este ajuste é efetuado eletronicamente na câmera, embora também possa ser efetuado com uso de filtros. Quando a câmera e o sistema ótico estiverem calibrados para uma faixa específica de temperatura, os valores são então mapeados a temperaturas de tal modo que os níveis-de-cinza podem ser interpretados linearmente em termo da temperatura da fonte, com o nível zero correspondendo a menor temperatura da faixa e o nível superior ao topo da faixa.

Quanto às técnicas de processamento digital de imagens, cabe ponderar as diferenças entre processamento para as imagens obtidas com radiação infravermelha e daquelas obtidas por luz visível.

Para a imagem obtida por luz visível, esta é produzida pela radiação que é refletida pela superfície iluminada, fornecendo assim a informação sobre o objeto. Logo, neste caso, a fonte de luz não aparece normalmente na imagem (exceto, talvez como uma imagem virtual destorcida na forma de uma reflexão especular). Nesta situação, o controle da iluminação externa, por exemplo, pode ter um peso importante para melhorar o desempenho computacional do sistema de processamento de imagem.

Para a imagem térmica infravermelho não existe nenhuma fonte externa de iluminação infravermelha. A energia é dada pela radiação térmica natural gerada pelo objeto. Como mencionado anteriormente, esta radiação é gerada de acordo com a lei de Planck para radiação de corpo negro (JONES & PLASSMANN, 2002).

O processamento de imagens é bastante dependente do problema a ser resolvido. Neste sentido, fases de pré-processamento podem ter um peso importante quando se procura aumentar o desempenho do sistema. Em princípio, as câmeras de infravermelho incluem *hardware* e *software* de pré-processamento digital de imagem. Presume-se que as câmeras efetuem pré-processamento de imagem objetivando reduzir ruídos na imagem.

Outros distúrbios relativos ao arranjo no plano focal é a resposta variável dos elementos detectores devido à falta de uniformidade no processo de fabricação. Ainda com relação ao pré-processamento digital de imagens térmicas nas câmeras, um procedimento seria adotar limiares de amplitude do sinal gerado pelo sensor, de modo que todos dos níveis-de-cinza abaixo de certo limiar são tomados como zero enquanto que aqueles acima do outro limiar são tomados como o valor superior do nível-de-cinza. Outro procedimento, neste mesmo sentido, é atribuir um limiar de modo que para os *pixels* correspondentes ao fundo (usualmente com uma temperatura mais baixa que o objeto de interesse) teriam os níveis-de-cinza tomados como zero enquanto que os outros *pixels* reteriam o valor original dos níveis-de-cinza (JONES & PLASSMANN, 2002).

As imagens digitalizadas disponibilizadas pelas câmeras de infravermelho, podem ainda receber melhoras adicionais por meio de processamento digital subsequente, de acordo com técnicas específicas nos diversos campos de processamento.

O processamento da imagem digitalizada envolve principalmente os seguintes campos de processamento: Realce, Restauração, Segmentação e Descrição. As técnicas de realce procuram destacar informações presentes em imagens, inspiradas em características do sistema visual humano. Entre estas técnicas incluem-se modificação de histograma, suavização, realce de bordas e pseudocolorização (ver Anexo E). No contexto da formação da imagem poderia ainda incluir-se o campo de codificação da imagem, que consiste em comprimi-la objetivando diminuir espaço de armazenamento.

4 Base de Dados de Imagens Termográficas

4.1 *Introdução*

Na área de manutenção de pára-raios em subestações, foi verificada a dificuldade de se estabelecer referências absolutas para predição do envelhecimento dos dispositivos instalados, diante da variedade de modelos e de fabricantes dos dispositivos, da variedade das condições ambientais de trabalho e das distintas solicitações a que os dispositivos ficam submetidos nos diferentes locais de instalação. Isto sugeriu que a forma mais eficiente de verificação da evolução da deterioração dos pára-raios deveria se basear no acompanhamento da modificação das propriedades de cada dispositivo ao longo do tempo. Tal acompanhamento seria possível através de um processo contínuo de monitoramento do seu comportamento a partir da comparação de algumas de suas propriedades macroscópicas com aquelas verificadas em registros anteriores específicos do próprio dispositivo. A utilização de termovisores é bastante adequada a este tipo de aplicação, inclusive por não demandar a interferência na operação do dispositivo.

O presente capítulo expõe o procedimento de criação e análise de banco de dados de imagens termográficas para dispositivos pára-raios de subestações. Inicialmente, são explorados alguns conceitos físicos mais importantes e é detalhada a técnica de utilização dos termovisores. É relatado o procedimento para a inspeção termográfica observando as especificações e os cuidados específicos dos termovisores além dos equipamentos necessários.

Em seguida é descrita a utilização da termografia para a identificação de uma anomalia térmica de pára-raios de subestação. Finalmente são apresentados os procedimentos de inspeção e os critérios para abertura de relatório termográfico, para os pára-raios ZnO e SiC.

4.2 ***Conceitos básicos em imagens termográficas***

Como descrito no Capítulo 3, todos os objetos emitem radiação devido à agitação térmica de átomos e moléculas dos quais são constituídos. Quanto maior a temperatura do objeto, mais radiação ele emite. A maior parte da radiação térmica é emitida sob forma da luz infravermelha, invisível ao olho humano (EISBERG, 1994). Os termovisores são sensíveis à radiação infravermelha emitida pelos objetos, fornecendo imagens térmicas dos objetos sob inspeção denominadas termogramas. Assim, por meio desses termovisores, é possível medir à distância as temperaturas na superfície dos objetos inspecionados.

Um termovisor mede a radiação de infravermelho emitida pelos objetos e reproduz imagens correspondentes. O fato de a radiação resultar da temperatura de superfície do objeto possibilita que a câmara calcule e mostre essa temperatura. No entanto, a radiação medida pela câmara não depende apenas da temperatura do objeto, mas também é função da emissividade. Além disto, a energia infravermelha total que deixa a superfície de um objeto é a soma dos componentes transmitidos, irradiados e refletidos da radiação infravermelho conforme descrito no Capítulo 3.

Para medir corretamente a temperatura do objeto é, portanto, necessário compensar os efeitos de diversos fatores. Isto é feito automaticamente pelos termovisores (FLIR, 2003). Neste sentido, os seguintes parâmetros devem ser fornecidos para a câmera:

- A emissividade do objeto;
- A temperatura ambiente refletida;
- A temperatura atmosférica
- A distância entre o objeto e o termovisor;
- A umidade relativa;

Alguns conceitos físicos relativos ao poder emissivo emitido na subfaixa do espectro eletromagnético referente ao infravermelho, foram apresentados na seção 3.2.1.

A seguir são apresentados alguns conceitos básicos que estão relacionados com o ajuste usado nos termovisores para obtenção das imagens através da radiação térmica.

Emissividade

Emissividade é a relação entre o poder emissivo de um corpo qualquer e o de um corpo negro a mesma temperatura. Pode ter um máximo igual a um, que é correspondente à de um corpo negro, e um mínimo igual a zero.

O valor da emissividade depende, primordialmente, do comprimento de onda considerado, uma vez que a transparência e a refletividade dos materiais variam de acordo com o comprimento de onda, da textura do material, relacionado com o tamanho da onda, em contraste com o tamanho das imperfeições da superfície do material. Esse fator pode ser afetado por alterações provocadas pela temperatura na composição química superficial do objeto (como a formação de camadas de óxidos), bem como pinturas e a deposição de poeira. Uma superfície é considerada "lisa" se suas saliências e reentrâncias têm tamanhos inferiores a um quarto do comprimento de onda considerado e do ângulo de visualização, quando ultrapassa os 60° com a normal (linha perpendicular à superfície) começa a ocorrer uma diminuição aparente da emissividade (VERATTI *et al.*, 1997).

FLIR (2003) apresenta dois métodos para se definir o valor da emissividade, quando não se tem acesso a um valor pré-determinado. No entanto, para que estes métodos sejam eficazes, a temperatura do mensurando não deve ser muito próxima da temperatura ambiente e ou refletida. Os métodos são descritos a seguir.

Utilização de par termoeletrico: seleciona-se um ponto de referência e mede-se a respectiva temperatura utilizando um par termoeletrico. É alterada a emissividade até que a temperatura medida pelo termovisor esteja em conformidade com a leitura do par termoeletrico. O valor assim determinado é o valor de emissividade do objeto de referência.

Utilização de emissividade de referência: coloca-se uma fita ou tinta de emissividade conhecida sobre o mensurando. Mede-se a temperatura da fita ou tinta de valor de emissividade conhecida, utilizando o termovisor. Registra-se a temperatura. Altera-se a emissividade informada ao termovisor até que a medição (de emissividade desconhecida) adjacente à fita (ou tinta) registre a mesma leitura de temperatura.

Com o objetivo de verificar a influência de valores de emissividade no processo de análise, testes em laboratório foram desenvolvidos nesta dissertação para determinação de valores de emissividade dos pára-raios com invólucro de porcelana e polimérico, para esta finalidade foi utilizado o método do par termoelétrico.

Temperatura refletida ou ambiente

Este ajuste define a temperatura do meio circundante ao objeto. É utilizado para compensar a radiação refletida no objeto e a radiação emitida pela atmosfera do mensurando até o termovisor.

FLIR (2003) considera que se a emissividade for baixa, a distância demasiadamente grande e a temperatura do alvo forem próximas à temperatura refletida, será importante regular e compensar corretamente a temperatura ambiente.

Distância

Este ajuste tem como objetivo definir a distância entre o objeto e a lente frontal do termovisor. É utilizada para compensar a radiação absorvida entre o mensurando e o termovisor e também devido à transmitância depender da distância considerada e do comprimento de onda.

Umidade relativa

Este ajuste é utilizado para que o termovisor compense o fato da transmitância depender, em parte, da umidade relativa da atmosfera. O vapor de água e o gás carbônico absorvem diversos comprimentos de onda entre 1 e 15 μm e grande parte da radiação acima de 15 μm . Na faixa entre 5 a 7 μm ocorre uma forte absorção, sendo esta faixa usada para medir a concentração de vapor de água na atmosfera.

Conforme é apresentado na Figura 32, existem intervalos entre comprimentos de onda que tem uma alta transmitância e a radiação que chega ao detector sofre pouca influência da atmosfera, são chamados de janelas atmosféricas (BATISTA & DIAS, 2005). A figura mostra que a energia transmitida é maior nas janelas atmosféricas e é absorvida fora delas. Também

pode ser observado que os comprimentos de onda menores são afetados de forma mais severa pelo espalhamento atmosférico do que comprimentos de onda maiores.

FLIR (2003) considera que para pequenas distâncias e umidade normal, esta pode ser considerada como um valor pré-definido de 50%.

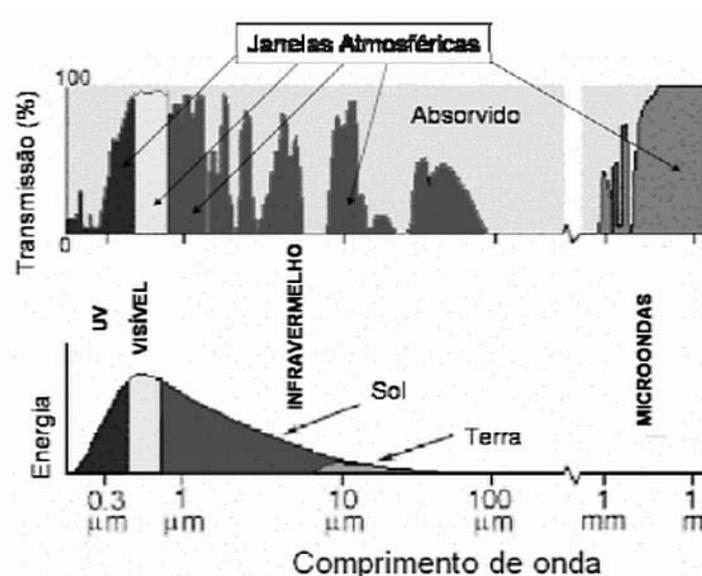


Figura 32: Janelas atmosféricas nos principais comprimentos de onda do espectro eletromagnético
(Adaptado de BATISTA & DIAS, 2005)

Outros parâmetros

FLIR (2003) acrescenta que os termovisores permitem compensar ainda o parâmetro de temperatura atmosférica entre a câmera e o objeto e a temperatura óptica externa que é a temperatura de quaisquer lentes externas.

4.3 Criação de banco de dados

Análise e planejamento da tarefa

É recomendável que a inspeção termográfica seja realizada por um profissional que tenha treinamento na operação de um sistema infravermelho, tenha autorização para trabalhar em área de riscos em eletricidade bem como o conhecimento e treinamento para seu controle. O operador deve observar as especificações e cuidados descritos para manuseio do termovisor.

É desejável ainda que o profissional conheça o sistema elétrico de potência e saiba definir o grau de importância do componente e ou equipamento no ponto operativo, para possibilitar a definição e priorização no instante da manutenção.

A Figura 33 mostra que a qualidade na implantação do programa de Termografia depende fundamentalmente da interação entre o operador com treinamento e conhecimento técnico, o sistema bem modelado e as metodologias de processamento consistentes. Estes fatores quando devidamente harmonizados possibilitam um melhor resultado.



Figura 33: Conjunto de três premissas empregadas no programa de inspeção termográfica (Adaptado de VERATTI *et al.*,1997).

Para a realização da inspeção termográfica é desejável que o inspetor esteja munido dos seguintes equipamentos:

- Termovisor;
- Câmera digital e acessórios;
- Binóculo;
- Termo-higrômetro;
- EPI (Equipamentos de Proteção Individual);
- Relatórios das estações a serem inspecionados;
- Anemômetro;
- Trena eletrônica.
- Material para anotações;

Recomenda-se atenção aos itens que deverão ser levados para o campo, pois a falta de determinados componentes pode comprometer a qualidade da inspeção executada ou até inviabilizá-la.

As inspeções são realizadas por inspetores que trabalham em conjunto na detecção, análise, preenchimento do Relatório de Inspeção Termográfica (RT), e interpretação preliminar das Anomalias térmicas (AT's) encontradas, bem como na divulgação e esclarecimentos posteriores de todos os dados coletados. É desejável que a inspeção termográfica de pára-raios de subestações seja semestral, sendo aceitável o prazo máximo de um ano, contudo pode haver inspeções aperiódicas em função da necessidade do sistema.

Na fase de programação e provisionamento, CEMIG (2007) recomenda verificar se há relatórios já abertos das estações a serem inspecionadas, evitar inspeções com carga abaixo de 50% da corrente nominal, evitar inspeções em equipamentos com tempo de energização menor que quarenta e cinco minutos e evitar inspeções com chuva e inspeções com a velocidade do vento maiores que cinco metros por segundo.

Para cada anomalia térmica é recomendado que se abra um relatório técnico específico, ainda que seja no mesmo equipamento, bem como deverá ser feita uma fotografia digital na mesma posição do termograma com destaque para o objeto analisado (CEMIG, 2007).

Para inspeção termográfica em pára-raios de subestações todos os ensaios são realizados com os equipamentos energizados devendo-se respeitar a distância de segurança requerida para os níveis de tensão do sistema elétrico.

Monitoração do Sistema Elétrico

A detecção termográfica de um componente elétrico defeituoso baseia-se na identificação de uma anomalia térmica no sistema. Na maioria dos casos, essa anomalia térmica é uma elevação de temperatura do componente em função de uma variação sua resistência ôhmica devido à oxidação, corrosão ou falta de contato. Dessa forma, um componente defeituoso apresenta-se com anomalia térmica em comparação com outro componente de mesma emissividade e que não apresente alteração térmica. Menos frequentes, mas não menos importantes, são os casos onde o componente defeituoso se revela por estar com uma temperatura menor em relação aos demais, como por exemplo, uma falha de refrigeração na serpentina de um transformador.

Para serem efetivas, as inspeções devem ser realizadas nos períodos de maior demanda, quando os pontos deficientes do sistema tornam-se mais evidentes.

Embora o componente analisado neste trabalho é o pára-raios, vários outros equipamentos como conectores, chaves seccionadoras, barramentos, fusíveis, disjuntores, bancos de capacitores, transformadores de corrente e de potência, também constam como equipamentos inspecionados pela termografia.

Procedimentos para Inspeção Termográfica em Pára-raios de Subestações

Antes da execução da inspeção é desejável que se verifique o aspecto externo do dispositivo, suas condições de limpeza, a existência de trincas nas saias ao longo da coluna de isoladores e o estado da base isolante, quando houver. As conexões do aterramento, da linha e do barramento e as condições do contador de descarga, quando existir, também devem ser verificadas.

Em geral, a execução da inspeção termográfica em pára-raios de subestação obedece a uma seqüência de procedimentos, tais como:

- Verificar a programação de serviço do dia;
 - Fazer provisionamento conforme os locais a serem inspecionados;
 - Analisar os relatórios existentes das estações;
 - Informar previamente aos grandes clientes, sempre que necessário, da visita de inspeção;
 - Realizar a análise de risco da tarefa, adotando medidas preventivas para seu controle;
 - Realizar a inspeção termográfica conforme procedimento específico para cada tipo de termovisor;
 - Procurar restringir a imagem à superfície alvo, evitando a presença de outras fontes térmicas na imagem;
 - Tomar o cuidado com os ajustes de foco, nível e ganho no termovisor. Termogramas gerados com problemas de foco dificultarão a identificação do possível local de início de falha (as distorções não são recuperadas no ambiente do *software*);
 - Ajusta-se a emissividade do termovisor em 0,75 nos pára-raios com invólucro de cerâmica e com invólucro polimérico;
 - Trabalha-se com distâncias definidas e ajusta-se no termovisor a condição do instante da inspeção (umidade relativa, temperatura do ambiente);
 - Utiliza-se sempre a mesma distância entre o termovisor e o pára-raios, em todas as medições em um conjunto de pára-raios;
 - Realizam-se as medições focando o pára-raios em três ângulos, no mínimo, podendo atingir seis posições;
 - Trabalha-se na análise radiométrica dos pára-raios utilizando-se sempre os dispositivos de mesmo fabricante e características elétricas;
 - Obter imagens digitais do alvo nas mesmas posições em que foram feitos os termogramas;
 - Registrar a inspeção e ou qualquer anormalidade no Livro de Ocorrências e Serviços da subestação;
 - Abrir relatórios se necessário.
-

SILVA (2007) descreve que a execução da inspeção focalize o pára-raios em três posições, no mínimo, com ângulos de 120°, podendo chegar a seis posições com ângulos de 60°. Este procedimento é ilustrado na Figura 34 para aquisição em três ângulos diferentes.

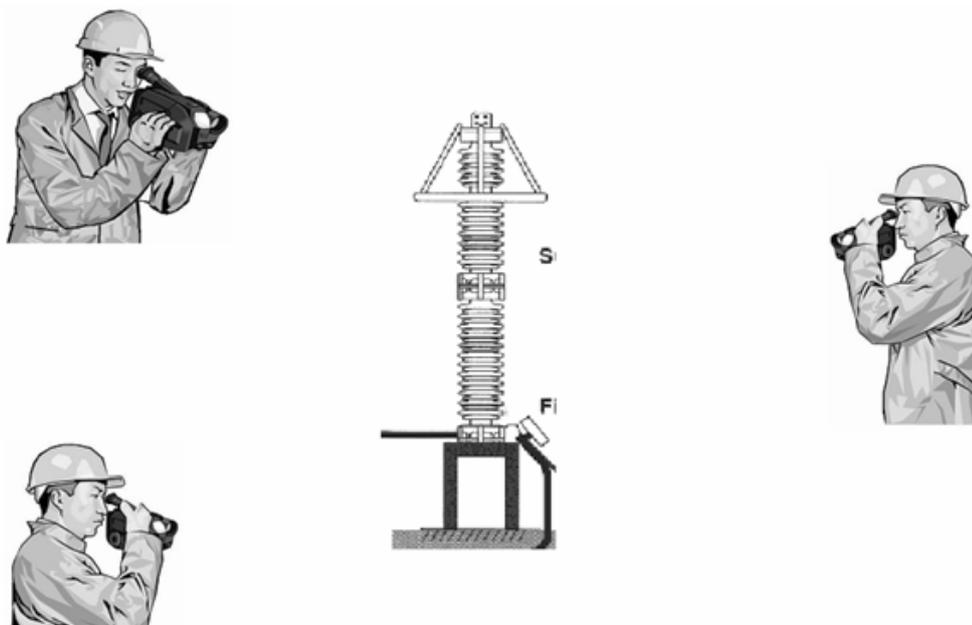


Figura 34: Inspeção termográfica com três posições com ângulos de 120 graus (SILVA, 2007).

O objetivo da aquisição de imagens em ângulos diferentes é a identificação de uma anomalia térmica em qualquer parte dos resistores. Com a aplicação da metodologia proposta o pára-raios é inspecionado por completo. Na Figura 35 é apresentado um conjunto de pára-raios de subestações passíveis de serem inspecionados.



Figura 35: Pára-raios de 120kV, 10kA fabricante Hitachi.

Após a aquisição dos termogramas eles são transferidos para o ambiente do *software*, onde é iniciada a análise. Os pára-raios são denominados por referência a fase vermelha, azul e branca, como PRVM, PRAZ e PRBR, respectivamente.

A imagem de cada dispositivo é dividida em quatro áreas, no mínimo. Como exemplo, considere um dispositivo que será analisado em seis posições e dividido em quatro áreas, denominadas área P01 ou AR01 a área P04 ou AR04. A seguinte seqüência de análise é estabelecida para cada dispositivo:

- Divide-se o pára-raios em quatro áreas;
- Define-se a temperatura de referência como a menor temperatura encontrada na área P01 efetuada por comparação, tomando-se todos os termogramas coletados em todas as posições de cada dispositivo;
- As temperaturas de referência das outras áreas P02 a P04 são obtidas na mesma seqüência do item anterior;
- O gradiente de temperatura encontrado é a temperatura aparente coletada nas seis posições em cada área menos a temperatura de referência da respectiva área.

Critérios para abertura de Relatório Termográfico

No instante em que se executa a inspeção termográfica de um componente elétrico, o inspetor realiza uma rigorosa seleção preliminar para definir se o equipamento encontra-se em situação normal ou será registrado para posterior diagnóstico a constar no relatório técnico devido a uma anomalia térmica. Nesta seleção preliminar, para considerar um pára-raios instalado em subestações como anormalmente aquecidos, é adotado por Silva (2007) os seguintes critérios para cada tipo de pára-raios:

Pára-raios de ZnO: para gradiente de temperatura (ΔT) maior que 5°C entre fases de pára-raios de mesmo modelo e fabricante, recomenda-se o acompanhamento com periodicidade mensal. Se essa diferença continuar se elevando e atingir um ΔT de 6°C é recomendado que se entre em contato com o setor de manutenção para auxiliar na tomada de decisão.

Pára-raios de SiC: a análise deve ser feita de modo comparativo entre mesmos módulos de diferentes fases, para um mesmo modelo e fabricante. Para ΔT entre 7°C e 10°C, em meio a módulos correspondentes de pára-raios de outra fase, recomenda-se reduzir a periodicidade das inspeções para 30 dias. Para ΔT maiores que 10°C, entrar em contato com o setor de manutenção para definição e tomada de decisão.

Todos os relatórios emitidos têm as suas informações básicas lançadas em planilhas e as informações podem levar às ações indicadas abaixo.

- Relatórios para acompanhamento:

Indicam gradiente de temperatura elevado, anormal, embora não atingindo o ponto crítico. O termografista emite relatório para monitorar a evolução do gradiente de temperatura, gera-se um novo relatório para análises posteriores e comparação. Nenhuma ação ou intervenção é prevista neste caso.

- Relatórios para programar intervenções:

De posse das informações originadas do RT é realizado o planejamento das intervenções necessárias. Concluída a análise dos relatórios, os dados são encaminhados, se necessário, às áreas responsáveis.

Devem ser analisados criteriosamente os dispositivos que apresentarem elevado gradiente de temperatura ao longo da coluna de isoladores. Na Figura 36 é apresentado um termograma com anomalia térmica na parte superior do pára-raios. O termograma é apresentado com pseudocolorização (Anexo D) conforme a relação de cor com temperatura dada pela barra gráfica ao lado. A anomalia térmica pode ser percebida pela relativa diferença de temperatura – gradiente de temperatura – apresentada na parte superior do pára-raios.

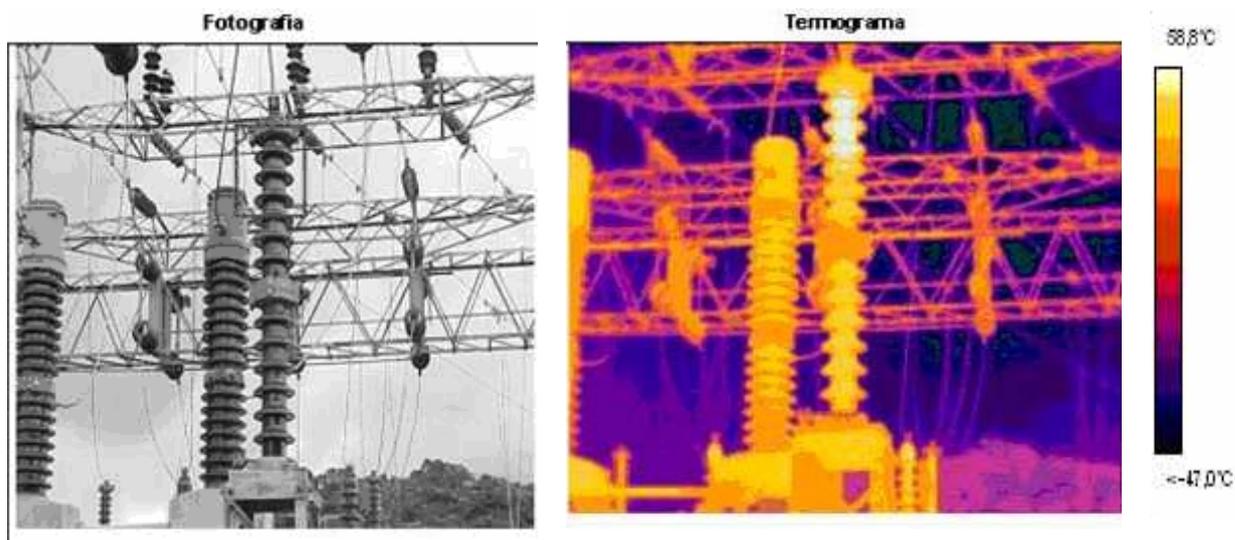


Figura 36: Pára-raios com anomalia térmica.

Os para-raios que mostrarem gradientes de temperatura maiores que os limites pré-estabelecidos indicam possibilidade de apresentarem falhas, devendo ter seu espaço delimitado para manter a segurança das pessoas na subestação.

4.4 *Descrição das inspeções realizadas*

Nesta seção são descritas as inspeções que foram realizadas para a criação do banco de dados necessário para a elaboração desta dissertação. Nestas inspeções, junto da obtenção dos termogramas dos para-raios, foram também anotadas as diversas questões que podem apresentar influência na metodologia de inspeção de para-raios: incidência da radiação solar; gradiente de temperatura acima de valores pré-estabelecidos; amplitude da quantização em nível-de-cinza ao longo da coluna de resistores; número de posições para realização da inspeção; presença de obstáculos físicos que impedem a realização em ângulos iguais; localização das áreas nos dispositivos; capacidade de repetição de resultados na inspeção; valor da emissividade.

Segundo a metodologia adotada procura-se efetuar termogramas para todos os para-raios, em três posições, no mínimo, com ângulos de 120°, podendo chegar a seis posições com ângulos de 60° entre elas (SILVA, 2007), o esquema com as posições onde foram realizadas a aquisição dos termogramas são mostrados em cada inspeção.

4.4.1 Inspeção nos pára-raios da Subestação 01

As análises foram efetuadas em pára-raios de ZnO do fabricante Hitachi de 120kV/10kA, modelo tipo ZLA-X15S, nº série 554318-4/3/2, instalado na subestação Atalaia, aqui denominada *Subestação 01*, localizada na linha Neves 01-LT2 (Derivação para Contagem 03). A corrente na linha no período da inspeção era de 181,5A na fase VM, 177,5A na fase AZ e 178,5A na fase BR. A velocidade do vento no momento da inspeção era inferior a cinco metros por segundo.

Foram efetuados termogramas para todos os pára-raios, em seis posições, com ângulo de 60° entre elas conforme é apresentado na Figura37.

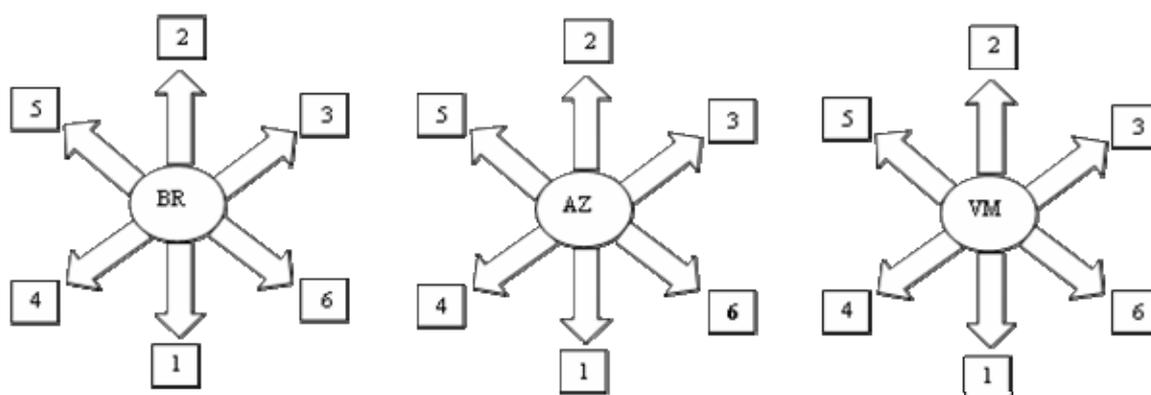


Figura 37: Configuração das posições para a inspeção realizada na subestação 01

Todos os pára-raios foram divididos em quatro áreas denominadas P01, P02, P03 e P04. Na Figura 38 são apresentados os termogramas coletados na posição 05 nos pára-raios PRVM, PRAZ e PRBR. Nesta figura, junto com a data, horário e o número do termograma, são indicados os valores dos parâmetros de ajuste informados para o termovisor, tais como emissividade, distância da câmera ao mensurando, temperatura ambiente e umidade relativa.

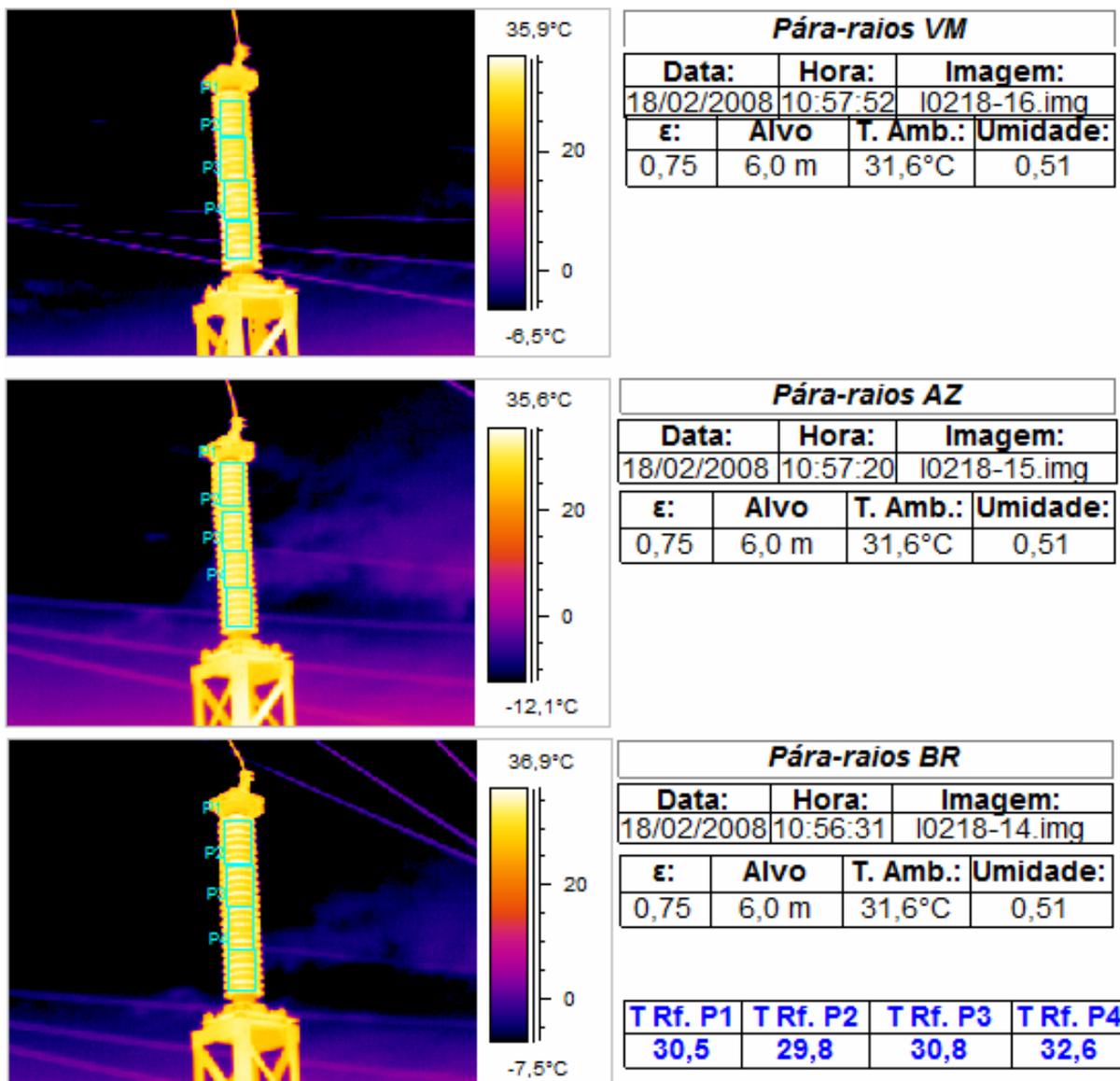


Figura 38: Análise dos termogramas na posição 05 da subestação 01.

Na Figura 38 são mostradas as temperatura de referência, TRf.P1, TRf.P2, TRf.P3 e TRf.P4, determinadas como a menor temperatura aparente⁷ obtida em cada área em todas as seis posições dos pára-raios PRVM, PRBR e PRAZ.

⁷ TEMPERATURA APARENTE - temperatura de um objeto, indicada pelo instrumento, antes que correções específicas para este sejam introduzidas.

4.4.2 Inspeção nos pára-raios da Subestação 02

As análises foram efetuadas em pára-raios de carbureto de silício com invólucro de porcelana do fabricante SPRECHER&SCHUH do Brasil S.A. de 120kV/10kA, modelo tipo BHF6E, no.Série75-1236/1/2/3, instalado na subestação maracanã, aqui denominada *Subestação 02*, localizada na linha BH - Palmares. A corrente na linha no período da inspeção era de 192,0A na fase VM, 189,0A na fase AZ e 193,0A na fase BR. A velocidade do vento no momento da inspeção era inferior a cinco metros por segundo.

Foram efetuados termogramas para todos os pára-raios, em seis posições com ângulo de 60° entre elas. É apresentada na Figura 39 a configuração das posições quando da aquisição das imagens.

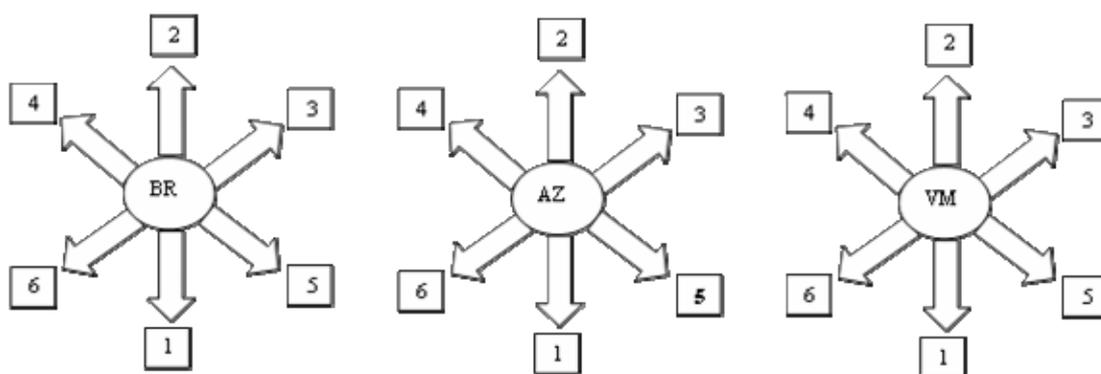


Figura 39: Configuração das posições para a inspeção realizada na subestação 02

Todos os pára-raios foram divididos em áreas denominadas P01, P02, P03 e P04. Na Figura 40 são apresentados os termogramas coletados na posição 01 nos pára-raios PRVM, PRAZ e PRBR. Nesta figura, junto com a data, horário e o número do termograma, são indicados os valores dos parâmetros de ajuste informados para o termovisor, tais como emissividade, distância da câmera ao mensurando, temperatura ambiente e umidade relativa.

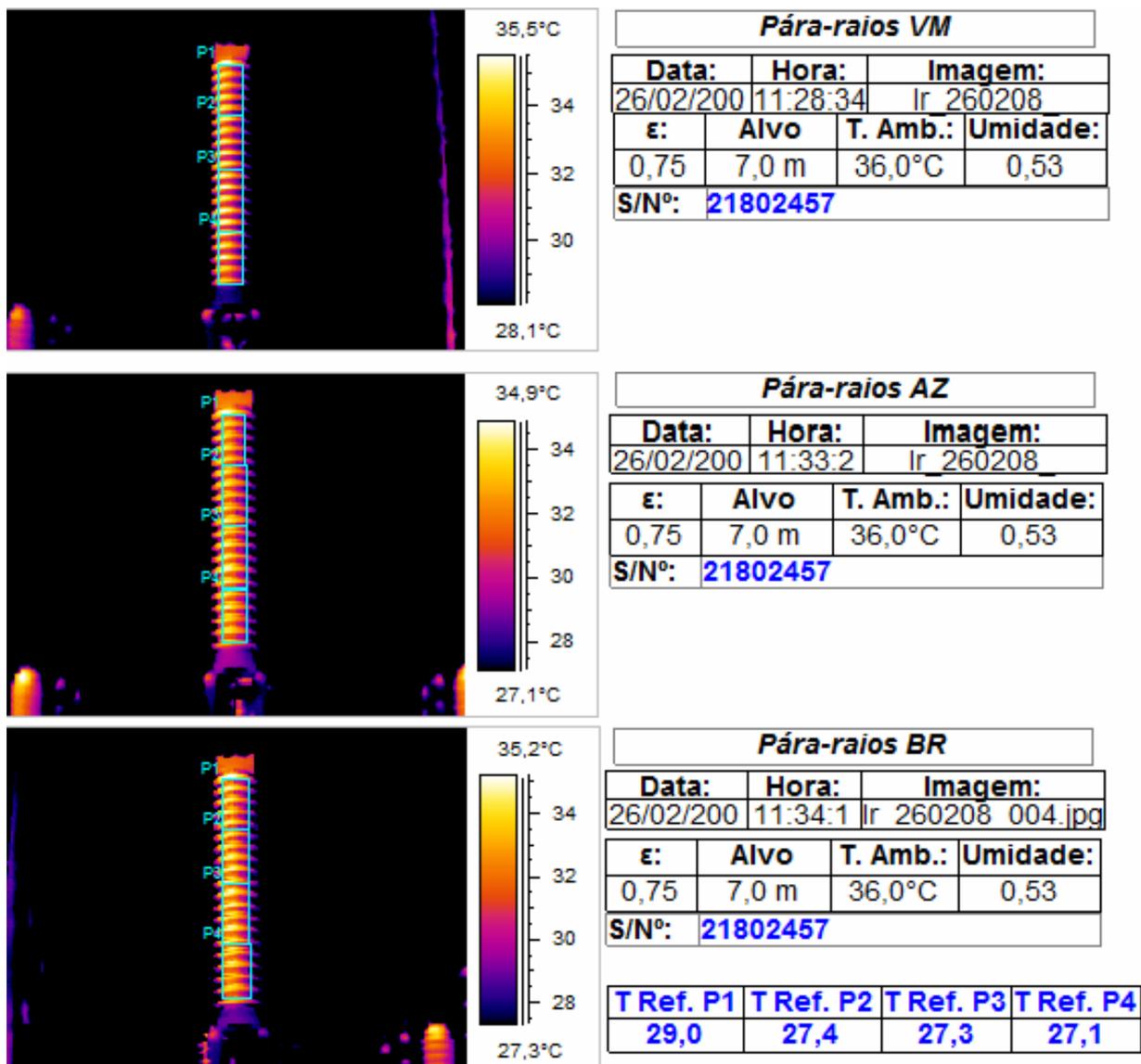


Figura 40: Análise dos termogramas na posição 01 da subestação 02.

As temperatura de referência, TRf.P1, TRf.P2, TRf.P3 e TRf.P4, indicadas na Figura 40, foram determinadas como a menor temperatura aparente obtida em cada área em todas as seis posições dos pára-raios PRVM, PRBR e PRAZ.

Cabe acrescentar que nesta inspeção, apresentou-se forte incidência solar em várias das posições de tomada de termograma.

4.4.3 Inspeção nos pára-raios da Subestação 03

As análises foram efetuadas em pára-raios de carbureto de silício do fabricante *Challeroi* de 120kV/10kA, modelo tipo ALVS, instalado na subestação Adelaide, aqui denominada *Subestação 03*, localizada na barra principal de 138kV. A velocidade do vento no momento da inspeção era inferior a cinco metros por segundo.

Foram realizados termogramas em seis posições com ângulo de 60° entre elas, para todos os pára-raios. Todos os pára-raios foram divididos em quatro áreas denominadas AR01, AR02, AR03 e AR04. São apresentados na Figura 41 os termogramas coletados na posição 01 nos pára-raios PRVM, PRAZ e PRBR.

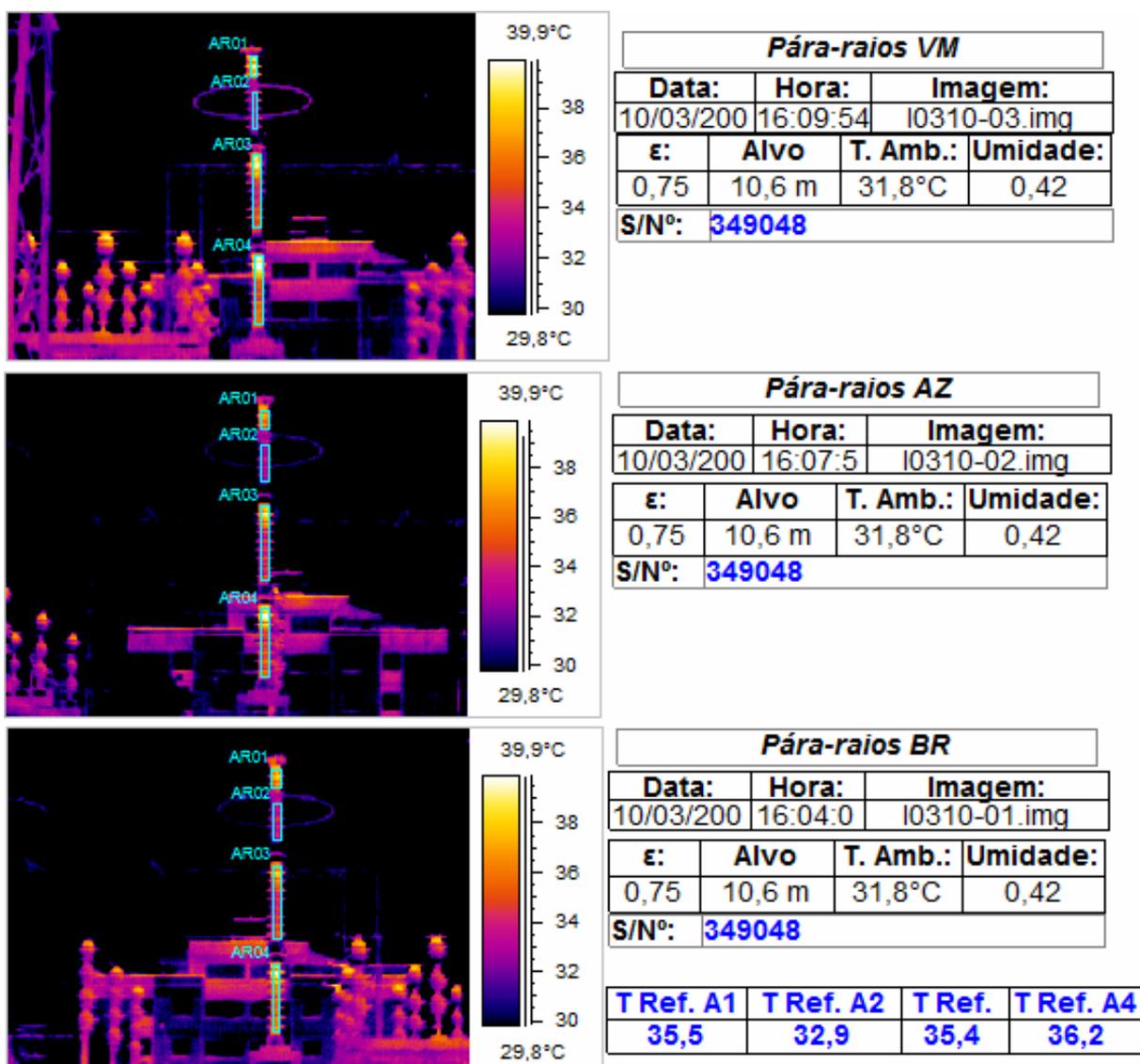


Figura 41: Análise dos termogramas na posição 01 da subestação 03.

Foram efetuados termogramas para todos os pára-raios, em seis posições procurando obter ângulos de 60° entre elas. Cada pára-raios foi dividido em áreas denominadas P01, P02, P03 e P04. Na Figura 41 são apresentados os termogramas coletados na posição 01 nos pára-raios PRVM, PRAZ e PRBR. Nesta figura, junto com a data, horário e o número do termograma, são indicados os valores dos parâmetros de ajuste informados para o termovisor, tais como emissividade, distância da câmera ao mensurando, temperatura ambiente e umidade relativa.

As temperatura de referência, TRf.P1, TRf.P2, TRf.P3 e TRf.P4, indicadas na Figura 41, foram determinadas como a menor temperatura obtida em cada área em todas as seis posições.

Cabe acrescentar que nesta inspeção não havia radiação solar no momento da inspeção, pois o tempo estava nublado, porém quente. Havia ferragem obstruindo a coleta do termograma com o ângulo de 60° no pára-raios AZ, na posição 03, a alternativa encontrada foi à mudança deste ângulo para 45° em relação à posição 01, conforme é mostrado na Figura 42.

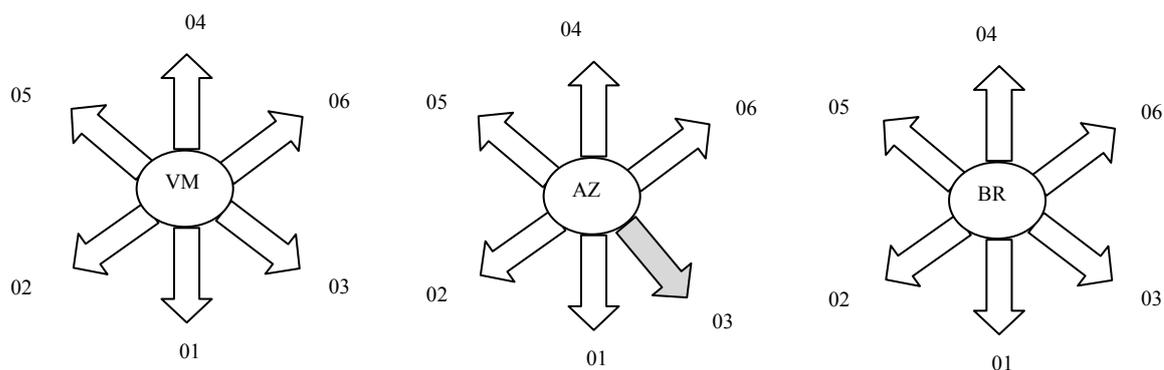


Figura 42: Configuração das posições quando da aquisição das imagens na subestação 03.

Havia muitos equipamentos causando reflexão, nestes casos é recomendável, quando possível, mudar a posição de aquisição.

4.4.4 Inspeção nos pára-raios da subestação 04

As análises foram efetuadas em um pára-raios de ZnO com invólucro polimérico do fabricante ALSTHON de 120kV/10kA, modelo tipo MHF 2E. 98, instalado na subestação da Siderúrgica ICAL, aqui denominada *Subestação 04*, na Barra no. 1-OP-138kV-S2. A velocidade do vento no momento da inspeção era inferior a cinco metros por segundo.

Para esta subestação foram realizadas duas inspeções em horários com incidência solar diferenciadas. Estas foram aqui denominadas *Inspeção 01 e Inspeção 02 da Subestação 04*

Para as duas inspeções, foram efetuados termogramas para todos os pára-raios, em seis posições com ângulo de 60° entre elas.

É apresentada na Figura 43 a configuração das posições quando da aquisição das imagens.

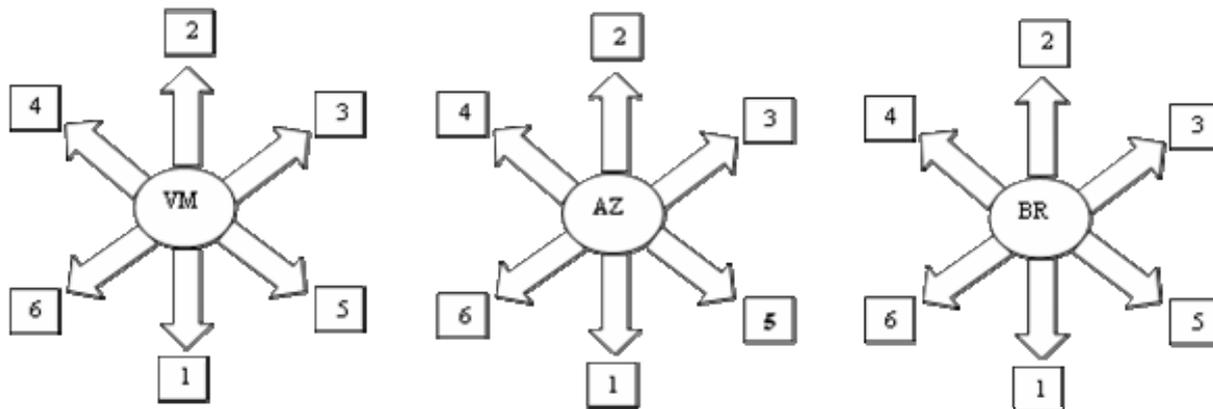


Figura 43: Configuração das posições quando da aquisição das imagens na subestação 04.

Cada pára-raios foi dividido em quatro áreas denominadas de AR01, AR02, AR03 e AR04. Na Figura 44 são apresentados os termogramas coletados na posição 05 nos pára-raios PRVM, PRAZ e PRBR na *Inspeção 01*. Nesta figura, junto com a data, horário e o número do termograma, são indicados os valores dos parâmetros de ajuste informados para o termovisor, tais como emissividade, distância da câmera ao alvo, temperatura ambiente e umidade relativa.

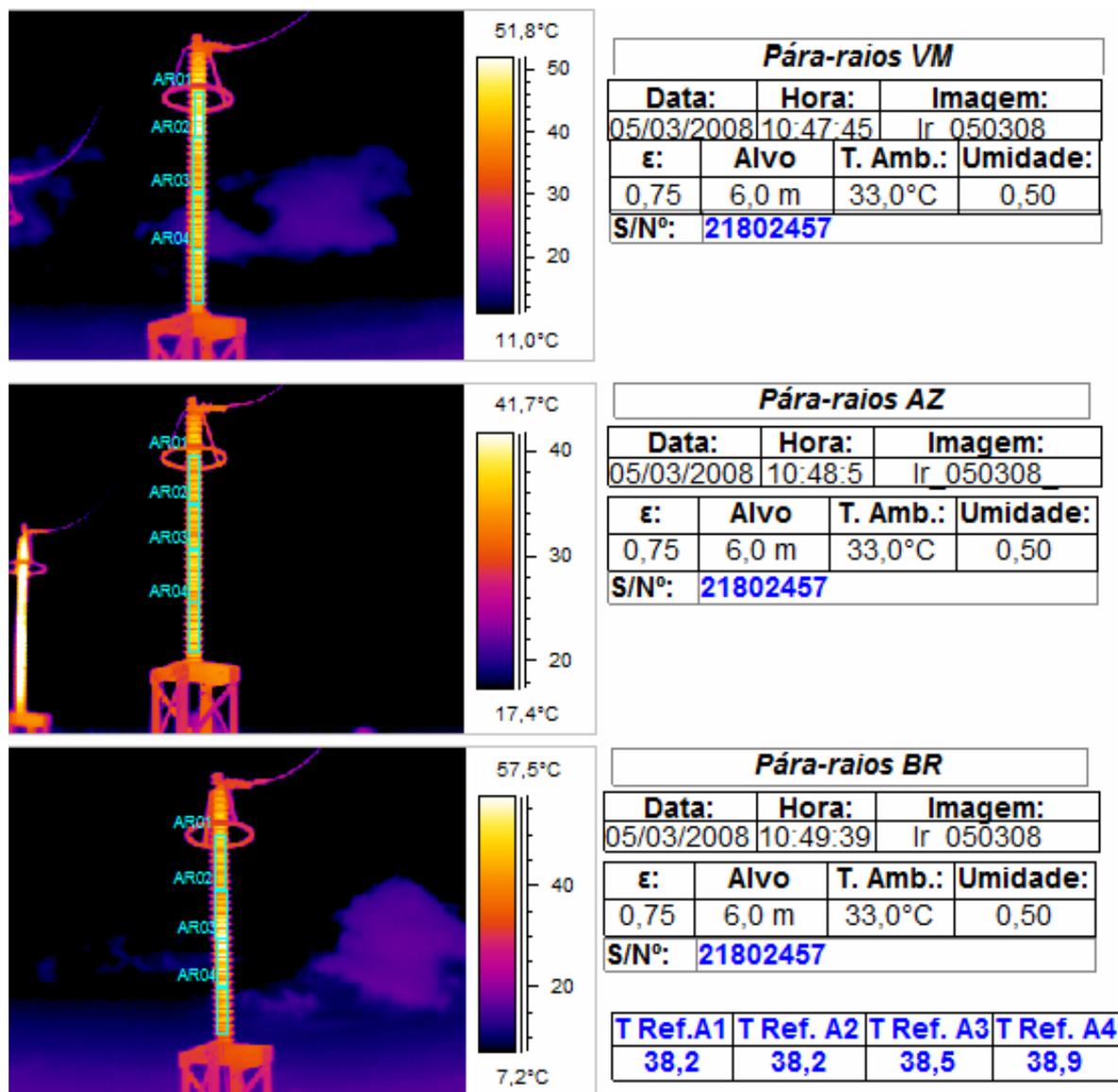


Figura 44: Análise dos termogramas na posição 05 da subestação 04.

As temperatura de referência, TRef.A1, TRef.A2, TRef.A3 e TRef.A4, indicadas na Figura 44, foram determinadas como a menor temperatura aparente obtida em cada área em todas as seis posições dos pára-raios PRVM, PRBR e PRAZ.

Cabe acrescentar que, devido à localização em área industrial da *Subestação 04*, nas duas inspeções foi observado acúmulo de resíduos de poluição depositada nos isolamentos dos pára-raios.

A Tabela 4 apresenta valores dos parâmetros inseridos no termovisor durante a segunda inspeção desta mesma subestação.

Tabela 4: Dados da Inspeção 2 da subestação 04

Parâmetros	Pára-raios fase VM/AZ e BR
Data	25/03/2008
Hora	07:28H a 07:38H
Emissividade	0,75
Distacia (m)	6
T.ambiente(° C)	25
Umidade(%)	70

5 Análise da Base de Dados

5.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a análise dos termogramas disponibilizados pelo banco de dados obtido no Capítulo 3. Esta análise foi desenvolvida empregando o ambiente do *software* aplicativo que acompanha o termovisor utilizado (FLIR, 2003). As análises se baseiam no critério da Seção 4.3, *Critérios para abertura de Relatório Termográfico*, onde foram balizados os valores para a tomada de decisão.

A análise de um termograma de pára-raios é iniciada a partir da observação do gradiente de temperatura entre a temperatura aparente e a temperatura de referência da respectiva subárea.

5.2 Análise da inspeção na Subestação 01.

Os resultados referentes à inspeção descrita no item 4.4.1, são apresentados na Tabela 5. Esta tabela mostra que houve gradiente de temperatura maior ou igual a 6,0°C no pára-raio VM em todas as subáreas da posição 05, nos pára-raios de fase AZ nas subáreas A2 e A3 na posição 02 e nas subáreas A1,A2 e A3 da posição 05. No pára-raios de fase BR houve gradiente de temperatura maior que 6,0 °C nas subáreas A1, A2 e A3 nas posições 02 e 05. Nota-se ainda que o maior gradiente de temperatura, com valor de 8,7°C foi encontrado no pára-raios da fase BR na posição 05 e área A1.

Tabela 5: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da Subestação 01 em °C.

Δt Geral												
	Pára-raios fase VM				Pára-raios fase AZ				Pára-raios fase BR			
Posição	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
1	2,4	4,4	3,5	2,6	3,0	3,1	2,4	1,0	1,9	2,0	2,0	0,7
2	5,9	5,8	5,0	3,6	5,9	6,3	6,2	5,7	6,4	6,1	6,1	4,6
3	2,2	3,1	3,3	1,8	4,1	3,0	3,3	2,6	5,5	3,8	3,9	3,1
4	2,8	3,6	4,7	4,2	3,8	4,5	3,6	2,7	4,8	5,6	4,8	3,4
5	6,5	6,8	6,8	6,5	6,7	6,5	5,8	4,4	8,7	8,6	7,8	6,5
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	2,2	2,2	1,6	2,1	2,7	3,0	2,0

Cabe aqui salientar que nas posições 02 e 05 havia incidência direta da radiação solar no dispositivo, conforme pode ser observado pela fotografia mostrada na Figura 45. O resultado da incidência da radiação solar em determinadas posições causa um aumento da energia refletida pela superfície e detectada pelo sensor. O gradiente de temperatura se eleva em relação às demais posições sem radiação, pois a temperatura aparente aumenta e a temperatura de referência permanece a mesma. Quando a radiação solar atingir todas as posições, a temperatura de referência será maior, não influenciando significativamente nos gradientes de temperatura.

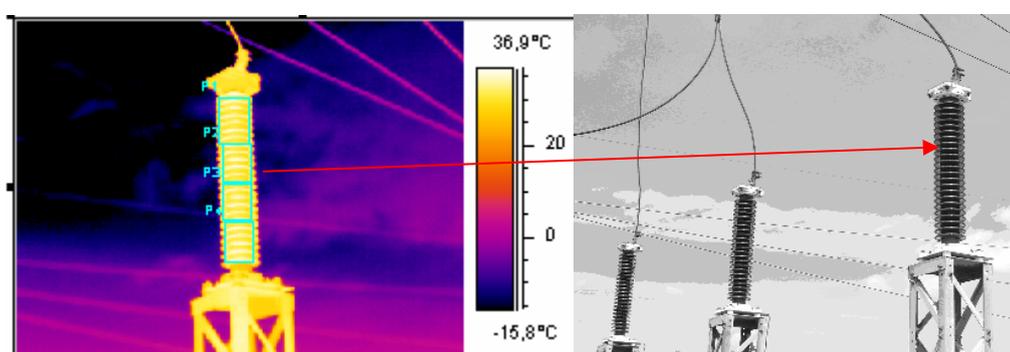


Figura 45: Análise da interferência da radiação solar para as posições 02 e 05.

Apesar de não ser apresentado neste trabalho o resultado da inspeção da subestação 01, efetuada sem influência da radiação solar, é recomendável que o termografista analise criteriosamente as condições ambientais no momento da aquisição das imagens e posteriormente o termograma e se necessário repita a inspeção em outro horário, sem interferência da radiação solar antes da tomada de decisão.

5.3 Análise da inspeção na Subestação 02.

Os resultados referentes à inspeção descrita no item 4.4.2, são apresentados na Tabela 6. Esta tabela mostra que houve gradiente de temperatura maior que 5°C em praticamente todas as posições com exceção das posições 02 e 03. O maior gradiente de temperatura, no valor de 8,4°C, foi encontrado no pára-raios da fase VM na posição 01 nas subáreas A3 e A4.

Tabela 6: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da subestação 02 (com $\epsilon=0,75$) em °C.

Δt Geral												
	Pára-raios fase VM				Pára-raios fase AZ				Pára-raios fase BR			
Posição	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
1	6,7	8,2	8,4	8,4	5,8	7,2	7,6	7,4	6,3	7,6	7,8	7,8
2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	2,4	2,7	2,7	1,3	2,3	2,3	2,4
3	2,7	3,8	3,6	4,8	2,5	3,5	3,3	3,2	1,7	3,2	3,3	3,7
4	6,3	7,4	7,5	7,0	6,3	7,4	7,4	7,4	6,9	7,8	8,1	6,7
5	3,4	4,4	4,7	4,8	4,2	5,1	5,2	5,3	4,5	6,4	6,4	6,3
6	4,3	5,2	5,5	5,7	4,6	5,7	6,0	6,0	4,4	5,6	6,0	6,4

É importante salientar que no horário da inspeção de 11h28min até 11h58min, havia incidência direta do sol no corpo do pára-raios nas posições de maior ΔT , causando um aumento da energia irradiada ao detector. Nestas posições o detector capta a energia irradiada pelo equipamento e a energia refletida causada pela radiação solar incidindo no dispositivo. A fotografia da Figura 46 mostra a influência da reflexão na posição 04 para o PRAZ.

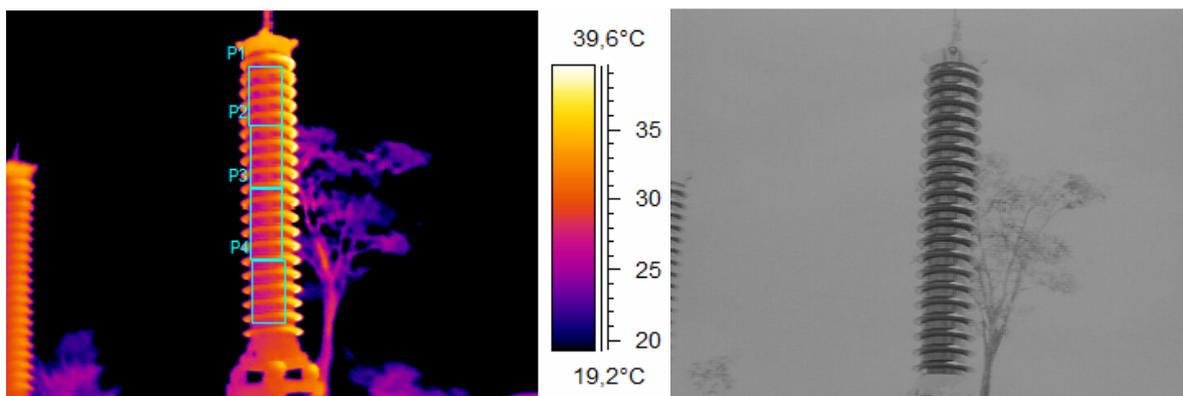


Figura 46: Influência da reflexão solar na posição 04 para o PRAZ

Cumpré aqui acrescentar uma análise com relação à influência do valor tomado para emissividade. Após testes efetuados em laboratório, no âmbito desta dissertação, para determinar o valor da emissividade do pára-raios com invólucro de porcelana, através do método do termopar (como descrito no Capítulo 2, Seção 2.2) foi constatado o valor $\epsilon = 0,92$. Assim a Tabela 6 foi construída para mostrar os valores de ΔT recalculados para esta emissividade. Esta tabela mostra que a alteração na emissividade provocou um decréscimo no ΔT de até 1,9°C. Os processos de análise da Tabela 6 e da Tabela 7 levam à conclusão de que com a utilização do valor emissividade menor que o real leva a maiores valores de ΔT . Assim, o resultado da análise pode sugerir medidas de manutenção que talvez não fossem necessárias, entretanto leva a ação mais conservativa e cautelosa. Fica então evidenciando a importância do uso do valor correto da emissividade do objeto.

Tabela 7: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da subestação 02 com $\epsilon=0,92$ em °C.

Δt Geral												
	Pára-raios fase VM				Pára-raios fase AZ				Pára-raios fase BR			
Posição	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
1	5,9	6,6	6,7	6,9	5,1	5,9	6,1	6,0	5,5	6,2	6,3	6,3
2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,9	0,8	0,2	0,5	0,5	0,6
3	2,6	3,1	2,9	3,9	2,5	2,9	2,6	2,6	1,9	2,6	2,6	3,0
4	5,5	6,1	6,0	5,6	5,5	6,0	6,0	6,0	6,0	6,4	6,5	5,4
5	3,2	3,6	3,9	3,9	3,8	4,1	4,2	4,3	4,1	5,2	5,1	5,1
6	3,9	4,2	4,4	4,6	4,2	4,7	4,8	4,9	4,0	4,6	4,9	5,1

É recomendável uma criteriosa análise do termograma conforme recomendações anteriores e se ainda persistir a dúvida que se faça a inspeção em outro horário sem radiação solar, antes da tomada de decisão.

Pelo gradiente de temperatura encontrado e após a mudança no valor da emissividade conclui-se que os pára-raios analisados encontram-se em seu estado normal de operação.

5.4 Análise da inspeção na Subestação 03.

Os resultados referentes à inspeção descrita no tópico 4.4.3, são apresentados na Tabela 8. Esta tabela mostra que o maior gradiente de temperatura foi encontrado no pára-raios da fase VM na posição 01 na subárea A4, com o valor de 5,3°C.

Tabela 8: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da subestação 03 em °C.

Δt Geral												
Pára-raios fase VM					Pára-raios fase AZ				Pára-raios fase BR			
Posição	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
1	4,7	2,2	4,5	5,3	2,4	1,5	4,3	4,2	2,9	1,8	3,3	4,4
2	2,7	1,6	3,5	3,1	2,7	1,2	3,0	2,8	1,9	1,1	3,0	2,7
3	4,0	1,7	3,9	4,9	0,7	1,0	4,1	3,3	2,6	1,3	2,2	2,4
4	2,5	0,5	1,6	1,2	1,7	0,2	2,3	0,6	3,2	0,9	0,7	0,4
5	0,0	0,0	0,9	0,3	2,7	0,8	1,0	0,0	1,3	0,1	0,0	0,7
6	4,2	1,7	3,7	4,3	1,8	1,3	4,1	2,8	3,5	1,3	1,4	1,5

Verificou-se que existe nesta subárea um valor mais elevado de ΔT indicando um possível indício de anomalia, contudo abaixo dos valores mencionados no item 6.3 - *Critérios para abertura de Relatório Termográfico*. Este fato pode ser apurado visualmente na Figura 47, onde a subárea em análise é comparada com a mesma subárea dos outros pára-raios, na mesma escala. Nela podemos verificar o aumento da energia irradiada do PRVM na AR04 na parte superior em relação às demais unidades.

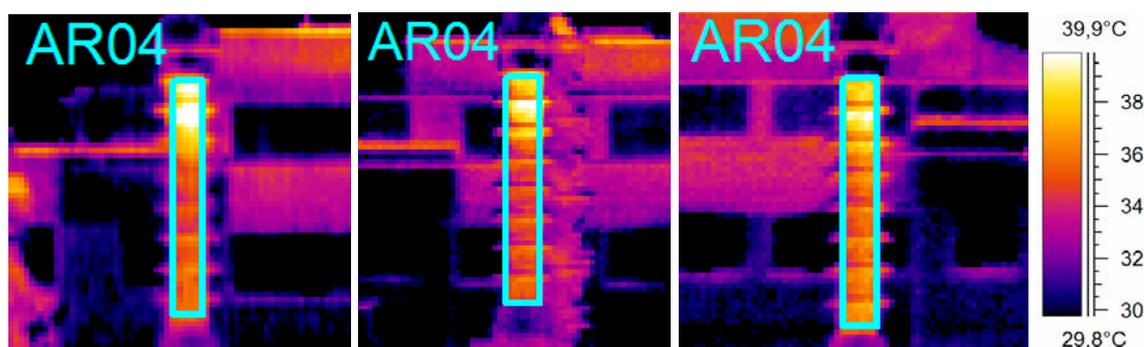


Figura 47: Comparação entre a subárea AR04 da posição 01 para os três pára-raios.

Cumprе acrescentar uma análise com relação a importância do número de posições para a tomada dos termogramas. Neste sentido foi também elaborada uma análise considerando os termogramas para todos os pára-raios, em três posições com ângulo de 120° entre elas (uma vez que os dados de aquisição de termogramas em seis posições possibilitam também a

análise em ângulos de 120°). Foram tomados dois grupos com três posições: as posições 01, 06, 05 e as posições 04, 03 e 02. Esta análise pode ser obtida pela mesma Tabela 8.

Tomando as posições 01, 06 e 05 o maior gradiente de temperatura foi encontrado também com o valor de 5,3 °C, na posição 01 na subárea 04. Tomando agora as posições 04, 03 e 02 o maior gradiente de temperatura é de 4,9°C, na subárea 04 e posição 03. Apesar do Δt para este caso estar abaixo dos valores definidos no item 6.3, a situação poderia apresentar uma anomalia térmica em determinado grupo de três posições e em outro não.

Cabe ainda acrescentar uma análise onde a distribuição equitativa dos ângulos 60° de tomada dos termogramas em seis posições é alterada. Neste caso, para a aquisição do termograma da posição 03 do pára-raios de fase AZ, esta foi alterada, formando ângulo de 45° com relação à posição 01, como uma situação de presença de obstáculo físico. Considerando esta alteração na distribuição equitativa dos ângulos, a análise para o grupo com três posições 04, 03 e 02 ficou ainda mais afetada, pois, o ângulo entre as posições que deveria ser de 120° passou a ser de 135° entre as posições 04 e 03.

É também importante acrescentar mais uma análise sobre o cuidado na localização precisa das áreas definidas para os pára-raios. Quando estas áreas não estão devidamente inseridas no termograma ao longo do corpo do pára-raios, o gradiente de temperatura pode ser alterado, levando a resultados inconsistentes. Essa situação pode ser observada na Figura 44. Para o termograma (A) da Figura 48, foi tomada a área devidamente inserida no corpo do pára-raios fornecendo uma temperatura aparente de 41,1 °C. Para o termograma (B) da mesma figura, foi tomada uma área maior que inclui, além do pára-raios em foco, uma parte de outro equipamento fornecendo assim uma temperatura aparente muito maior, no valor de 48,2 °C. Portanto, o termografista deve evitar inspeções quando houver outro objeto emitindo radiação atrás ou próximo do pára-raios em análise.

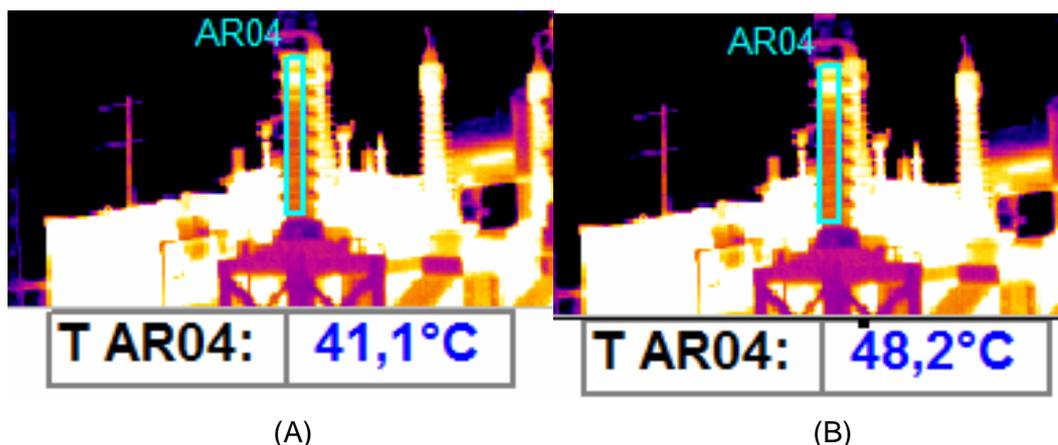


Figura 48: Área correta, (A) – Posicionamento incorreto das áreas, (B) – Área maior.

5.5 Análise da inspeção na Subestação 04.

Os resultados referentes à *Inspeção 01* e à *Inspeção 02*, descritas no tópico 4.4.4, são apresentados na Tabela 9 e Tabela 10, respectivamente.

Tabela 9: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da inspeção 1 em °C.

Δt Geral Inspecao 1												
Posição	Pára-raios fase VM				Pára-raios fase AZ				Pára-raios fase BR			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
1	10,0	7,5	5,9	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	10,1	14,9	15,5	10,5
2	16,9	15,9	11,4	12,7	2,2	2,1	2,1	1,8	14,1	18,7	21,8	16,8
3	17,0	14,7	11,5	12,9	1,9	2,0	2,0	2,0	14,0	19,0	22,0	16,3
4	15,5	13,0	11,4	12,5	1,3	1,5	1,5	2,0	12,0	16,8	20,2	15,2
5	14,8	13,9	9,4	9,3	0,5	0,8	1,0	0,7	13,1	20,8	21,1	14,4
6	11,5	10,4	7,7	7,3	0,6	1,3	1,2	1,0	10,8	12,6	15,5	11,6

Tabela 10: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições de análise da inspeção 2 em °C.

Δt Geral Inspecao 2												
Posição	Pára-raios fase VM				Pára-raios fase AZ				Pára-raios fase BR			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
1	19,6	18,2	14,2	13,5	1,7	1,2	1,7	1,7	18,7	20,3	23,8	18,3
2	16,9	16,5	10,0	11,5	3,0	2,8	2,6	2,8	17,5	23,8	24,4	19,6
3	16,7	15,0	12,0	13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	13,1	20,0	23,1	17,2
4	15,5	13,6	10,0	11,3	2,1	2,2	2,0	3,0	15,4	23,8	24,2	19,2
5	21,5	17,3	14,1	14,7	0,7	0,3	0,8	0,9	15,4	23,3	24,6	17,9
6	20,0	18,8	17,0	15,4	2,3	2,0	1,5	2,0	16,0	23,1	25,9	19,0

A Tabela 9, referente à *Inspeção 01*, mostra que houve gradientes de temperatura consideráveis nos pára-raios VM e BR, bem acima dos níveis preestabelecidos, denotando anomalia térmica para estes pára-raios. O maior gradiente de temperatura foi encontrado no pára-raios da fase BR na posição 03 na subárea A3 atingindo o valor de 22,0°C.

Os resultados apresentados na Tabela 10, referente à *Inspeção 02*, realizada em horário diferente, confirmam a anomalia térmica nos pára-raios VM e BR, mantendo a localização do maior gradiente de temperatura na subárea 3 do PRBR.

Desta análise fica evidenciada uma anormalidade no pára-raios de ZnO. As causas que geram um aumento da temperatura ao longo dos resistores de óxido de zinco de pára-raios foram detalhadas no item 2.4.2. Destaca-se que a subestação está inserida em uma área industrial, onde a poluição é um fator agravante, contendo altas concentrações de partículas em suspensão além de outros gases. Conforme item 2.4.2, a poluição juntamente com a umidade podem causar uma elevação da corrente de fuga pelo invólucro, provocando uma distribuição de tensão não uniforme ao longo dos pára-raios, com conseqüente aquecimento excessivo e envelhecimento de alguns (ou todos) os blocos de ZnO.

Embora as duas inspeções realizadas converjam para a mesma conclusão, cumpre comentar as diferenças nos gradientes de temperaturas mostrados nas Tabelas 9 e 10. Uma possível causa seria a presença acentuada de resíduos sólidos e outros gases na atmosfera e a variabilidade de suas concentrações no decorrer do dia, que gerariam aumento das incertezas relacionadas à transmissão atmosférica.

Testes foram realizados em laboratório, através do método do termopar para averiguar o valor da emissividade do pára-raios com invólucro polimérico, constatou-se a emissividade do polímero com o valor de 0,94. Constatou-se que com a utilização do valor de emissividade de 0,75 leva a maiores valores de ΔT . Assim, o resultado da análise pode sugerir medidas de manutenção que talvez não fossem necessárias, entretanto leva a ação mais conservativa e cautelosa.

Para verificar o efeito da utilização do valor $\varepsilon = 0,94$ nos resultados, foram construídas as Tabelas 11 e 12, com este valor de emissividade para a *inspeção 1* e *inspeção n^o2*.

Tabela 11: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições da *inspeção 1* para $\varepsilon=0,94$ em °C.

Δt Geral Inspecao 1												
Posição	Pára-raios fase VM				Pára-raios fase AZ				Pára-raios fase BR			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
1	8,1	6,0	4,8	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	8,1	12,1	12,6	8,5
2	13,8	12,9	9,3	10,2	1,7	1,7	1,7	1,3	11,4	15,2	17,8	13,6
3	13,8	11,9	9,4	10,4	1,5	1,6	1,6	1,6	11,4	15,5	18,0	13,2
4	12,6	10,5	9,3	10,1	1,0	1,1	1,2	1,5	9,7	13,7	16,5	12,3
5	12,0	11,3	7,6	7,4	0,4	0,6	0,8	0,5	10,6	17,0	17,2	11,7
6	9,3	8,4	6,2	5,8	0,5	1,0	1,0	0,8	8,7	10,2	12,6	9,3

Tabela 12: Gradiente de temperatura encontrado para os pára-raios em todas as subáreas e posições da *inspeção 2* para $\varepsilon=0,94$ em °C.

Δt Geral Inspecao 2												
Posição	Pára-raios fase VM				Pára-raios fase AZ				Pára-raios fase BR			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
1	16,2	15,0	11,7	11,1	1,4	1,0	1,4	1,4	15,4	16,8	19,7	15,1
2	14,0	13,6	8,2	9,4	2,3	2,4	2,1	2,3	14,4	21,2	21,3	17,1
3	13,8	12,3	9,8	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0	10,8	16,6	19,1	14,1
4	12,8	11,2	8,2	9,3	1,7	1,8	1,6	2,5	12,7	19,7	20,0	15,8
5	17,8	14,3	11,6	12,1	0,6	0,3	0,6	0,8	12,7	19,3	20,4	14,8
6	16,5	15,5	14,0	12,7	1,9	1,6	1,2	1,6	13,2	19,1	21,5	15,7

Observando as Tabelas 11 e 12 alteração na emissividade provocou um decréscimo nos gradiente de temperatura de até 4,4°C em ambas as inspeções. Mesmos assim, pode-se constatar por estas tabelas que os pára-raios PRVM e PRBR também apresentam valores de gradientes de temperatura bem acima dos valores estipulados no item 4.3 - *Crítérios para abertura de Relatório Termográfico*.

Cabe aqui acrescentar uma análise com relação à influência da distancia na aquisição dos termogramas. Foram tomados dois termogramas que são apresentados na Figura 45. Os termogramas (A) e (B) foram tomados a distância do alvo de 6m e 2m, respectivamente.

Observando as tabelas da Figura 49 percebe-se, provavelmente, uma melhor precisão no termograma (B), tomada a menor distância, com a temperatura máxima avaliada em 61,6°C, enquanto que no termograma (A) a temperatura máxima foi de 60,7°C. Contudo há pouca influência no resultado final. O analista de termografia pode recorrer a esta alternativa quando a subárea em análise exigir maior precisão. Entretanto, o alvo no termograma (B) passou a ser

somente uma parte do dispositivo que apresentou maior temperatura aparente. Contudo o ideal no caso da análise do pára-raios como um todo é que o termograma contenha o dispositivo por completo.

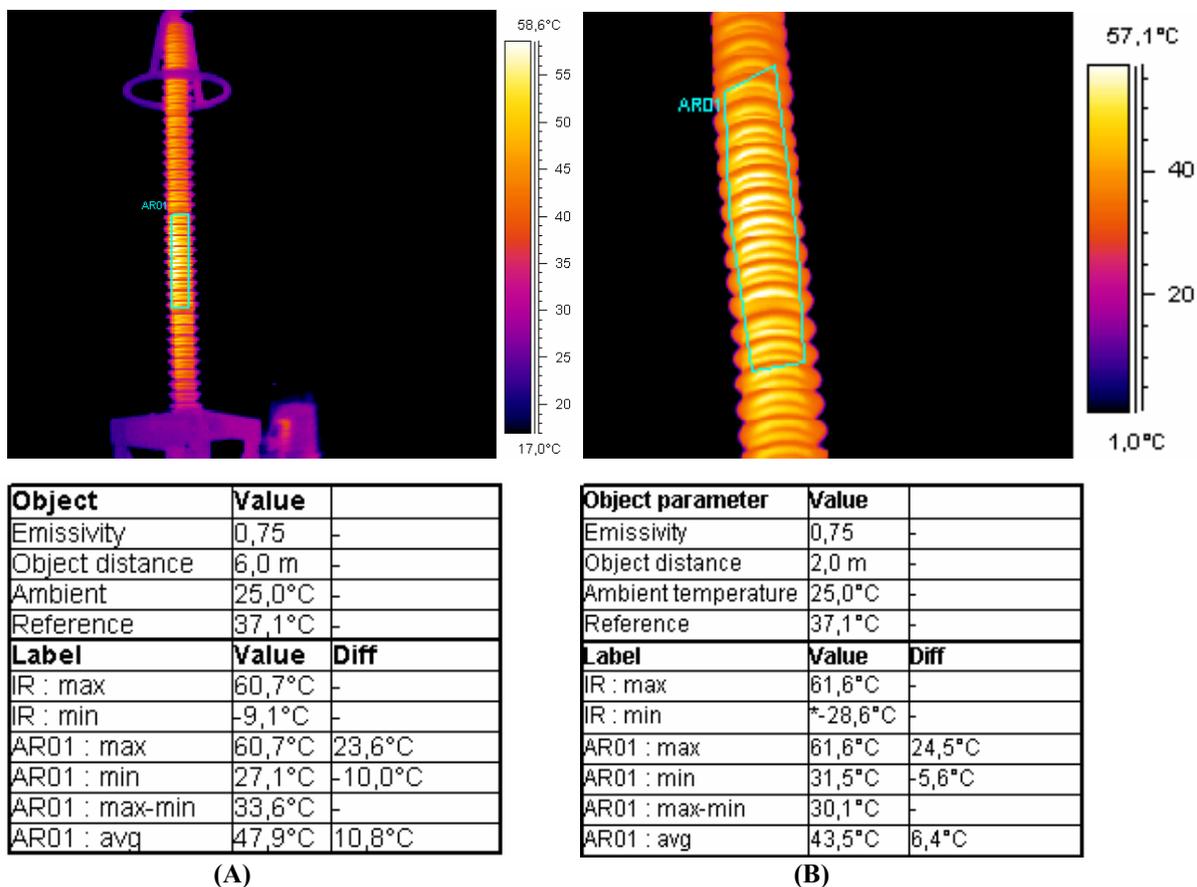


Figura 49: (A) Pára-raios a 6m do termovisor, (B) Pára-raio a 2m do termovisor.

6 Conclusões e Propostas de Continuidade

O objetivo do presente trabalho é o estudo de uma metodologia de inspeção em pára-raios de subestações usando uma técnica de aquisição de termogramas em ângulos diferentes através do uso da inspeção termográfica para identificar a iminência de falhas em pára-raios.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais desta dissertação obtidas após a obtenção dos resultados termográficos em pára-raios de subestações através de inspeções realizadas em campo e análises subseqüentes. São ainda apresentadas sugestões de propostas para a continuação do trabalho.

6.1 *Conclusões*

A aquisição de termogramas em seis posições, igualmente espaçadas em ângulos de 60° mostrou-se melhor. Foi verificado que tomando apenas uma ou três posições uma anomalia térmica pode não ser observada. Entretanto, a partir das inspeções realizadas em campo, notou-se que, às vezes, devido a obstáculos físicos, fica impossibilitada a aquisição de imagens em posições igualmente espaçadas.

Foi avaliada a influência da radiação solar nos resultados obtidos pela análise de imagens da inspeção termográfica. Como efeito desta influência, obteve-se o aumento da temperatura aparente nas posições em que há energia refletida, causada pelos raios solares. Se a radiação incidir no corpo do pára-raios de modo heterogêneo, o resultado do gradiente de temperatura pode ser duvidoso, uma vez que a temperatura de referência é tomada como a menor temperatura medida em todas as posições.

Foi verificada a influência da inserção precisa das subáreas de análise termográfica nos pára-raios. Quando as subáreas não forem devidamente inseridas ao longo do corpo de resistores, elas podem alterar o gradiente de temperatura levando a resultados inconsistentes.

Foi analisado o efeito da troca do valor da emissividade adotado pela metodologia e o valor da emissividade obtido, no âmbito desta dissertação, em testes de laboratório com material polimérico e material de porcelana. Foram observadas alterações mais significativas nos casos de invólucro polimérico e menos expressivas nos casos de invólucro de porcelana. Entretanto, os resultados obtidos com o valor adotado pela metodologia levam a conclusões mais conservativas em termos de segurança.

Verificou-se também que, em ambientes com poluição atmosférica de resíduos sólidos e outros gases, os efeitos de atenuação e reemissão da radiação conduzem a incertezas relacionadas à transmissão atmosférica.

Avaliou-se a influência da distância do termovisor ao dispositivo. Observou-se pequena importância no resultado final. Contudo, quando se deseja uma maior precisão na medição de determinada subárea do pára-raios deve-se procurar uma tomada da termografia a menor distância do objeto.

Cabe ressaltar que a termografia fornece uma avaliação indireta do estado e do desempenho de pára-raios em serviço. Entretanto, a avaliação mais precisa e conclusiva depende de características intrínsecas do pára-raios, necessitando ponderar, entre outras informações, as grandezas elétricas do sistema, os resultados de ensaios de campo, os dados técnicos do fabricante e os resultados de ensaios de laboratório.

A termografia é uma técnica já consagrada em diversos serviços de manutenção, tendo grande praticidade de uso e a vantagem de não exigir o desligamento dos equipamentos sob inspeção. Contudo a termografia em pára-raios exige maiores cuidados de leitura, uma vez que pequenas diferenças de temperatura podem indicar início de defeitos nos pára-raios. Sugere-se que os critérios adotados neste trabalho deverão ser objetos de reavaliação permanente em função da grande variedade de fabricantes e projetos de pára-raios.

6.2 *Propostas para Trabalhos Futuros*

Esta dissertação se insere num contexto de pesquisas mais amplas e profundas acerca de técnicas envolvendo infravermelho. O que se buscou foi investigar a aplicação de uma metodologia de inspeção em pára-raios baseada em técnicas de Termografia. De posse dos resultados desta investigação, surge como uma proposta de continuidade do trabalho, a busca de melhorias que visem à mensuração da temperatura correta para se intervir no pára-raios de acordo com cada fabricante e com as características intrínsecas do equipamento. De posse da temperatura de alarme outra proposta seria o desenvolvimento de um protótipo de instrumento integrado para monitoramento contínuo do envelhecimento de pára-raios e sistema de diagnóstico automático de falhas nos dispositivos.

Nesta dissertação não se esgotou as possíveis variações do sistema estudado. Como o valor de temperatura obtido pelo termovisor pode sofrer influência das características da superfície do alvo (emissividade), das variações no trajeto da transmissão (absorção, radiações espúrias e efeito do tamanho do objeto) e efeitos no termovisor devido a variações na temperatura ambiente, linearização e emissividade instrumental. Sugere-se um estudo relacionado às incertezas de medição relacionadas à radiância medida e a emissividade.

Também, sugere-se uma investigação procurando estabelecer relação entre a análise de termogramas com a evolução da corrente de fuga em pára-raios defeituosos e o desenvolvimento de modelos matemáticos que relacione a temperatura com o tipo de falha - Problema determinístico.

Referências Bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ONS, Organismo de Normalização Setorial de Ensaio Não Destrutivos, Comissão de Estudo de Termografia, Projeto 58:000.11-001, 4p., Rio de Janeiro, 2006.

ALVARES, R. C. et al.; On surge arrester fault prediction via thermograph analysis, GROUND'2008 & 3rd LPE, Florianópolis, 6p. , 2008.

ARAÚJO, D. C.; P. MARTINS, A. J. A. L.; SILVA, N. S.; A experiência da CEMIG em Monitoramento e Diagnóstico de Pára-Raios em Subestações de 69kV e 138kV, Anais do SBSE 2006 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, 6p. , 2006.

ARECO, E. R., Comparação de algoritmos de suavização espacial utilizando o ambiente KHOROS, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995.

VERATTI, A. B., Veratti, A. J., PUGNO, F. P., Termográfica [CD-ROM]. São Paulo: ICON Tecnologia e Serviços S/C Ltda, INTERATIVA Multimídia e Serviços de Informática Ltda; 1997.

BALLARD, D. H. & Brown, C. M., Computer Vision, Prentice-Hall, 1982.

BARGIGIA, A. et al. Most recent development in surge arrester testing, Proceedings of the 56th International Conference of Doble Clients, Boston, EUA, 1989.

BATISTA, G, T. & Dias, N, W., Introdução ao Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, vol. 1, p. 54, 2005.

CARVALHO, H. G., Utilização do Software ThermaCAM Reporter 2000 Pro, Instrução de Manutenção POP-OM-RD- 02063, CEMIG, 2005.

CEMIG, Execução e controle de inspeções termográficas, Instrução de Manutenção IM-OM-SE-00500, 2007.

CEPEL - ELETROBRAS, Curso sobre Pára-raios de distribuição, Estação e Linhas de Transmissão, 53p., 1977.

COELHO, E. M. P., Abordagem neuro-nebulosa para o diagnóstico de câncer de colo uterino, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

EFWING, M., Nanoscale Characterization of Barriers to Electron Conduction in ZnO Varistor Materials, Acta Universitatis Upsaliensis. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology, 73p. , 2002.

EISBERG, R. M., Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas, Editora Campus, Rio de Janeiro, 1994.

- FINEP, Produção de filmes finos de óxido de vanádio por pulverização catódica, Instituto Militar de Engenharia, Projeto de pesquisa e desenvolvimento das ciências físicas e naturais, 2006.
- FLIR SYSTEMS, ThermaCam P20 – Operators manual, 2003.
- FRANCO, J. L., Estudo das propriedades elétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, 1993.
- FRANCO, J. L. Curso sobre Pára-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão, Franco Engenharia, São Paulo, 174p., 2001.
- GOMES, R. M., Filtro de Kalman Paralelo: Aplicação em Processamento de Imagem, Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.
- GOMES, R. M., RESENDE, P. & MELO, J. C. D., Filtro de Kalman Paralelo: Aplicação Em Processamento de Imagem, Anais do X Congresso Brasileiro de Automática, pp. 1132-1137, Rio de Janeiro, 1994.
- GU, X. et al. Determination of thermal parameters of microbolometers using a single electrical measurement. American Institute of Physics, Singapore, v.72. n.15, 3p., April 1998.
- GONZALEZ, R. C. & WINTZ, P., Digital Image Processing, Addison Wesley, 1992.
- LUPO, J. & BALERAK, R., The physical basis of thermal imaging, Proc. 22nd Annual Conf. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2000.
- IEC - International Eletrotechnical Commission, Guia de Aplicação de Pára-raios de Resistor não Linear em Sistemas de Potência 60099-5:1996, 57p., 2001.
- JAIN, A. K., Fundamentals of Digital Image Processing, Prentice Hall, 1989.
- JONES, B. F. & PLASSMANN, P., Digital infrared thermal Imaging of Human Skin, IEEE Engineering in Medicine and Biology, pp. 41-48, 2002.
- JUNQUEIRA, A. et al., Avaliação do desempenho de pára-raios convencionais (SiC) em sistemas de transmissão: técnicas preditivas atuais e novas propostas para a identificação de unidades defeituosas em serviço, Anais do XII SNTPEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 6p., 1993.
- LAT, M. V., Application guide for surge arresters on distribution systems, Canadian Elec. Association, 1988.
- LEWIS, J. M., WENTWORTH, S. M. & NEIKIRK, D. P., Low grown temperature GaAs microbolometers, Proc. 15th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, pp. 398-400, 1990.
- MACEDO, E. C. T.; Costa, E. G.; Lira, J. G. A.; Freire, R. C. S., Diagnóstico de Pára-Raios de Óxido de Zinco Utilizando Microcontrolador, Anais do SBSE 2006 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, 6p. , 2006.
-

- MEISTER, A., Modelagem de varistores de Óxido de Zinco para estudos de coordenação de isolamento, Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência, Universidade de Brasília, 2005.
- MENTA, G. BLITZKOW, G.B. Varistores de Óxido de Zinco – Microestrutura, Propriedades e Aplicações [S.L], 5p. , [2003?].
- MIOTTO, R & MIOTTO, R. - Evolução do Conceito de Medição de Temperatura sem Contato. [S.L],[2007?].19p.Disponível em:<www.pirometro.com.br>Acesso em 15 mar.2008.
- OMEGA ENGINEERING. Transactions in measurement and control, 83 p, v. 01, ed.02. Disponível em: www.omega.com/literature/litdownload.html#horizons. Acesso em: 07 de fev.2008.
- ROGALSKI, A., Infrared detectors: an overview, Infrared Physics & Technology, pp 187-210, 2002.
- ROSENFELD, A. & Kak, A. C., Digital Picture Processing, Academic Press, 1982.
- SCHEI, A.; FRANCO, J. L.; Experiência no Monitoramento de Pára-raios de Óxido Metálico em Serviço, Anais do VIII ERLAC Encuentro Regional Latinoamericano de la CIGRÉ, Ciudad del Este, Paraguai, 6p., 1999.
- SHIRAKAWA, S. et al., Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector, IEEE Transactions on Power Delivery, n. 3, pp.998-1003, 1988.
- SILVA, N. S. Instrução de manutenção de pára-raios SiC e ZnO, Instrução de Manutenção IM-OM-SE-00346, CEMIG, 2007.
- SOBRINHO, P. F. P, *et al.* Avaliação do estado e do comportamento de pára-raios de media e alta tensão dos tipos de carboneto de Silício (SiC) e de oxido metálico de zinco (ZnO), Seminário interno de manutenção de subestações da CTEEP e EPTE. p.1-14, 2000.
- SOUMITRA, K, GHOSH K. & GALESKI,P. J., Criteria For Selection of Infrared Camera System, IEEE proceedings, 1994.
-

Anexo A - Definições de Termos Técnicos

A seguir, são descritas algumas das principais definições relativas ao assunto, de interesse para compreensão do trabalho.

Calor: sempre que existir um gradiente de temperaturas no interior de um sistema haverá transferência dessa energia no sentido das temperaturas mais altas para as mais baixas. Essa energia em trânsito é chamada Calor, e o processo de transporte é denominado Transmissão de Calor.

Campo de Visão Instantâneo (IFOV - *Instantaneous Field of View*): expresso em miliradianos, é dado pelo ângulo sólido determinado pela projeção do detector na cena em um dado instante. A área delimitada por essa projeção é chamada célula de resolução ou pixel, a qual estabelece a capacidade do sistema em discernir entre dois pontos a uma dada distância (Resolução Geométrica ou Óptica).

Campo de Visão Total (FOV - *Field of View*): dado em graus, é definido como a porção angular sensoreada pelo sistema, função não só da parte óptica como também do mecanismo de varredura.

Comprimento de Onda: distância entre duas cristas sucessivas da onda.

Condução: é a transferência de energia entre partes adjacentes de um sólido em consequência da existência de um gradiente de temperatura no mesmo. Na condução o calor se transfere a camadas sucessivas do material através da difusão da energia cinética média das moléculas. Essa energia é maior nas regiões mais quentes e é menor nas mais frias. A condutibilidade térmica (k) é o parâmetro que determina a maior ou menor capacidade de um material em conduzir calor.

Consultor de Termografia: é o profissional que desenvolve metodologias e programas de inspeção, bem como a análise das causas das alterações térmicas encontradas. O Consultor de Termografia deve conhecer em profundidade os fundamentos e as aplicações da Termografia, além dos aspectos técnicos dos equipamentos inspecionados.

Convecção: é um processo de transmissão de calor por condução e movimentação de massa, característico dos fluidos. O calor é transferido de uma região para outra devido a variações de densidade decorrentes da presença de gradientes de temperatura. A convecção pode ser natural ou forçada, neste último caso, quando estimulada pela ação do vento, de um ventilador ou de uma bomba.

Corpo Negro: objeto ideal que apresenta emissividade igual a 1. Absorve toda a energia eletromagnética que incide sobre ele, enquanto possui transparência e refletividade nulas. Em contrapartida emite o máximo de radiação pela fórmula de Stefan-Boltzmann (emissor perfeito).

Detectores (ou Sensores): dispositivos destinados a reconhecer a presença ou intensidade de um fenômeno físico, transformando esse dado em informação passível de ser processada.

Distância Focal (f): distância entre o centro da lente ou espelho e seu ponto focal.

Emissividade: relação entre a energia irradiada por um corpo real e a que seria irradiada por um corpo ideal com máxima capacidade de emissão (emissividade igual a 1).

Espectro Eletromagnético: família de ondas eletromagnéticas, que vai dos raios gama às ondas de rádio.

Fóton: unidade discreta de energia eletromagnética.

Graus Celsius (ou Centígrados): escala de temperaturas baseada no ponto de fusão da água pura (zero grau) e no ponto de ebulição da mesma (100 graus), em pressão de 1 atmosfera.

Infravermelho: porção do espectro eletromagnético que se estende do limite inferior do visível ($0,75 \mu\text{m}$) até o comprimento de onda de 1 mm.

Inspeção qualitativa: Modalidade de inspeção na qual o termografista analisa padrões térmicos diferenciais (anomalias).

Inspeção quantitativa: Modalidade de inspeção na qual o termografista determina valores específicos de temperatura.

Inspeção Termográfica: técnica de inspeção não destrutiva realizada com a utilização de sistemas infravermelhos, para a medição de temperaturas ou observação de padrões diferenciais de distribuição de calor, com o objetivo de propiciar informações relativas à condição operacional de um componente, equipamento ou processo.

Janelas Atmosféricas: bandas do espectro eletromagnético nas quais a atmosfera terrestre apresenta maior transparência.

Luz: é a parte do espectro eletromagnético à qual nossa retina é sensível, compreendida entre 0,4 μm a 0,75 μm).

Manutenção: é o conjunto de atividades técnicas e administrativas destinadas a manter ou restituir a um equipamento seu estado operacional.

Medição de Contato: é a técnica de medição de temperaturas na qual se busca a obtenção de um perfeito equilíbrio térmico entre o sensor e o meio medido. Tal equilíbrio é alcançado principalmente pelos mecanismos da condução e convecção.

Medições Termográficas: têm como princípio a comparação entre as intensidades de radiação provenientes do corpo observado e de uma referência de temperatura.

Radiação espectral: Quantidade de energia emitida por um objeto por unidade de tempo, área e comprimento de onda ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$).

Radiações Eletromagnéticas: são produzidas pela oscilação de um campo elétrico perpendicularmente a um campo magnético e deslocam-se à velocidade de 297.792.458 m/s no vácuo. Todos os corpos emitem naturalmente radiação eletromagnética em função da temperatura absoluta de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann e desta forma podem trocar calor sem qualquer contato físico, mesmo no vácuo. A maior ou menor capacidade do corpo em emitir radiação eletromagnética é dada pela sua emissividade (ϵ), parâmetro que pode variar entre 0 e 1.

Radiometria: técnica de sensoriamento remoto, na qual as medições são realizadas por sensores que não estão em contato físico com os objetos sob estudo. A medição radiométrica de temperaturas baseia-se na detecção da radiação eletromagnética naturalmente emitida pelos corpos em função de sua temperatura absoluta. A Radiometria pode ser realizada nas faixas

espectrais do ultravioleta, visível, infravermelho ou microondas e abrange grande número de técnicas, dentre as quais a Termografia.

Radiômetro: sistema infravermelho, normalmente portátil, que mede temperaturas em um campo de visão fixo. O deslocamento desse campo de visão é feito pela movimentação de todo o aparelho.

Refletividade (r): Porção da energia incidente sobre uma superfície, que é refletida por esta, em um dado comprimento de onda. Para um espelho perfeito, a refletividade é 1.0, e para um corpo negro, a refletividade é 0.

Resolução Geométrica, Espacial ou Óptica: Capacidade do sistema em discernir entre dois pontos a uma dada distância. Está relacionada com a área delimitada pela projeção do(s) elemento(s) detector (es), na cena. É expressa em miliradianos ou na razão D/d (distância de observação dividida pelo tamanho do alvo).

Resolução de medição: Corresponde ao menor tamanho de alvo no qual o equipamento infravermelho pode produzir uma medição confiável de temperatura. É expressa em miliradianos ou na razão D/d (distância de observação dividida pelo tamanho do alvo).

Refletividade (r): Porção da energia incidente sobre uma superfície, que é refletida por esta, em um dado comprimento de onda. Para um espelho perfeito, a refletividade é 1.0, e para um corpo negro, a refletividade é nula.

Sensibilidade Térmica: Menor diferença de temperatura que pode ser detectada pelo instrumento. Depende das propriedades do sistema óptico, da resposta do detector e do nível de ruído eletrônico interno do equipamento infravermelho.

Sistema infravermelho: Conjunto composto pelo termovisor, acessórios e aplicativos de análise termográfica dos registros efetuados.

Técnicas de inspeção (ou de monitoramento): são extensões de nossos sentidos que visam tornar conhecido o estado operacional de um componente e revelar um mecanismo de desgaste, mesmo em seus estágios iniciais.

Termografia: técnica na qual as medições de temperatura são realizadas na faixa do infravermelho.

Termografista: Profissional habilitado a realizar inspeções termográficas através da operação de um sistema infravermelho, registro de imagens e documentação de todas as informações térmicas pertinentes, relativas ao equipamento inspecionado.

Termograma: imagem obtida a partir da radiação térmica emitida naturalmente pelos corpos em função de sua temperatura.

Termometria: é o ramo da ciência que trata da medição de temperaturas. A termometria divide-se em duas áreas, de acordo com o princípio de medição empregado: Medição de Contato e Radiometria.

Termopar: dispositivo que mede a temperatura através da determinação da força eletromotriz que se estabelece pela junção de dois metais diferentes com uma união mantida na temperatura que se deseja medir e a outra em uma temperatura de referência.

Termovisores: sistemas infravermelhos imageadores, dotados de recursos para a análise e medição de distribuições térmicas na forma de imagens, chamadas termogramas.

Temperatura: é definida como a medida da energia cinética média dos átomos, moléculas ou íons de uma substância, dada em graus Centígrados, Kelvin ou Fahrenheit.

Temperatura aparente: Temperatura de um objeto, indicada pelo instrumento, antes que correções específicas para este sejam introduzidas.

Temperatura ambiente: (a) temperatura ao redor do objeto medido, ou (b) temperatura refletida pelo objeto.

Temperatura atmosférica: Temperatura dos gases (geralmente o ar) entre o instrumento e o objeto.

Transmissividade (τ): Porção da energia incidente sobre um corpo, que é transmitida por este, em um dado comprimento de onda. Para um corpo opaco, a transmissividade é igual a 0. Materiais transparentes possuem valores de transmissividade entre 0 e 1.

Valor térmico: é um parâmetro interno do equipamento que corresponde à resposta do detector, obtida a partir da calibração do mesmo em laboratório.

Visores Térmicos: sistemas infravermelhos que produzem imagens térmicas, termogramas, porém sem capacidade de medição de temperaturas. São utilizados, sobretudo, na área militar.

Anexo B - Referências Comerciais de Arranjos de Detectores do Tipo Matriz de Plano Focal (FPA)

Este anexo apresenta uma tabela com detalhes das características dos principais arranjos comerciais de detectores do tipo matriz de plano focal.

Tabela A (Extraída de ROGALSKI, 2002)

Representative IR FPAs offered by some major manufacturers

Manufacturer/web site	Size/architecture	Pixel size (μm)	Detector material	Spectral range (μm)	Operating temperature (K)	D^* (λ_0) ($\text{cm Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$) / NETD (mK)
Raytheon/ www.raytheon.com	256 × 256/H	30 × 30	InSb	1–5.5	10–77	
	1024 × 1024/H	27 × 27	InSb	0.6–5.0	35	
	320 × 240/H	50 × 50	Si:As BIB	2–28	4–10	
	128 × 128/H	40 × 40	HgCdTe	9–11	80	
	256 × 256/H	30 × 30	HgCdTe	8.5–11	77–100	
	320 × 240/M	48 × 48	VO _x (bolometer)	8–14	300	50
Rockwell/Boeing/ www.boeing.com www.rsc.rockwell.com	328 × 245/H	35 × 35	Pyro (BST)	8–14	300	>50
	256 × 256/H	40 × 40	HgCdTe	>15	77	
	640 × 480/H	27 × 27	HgCdTe	>10	77	
	225 × 256/H	40 × 40	HgCdTe	1–4.6	120	>10
	640 × 480/H	27 × 27	HgCdTe	1–4.6	120	>25
	2048 × 2048/H	18 × 18	HgCdTe	1–2.5	95–120	> 1 × 10 ¹⁴
Mitsubishi/www.mitsubishi-imaging.com	320 × 240/M	48 × 48	VO _x (bolometer)	8–14	300	50
	256 × 256/M	52 × 40	PtSi	3–5	77	0.036
	512 × 512/M	26 × 20	PtSi	3–5	77	0.033
BAE Systems	1024 × 1024/M	17 × 17	PtSi	3–5	77	0.10
	256 × 256/H	30 × 30	HgCdTe	1–10	80	
	432 × 432/H		HgCdTe	1–5	80	
Sofradir/ Infrared.sofradir.com	640 × 480/M	28 × 28	VO _x (bolometer)	8–14	≈300	60
	128 × 128/H	50 × 50	HgCdTe	7.7–10	80	1.1 × 10 ¹¹ /10
	128 × 128/H	50 × 50	HgCdTe	3.7–4.8	90	4.3 × 10 ¹¹ /7
	128 × 128/H	50 × 50	HgCdTe	2.5–4.2	195	7.5 × 10 ¹¹ /36
	320 × 240/H	30 × 30	HgCdTe	3.7–4.8	120	1.0 × 10 ¹² /8
	320 × 240/M	45 × 45	Amorphous Si (bolometer)	8–14	–20 to 60 °C	80
Sarnoff/ www.sarnoff.com	320 × 244/M	23 × 32	PtSi	1–5	77	
	640 × 480/M	24 × 24	PtSi	1–5	77	
Eastman-Kodak/ www.kodak.com	486 × 640/M	25 × 25	PtSi	1–5	77	
	128 × 128/H	50 × 50	HgCdTe	8–12	77	
	384 × 288/H	30 × 30	HgCdTe	3–5	80	15
Marconi/www.gec-marconi.com/infra-red/	256 × 128/H	56 × 56	Pyro (PST)	8–14	≈300	90
	384 × 288/H	40 × 40	Pyro (PST)	8–14	≈300	130
	256 × 256/M	24 × 24	PtSi	3–5	77	75
AEG/www.aeg.com/e_produkte.htm	486 × 640/M	24 × 24	PtSi	3–5	77	70
	256 × 256/H	40 × 40	HgCdTe	8–10	80	20
	640 × 512/H	24 × 24	HgCdTe	3–5	80	20
	256 × 256/H	40 × 40	QWIP	8–10	60	10
	640 × 512/H	24 × 24	QWIP	8–10	60	20
	128 × 128/H	50 × 50	QWP	15 (λ_c)	45	30
JPL/www.jpl.nasa.gov	256 × 256/H	38 × 38	QWIP	9 (λ_c)	70	40
	640 × 486/H	18 × 18	QWIP	9 (λ_c)	70	36
	128 × 128/H	60 × 60	InGaAs	0.9–1.7	300	>10 ¹³
Sensors Unlimited/ www.sensorsinc.com	320 × 240/H	40 × 40	InGaAs	0.9–1.7	300	>10 ¹²

H—hybrid, M—monolithic.

Anexo C - Referências Comerciais em Sistemas de Infravermelho

Este anexo apresenta os principais *sites* comerciais de sistemas de infravermelho disponíveis na rede mundial de computadores, na data de publicação desta dissertação.

American Infrared (EUA) - <http://www.americaninfrared.com/>
Ann Arbor Sensor Systems (EUA) - <http://www.aas2.com/>
Avio, Nippon Avionics Co. (Japão) - <http://www.avio.co.jp/>
Cantronic Systems Inc (Canadá) - <http://www.cantronics.com/>
CEDIP Infrared Systems (França) - <http://www.cedip-infrared.com/>
CMC Electronics Cincinnati (USA) - <http://www.cmccinci.com/>
Electrophysics Corp. (EUA) - <http://www.electrophysics.com/>
FLIR Infrared Camera Systems (EUA) - <http://www.flirthermography.com/>
Guangzhou S AT Infrared Technology Co. (China) - <http://www.sat.com.cn/>
InfraTec (Alemanha) - <http://www.infratec.de/>
IRISYS Ltd (Reino Unido) - <http://www.irisys.co.uk/>
Ircon, Inc. (EUA) - <http://www.ircon.com/>
Mikron Infrared Inc (EUA) - <http://www.mikroninfrared.com/>
NEC San-ei Instruments, Ltd. (Japão) - <http://www.necsan-ei.co.jp/>
Opgal Optronics Industries Ltd (Israel) - <http://www.opgal.com/>
Raytek, Inc. (EUA) - <http://www.raytek.com/>
Thermoteknix (Reino Unido) - <http://www.thermoteknix.com/>
WuHan Guide Electronic Industrial Co. (China) - <http://www.guide-infrared.com/>
Xenics (Bélgica) - <http://www.xenics.com/>

Anexo D - Técnicas de Processamento de Imagens

Neste anexo são descritas as principais técnicas de processamento de imagens, que no contexto desta dissertação, parecem mais relevantes.

Processamento digital de imagem e classificação estatística de padrões constituem-se nas mais importantes técnicas da ciência denominada visão computacional, que procura incumbir-se da automação e integração de uma vasta área de processos e representações usada para percepção visual (BALLARD & BROEN, 1982). Com o objetivo de alcançar melhorias adicionais nas imagens digitalizadas disponibilizadas pelas câmeras de infravermelho, no sentido de acentuar certas características da imagem para uma análise posterior ou para aprimoramento da visualização são importantes as ferramentas da área de processamento de imagens. Em processamento de imagens, os principais algoritmos são divididos em duas categorias: métodos no domínio espacial, que são efetivados com manipulações diretas dos *pixels* da imagem; e métodos no domínio da frequência, que são baseados em modificações da transformada de Fourier da imagem.

Os métodos no domínio espacial são procedimentos que operam diretamente nos *pixels*, considerando sua posição no arranjo em duas dimensões que forma a imagem. O termo domínio espacial se refere a um agregado de *pixels* que compõem a imagem. As funções de processamento nesta categoria partem da definição de um grupo de vizinhos em torno de certo *pixel*, formando uma sub-imagem. Assim o centro desta sub-imagem é deslocado de *pixel* em *pixel* percorrendo toda a imagem e aí aplicando uma operação apropriada. Pode-se escolher este percurso como sendo a partir da parte superior esquerda da imagem, deslocando-se para a direita e, em seqüência, em direção à parte inferior. A vizinhança que define a sub-imagem poderia degenerar-se como o próprio *pixel*, – dita, neste caso, vizinhança 1×1 . Poder-se-ia adotar, como outro exemplo, o caso com 8 vizinhos, – vizinhança 3×3 , quadrada com o *pixel* considerado no centro. Outras configurações de arranjo de vizinhança maiores também poderiam ser adotadas. Um exemplo de utilização da vizinha 1×1 : o processamento poderia ser a formação de uma imagem de maior contraste que a original, escurecendo os níveis-de-cinza abaixo de certo limiar e clareando os níveis-de-cinza acima deste limiar. Ainda exemplificando, no caso de 8 vizinhos, uma mascara é definida com oito ponderações

destinadas a cada um destes vizinhos e também uma ponderação para o próprio *pixel* correspondente ao centro da máscara. Assim, a adição do resultado das nove multiplicações definiria o novo nível-de-cinza do *pixel* central processado. Dependendo de como é escolhido tamanho da vizinhança e as respectivas ponderações, são alcançados diferentes efeitos no processamento da imagem. Cabe ainda mencionar que, em aplicações especiais, é possível determinar dinamicamente as ponderações associadas a máscara [Gomes, Resende & Melo, 1994; Gomes, 1994]

Os métodos no domínio da frequência, segundo o enfoque da transformada de Fourier, podem também produzir efeitos correspondentes à operação de deslocamento de máscara descrita acima. O fato é que a operação descrita no domínio espacial constitui uma convolução da sub-imagem com o operador invariante dado pela máscara [Jain, 1989.]. Do ponto de vista de domínio de Fourier a convolução discreta no domínio espacial equivale ao produto das partes correspondentes no domínio frequência. Uma convolução discreta com arranjos grandes é realizada de forma mais eficiente no domínio da frequência usando a transformada rápida de Fourier, FFT [Gonzalez & Wintz, 1992].

Tanto no domínio espacial como no domínio da frequência, as técnicas de processamento de imagens digitalizadas dividem-se, principalmente, nos seguintes campos: realce, restauração, segmentação e descrição.

O realce procura acentuar certas características da imagem para uma análise posterior ou para visualização. As técnicas de restauração pretendem reverter à degradação sofrida por uma imagem. Este processo é efetuado através de operação reversa, considerando a modelagem reversa dos fenômenos que causariam tal degradação. Segmentação é o processo de rotulação de objetos, ou regiões, de uma imagem para que possam ser identificados e tratados separadamente [Coelho, 1997]. O campo de descrição engloba técnicas utilizadas para descrever os objetos, por meio de representações adaptadas para diferentes tipos de análises [Rosenfeld & Kak, 1982].

Neste anexo, enfocaram-se as técnicas de realce de imagem, pois se sugerem de maior utilidade uma vez que estas técnicas de realce procuram destacar informações presentes na imagem, inspiradas em características do sistema visual humano. Entre estas técnicas incluem-se

modificação de histograma, suavização, realce de bordas e pseudocolorização, que são descritas seguir.

Modificação de histogramas

O histograma de níveis-de-cinza representa uma descrição global da aparência da imagem. Por exemplo, em uma imagem onde a maior área da figura do histograma corresponde a uma faixa de menores valores de nível-de-cinza, – esquerda do gráfico do histograma, – indica que a imagem é predominantemente escura, – já que a maioria do *pixels* tem valores pequenos.

O tipo ou o grau de melhoria que pode ser alcançado com a modificação do histograma depende da natureza do histograma especificado. A modificação de histograma é baseada em uma transformação, como um mapeamento ou função de transformação, onde cada valor do nível-de-cinza da imagem original modifica-se na imagem resultado. A condição é que esta função deve ser monotonicamente crescente, de modo a manter a ordem de preto para branco na escala de cinza. Outra condição é que os novos valores de nível-de-cinza se mantenham entre o nível zero e nível máximo original.

Para melhor abordar o processo de transformação de histograma, poder-se-ia considerar os níveis-de-cinza de uma imagem como uma variável aleatória. Assim, no histograma, os níveis-de-cinza da imagem poderiam ser associados a uma função densidade de probabilidades, após uma normalização (pois a função densidade de probabilidade deve ter área unitária). Daí, a função cumulativa de probabilidades seria obtida através da integração da função densidade de probabilidades, – sendo obviamente uma função monotonicamente crescente, com o menor valor zero até o valor máximo de 1. Assim, descreve-se abaixo, as principais técnicas de modificação de histograma segundo esta interpretação.

Equalização de histograma: neste processamento é adotada função cumulativa de probabilidades como a função de transformação de níveis-de-cinza a ser aplicada na imagem original. Assim, este processo, é tal que tende a provocar na imagem resultado uma distribuição de probabilidades uniforme, ou seja, o histograma estaria equalizado, uma distribuição equitativa de níveis-de-cinza.

Melhoria local de histograma: O método discutido anteriormente é global, baseado nos níveis-de-cinza da imagem completa. Aqui, pretende-se melhorar detalhes e pequenas áreas da imagem. Neste caso o que se faz é uma adaptação da técnica para o melhoramento local. O procedimento torna-se então em definir um arranjo retangular de vizinhança e mover o centro desta área de *pixel* em *pixel*. Em cada posição é calculado o histograma correspondente da região do arranjo e executado a equalização do histograma, a função é usada para definir o novo nível-de-cinza do *pixel* central da região. O procedimento é então repetido para o *pixel* adjacente e assim sucessivamente.

Cabe notar que os processos de modificação de histograma são mais úteis em visualização da imagem do que no aprimoramento de características da imagem para uma análise posterior. Obviamente, no caso de processamento de histograma de imagem térmica, é sempre necessário transformar o mapeamento de temperatura de acordo com a função de transformação de nível-de-cinza.

Suavização de imagem

Suavização busca uma homogeneidade dos *pixels* presentes nas regiões da imagem, alterando aqueles *pixels* com nível-de-cinza pouco semelhantes aos da vizinhança, e que podem representar pontos ruidosos. As técnicas de suavização podem ser efetuadas tanto no domínio espacial como no domínio da frequência (Areco, 1995).

No domínio espacial, as técnicas atuam diretamente nos *pixels*, através de ações realizadas dentro do limite de uma máscara, que se desloca sobre toda a imagem. O nível de cinza do *pixel* central da janela de imagem definida pela máscara é substituído por um valor que é função dos níveis-de-cinza da vizinhança, dentro da janela, de acordo como método empregado. Os métodos amplamente utilizados são descritos abaixo:

Media da vizinhança: As ponderações em uma máscara são escolhidas equitativamente. Por exemplo, em uma máscara 3×3 cada fator de ponderação será $1/9$.

Filtro mediana: Neste caso em vez de usar ponderação, o nível de cinza do *pixel* central é substituído pela mediana dos níveis-de-cinza da vizinhança. Por exemplo, no caso 3×3 , os 9

níveis-de-cinza da vizinhança são ordenados e daí é tomado valor do meio para novo valor do *pixel* central. Comparado com o método da media da vizinhança, o filtro mediano evita borrar borda ou detalhes finos.

Média de imagens múltiplas: Neste método, são registradas varias imagens, devidamente alinhadas, de um mesmo objeto fixo. É considerado que para cada imagem, os *pixels* podem estar contaminados com ruído aleatório não correlacionado de valor médio nulo e desvio padrão conhecido. Então, pode ser mostrado por estatística básica, através do teorema do limite central, que a imagem resultado pela média das múltiplas imagens, *pixel* por *pixel*, apresenta ruído cuja variância torna-se dividida pelo número de imagens. Portanto, a imagem resultado passa a apresentar maior atenuação de ruídos para maior número de imagens usadas.

No domínio da frequência, suavização é obtida por meio de filtros tipo passa-baixa. Bordas ou transições bruscas (como ruídos) nos níveis-de-cinza, contribuem com os componentes de alta frequência da transformada de Fourier da imagem. Assim pode-se suavizar a imagem atenuando componentes de certa faixa de alta frequência. Dentre os filtros passa-baixa, duas abordagens são adotadas: projetos são desenvolvidos através de características do passa-baixa ideal; projetos elaborados segundo filtros especificados por formas de resposta em frequência pré-estabelecidas, como filtro tipo Butterworth passa-baixa.

Realce de bordas em imagens

Realce de bordas busca dar maior destaque aos contornos de partes de uma imagem. Em imagens obtidas por luz visível, as bordas são detectadas devido a descontinuidades em coeficientes de reflexão entre objetos e o fundo. No caso de imagens térmicas as bordas ocorrem devido a descontinuidades em temperatura e emissividade entre objeto e fundo.

As técnicas de realce de bordas podem ser efetuadas tanto no domínio espacial como no domínio da frequência [Gonzalez & Wintz, 1992].

No domínio espacial as técnicas de realce de bordas atuam diretamente nos *pixels*, por meio de uma máscara usualmente 3×3. Neste processamento o novo valor do nível-de-cinza do *pixel* central da janela de imagem definida pela máscara é substituído pelo resultado de uma

operação associada à diferenciação. A explicação é dada a seguir. Como mostrado anteriormente, a tomada de média leva à suavização da imagem; já que a média é análoga a integração, é natural esperar que a diferenciação apresente um efeito oposto, – acentue diferenças na imagem. O método mais comum para diferenciação em processamento de imagem é o gradiente. O valor do gradiente é proporcional à diferença de nível-de-cinza entre *pixels* adjacentes. Assim o gradiente assume valores relativamente altos em bordas acentuadas de uma imagem e valores pequenos em regiões com maior suavidade, sendo zero apenas em regiões onde o nível-de-cinza é constante. A maneira mais simples de obter a imagem com realce de bordas consiste em atribuir ao novo valor do *pixel* o gradiente calculado para o referido *pixel* a partir da imagem original.

No domínio da frequência, as técnicas de realce de bordas são obtidas por meio de filtros tipo passa-alta. A explicação é dada a seguir. Como antes mencionado, o uso de filtro passa-baixa suaviza a imagem, atenuando de componentes de alta frequência. Como as bordas ou transições abruptas nos níveis-de-cinza estão associadas a componentes de alta frequência, o realce de bordas pode ser alcançado, no domínio da frequência, pelo processo de filtragem passa-alta, que atenua os componentes de baixa frequência sem perturbar as informações de alta frequência da transformada de Fourier. Dentre os filtros passa-alta duas abordagens são adotadas: projetos são desenvolvidos através de características do passa-alta ideal; projetos elaborados segundo filtros especificados por formas de resposta em frequência pré-estabelecidas, como filtro tipo Butterworth passa-alta.

Pseudocolorização de imagem

Os níveis-de-cinza, para efeito de visualização da imagem, representariam a imagem tipicamente composta por tons de cinza: variando entre o preto, para o nível zero (como a menor intensidade); e o branco, para o nível superior (como a maior intensidade).

A pseudocolorização da imagem é resultada a partir de uma imagem de níveis-de-cinza pelo mapeamento de cada valor de *pixel* para uma cor, de acordo com uma tabela ou função.

A motivação para utilização desta modalidade de processamento, aplicada a uma imagem formada por níveis-de-cinza, é devido ao fato que a visão humana, para um observador médio,

limita-se a discernir apenas uma a duas dúzias de tonas de cinza (Gonzalez & Wintz, 1992). Em contraste, o olho humano é capaz de discernir milhares de intensidades e tons de cores. A finalidade é então designar uma cor para cada nível-de-cinza dentro de certo padrão que se arbitra. Por exemplo, dependendo do que a imagem térmica pretende mostrar, poder-se-ia associar o nível zero à cor azul, e o nível superior à cor amarela, passando pelo vermelho. Assim, pode-se definir de diferentes maneiras a associação dos níveis-de-cinza com cores tabeladas em valores RGB (*red, green, blue*).
