

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Monitoramento Autônomo de Para-Raios de ZnO

Wagner Antônio Moreira Ursine

Belo Horizonte

2013

Wagner Antônio Moreira Ursine

Monitoramento Autônomo de Para-Raios de ZnO

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

Área de concentração: Engenharia de Potência

Linha de pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Silvino

Belo Horizonte

2013

Dedico esta conquista à minha mãe, Elizete, meu alicerce e inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela possibilidade de um relacionamento verdadeiro e íntimo com o criador do universo por meio de Jesus Cristo;

à minha mãe, Elizete, por todo esforço e sacrifício para me proporcionar uma educação pautada não só no conhecimento científico, mas também na moral, ética e amor.

à minha avó, Benice, pelo carinho e cuidado ao longos de todos esses anos e ao meu irmão, Ícaro, pela paciência e boas discussões sobre a vida, o universo e tudo mais;

ao meu orientador e amigo, professor Silvino, pelo direcionamento, confiança e valiosos ensinamentos;

ao professor e amigo Roberto Márcio, pelas oportunidades, confiança e grande exemplo de profissionalismo;

ao professor e amigo Peterson, pelo apoio e incentivo;

aos engenheiros Nilton Soares e Henrique Diniz, pelas oportunidades, confiança e inestimáveis contribuições;

aos amigos Ronaldo Eugênio e Flávio Calado, pelas infindáveis horas dedicadas à construção das mais diversas engenhocas, turismo e resenhas esportivas;

aos amigos Leonardo Fonseca, Túlio Borel, Rafael Ferreira, Cristiane Viana, Víctor Vilela, Kilder Fagundes, Selson Gomes e à equipe do Laboratório de Digitalização e do Laboratório de Termometria pelo apoio com experimentos, análise dos resultados e valiosas discussões;

à Companhia Energética de Minas Gerais e à Agência Nacional de Energia Elétrica pelo fomento à pesquisa;

a todos que, de alguma forma, contribuíram para a valorização deste trabalho.

“Gente grande tem mania de dar explicações sem graça!”

(Kirke, Digory)

personagem fictício do livro *As Crônicas de Narnia*

Sumário

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	i
LISTA DE TABELAS	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO	1
Objetivo geral.....	3
Objetivos específicos	3
Organização do trabalho.....	3
1 O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	5
1.1 O Sistema Interligado Nacional.....	5
1.2 Caminho da energia.....	7
1.3 Equipamentos de Subestações de Energia	7
1.4 Manutenção	11
2 TERMOGRAFIA.....	14
2.1 Termografia, temperatura e calor	14
2.2 Transferência de calor.....	16
2.3 Características das superfícies	18
2.4 Modelo matemático da medição	23
3 INSPEÇÕES TERMOGRÁFICAS	25
3.1 Como são feitas as inspeções em subestações?	25
3.2 Inspeção termográfica.....	29
3.3 Fatores de influência	31
3.4 O início dos problemas.....	35
3.5 Automação das inspeções	35
4 PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO	45
4.1 Histórico	46

4.2	Aspectos construtivos	47
4.3	Fatores de degradação	52
4.4	Corrente de Fuga	56
4.5	Modelo elétrico	57
4.6	Monitoramento e diagnóstico	58
4.7	Estratégia para extração da corrente resistiva	66
4.8	Corrente de fuga x Termografia	71
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÕES	73
5.1	Extração da corrente resistiva: Simulação	74
5.2	Extração da corrente resistiva: Resultados experimentais	78
5.3	Radiação solar	82
5.4	Velocidade do vento	87
5.5	Temperatura ambiente	95
5.6	Parâmetros dos termogramas	103
6	CONCLUSÃO	109
	REFERÊNCIAS	114

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Sistema de Transmissão em janeiro de 2012	6
Figura 1.2 - Caminho da Energia	7
Figura 1.3 - Sátira sobre os processos produtivos e de manutenção dos anos 1930	12
Figura 2.1 - Espectro eletromagnético dividido em suas faixas características.....	15
Figura 2.2 - Relação entre emissividade e o comprimento de onda para corpos negros, cinzentos e seletivos	19
Figura 2.3 - Irradiância espectral sobre um meio semitransparente.....	21
Figura 3.1 - Transmissividade do ar para distâncias de 10, 50 e 100 metros	33
Figura 3.2 - Sistema de Monitoramento Autônomo para Para-Raios	38
Figura 3.3 - <i>SmartGuard</i> em subestações na China	39
Figura 3.4 - Robô suspenso para monitoramento de subestações	40
Figura 3.5 - Concepção da primeira versão de um sistema para monitoramento de subestações	42
Figura 3.6 - Módulo de controle e posicionamento.....	43
Figura 4.1 - Evolução dos para-raios à base de materiais não lineares	47
Figura 4.2 - Detalhes construtivos dos para-raios tipo moldado.....	48
Figura 4.3 - Estrutura microscópicas do varistores de ZnO	49
Figura 4.4 - Comportamento não linear de varistores de ZnO	50
Figura 4.5 - Característica V x I típica de para-raios e sua relação com a temperatura do dispositivo.....	51
Figura 4.6 - Curva V x I típica com indicação de alguns parâmetros de interesse e níveis de proteção	51
Figura 4.7 - Resumo dos resultados obtidos na identificação das causas de falha em para-raios de distribuição	53
Figura 4.8 - Deterioração de um para-raios devido ao depósito de resíduos em sua superfície.....	54
Figura 4.9 - Corrosão das partes metálicas de um para-raios devido à penetração de umidade	55

Figura 4.10 - Comparativo do resultado da degradação de um para-raios por redução de oxigênio e sobretensão na corrente que flui pelos terminais de um para-raios....	55
Figura 4.11 - Modelo elétrico de um para-raios.....	57
Figura 4.12 - Esquemático do equipamento para medição pelo método da compensação de harmônicos.....	60
Figura 4.13 - Extração da corrente resistiva baseada em adição das formas de onda da corrente total defasadas no tempo	63
Figura 4.14 - Circuito utilizado para extração da corrente resistiva implementado por (NETO, <i>et al.</i> , 2006)	63
Figura 4.15 - Esquemático do circuito utilizado por (XU, <i>et al.</i> , 2013) para a extração da parcela resistiva da corrente de fuga	63
Figura 4.16 - Aquisição de termogramas de um para-raios de três posições espaçadas de 120°	64
Figura 4.17 - Divisão da superfície de um para-raios em quatro áreas distintas.....	66
Figura 4.18 - Tensão e corrente de fuga total em um para-raios de ZnO ideal.....	67
Figura 4.19 - Tensão e corrente de fuga total em um para-raios após degradação ou sob condições anormais de operação.....	67
Figura 4.20 - Fluxograma de funcionamento da estratégia para extração da corrente resistiva	68
Figura 4.21 - Corrente resistiva obtida através do método proposto.....	69
Figura 4.22 - Amostra da tensão real aplicada nos terminais de um para-raios	70
Figura 4.23 – Tensão distorcida (14 <i>kV_{peak}</i> , em preto) e Corrente de Fuga resultante (2 <i>mA_{peak}</i> , em azul) em um para-raios de distribuição	70
Figura 4.24 - Resultado da extração da corrente resistiva para uma forma de onda não senoidal.....	71
Figura 5.1 - Programa para aquisição da corrente de fuga total	74
Figura 5.2 - Circuito utilizado para simulação do comportamento de para-raios em relação à tensão de operação aplicada.....	75
Figura 5.3 - Tensão e corrente de fuga quando aplicada tensão nominal no conjunto de varistores.....	75
Figura 5.4 - Análise harmônica das parcelas da corrente de fuga para uma tensão de 800 V.....	76

Figura 5.5 - Resultados da introdução de distorção harmônica na tensão de operação	77
Figura 5.6 - Análise harmônica das correntes após a introdução de harmônicos na tensão	77
Figura 5.7 - Esquemático do experimento de extração da corrente resistiva	78
Figura 5.8 - Experimento para verificação da estratégia de extração da corrente resistiva	79
Figura 5.9 - Formas de onda da tensão e corrente de fuga total durante aplicação de 11 kV nos terminais dos para-raios	81
Figura 5.10 - Termogramas da situação dos para-raios quando submetidos a 7 kV (a) e 11 kV (b).....	82
Figura 5.11 - Esquemático do experimento sobre radiação solar	82
Figura 5.12 - Experimento para determinação da influência da radiação solar na temperatura superficial de um para-raios.....	83
Figura 5.13 - Medições da irradiação solar ao longo de um dia.....	84
Figura 5.14 - Termogramas das quatro posições referentes à aquisição realizada às 16 horas	86
Figura 5.15 - Resultados obtidos pelo modelo matemático para os dados coletados de radiação solar ao longo do dia	87
Figura 5.16 - Esquemático de funcionamento do experimento realizado no túnel de vento	88
Figura 5.17 - Equipamentos utilizados no experimento sobre a influência da velocidade do vento na temperatura dos para-raios (visão frontal).....	89
Figura 5.18 - Equipamentos utilizados no experimento sobre a influência da velocidade do vento na temperatura dos para-raios (visão posterior).....	89
Figura 5.19 - Termogramas do para-raios novo (a) e do degradado (b) submetidos a uma tensão de 9 kV e velocidade do vento igual a 3 m/s	91
Figura 5.20 - Relação entre a corrente resistiva e a velocidade do vento em um para-raios novo.....	92
Figura 5.21 - Diferença entre a temperatura do para-raios e a temperatura ambiente	93
Figura 5.22 - Evolução das temperaturas de interesse no para-raios novo	94
Figura 5.23 - Evolução das temperaturas de interesse no para-raios degradado	94

Figura 5.24 - Esquemático do experimento sobre a influência da temperatura ambiente	95
Figura 5.25 - Equipamentos utilizados no experimento sobre a influência da temperatura ambiente na temperatura superficial de para-raios	96
Figura 5.26 - Evolução das temperaturas de interesse ao longo do experimento	98
Figura 5.27 - Elevação de temperatura superficial do para-raios em relação à corrente resistiva que flui por seus terminais	99
Figura 5.28 - Relação entre a corrente resistiva e a temperatura ambiente	100
Figura 5.29 –Termogramas das três posições do para-raios novo submetido à tensão de 11 kV na temperatura ambiente de 25°C	101
Figura 5.30 - Três posições do para-raios novo submetido à tensão de 11 kV na temperatura ambiente de 25°C	101
Figura 5.31 - Resultados fornecidos pelo modelo matemático com os dados do experimento sobre a temperatura ambiente para o para-raios sem defeitos	102
Figura 5.32 - Resultados fornecidos pelo modelo matemático com os dados do experimento sobre a temperatura ambiente para o para-raios defeituoso	103
Figura 5.33 - Equipamentos utilizados para a verificação da influência dos parâmetros de aquisição na temperatura medida	104
Figura 5.34 - Variação da temperatura superficial em função da temperatura média refletida considerada	105
Figura 5.35 - Variação da temperatura superficial em função da emissividade adotada	105
Figura 5.36 - Variação da temperatura superficial em função da temperatura ambiente considerada	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.1	16
Tabela 2.2 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.2	17
Tabela 2.3 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.3	18
Tabela 2.4 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.4	18
Tabela 2.5 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.5	20
Tabela 2.6 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.6	21
Tabela 2.7 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.7	21
Tabela 2.8 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.8	22
Tabela 2.9 - Descrição dos termos da Equação 2.10.....	23
Tabela 2.10 - Descrição dos termos da Equação 2.11.....	24
Tabela 3.1 - Itens necessários para a realização de inspeções termográficas em subestações de energia	26
Tabela 3.2 - Características desejáveis em um termovisor destinado ao monitoramento de ativos em subestações de energia	27
Tabela 4.1 - Descrição dos termos da Equação 4.2.....	60
Tabela 4.2 - Comparativo entre os diversos métodos de análise da corrente de fuga	61
Tabela 4.3 - Descrição dos termos da Equação 4.4.....	65
Tabela 5.1 - Resultados das medições de corrente de fuga e temperatura de um para-raios novo durante o experimento de extração da corrente resistiva	80
Tabela 5.2 - Resultados das medições de corrente de fuga e temperatura de um para-raios degradado durante o experimento de extração da corrente resistiva	80
Tabela 5.3 - Temperaturas medidas durante o experimento sobre radiação solar ...	85
Tabela 5.4 - Incerteza contido nas medições de temperatura realizadas durante o experimento.....	85
Tabela 5.5 - Resultados dos experimentos realizados no túnel de vento com para-raios sem defeitos	90
Tabela 5.6 - Resultados dos experimentos realizados no túnel de vento com para-raios com defeito	91
Tabela 5.7 - Dados do experimento sobre a influência da temperatura ambiente no para-raios novo	97

Tabela 5.8 - Dados do experimento sobre a influência da temperatura ambiente no para-raios defeituoso.....	97
Tabela 5.9 - Diferenças máximas e mínimas entre a temperatura do para-raios e a temperatura ambiente durante o experimento.....	98
Tabela 5.10 - Valores medidos para o experimento sobre a influência dos parâmetros da câmera térmica.....	104
Tabela 5.11 - Descrição dos termos da Equação 5.1.....	107
Tabela 5.12 - Resultado da variação dos parâmetros de aquisição pelo software desenvolvido por (TEIXEIRA, 2012) e pelo <i>FLIR ThermoCam Researcher</i>	108

RESUMO

A redução dos custos operacionais e melhoria da qualidade na prestação de serviços, partindo do melhor gerenciamento e conseqüente maior disponibilidade dos ativos, são pontos fundamentais para as empresas do setor elétrico. Para tanto, no âmbito das subestações de energia, é necessária a realização de inspeções periódicas a fim de avaliar o estado de degradação dos equipamentos. Em especial, o para-raios se apresenta como um dispositivo de proteção contra sobretensões, prevenindo que surtos atinjam ativos sensíveis ou de grande importância para o sistema. A termografia e a análise da corrente de fuga são as técnicas mais adotadas para o monitoramento e diagnóstico de para-raios a base de óxido de zinco, sendo que proporcionam um conjunto de dados complementares entre si. Neste trabalho, foram desenvolvidos experimentos para determinar a influência de fatores como a temperatura ambiente, radiação solar e velocidade do vento na medição da temperatura superficial deste dispositivo. Além disso, é proposta uma técnica para extração da parcela resistiva da corrente de fuga total. A finalidade dos estudos apresentados é contribuir para a construção de um banco de informações sobre o monitoramento e diagnóstico de diversos equipamentos presentes em subestações. Tal banco será empregado em um sistema autônomo de inspeções. Os resultados obtidos mostram que a metodologia para obtenção da corrente de fuga é passível de implementação em campo, constituindo uma técnica simples e robusta, principalmente em relação aos harmônicos presentes na tensão de operação. A medição de temperatura através da termografia mostrou-se muito dependente da quantidade de radiação solar e temperatura ambiente, fato que não se confirmou para a velocidade do vento. Com relação aos parâmetros das câmeras térmicas, a emissividade e a temperatura média refletida foram consideradas como cruciais para a correta medição da temperatura de um para-raios.

Palavras-chave: Para-Raios, Termografia, Corrente de Fuga, Monitoramento Autônomo, Inspeções de Subestações

ABSTRACT

Reducing operating costs and improving quality of the provided services, based on better management and consequent increased availability of assets, are key points for electricity companies. Therefore, in the context of power substations, it is necessary to carry out periodic inspections to assess the equipment's state of degradation. In particular, the surge arrester appears as a protective device against overvoltages, preventing surges from reaching assets that are sensitive or of great importance to the system. Thermography and leakage current analysis are the techniques adopted for monitoring and diagnosing metal-oxide surge arresters, providing a set of complementary information. In this work, experiments were performed to determine the influence of factors such as temperature, solar radiation and wind speed in the measurement of surface temperature of this device. In addition, a technique is proposed for extracting the resistive portion of the total leakage current. The goal of the presented studies is to help building an information database about diagnosis and monitoring of the equipment found in power substations. This database will be used in an autonomous inspection system. Results show that the proposed methodology for obtaining the resistive current is liable to field implementation, providing a simple and robust technique, especially regarding the harmonics present in operating voltage. The temperature measurement by thermography proved to be very dependent on the amount of solar radiation and room temperature, a fact that was not confirmed for the wind speed. Regarding the infrared camera parameters, emissivity and average reflected temperature were considered crucial for the correct surge arrester temperature measurement.

Keywords: Surge Arrester, Thermography, Leakage Current, Autonomous Monitoring, Substation's Inspection

INTRODUÇÃO

A redução dos custos operacionais e a melhoria da qualidade na prestação de serviços, partindo do melhor gerenciamento e conseqüente maior disponibilidade dos ativos, são pontos fundamentais para as empresas do setor elétrico. Os investimentos em pesquisa e desenvolvimento na área de manutenção, aliados à experiência acumulada ao longo dos anos, possibilitaram iniciar a criação de uma base de conhecimento que constitui um pilar crucial para a gestão desses ativos.

A termografia é a técnica mais adotada para o monitoramento e diagnóstico de equipamentos em operação nas subestações de energia. No entanto, a transição de sua aplicação qualitativa para uma aplicação quantitativa ainda requer esforços no sentido de determinar fatores de influência e a incerteza associada às medições de temperatura. A qualidade dos dados e o profundo conhecimento sobre os equipamentos são fundamentais para o correto diagnóstico das anomalias térmicas detectadas e escolha do melhor momento para a substituição ou intervenção.

Automatizar os processos de inspeção e diagnóstico dos ativos desponta como uma alternativa plausível dentro do contexto da manutenção de subestações. As vantagens vão desde o aumento da frequência de inspeções, formando uma base de dados ainda mais rica, até a padronização do processo e aplicação sistemática da tecnologia. Ainda, é possível unificar as tarefas de aquisição e análise para todos os equipamentos, criando uma plataforma integrada para a gestão da manutenção.

Com a finalidade de proteger os equipamentos das subestações contra sobretensões oriundas do próprio sistema ou de descargas atmosféricas, são utilizados dispositivos denominados para-raios. Tal proteção é muito importante no quesito referente à confiabilidade dessas instalações, tornando crítica a falha do dispositivo durante uma solicitação. Seu diagnóstico pode ser feito pela análise da pequena corrente que flui por seus terminais e também por termografia.

Considerando a importância do para-raios, é imprescindível que os sistemas de monitoramento automático que serão implantados nas subestações contemplem seu funcionamento, propriedades e possíveis anomalias, sendo capazes de prever falhas e determinar o melhor momento para retirada de serviço. Para tanto, torna-se necessário desenvolver ferramentas para sua análise e levantar os parâmetros de interesse para seu diagnóstico.

O presente trabalho insere-se no contexto de fundamentação do conhecimento e automatização das inspeções em subestações propiciado pelo projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica denominado P&D 426 – “Sistema automatizado para monitoramento e diagnóstico de falhas em ativos de subestações, sem desligamento, através de varredura, localização, aquisição, tratamento e processamento de imagens no espectro visível e no infravermelho”. Esse projeto é consequência de diversos outros projetos desenvolvidos em conjunto pelas equipes do *Lightning Research Center* (LRC/UFMG), Laboratório de Termometria (LabTerm/UFMG) e Companhia Energética de Minas Gerais. Dentre eles, destacam-se o P&D 170 – “Protótipo para Monitoramento e Diagnóstico Automático de Falhas em Para-raios, incluindo os de carboneto de silício, utilizando técnicas de sistema de infravermelho” e o P&D 235 – “Metodologia para Melhoria da Confiabilidade da Termografia em Sistemas de Distribuição”.

Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é contribuir para a construção de uma base de dados sobre os equipamentos das subestações de energia, desenvolvendo um método para análise da corrente de fuga de para-raios à base de óxido de zinco e avaliando a influência das condições ambientais na medição de sua temperatura superficial.

Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

1. Desenvolver, simular e testar experimentalmente um método operacional para a extração da parcela resistiva da corrente de fuga de para-raios à base de óxido de zinco;
2. Investigar o comportamento da corrente de fuga em situações de sobretensão, distorção harmônica, alteração na temperatura ambiente e diferentes velocidades do vento;
3. Determinar os fatores de maior influência na termografia aplicada a para-raios, discutindo formas de contornar ou considerar seus efeitos;
4. Alimentar um modelo matemático desenvolvido pelo grupo de pesquisa responsável pelo P&D 426 para o estudo do comportamento térmico de para-raios e a consideração dos fatores de influência de sua temperatura superficial.

Organização do trabalho

As ideias apresentadas neste documento encontram-se divididas fundamentalmente em seis capítulos. No primeiro deles, discute-se o sistema elétrico brasileiro e a forma como as subestações de energia se inserem no contexto da transmissão e distribuição da energia elétrica. Ainda concernente às subestações, são comentados seus principais equipamentos. Esta seção trata, também, das principais técnicas de monitoramento utilizadas e a atual situação da manutenção preditiva.

No segundo capítulo, são abordados os conceitos básicos sobre termografia essenciais ao entendimento dos experimentos e conclusões. Além disso, os mecanismos de troca de calor e as propriedades das superfícies são alvo deste capítulo.

O terceiro capítulo trata das inspeções termográficas aplicadas em subestações. Nesta seção, discute-se o procedimento de inspeção e os fatores de influência que podem acarretar medições equivocadas de temperatura. Logo, a automação da tarefa de aquisição e diagnóstico surge como solução para tornar o processo mais eficiente e confiável.

Os para-raios, dispositivos de maior interesse deste trabalho, são apresentados no quarto capítulo. Neste capítulo, são discutidos propriedades construtivas, modelos elétricos, fatores de degradação e também as técnicas de monitoramento. Não obstante, uma técnica para extração da parcela resistiva da corrente de fuga é proposta.

O quinto capítulo traz os resultados obtidos por meio de simulações e experimentos realizados para avaliar a técnica desenvolvida e também a influência de diversos parâmetros na temperatura superficial dos para-raios medida por termografia. Ainda, os resultados do modelo matemático proposto por (FONSECA, *et al.*, 2011) para os dados fornecidos são apresentados.

O último capítulo resume as conclusões sobre os assuntos tratados neste trabalho, juntamente com propostas de continuidade para os estudos sobre termografia aplicada e análise de corrente de fuga em para-raios de ZnO.

1 O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

O conjunto de equipamentos que operam de maneira coordenada a fim de disponibilizar energia elétrica para os consumidores é denominado Sistema Elétrico de Potência (SEP). Os equipamentos desse conjunto são responsáveis pelas atividades de geração, transmissão e distribuição da energia. O funcionamento do SEP está condicionado a diversas restrições para garantia da qualidade, continuidade, segurança e minimização dos impactos socioambientais. Para tanto, são adotadas filosofias de supervisão e controle baseadas no monitoramento e intervenção em variáveis estratégicas do sistema.

1.1 O Sistema Interligado Nacional

O sistema brasileiro de geração e transmissão de energia é caracterizado por seu grande porte e predominância de usinas hidrelétricas. Tais usinas encontram-se, em sua maioria, distantes dos centros consumidores, fato que torna necessário transmitir a energia produzida por meio de longas linhas de transmissão. Além disso, o sistema é interligado a fim de aumentar sua segurança e desempenho. As empresas de energia da região Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e Norte constituem o Sistema Interligado Nacional (SIN). De acordo com o Operador Nacional do Sistema¹ (ONS), apenas 3,4% da capacidade de produção de energia encontra-se em sistemas isolados e, portanto, fora do SIN (ONS, 2013). A Figura 1.1 apresenta o sistema de transmissão de energia em janeiro de 2012.

¹ <http://www.ons.org.br>

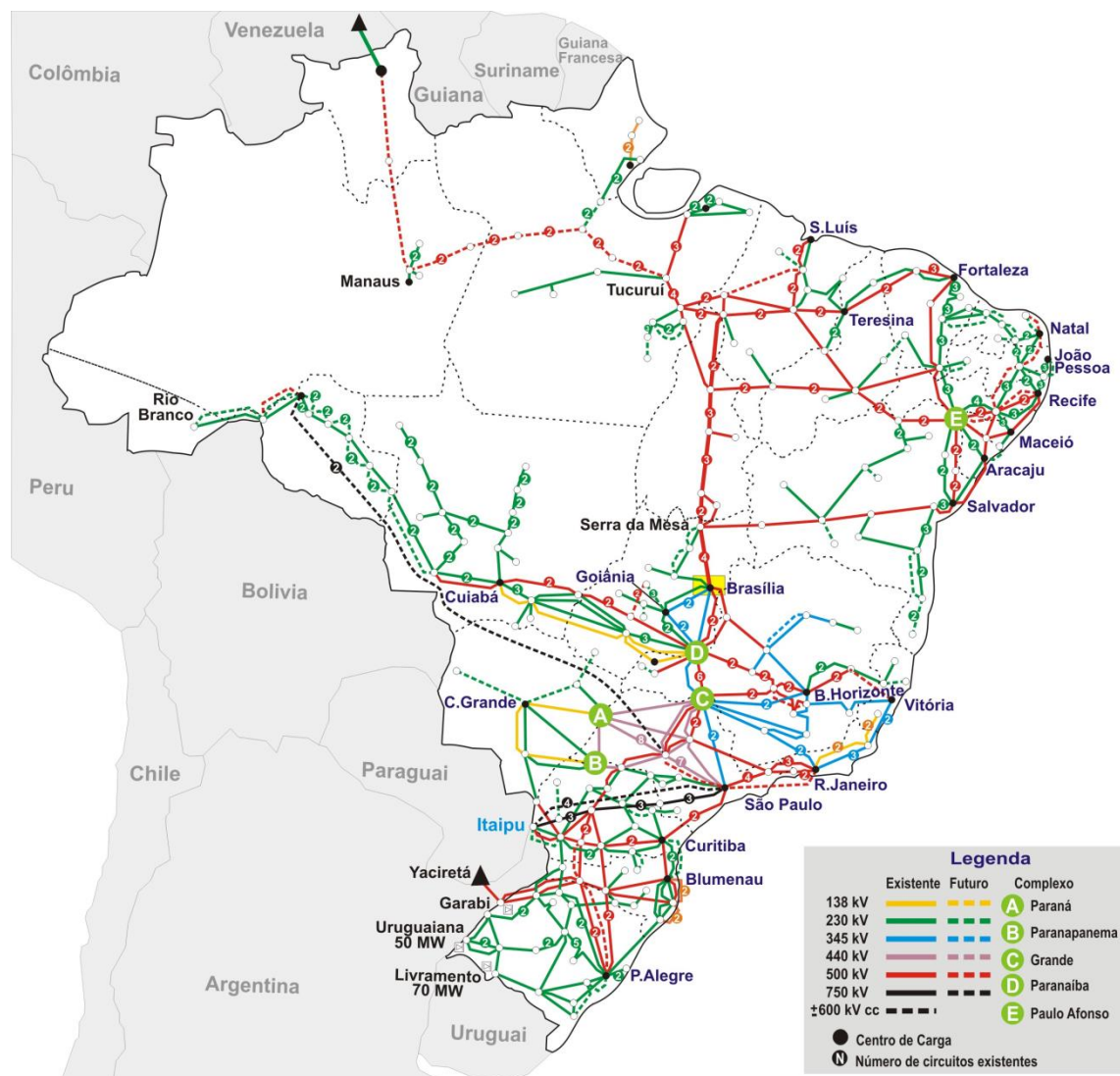


Figura 1.1 - Sistema de Transmissão em janeiro de 2012

Fonte: (ONS, 2013)

A atuação das empresas no setor elétrico pode englobar atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia. Em especial, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) possui 70 usinas e mais de 9,4 mil quilômetros de linhas de transmissão e 510 mil quilômetros de redes de distribuição. Em 2012, atendia 7.336.343 consumidores. 56% do consumo da energia fornecida foram atribuídos ao consumidor industrial, 18,9% e 11,8% ao residencial e comercial, respectivamente. O restante é repartido entre o consumidor rural e outros tipos de consumidores. A capacidade instalada até 2011 era de 6.964 MW. A CEMIG possui mais de 410 subestações espalhadas por sua área de atuação e participa de todas as atividades citadas (CEMIG, 2012).

1.2 Caminho da energia

Em seu percurso até o consumidor final, a energia passa por diversos estágios. De forma simplificada, para deixar a instalação geradora, os níveis de tensão são elevados por uma subestação e a energia é transportada por linhas de transmissão até uma subestação que abaixará tais níveis para adequá-los à distribuição. Em seguida, ela é distribuída para os consumidores de acordo com suas necessidades e contratos estabelecidos. A Figura 1.2 ilustra o caminho da energia, da sua geração até o consumidor.

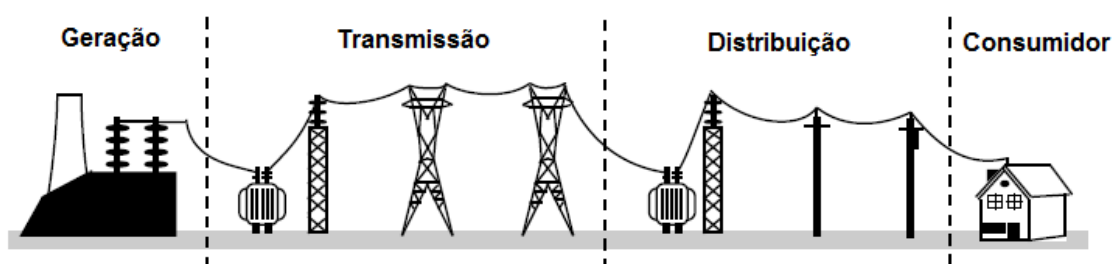


Figura 1.2 - Caminho da Energia

Fonte: adaptado de (Marques, 2009) apud (DINIZ, 2013)

As tensões geradas nas usinas têm valores entre 6 kV e 15 kV. Os níveis típicos de tensão utilizados para a transmissão da energia são superiores a 230 kV e, para a distribuição, estão entre 1 kV e 230 kV.

1.3 Equipamentos de Subestações de Energia

As subestações de energia são instalações que permitem, dentre outras funções, a transformação de níveis de tensão, o controle do fluxo de potência e a realização de manobras. Subestações próximas a centros de geração são denominadas Subestações Transformadoras Elevadoras, pois “elevam” o nível de tensão gerada para permitir sua transmissão. As instalações vizinhas aos centros consumidores e que são utilizadas para “abaixar” o nível de tensão que chega das linhas de transmissão são chamadas Subestações Transformadoras Abaixadoras.

Os principais equipamentos encontrados em subestações de energia são: as unidades transformadoras de potência – transformadores; unidades de compensação reativa – banco de reatores, banco de capacitores e compensadores síncronos e estáticos; equipamentos de manobra – chaves seccionadoras e disjuntores;

transformadores para medição – transformadores de potencial e transformadores de corrente.

1.3.1 Unidades transformadoras

O transformador é um equipamento estático utilizado principalmente para transformação dos níveis de tensão em circuitos elétricos. Nos sistemas elétricos de potência também são utilizados transformadores reguladores e defasadores.

1.3.2 Unidades de compensação

a) Banco de Capacitores

Conjunto de capacitores ligado em paralelo ao sistema. Sua principal função é a injeção de potência reativa.

b) Banco de Reatores

Conjunto de bobinas ligadas em paralelo ao sistema. Sua função primordial é minimizar os efeitos capacitivos das linhas de transmissão.

c) Compensador Síncrono

O compensador síncrono é um motor síncrono que trabalha fornecendo ou consumindo potência reativa dependendo da excitação utilizada. Quando superexcitado funciona como carga capacitiva. Quando subexcitado trabalha como uma carga indutiva.

d) Compensador Estático

Conjunto de equipamentos estáticos (capacitores e indutores) que trabalha automaticamente para o controle de reativo do sistema.

1.3.3 Equipamentos de manobra

a) Chave seccionadora

Uma *chave* é um dispositivo mecânico que assegura o isolamento na posição aberta e mantém a continuidade do circuito na posição fechada. O termo *seccionador* define um dispositivo capaz de abrir ou fechar um circuito no qual circula uma corrente de intensidade desprezível. As chaves seccionadoras são utilizadas para permitir manobras em circuitos sem carga (ABNT, 1985).

b) Disjuntor

Dispositivo mecânico de manobra e proteção capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais ou anormais de circuito. No entanto, sua principal função é interromper correntes de defeito (ABNT, 1987).

1.3.4 Transformadores para medição

a) Transformador de corrente

O transformador de corrente é um transformador ligado em série com o circuito da carga a fim de fornecer uma amostra da corrente circulante aos equipamentos de medição, proteção e controle. Fornecem correntes secundárias padronizadas em 5 A.

b) Transformador de potencial

O transformador de potencial é utilizado para fornecer amostras dos valores de tensão aos instrumentos de medição, proteção e controle. São ligados em paralelo ao circuito e fornecem tensões secundárias padronizadas em 115 V.

Eventualmente, é necessária a utilização de mecanismos para proteger os equipamentos e também as pessoas que se encontram dentro de uma subestação. Tal proteção pode atuar contra falhas em equipamentos, acidentes naturais (descargas atmosféricas, quedas de árvores) e acidentes por falha humana. Dentre os equipamentos de proteção instalados em uma subestação, pode-se destacar: para-raios, relés e chaves fusíveis. Os para-raios são de especial interesse deste trabalho.

1.3.5 Equipamentos de proteção

a) Chave Fusível

A chave é utilizada na proteção de circuitos contra sobrecorrentes. Normalmente é constituída de um filamento metálico com ponto de fusão predeterminado, que é alcançado quando a corrente ultrapassar certo valor limite.

b) Relé

Dispositivo elétrico destinado a produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos quando condições especiais são satisfeitas em sua entrada (ABNT, 1981).

c) Para-raios

O para-raios é um dispositivo de proteção para equipamentos elétricos contra sobretensões transitórias (ABNT, 1988). Seus aspectos construtivos e funcionamento são discutidos no capítulo 4.

1.3.6 Exigência de continuidade do serviço

Dada a importância das subestações de energia, nota-se que seu funcionamento ininterrupto é fundamental. Uma falha ou uma parada não programada pode acarretar sérios problemas aos consumidores e à empresa de energia responsável pela instalação. Alguns consumidores (hospitais e indústrias, por exemplo) necessitam que o suprimento de energia seja assegurado. Além do prejuízo financeiro decorrente da falta de energia para os consumidores, do descumprimento de contratos de fornecimento e dos danos causados aos equipamentos da subestação, existem as penalizações impostas pelos órgãos regulatórios. O fato de tais penalizações serem bastante severas desperta ainda mais o interesse das companhias em evitar interrupções não programadas do fornecimento de energia (COVRE, 2011).

A Agência Nacional de Energia Elétrica² (ANEEL) dispõe de uma série de documentos para normatização e padronização das atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia. Tais documentos são denominados Procedimentos de Distribuição³ (PRODIST). O módulo 8 (versão 01/02/2012) destes procedimentos trata da qualidade do produto e do serviço prestados pelas distribuidoras aos consumidores e distribuidoras acessantes.

No quesito qualidade do produto, são caracterizados os fenômenos de qualidade da energia elétrica. Adicionalmente, os critérios de amostragem, valores de referência e os procedimentos relativos à qualidade são estabelecidos. Os aspectos avaliados para a definição da qualidade do produto englobam tensão (regime permanente, desequilíbrio, variações e flutuação), fator de potência, harmônicos e frequência.

² <http://www.aneel.gov.br>

³ Documentos elaborados pela ANEEL que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Na seção sobre a qualidade do serviço prestado, são determinados, em especial, indicadores de continuidade do serviço. São eles: a Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão (DIC), a Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão (FIC) e a Duração Máxima de Interrupção Contínua (DMIC). Além dos indicadores individuais, existem também indicadores que são avaliados para conjuntos de unidades consumidoras: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). Os objetivos desta seção culminam na capacidade de fornecer subsídios para planos de melhoramento e expansão do sistema de distribuição e oferecimento de parâmetros de avaliação do serviço por parte dos consumidores (ANEEL, 2012).

A penalização por violação dos limites (mensal, trimestral ou anual) de continuidade consiste na compensação dos consumidores acessantes do sistema de distribuição. O valor da compensação pela violação dos limites individuais pode chegar a 120 vezes o valor da média dos encargos de uso do sistema (EUSDmédio) de distribuição durante o período apurado. No caso de distribuidoras acessadas por outras distribuidoras, a penalização pode atingir 20 vezes o EUSDmédio associado ao ponto de conexão.

Haja vista os problemas decorrentes da interrupção do serviço, o interesse e o investimento no sistema de proteção e na manutenção dos equipamentos das subestações são crescentes.

1.4 Manutenção

O termo manutenção é definido como ação ou efeito de manter, sustentar ou conservar⁴. Até o início da primeira guerra mundial, a manutenção era tratada como uma tarefa secundária, não havendo necessidade de organização, planejamento ou capacitação de pessoal. Entre outros assuntos, esse tipo de manutenção foi satirizado até mesmo através da sétima arte, conforme ilustra a Figura 1.3. Nos anos seguintes, a necessidade da rapidez do processo de produção e urgência no reparo de máquinas essenciais a tal processo culminou na criação da engenharia de manutenção que, além do planejamento e controle da manutenção, passou a explorar também a causa

⁴ Dicionário Aurélio - <http://www.dicionariodoaurelio.com>.

e o efeito das falhas⁵. Nas décadas posteriores, surgem novas filosofias de gestão da manutenção como a Manutenção Centrada em Confiabilidade e a Manutenção Produtiva Total (ZAIIONS, 2003).



Figura 1.3 - Sátira sobre os processos produtivos e de manutenção dos anos 1930

Fonte: cena do filme *Tempos Modernos*⁶

Nos últimos anos, o grande e diversificado número de ativos⁷ presentes nas instalações, a maior complexidade dos projetos e o surgimento de novas técnicas de manutenção fizeram com que a manutenção passasse a ser abordada de forma estratégica e tivesse papel fundamental nas tomadas de decisão (DINIZ, 2013).

1.4.1 Corrigir, prevenir ou prever

A correta realização das tarefas de manutenção confere maior confiabilidade ao sistema, reduzindo desligamentos programados e evitando não programados. Paralelamente, equipamentos, conexões e condutores conservados reduzem as perdas e aumentam a eficiência do sistema de distribuição (DINIZ, 2013). A manutenção pode ser dividida basicamente em três modalidades: corretiva, preventiva e preditiva.

⁵ Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida.

⁶ *Tempos Modernos*, Estados Unidos, 1936 – Charles Chaplin Productions

⁷ Item físico que possui valor econômico para uma organização, sendo tal valor tangível ou não.

A manutenção corretiva é aquela realizada após a falha. Esse tipo de manutenção não é planejado, o que pode acarretar custos bastante elevados conforme explicado previamente. Além disso, o equipamento danificado pode estar fatalmente comprometido e até mesmo comprometer outros equipamentos, podendo tornar tal manutenção bastante onerosa.

Quando realizada de forma periódica e antes que o funcionamento normal de um equipamento esteja comprometido, a manutenção é denominada preventiva. Ainda, é uma manutenção agendada e executada em oportunidades propícias, como uma parada planejada em uma subestação.

Por fim, a manutenção preditiva é definida pela avaliação sistemática e periódica dos equipamentos a fim de determinar seu estado de degradação por meio de diversas técnicas. Tal avaliação é realizada sem a necessidade de desligamento da subestação ou de qualquer um de seus equipamentos. Esse tipo de manutenção permite planejar e aperfeiçoar as ações corretivas e reduzir os custos de suas realizações.

Mais que um conjunto de atividades passivas, a manutenção pode, então, ser sintetizada como uma atividade gestora e executora que objetiva disponibilidade e confiabilidade⁸ de um ativo, de forma a preservar o desempenho mínimo do sistema, a segurança dos envolvidos e o meio ambiente (ZAIONS, 2003).

⁸ Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.

2 TERMOGRAFIA

2.1 Termografia, temperatura e calor

A termografia é uma técnica que permite registrar em forma gráfica a radiação infravermelha dos corpos acima do zero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$), estendendo, assim, a capacidade da visão humana através do espectro infravermelho. As ondas que compõem esse espectro têm sua intensidade atrelada à temperatura do corpo que as emite sendo a imagem gerada pela termografia, que representa a distribuição de temperaturas na superfície de um corpo, denominada termograma (ÁLVARES, 2008).

A radiação infravermelha foi descoberta no século XIX pelo astrônomo William Herschel. Durante suas pesquisas sobre redução de claridade solar em telescópios, Herschel observou que amostras de vidro de diferentes cores, deixavam passar diferentes quantidades de calor solar. Após a medição dessa quantidade de calor por todo o espectro visível, o astrônomo determinou que as temperaturas obtidas com um termômetro de mercúrio aumentavam das cores próximas ao violeta para as cores próximas ao vermelho. Além disso, a temperatura continuava a aumentar além da cor vermelha, após o fim do espectro visível.

Em 1830, Macedonio Melloni descobriu um cristal transparente à radiação infravermelha e a primeira imagem térmica foi obtida em 1840 por John Herschel, filho de William Herschel. Com a invenção do bolômetro em 1880, por Samuel P. Langley a sensibilidade dos detectores de radiação infravermelha foi notoriamente melhorada, possibilitando sua utilização em aplicações militares. Na década de 50, os detectores térmicos se tornaram disponíveis para aplicações civis (RAO, 2008). As câmeras

térmicas chegaram ao Brasil na década de 70 e contavam com resfriamento por nitrogênio líquido e sistemas de varredura óptico/mecânicos.

Nos últimos 40 anos, essa tecnologia evoluiu significativamente para atender às demandas de mercado e possibilitar novas aplicações para a termografia. Os detectores passaram a não necessitar de resfriamento e os sistemas de varredura foram substituídos pela tecnologia *Focal Plane Array* (FPA). A redução no peso do equipamento foi maior que 95%, passando de 40 kg para valores menores que 1,7 kg. Ademais, os avanços na resolução, lentes e eletrônica embarcada tornaram as câmeras térmicas equipamentos fundamentais para o monitoramento sem desligamento (*online*) de ativos (ARAÚJO, BARBOSA e SINISCALCHI, 2008).

O espectro eletromagnético naturalmente visível ao ser humano compreende ondas com comprimentos de onda entre 0,38 μm (violeta) e 0,78 μm (vermelho). Portanto, ondas com comprimentos de onda maiores que 0,78 μm , são caracterizadas como representantes da radiação infravermelha. A Figura 2.1 apresenta uma ilustração do espectro eletromagnético. A faixa destacada entre o ultravioleta e o infravermelho representa o espectro visível.

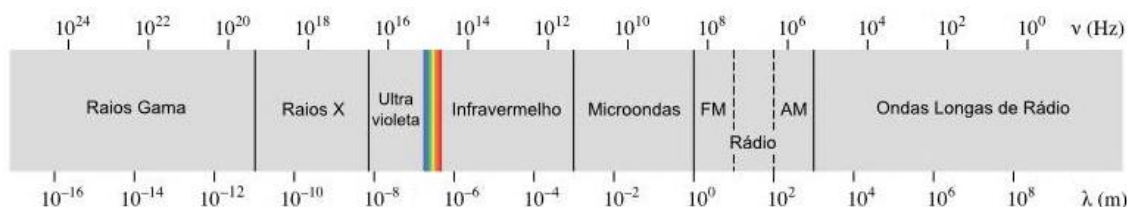


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético dividido em suas faixas características

Fonte: Luz, Tecnologia e Arte ⁹

Define-se temperatura como a grandeza associada ao grau de agitação das partículas que compõem os corpos. Já o termo calor expressa a energia térmica em trânsito que flui de um corpo a outro quando existe uma diferença de temperatura entre eles (INCROPERA e DEWITT, 2002). Pode-se dizer que a temperatura é o resultado de um balanço de energia (FERREIRA, 2013).

⁹ Disponível em: <http://luztecnologiaearte.weebly.com/luz-natural-e-luz-cecircular.html>. Acesso em 25 de junho de 2013.

2.2 Transferência de calor

A transferência de calor se dá por três formas básicas: condução, convecção e radiação. A compreensão destas formas de transferência é fundamental para o entendimento dos fatores que influenciam a temperatura de uma superfície e também sua aquisição através de um termograma.

2.2.1 Condução

A condução expressa a transferência de energia de uma partícula mais energética para uma partícula menos energética devido a suas interações. Tal processo ocorre em níveis de atividade atômica e molecular e pode ser quantificado em termos das equações de transferência de calor apropriadas. A quantidade de energia transferida por condução por unidade de tempo pode ser obtida pela lei de Fourier, apresentada na Equação 2.1.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx}$$

Equação 2.1

A Tabela 2.1 descreve os termos da Equação 2.1.

Tabela 2.1 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.1

Termo	Descrição	Unidade
q''_x	Fluxo de calor na direção x	W/m^2
dT/dx	Gradiente de temperatura	K/m
k	Condutividade térmica	$W/m.K$

[W] Watt – [m] Metro – [K] Kelvin

2.2.2 Convecção

Dois mecanismos compõem a transferência de calor por convecção: o movimento aleatório molecular (difusão) e o movimento global (advecção). O primeiro é semelhante ao descrito na transferência de calor por condução. Já o segundo é associado à movimentação agregada das moléculas de um fluido. Tal movimento contribui para a transferência de calor na existência de um gradiente de temperatura (e conseqüente diferença de densidade) entre regiões deste fluido. Portanto, a convecção é uma superposição da transferência por difusão e por advecção. A

convecção pode ser forçada, quando causada por meios externos (ventiladores, ventos atmosféricos), ou livre (ou natural), quando forças de empuxo são originadas por diferenças de densidades causadas pela variação de temperatura no fluido. A lei do resfriamento de Newton, Equação 2.2, trata da taxa de transferência de calor entre uma superfície e um fluido.

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

Equação 2.2

A Tabela 2.2 descreve os termos da Equação 2.2.

Tabela 2.2 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.2

Termo	Descrição	Unidade
q''	Fluxo de calor convectivo	W/m^2
$(T_s - T_\infty)$	Diferença de temperatura entre a superfície e o fluido	K
h	Coeficiente convectivo	$W/m^2 \cdot K$

2.2.3 Radiação

A radiação térmica é emitida por qualquer corpo que se encontre em uma temperatura finita. Diferentemente da condução e da convecção, na radiação a energia é transportada por ondas eletromagnéticas na faixa de 0,1 μm até 100 μm e não depende de um meio material para ocorrer (INCROPERA e DEWITT, 2002). O corpo que emite máxima radiação a uma determinada temperatura é denominado corpo negro. As características desse corpo são a base para a descrição do comportamento radioativo de corpos reais. Sua emitância espectral hemisférica pode ser obtida através da Lei de Planck (Equação 2.3) (TEIXEIRA, 2012).

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2\pi h C_0^2}{\lambda^5 [e^{\frac{hc_0}{\lambda k T}} - 1]}$$

Equação 2.3

Os termos da Equação 2.3 estão descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.3

Termo	Descrição	Unidade
C_o	Velocidade da luz no vácuo	m/s
h	Constante universal de Planck: $6,6256 * 10^{-34}$	$J * s$
k	Constante universal de Boltzmann: $1,3805 * 10^{-23}$	$\mu m * K$
λ	Comprimento de onda	μm
T	Temperatura absoluta do corpo negro	K

[s] Segundo – [J] Joule

Integrando-se a Lei de Planck (Equação 2.3) para todos os comprimentos de onda é possível obter a taxa de energia liberada por unidade de área, denominada poder emissivo, de um corpo negro, conforme mostra a Equação 2.4, também conhecida como Lei de Stefan-Boltzmann (INCROPERA e DEWITT, 2002).

$$E_b = \sigma T_s^4$$

Equação 2.4

A Tabela 2.4 descreve os termos da Equação 2.4.

Tabela 2.4 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.4

Termo	Descrição	Unidade
T_s	Temperatura absoluta da superfície	K
σ	Constante de Stefan-Boltzmann: $5,6704 * 10^{-8}$	$W/m^2 * K^4$

2.3 Características das superfícies

As superfícies reais não se comportam exatamente da mesma maneira que a superfície de um corpo negro. Na realidade, os corpos reais absorvem, refletem e transmitem apenas uma parcela do fluxo neles incidente. Baseado nos princípios de conservação da energia, o fluxo incidente em um corpo real é igual à soma das parcelas refletidas, absorvidas e transmitidas (MALDAGUE, 2001). Além disso, os corpos reais emitem uma parcela de radiação decorrente da agitação de suas moléculas.

2.3.1 Emissividade

O poder emissivo de um corpo é uma fração do poder emissivo de um corpo negro. Portanto, a Equação 2.4 deve ser corrigida para que possa ser efetivamente aplicada. O fator de correção para essa equação é chamado de *emissividade*, é adimensional e relaciona o comportamento do corpo com o de um corpo negro emitindo radiação nas mesmas condições de temperatura, direção e banda espectral.

A emissividade de um corpo depende da temperatura, comprimento de onda, da direção da radiação, material e forma da superfície (MALDAGUE, 2001) (CHRZANOWSKI, 2001). Logo, desconsiderar tal dependência pode ocasionar erros significativos em materiais radiadores seletivos. A Figura 2.2 apresenta o comportamento espectral da emissividade em corpos seletivos, cuja emissividade varia com o comprimento de onda, corpos cinzentos, cuja emissividade é constante e menor que a unidade e corpos negros, cuja emissividade é igual à unidade.

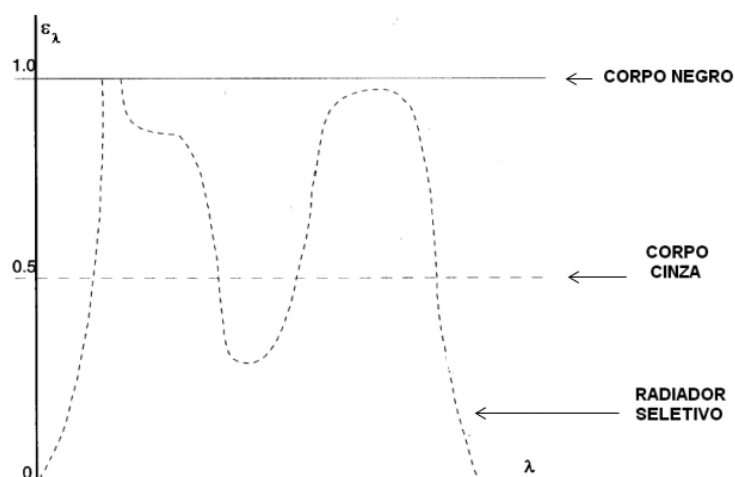


Figura 2.2 - Relação entre emissividade e o comprimento de onda para corpos negros, cinzentos e seletivos

Fonte: (Santos, 2006)

Para contornar o problema encontrado, adota-se a emissividade total hemisférica cuja dependência da direção de radiação e do comprimento de onda é nula para superfícies cinzentas difusoras (TEIXEIRA, 2012). Finalmente, a lei de Stefan-Boltzmann (Equação 2.4) pode ser modificada para utilização em superfícies reais, conforme mostra a Equação 2.5.

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4$$

Equação 2.5

A Tabela 2.5 descreve os termos da Equação 2.5.

Tabela 2.5 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.5

Termo	Descrição	Unidade
ε	Emissividade	-
T_s	Temperatura absoluta da superfície	K
σ	Constante de Stefan-Boltzmann: $5,6704 * 10^{-8}$	W/m² * K⁴

2.3.2 Absortividade, Refletividade e Transmissividade

A razão entre o fluxo incidente e a parcela absorvida por um corpo é denominada absortividade e representa a taxa na qual a energia radiante é absorvida por unidade de área. Os valores de absortividade encontram-se entre zero e a unidade. A parcela não absorvida pelo corpo divide-se entre o fluxo que foi refletido e o que foi transmitido. A refletividade representa a razão entre a radiação incidente e a radiação refletida. De forma semelhante, a transmissividade expressa a razão entre o fluxo incidente e o fluxo que é transmitido através do corpo. Vale destacar que todas as propriedades discutidas apresentam dependências semelhantes às da emissividade.

A Equação 2.6 descreve a relação entre os fluxos de energia em um corpo semitransparente.

$$\Phi_I = \Phi_R + \Phi_A + \Phi_T$$

Equação 2.6

A Tabela 2.6 descreve os termos da Equação 2.6. Tais termos também podem ser visualizados na Figura 2.3.

Tabela 2.6 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.6

Termo	Descrição	Unidade
Φ_I	Fluxo total incidente	W/m^2
Φ_R	Fluxo refletido	W/m^2
Φ_A	Fluxo absorvido	W/m^2
Φ_T	Fluxo transmitido	W/m^2

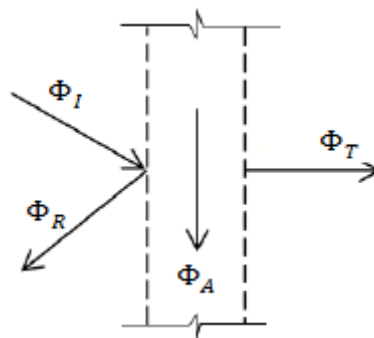


Figura 2.3 - Irradiância espectral sobre um meio semitransparente

Fonte: adaptado de (TEIXEIRA, 2012)

A Equação 2.7 ilustra a relação entre as propriedades de corpos semitransparentes.

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Equação 2.7

A Tabela 2.7 descreve os termos da Equação 2.7.

Tabela 2.7 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.7

Termo	Descrição	Unidade
ρ	Refletividade	-
α	Absortividade	-
τ	Transmissividade	-

A lei de Kirchhoff estabelece que a capacidade de um corpo em absorver energia é igual à sua capacidade de emitir energia para um mesmo comprimento de

onda. Quando um corpo encontra-se em equilíbrio térmico com sua vizinhança, a quantidade de radiação absorvida é igual à emitida. É importante ressaltar que as parcelas de radiação refletidas e transmitidas não exercem influência na energia térmica da matéria (SANTOS, 2006).

Sabendo-se que a irradiação pode ser aproximada pela emissão de um corpo negro, a taxa na qual a energia é absorvida por um corpo é dada pela Equação 2.8.

$$G = \alpha\sigma T_{viz}^4$$

Equação 2.8

A Tabela 2.8 descreve os termos da Equação 2.8.

Tabela 2.8 - Descrição de constantes e variáveis da Equação 2.8

Termo	Descrição	Unidade
<i>G</i>	Taxa de absorção da energia radiante	<i>W/m²</i>
<i>σ</i>	Constante de Stefan-Boltzmann: 5,6704 * 10 ⁻⁸	<i>W/m² * K⁴</i>
<i>α</i>	Absortividade	-
<i>T_{viz}</i>	Temperatura da vizinhança	<i>K</i>

Pela lei de Kirchhoff a emissividade é igual à absortividade para um corpo cinzento, cujas propriedades óticas independem do comprimento de onda. Finalmente, a partir da Equação 2.4, Equação 2.5 e da Equação 2.8 é possível obter a taxa líquida de transferência de calor por radiação, conforme a Equação 2.9. Essa equação é aplicável quando a superfície é muito pequena em relação ao ambiente.

$$q''_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4)$$

Equação 2.9

Na Equação 2.9, q''_{rad} [W/m^2] é a taxa líquida de transferência de calor por radiação por unidade de área.

2.4 Modelo matemático da medição

A radiação infravermelha emitida por uma superfície percorre uma distância antes de ser captada pelos detectores da câmera térmica. Tanto a radiação emitida quanto a radiação refletida por ela sofrem atenuação ao serem transmitidas pela atmosfera. Além disso, a atmosfera também emite certa quantidade de radiação que é detectada pelo termovisor (TEIXEIRA, 2012). O fluxo total recebido pelo termovisor é dado pela Equação 2.10.

$$G = \varepsilon\tau E(T_{sup}) + (1 - \varepsilon)\tau G(T_{refletida}) + (1 - \tau)E(T_{ambiente})$$

Equação 2.10

A Tabela 2.9 descreve os termos da Equação 2.10.

Tabela 2.9 - Descrição dos termos da Equação 2.10

Termo	Descrição	Unidade
T_{sup}	Temperatura da superfície	-
G	Radiação total recebida	-
$T_{ambiente}$	Temperatura ambiente	-
$T_{refletida}$	Temperatura média refletida	-
τ	Transmissividade	-
ε	Emissividade	-

O sinal que representa a temperatura da superfície na câmera térmica pode ser obtido através da Equação 2.11. Nesta equação, o sinal total obtido pela câmera é dividido em três parcelas, oriundas da temperatura do objeto, temperatura ambiente e da temperatura média refletida. A relação entre sinal e temperatura não é linear.

$$\varepsilon\tau S_{sup} = S_{total} - (1 - \tau)S_{T_{ambiente}} - (1 - \varepsilon)S_{T_{refletida}}$$

Equação 2.11

A Tabela 2.10 descreve os termos da Equação 2.11.

Tabela 2.10 - Descrição dos termos da Equação 2.11

Termo	Descrição	Unidade
S_{sup}	Sinal referente à temperatura da superfície	-
S_{total}	Sinal referente à radiação total recebida	-
$S_{T_{ambiente}}$	Sinal referente à temperatura ambiente	-
$S_{T_{refletida}}$	Sinal referente à temperatura média refletida	-
τ	Transmissividade	-
ε	Emissividade	-

3 INSPEÇÕES TERMOGRÁFICAS

Conforme discutido na Seção 2, a termografia pode ser definida como a detecção da temperatura da superfície de um corpo através da captura da radiação infravermelha emitida por ele. As câmeras térmicas ou câmeras no infravermelho traduzem as temperaturas detectadas em cores, permitindo ao usuário uma relativa visualização de tais informações.

A aquisição de imagens térmicas é um processo que pode ser realizado por um operador bem treinado de forma rápida e eficiente, desde que critérios de qualidade sejam observados. Além disso, uma vez que o dispositivo de aquisição é o mesmo para qualquer equipamento da subestação, o custo da inspeção é severamente reduzido, tornando essa técnica bastante atrativa. A redução do preço das câmeras térmicas e a redução da burocracia exigida para sua aquisição são fatores que muito contribuíram para a disseminação da manutenção preditiva no setor elétrico.

3.1 Como são feitas as inspeções em subestações?

Os procedimentos adotados para a realização das inspeções térmicas iniciam-se com o planejamento da inspeção. A segurança do inspetor é um dos focos desta etapa, que compreende a análise de riscos, avaliação das premissas para execução das inspeções e obtenção da autorização operativa. Definem-se, ainda, a rota a ser percorrida e as distâncias mínimas de segurança de acordo com a NR-10¹⁰.

¹⁰ Norma regulamentadora emitida pelo Ministério do Trabalho e Emprego que abrange os trabalhos realizados envolvendo eletricidade.

Os itens necessários para a realização da inspeção englobam os equipamentos para aquisição dos dados de interesse e também os equipamentos de proteção individual (EPI). Tais itens são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Itens necessários para a realização de inspeções termográficas em subestações de energia

Aquisição de dados	EPI
Câmera térmica	
Câmera digital	
Termo higrômetro	
Trena eletrônica	Uniforme apropriado
Anemômetro	Bota
Termômetro por contato	Capacete
Binóculo	Óculos
Fita isolante	
Material para anotação	
Notebook	

A termografia pode ser do tipo ativa ou passiva. No primeiro caso, os materiais ou equipamentos que estão sendo testados apresentam uma temperatura naturalmente diferente da temperatura ambiente. No segundo caso, as temperaturas dos objetos de teste são estimuladas por fatores externos para que o contraste térmico entre suas temperaturas e a temperatura ambiente seja suficiente (MALDAGUE, 2002). Uma vez que os equipamentos de uma subestação apresentam, normalmente, uma temperatura superior à temperatura ambiente, seja por consequência do efeito Joule, radiação solar ou outros fatores, a termografia passiva é a abordagem escolhida para sua inspeção.

Segundo (SANTOS, 2006), as câmeras térmicas destinadas ao monitoramento de subestações devem atender a uma lista de requisitos para que os resultados da inspeção sejam satisfatórios. As características destes equipamentos, como tecnologias de detecção, faixas de temperatura, temperatura de operação, faixa espectral e resolução espacial são exaustivamente discutidas em (MALDAGUE, 2001)

e (SANTOS, 2006). A Tabela 3.2 apresenta um resumo das características mínimas desejáveis em uma câmera térmica para monitoramento de subestações.

Tabela 3.2 - Características desejáveis em um termovisor destinado ao monitoramento de ativos em subestações de energia

Característica	Requisitos
Portabilidade	Portátil
Sistema de detecção	Fixo
Tipo de detector	Microbolômetro
Faixa de temperatura	-20 °C a 500 °C
Faixa espectral	8 µm a 14 µm
Resolução espacial	Variável ¹¹
Sensibilidade térmica	80 mK
<i>Frame Rate</i>	60 Hz
Temperatura de operação	-15 °C a 50 °C

Fonte: adaptado de (Santos, 2006)

As premissas que devem ser analisadas estão relacionadas ao pessoal envolvido na tarefa, às condições ambientais e ao estado operativo do sistema. Sugere-se que duas pessoas capacitadas a trabalhar na presença de tensões elevadas e manipular os equipamentos necessários realizem a inspeção em conjunto a partir de duas horas após o pôr do sol. O horário justifica-se pela necessidade de se evitar a grande influência do carregamento solar e os efeitos do reflexo da radiação nos equipamentos que apresentam alta refletividade.

A umidade relativa do ar também é tratada como fator restritivo à realização do monitoramento de ativos por termografia. Devido a sua atuação na transmissividade do ar, recomenda-se que a aquisição não seja feita quando tal parâmetro for superior a 70%. Durante a atividade, a temperatura atmosférica e a umidade relativa são aferidas e armazenadas para cada ponto de medição. Outro quesito que deve ser aferido no ato da aquisição é a velocidade do vento. Valores de velocidade maiores

¹¹ A resolução espacial mínima depende da distância de aquisição dos termogramas, bem como do tamanho dos objetos que serão monitorados. Pode-se fazer uso de lentes para aumentar ou diminuir a resolução espacial caso necessário.

que 5,5 m/s podem comprometer as informações obtidas. Finalmente, o carregamento mínimo durante a inspeção deve ser 80% da carga máxima típica. Todas as premissas mencionadas são amplamente adotadas, mesmo que algumas delas não apresentem validação formal.

É essencial que o inspetor responsável tenha em mãos o histórico de inspeções da subestação em questão, uma vez que a maioria das avaliações é baseada no acompanhamento do comportamento dos equipamentos. A recorrência de anomalias, aparecimento de novos problemas e a ausência de defeitos detectados anteriormente são informações fundamentais para a tomada de decisão quanto a interferir ou não em um ativo.

A etapa de execução é composta pela aquisição dos termogramas, imagens correspondentes e dos dados previamente discutidos. Durante esta etapa, o inspetor se desloca no interior da instalação e realiza as tarefas necessárias. Os termogramas são obtidos das posições que o operador da câmera térmica julgar mais adequadas para cada equipamento ou das posições mais próximas das consideradas nas inspeções anteriores. Ao sinal de uma anomalia térmica, o termograma adquirido também deverá ser acompanhado de uma foto correspondente, obtida com a câmera digital.

O responsável pela operação da câmera térmica ainda tem a incumbência de realizar sua calibração de acordo com as metodologias adotadas pela empresa. A temperatura refletida e a emissividade de cada componente também não podem ser ignoradas e devem ser compensadas e ajustadas durante a aquisição das imagens térmicas.

Ao fim da inspeção, a mesma é registrada e os resultados armazenados no banco de dados utilizado para gestão da manutenção nas subestações. Caso alguma anomalia tenha sido encontrada, são abertos relatórios para análise quantitativa e qualitativa da mesma. Os relatórios podem ter o objetivo de acompanhamento da anomalia, realização de manobra (no caso de seccionadoras ou disjuntores) ou requisição de intervenção e são mantidos por períodos de no mínimo cinco anos.

3.2 Inspeção termográfica

Os principais pontos de interesse, bem como as anomalias comumente encontradas em cada equipamento de uma subestação, são discutidos a seguir (CEMIG, 2011) (CEMIG, 2007).

3.2.1 Transformador

Considerado como sendo o equipamento mais importante de uma subestação, seja por seu valor ou sua função, o transformador é cuidadosamente analisado por meio da termografia. Os pontos de interesse durante uma inspeção são as conexões, buchas, parte ativa do transformador e o sistema de arrefecimento.

3.2.2 Banco de capacitores

O banco de capacitores não costuma apresentar grandes perdas por efeito Joule. Por outro lado, o aumento das perdas dielétricas originadas por defeito na parte ativa pode causar elevação de temperatura em relação a equipamentos vizinhos. A temperatura da bucha é de grande interesse e sua análise é feita comparando-se os bancos submetidos a um mesmo potencial. Espera-se que a diferença de temperatura normal entre os capacitores seja de no máximo 5°C.

3.2.3 Seccionador

Chaves seccionadoras tendem a apresentar problemas nas conexões com o sistema, contatos e articulações, normalmente causados pela redução da capacidade de condução de corrente no ponto. Tais problemas se traduzem termicamente como um aumento de temperatura. Muitas vezes seu fechamento incompleto ou incorreto também causa uma elevação de temperatura. Porém, esta pode ser corrigida manobrando-se o equipamento corretamente.

3.2.4 Conexão

As conexões são os principais componentes detectados pela termografia. Além de serem os componentes mais numerosos em uma subestação, sua função e forma de instalação explicam tal constatação. A análise termográfica destes itens é realizada de forma comparativa com os pontos de conexão das fases adjacentes com mesmas características. Sempre que a análise comparativa levar em consideração equipamentos de outras fases, admite-se que o circuito é equilibrado e, portanto, as correntes que nele circulam também são equilibradas.

A gravidade das anomalias detectadas para as conexões, seccionadores, e os prazos de ação são determinados por um critério de pontuação empírico.

3.2.5 Transformador de corrente

O monitoramento do transformador de corrente (TC) também é realizado de forma comparativa. Tal comparação é feita com os transformadores das fases adjacentes, de mesmo fabricante e modelo. São analisadas as conexões (terminais e barras de religação), parte ativa e as colunas isolantes.

O conhecimento do tipo construtivo do transformador de corrente também é bastante importante, uma vez que podem ser do tipo Núcleo Invertido ou do tipo Tanque, com os núcleos no topo e na base, respectivamente. Quando a temperatura ambiente está próxima de 30°C, a temperatura máxima aceitável para um ponto quente no TC é de 95°C.

3.2.6 Transformador de potencial

De forma semelhante à análise do transformador de corrente, o transformador de potencial (TP) também é analisado por comparação. Seja indutivo ou capacitivo, o transformador é comparado com os das fases adjacentes do mesmo modelo e fabricante. Vale ressaltar que os transformadores de potencial capacitivos apresentam uma temperatura mais elevada que os indutivos mesmo nas condições normais de operação.

A temperatura máxima aceitável para um TP é semelhante à de um TC. Uma diferença de temperatura superior a 5°C entre as conexões de transformadores de potencial adjacentes caracteriza o estado do equipamento como crítico, aumenta a frequência de inspeção e faz com que seu reparo seja tratado como urgente.

3.2.7 Para-raios

A análise dos para-raios também é feita por comparação. Nesta análise, os para-raios de cada fase são divididos em três ou quatro regiões e suas temperaturas são comparadas para cada uma delas. A Seção 4.6 detalha o procedimento utilizado para monitoramento de para-raios através de termografia.

A eficiência da inspeção esbarra na dificuldade do estabelecimento de referências absolutas para a determinação do estado de degradação dos dispositivos

instalados nas subestações. Tal dificuldade explica-se pela inúmera variedade de fabricantes e modelos de para-raios e também pelas diferentes condições a que os dispositivos estão submetidos nos locais de instalação (ÁLVARES, 2008).

3.3 Fatores de influência

Conforme demonstrado, o emprego da termografia para avaliação das condições de equipamentos envolvidos no caminho percorrido pela energia até o consumidor final está bem estabelecido, mesmo que muitas vezes seja subutilizada ou, no pior caso, mal utilizada. A falta de conhecimento sobre o equipamento em análise é apenas o começo de uma cadeia de fatores que podem destruir uma inspeção termográfica.

Não é rara a substituição de equipamentos ainda em boas condições ou a falta de intervenção nos que efetivamente necessitavam de maior cuidado. Situações como estas podem ocorrer, seja por subestimação, seja por superestimação dos problemas (se/quando) detectados (SNELL e RENOWDEN, 2000). O cenário pode ficar ainda pior se uma abordagem quantitativa errônea for utilizada para o planejamento da gestão de ativos. Fato posto, verifica-se a necessidade de uma maior confiabilidade das inspeções termográficas para que a frequência em que as decisões são tomadas baseadas em informações incorretas e custos mal avaliados seja minimizada.

A confiabilidade das inspeções termográficas está condicionada aos fatores intrínsecos e extrínsecos que afetam a medição de temperatura, bem como às faixas de criticidade determinadas a partir do estudo aprofundado da relação entre a temperatura e a real condição do equipamento. Os fatores intrínsecos estão relacionados aos erros introduzidos pelos componentes internos dos dispositivos de aquisição. Já os fatores extrínsecos estão relacionados aos erros introduzidos pelas propriedades do objeto de estudo e pelas condições a que ele está submetido (DINIZ, 2013).

As contribuições dos principais fatores de influência na termografia aplicada em subestações são discutidas a seguir (SNELL e RENOWDEN, 2000) (SANTOS, 2012) (FERREIRA, 2013).

3.3.1 Radiação solar

O aquecimento provocado pela absorção da radiação solar pode ser capaz de mascarar pequenas diferenças de temperatura na superfície do equipamento em análise. Além disso, a parcela da radiação refletida principalmente pelas partes metálicas dos equipamentos, cuja absorvidade é baixa, pode ser captada pelo detector da câmera térmica, causando uma falsa impressão de aquecimento da região.

3.3.2 Vento

Ventos com velocidades reduzidas podem causar considerável influência no sentido de reduzir a temperatura das anomalias térmicas nos componentes elétricos. A redução é contínua com o aumento da velocidade e diminui até que não seja mais percebida pela termografia. A diferença de temperatura medida em situações de incidência de vento é normalmente compensada por fatores de correção, que são dependentes não só da velocidade, mas também do tempo de exposição. Segundo (FERREIRA, 2013), o valor de temperatura medida para uma conexão submetida a uma velocidade de 1 *m/s* por 5 minutos deve ser corrigido por um fator de 1,24, o que mostra um valor medido 80% menor que na ausência de influência do vento.

O efeito do vento está condicionado a fatores como a potência dissipada pelo equipamento; velocidade, direção e orientação do vento; área e formato do equipamento; disposição dos objetos vizinhos. Portanto, tal efeito não apresenta comportamento uniforme e carece de atenção diferenciada por equipamento.

3.3.3 Condições atmosféricas e distância

O meio entre o mensurando e o detector é o ar atmosférico e apresenta absorvidade, refletividade e transmissividade características. Essas propriedades alteram-se na presença de chuva, poluição, névoa, entre outros.

A absorção e a dispersão da radiação infravermelha aumentam com o aumento do vapor e água e do dióxido de carbono. A transmissividade depende da distância entre o detector e o objeto. Quanto maior for essa distância, menor será a transmissividade do ar. A termografia é realizada em janelas de comprimentos de onda situadas de 3 μm a 5 μm e 8 μm a 14 μm . Tais janelas representam os

comprimentos de onda para os quais a transmissividade do ar é maior, conforme mostra a Figura 3.1.

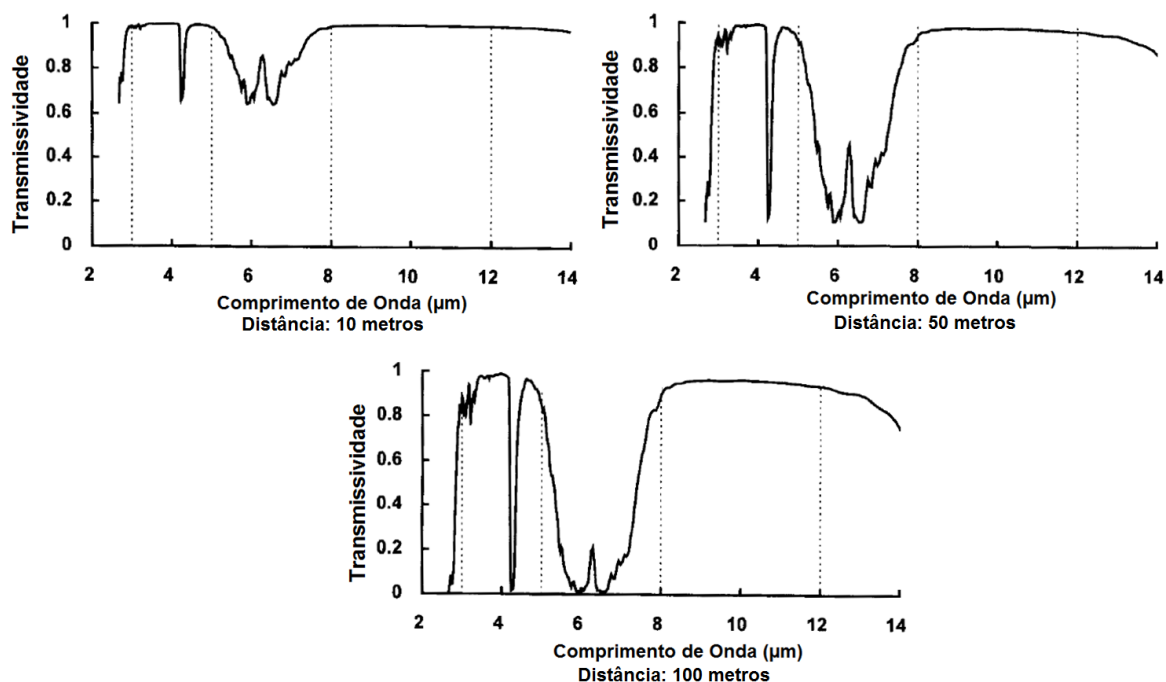


Figura 3.1 - Transmissividade do ar para distâncias de 10, 50 e 100 metros

Fonte: adaptado de (HOLST, 2000)

Vale ressaltar que todas as propriedades discutidas apresentam dependência do comprimento de onda. Além disso, a umidade do ar também pode acarretar aumento no processo de arrefecimento dos equipamentos e introduzir erros significativos nas medições. Portanto, recomenda-se a não realização de inspeções em condições de chuva ou nevoeiro.

3.3.4 Carregamento

A condição de carga e sua variação durante a realização da inspeção são informações cruciais para a determinação do estado de degradação dos equipamentos. A temperatura tem forte relação com o carregamento do equipamento, uma vez que um aumento na potência dissipada acarreta elevação da temperatura superficial.

Para alguns equipamentos, o risco de falha é crítico quando a carga no sistema é máxima. Portanto, as inspeções não devem ser realizadas caso o carregamento do sistema seja muito reduzido, sob penalidade de subestimação das anomalias. Ainda,

é desejável que o acompanhamento do estado de cada equipamento seja feito sob condições semelhantes de carga.

3.3.5 Temperatura ambiente

A temperatura ambiente exerce grande influência nos resultados das medições. De forma geral, um aumento na temperatura ambiente reflete em um aumento na temperatura de cada componente. Deve-se observar que ao realizar inspeções com temperatura ambiente reduzida os sintomas das anomalias também tendem a ser atenuados, portanto sua severidade pode acabar subestimada. Conforme já mencionado, em temperaturas mais elevadas o risco de falha dos equipamentos é maior.

3.3.6 Emissividade

A radiação infravermelha emitida por um corpo está relacionada à sua emissividade, sendo que esse parâmetro deve ser fornecido à câmera térmica para aquisição dos termogramas. A escolha errônea do valor de emissividade pode acarretar medições equivocadas de temperatura. Um fato comum é a utilização de um valor único para todos os equipamentos da subestação. Nessa situação, a medição de temperatura tanto dos objetos que possuem alta quanto dos que possuem baixa emissividade não apresentará resultados condizentes com a realidade.

3.3.7 Temperatura média refletida

O parâmetro que considera a radiação da vizinhança refletida pelo objeto focado e captada pela câmera térmica é a temperatura média refletida. Esse parâmetro também considera a radiação emitida pela atmosfera entre o detector e o alvo. O erro em sua estimativa subtrai ou credita ao objeto uma quantidade indevida de radiação, comprometendo a temperatura medida. Usualmente, os inspetores consideraram a temperatura média refletida igual à temperatura ambiente.

Pode-se afirmar que os três últimos fatores mencionados (temperatura ambiente, emissividade e temperatura média refletida) são caracterizados como importantes fontes de erro na medição de temperatura por termografia.

3.4 O início dos problemas

Anos após a popularização e sedimentação da termografia, verifica-se que uma avaliação qualitativa aliada ao empirismo tipicamente empregado ao setor de manutenção representa uma brecha que pode ser significativa para a gestão de ativos. Valores referentes à periodicidade das inspeções, ao prazo para retirada dos equipamentos considerados defeituosos e até mesmo às referências utilizadas para classificação do estado de degradação dos ativos estão em xeque. Torna-se necessário, portanto, investir no estudo dos equipamentos monitorados pela termografia e determinar de forma menos subjetiva sua condição de operação.

Outro ponto bastante importante é a padronização das inspeções e a melhor qualificação dos profissionais que avaliarão os dados obtidos em campo. A escolha das faixas de criticidade, caracterização das falhas e os fatores de influência ainda fazem parte de uma área pouco explorada e carente de atenção.

Uma nova direção para a ampliação das dimensões da manutenção preditiva está alicerçada na automatização das inspeções e na análise dos dados obtidos. O monitoramento automático de subestações de energia permite avaliações com maior frequência, padronizadas e com menor custo operacional. Além disso, a análise torna-se menos subjetiva, simplificando as tomadas de decisão e, conseqüentemente, a gestão de ativos.

3.5 Automação das inspeções

As inspeções periódicas são a base em que a manutenção está atualmente fundamentada. No entanto, elas são, muitas vezes, realizadas sem a frequência necessária e em condições inadequadas¹², por motivos relacionados à praticidade, falta de pessoal e custo.

Entretanto, o sucesso da manutenção não depende somente da frequência de inspeções em uma subestação. A qualidade das informações obtidas é fundamental para que os diagnósticos referentes às condições dos equipamentos sejam assertivos e as intervenções sejam realizadas no período mais propício.

¹² Condições inadequadas são caracterizadas pela violação das premissas adotadas como fundamentais para uma boa inspeção.

Conforme tratado na Seção 3.3, diversos fatores podem influenciar na qualidade das inspeções, especialmente nas inspeções termográficas. A carga do sistema, condições climáticas, emissividade dos equipamentos, distância e ângulo das imagens são pontos críticos que devem ser observados durante a aquisição dos dados. Quando as inspeções são executadas por inspetores, tais dados ainda estão sujeitos a ocasionais relaxamentos e até mesmo descuidos, e sua análise pode ser tratada com certa subjetividade.

3.5.1 Automação da manutenção em subestações

Se por um lado a automação da operação de subestações está em um avançado estágio de desenvolvimento, coerente com as necessidades impostas pelo sistema (FERREIRA, 2007), a automação da manutenção ainda se encontra em estado inicial. No entanto, impulsionada pela evolução da tecnologia e pelos motivos apresentados anteriormente, esse tipo de automação, aplicada ao monitoramento de equipamentos em subestações de energia tornou-se uma alternativa interessante e plausível, passando a ser objeto de diversas pesquisas.

Inicialmente, os equipamentos foram abordados de forma individualizada, isto é, não se pensava no dispositivo como parte de um todo (BERGMAN, 1999). O estudo do comportamento e modos de falha de transformadores, conexões e para-raios deram o subsídio necessário para a implantação dos primeiros sistemas de monitoramento. Tais sistemas eram responsáveis por coletar informações sobre os equipamentos (quantidade de gás presente no óleo de transformadores e correntes de fuga de para-raios, por exemplo) e disponibilizá-las apenas localmente para o responsável por sua análise.

A experiência das equipes de manutenção e os procedimentos de monitoramento passaram a ser sistematizados e uma base de dados com as informações e histórico dos equipamentos tornou-se disponível. Tomando como guia o caso específico dos para-raios, foram desenvolvidas técnicas e diversos equipamentos para analisar suas condições operativas. Assim, essas técnicas e equipamentos se tornaram parte integrante da rotina de manutenção (ARAÚJO, MARTINS e SILVA, 2006).

Após diversos projetos de pesquisa e estudos sobre o processo de aquisição de imagens no infravermelho, um avanço em direção à automatização das inspeções foi obtido com o desenvolvimento de um sistema capaz de monitorar um conjunto de para-raios em subestações (SILVINO, *et al.*, 2010). A concepção deste sistema contempla uma câmera digital e uma câmera térmica acopladas em uma plataforma capaz de se movimentar nas direções horizontal (Pan) e vertical (Tilt). A utilização de duas câmeras se dá pela necessidade de identificação do alvo e sua segmentação no termograma. É importante ressaltar que os termogramas não apresentam compromisso com a forma dos objetos, mas sim com sua temperatura superficial. A operação é autônoma e as informações obtidas são processadas por um computador local.

De maneira simplificada, o sistema realiza uma varredura em busca de para-raios, lançando mão de algoritmos de *template matching*¹³ até que todos os equipamentos de interesse tenham sido identificados e seus respectivos termogramas adquiridos. Cada termograma é segmentado de acordo com sua foto correspondente e o algoritmo de avaliação e detecção de anomalias é executado. Tal algoritmo considera os mesmos critérios de avaliação que seriam utilizados por um inspetor e emite um relatório sobre o estado de cada um dos dispositivos. A Figura 3.2 apresenta um desenho esquemático do protótipo desenvolvido.

¹³ Método de identificação e reconhecimento que compara uma imagem padrão com uma cena.

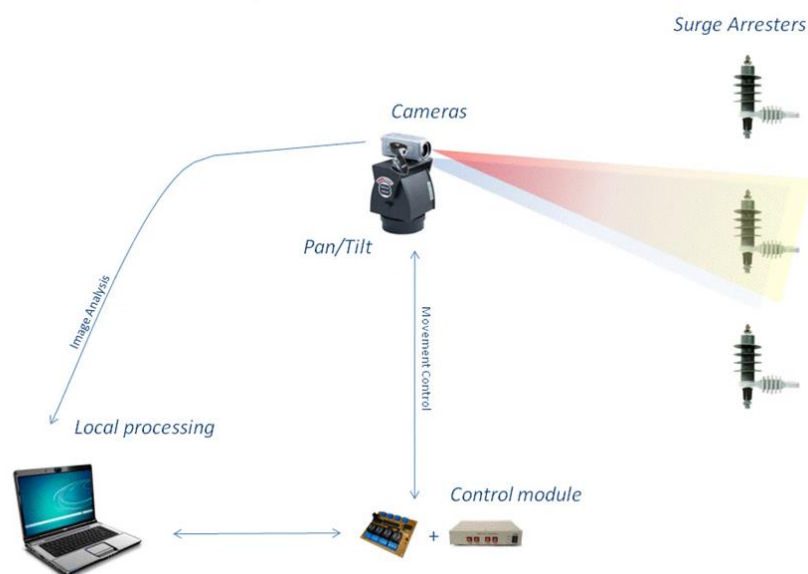


Figura 3.2 - Sistema de Monitoramento Autônomo para Para-Raios

Fonte: (SILVINO, *et al.*, 2010)

Apesar dos bons resultados e ótima repercussão do projeto, suas limitações eram bastante claras. Somente para-raios seriam monitorados e, ainda assim, apenas os que estivessem próximos e dentro do campo de visão da plataforma. O potencial da inspeção autônoma foi demonstrado, porém suas possibilidades ainda não haviam sido totalmente exploradas. Os custos para implantação de um sistema de monitoramento exclusivo para para-raios não justificaria o investimento, trazendo a necessidade do desenvolvimento de outras soluções.

Utilizando-se da versatilidade das câmeras térmicas é possível expandir o leque de equipamentos monitorados pelo mesmo sistema autônomo. Para tanto, necessita-se de uma plataforma capaz de se deslocar dentro da subestação a fim de obter termogramas de todos os ativos de interesse. Para que o sistema seja viável, também é necessário desenvolver soluções para sua locomoção, alimentação, comunicação, reconhecimento de ativos e central de processamento de dados.

Estas ideias também passaram a ser consideradas em outros locais do globo. O desenvolvimento de um robô, chamado *SmartGuard*, para inspeção de equipamentos em subestações chinesas, tem mostrado a viabilidade do monitoramento autônomo de subestações (WANG, *et al.*, 2012). O robô, que se movimenta pelo chão e é alimentado por bateria, pode ser guiado por sensores

magnéticos, visão computacional e Sistema de Posicionamento Global (GPS). Quando em funcionamento, o *SmartGuard* se desloca até pontos predeterminados e utiliza um sistema *pan/tilt* para posicionar as câmeras e coletar as imagens que são transmitidas via comunicação *wireless* para uma central de processamento. O sistema de visão é composto por uma câmera digital e uma câmera térmica. A Figura 3.3 ilustra o sistema em funcionamento.



Figura 3.3 - *SmartGuard* em subestações na China

Fonte: (WANG, *et al.*, 2012)

Outra alternativa, desenvolvida no Brasil, traz um robô contendo uma câmera digital e uma câmera térmica suspenso nas extremidades da subestação por meio de cabos de aço (PINTO, *et al.*, 2008). O deslocamento do robô é feito por um motor em corrente contínua controlado por um microcontrolador e a movimentação das câmeras é realizada por uma plataforma *pan/tilt*. A transmissão dos dados é feita através de uma conexão de rede sem fio. A Figura 3.4 apresenta o sistema desenvolvido.



Figura 3.4 - Robô suspenso para monitoramento de subestações

Fonte: (PINTO, *et al.*, 2008)

A primeira proposta apresenta desvantagens quando aplicada à realidade das subestações brasileiras. Muitas vezes construídas em terrenos irregulares e também apresentando instalações de difícil locomoção, o deslocamento do *SmartGuard* estaria comprometido. A alimentação por bateria também pode apresentar problemas em caso de imprevistos ocorridos no percurso, desgaste e necessidade de substituição periódica. A segunda opção apresentada é de fácil implementação e boa relação custo-benefício. A alimentação por cabos torna a proposta mais frágil e a distância do sistema para os equipamentos que serão monitorados aparenta ser um empecilho para o bom desempenho do conjunto.

No trabalho apresentado em (KATRASNIK, PERNUS e LIKAR, 2010), os autores descrevem a tarefa de inspecionar uma linha como lenta, tediosa, monótona e subjetiva quando feita por um ser humano. Já a inspeção via helicóptero se caracteriza pelo alto custo e baixa eficiência. O trabalho traz, ainda, um resumo dos feitos na área de inspeção por robôs móveis e uma comparação entre as inspeções em linhas de distribuição e transmissão realizadas por veículos aéreos não tripulados e robôs escaladores. Por fim, observa-se maior complexidade e baixa autonomia nos robôs voadores e o direcionamento do foco das pesquisas no desenvolvimento de robôs escaladores.

Apesar do direcionamento para linhas de distribuição e transmissão, os conceitos discutidos em (KATRASNIK, PERNUS e LIKAR, 2010) também são relevantes para o ambiente de uma subestação. A aplicação de veículos aéreos para a inspeção de subestações não é plausível devido ao custo envolvido e o pequeno tamanho das instalações. Além disso, existem subestações abrigadas que impediriam a utilização de tais veículos. Os robôs escaladores são bastante interessantes, mas devem sofrer modificações radicais para serem utilizados dentro da proposta de monitoramento de subestações. Uma modificação crítica seria a forma de locomoção devido à complexidade da disposição dos equipamentos nesse novo ambiente de operação. Finalmente, a tarefa de inspeção de uma subestação pode ser tão enfadonha quanto a de uma linha de transmissão.

Os projetos apresentados nesta seção se assemelham por se concentrarem nas tarefas construtivas e práticas das soluções. Não são discutidos os equipamentos monitorados, muito menos suas características e critérios de avaliação. Para tanto, um estudo aprofundado sobre cada ativo de interesse precisa ser conduzido e o sistema de monitoramento deve ser capaz de lidar com todas as informações necessárias para seu diagnóstico.

3.5.2 Novos desafios

Buscando uma abordagem mais coesa para a automação do monitoramento de subestações no Brasil, iniciou-se o desenvolvimento de um sistema autônomo de alta confiabilidade metrológica e operacional para monitoramento online de ativos de subestações. Tal sistema utilizará tecnologias de aquisição, tratamento e processamento de imagens no visível para monitoramento patrimonial e no espectro infravermelho para diagnóstico e análise de tendência de falhas de ativos.

Os pontos fundamentais para o sucesso de um projeto com a ambição de executar o monitoramento global dos equipamentos de uma subestação encontram-se na leveza e eficiência de sua construção, disponibilidade de uma base de dados mais completa possível sobre metodologias de inspeção e características dos ativos que serão inspecionados e capacidade de integração com os sistemas já instalados. Tal integração permitirá o acesso on-line às informações de carregamento, histórico do ativo e outros dados relevantes para um diagnóstico conclusivo.

O sistema, mostrado na Figura 3.5, encontra-se hoje em sua primeira versão e contempla as etapas de desenvolvimento necessárias à elaboração do primeiro protótipo e conseqüente cabeça de série. Seu deslocamento se dá por um percurso de trilhos (instalados nas estruturas de suporte dos equipamentos) que são energizados com 24 V e contemplam toda a instalação. A posição absoluta da plataforma será dada por sensores de posicionamento espalhados ao longo do caminho e sua posição relativa por *encoders*¹⁴ instalados em suas rodas.

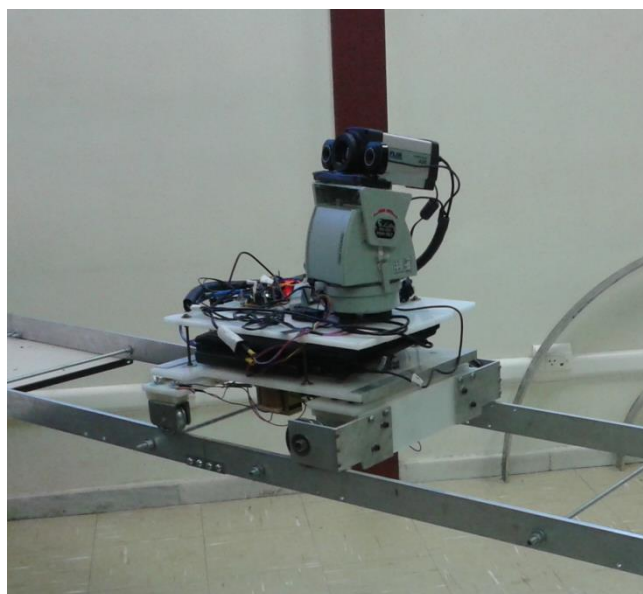


Figura 3.5 - Concepção da primeira versão de um sistema para monitoramento de subestações

Um dispositivo pan/tilt é o responsável pelo direcionamento de duas câmeras digitais e uma câmera térmica que compõe um módulo de visão computacional estéreo e híbrido. Esse módulo é capaz de se calibrar automaticamente (URSINE, *et al.*, 2012), removendo distorções e determinando a correspondência entre cada ponto das imagens, e realizar a identificação dos ativos e suas respectivas segmentações nos termogramas (CALADO, *et al.*, 2012). A escolha das câmeras é baseada em fatores como resolução espacial, capacidade de visão noturna e protocolos de comunicação.

O módulo de controle é centrado em microcontroladores responsáveis pela leitura dos sensores de posicionamento e *encoders*, controle de posição da plataforma

¹⁴ Dispositivos eletromecânicos que traduzem movimentos rotativos em impulsos elétricos. Fornecem medidas precisas sobre velocidade de rotação e posição angular.

e pan/tilt, controle de corrente dos motores e comunicação com a central de processamento. A Figura 3.6 apresenta o esquemático que ilustra o atual funcionamento do módulo de controle.

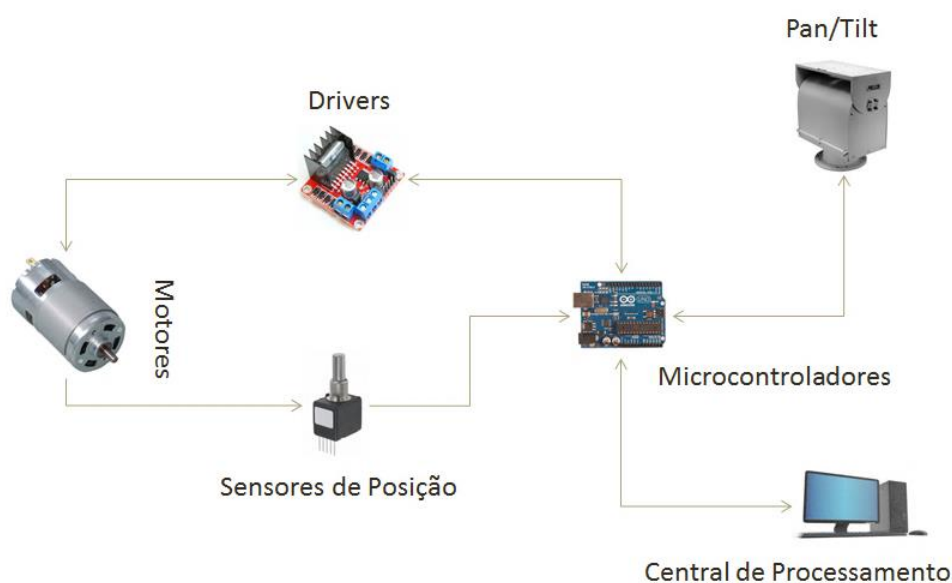


Figura 3.6 - Módulo de controle e posicionamento

O sistema ainda contará com uma grande variedade de sensores (pressão atmosférica, temperatura, velocidade do vento, umidade, etc.) para avaliação das condições ambientais. Além disso, entradas de dados auxiliares serão acopladas para permitir que o sistema adquira dados complementares ao diagnóstico realizado pela termografia, como por exemplo, corrente de fuga, contadores de descargas, nível de óleo e carregamento do sistema. Atualmente, grande parte desses dados já encontra-se disponível dentro das subestações.

Paralelamente à construção da parte física do sistema, alguns dos principais equipamentos e componentes de subestações estão sendo estudados por uma equipe multidisciplinar para que seus modos de falha, comportamento térmico e principais características operativas, juntamente com os procedimentos mais eficientes já aplicados pelas companhias, sejam inseridos nos modelos e critérios utilizados para sua avaliação. Não obstante, as incertezas associadas às medições térmicas (TEIXEIRA, 2012) e os fatores de influência estão sendo determinados para cada equipamento específico.

No presente trabalho, detalha-se o monitoramento autônomo de para-raios de óxido de zinco sem centelhadores. Tal monitoramento é baseado na termografia e também na avaliação da corrente de fuga apresentada por estes equipamentos. Além de uma compilação das técnicas de monitoramento já adotadas, avalia-se a influência dos parâmetros ambientais no caso específico de para-raios e propõe-se uma nova técnica para obtenção da sua corrente resistiva.

4 PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

O para-raios é um dispositivo de proteção contra sobretensões. Ele atua como limitador de tensão prevenindo que surtos atinjam equipamentos do sistema elétrico. Além disso, este dispositivo tem papel fundamental dentro dos programas de manutenção centrada em confiabilidade.

Idealmente, um para-raios deve se comportar como um circuito aberto (impedância infinita) na ausência de distúrbios no sistema. Na ocorrência de uma sobretensão, o dispositivo deve entrar em condução instantaneamente mantendo o nível de tensão fixo durante todo o processo. Ao fim do surto, o para-raios deve retornar à condição inicial sem perda de suas propriedades. Além disso, sua atuação não pode introduzir ruídos nem causar degradação ao sistema.

Na realidade, o para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhador apresenta uma corrente que flui continuamente entre seus terminais, denominada corrente de fuga. Além disso, suas propriedades são alteradas com o tempo e uso, caracterizando sua degradação.

Entre as vantagens da utilização de para-raios, destacam-se a melhoria dos índices de qualidade do serviço e o aumento da segurança de equipamentos e equipes de manutenção. Portanto, torna-se interessante o estudo dos aspectos construtivos, modos de falha e técnicas de monitoramento destes dispositivos.

4.1 Histórico

Desde o início das atividades de transmissão de energia observa-se a necessidade da proteção do sistema elétrico de potência contra sobretensões oriundas de diversas fontes. Nesse período (entre 1892 e 1908), tal proteção era realizada por gaps de ar (centelhadores) instalados entre fase e terra.

Apesar de sua capacidade de interrupção, o centelhador introduzia um curto-circuito no sistema durante sua operação e não era capaz de dissipar a corrente subsequente. Diversos arranjos e combinações de centelhadores, incluindo a utilização de resistores em série foram testados a fim de solucionar esse problema e também contornar a variação da tensão de interrupção com as condições ambientais (temperatura, pressão, umidade).

As pesquisas conduzidas nos anos seguintes apontaram para a utilização de materiais que apresentassem resistência não linear, capazes de limitar a sobretensão e também evitar a corrente subsequente. O primeiro material a apresentar bons resultados foi o alumínio. Em 1930, surgem os primeiros dispositivos à base de Carboneto de Silício (SiC). Nesses dispositivos, a combinação de um centelhador com um resistor não linear garantia as qualidades necessárias para sua ampla utilização, caracterizando um para-raios convencional (SAKSHAUG, 1991).

Ao final da década de 60 a Matsushita Electrical Co. Ltd. desenvolveu um dispositivo, formado por elementos cerâmicos à base de óxido de zinco (e pequenas quantidades de outros elementos), que apresentava uma relação altamente não linear entre tensão e corrente. Ainda que inicialmente destinados à proteção de circuitos eletrônicos, diversas empresas conduziram estudos para viabilizar sua utilização em sistemas de potência.

A partir de 1976, iniciou-se a produção de dispositivos à base de ZnO capazes de suportar as tensões de operação do sistema sem a necessidade de gaps. A primeira empresa a comercializar tais dispositivos foi a Meidensha Electric Manufacturing Company Ltda. A Figura 4.1 ilustra a evolução dos para-raios após a introdução dos elementos não lineares. Da esquerda para a direita, observa-se o primeiro para-raios à base de alumínio produzido pela Toshiba em 1911. Em seguida, estão mostrados dois dispositivos à base de carboneto de silício (para 33 kV e 66 kV)

produzidos em 1932. Por fim, três para-raios à base de ZnO produzidos em 1978 são apresentados.

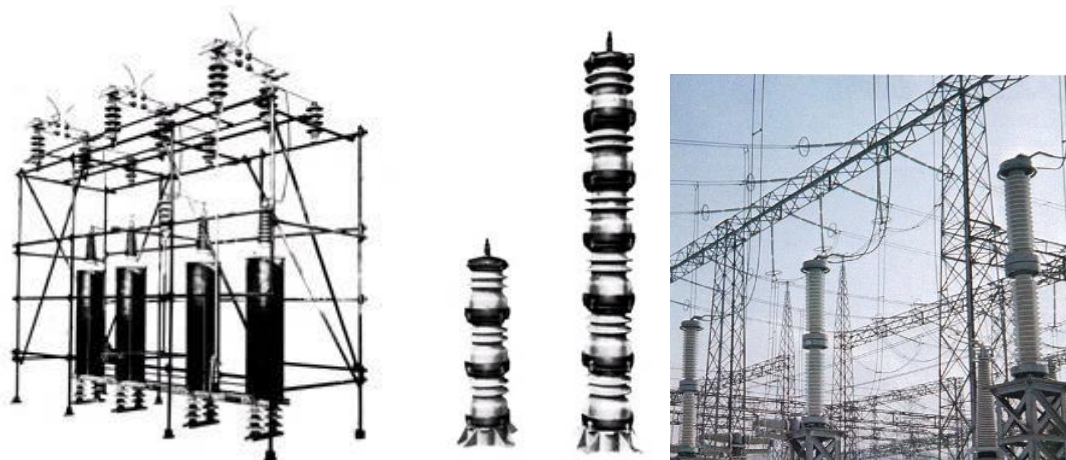


Figura 4.1 - Evolução dos para-raios à base de materiais não lineares

Fonte: adaptado de (TOSHIBA, 2013)

Até 2006, 71% dos para-raios instalados em subestações da CEMIG eram a base de SiC e o restante à base de ZnO. O tempo médio decorrido desde a instalação dos dispositivos era de 20 anos para os de Carboneto de Silício e 10 anos para os de ZnO (ARAÚJO, MARTINS e SILVA, 2006). A instalação exclusiva de para-raios à base de ZnO no caso de substituição de ativos ou em novos empreendimentos é prevista pelas equipes de manutenção.

4.2 Aspectos construtivos

Basicamente, os para-raios de ZnO são constituídos de um conjunto de varistores¹⁵ revestidos por um invólucro, que pode ser cerâmico ou polimérico. Além disso, este tipo de para-raios pode apresentar ou não centelhador. Os dispositivos utilizados em redes de distribuição que possuem centelhador vêm com invólucro cerâmico e têm corrente de descarga nominal¹⁶ de 5 kA. Os que não possuem podem ser revestidos por qualquer um dos materiais, sendo que a corrente de descarga nominal para os cerâmicos é de 5 kA e para os poliméricos de 5 kA ou 10 kA. A vida útil estimada de um para-raios é de aproximadamente 15 anos (FRANCO, 2001).

¹⁵ Termo derivado de “variable resistor”. Materiais que não obedecem à lei de Ohm.

¹⁶ Valor de crista da corrente de descarga com impulso de forma 8/20 μ s utilizada para classificação de para-raios.

4.2.1 Tipos de invólucros

Para utilização do invólucro cerâmico, os elementos de ZnO devem ser dispostos de forma a minimizar a ionização interna e dispositivos para alívio de pressão devem ser incorporados aos flanges terminais a fim de evitar a fragmentação ou explosão do dispositivo em caso de falha. Não obstante, os perfis das saias necessitam garantir uma distância de escoamento e características elétricas de invólucro compatíveis com as características de proteção do para-raios (ÁLVARES, 2008).

O projeto de para-raios com invólucro polimérico pode ser dividido em três concepções distintas (DINIZ, 2011). Na primeira (tipo moldado), o invólucro é moldado e colocado posteriormente sobre o conjunto de varistores envolto em material de fibra de vidro impregnado em resina epóxi. O espaço entre o invólucro e a fibra é normalmente preenchido com silicone. A Figura 4.2 detalha esse tipo de para-raios.



Figura 4.2 - Detalhes construtivos dos para-raios tipo moldado

Fonte: (DINIZ, 2011) apud (FRANCO, 2011)

Na segunda concepção (tipo injetado), o invólucro é injetado diretamente sobre o conjunto de varistores. Uma de suas vantagens está em dispensar a utilização de dispositivos para alívio de sobrepressão em caso de falhas. Esta concepção é utilizada pela maioria dos fabricantes.

A última forma de construção (tipo gaiola) traz os varistores fixados e montados entre as extremidades do para-raios por meio de fitas trançadas ou bastões de fibra

pré-tensionados axialmente. Tal construção apresenta elevada suportabilidade mecânica, porém necessita de maior tecnologia para sua fabricação.

4.2.2 Característica Tensão x Corrente

A relação entre a tensão e a corrente é a propriedade mais importante de um varistor. Tal relação é ditada pela organização microestrutural dos grãos de ZnO e sua região intergranular. A Figura 4.3 ilustra a microestrutura desses varistores.

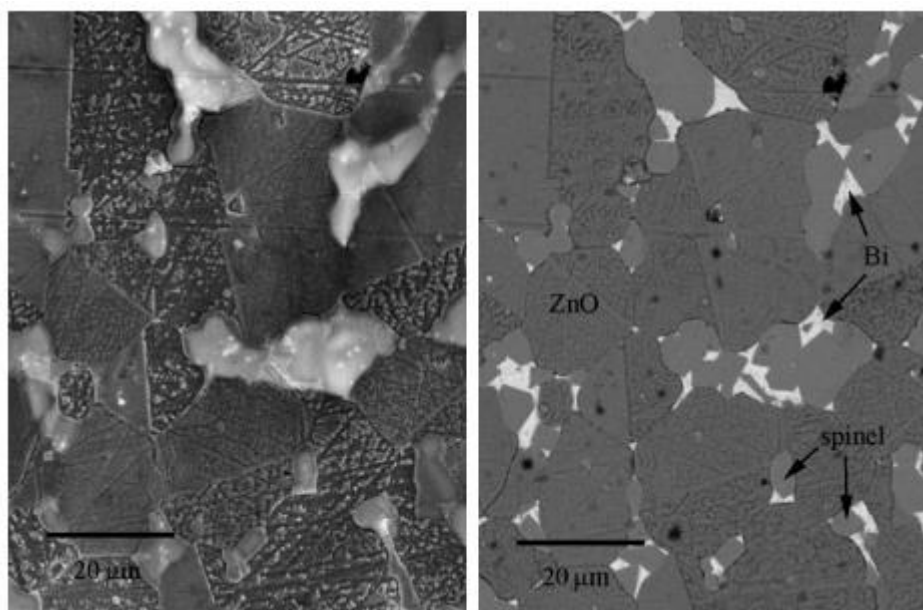


Figura 4.3 - Estrutura microscópicas do varistores de ZnO

Fonte: adaptado de (ELFWING, 2002)

O comportamento não linear dos varistores é ilustrado na Figura 4.4. Nessa figura, observa-se a existência de três regiões distintas, denominadas região de baixa corrente, região de não linearidade e região de alta corrente (ELFWING, 2002) (DINIZ, 2011) (ÁLVARES, 2008).

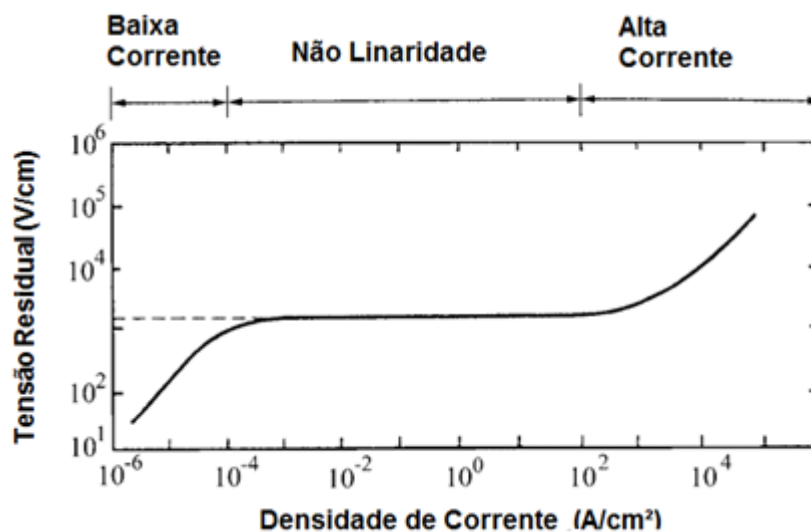


Figura 4.4 - Comportamento não linear de varistores de ZnO

Fonte: adaptado de (ELFWING, 2002)

A região de baixa corrente (ou região de pré-ruptura) caracteriza-se por uma relação próxima à linear, apresentando grande dependência da temperatura. As propriedades dessa região são ditadas pelo contorno dos grãos de ZnO e ela é limitada pela tensão nominal do varistor. Quando na região de baixa corrente, o para-raios se encontra em regime permanente e com tensão de operação entre 70% e 80% da nominal.

A região de não linearidade (ou região de ruptura) compreende densidades de corrente da ordem de 100 a 1000 A/cm², apresentando pequena variação de tensão para um grande aumento na corrente. O limite superior desta região representa a corrente nominal do para-raios e a queda de tensão no dispositivo quando percorrido por esta corrente.

Finalmente, a região de alta corrente apresenta relação linear entre a tensão e a corrente. Nesta região, o aumento de tensão é ditado pela impedância dos grãos de ZnO. Ainda, caso o dispositivo permaneça muito tempo com elevada corrente fluindo por seus terminais, pode ocorrer uma avalanche térmica ou alteração de suas características de proteção.

Curvas $V \times I$ típicas são mostradas na Figura 4.5 e na Figura 4.6.

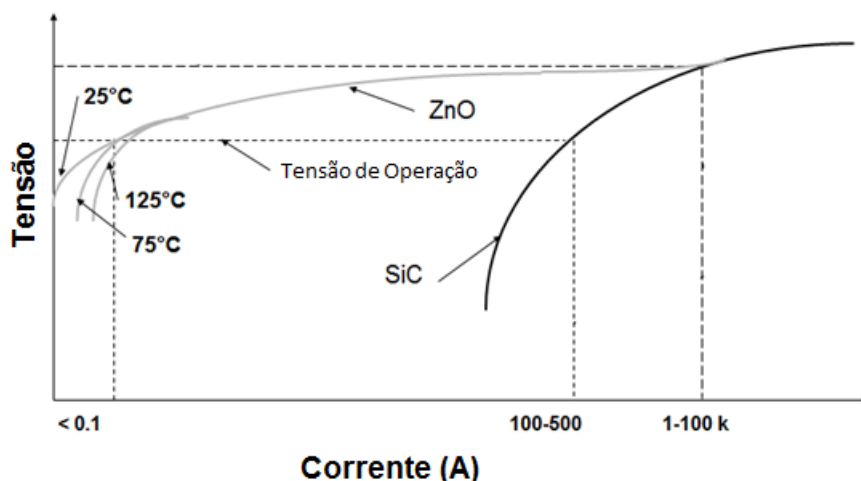


Figura 4.5 - Característica V x I típica de para-raios e sua relação com a temperatura do dispositivo

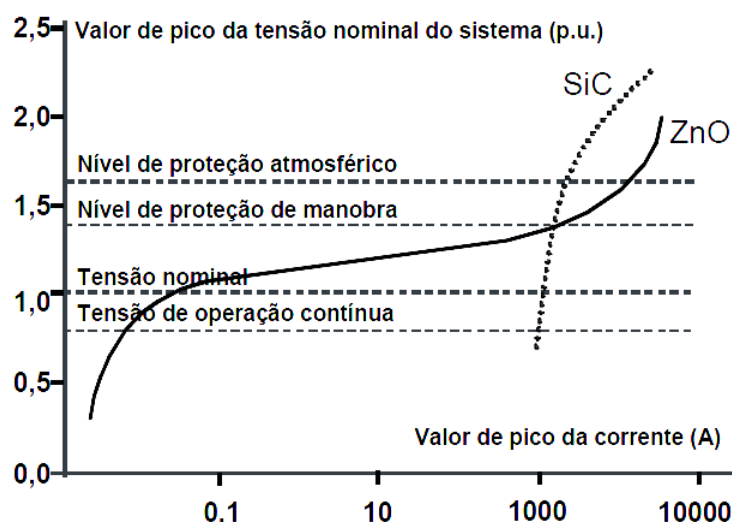


Figura 4.6 - Curva V x I típica com indicação de alguns parâmetros de interesse e níveis de proteção

Fonte: (NETO, *et al.*, 2006)

É possível observar que a corrente para a tensão de operação é pequena e bastante dependente da temperatura nos dispositivos de ZnO. Além disso, esses dispositivos apresentam uma região de não linearidade com pequena inclinação, ou seja, pequena variação de tensão. Já os para-raios de SiC, caso não utilizassem centelhadores, seriam percorridos por uma corrente consideravelmente alta. Sendo assim, tais dispositivos não possuem uma característica não linear suficiente para operarem sem centelhadores. Outro ponto interessante é a grande variação da tensão na região de não linearidade desses dispositivos.

4.2.3 Principais parâmetros

Os critérios de seleção e os principais parâmetros de um para-raios de ZnO estão descritos em (IEC, 2000) e (FRANCO, 2001). Tais parâmetros são resumidos a seguir.

- **Tensão nominal:** máximo valor eficaz de tensão permitido entre os terminais do para-raios para que ele continue funcionando de acordo com suas características de projeto durante o ensaio de ciclo de operação.
- **Corrente de descarga nominal:** valor de pico de uma corrente de descarga na forma 8/20 μ s utilizada para classificação do dispositivo.
- **Tensão máxima de operação:** maior valor eficaz de tensão em 60 Hz que um para-raios é projetado para operar continuamente.
- **Capacidade de absorção de energia:** quantidade de energia que um para-raios é capaz de absorver e dissipar durante um surto sem alteração de suas características de projeto.
- **Tensão residual:** tensão nos terminais de um para-raios devido à passagem de corrente de descarga. Utilizada para definição das características de proteção oferecidas pelo dispositivo.

Os critérios de seleção de para-raios compreendem a corrente de descarga nominal, classe de descarga de correntes de longa duração (relacionada à manobras de linhas de transmissão) e classe de alívio de sobrepressão (relacionada à capacidade de suportar correntes de falta após eventual falha do para-raios sem que haja fragmentação).

4.3 Fatores de degradação

O processo de modificação das propriedades iniciais e consequente alteração das características de funcionamento e capacidade de proteção fornecida pelo para-raios é denominado degradação. Após a instalação, o para-raios é submetido a diversos fatores capazes de propiciar sua degradação mesmo em condições normais de operação (ARAÚJO, MARTINS e SILVA, 2006) (HEINRICH e HINRICHSEN, 2001) (AKBAR e AHMAD, 1999).

Os fatores mais significativos no que concerne à deterioração do para-raios são as sobretensões, condições ambientais e a própria tensão de operação. No último

caso, o estresse causado por estar constantemente submetido à tensão de serviço é traduzido no aumento da corrente de fuga e, conseqüentemente, no aumento de sua temperatura (efeito Joule). Apesar de lento, esse processo pode ocasionar uma avalanche térmica¹⁷. A figura 2.3 apresenta os resultados de estudos realizados por algumas empresas para a identificação das principais causas de falha em para-raios.

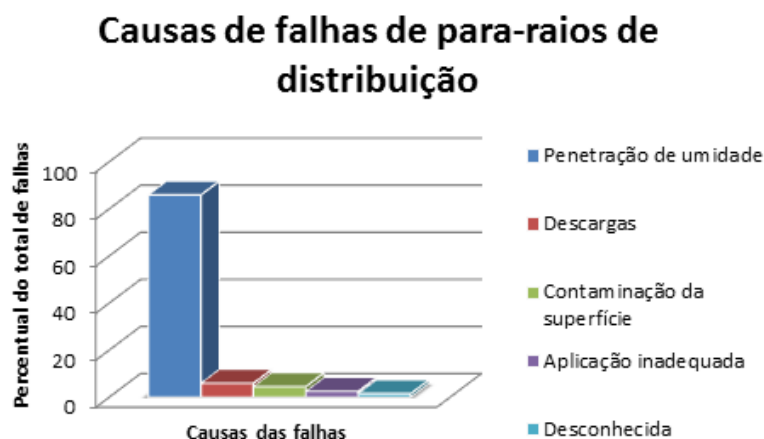


Figura 4.7 - Resumo dos resultados obtidos na identificação das causas de falha em para-raios de distribuição

Fonte: adaptado de (FRANCO, 2001)

As sobretensões podem ser temporárias, de longa duração e baixa intensidade (manobras) ou rápida duração e alta intensidade (descargas atmosféricas). As sobretensões temporárias e de manobra podem causar perfurações, quebras e descargas superficiais. Já as descargas atmosféricas, devido à sua maior intensidade, ainda causam a modificação da característica *tensão x corrente* dos blocos de varistores. Não obstante, a capacidade de absorção de energia do para-raios é afetada.

O depósito de resíduos na superfície do invólucro e a penetração de umidade são os fatores ambientais mais significativos na degradação do para-raios. Na primeira situação, origina-se uma distribuição de tensão não uniforme na superfície do invólucro devido ao aumento da corrente superficial. Tal fato gera aquecimento e envelhecimento dos blocos de ZnO. Além disso, também ocorre a ionização interna do dispositivo, que pode gerar descargas internas e alterar a composição química dos elementos de preenchimento. Uma alteração comum é a diminuição do oxigênio, que

¹⁷ Processo cíclico em que a corrente de fuga aumenta com a temperatura e a temperatura aumenta com a corrente de fuga até a ocorrência de falha no dispositivo.

causa significativas mudanças na característica *tensão x corrente*. A Figura 4.8 mostra o desgaste superficial provocado pelo acúmulo de poluição no invólucro dos para-raios.



Figura 4.8 - Deterioração de um para-raios devido ao depósito de resíduos em sua superfície

Fonte: (NETO, 2007) apud (CHRZAN, 2003)

A penetração de umidade é a maior causa de falhas em para-raios (ÁLVARES, 2008) apud (SCHEI & FRANCO, 1988). As consequências desse processo são a condensação de vapor d'água e a corrosão dos componentes metálicos. Adicionalmente, a presença de umidade altera a relação *tensão x corrente*, aumenta a corrente resistiva¹⁸, compromete o isolamento externo e reduz a capacidade de absorção de energia. A Figura 4.9 apresenta o resultado da penetração de umidade devido à falha na vedação de um para-raios.

¹⁸ Parcela da corrente de fuga responsável pelas perdas ôhmicas e consequente aquecimento do para-raios.



Figura 4.9 - Corrosão das partes metálicas de um para-raios devido à penetração de umidade

Fonte: adaptado de (NETO, 2007)

A Figura 4.10 ilustra os efeitos da degradação por sobretensão e redução de oxigênio. Nessa figura, o eixo das abscissas é dado pela razão entre a tensão aplicada e a tensão de operação.

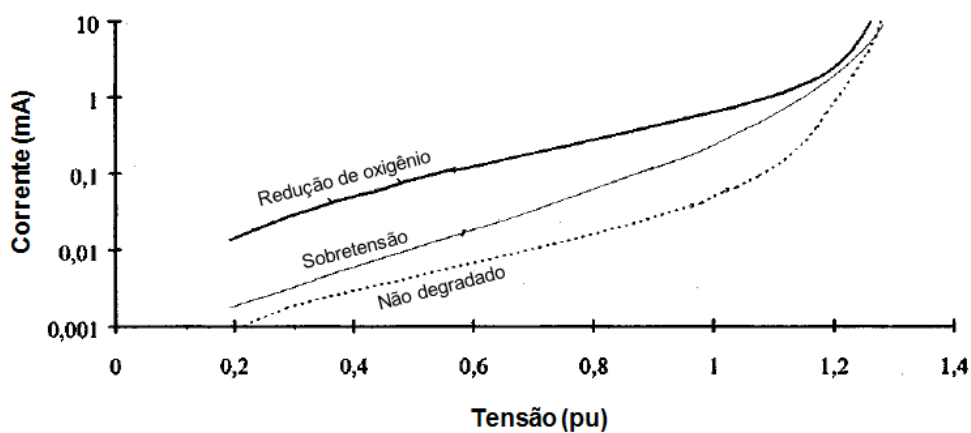


Figura 4.10 - Comparativo do resultado da degradação de um para-raios por redução de oxigênio e sobretensão na corrente que flui pelos terminais de um para-raios

Fonte: adaptado de (HEINRICH e HINRICHSEN, 2001)

4.4 Corrente de Fuga

Uma vez que são usualmente ligados entre uma fase e o terra, os para-raios de ZnO sem centelhadores apresentam uma corrente que flui continuamente entre seus terminais mesmo em condições normais de operação. Esta corrente é chamada corrente de fuga e seu valor pode variar de microampères até alguns ampères.

A corrente de fuga total (I_t) é composta por uma componente capacitiva (I_c) e uma componente resistiva (I_r). Esta última, denominada corrente resistiva, é muito pequena em relação à primeira, denominada corrente capacitiva, fazendo com que a corrente total seja predominantemente capacitiva. A medição dessas correntes pode ser feita com o equipamento em pleno funcionamento (*online*) ou retirando-se o equipamento de operação e energizando-o com uma fonte de tensão externa (*offline*).

A corrente capacitiva é causada pela permissividade dos grãos de ZnO e capacitâncias parasitas. Para tensão de operação, seu valor de pico varia entre 0,2 mA e 3 mA, dependendo dos parâmetros do para-raios utilizado. Tipicamente, o valor da capacitância de um para-raios está dentro da faixa entre $60 \text{ pF} * \text{kV}/\text{cm}^2$ e $150 \text{ pF} * \text{kV}/\text{cm}^2$ (IEC, 2000).

A corrente resistiva é a componente que se encontra em fase com a tensão aplicada ao para-raios. Portanto, seu valor de pico, usualmente entre 50 μA a 250 μA , é atingido quando a tensão está no máximo. Tais valores são referentes ao para-raios a uma temperatura de 20°C (LUNDQUIST, *et al.*, 1990). Esta corrente é, ainda, a responsável pelo aquecimento do para-raios por efeito Joule.

Não existem evidências de que a corrente capacitiva seja modificada devido à degradação do dispositivo. Por outro lado, a corrente resistiva é um bom indicador de mudanças em suas características. O envelhecimento dos para-raios é seguido de um aumento gradual nessa parcela da corrente de fuga. Fato posto, a corrente resistiva passou a ser utilizada no monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO.

Apesar de não necessitarem de manutenção após a instalação, o monitoramento periódico dos para-raios é fundamental para a gestão dos ativos. Por razões econômicas, práticas e de segurança, é desejável que a medição da corrente de fuga

e de suas parcelas, quando aplicada à manutenção, seja sempre realizada de forma *online*.

4.5 Modelo elétrico

Um modelo simplificado, mostrado na Figura 4.11, pode ser utilizado para o estudo do para-raios e sua corrente de fuga.

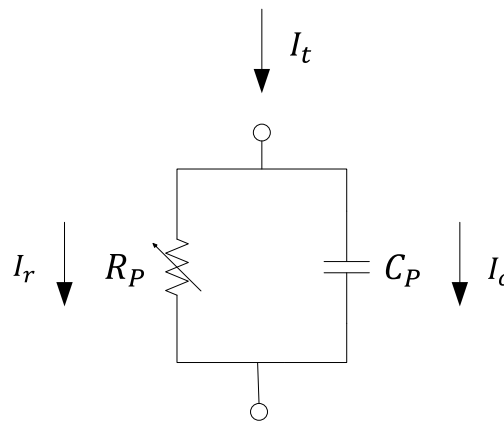


Figura 4.11 - Modelo elétrico de um para-raios

Fonte: adaptado de (LUNDQUIST, *et al.*, 1990)

Nesse modelo, R_p representa a resistência não linear da região intergranular e C_p a capacitância formada pelos grãos de ZnO. Observa-se que a corrente de fuga total (I_t) é formada pela soma da corrente resistiva (I_r) com a corrente capacitiva (I_c), conforme Equação 4.1.

$$I_t = I_r + I_c$$

Equação 4.1

Apesar de muitos trabalhos importantes na área utilizarem tal modelo, existem outras formas de representar um para-raios (HOLZER e ZAPSKY, 1999) (FONSECA, *et al.*, 2011). Adicionalmente, os problemas do modelo aqui apresentado e sua exatidão são discutidos em (ZHU e RAGHUVVEER, 2001).

4.6 Monitoramento e diagnóstico

O ponto chave para aplicação do conhecimento do comportamento e das propriedades do para-raios é seu monitoramento e diagnóstico. Nesta área, teoria e prática se unem para elaboração de métodos e procedimentos que possam determinar o estado de degradação desse dispositivo e sua vida útil restante. Enquanto a termografia se preocupa com as anomalias térmicas consequentes do envelhecimento dos para-raios, a análise da corrente de fuga considera o reflexo desse envelhecimento na corrente resistiva.

As técnicas predominantes no monitoramento de para-raios são a medição da corrente de fuga pelo método da compensação e a termografia. Ambas estão disponíveis comercialmente e oferecem ferramentas confiáveis e exaustivamente testadas em campo. A norma internacional IEC 60099-5 (IEC, 2000) divide os métodos para análise da corrente de fuga em três grupos que serão discutidos a seguir.

4.6.1 Medição direta da corrente resistiva

O primeiro método (A1) de medição direta consiste na utilização da tensão aplicada ao para-raios para a determinação do momento em que esta é máxima e, conseqüentemente, a corrente resistiva está em seu valor de pico. Este método é comumente utilizado em laboratório devido à dificuldade de obtenção da tensão aplicada ao dispositivo ainda em serviço.

O segundo método (A2) utiliza uma ponte de alta tensão (HV Bridge) constituída de resistores e capacitores e ligada em paralelo ao para-raios. Essa ponte é responsável por anular (compensar) a corrente capacitiva e garantir que apenas a parte resistiva será lida na base do dispositivo. Apesar de eliminar boa parte da componente capacitiva, ainda restarão vestígios na corrente final. As limitações de aplicação são as mesmas do primeiro método.

O terceiro método (A3) é caracterizado pela utilização de um sinal sintético de tensão. Nesse caso, um sinal de características semelhantes (frequência e amplitude) ao que seria encontrado no para-raios substitui a tensão real na obtenção da corrente resistiva.

O último método (A4) deste grupo propõe que, quando somadas, as correntes capacitivas e a componente fundamental da corrente resistiva das três fases se anulam. Assim, o resultado traria o conteúdo harmônico da corrente resistiva sem a necessidade de medição da tensão. Esse método somente é aplicável aos circuitos idealmente simétricos e sem a presença de harmônicos na tensão.

4.6.2 Medição indireta da corrente resistiva

O primeiro método (B1) do grupo de medição indireta considera que todos os harmônicos contidos na corrente de fuga total são gerados pela não linearidade dos varistores. Portanto, os harmônicos seriam dependentes da magnitude da corrente resistiva. Geralmente, utiliza-se o terceiro harmônico (considerado o harmônico predominante na corrente resistiva) para determinar tal magnitude a partir de suas relações determinadas em laboratório ou fornecidas pelo fabricante.

Apesar de ser um método simples e de fácil implementação, é ingênuo considerar a ausência de conteúdo harmônico na tensão. Tal fato pode levar a erros consideráveis e comprometer os resultados da medição. Segundo (HEINRICH e HINRICHSEN, 2001), a presença de 1% de distorção harmônica na tensão pode acarretar um erro de 100% na medição.

A análise de terceiro harmônico com compensação de tensão é o segundo método (B2) deste grupo. Neste método, descrito em (LUNDQUIST, *et al.*, 1990), uma antena de campo é utilizada para compensar os harmônicos introduzidos pela tensão na corrente de fuga. Assim, somente os harmônicos produzidos pelos varistores estarão presentes na medição. A Figura 4.12 ilustra a medição da corrente resistiva pelo método B2.

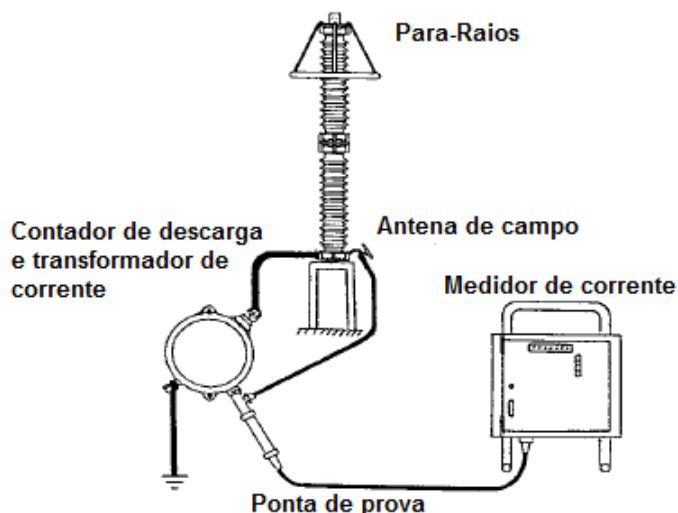


Figura 4.12 - Esquemático do equipamento para medição pelo método da compensação de harmônicos

Fonte: adaptado de (LUNDQUIST, *et al.*, 1990)

O terceiro harmônico da corrente resistiva é dado pela Equação 4.2.

$$I_{3r} = I_{3t} - 0,75 * \frac{I_{1t}}{I_{1p}} * I_{3p}$$

Equação 4.2

A Tabela 4.1 descreve os termos da Equação 4.2.

Tabela 4.1 - Descrição dos termos da Equação 4.2

Termo	Descrição	Unidade
I_{3r}	Terceiro harmônico da corrente resistiva	A
I_{3t}	Terceiro harmônico da corrente de fuga total	A
I_{1t}	Componente fundamental da corrente de fuga total	A
I_{1p}	Componente fundamental da corrente na antena de campo	A
I_{3p}	Terceiro harmônico da corrente na antena de campo	A

[A] Ampère

A relação entre a magnitude do terceiro harmônico (I_{3r}) e a componente fundamental da corrente resistiva (I_{1r}) é dada pela Equação 4.3.

$$I_{1r} \approx 4 * I_{3r}$$

Equação 4.3

No último método (B3) deste grupo, a corrente resistiva é obtida através de processos de filtragem e integração da corrente de fuga total. No entanto, tal processo também depende da obtenção dos valores de tensão aplicados ao para-raios.

4.6.3 Medição direta das perdas de potência

As perdas de potência (método C) podem ser definidas como a integral do produto dos valores instantâneos da tensão e da corrente de fuga divididos pelo tempo. Elas também podem ser expressas em razão dos valores eficazes da tensão e da corrente resistiva. A influência dos harmônicos é bastante reduzida pelos processos de multiplicação e divisão.

Os dados obtidos pelos métodos discutidos devem ser comparados com as informações fornecidas pelo fabricante para avaliação do estado do dispositivo. A tensão de operação, bem como a temperatura ambiente, também deve ser levada em consideração. A Tabela 4.2 apresenta um resumo comparativo entre os métodos, avaliando sua sensibilidade a diversos fatores e sua eficiência.

Tabela 4.2 - Comparativo entre os diversos métodos de análise da corrente de fuga

	Sensibilidade			Eficiência	
	Harmônicos na tensão	Fases Adjacentes	Corrente Superficial	Qualidade das informações	Complexidade
A1	**	***	***	**	***
A2	**	***	***	**	***
A3	**	***	***	**	*
A4	***	***	***	*	*
B1	***	*	*	**	*
B2	*	*	*	***	**
B3	*	***	***	**	***
C	*	***	***	**	***

Legenda: * - Baixa ** - Média *** - Alta

Fonte: adaptado de (IEC, 2000)

Deseja-se que o método seja pouco sensível aos fatores apresentados, que suas informações sejam de alta qualidade e seu funcionamento e utilização sejam de baixa complexidade. Outras discussões sobre esses métodos podem ser encontradas em (HEINRICH e HINRICHSEN, 2001) e (HINRICHSEN, 1997).

4.6.4 Outros métodos

Diversos métodos foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos e não se encontram descritos na norma IEC 60099-5 nem são utilizados comercialmente, porém apresentam potencial para maiores estudos e desenvolvimento.

A Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 ilustram os métodos propostos por (LEE e KANG, 2005), (NETO, *et al.*, 2006) e (XU, *et al.*, 2013), respectivamente.

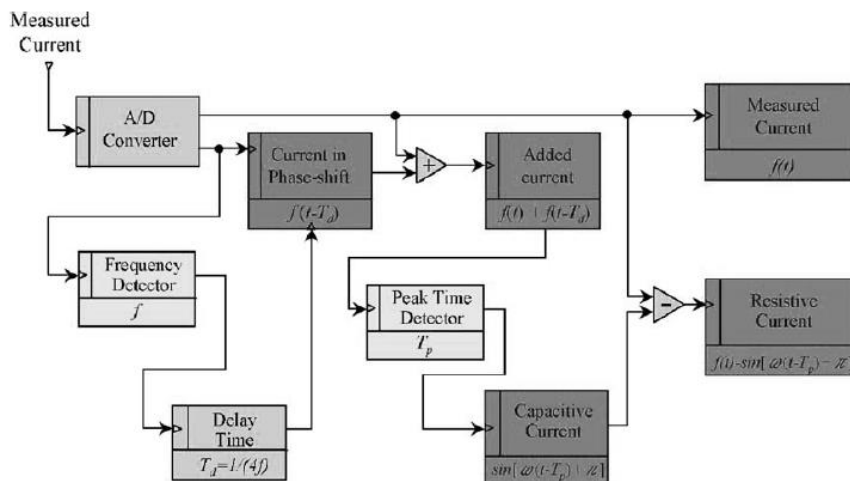


Figura 4.13 - Extração da corrente resistiva baseada em adição das formas de onda da corrente total defasadas no tempo

Fonte: retirado de (LEE e KANG, 2005)

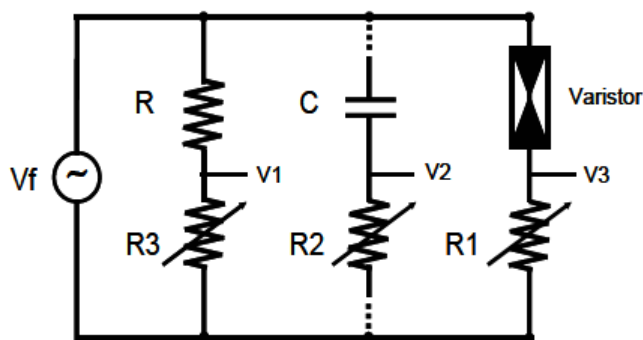


Figura 4.14 - Circuito utilizado para extração da corrente resistiva implementado por (NETO, et al., 2006)

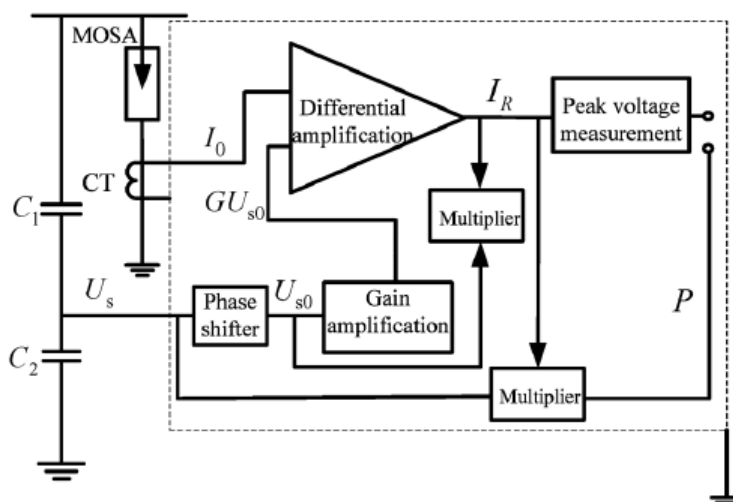


Figura 4.15 - Esquemático do circuito utilizado por (XU, et al., 2013) para a extração da parcela resistiva da corrente de fuga

4.6.5 Termografia

A metodologia adotada para a avaliação das condições do para-raios através da termografia consiste na realização de análises térmicas de regiões do dispositivo. O critério de espaçamento angular entre tais regiões pode variar de 60° (seis posições) até 120° (três posições) de acordo com as condições e necessidades do inspetor e do dispositivo. A explicação para a adoção de tal procedimento é a possibilidade da existência de uma anomalia interna localizada próxima à superfície de uma das regiões analisadas que permaneceria oculta na análise da região diametralmente oposta. A Figura 4.16 ilustra a aquisição dos termogramas referentes a um único para-raios.

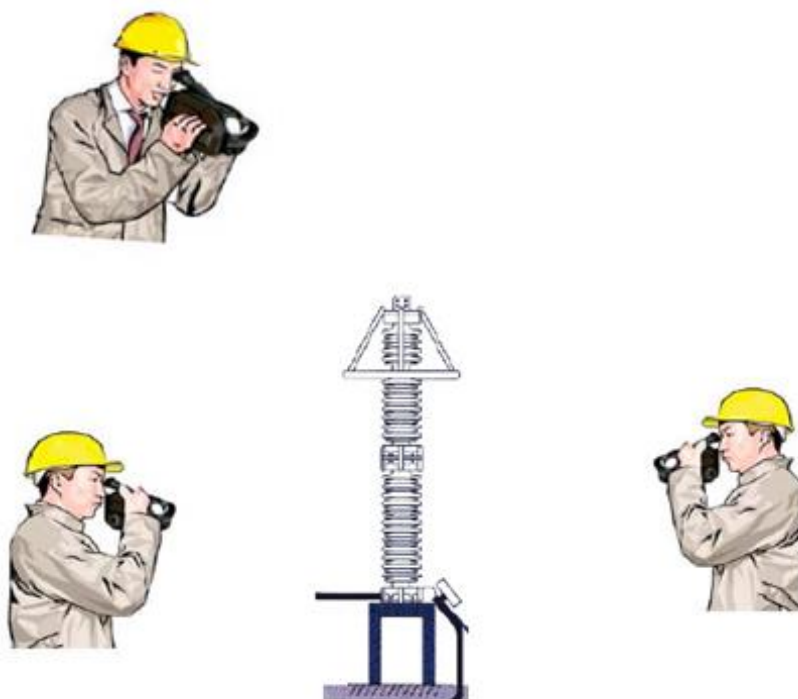


Figura 4.16 - Aquisição de termogramas de um para-raios de três posições espaçadas de 120°

Fonte: adaptado de (CEMIG, 2010)

De posse dos termogramas de todas as posições e para todos os para-raios adjacentes, executam-se as instruções a seguir (ÁLVARES, 2008):

1. Divisão do para-raios em quatro áreas distintas;
2. Definição da menor temperatura encontrada em cada área comparando-se todos os termogramas obtidos (temperatura de referência). Ao final

desta etapa serão obtidas quatro temperaturas de referência, sendo uma para cada área;

3. Cálculo da diferença de temperatura (ΔT) por área para todos os termogramas. A diferença de temperatura é dada pela máxima temperatura encontrada em uma área subtraída da temperatura de referência (equação 2.5).

$$\Delta T_n = T_{max_n} - T_{ref_n}$$

Equação 4.4

A Tabela 4.3 descreve os termos da Equação 4.4.

Tabela 4.3 - Descrição dos termos da Equação 4.4

Termo	Descrição	Unidade
ΔT_n	Diferença de temperatura para uma área	°C
T_{max_n}	Máxima temperatura em uma área	°C
T_{ref_n}	Temperatura de referência para a respectiva área	°C

[°C] *Graus Celsius*

No caso de uma inspeção de 3 para-raios utilizando 3 posições espaçadas de 120°, serão obtidos 9 termogramas (3 para cada para-raios) e 4 temperaturas de referência. Nota-se que o número de temperaturas de referência não depende do número de termogramas, mas sim da quantidade de áreas em que o dispositivo foi dividido. A Figura 4.17 ilustra um termograma de uma posição de um para-raios dividido em quatro áreas.

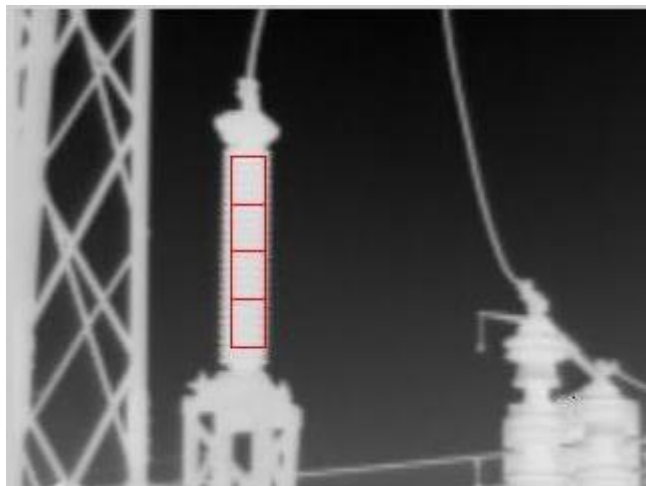


Figura 4.17 - Divisão da superfície de um para-raios em quatro áreas distintas

Fonte: adaptado de (SILVINO, *et al.*, 2010)

A máxima diferença de temperatura esperada entre os pontos das superfícies das regiões analisadas é de 3°C. No caso de para-raios à base de Óxido de Zinco, ao se detectar uma diferença de temperatura (ΔT) maior que 5°C, recomenda-se um acompanhamento mensal do para-raios. Se a tendência de aumento na temperatura persistir e a mesma atingir 6°C, o setor responsável pela tomada de decisão deve ser acionado (CEMIG, 2007). Tais valores foram definidos empiricamente.

4.7 Estratégia para extração da corrente resistiva

Deseja-se viabilizar a implementação de um sensor capaz de se comunicar com o sistema de monitoramento autônomo em desenvolvimento e fornecer dados referentes à corrente resistiva dos para-raios que serão monitorados. Tal sensor deve enviar a corrente de fuga total ao sistema quando requisitado. A partir daí, o sistema deve ser capaz de manipular as informações de forma a obter dados para o diagnóstico do dispositivo. A análise da corrente resistiva, aliada à termografia compõe uma poderosa ferramenta de monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO (URSINE e SILVINO, 2010).

Conforme discutido na Seção 4.4, a corrente de fuga em um para-raios ideal pode ser considerada quase totalmente capacitiva. Tal fato é ilustrado na Figura 4.18. Nesta figura, é possível notar que a corrente se encontra adiantada de 90° em relação à tensão aplicada ao dispositivo.

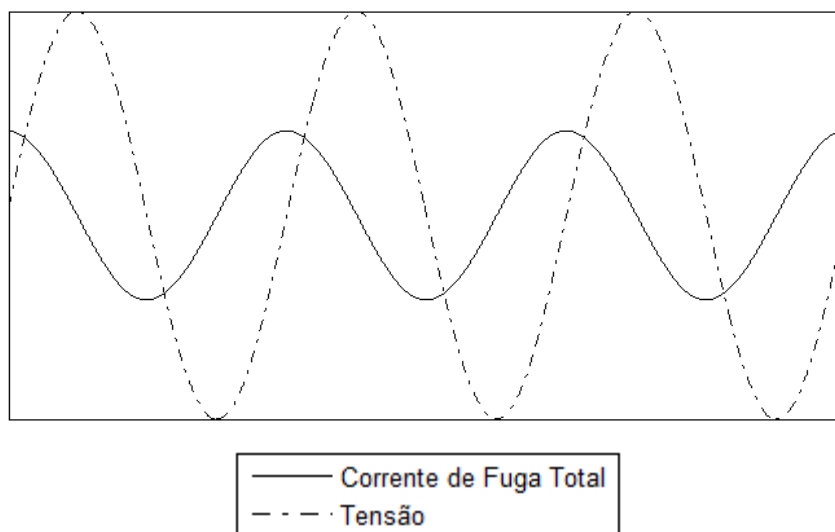


Figura 4.18 - Tensão e corrente de fuga total em um para-raios de ZnO ideal

Na ocorrência de degradação ou operação fora das condições normais, a corrente resistiva pode se tornar suficientemente grande para distorcer a forma de onda da corrente de fuga total, como mostrado na Figura 4.19. O pico de corrente resistiva coincide com o pico da tensão aplicada.

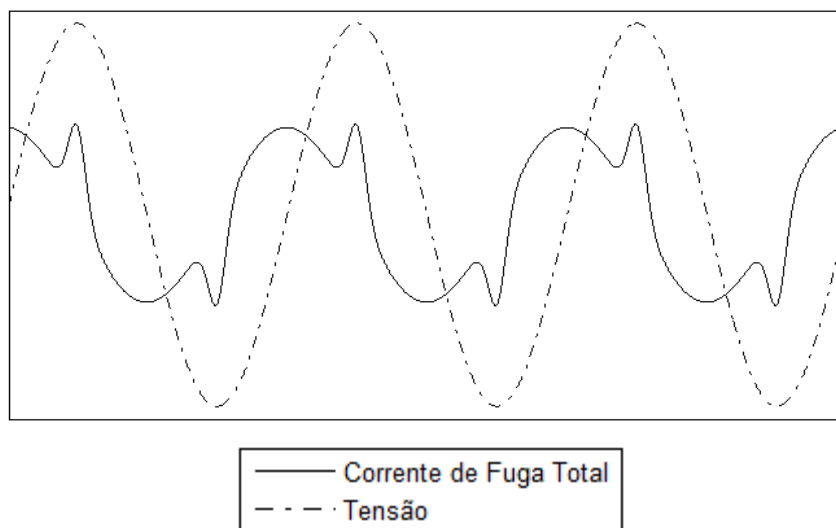


Figura 4.19 - Tensão e corrente de fuga total em um para-raios após degradação ou sob condições anormais de operação

A fim de se obter a corrente resistiva deve-se extrair a parcela capacitiva da corrente de fuga total. Considerando a forma de onda da corrente capacitiva idêntica à da tensão, torna-se viável obter tal corrente através da medição de um sinal representativo da forma de onda da tensão aplicada ao para-raios.

A forma de onda representativa da tensão deve, então, ser deslocada no tempo até que esteja em fase com a corrente capacitiva. Em seguida, a tensão deslocada deve ser escalonada para que sua amplitude seja compatível com essa mesma corrente. Assim, a corrente capacitiva pode ser eliminada da corrente de fuga total. A Figura 4.20 ilustra o funcionamento do método proposto.

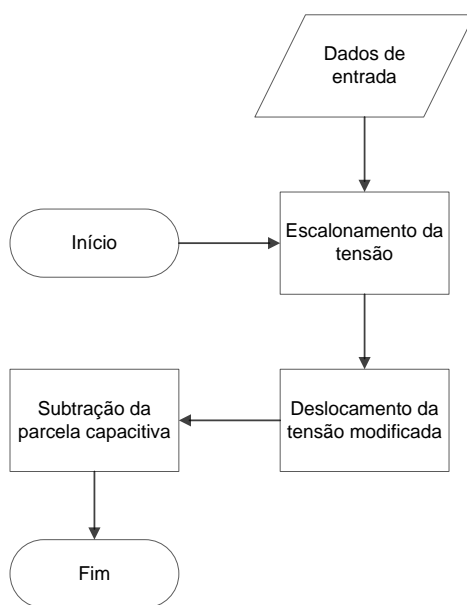


Figura 4.20 - Fluxograma de funcionamento da estratégia para extração da corrente resistiva

Ao fim do processo a corrente resistiva é obtida, como ilustra a Figura 4.21.

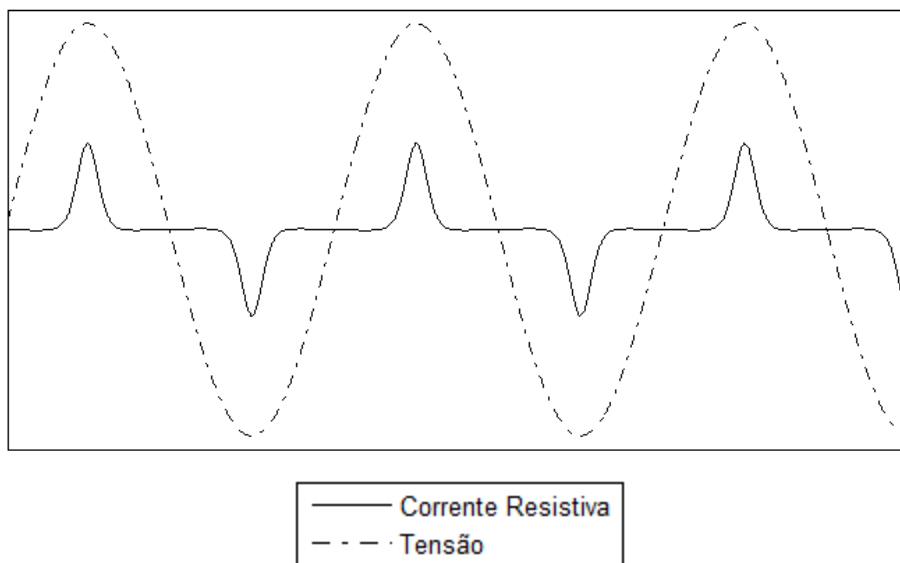


Figura 4.21 - Corrente resistiva obtida através do método proposto

É importante destacar que a complexidade do método é baixa e a qualidade das informações obtidas é suficiente para fornecer subsídios ao monitoramento autônomo de para-raios. A influência dos harmônicos na tensão é eliminada ao se utilizar um sinal representativo da tensão aplicada ao para-raios. Tal sinal pode ser obtido em qualquer ponto da subestação, desde um ponto de tomada até a própria alimentação do sistema de monitoramento.

A Figura 4.22 mostra a forma de onda da tensão real aplicada a um para-raios em uma subestação de distribuição. Nesta figura, nota-se que sua forma não é exatamente uma senoide perfeita, salientando a necessidade de sua utilização para extração de um valor adequado para a corrente resistiva.

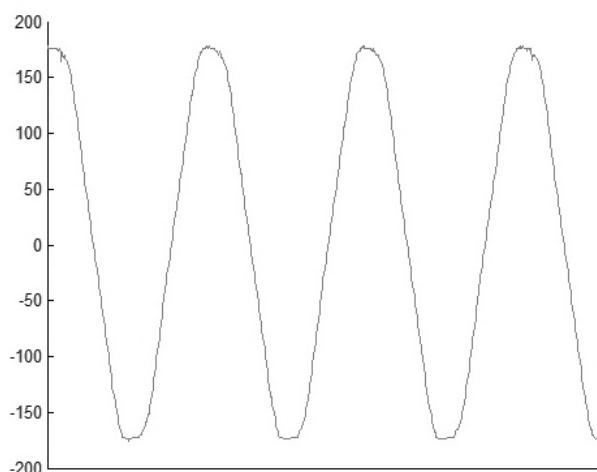


Figura 4.22 - Amostra da tensão real aplicada nos terminais de um para-raios

Vale destacar que a forma de onda da corrente de fuga total resultante da aplicação de uma onda não senoidal pode ser completamente diferente da apresentada na Figura 4.19. Um exemplo dessa situação está apresentado na Figura 4.23.

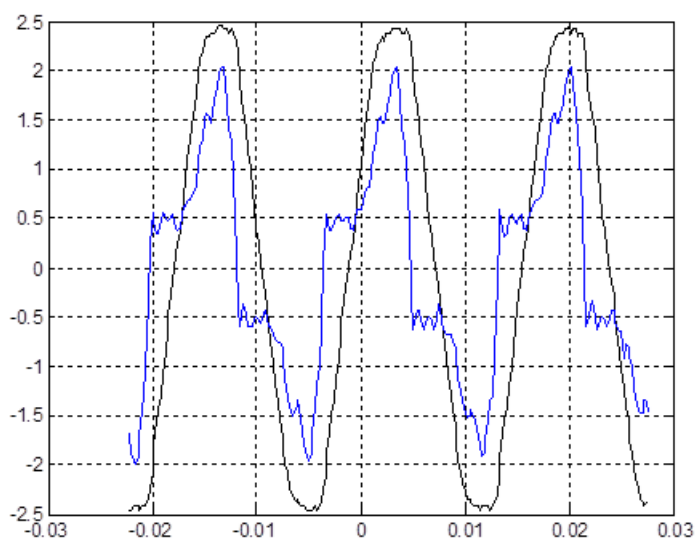


Figura 4.23 – Tensão distorcida (14 kV_{peak} , em preto) e Corrente de Fuga resultante (2 mA_{peak} , em azul) em um para-raios de distribuição

O resultado da extração da corrente resistiva é apresentado na Figura 4.24.



Figura 4.24 - Resultado da extração da corrente resistiva para uma forma de onda não senoidal

A corrente superficial e também a induzida pelas fases adjacentes não são tratadas de forma especial pelo método, sendo computadas como parte da corrente resistiva.

4.8 Corrente de fuga x Termografia

A partir das informações contidas na Seção 4.6, verifica-se que as duas técnicas utilizadas para o monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO sem centelhadores são a corrente de fuga e a termografia. Ambas são amplamente adotadas pelas companhias de energia e fazem parte da rotina de qualquer equipe de manutenção de subestações.

A componente resistiva da corrente de fuga é responsável pelo aquecimento do para-raios (na ausência de fatores externos) e seu aumento é refletido como uma elevação na temperatura desse equipamento. Caso o para-raios esteja em perfeito estado, tal aquecimento será praticamente uniforme e estará dentro dos limites determinados anteriormente.

Por outro lado, a ocorrência de degradação pode alterar a distribuição das correntes nos blocos de ZnO. Quando esse fato ocorre, os grãos de ZnO podem estar permitindo a passagem de uma quantidade de corrente superior ou inferior que o normal. No primeiro caso, o grão se comporta como um curto-circuito, aumentando a corrente que passa por ele e, conseqüentemente, diminuindo a corrente em sua vizinhança. No segundo, o grão se assemelha a um circuito aberto, impedindo a

passagem de corrente e acarretando um aumento da corrente em sua vizinhança. Estes tipos de degradação geram o aparecimento de pontos e regiões quentes, respectivamente.

O aquecimento do para-raios por fontes externas (radiação solar, temperatura ambiente), quando suficiente, pode alterar momentaneamente as propriedades dos varistores que o compõem e aumentar a corrente de fuga que flui por seus terminais (Figura 4.5). No caso de uma solicitação, tal aumento pode ser tão grande que cause a falha de um dispositivo degradado.

A corrente de fuga e a termografia apresentam, portanto, uma relação de complementaridade e podem ser combinadas para uma análise mais detalhada e consistente. O próximo capítulo apresenta uma série de simulações e experimentos realizados para verificação da estratégia proposta para extração da corrente resistiva, avaliação dos fatores de influência na termografia aplicada a para-raios e observação da relação entre a temperatura e a corrente de fuga.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÕES

Os ensaios propostos nesta seção foram realizados com dois para-raios de distribuição com tensão nominal 12 kV. Um desses para-raios encontrava-se em perfeito estado e nunca havia sido utilizado. O outro apresentava sinais de degradação e foi retirado de operação após inspeção termográfica.

A medição da corrente de fuga total foi feita através de resistores *shunt* de 2,7 k Ω posicionados nas bases dos para-raios. O sinal de tensão nos resistores *shunt* e o sinal de referência da tensão foram lidos por um módulo de aquisição de dados.

Todo o processamento dos dados coletados foi realizado no ambiente MATLAB¹⁹. Uma tela do programa de aquisição de dados é mostrada na Figura 5.8.

¹⁹ <http://www.mathworks.com/products/matlab/>



Figura 5.1 - Programa para aquisição da corrente de fuga total

O valor adotado para emissividade padrão do para-raios foi $\varepsilon = 0,92$. Tal valor encontra-se em conformidade com os estudos realizados para os equipamentos que possuem invólucro polimérico. A transmissividade do ar foi considerada $\tau = 0,99$. A umidade relativa do ar durante os experimentos não foi superior a 60% e a distância da câmera térmica ao objeto não ultrapassou 1,5 m. Por fim, a incerteza das medições de temperatura ambiente fornecidas pelos sensores e termohigrômetros é de 0,5°C.

5.1 Extração da corrente resistiva: Simulação

O comportamento da metodologia proposta para obtenção da corrente de fuga foi simulado para diversas situações. Tais simulações foram feitas no ambiente Orcad Pspice²⁰ e demonstram, principalmente, a influência da tensão de operação e seus harmônicos na corrente de fuga.

Para todas as simulações foram utilizados quatro varistores do modelo B32K250 em série, caracterizando uma tensão nominal de 1 kV para o conjunto. A Figura 5.2 ilustra o circuito simulado.

²⁰ <http://www.cadence.com/>

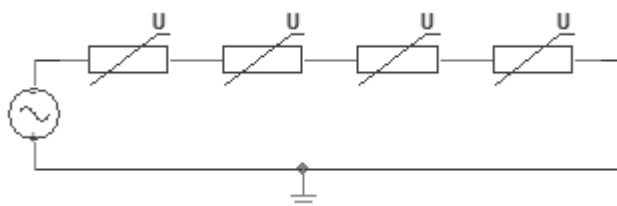


Figura 5.2 - Circuito utilizado para simulação do comportamento de para-raios em relação à tensão de operação aplicada

Vale destacar que as formas de onda da tensão aplicada mostradas nas simulações e experimentos estão adiantadas de 90° (para compensar o efeito capacitivo na corrente de fuga). As formas da corrente capacitiva foram omitidas por serem qualitativamente idênticas às da tensão.

5.1.1 Caso 1 - Tensão de operação

Neste caso, $800 V_{RMS}$ foram aplicados aos terminais do conjunto de varistores. Tal valor foi escolhido devido ao fato da tensão de operação dos para-raios estar entre 60 % e 80% da tensão nominal.

A Figura 5.3 ilustra o resultado da simulação.

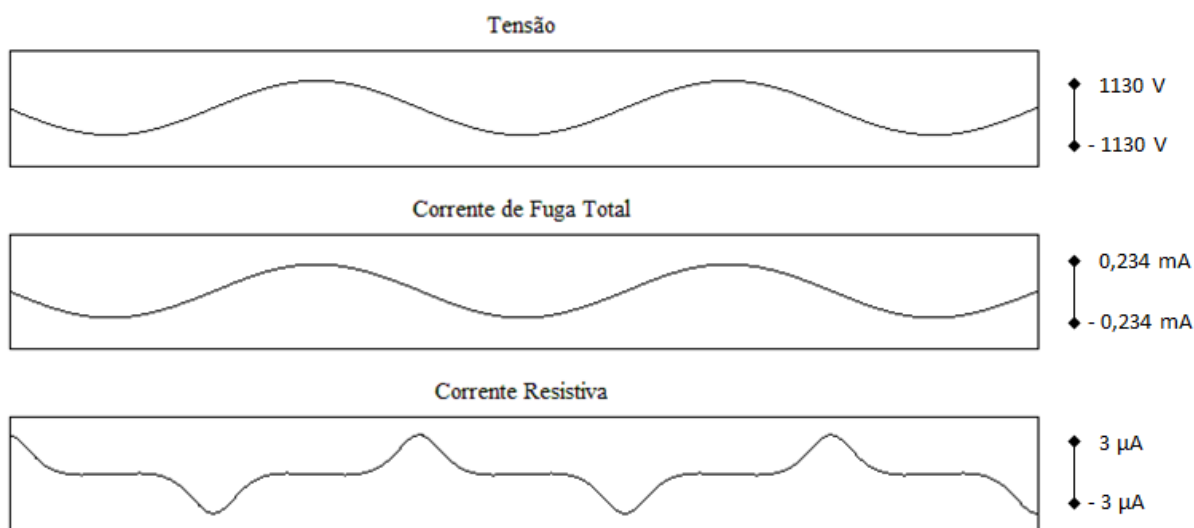


Figura 5.3 - Tensão e corrente de fuga quando aplicada tensão nominal no conjunto de varistores

Nota-se que a forma de onda da corrente de fuga total é praticamente idêntica à da tensão. A corrente resistiva tem valor de pico igual a $0,003 \text{ mA}$. A corrente capacitiva, $0,234 \text{ mA}$.

As Transformadas Rápidas de Fourier das correntes resistiva e capacitiva são mostradas na Figura 5.4.

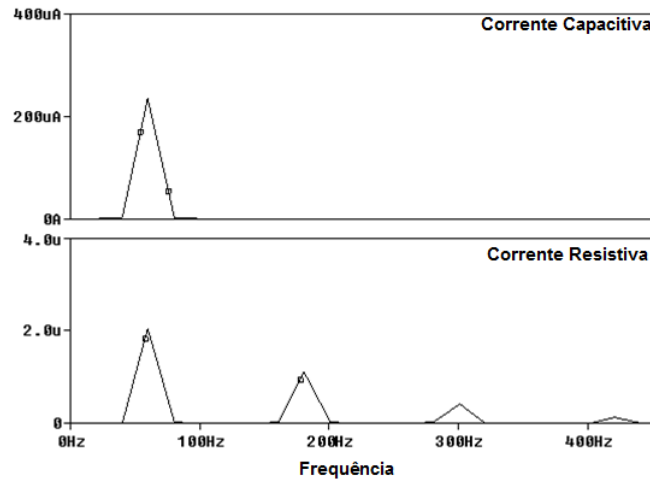


Figura 5.4 - Análise harmônica das parcelas da corrente de fuga para uma tensão de 800 V

Como esperado, a corrente capacitiva se comporta como a tensão e apresenta apenas a componente fundamental. Já a corrente resistiva possui uma componente de terceiro harmônico igual a 55% do valor da fundamental. Os harmônicos de quinta ordem também são significativos e não deveriam ser ignorados.

5.1.2 Caso 2 – Presença de harmônicos na tensão

Na segunda simulação, os efeitos dos harmônicos da tensão de operação são observados por meio da introdução de 3% de distorção de terceira e quinta ordem.

A Figura 5.5 apresenta os resultados obtidos.

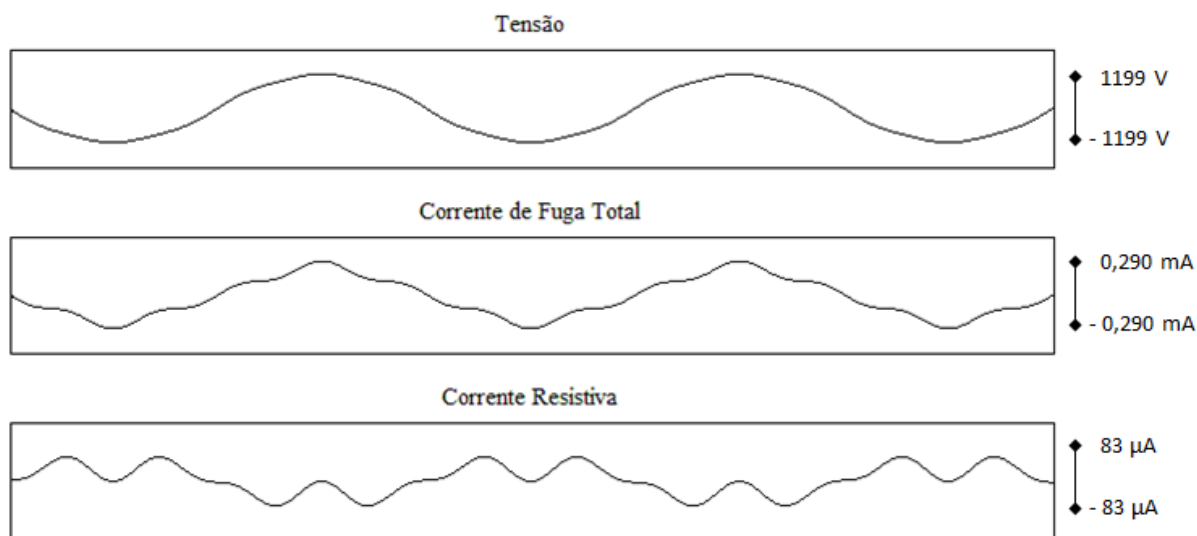


Figura 5.5 - Resultados da introdução de distorção harmônica na tensão de operação

O efeito da distorção harmônica da tensão é visível tanto na corrente de fuga total quanto na corrente resistiva. A corrente de fuga total apresenta um pico de 0,290 mA e a corrente resistiva de 0,083 mA. Portanto, observa-se um aumento de 24 vezes para o caso anterior, em que a corrente resistiva apresentava um pico de 0,003 mA.

As Transformadas Rápidas de Fourier das correntes resistiva e capacitiva são mostradas na Figura 5.6.

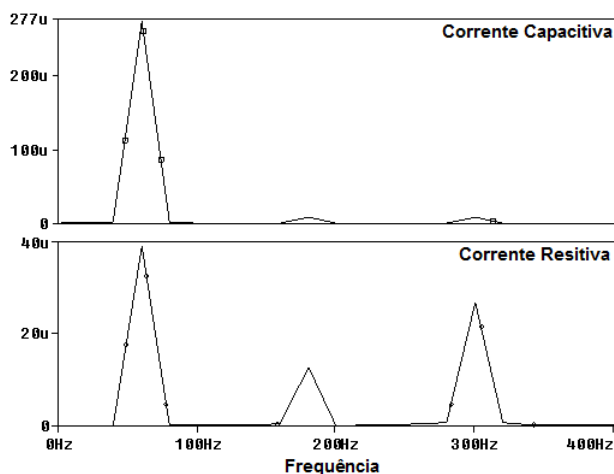


Figura 5.6 - Análise harmônica das correntes após a introdução de harmônicos na tensão

Nota-se que o terceiro harmônico passa a apresentar um valor menos significativo que o quinto harmônico. Este último alcança 68% do valor da fundamental. A corrente capacitiva apresenta distorção de 3% de terceira e quinta ordem, como esperado. Vale

mencionar novamente que a maioria dos métodos de análise de corrente de fuga ignora os efeitos dos harmônicos presentes na tensão aplicada ao para-raios.

5.2 Extração da corrente resistiva: Resultados experimentais

Para verificação da estratégia proposta para extração da corrente resistiva os para-raios foram ensaiados em laboratório, conforme esquemático da Figura 5.8.

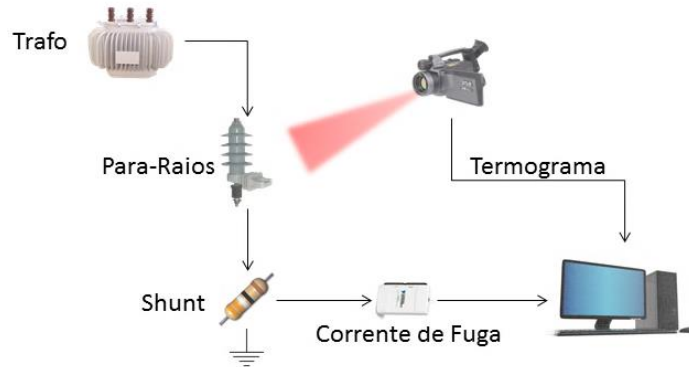


Figura 5.7 - Esquemático do experimento de extração da corrente resistiva

Nesse ensaio, um transformador energiza o para-raios com valores de tensão abaixo da tensão nominal. A corrente de fuga e a temperatura superficial dos dispositivos são obtidas respectivamente através da leitura dos sinais de tensão nos resistores e termogramas. Os dados são coletados após um período de acomodamento de uma hora com a temperatura ambiente constante.

A Figura 5.8 apresenta a montagem para o experimento.



Figura 5.8 - Experimento para verificação da estratégia de extração da corrente resistiva

Os equipamentos utilizados no experimento foram:

1. Para-Raios ZnO novo
2. Para-Raios ZnO defeituoso
3. Transformador
4. Resistores shunt
5. Câmera Térmica
6. Multímetros
7. Osciloscópio
8. Módulo de aquisição
9. Termohigrômetro digital
10. Computador

Os resultados obtidos com o para-raios em perfeito estado e com o degradado estão resumidos na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2, respectivamente.

Tabela 5.1 - Resultados das medições de corrente de fuga e temperatura de um para-raios novo durante o experimento de extração da corrente resistiva

Para-raios novo					
Tensão (V_{RMS})	Corrente Total (mA_{RMS})	Corrente Resistiva (mA_p)	Corrente Resistiva (mA_{RMS})	Temperatura Para-Raios (°C)	Temperatura Ambiente (°C)
7000	0,23	0,036	0,019	24,0	23
8000	0,26	0,049	0,026	24,2	23,4
9000	0,29	0,075	0,044	24,3	23,5
10000	0,33	0,099	0,048	24,5	23,5
11000	0,37	0,159	0,083	24,7	23,5

Tabela 5.2 - Resultados das medições de corrente de fuga e temperatura de um para-raios degradado durante o experimento de extração da corrente resistiva

Para-raios degradado					
Tensão (V_{RMS})	Corrente Total (mA_{RMS})	Corrente Resistiva (mA_p)	Corrente Resistiva (mA_{RMS})	Temperatura Para-Raios (°C)	Temperatura Ambiente (°C)
7000	0,26	0,083	0,049	24,2	23
8000	0,31	0,124	0,070	24,8	23,4
9000	0,35	0,232	0,132	25,5	23,5
10000	0,42	0,276	0,148	26,5	23,5
11000	0,45	0,376	0,208	27,5	23,5

A incerteza associada à medição da temperatura através dos termogramas para o para-raios sem defeitos é de 0,98°C. Já para o dispositivo defeituoso, a incerteza é de 1,12°C no pior caso. Todas as incertezas calculadas para os termogramas deste trabalho foram realizada pelo método Monte Carlo implementado em (TEIXEIRA, 2012).

Em todas as situações, a corrente resistiva é maior no para-raios defeituoso. Consequentemente, a temperatura superficial também é mais elevada para tal dispositivo. A componente resistiva se torna mais visível na forma de onda da corrente total à medida que a tensão se eleva, conforme mostra a Figura 5.9.

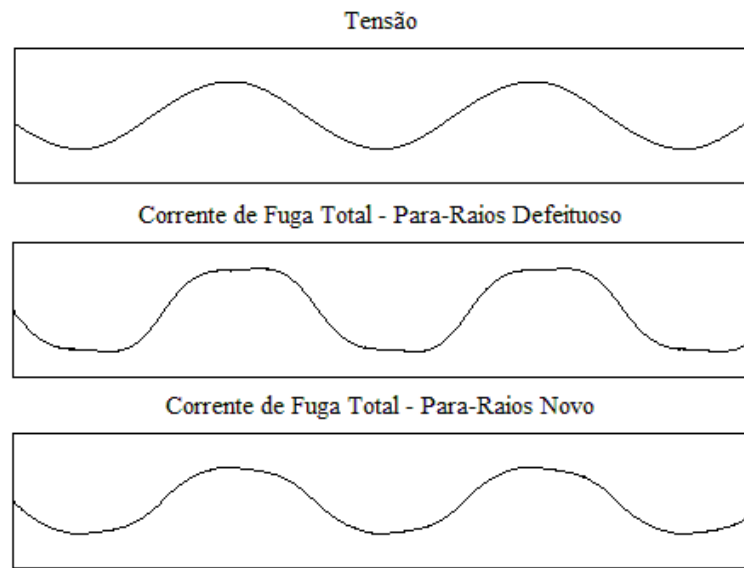


Figura 5.9 - Formas de onda da tensão e corrente de fuga total durante aplicação de 11 kV nos terminais dos para-raios

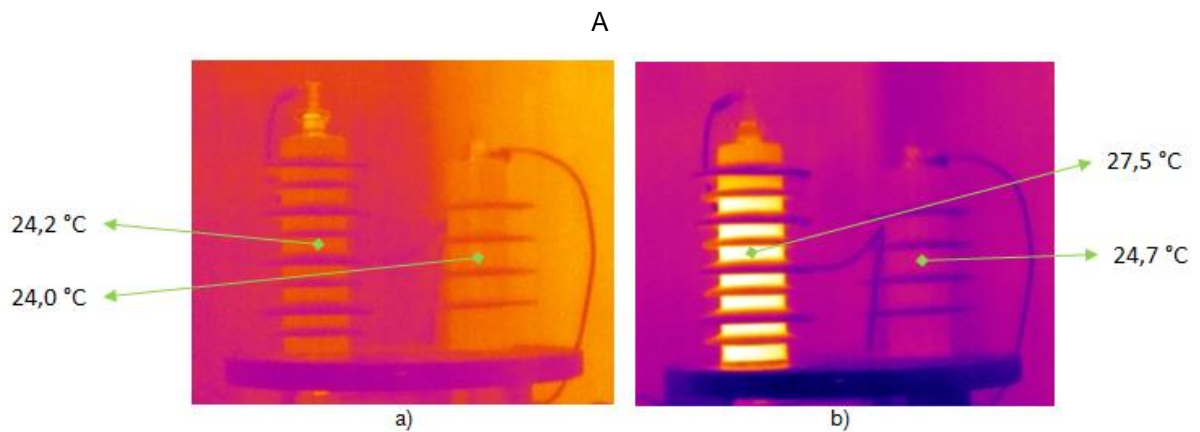


Figura 5.10 ilustra a aquisição das temperaturas superficiais para o caso de menor e maior tensão aplicada. Observando as situações apresentadas, verifica-se um aumento de temperatura superior no para-raios defeituoso, situado à esquerda.

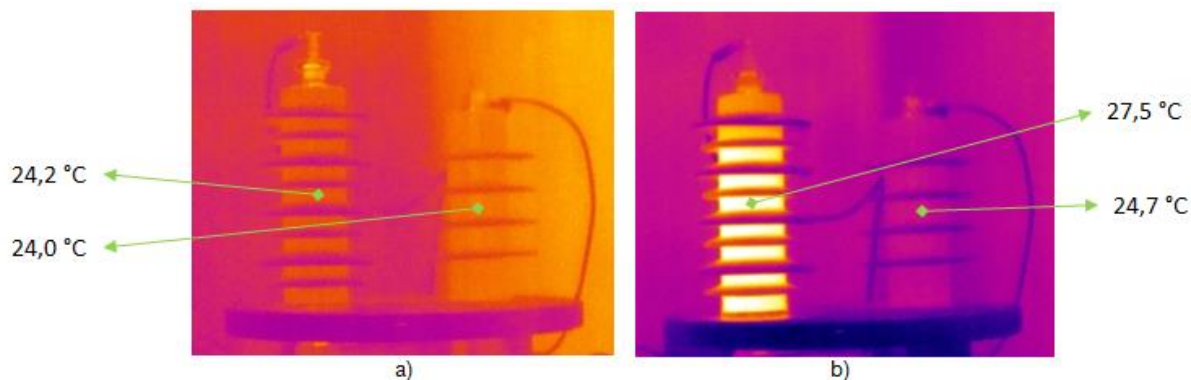


Figura 5.10 - Termogramas da situação dos para-raios quando submetidos a 7 kV (a) e 11 kV (b)

5.3 Radiação solar

Para a verificação da influência da radiação solar na temperatura superficial do para-raios, um exemplar foi colocado em exposição ao sol, em um local sem interferência de sombra (latitude 19°52'27.74"S e longitude 43°58'2.19"O), por um período de 8 até 16 horas no dia 18 de setembro de 2012. O esquemático da Figura 5.11 ilustra o experimento realizado.

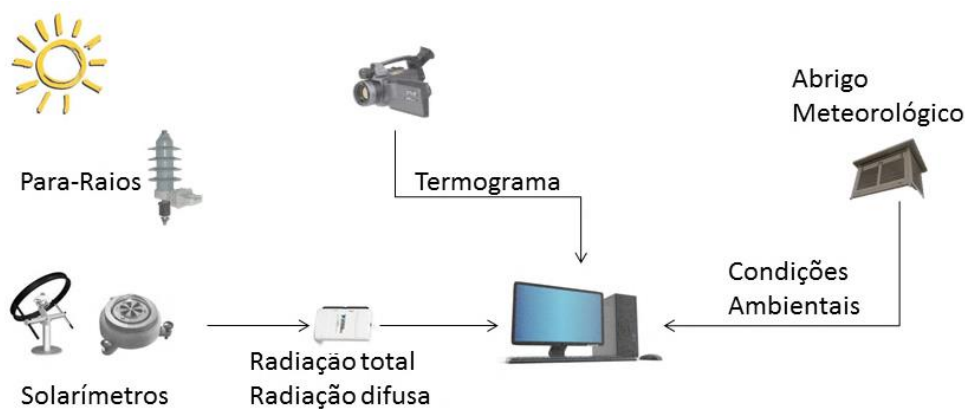


Figura 5.11 - Esquemático do experimento sobre radiação solar

Dois solarímetros do tipo piranômetro foram posicionados próximos ao para-raios para medição da radiação total e difusa recebidas por ele. A radiação difusa é obtida por meio da utilização de um anel de sombreamento capaz de bloquear toda a radiação direta proveniente do sol. Sendo assim, a radiação direta, grande responsável pelo aquecimento do para-raios nesse fenômeno, pode ser determinada pela diferença entre a total e a difusa.

As condições ambientais foram determinadas por sensores posicionados dentro de um abrigo meteorológico. Tais condições incluem a pressão atmosférica, umidade relativa do ar e temperatura ambiente. O abrigo foi construído de forma a bloquear a radiação solar e rajadas de vento, mas permitindo o fluxo constante de ar em seu interior. A velocidade do vento durante o experimento era desprezível.

A Figura 5.12 apresenta a montagem utilizada.



Figura 5.12 - Experimento para determinação da influência da radiação solar na temperatura superficial de um para-raios

Os dados dos solarímetros e do abrigo meteorológico foram coletados a cada 15 minutos por uma unidade de aquisição. Quatro termogramas espaçados de 90° foram obtidos de hora em hora e a temperatura superficial do para-raios foi medida para cada posição. As posições cobrem toda a área do para-raios, sendo que os pares de posições 1-3 e 2-4 são diametralmente opostos.

Os equipamentos utilizados nesse experimento foram:

1. Para-raios
2. Solarímetros
3. Termohigrômetro digital
4. Câmera térmica
5. Módulo de aquisição
6. Anel de sombreamento

O gráfico da Figura 5.13 apresenta os resultados obtidos para as medições de radiação total e difusa.

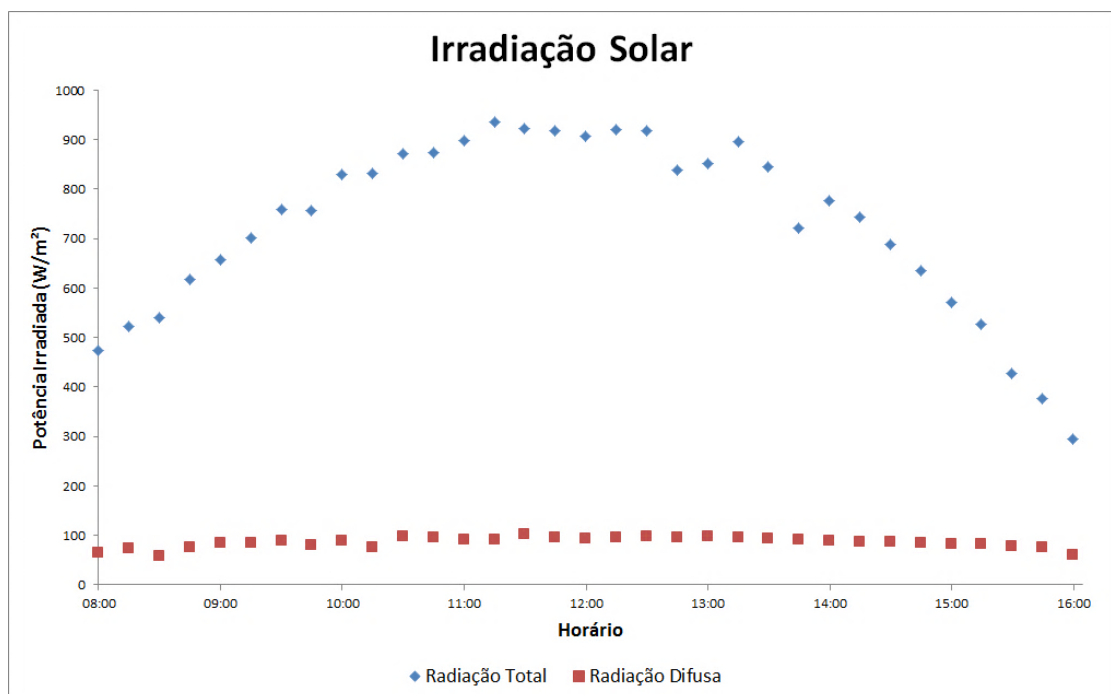


Figura 5.13 - Medições da irradiação solar ao longo de um dia

Conforme esperado, a radiação total aumenta durante a manhã até atingir seu valor máximo próximo ao meio dia. A partir de então, começa a diminuir, alcançando seu valor mínimo medido ao fim do experimento.

A Tabela 5.3 traz a temperatura ambiente e a temperatura medida para cada posição ao longo do experimento.

Tabela 5.3 - Temperaturas medidas durante o experimento sobre radiação solar

Horário	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Posição 1 (°C)	Temperatura Posição 2 (°C)	Temperatura Posição 3 (°C)	Temperatura Posição 4 (°C)
08:00	26,2	28,6	29,2	29,4	28,8
09:00	27,4	31,7	32,3	32,3	31,4
10:00	30,1	34,6	35,8	34,6	34,1
11:00	32,0	35,8	36,3	34,8	35,0
12:00	34,3	38,0	38,8	37,6	37,4
13:00	35,0	40,1	39,6	38,5	39,0
14:00	35,2	39,8	40,1	39,5	39,8
15:00	35,2	42,1	41,0	39,9	40,4
16:00	35,0	39,9	37,5	35,8	36,0

A incerteza das temperaturas medidas pode ser observada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Incerteza contido nas medições de temperatura realizadas durante o experimento

Horário	Incerteza Temperatura Posição 1 (°C)	Incerteza Temperatura Posição 2 (°C)	Incerteza Temperatura Posição 3 (°C)	Incerteza Temperatura Posição 4 (°C)
08:00	0,5	0,5	0,5	0,5
09:00	0,6	0,6	0,6	0,5
10:00	0,6	0,7	0,6	0,6
11:00	0,7	0,7	0,7	0,7
12:00	0,8	0,9	0,7	0,8
13:00	0,8	0,8	0,8	0,8
14:00	0,8	0,7	0,7	0,8
15:00	0,8	0,8	0,8	0,7
16:00	0,8	0,7	0,6	0,5

Os valores de temperatura na superfície de cada posição do para-raios variam de acordo com a quantidade de radiação direta recebida por ela. Enquanto uma região encontra-se em uma temperatura elevada, outra pode estar protegida dessa radiação e apresentar temperatura bastante inferior.

Um bom exemplo são os valores obtidos às 16 horas para as posições 1 e 3, que são diametralmente opostas. Enquanto a posição 1 recebe radiação direta e apresenta temperatura de $39,9 \pm 0,8^\circ\text{C}$, a superfície vista da posição 3 encontra-se a $35,8 \pm 0,6^\circ\text{C}$. No pior caso, a diferença de temperatura entre essas posições pode chegar a $5,5^\circ\text{C}$, o que, em uma situação real, faria com que a frequência de inspeções desse equipamento fosse aumentada sem necessidade.

A premissa de realização das inspeções na ausência de carga solar muitas vezes não é respeitada, culminando em uma inspeção com condições inadequadas. Os resultados do experimento realizado ilustram algumas das consequências da violação desta premissa.

A Figura 5.14 apresenta quatro termogramas que representam as quatro posições utilizadas no experimento. Além disso, tais termogramas trazem as medições de temperatura realizadas às 16 horas.

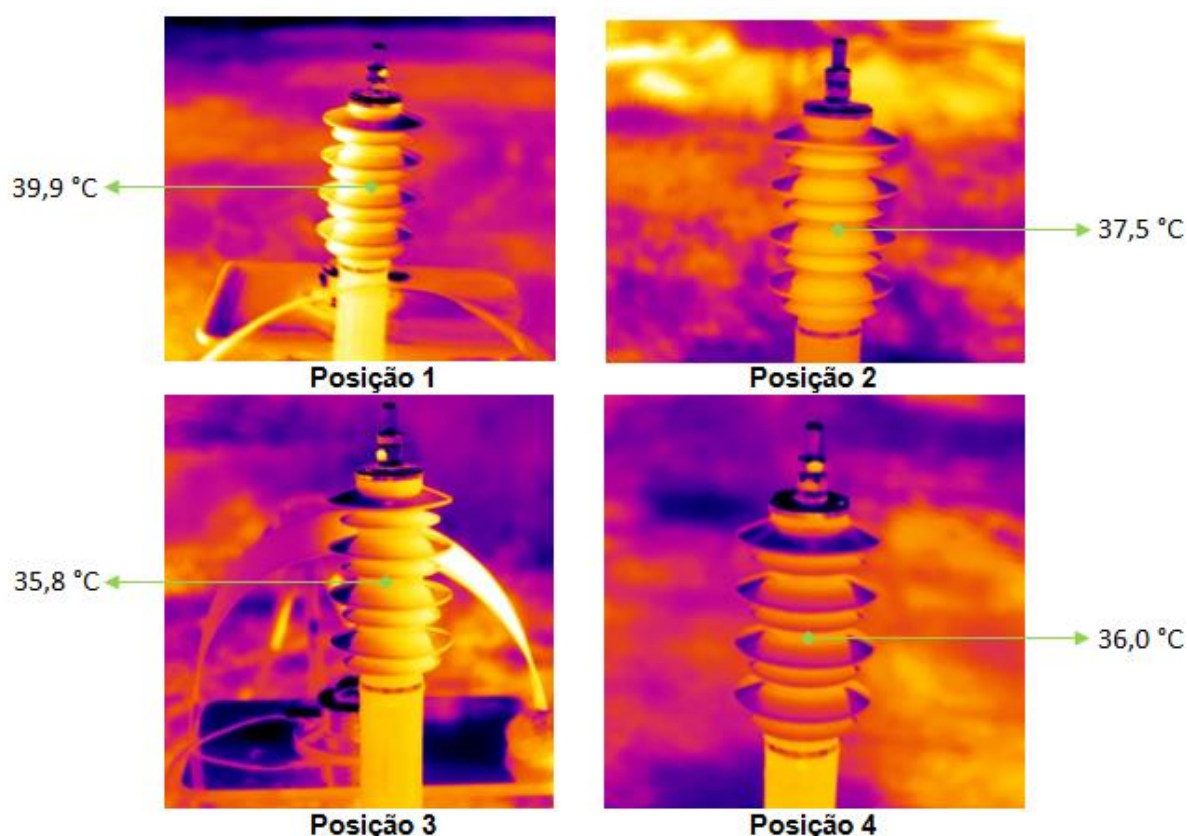


Figura 5.14 - Termogramas das quatro posições referentes à aquisição realizada às 16 horas

O experimento descrito não engloba medições da corrente de fuga por razões de viabilidade técnica e, principalmente, de segurança.

A medição da radiação solar pode ser utilizada para fornecer dados ao modelo matemático descrito em (FONSECA, *et al.*, 2011). De posse dessas informações, o modelo é capaz de prever o aquecimento da superfície do para-raios de acordo com a insolação incidente. A Figura 5.15 apresenta os resultados comparativos entre o aquecimento medido e o simulado para uma posição do experimento.

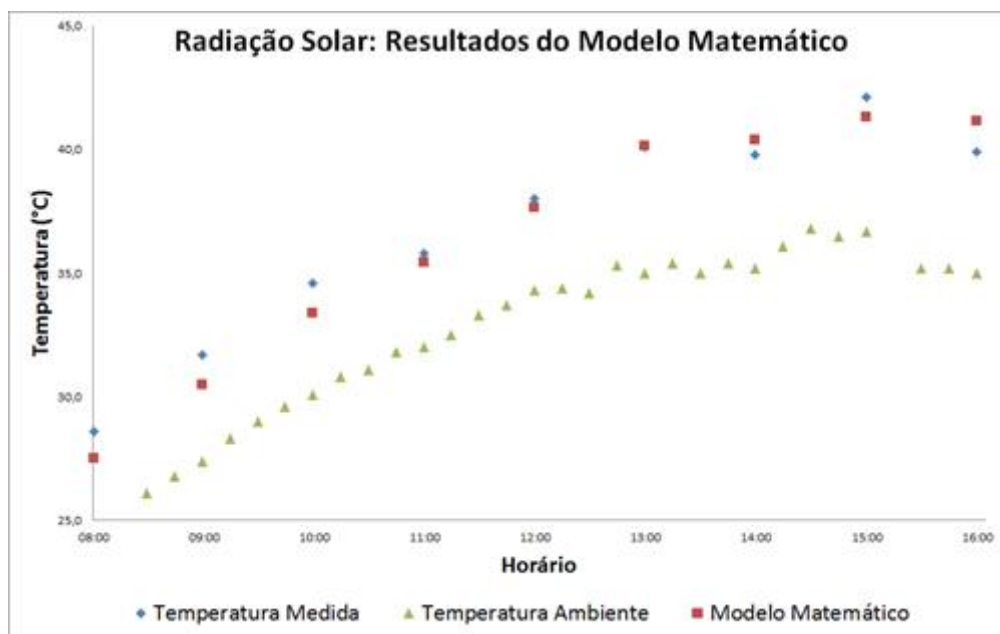


Figura 5.15 - Resultados obtidos pelo modelo matemático para os dados coletados de radiação solar ao longo do dia

A diferença entre a temperatura obtida pelo modelo e a temperatura medida não ultrapassou $1,3^{\circ}\text{C}$, o que mostra uma aproximação inicial bastante interessante sobre os efeitos da radiação na temperatura superficial do para-raios.

5.4 Velocidade do vento

Outro fator de grande importância na realização de inspeções térmicas em subestações é a velocidade do vento. Por esta razão, um experimento para determinar sua influência na temperatura superficial dos para-raios foi elaborado.

Neste experimento, um para-raios é energizado no interior de um túnel de vento. Mantendo-se uma tensão constante, diversas velocidades são utilizadas para determinar o comportamento do dispositivo. O processo é repetido para quatro valores distintos de tensão e para os dois tipos de para-raios.

As medições são realizadas após a estabilização da temperatura do para-raios, processo que leva em torno de 1 hora. Os dados de corrente são obtidos através de resistores shunt e a temperatura através de termogramas. A velocidade do vento é monitorada por um anemômetro de fio quente. A Figura 5.16 mostra um esquemático descritivo do experimento. Os equipamentos utilizados para energizar o para-raios foram omitidos no esquemático.

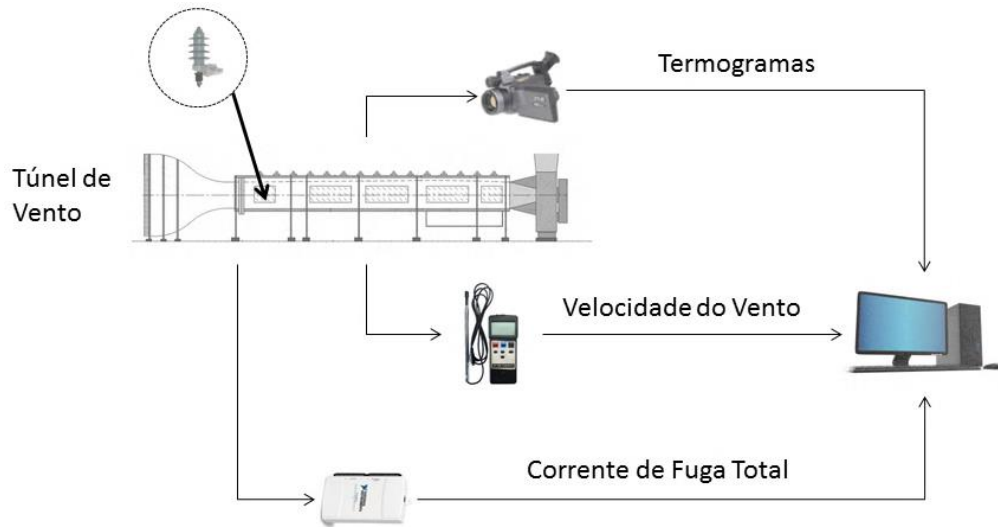


Figura 5.16 - Esquemático de funcionamento do experimento realizado no túnel de vento

As condições climáticas foram monitoradas por meio de um Termohigrômetro. A temperatura ambiente não foi controlada por não haver o equipamento adequado para tanto. A montagem utilizada no experimento pode ser vista na Figura 5.17 e na Figura 5.18.

Os equipamentos utilizados foram:

1. Para-raios sem defeito
2. Para-raios com defeito
3. Módulo de aquisição
4. Anemômetro de fio quente
5. Câmera térmica
6. Termohigrômetro digital
7. Transformador
8. Resistores shunt
9. Multímetros
10. Osciloscópio
11. Computador



Figura 5.17 - Equipamentos utilizados no experimento sobre a influência da velocidade do vento na temperatura dos para-raios (visão frontal)



Figura 5.18 - Equipamentos utilizados no experimento sobre a influência da velocidade do vento na temperatura dos para-raios (visão posterior)

Os multímetros e o osciloscópio são utilizados apenas para monitoramento da corrente de fuga e da tensão aplicada ao para-raios.

Os resultados obtidos nos testes com o para-raios não danificado são apresentados na Tabela 5.5. A incerteza na medição da temperatura é inferior a 1,4°C para todos os casos.

Tabela 5.5 - Resultados dos experimentos realizados no túnel de vento com para-raios sem defeitos

Para-raios novo					
Tensão (V_{RMS})	Velocidade Vento (m/s)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Para-raios (°C)	Corrente Total (mA_{RMS})	Corrente Resistiva (mA_{RMS})
8000	0	25,9	26,6	0,24	0,060
	1	26,7	26,6	0,23	0,069
	3	27,0	29,5	0,24	0,055
	5	27,8	28,4	0,24	0,047
	10	28,5	31,5	0,24	0,037
9000	0	29,5	32,5	0,25	0,059
	1	31,0	32,2	0,25	0,048
	3	26,6	27,1	0,26	0,073
	5	24,6	24,9	0,26	0,035
	10	23,9	24,7	0,26	0,060
10000	0	23,5	25,4	0,29	0,121
	1	23,0	24,0	0,29	0,112
	3	23,3	24,1	0,29	0,094
	5	23,5	24,0	0,29	0,075
	10	22,8	22,4	0,29	0,099
11000	0	23,6	25,4	0,33	0,188
	1	24,5	26,1	0,33	0,175
	3	25,7	26,9	0,32	0,160
	5	25,5	26,0	0,32	0,154
	10	26,7	27,6	0,33	0,159

Em seguida, na Tabela 5.6, são mostrados os resultados para o para-raios degradado.

Tabela 5.6 - Resultados dos experimentos realizados no túnel de vento com para-raios com defeito

Para-raios defeituoso					
Tensão (V_{RMS})	Velocidade Vento (m/s)	Temperatura Ambiente ($^{\circ}C$)	Temperatura Para-raios ($^{\circ}C$)	Corrente Total (mA_{RMS})	Corrente Resistiva (mA_{RMS})
8000	0	28,2	30,3	0,29	0,079
	1	28,9	30,6	0,28	0,075
	3	28,1	28,7	0,29	0,082
	5	27,1	28,2	0,29	0,078
	10	26,4	26,3	0,29	0,069
9000	0	24,0	26,4	0,32	0,091
	1	24,8	26,7	0,33	0,093
	3	25,5	26,6	0,34	0,115
	5	27,0	28,6	0,34	0,109
	10	27,1	28,6	0,35	0,113
10000	0	27,7	32,1	0,38	0,120
	1	28,0	30,9	0,39	0,143
	3	28,3	30,5	0,4	0,156
	5	28,2	30,1	0,41	0,134
	10	27,7	29,6	0,4	0,169
11000	0	27,3	33,6	0,48	0,220
	1	26,5	30,7	0,48	0,173
	3	26,2	28,9	0,47	0,221
	5	26,2	28,7	0,48	0,198
	10	26,0	27,5	0,47	0,200

A Figura 5.19 apresenta dois termogramas que ilustram o procedimento de aquisição da temperatura dos para-raios.

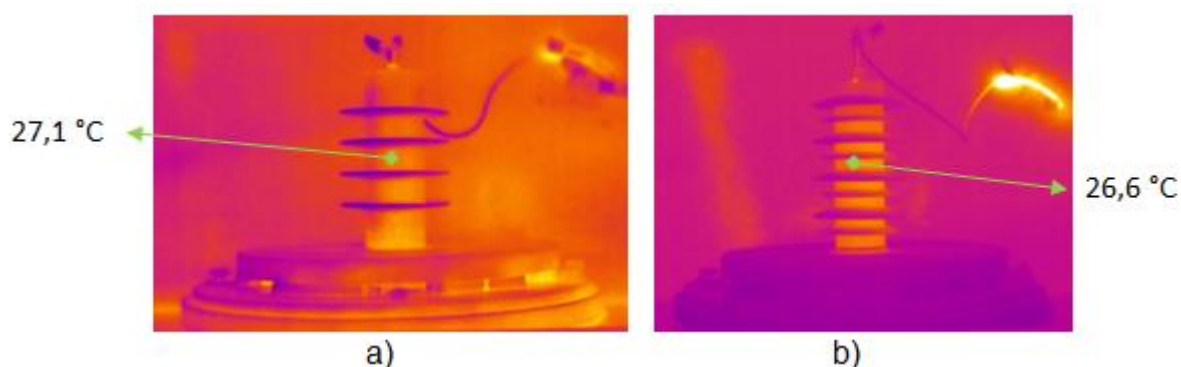


Figura 5.19 - Termogramas do para-raios novo (a) e do degradado (b) submetidos a uma tensão de 9 kV e velocidade do vento igual a 3 m/s

A corrente resistiva não aparenta ter relação significativa com a velocidade do vento em nenhum dos dispositivos ensaiados, conforme mostra a Figura 5.20. Sua pequena variação é atribuída à flutuação da tensão aplicada ao para-raios, que

contribui fortemente para o valor da corrente resistiva. Vale mencionar que, quanto maior a tensão aplicada, maior será a contribuição desta corrente para o valor da corrente de fuga total.

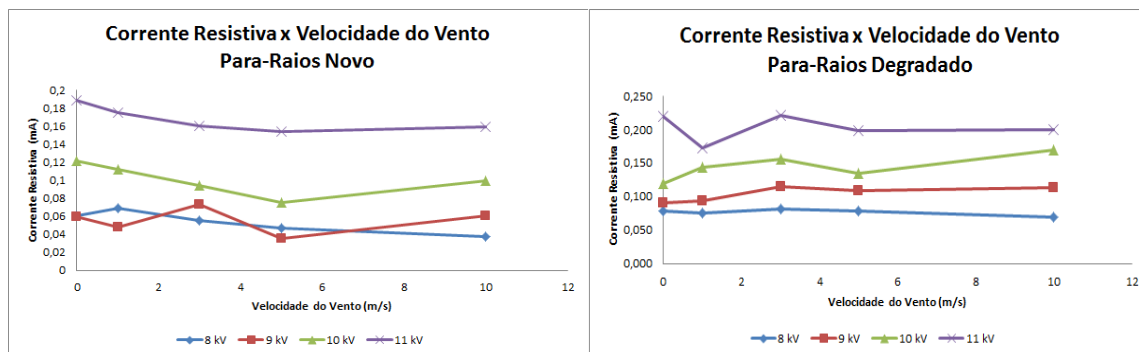


Figura 5.20 - Relação entre a corrente resistiva e a velocidade do vento em um para-raios novo

A diferença entre a temperatura do para-raios e a temperatura ambiente, na ausência de influência externa, deve ser função da energia térmica gerada no dispositivo devido à passagem da corrente de fuga. A dissipação desta energia fica, então, a cargo dos processos de radiação e convecção. Uma vez que tal diferença de temperatura é pequena (alcançando um valor máximo de 3°C para o dispositivo novo e 6,3°C para o degradado) a taxa de transferência de calor por convecção é pequena, conforme Equação 2.2. Essa situação é oposta à que acontece com conexões e outros equipamentos que são constantemente percorridos por altas correntes e apresentam elevada temperatura. Além disso, a condutividade térmica do ar é pequena, tornando o coeficiente convectivo pequeno e dificultando ainda mais a dissipação do calor gerado.

O aumento da velocidade do vento atua no sentido de elevar o coeficiente convectivo, permitindo que uma maior troca de calor ocorra entre o objeto e o fluido (ar). No entanto, tal aumento não é suficiente para causar a diminuição significativa da temperatura do para-raios. A Figura 5.21 mostra as diferenças de temperatura entre os para-raios e o ar em função da velocidade do vento.

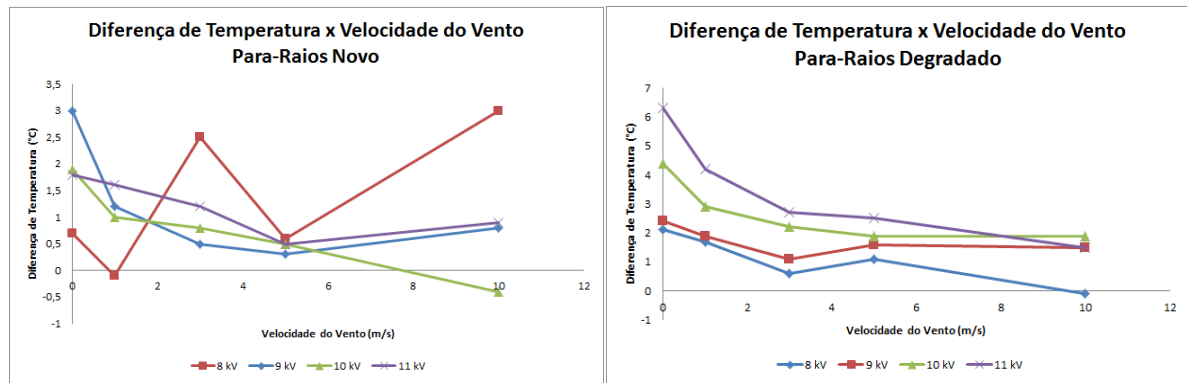


Figura 5.21 - Diferença entre a temperatura do para-raios e a temperatura ambiente

Pode-se observar, portanto, que o balanço de energia que resulta na temperatura final do para-raios é bastante complexo. Tal temperatura não é passível de determinação apenas conhecendo-se sua corrente resistiva.

Durante a realização do experimento, verificou-se que a temperatura superficial dos para-raios sofria grande influência da temperatura ambiente. Uma vez que esta não era controlada no local, os valores medidos para o para-raios podem parecer confusos. Em alguns casos, o aumento da velocidade do vento coincide com um aumento na temperatura, mas a relação de causa e efeito não é verdadeira. A Figura 5.22 e a Figura 5.23 apresentam a evolução da temperatura do para-raios e da temperatura ambiente em todas as situações analisadas.

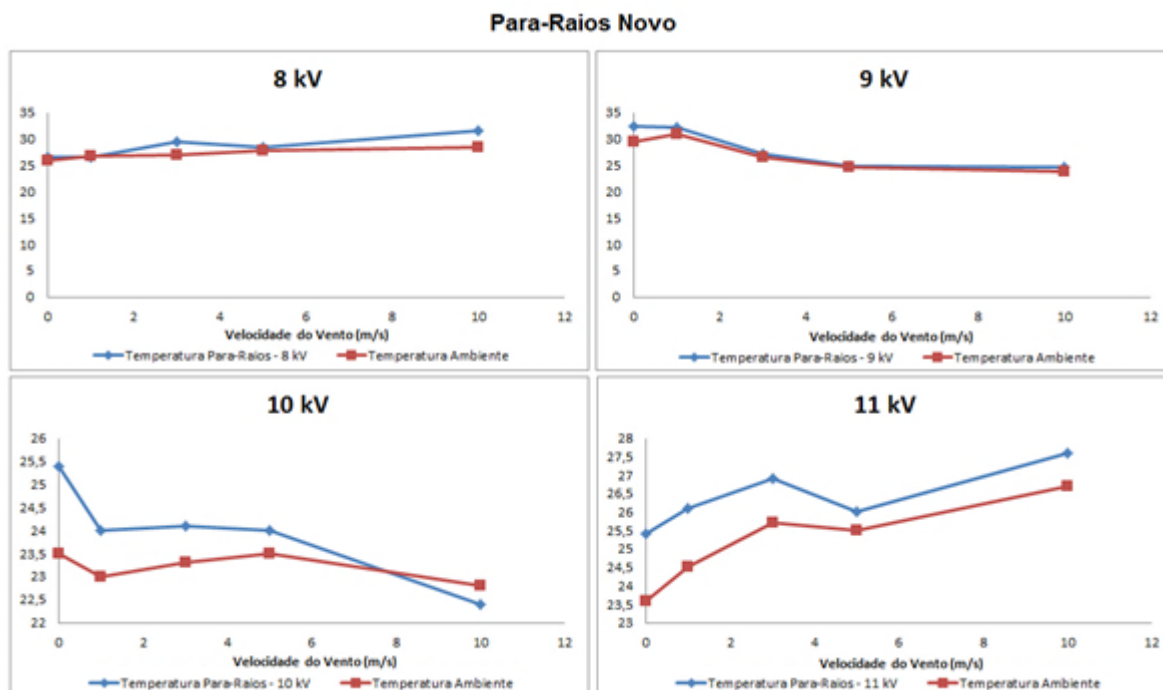


Figura 5.22 - Evolução das temperaturas de interesse no para-raios novo

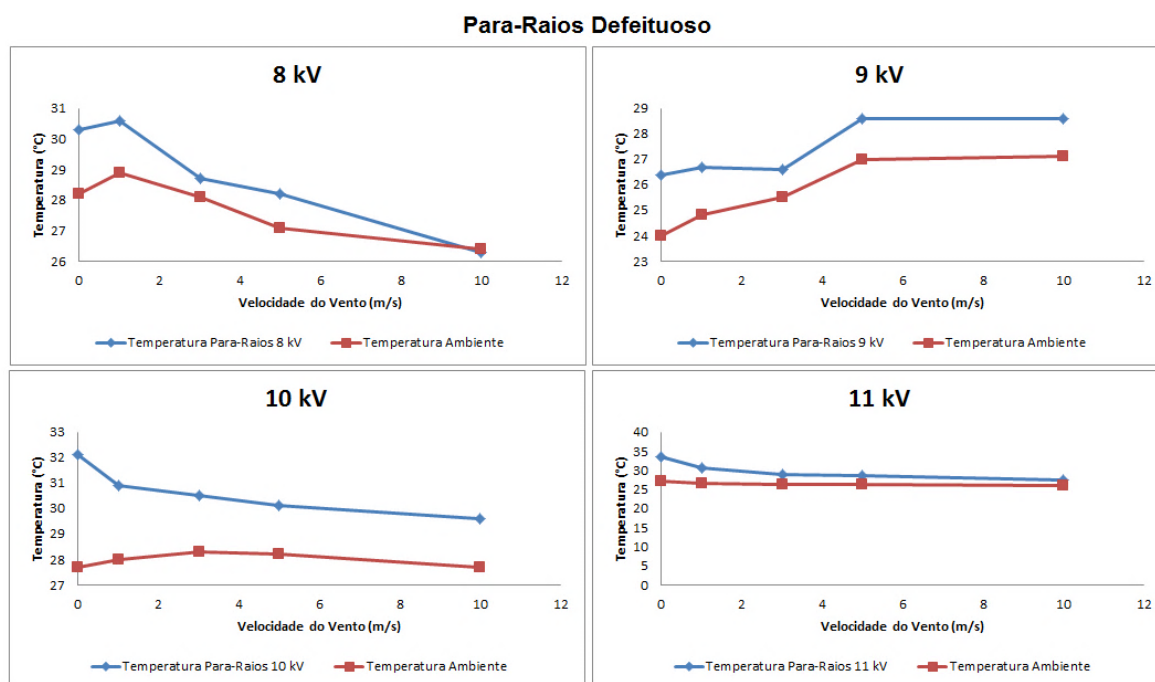


Figura 5.23 - Evolução das temperaturas de interesse no para-raios degradado

É plausível dizer que a temperatura ambiente atua como *offset* para a temperatura do para-raios.

5.5 Temperatura ambiente

A importância da temperatura ambiente, evidenciada durante o experimento sobre a velocidade do vento, impulsionou a realização de um novo experimento cuja finalidade é observar o comportamento dos para-raios submetidos a diferentes temperaturas. Para tanto, ambos foram energizados com dois níveis de tensão diferentes em uma sala com temperatura controlada. A temperatura ambiente foi variada dentro do intervalo permitido pelo equipamento de refrigeração e os dados relevantes coletados após a estabilização da temperatura superficial. Os dados de interesse deste experimento são a temperatura e a corrente de fuga dos dispositivos.

A Figura 5.24 apresenta o esquemático do ensaio realizado.

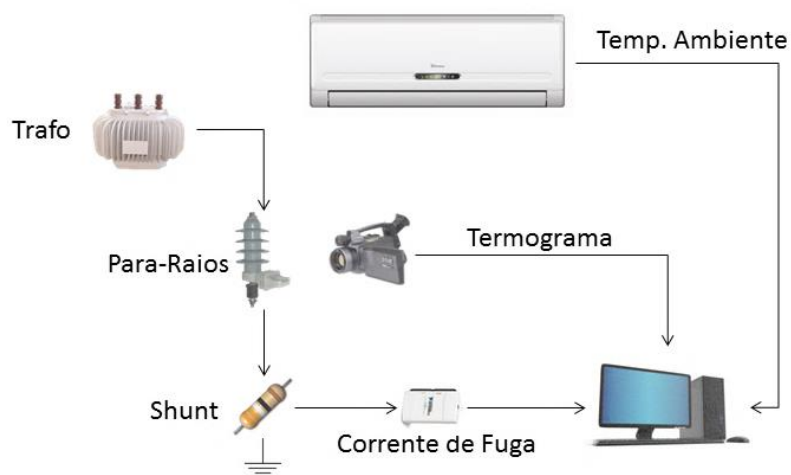


Figura 5.24 - Esquemático do experimento sobre a influência da temperatura ambiente

Os equipamentos utilizados foram:

1. Para-raios sem defeito
2. Para-raios com defeito
3. Ar Condicionado
4. Módulo de aquisição
5. Câmera térmica
6. Termohigrômetro digital
7. Transformador
8. Resistores shunt

9. Multímetros

10. Osciloscópio

11. Computador

Novamente, os multímetros e osciloscópio serviram para monitorar a tensão aplicada e a forma de onda das correntes de fuga. As condições climáticas foram monitoradas por um termohigrômetro digital e a circulação de vento no local era nula.

A Figura 5.25 apresenta a montagem utilizada nesse experimento.



Figura 5.25 - Equipamentos utilizados no experimento sobre a influência da temperatura ambiente na temperatura superficial de para-raios

Os dados obtidos no experimento estão resumidos na Tabela 5.7 e na Tabela 5.8. A incerteza associada à medição da temperatura dos para-raios é de $0,7^{\circ}\text{C}$.

Tabela 5.7 - Dados do experimento sobre a influência da temperatura ambiente no para-raios novo

Para-Raios Novo				
Tensão (V_{RMS})	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Para- raios (°C)	Corrente Total (mA_{RMS})	Corrente Resistiva (mA_{RMS})
8000	17,6	20,3	0,29	0,037
	18,8	21,1	0,29	0,027
	20,6	21,9	0,30	0,023
	21,1	22,8	0,30	0,036
	21,8	23,3	0,30	0,030
	22,8	24,1	0,30	0,021
	23,1	24,8	0,30	0,032
	24,0	26,3	0,31	0,072
	25,0	27,4	0,31	0,059
11000	26,0	28,4	0,31	0,074
	18,9	22,4	0,45	0,110
	21,4	25,7	0,45	0,124
	22,0	26,6	0,45	0,134
	23,0	27,4	0,45	0,121
	24,0	28,3	0,46	0,159
	25,0	28,9	0,45	0,157

Tabela 5.8 - Dados do experimento sobre a influência da temperatura ambiente no para-raios defeituoso

Para-Raios Degradado				
Tensão (V_{RMS})	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Para- raios (°C)	Corrente Total (mA_{RMS})	Corrente Resistiva (mA_{RMS})
8000	18,9	21,8	0,29	0,062
	20,3	22,6	0,29	0,057
	20,9	23,7	0,29	0,070
	21,8	24,9	0,29	0,065
	23,1	26,8	0,30	0,088
	24,5	27,9	0,30	0,078
11000	19,1	27,2	0,47	0,198
	20,3	27,8	0,47	0,188
	21,0	28,2	0,47	0,185
	21,9	27,2	0,46	0,129
	23,0	28,1	0,46	0,146
	23,6	30,2	0,46	0,183

A presença de distorção na tensão de alimentação do para-raios em alguns momentos do experimento acarretou o aumento da parcela resistiva tanto no dispositivo novo quanto no degradado. Esse aumento é mais perceptível para o caso da aplicação de 8 kV no para-raios novo com temperaturas ambiente de 24°C e 26°C. No pior caso, a elevação da corrente resistiva chega a 3,5 vezes.

A temperatura ambiente certamente é um fator muito importante quando o termo de geração de energia (Ri^2) é pequeno. A Figura 5.26 mostra que a temperatura dos para-raios acompanha a temperatura ambiente ao longo do experimento.

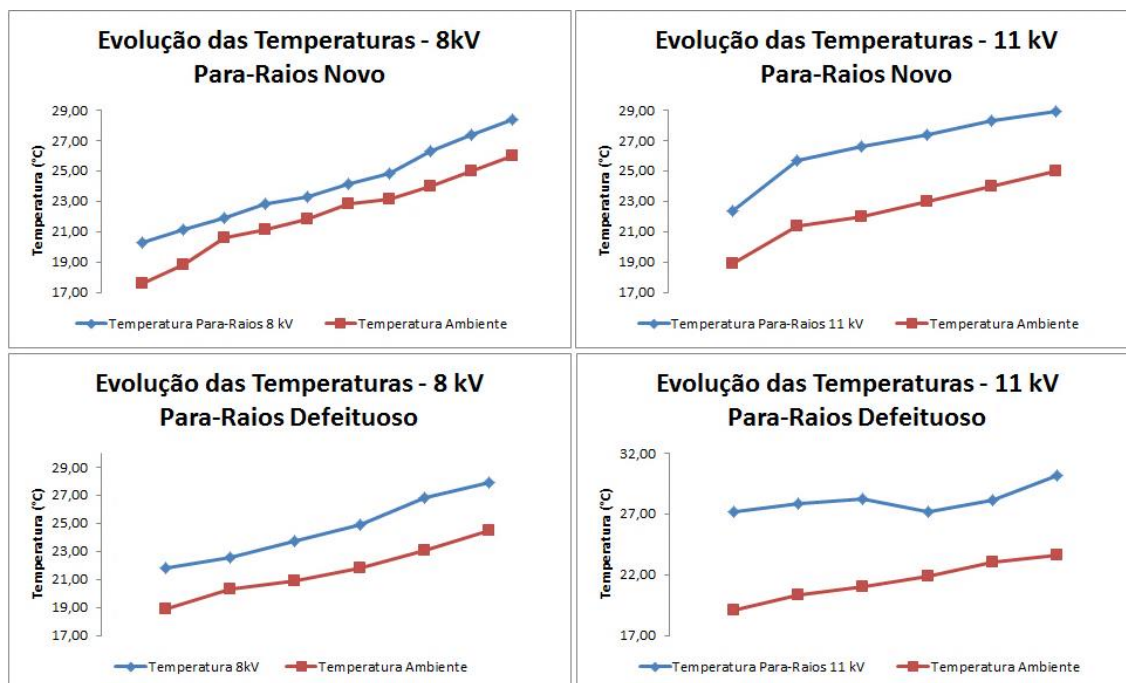


Figura 5.26 - Evolução das temperaturas de interesse ao longo do experimento

Considerando a mínima influência de outros fatores, esperava-se que a diferença de temperatura permanecesse constante para todas as situações. A Tabela 5.9 apresenta os valores máximos e mínimos para as diferenças de temperatura encontradas.

Tabela 5.9 - Diferenças máximas e mínimas entre a temperatura do para-raios e a temperatura ambiente durante o experimento

Para-Raios	Tensão (V_{RMS})	$\Delta T_{max}(^{\circ}C)$	$\Delta T_{min}(^{\circ}C)$	Dispersão ($^{\circ}C$)
Novo	8000	2,7	1,3	1,4
	11000	4,6	3,5	1,1
Degradado	8000	3,7	2,3	1,4
	11000	8,1	5,1	3,0

Observando a Tabela 5.9, verifica-se que a distância entre o valor máximo e o mínimo obtidos para a diferença de temperatura está dentro da faixa de incerteza calculada para a temperatura medida através dos termogramas. Portanto, os resultados sobre esta questão não são conclusivos.

A relação entre a corrente resistiva e a elevação de temperatura do para-raios em relação ao ambiente pode ser vista na Figura 5.27.

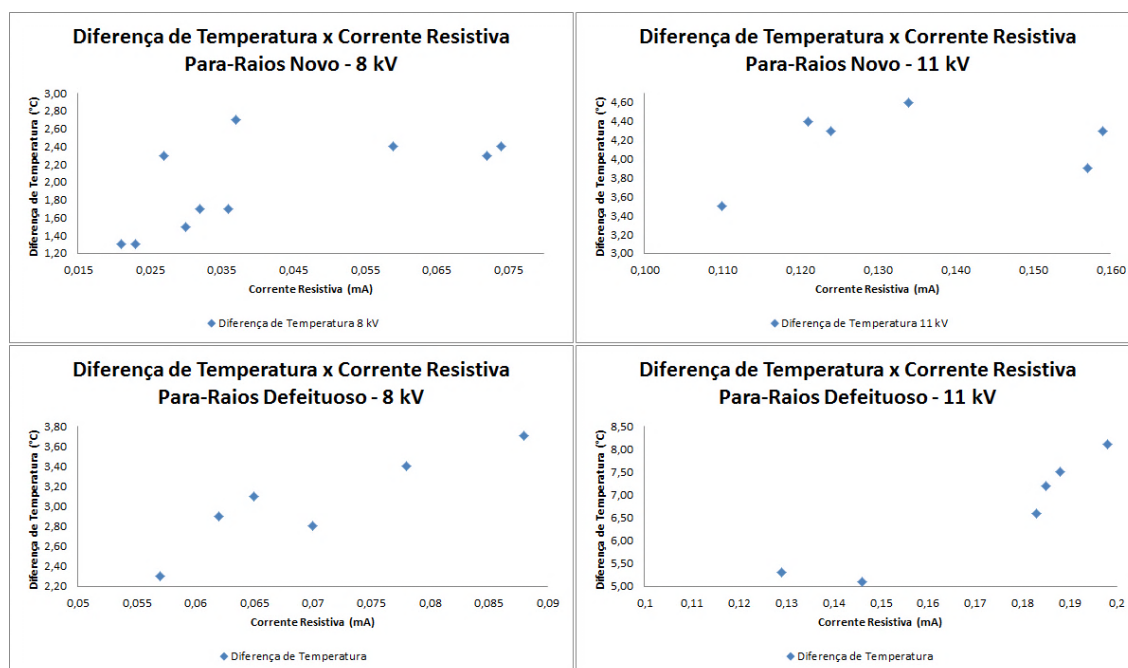


Figura 5.27 - Elevação de temperatura superficial do para-raios em relação à corrente resistiva que flui por seus terminais

Apesar de não externarem uma relação direta entre as grandezas, os gráficos apresentados na Figura 5.27 ilustram que um aumento na corrente resistiva geralmente é sucedido por um aumento da temperatura superficial. A elevação da temperatura ambiente aparenta contribuir ligeiramente para o aumento da corrente resistiva, conforme mostra a Figura 5.28. No entanto, não é possível afirmar que tal aumento seja primordialmente função deste fator.

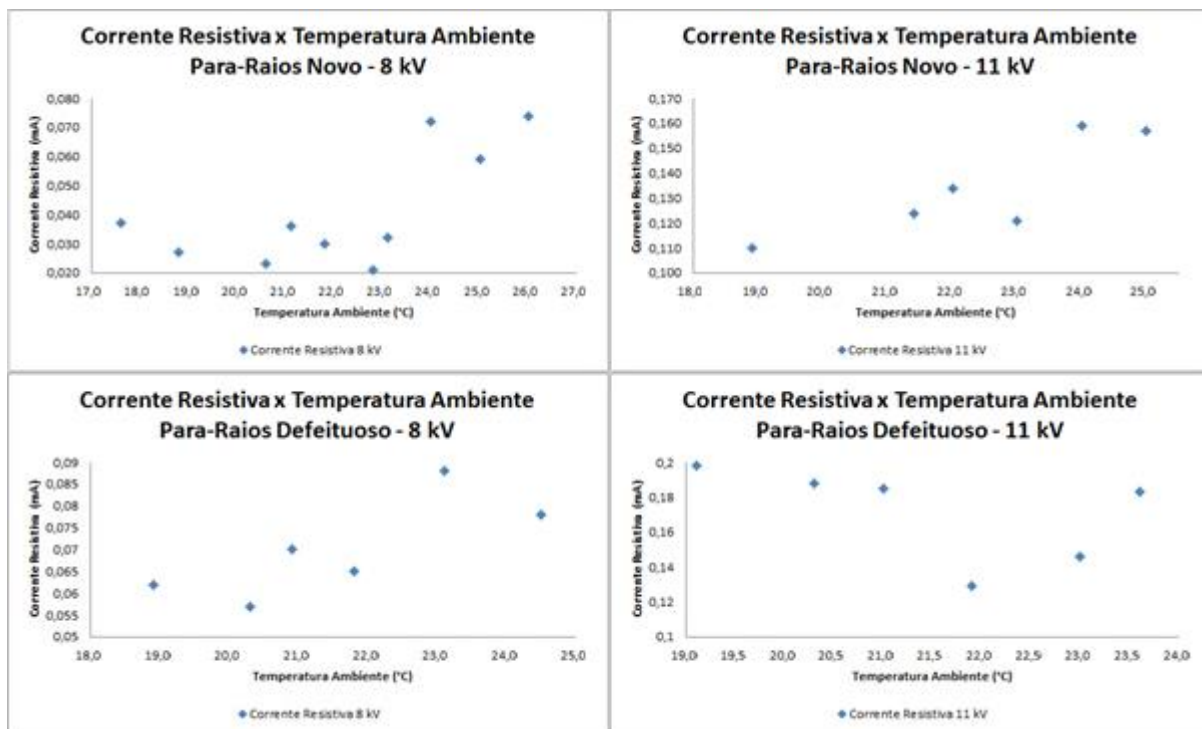


Figura 5.28 - Relação entre a corrente resistiva e a temperatura ambiente

A Figura 5.29 e a Figura 5.30 ilustram a aquisição dos termogramas no decorrer do experimento e suas respectivas fotos. Foram obtidas três imagens de posições diferentes para que o aquecimento em todas as partes do para-raios fosse analisado.

Conforme mencionado anteriormente, a foto é utilizada pelo sistema autônomo para segmentação do termograma. Além disso, ela também pode ser útil quando o contraste térmico é insuficiente para que o operador distinga os diversos equipamentos da subestação.

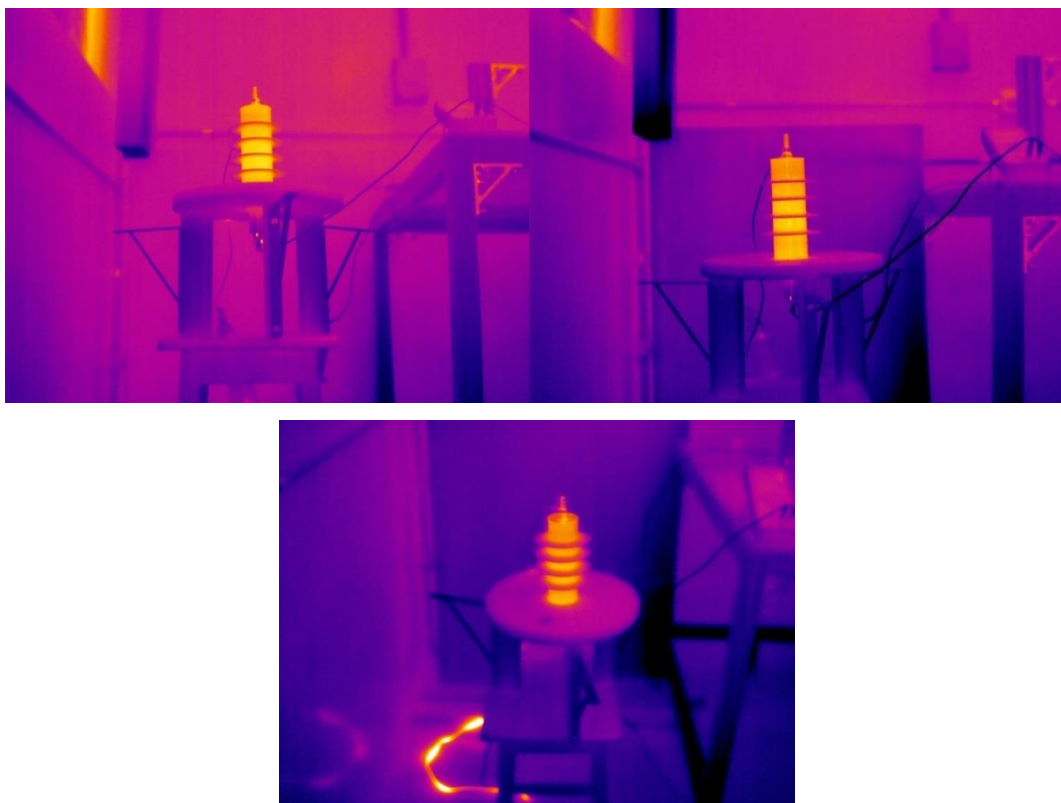


Figura 5.29 –Termogramas das três posições do para-raios novo submetido à tensão de 11 kV na temperatura ambiente de 25°C



Figura 5.30 - Três posições do para-raios novo submetido à tensão de 11 kV na temperatura ambiente de 25°C

O modelo matemático utilizado para a simulação do comportamento térmico do para-raios de ZnO, quando munido dos dados obtidos nos experimentos com tensão aplicada igual a 8 kV fornece os resultados mostrados na Figura 5.31 e na Figura 5.32, respectivamente para o para-raios novo e defeituoso.

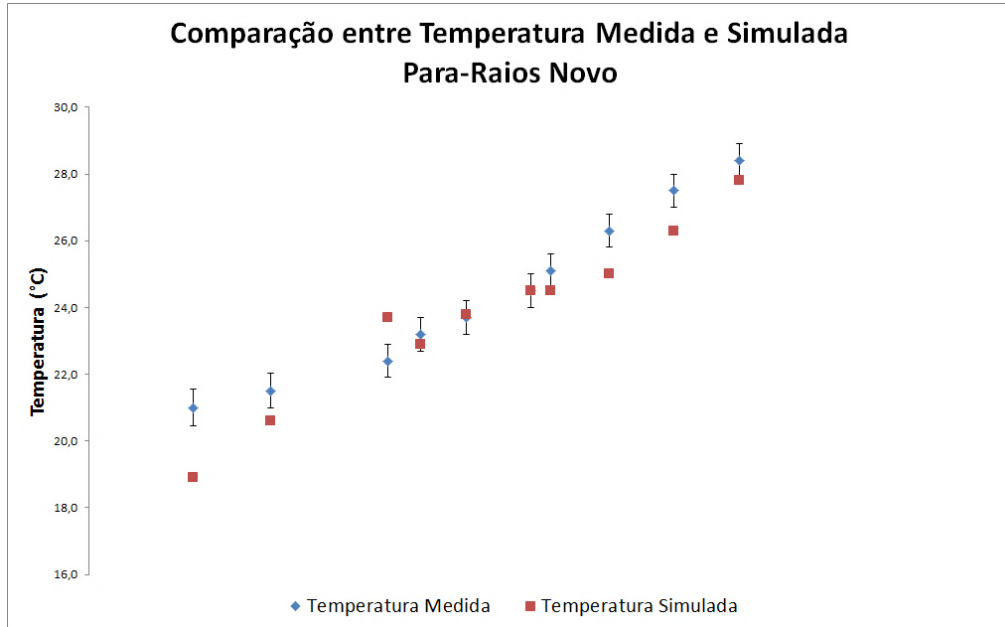


Figura 5.31 - Resultados fornecidos pelo modelo matemático com os dados do experimento sobre a temperatura ambiente para o para-raios sem defeitos

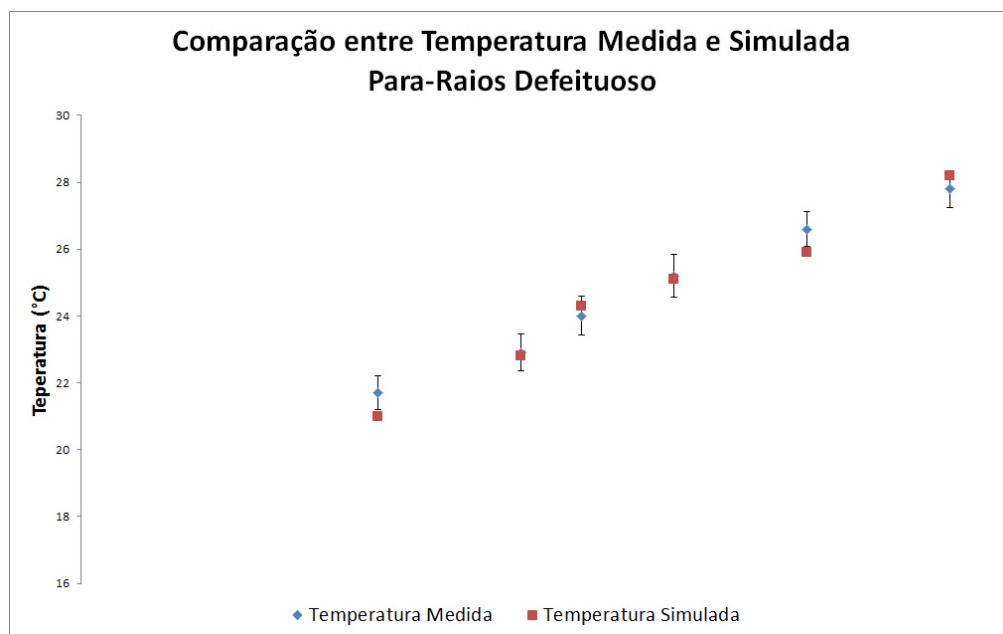


Figura 5.32 - Resultados fornecidos pelo modelo matemático com os dados do experimento sobre a temperatura ambiente para o para-raios defeituoso

A faixa de incerteza mostrada nas figuras anteriores está relacionada à incerteza de medição da temperatura por meio dos termogramas. As simulações para o dispositivo defeituoso apresentaram melhores resultados, sendo que a temperatura do modelo apresenta interseção com a faixa de incertezas apresentada. No caso do para-raios sem defeitos, a diferença entre a temperatura superficial e a simulada chegou a 3°C, caracterizando grande discrepância entre o modelo e o objeto.

5.6 Parâmetros dos termogramas

No ato da aquisição de um termograma, alguns parâmetros da câmera térmica devem ser ajustados de acordo com as propriedades do objeto e condições ambientais. Três desses parâmetros destacam-se por serem considerados importantes fontes de erros nas medições de temperatura: emissividade, temperatura ambiente e temperatura média refletida.

A fim de avaliar as consequências da utilização incorreta destas variáveis, a temperatura superficial de um para-raios foi medida por meio de termopares e comparada aos valores medidos em um termograma. A Figura 5.33 apresenta a montagem utilizada para este experimento.



Figura 5.33 - Equipamentos utilizados para a verificação da influência dos parâmetros de aquisição na temperatura medida

Inicialmente, os valores medidos encontram-se dispostos na Tabela 5.10. As medições feitas pelo termopar apresentam incerteza de $0,5^{\circ}\text{C}$. Já as realizadas pelos termogramas possuem incerteza de $0,7^{\circ}\text{C}$.

Tabela 5.10 - Valores medidos para o experimento sobre a influência dos parâmetros da câmera térmica

Temperatura Refletida ($^{\circ}\text{C}$)	Emissividade ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura Ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura Para-Raios ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura Termopar ($^{\circ}\text{C}$)
27,4	0,92	17,6	20,1	19,2

A variação de cada parâmetro enquanto os outros são mantidos constantes e sua influência na temperatura medida através do termograma são apresentadas na Figura 5.34, Figura 5.35 e Figura 5.36. Tais variações foram realizadas por meio do software desenvolvido em (TEIXEIRA, 2012) e pelo *FLIR ThermoCam Researcher*.

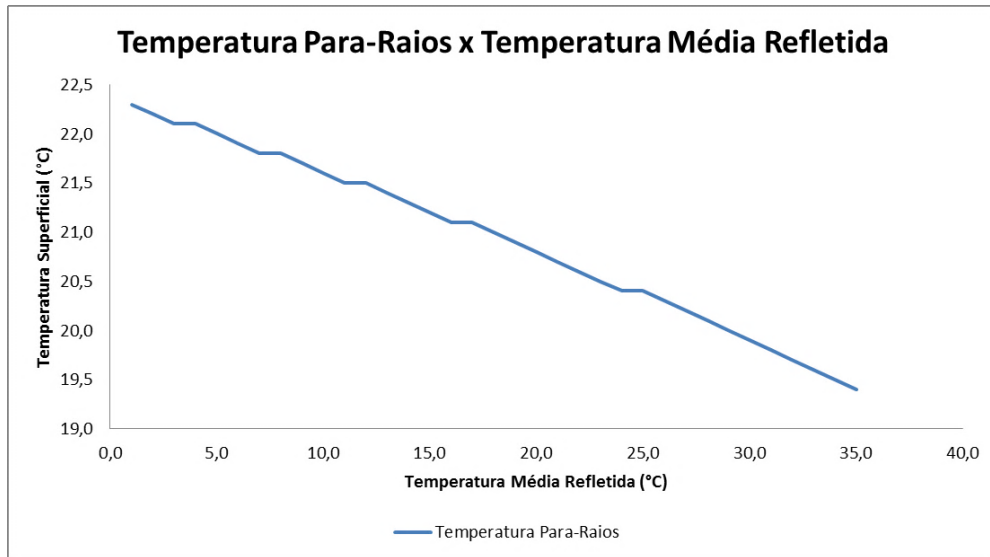


Figura 5.34 - Variação da temperatura superficial em função da temperatura média refletida considerada

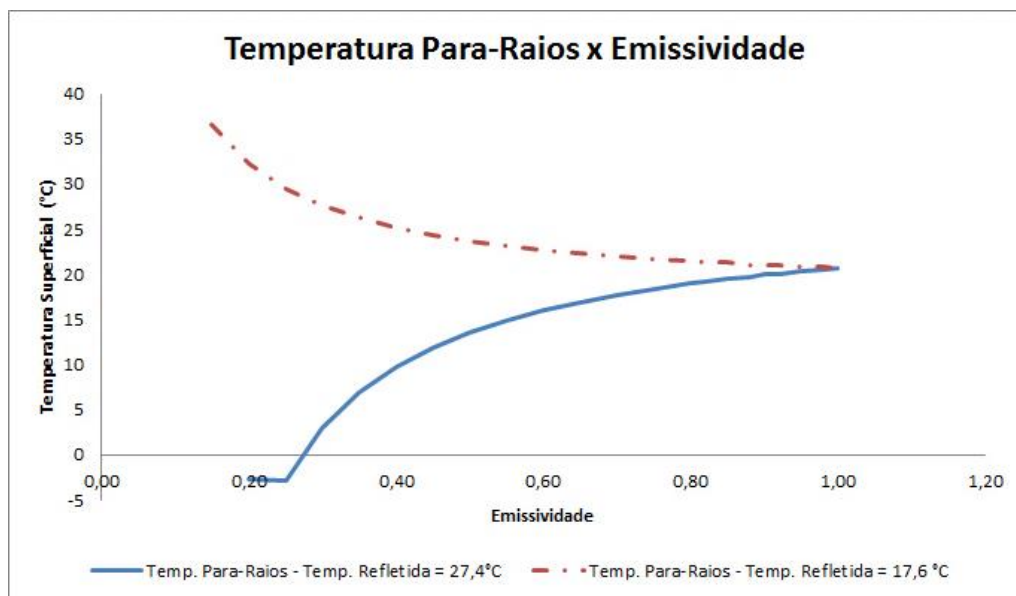


Figura 5.35 - Variação da temperatura superficial em função da emissividade adotada

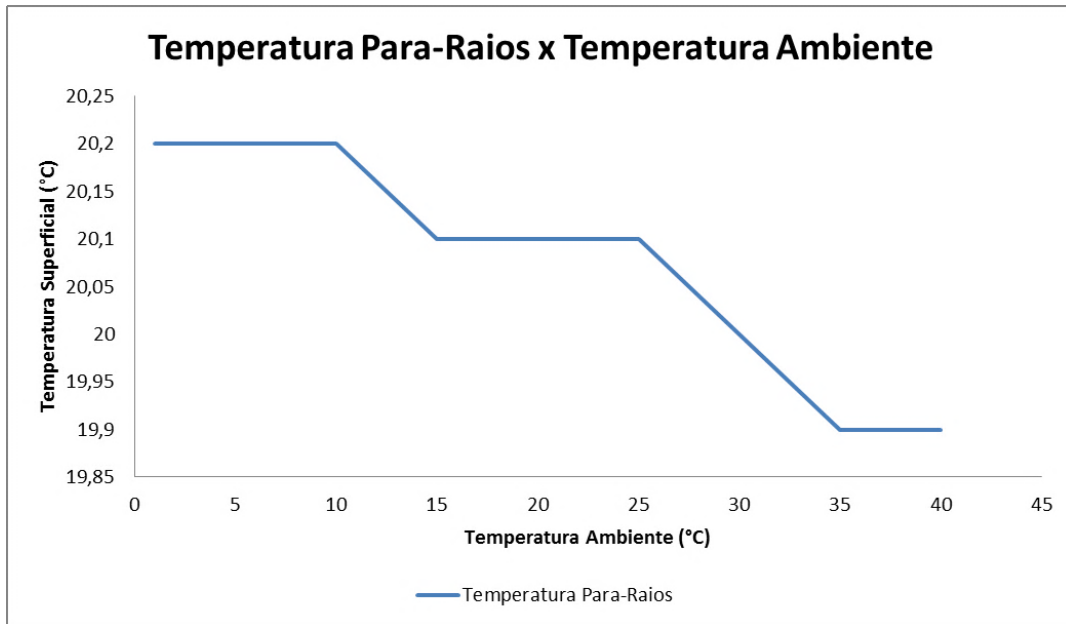


Figura 5.36 - Variação da temperatura superficial em função da temperatura ambiente considerada

A temperatura média refletida mostrou-se significativa para a medição da temperatura superficial do para-raios. Considerá-la acima de seu valor real implicará uma subestimação da temperatura superficial do dispositivo. O caso oposto, em que o valor utilizado é menor que o real, implica uma superestimação desta temperatura. A situação é mais grave quando a emissividade do equipamento em análise é baixa, acarretando alta refletividade. De acordo com a Figura 5.34, a influência da temperatura média refletida é proporcional à diferença entre seu valor real e o considerado. Para cada grau de diferença, a temperatura superficial medida apresentou variação média de 0,1°C. Uma boa aproximação para o erro causado pela utilização de valores inadequados para a temperatura refletida nesse experimento é expressa na Equação 5.1.

$$T_P = T_M + (1 - \varepsilon)(T_{Ru} - T_{Rr})$$

Equação 5.1

A Tabela 5.11 descreve os termos da Equação 5.1.

Tabela 5.11 - Descrição dos termos da Equação 5.1

Termo	Descrição	Unidade
T_P	Temperatura superficial do para-raios	°C
T_M	Temperatura medida no termograma	°C
ε	Emissividade	-
T_{R_u}	Temperatura média refletida utilizada	°C
T_{R_r}	Temperatura média refletida real	°C

Por meio da curva azul da Figura 5.35, nota-se que considerar emissividades muito baixas ocasiona medições absurdas para a temperatura do para-raios. A escolha de valores dentro de uma faixa de variação de 5% do valor real da emissividade proporcionou a obtenção de temperaturas, no pior caso, com diferença de 0,3°C para a considerada correta. No experimento realizado, a temperatura superficial apresentou uma relação com a emissividade próxima à logarítmica. Nesta situação, utilizar valores de emissividade menores que o correto levará à uma temperatura medida menor que a real.

A influência da emissividade pode ser ainda mais drástica no caso em que a temperatura média refletida for considerada como igual à temperatura ambiente (curva vermelha da Figura 5.35). Nesse caso, a variação dos valores de emissividade causam medições completamente diferentes do caso anterior, salientando que tal consideração pode ser bastante prejudicial para os resultados das inspeções. Para esta nova situação, valores menores que o correto acarretam temperatura medidas maiores que a real.

Por fim, pode-se afirmar que o valor de temperatura ambiente inserido na câmara térmica é pouco influente no resultado da medição. Nos casos em que a diferença entre a temperatura considerada e a temperatura ambiente medida foi maior que 15°C, a temperatura superficial apresentou variação inferior a 0,3°C. Portanto, mesmo que a medição de temperatura ambiente durante a inspeção seja aproximada, seu resultado não comprometerá a análise dos equipamentos. Tal conclusão também é válida para equipamentos que apresentam baixa emissividade.

Confirma-se, então, a baixa influência da temperatura ambiente devido à alta transmissividade do ar. Além disso, verifica-se que a emissividade e a temperatura refletida podem constituir uma parcela bastante significativa para a medição, dependendo da combinação de seus valores (Equação 2.11). Como já mencionado, a influência da temperatura média refletida diminui à medida que a emissividade do objeto aumenta.

Alguns casos particulares interessantes, como a escolha de um valor muito baixo para a emissividade ou a consideração da temperatura média refletida igual à temperatura ambiente podem ser observados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Resultado da variação dos parâmetros de aquisição pelo software desenvolvido por (TEIXEIRA, 2012) e pelo *FLIR ThermoCam Researcher*

Nº	Temperatura Refletida (°C)	Emissividade (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Para-Raios (°C)
1	27,4	0,25	17,6	-2,9
2	27,4	0,75	17,6	18,4
3	17,6	0,75	17,6	21,8
4	27,4	0,92	40,0	19,9
5	17,6	0,92	17,6	21,0
6	33,0	0,92	17,6	19,6

O caso número 3, em que a temperatura média refletida é igual à temperatura ambiente e a emissividade é 0,75, ilustra o procedimento padrão adotado em inspeções termográficas. Nessas situações, a emissividade é considerada única para todos os equipamentos inspecionados.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho descreveu uma metodologia para determinação da corrente resistiva de para-raios de ZnO baseada na medição da corrente de fuga total e na amostragem de uma forma de onda representativa da tensão aplicada. Tal metodologia foi desenvolvida para ser incorporada a um sistema autônomo de monitoramento de subestações de energia e possibilitar a avaliação completa do para-raios, atuando de forma complementar à termografia. Esta, por sua vez, foi abordada de forma a melhor identificar os fatores que influenciam na medição da temperatura superficial e, conseqüentemente, no diagnóstico de anomalias térmicas desse dispositivo.

Sobre a corrente resistiva, observou-se que a presença de harmônicos na tensão de operação não pode ser ignorada. Considerar que os harmônicos são oriundos exclusivamente da não linearidade dos varistores não traduz os resultados obtidos nas simulações. Apesar do senso comum, verifica-se que o terceiro harmônico nem sempre é o mais significativo, a exemplo do caso em que o quinto se mostrou mais proeminente. Portanto, a distorção harmônica da tensão exerce grande influência no resultado final das medições da corrente resistiva.

A aplicabilidade prática da metodologia desenvolvida para extração da corrente resistiva foi comprovada ao longo dos experimentos realizados. Além de simples e robusta, a medição dessa corrente não exige experiência do usuário nem padronização de procedimentos, uma vez que é completamente automatizada. Para sua aplicação em campo, é necessário o desenvolvimento de um dispositivo de

medição da corrente de fuga total para ser instalado na base dos para-raios e se comunicar com o sistema quando requisitado.

Realizar um experimento para a avaliação de apenas um fator por vez mostrou-se bastante complexo, já que isolar a influência deste fator exige um ambiente extremamente controlado. Experimentos ao ar livre, como o referente à radiação solar, implicam a falta de controle sobre a temperatura ambiente e velocidade do vento, além da impossibilidade de medição da corrente de fuga. No caso do túnel de vento, foi impossível controlar a temperatura ambiente ou acompanhar a variação da temperatura superficial em tempo real. Apesar disso, os resultados obtidos apontam uma direção de melhoria do processo de monitoramento e diagnóstico de para-raios.

A incidência de radiação solar provocou aquecimento distinto em diferentes regiões do dispositivo. A parcela de maior relevância é a radiação direta, sendo que a região exposta a ela apresentou maior elevação da temperatura superficial. A radiação difusa provocou um aquecimento de menor magnitude e próximo ao uniforme em toda a superfície. A diferença de temperatura entre as regiões do para-raios devido à radiação solar pode ser facilmente confundida com a causada por uma anomalia térmica, causando o diagnóstico equivocado do dispositivo. Esse fato é relevante mesmo durante o início da manhã e final da tarde, fazendo com que a realização de inspeções durante o dia não seja recomendada. Ainda, é possível que uma grande elevação de temperatura devido à radiação seja significativa para a corrente de fuga do para-raios e que o período de 2 horas após o pôr do sol, adotado como premissa para as inspeções, não seja suficiente para dissipação da energia térmica acumulada ao longo do dia.

Nas condições em que foram realizados, os experimentos no túnel demonstraram que a velocidade do vento não é um fator importante para a temperatura superficial do para-raios. Tais condições expressam a ausência ou insignificância de aquecimento externo por agentes diferentes da corrente resistiva. O fluxo de calor convectivo é dependente da diferença de temperatura entre o objeto e o meio, sendo maior quanto maior for essa diferença. Sendo assim, uma vez que os para-raios apresentaram, respectivamente, diferenças máximas de 3°C e 6,3°C é plausível que o resfriamento observado fosse pequeno. A velocidade do vento atua de forma a

aumentar o coeficiente convectivo e, conseqüentemente, o fluxo de calor. No entanto, tal aumento não é suficiente para compensar a pequena diferença de temperatura.

Em situações de campo, o aquecimento do para-raios não é função somente da corrente resistiva. No caso de insolação, por exemplo, é possível que o para-raios atinja temperaturas bastante superiores à temperatura ambiente, acentuando o processo de troca de calor. Considerando esses fatores, a velocidade do vento poderia se tornar muito mais significativa no processo de resfriamento do para-raios, sendo capaz até mesmo de mascarar regiões ou pontos quentes. Uma vez que a recomendação é para que as inspeções sejam realizadas na ausência de carga solar, é improvável que a velocidade do vento seja importante para os resultados das medições de temperatura.

Dentro da faixa de valores ensaiados, a temperatura ambiente não apresentou influência concreta na corrente de fuga de nenhum dos para-raios. Dos gráficos apresentados na Seção 4.2.2 já se notava que apenas temperaturas bastante elevadas alterariam visivelmente tal corrente. Nesse experimento, a diferença entre a temperatura superficial e a temperatura ambiente foi atribuída apenas à corrente resistiva, buscando-se uma relação entre essa corrente e a diferença entre as temperaturas. No entanto, apesar de um aumento na corrente resistiva ocasionar um aumento na diferença de temperatura, não foi possível determinar com clareza uma aproximação para essa relação.

O experimento sobre a radiação solar e o referente à temperatura ambiente também foram utilizados para fornecer dados relevantes para teste com o modelo matemático do para-raios. Esses testes se mostraram bastante interessantes e aproximaram de forma satisfatória o aquecimento superficial devido à radiação. Já o aquecimento causado pela corrente de fuga ainda carece de ajustes e da realização de novos experimentos que contemplem outras faixas de temperatura e tensão. Espera-se que num futuro próximo o modelo seja capaz de prever os efeitos de insolação, velocidade do vento e temperatura ambiente, bem como o aquecimento pela passagem da corrente resistiva. Assim, uma ferramenta poderosa para o diagnóstico de para-raios estará disponível dentro do sistema de monitoramento em construção.

As consequências da consideração dos parâmetros ajustáveis das câmeras térmicas foram tratadas na Seção 5.6 e mostram que o valor utilizado para a temperatura ambiente é pouco relevante para os resultados das medições. Tal fato permite que a estimativa da temperatura durante a aquisição dos dados não necessite de maiores cuidados. A emissividade é responsável por relacionar a quantidade de radiação atribuída ao corpo com a temperatura deste mesmo corpo. Um erro nesse parâmetro acarreta medições bastante equivocadas, podendo levar à subestimação ou superestimação das temperaturas. Utilizar um único valor para todos os equipamentos de uma instalação é assumir o risco de comprometer todos os diagnósticos realizados com base nessas medições.

A temperatura média refletida também se mostra importante para a medição da temperatura em para-raios, mesmo que este dispositivo apresente baixa refletividade. Considerar a temperatura refletida como sendo igual à temperatura ambiente seria plausível se equipamentos e pessoas estivessem em equilíbrio térmico. Contudo, grande parte dos objetos próximos ao para-raios não atende tal requisito, tornando necessária a medição da temperatura média refletida no ato da aquisição dos termogramas. Verificou-se que a influência desse parâmetro está intimamente relacionada à emissividade do material e, para o dispositivo em questão, foi determinada uma relação para sua aproximação (Equação 5.1).

O desconhecimento das incertezas relacionadas às temperaturas medidas através da termografia e a ausência de estudos sobre os modos de falha dos para-raios e seus reais sintomas térmicos compromete a confiabilidade das inspeções realizadas atualmente. A aplicação da termografia quantitativa só é possível a partir do preenchimento dessas lacunas, ou seja, o aumento na qualidade e relevância das informações. Somente a partir de uma avaliação metrológica criteriosa será possível evitar abordagens muito conservadoras e tornar mais eficiente a gestão dos ativos, visando o momento mais oportuno para a realização das intervenções.

Proposta de continuidade

O desenvolvimento dos sensores de corrente de fuga para o sistema autônomo de monitoramento e a transcrição dos algoritmos de análise para a plataforma em vigor são consequências naturais do trabalho desenvolvido. Além disso, é importante a comparação dos resultados com os equipamentos de medição adotados atualmente pelas empresas de energia.

A revisão dos níveis de criticidade dos para-raios, baseados em estudos e experimentos focados nas causas das anomalias térmicas, é muito importante no sentido de substituir os critérios subjetivos adotados em sua avaliação. A determinação das incertezas das medições e critérios corretamente estabelecidos culminarão numa abordagem voltada para o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 5465**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1981.
- ABNT. **NBR 6935**. Associação Brasileira de Normas técnicas. Rio de Janeiro. 1985.
- ABNT. **NBR 5459**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1987.
- ABNT. **NBR 5287**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1988.
- AKBAR, M.; AHMAD, M. Failure Study of Metal-Oxide Surge Arresters. **ELSEVIER Electric Power Systems Research**, 50, Março 1999. 79-82.
- ÁLVARES, R. C. **Diagnóstico de Falhas em Para-Raios Utilizando Termografia**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.
- ANEEL. Procedimentos de Rede. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>. Acesso em: 04 Junho 2013.
- ARAÚJO, D. C. P.; MARTINS, Á. J. A. L.; SILVA, N. S. **A Experiência da CEMIG em Monitoramento e Diagnóstico de Para-Raios em Subestações de 69 kV e 138 kV**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Campina Grande: [s.n.]. 2006.
- ARAÚJO, R. A.; BARBOSA, L. C.; SINISCALCHI, R. T. **Os Impactos da Aplicação da Termografia na Operação do Sistema Elétrico de Furnas e as Ações Adotadas para Buscas a Máxima Operacionalidade, Produtividade e Confiabilidade do Sistema**. X EDAO. São Paulo: [s.n.]. 2008.
- BERGMAN, W. J. **Equipment Monitoring Selection as a part of Substation Automation**. IEEE Switchgear Meeting. Pittsburg: [s.n.]. 1999.
- CALADO, F. R.; URSINE, W. A. M.; TEIXEIRA, G. G. D.; RESENDE, P.; DE ANDRADE, R. M. **Metrological Reliability Analysis in Thermal / Visible Stereo Vision Systems for Fault Detection in Electric Power Distribution Systems**. 11th Quantitative InfraRed Thermography - QIRT. Nápoles: [s.n.]. 2012.

CEMIG. **Execução e Controle de Inspeções Termográficas, Instrução de Manutenção IM-OM-SE-00500**. Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

CEMIG. **Instrução de execução e critérios para inspeção termográfica em subestações e linhas de transmissão utilizando o termovisor**. Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.

CEMIG. **Termografia Aplicada ao Sistema Elétrico de Potência**. Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

CEMIG. Cemig em números. **Companhia Energética de Minas Gerais**, 2012. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/publicacoes/Paginas/cemig_em_numeros.aspx>. Acesso em: 04 Junho 2013.

CHRZANOWSKI, K. **Non-Contact Thermometry – Measurement Errors**. Warsaw: SPIE Polish Chapter, 2001.

COVRE, H. P. **Integração de Dados dos Sistemas de Proteção de Subestações Distribuidoras**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

DINIZ, A. M. M. **Ensaio e Avaliação Elétrica de um Novo Projeto de Para-Raios para Sistemas de Distribuição em Média Tensão**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2011.

DINIZ, H. E. P. **Termografia Quantitativa como Ferramenta de Gestão de Ativos do Sistema Elétrico de Potência**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

ELFWING, M. **Nanoscale Characterisation of Barriers to Electron Conduction in ZnO Varistor Materials**. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 686. Uppsala. 2002.

FERREIRA, D. G. **Visão Integrada da Automação da Operação e Manutenção de Sistemas Elétricos de Potência**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

FERREIRA, R. A. M. **Avaliação do Processo de Aquecimento de Conexões Elétricas Utilizadas em Redes de Distribuição**. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

FONSECA, L. G.; SILVINO, J. L.; RESENDE, P.; SILVA, N. S.; ANDREADE, R. M. **Modelagem Matemática do Processo de Aquecimento de Para-Raios de ZnO Ocasionado pela Presença de Falhas em Sua Microestrutura**. Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica - CIBEM. Porto: [s.n.]. 2011.

FRANCO, J. L. D. **Curso sobre Para-Raios: Aplicações em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão**. São Paulo: Franco Engenharia, 2001.

HEINRICH, C.; HINRICHSEN, V. Diagnosis and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks - Comparison of Existing and Newly Developed Procedures. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 16, n. 1, Janeiro 2001. 138-143.

HINRICHSEN, V. **Monitoring of High Voltage Metal Oxide Surge Arresters**. VI Jornadas Internacionales de Aislamiento Eléctrico. Bilbao: [s.n.]. 1997.

HOLST, G. C. **Common Sens Approach to Thermal Imaging**. Flórida: JCD Publishing, 2000.

HOLZER, M.; ZAPSKY, W. Modeling Varistors with Pspice: Simulation Beats Trial and Error. **Compliance Engineering: Annual Reference Guide**, Maio 1999.

IEC. **IEC 60099-5: Surge arresters - Selection and application recommendations**. International Electrotechnical Commission. [S.I.]. 2000.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 5^a. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2002. 680 p.

KATRASNIK, J.; PERNUS, F.; LIKAR, B. A Survey of Mobile Robots for Distribution Power Line Inspection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Janeiro 2010. 485-493.

LEE, B.-H.; KANG, S.-M. A New On-Line Leakage Current Monitoring System of ZnO Surge Arresters. **ELSEVIER Materials Science and Engineering**, 2005. 13-18.

LUNDQUIST, J.; STENSTRÖM, L.; SCHEI, A.; HANSEN, B. New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 5, n. 4, Novembro 1990. 1811-1822.

MALDAGUE, X. P. V. **Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.

MALDAGUE, X. P. V. **Introduction to NDT by Active Infrared Thermography**. Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval. Quebec. 2002.

NETO, E. T. W. **Monitoramento e Diagnóstico de Pára-Raios a ZnO através de Redes Neurais Artificiais**. Tese de Doutorado, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2007.

NETO, E. T. W.; COSTA, E. G. D.; SOUZA, R. T. D.; MACEDO, E. C. T. D.; MAIA, M. J. A. Monitoração e Diagnósticos de Pára-Raios a ZnO. **IEEE Latin America Transactions**, 4, n. 3, Maio 2006. 170-176.

ONS. O que é o SIN - Sistema Interligado Nacional. **Operador Nacional do Sistema**, 2013. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em: 04 Junho 2013.

PINTO, J. K. C.; MASUDA, M.; MAGRINI, L. C.; JARDINI, J. A.; GARBELLOTTI, M. V. **Mobile Robot for Hot Spot Monitoring in Electric Power Substation**. Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chigago: [s.n.]. 2008. p. 1-5.

RAO, P. D. S. Infrared thermography and its applications in civil engineering. **The Indian Concrete Journal**, p. 41-50, Maio 2008.

SAKSHAUG, E. C. A Brief History of AC Surge Arresters. **IEEE Power Engineering Review**, Agosto 1991. 11-13.

SANTOS, L. D. **Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2006.

SANTOS, L. D. **Classificação e modelagem de fatores de influência sobre inspeções termográficas em ambientes desabrigados**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2012.

SILVINO, J. L.; RESENDE, P.; SILVA, N. S.; URSINE, W. A. M. **Prototype for Automatic Monitoring and Diagnosis of Surge Arresters Using Infrared Techniques**. Ground'2010 & 4th LPE. Salvador: [s.n.]. 2010.

SNELL, J.; RENOWDEN, J. **Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines**. IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. Montreal: [s.n.]. 2000. p. 135-144.

TEIXEIRA, G. G. D. **Confiabilidade Metrológica em Termografia Aplicada em Sistemas Elétricos**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

TOSHIBA. History of Surge Arresters. **TOSHIBA Corporation**, 2013. Disponível em: <<http://www.toshiba.co.jp>>. Acesso em: 11 Junho 2013.

URSINE, W. A. M.; CALADO, F. R.; TEIXEIRA, G. G. D.; SILVINO, J. L.; DE ANDRADE, R. M. **Thermal / Visible Autonomous Stereo Vision System Calibration Methodology for Non-controlled Environments**. 11th Quantitative InfraRed Thermography - QIRT. Nápoles: [s.n.]. 2012.

URSINE, W. A. M.; SILVINO, J. L. **Metodologia Alternativa para Análise da Corrente de Fuga em Para-Raios de ZnO sem Centelhadores**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.

WANG, B.; GUO, R.; LI, B.; HAN, L.; SUN, Y.; WANG, . SmartGuard: An Autonomous Robotic System for Inspecting Substation Equipment. **Journal of Field Robotics**, 16 Janeiro/Fevereiro 2012. 123-137.

XU, Z.-N.; ZHAO, L.-J.; DING, A.; LÜ, F.-C. A Current Orthogonality Method to Extract Resistive Leakage Current of MOSA. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Janeiro 2013. 93-101.

ZAIONS, D. R. **Consolidação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade em uma Planta de Celulose e Papel**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003.

ZHU, H.; RAGHUVeer, M. R. Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 16, n. 4, Outubro 2001. 599-603.