

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica

Diagnóstico Inteligente de Falhas em Pára-Raios

Carlos Alexandre Laurentys de Almeida

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, **como parte dos requisitos necessários à obtenção de título de Mestre em Engenharia.**

Orientador: Walmir Matos Caminhas

Belo Horizonte - MG

**Agradecimentos**

*Agradeço a todos colaboradores pela incessante batalha na construção de conhecimento. Entre estes devo citar a presença sempre marcante de meus pais, que, mesmo, algumas vezes em silêncio, muito diziam. Menciono o papel fundamental do corpo docente da UFMG na sedimentação de conhecimento destacando-se as Figuras do meu orientador Walmir Caminhas e meu co-orientador João Antônio de Vasconcelos. Finalizando, agradeço a Deus pela oportunidade oferecida.*

*“Não se pode criar alguma coisa valiosa sem determinação. Nos primórdios da força nuclear, por exemplo, conseguir aprovação para construir o primeiro submarino nuclear – O Nautilus – foi quase tão difícil quanto desenhá-lo e construí-lo. As boas idéias não são adotadas automaticamente. Precisam ser impelidas para a prática com paciência e coragem.”*

*Almirante Hyman Rickover*

## Resumo

Este trabalho propõe e implementa uma metodologia de diagnóstico de falhas em pára-raios. A metodologia aplica métodos baseados em dados históricos de medições, utilizando técnicas de inteligência computacional. O sistema faz uso das técnicas de termografia, corrente de fuga e radiointerferência para diagnosticar a condição operativa em pára-raios. O sistema desenvolvido foi validado utilizando uma base de dados fornecida pelo CEPEL (Centro de Pesquisa em Energia Elétrica), contendo diversos cenários de falhas em pára-raios. O índice de acerto obtido foi de aproximadamente 90%. Esse trabalho também contribui no que diz respeito ao gerenciamento de informações de pára-raios. O sistema computacional desenvolvido implementa um ambiente de trabalho completamente integrado, permitindo que as informações pertinentes de medições de pára-raios tornem-se disponíveis aos seus usuários de forma transparente. O novo paradigma para diagnóstico de falhas e processamento de informações de pára-raios desenvolvidos nessa dissertação se traduzem na melhora de qualidade e disponibilidade das informações pertinentes aos pára-raios. A ferramenta se constitui como um sistema de apoio a tomada de decisão para diagnóstico de falhas em pára-raios, sendo atualmente utilizada pelo CEPEL.

## **Abstract**

This work proposes and implements a methodology to develop a fault diagnosis system applied to lightning arresters. The methodology applies methods based on historical data of measurements of lightning arresters, using techniques of computational intelligence. The system makes use of the termovision, leakage current and radiointerference techniques to generate the diagnosis. The methodology was validated using a database supplied by the CEPEL, getting about 10% of error. This work also contributes to the management of lightning arresters information. The developed computational system implements an environment of work completely integrated, allowing that all the measurements information of lightning arrester to become available to its users by a transparent form. The new paradigm for fault diagnosis, management of lightning arresters implemented can be seen by the the improvement of quality and availability of the pertinent information to the lightning arresters.

# Sumário

<b><u>Capítulo 1 – Introdução</u></b> .....	<b>10</b>
<u>1.1 – Apresentação</u> .....	10
<u>1.2 – Revisão Bibliográfica</u> .....	11
<u>1.3 – Objetivos</u> .....	16
<u>1.4 – Descrição da Proposta</u> .....	16
<u>1.5 – Contribuições</u> .....	17
<u>1.6 – Organização da Dissertação</u> .....	18
<u>1.7 – Conclusão</u> .....	19
<b><u>Capítulo 2 – Medições e Falhas em Pára-raios</u></b> .....	<b>20</b>
<u>2.1 – Introdução</u> .....	20
<u>2.2 – Apresentando os Pára-raios</u> .....	20
<u>2.3 – Descrição e Classificação dos Pára-raios</u> .....	22
<u>2.4 – Descrição das Variáveis Amostradas em Pára-Raios</u> .....	23
<u>2.4.1 - Termografia</u> .....	23
<u>2.4.2 - Técnica de Corrente de Fuga</u> .....	27
<u>2.4.3 - Técnica de Radiointerferência</u> .....	29
<u>2.4.4 - Variáveis de Identificação do Pára-raios</u> .....	29
<u>2.5 – Conclusão</u> .....	29
<b><u>Capítulo 3 – Metodologia para Diagnóstico Inteligente de Falhas em Pára-Raios</u></b> .....	<b>31</b>
<u>3.1 – Introdução</u> .....	31
<u>3.2 – Metodologia para Diagnóstico de Falhas</u> .....	31
<u>3.3 – Descrição da Rede <i>Neurofuzzy</i></u> .....	34
<u>3.3.1 – Comentários Iniciais</u> .....	34
<u>3.3.2 – Topologia e Formulação da Rede <i>Neurofuzzy</i></u> .....	34
<u>3.3.3 – Treinamento da Rede <i>Neurofuzzy</i></u> .....	35
<u>3.4 – Tratamento das Variáveis de Entrada da Rede <i>Neurofuzzy</i></u> .....	36
<u>3.4.1 - Codificação das Variáveis de Identificação</u> .....	36
<u>3.4.2 - Normalização das Variáveis de Medição</u> .....	36
<u>3.4.3 - Processamento Digital do Sinal de Corrente de Fuga</u> .....	37
<u>3.5 - Diagnóstico Parcial de Termografia</u> .....	40
<u>3.6 - Diagnóstico Parcial de Corrente de Fuga</u> .....	41
<u>3.7 - Diagnóstico Parcial de Radiointerferência</u> .....	41
<u>3.8 - Resultados</u> .....	42
<u>3.9 - Conclusão</u> .....	45
<b><u>Capítulo 4 – Sistema de Integração e Gerenciamento Avançado de Pára-Raios</u></b> .....	<b>46</b>
<u>4.1 - Introdução</u> .....	46
<u>4.2 - Considerações Iniciais</u> .....	46
<u>4.3 – Modelagem UML do SIGAP</u> .....	47
<u>4.3.1 - Geração em Lotes de Relatórios Web</u> .....	48
<u>4.3.2 - Processamento Digital de Imagem via Active-X</u> .....	49
<u>4.3.3 - Gerenciamento Avançado de Entidades no BD</u> .....	51
<u>4.4 - Arquitetura lógica do SIGAP</u> .....	53

4.4.1 - Camada do Cliente .....	54
4.4.2 - Camada do Servidor .....	55
4.5 - Conclusão.....	55
<b>Capítulo 5 – Conclusões</b> .....	<b>57</b>
5.1 – Conclusões .....	57
5.2 – Propostas de Continuidade .....	58
5.2.1 - Processamento Digital de Termogramas .....	58
5.2.2 – Análise Quantitativa de Evolução do Ponto Quente no Pára-raios.....	59
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>60</b>

## Lista de Figuras

<a href="#">Figura 1.1 – Modelo do pára-raios de ZnO</a>	13
<a href="#">Figura 1.2 – Medição da corrente de fuga resistiva pelo osciloscópio</a>	13
<a href="#">Figura 1.3 – Métodos de diagnósticos de falhas</a>	14
<a href="#">Figura 1.4 – Métodos de diagnóstico baseados no histórico do processo</a>	15
<a href="#">Figura 1.5 – Comitê de especialistas utilizados para o diagnóstico de falhas</a>	16
<a href="#">Figura 1.6 – Visão de um especialista genérico, baseado em conjuntos de redes <i>Neurofuzzy</i></a>	17
<a href="#">Figura 1.7 – Interações entre o processo e entre os sistemas desenvolvidos nessa dissertação</a>	18
<a href="#">Figura 2.1 – Pára-raios em linhas de transmissão (Fonte: Grupo de Fabricantes ABB)</a>	21
<a href="#">Figura 2.2 - Cortes de um pára-raios constituído por resistores de ZnO</a>	23
<a href="#">Figura 2.3 - Foto do termovisor ThermaCAM (Fonte: Sistemas FLIR)</a>	24
<a href="#">Figura 2.4 - Termograma de um conjunto de pára-raios de uma subestação e seus diferentes comportamentos (Fonte: Sumter Electric Cooperative, 2003)</a>	25
<a href="#">Figura 2.5 - Termograma para um sistema de pára-raios (Fonte: Sumter Electric Cooperative, 2003)</a>	26
<a href="#">Figura 2.6 - Termogramas comparativos de pára-raios na condição normal e defeituosa (Fonte: Cepel, 2003)</a>	26
<a href="#">Figura 2.7 - Corrente de fuga de um pára-raios amostrada por meio de um osciloscópio digital. (Fonte: CEPEL, 2003)</a>	27
<a href="#">Figura 2.8 - Comparativo das formas de onda das correntes de fuga para um pára-raios na condição normal e outro na condição defeituosa; logo abaixo suas respectivas decomposições harmônicas como função da amplitude da frequência fundamental. (Fonte: CEPEL, 2003)</a>	28
<a href="#">Figura 3.1 – Conjunto de técnicas utilizadas para o diagnóstico de falhas em pára-raios</a>	32
<a href="#">Figura 3.2 – Visão de um diagnóstico genérico, baseado em conjuntos de redes <i>Neurofuzzy</i></a>	33
<a href="#">Figura 3.3 – Fluxograma evidenciando como foi escolhido o número de redes <i>Neurofuzzy</i> para constituir cada técnica de diagnóstico parcial</a>	33
<a href="#">Figura 3.4 – Topologia da rede neuro fuzzy utilizada nos diagnósticos</a>	34
<a href="#">Figura 3.5 – Funções de pertinência de cada nó da camada de entrada</a>	35
<a href="#">Figura 3.6 - Metodologia de processamento das variáveis de Corrente de Fuga</a>	37
<a href="#">Figura 3.7 - Resposta em frequência do filtro projetado com frequência de corte em 185 Hz</a>	38
<a href="#">Figura 3.8 - Realização do filtro elíptico no domínio da transformada Z</a>	38

<a href="#">Figura 3.9 - (a) Sinal de Corrente de Fuga obtido pelo osciloscópio (b) Sinal de Corrente de Fuga obtido pelo osciloscópio filtrado</a> .....	39
<a href="#">Figura 3.10 – Topologia da Rede de Termografia</a> .....	40
<a href="#">Figura 3.11 – Configuração da Rede de Corrente de Fuga</a> .....	41
<a href="#">Figura 3.12 – Topologia da Rede de Radiointerferência</a> .....	42
<a href="#">Figura 3.13 – Funcionamento do treinamento das redes <i>Neurofuzzy</i></a> .....	42
<a href="#">Figura 3.14 – Utilização dos dados para treinamento, validação e validação geral</a> .....	43
<a href="#">Figura 4.1 - Diagrama de caso de uso do SIGAP</a> .....	47
<a href="#">Figura 4.2 - Relatório gerado pelo SIGAP</a> .....	49
<a href="#">Figura 4.3 - Módulo de interfaceamento com o sistema que processa digitalmente a imagem</a> .....	50
<a href="#">Figura 4.4 - Módulo de busca e visualização de informações de pára-raios</a> .....	51
<a href="#">Figura 4.5 - Módulo de cadastro de medições de pára-raios</a> .....	52
<a href="#">Figura 4.6 - Módulo de cadastro de clientes</a> .....	52
<a href="#">Figura 4.7 - Arquitetura Lógica do SIGAP</a> .....	53
<a href="#">Figura 4.8 - Arquitetura de 3 componentes do SIGAP e sua distribuição nas 2 camadas</a> .....	54
<a href="#">Figura 4.9 - Acesso transparente ao banco de dados via rede local</a> .....	55
<a href="#">Figura 5.1 – Processamento Digital Automático da imagem termográfica. Em verde o resultado da segmentação da imagem, em azul tem-se o ponto frio (temperatura mínima no corpo do pára-raios) em vermelho tem-se o ponto quente (temperatura máxima no corpo do pára-raios)</a> .....	58

## Lista de tabelas

<a href="#">Tabela 2.1 – Características disponíveis para o termovisor da FLIR</a> .....	25
<a href="#">Tabela 2.2 - Os quatro níveis definidos para a variável índice de poluição (Fonte: International Electrotechnical Commission IEC Report – Publication 815 – First Edition – 1989)</a> .....	29
<a href="#">Tabela 3.1 – Número de Medições por tipo de Pára-Raios</a> .....	43
<a href="#">Tabela 3.2 - Índices de coincidência de diagnóstico obtidos para cada técnica por tipo de pára-raios na validação</a> .....	44
<a href="#">Tabela 3.3 - Índices de falso-positivos para cada técnica de diagnóstico</a> .....	44

# Capítulo 1 – Introdução

---

## 1.1 – Apresentação

O Brasil é o país com maior incidência de descargas elétricas atmosféricas por área no mundo. Segundo estudos do INPE e da NASA, entre 1996 e 2000, a média anual brasileira foi de aproximadamente 70 milhões de descargas elétricas [1].

Descargas elétricas causam grandes distúrbios em linhas de transmissão e distribuição de energia, redes de telefonia, indústrias, telecomunicações e propriedades privadas. Esses efeitos ocorrem devido à alta corrente e tensão dos raios, gerando calor e outros efeitos danosos.

A dimensão dos estragos causados por este fenômeno da natureza, tanto no que tange a perda de vidas humanas, quanto aos prejuízos materiais causados às concessionárias, consumidores e indústrias é conhecida. Segundo o Grupo de Eletricidade Atmosférica do INPE, raios causam um prejuízo anual de R\$ 200 milhões por ano ao país em perdas geradas por incêndios, interrupções no fornecimento de energia elétrica e oscilações na rede elétrica [2].

Tais efeitos podem ser evitados quando se utiliza um sistema que propicie características de proteção, garantindo a operacionalidade de equipamentos, como a instalação de pára-raios. Os pára-raios são projetados para proteger os equipamentos das sobretensões oriundas de ocorrências no próprio sistema ou de descargas elétricas. Com o uso de pára-raios pode-se proteger os equipamentos dos impactos causados pelas descargas atmosféricas, bem como, garantir a confiabilidade e a continuidade de operação dos sistemas.

Objetivando verificar se o funcionamento desse sistema apresenta algum tipo de anomalia, faz-se necessário o controle sobre o mesmo. Esse controle se traduz na medição e avaliação das variáveis como corrente de fuga do pára-raios, radiointerferência além de outras que possam indicar o estado de operacionalidade dos pára-raios.

O diagnóstico de anormalidades operacionais do pára-raios, nos sistemas de distribuição e transmissão de energia pode minimizar ou até mesmo evitar, desde pequenas perdas de equipamentos até acidentes de proporções catastróficas.

A partir desse cenário, desenvolve-se, nessa dissertação, uma metodologia para o diagnóstico de falhas em pára-raios fazendo uso de técnicas de inteligência computacional.

Esse capítulo visa situar o leitor através de uma breve revisão bibliográfica, da descrição dos objetivos desse trabalho, da descrição sucinta da proposta e das contribuições esperadas. Após é feita uma descrição da organização dos capítulos desta dissertação.

## 1.2 – Revisão Bibliográfica

Diagnóstico de falhas é um problema importante na área da engenharia de processos. É um componente vital para o Gerenciamento de Eventos Anômalos (GEA), o qual tem recentemente atraído muita atenção. O GEA lida com diagnóstico e correção de falhas em processos. O diagnóstico prematuro de uma condição de falha pode evitar a progressão da anomalia e reduzir a perda de produtividade num determinado processo [3].

Torna-se cada vez mais difícil o gerenciamento de falhas por diversos fatores. Um parâmetro dessa dificuldade é a grande complexidade dos processos modernos. Por exemplo, numa planta moderna podem existir até 1500 variáveis a serem observadas por segundo [4] gerando um fluxo de informações incompatível com as capacidades humanas de gerenciamento. Ressalta-se ainda o fato que as medidas dos processos podem ser insuficientes, incompletas e/ou não confiáveis devido a uma variedade de causas como, por exemplo, falhas em sensores.

Analisando o cenário descrito não é surpreendente que pessoas responsáveis pelo GEA tomem, freqüentemente, decisões incorretas. Estatísticas industriais mostram que 70% dos acidentes são causados por erros humanos [5].

O grande desafio hoje é a automação do GEA utilizando sistemas computacionais. Esses sistemas possibilitam ao ser humano uma ferramenta completa para gerenciamento automático de eventos anômalos.

A automação do processo de diagnóstico de falhas é o passo inicial para a automação do GEA. Devido a grande diversidade de problemas de diagnóstico de falhas, várias metodologias baseadas em implementações computacionais vêm sendo desenvolvidas com o passar dos anos. Essa dissertação trata sobre o problema de diagnóstico de falhas em pára-raios.

Os pára-raios têm a importante função de limitar as sobretensões que podem ocorrer no sistema elétrico. Atuam como limitadores de tensão, impedindo que valores acima de um determinado nível preestabelecido possam alcançar os equipamentos para os quais fornecem proteção (ex. transformadores, reatores, banco de capacitores, etc).

Embora protegendo equipamentos de elevado custo e de grande importância para a continuidade e confiabilidade no sistema de transmissão, os pára-raios não possuem, contraditoriamente, técnicas de inspeção comprovadamente eficazes para se identificar, com boa precisão, as unidades que possam estar defeituosas e inadequadas para continuar em serviço [6]. Essa dificuldade deve-se, em grande parte, às características construtivas e operativas dos pára-raios: equipamentos selados que não permitem a inspeção de seus componentes internos.

Os baixos índices de falha nos pára-raios novos induziram, há muito tempo, a uma despreocupação em relação aos registros e análise das falhas desse equipamento. O cenário atual, indica um aumento nesses índices, provocado provavelmente, pelo envelhecimento, pela penetração de umidade e pelo armazenamento inadequado [6].

Tendo em vista o envelhecimento dos pára-raios, foi necessária a padronização dos procedimentos atuais e a implantação de técnicas preditivas que orientassem as equipes de manutenção, nos critérios de avaliação, substituição e reaproveitamento desses pára-raios [7].

Dentro deste enfoque, esta dissertação apresenta aspectos práticos observados durante o desenvolvimento de pesquisas, que se constituiu na determinação de ensaios para se avaliar o estado e o comportamento dos pára-raios.

No estágio atual do conhecimento, é comum o uso conjugado de algumas das técnicas e o acompanhamento periódico do comportamento dos pára-raios durante sua vida útil, para balizar tendências de mau funcionamento, podendo fornecer diagnósticos mais precisos na identificação de unidades defeituosas [7].

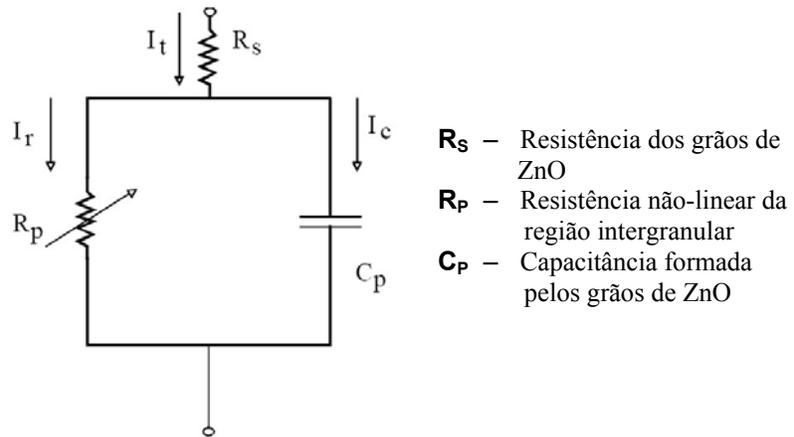
As técnicas usualmente utilizadas são: medição das perdas dielétricas (*Doble*), medição da corrente de fuga total, medições de temperatura utilizando termovisor (termografia), medição da corrente de fuga resistiva (para os pára-raios de ZnO – aqueles compostos por um conjunto de resistores não lineares de ZnO) e radiointerferência.

A técnica de medição das perdas dielétricas (*Doble*), consiste em um ensaio clássico, fazendo uso de um equipamento que mede o fator de potência e as perdas dielétricas. O procedimento de ensaio é feito por comparação destas perdas, para uma determinada tensão aplicada de ensaio, com valores típicos para pára-raios similares.

A técnica de medição da corrente de fuga total [7] consiste na medição da corrente total de escoamento. Esta corrente tem uma componente resistiva, que passa internamente pelos resistores, e uma componente capacitiva. Na tensão operativa dos pára-raios a amplitude da corrente total de escoamento não é muito representativa do estado dos resistores, já que a componente capacitiva é muito maior que a resistiva. Este ensaio baseia-se na avaliação da forma de onda da corrente de fuga total, calculada como a soma vetorial da componente capacitiva que flui pela porcelana (usualmente da ordem de 70% a 90% da corrente total) e a componente resistiva, cujo aumento indica efetivamente a ocorrência de deterioração do pára-raios.

A Termografia [8]/[9] é uma técnica já consagrada em diversos serviços de manutenção [10], tendo grande praticidade de uso e a vantagem de não exigir o desligamento dos equipamentos sob inspeção [11]. Em pára-raios, exige-se maiores cuidados de leitura, uma vez que pequenos diferenciais de temperatura podem indicar início de defeitos nos mesmos. Os critérios utilizados em termografia têm sido objeto de reavaliação permanente em função da grande variedade de fabricante e projeto de pára-raios. Em geral, os critérios adotados baseiam-se na diferença entre as temperaturas máxima e mínima encontradas no corpo do pára-raios.

Pára-raios de Óxido de Zinco, mesmo novos, em excelentes condições, devido as suas características, sempre terão uma corrente de fuga fluindo através do mesmos [7]. A corrente total que flui pelo pára-raios possui duas componentes: uma capacitiva e outra resistiva. A Figura 1.1 evidencia o circuito equivalente do pára-raios de ZnO.

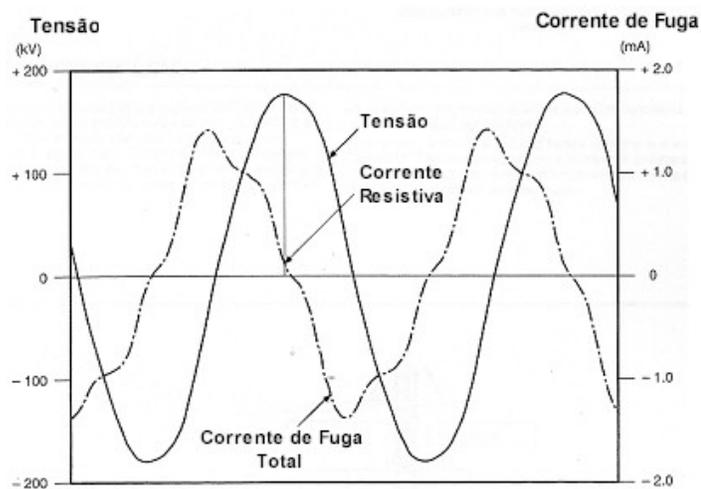


**Figura 1.1 – Modelo do pára-raios de ZnO**

A corrente resistiva, de característica não-linear, é a responsável pelas perdas/envelhecimento dos blocos de ZnO, representando, num pára-raios em condição normal, cerca de 10% a 20% da corrente total.

O monitoramento da corrente de fuga resistiva pode ser executado de duas formas: utilizando o instrumento medidor de corrente de fuga LCM [12] ou um osciloscópio de duplo canal.

A corrente de fuga resistiva pode ser medida pela aplicação de uma tensão igual à máxima tensão operativa do pára-raios e, com o auxílio de um osciloscópio de duplo canal, mede-se o módulo da corrente de fuga resistiva, como sendo o valor de corrente que estiver em fase com o máximo da onda de tensão aplicada como evidencia a Figura 1.2.



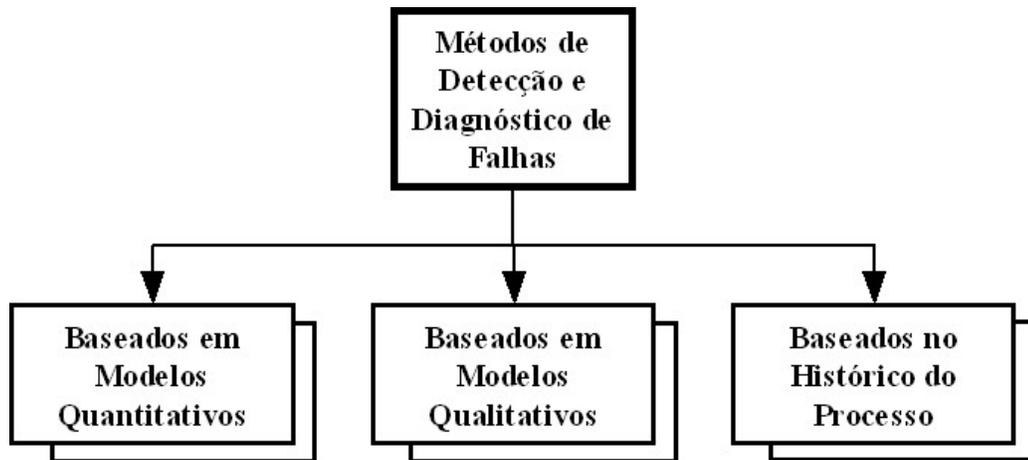
**Figura 1.2 – Medição da corrente de fuga resistiva pelo osciloscópio**

A técnica de radiointerferência [12] aplicada a pára-raios consiste na medição de sinais de alta frequência gerados pelo mesmo. Esses sinais são captados por um transformador de corrente tipo janela (TC), cujo valor absoluto é fornecido por meio de um medidor portátil de radiointerferência com sensibilização de 1MHz.

As técnicas citadas constituem os métodos mais utilizados para o diagnóstico de falhas em pára-raios. Existe ainda na literatura uma diversidade de métodos para diagnóstico de

falhas que podem ser utilizados para definir a condição operativa de pára-raios. Esses métodos englobam desde métodos matemáticos até métodos que se baseiam em inteligência artificial e métodos estatísticos [3].

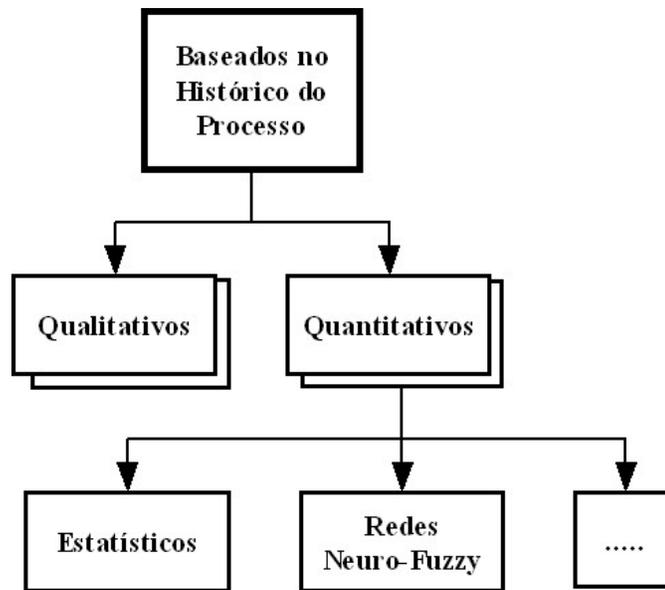
Classificam-se em três os tipos de métodos para diagnóstico de falhas: métodos baseados em modelos quantitativos, métodos baseados em modelos qualitativos e métodos baseados em histórico de processos, conforme evidencia a Figura 1.3.



**Figura 1.3 – Métodos de diagnósticos de falhas**

Nas metodologias baseadas em modelos de processos, sejam eles qualitativos ou quantitativos, necessita-se de um conhecimento a priori sobre o processo. Em contraste com essas metodologias, métodos baseados no histórico do processo exigem uma grande quantidade de dados pertencentes ao processo.

Citam-se métodos que não assumem qualquer tipo de modelo do processo, baseando-se em informações históricas do processo. Existem diferentes formas de transformar os dados históricos do processo em conhecimento para o sistema de diagnóstico. Esse processo de transformação denomina-se processo de extração. O processo de extração pode ser quantitativo ou qualitativo. Enquanto o primeiro baseia-se principalmente em sistemas especialistas, o segundo pode ser dividido em métodos estatísticos e não-estatísticos, como mostra a Figura 1.4.



**Figura 1.4 – Métodos de diagnóstico baseados no histórico do processo**

Métodos baseados no histórico do processo, de carácter quantitativo, essencialmente, formulam o problema de diagnóstico de falhas como um problema de reconhecimento de padrões. O objetivo da classificação de padrões é o de classificar pontos no espaço, de forma geral, em classes pré-determinadas. Um dos importantes classificadores não-estatísticos são as Redes *Neurofuzzy*.

Redes *Neurofuzzy* têm sido utilizadas com sucesso para classificação de padrões nas mais diversas áreas. Entre elas citam-se o diagnóstico de falhas em motores elétricos [13] e o diagnóstico de câncer por meio de imagens ultra-som [14].

Redes *Neurofuzzy* combinam métodos da teoria das redes neurais e dos sistemas *fuzzy* [15]. Sistemas *Neurofuzzy* surgiram devido à grande dificuldade de ajuste dos parâmetros dos sistemas *fuzzy*. O problema de encontrar funções de pertinência e regras é frequentemente um problema resolvido por tentativa e erro. A ideia de aplicar algoritmos de aprendizado foi considerada com intuito de otimizar o maçante processo de definição dos parâmetros *fuzzy*. A capacidade de aprendizado das redes neurais fizeram da mesma um alvo para combinação com sistemas *fuzzy*.

Quando se utilizam sistemas de classificação é freqüente a preocupação com o poder de generalização da estrutura desenvolvida. Sabe-se que o poder de generalização das redes pode ser significativamente melhorado [16]. Uma das formas de melhorar o poder de generalização de uma rede é utilizar a técnica conhecida como comitês de redes [17].

A técnica de comitês de redes emprega uma amostragem com reposição no conjunto de treinamento de dados, gerando diversos sub-conjuntos de treinamento [18]. Cada rede é treinada com um sub-conjunto, originando um conjunto de redes. A saída do comitê de redes é dada pelo voto majoritário de todas as redes treinadas que pertencem a esse comitê.

Esse tópico objetivou apresentar uma breve revisão sobre os temas utilizados nesse trabalho.

### 1.3 – Objetivos

Os objetivos dessa dissertação são:

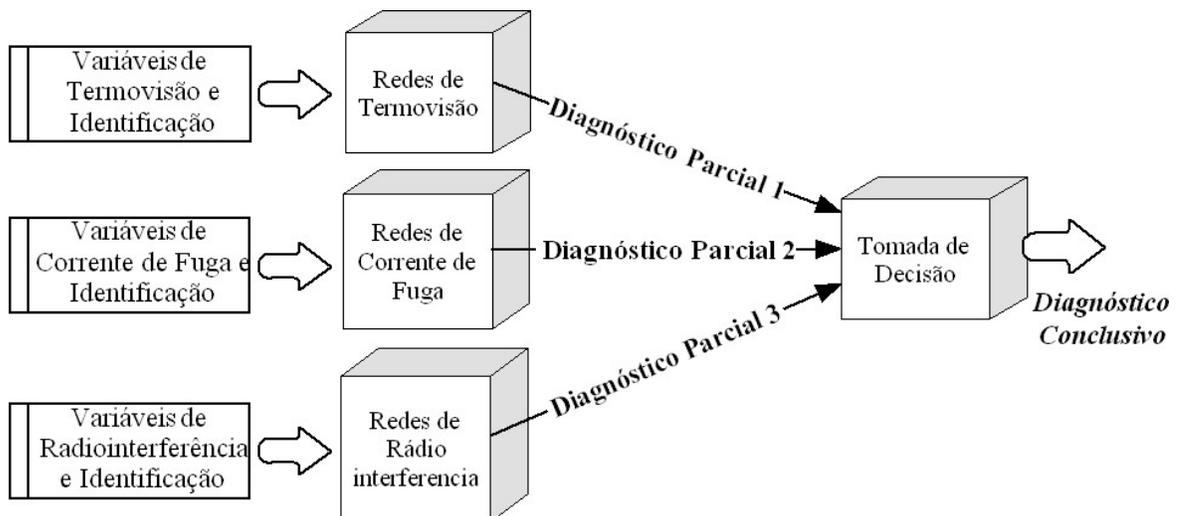
- proposição de uma metodologia para efetuar o diagnóstico de falhas em pára-raios aplicando métodos baseados em dados históricos de suas medições, utilizando técnicas de inteligência computacional,
- o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que viabilize o gerenciamento de informações de pára-raios, garantindo o ganho de produtividade do analista, confiabilidade, qualidade e disponibilidade das informações de pára-raios com alta performance,
- o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, permitindo ao analista de informações de pára-raios a geração automática de diagnóstico da condição operativa dos mesmos.

### 1.4 – Descrição da Proposta

Nesta dissertação é abordado o problema de diagnóstico de falhas em pára-raios como um problema de classificação de padrões, baseando-se em dados históricos do processo.

O presente trabalho apresenta uma metodologia e sua implementação computacional, objetivando o diagnóstico de falhas em pára-raios. Tal sistema utiliza-se de grupos de variáveis amostradas durante o processo de medição em pára-raios. Os seguintes grupos são utilizados: Termografia, Corrente de Fuga e Radiointerferência. Esses grupos são utilizados em conjunto com variáveis de identificação de pára-raios, como o seu material, seu fabricante etc.

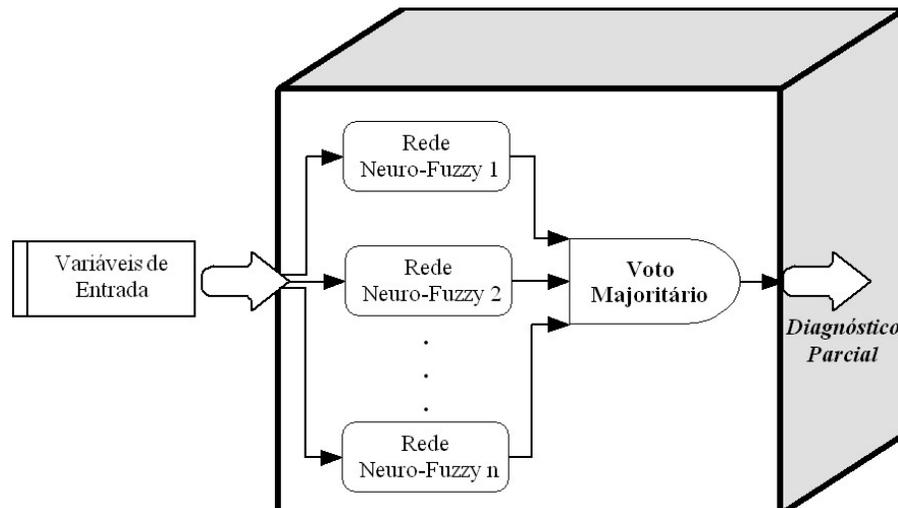
A metodologia proposta gera dois tipos de diagnóstico: um parcial para cada grupo de variáveis e um diagnóstico conclusivo. A topologia é análoga a um conjunto de especialistas, onde cada especialista é responsável pela geração de um diagnóstico parcial, referente a um grupo de variáveis medidas conforme mostra a Figura 1.5.



**Figura 1.5 – Comitê de especialistas utilizados para o diagnóstico de falhas**

O sistema de diagnóstico faz uso do sistema de inferência *Neurofuzzy* adaptativo para identificar a condição operativa do pára-raios.

Cada especialista é composto por diversas redes *Neurofuzzy* adaptativas. Cada uma dessas redes é obtida por meio de uma heurística, a ser descrita nessa dissertação. O voto majoritário desse conjunto de redes gera um diagnóstico parcial. Esse arranjo de redes é conhecido como comitês de redes, como mostra a Figura 1.6.



**Figura 1.6 – Visão de um especialista genérico, baseado em conjuntos de redes *Neurofuzzy***

O trabalho apresenta ainda o sistema computacional responsável pela implementação de um ambiente de trabalho completamente integrado, permitindo que as informações pertinentes de medições de pára-raios tornem-se disponíveis aos seus usuários de forma transparente. O sistema foi desenvolvido visando o aumento de produtividade, confiabilidade, 'qualidade e disponibilidade das informações de medições de pára-raios com alto desempenho, flexibilidade e "reusabilidade"\*'. O sistema computacional é concebido utilizando uma arquitetura de software de 2 camadas permitindo acesso distribuído.

## 1.5 – Contribuições

Essa dissertação objetiva contribuir para o diagnóstico de falhas em pára-raios, bem como para o gerenciamento de informações dessas estruturas, por meio do desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico de falhas e implementação de dois sistemas computacionais: o **DIPRA – Diagnóstico Inteligente de Pára-Raios**, responsável pela implementação da metodologia proposta nessa dissertação e o **SIGAP – Sistema de Integração e Gerenciamento Avançado de Pára-Raios**, sistema responsável pelo gerenciamento de informações de pára-raios.

O DIPRA nasce como resultado da implementação computacional da metodologia para diagnóstico de falhas proposta nessa dissertação. O DIPRA é um sistema computacional para apoio a tomada de decisão, executando a metodologia proposta para diagnóstico da condição operativa dos pára-raios.

O SIGAP foi desenvolvido com o intuito de permitir o aumento de produtividade, confiabilidade, qualidade e disponibilidade das informações de medições de pára-raios com

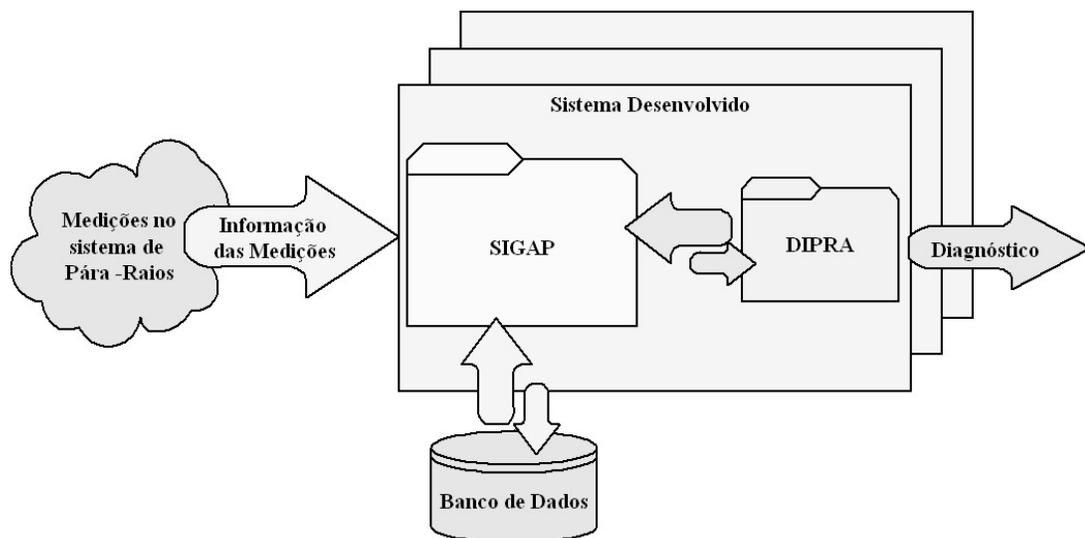
\* Reusabilidade é a habilidade de um programa de ser utilizado, sem qualquer modificação como um bloco construtivo num programa diferente daquele que o mesmo foi projetado.

alta performance e flexibilidade para seu usuário. O sistema, além das funcionalidades citadas, visou também a geração de relatórios em lotes, interfaceamento outros sistemas computacionais e o gerenciamento do banco de dados.

O DIPRA e o SIGAP agem de forma integrada, permitindo ao analista de informações de pára-raios, um ambiente integrado para geração de diagnóstico da condição operativa de pára-raios.

A metodologia de diagnóstico é viabilizada pela existência de uma base de dados de medições de pára-raios disponibilizada pelo CEPEL (Centro de Pesquisa em Energia Elétrica).

A metodologia e os sistemas computacionais gerados nessa dissertação abrem uma nova frente para execução do diagnóstico de pára-raios. Uma vez que se integra, computacionalmente, todas as informações pertinentes de pára-raios, torna-se um passo seguinte o diagnóstico automático da condição operativa dos mesmos, como mostra a Figura 1.7.



**Figura 1.7 – Interações entre o processo e entre os sistemas desenvolvidos nessa dissertação**

## 1.6 – Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida da seguinte forma: o capítulo 1 contendo uma introdução sobre o assunto tratado nessa dissertação, a revisão bibliográfica, os objetivos da proposta e as contribuições oferecidas.

No capítulo 2 são descritas as variáveis de medição em pára-raios e como as mesmas, qualitativamente, podem indicar uma condição de falha num pára-raios. Neste capítulo tornam-se evidentes as variáveis utilizadas como entradas no sistema de identificação de falhas e no sistema de gerenciamento de pára-raios.

O capítulo 3 apresenta a metodologia que permite a geração do diagnóstico de falhas em pára-raios por meio de uso de técnicas de inteligência computacional. Basicamente,

utilizou-se um sistema de inferência *Neurofuzzy* adaptativo aplicando o conceito de comitês de redes. A implementação dessa metodologia resultou no DIPRA, o sistema computacional responsável pelo diagnóstico de pára-raios. A análise dos resultados e impactos dos sistemas computacionais apresentados é feita em seqüência.

No capítulo 4 apresenta-se o SIGAP – Sistema de Integração e Gerenciamento Avançado de Pára-raios. O SIGAP propiciou o tratamento necessário para algumas variáveis de entrada do sistema de diagnóstico de falhas. As funcionalidades do sistema computacional desenvolvido são descritas por meio do diagrama de Caso de Uso da UML\* (Unified Modeling Language).

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, bem como as propostas para continuidade dessa pesquisa.

## **1.7 – Conclusão**

Nesse capítulo apresentou-se a revisão bibliográfica, descrevendo o problema de diagnóstico de falhas e contextualizando-o para uma aplicação tratada nessa dissertação: o diagnóstico inteligente de falhas em pára-raios.

Na revisão bibliográfica foi ainda apresentado o estado da arte para o diagnóstico de falhas em pára-raios, citando as técnicas atualmente consolidadas para obtenção da condição operativa dos pára-raios, a saber: medição das perdas dielétricas (*Doble*), medição da corrente de fuga total, medições termográficas (Termografia), medição da corrente de fuga resistiva (para os pára-raios de ZnO) e radiointerferência.

Durante a revisão bibliográfica foi contextualizada a metodologia implementada nessa dissertação para diagnóstico de falhas em pára-raios: a utilização de dados históricos associados à comitês de especialistas compostos por redes *Neurofuzzy*.

No decorrer do presente capítulo foi apresentada uma sucinta descrição da proposta bem como a organização dos capítulos desta dissertação.

## Capítulo 2 – Medições e Falhas em Pára-raios

---

### 2.1 – Introdução

Faz-se necessário um controle sobre o sistema de pára-raios das linhas de transmissão, com o intuito de verificar se o funcionamento desse apresenta algum tipo de anomalia. Tal controle se traduz na medição e avaliação de variáveis dos pára-raios. O processo de medição em pára-raios almeja amostrar variáveis que podem indicar uma condição de falha do mesmo. O processo de medição é, em geral, acompanhado por um engenheiro responsável da manutenção preventiva do sistema de pára-raios.

O objetivo deste capítulo é apresentar os pára-raios, fazendo um breve histórico e evidenciar as estruturas presentes nos mesmos. Citam-se as variáveis amostradas durante o processo de medição, focando nos pára-raios presentes em linhas de transmissão. A instrumentação necessária nesse processo é mencionada. Executa-se ainda uma análise qualitativa sobre cada um dos grupos de variáveis, ressaltando como os mesmos podem indicar uma condição operativa de falha num pára-raios.

### 2.2 – Apresentando os Pára-raios

Embora os fenômenos elétricos fossem conhecidos desde a Antiguidade, Tales de Mileto relatara no século 6 a.C. a atração de cabelos humanos por um bastão de âmbar depois de atritado, foi somente no começo do século 18 que as pesquisas sobre eletricidade se difundiram entre os físicos, iniciando-se um período ativo de experimentações e proposição de teorias. Destaca-se entre os personagens mais envolvidos com esse estudo o químico francês Charles François de Cisternay Du Fay (1698-1739), para quem a eletricidade era uma propriedade que consistia em atrair corpos leves. Baseando-se em experiências com várias substâncias, ele foi o primeiro a dividir os corpos em dois grandes grupos: os vítreos e os resinosos, segundo seu comportamento elétrico.

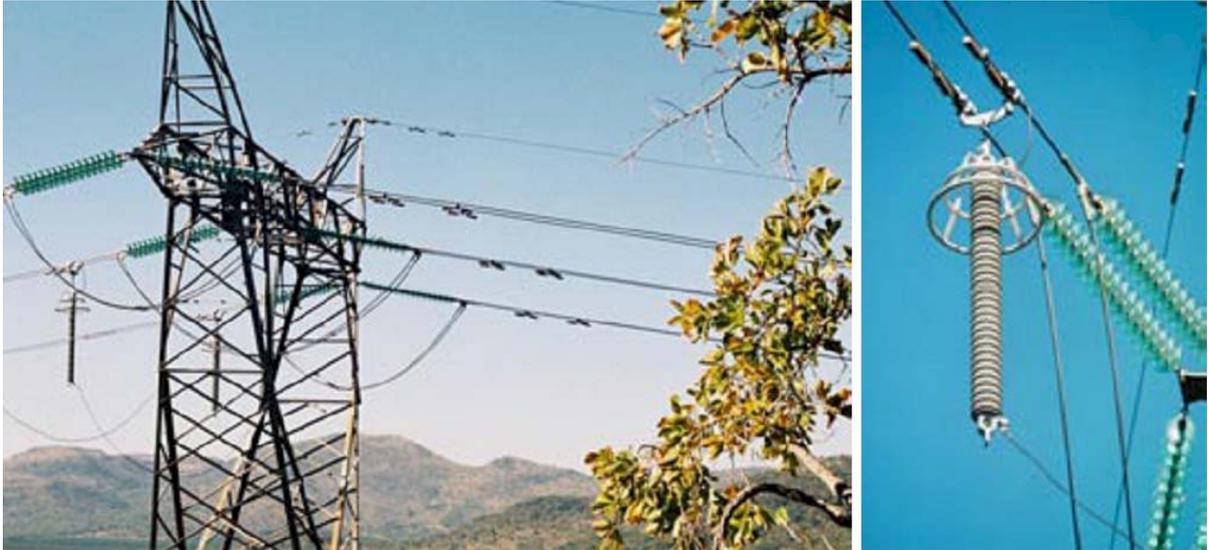
A existência de dois tipos de eletricidade foi também comprovada de forma independente pelo cientista norte-americano Benjamim Franklin (1706-1790), que desconhecia os trabalhos desenvolvidos na Europa. Foi Franklin quem introduziu o termo carga elétrica para designar as duas formas de eletricidade e lhes atribuiu os sinais positivo e negativo. Ao observar que corpos pontiagudos eram capazes de transmitir eletricidade a outros corpos, ele também acabou inventando o pára-raios. Em 1749 Franklin escreveu uma carta publicada em 1750 pela Revista *Gentlemen* na qual ele cita:

" . . . from what I have observed on experiments, I am of opinion that houses, ships, and even towers and churches may be eventually secured from the strokes of lightning by their means; for if instead of the round balls of wood or metal which are commonly placed on the tops of weathercocks, vanes, or spindles of churches, spires, or masts, there should be a rod of iron eight or ten feet in length, sharpened gradually to a point like a needle, and gilt to prevent rusting, or divided into a number of points, which would be better, the electrical fire would, I think, be drawn out of

a cloud silently, before it could come near enough to strike.”

Pára-raios foram primeiramente utilizados para fins de proteção em 1752 na França e mais tarde, ainda no mesmo ano, nos Estados Unidos.

O uso de sistema de proteção baseados em pára-raios é muito comum subestações de energia elétrica. Os pára-raios têm a importante função de limitar as sobretensões que podem ocorrer nesse sistema evitando desastrosos estragos.



**Figura 2.1 – Pára-raios em linhas de transmissão  
(Fonte: Grupo de Fabricantes ABB)**

A dimensão dos estragos causados pelos raios, tanto no que tange a perda de vidas humanas, quanto aos prejuízos materiais causados às concessionárias, consumidores e indústrias é conhecida. Segundo o Grupo de Eletricidade Atmosférica do INPE, raios causam um prejuízo anual de R\$ 200 milhões por ano ao país em perdas geradas por incêndios, interrupções no fornecimento de energia elétrica e oscilações na rede elétrica [2].

Tais efeitos podem ser evitados quando se utiliza um sistema que propicie características de proteção, garantindo a operacionalidade de equipamentos. Os pára-raios são projetados para proteger os equipamentos das sobretensões oriundas de ocorrências no próprio sistema ou de descargas elétricas. Com o uso de pára-raios pode-se proteger os equipamentos dos impactos causados pelas descargas atmosféricas, bem como, garantir a confiabilidade e a continuidade de operação dos sistemas.

Na literatura técnica há registros que desde 1930 tenta-se a redução do número de desligamentos por descargas atmosféricas com a instalação de pára-raios [19]/[20]. Os pára-raios existentes nessa época embora reduzissem efetivamente o número de desligamentos por descargas atmosféricas, suportando correntes de até 100 kA, possuíam limitações: eram pesados e ineficientes.

No início dos anos 80 começou a verdadeira difusão da aplicação de pára-raios por concessionárias energéticas com problemas de interrupção de fornecimento. Dois fatores viabilizaram essa difusão: o surgimento dos pára-raios de óxido de zinco e o encapsulamento polimérico. Esses fatores permitiram a fácil instalação em torres devido a seu baixo peso

(entre 12 e 19 Kg para linhas de transmissão de 138 kV), sem acarretar esforços mecânicos excessivos nas estruturas mecânicas em que eram instalados.

### **2.3 – Descrição e Classificação dos Pára-raios**

Os pára-raios atuam como limitadores de tensão, impedindo que valores acima de um determinado nível preestabelecido possam alcançar os equipamentos para os quais fornecem proteção (ex. transformadores, reatores, banco de capacitores, etc).

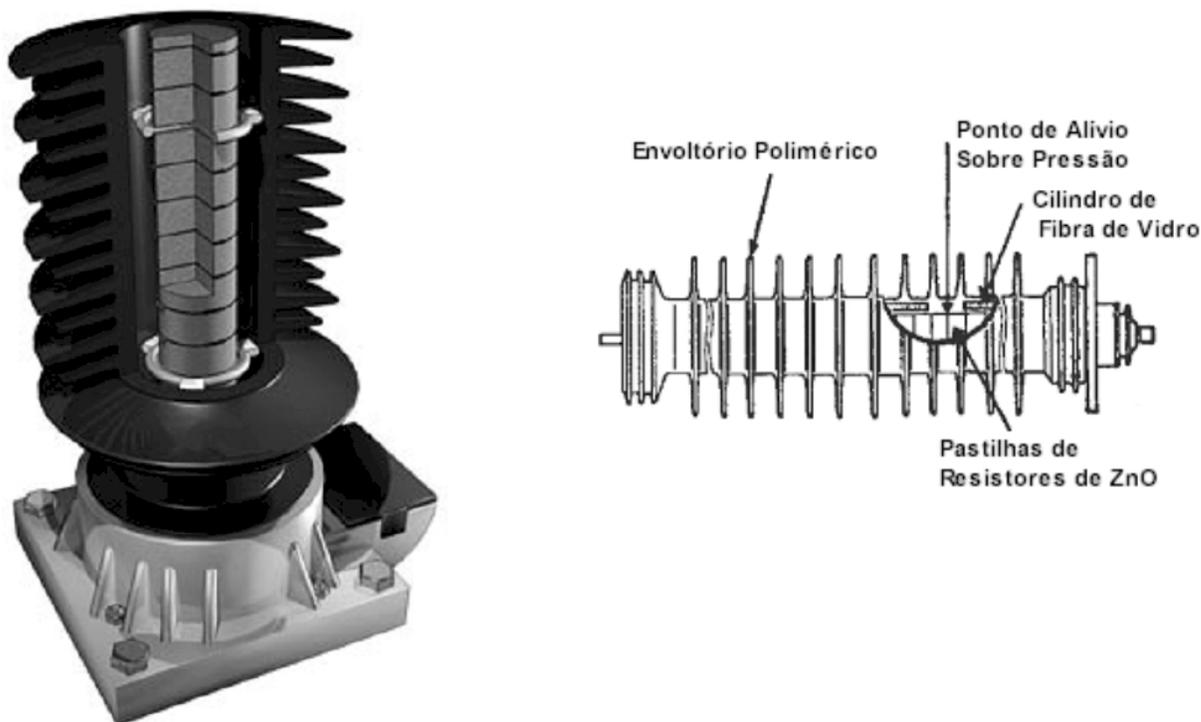
Um pára-raios é constituído por um elemento resistivo não-linear associado ou não a um centelhador em série. Quando ocorre uma sobretensão, o centelhador dispara e uma corrente circula pelo resistor não-linear, impedindo que a tensão nos seus terminais ultrapasse um determinado valor. É possível a eliminação do centelhador, utilizando-se somente o resistor não-linear, se o material não-linear apresenta uma característica suficiente adequada para esta finalidade.

Nessa dissertação consideram-se 2 tipos de pára-raios: os de Carboneto de Silício (SiC) e os de Óxido de Zinco (ZnO). Cada um desses pára-raios apresenta características bem definidas em função do material que são constituídos.

Os pára-raios de carboneto de silício utilizam como resistor não linear blocos de carboneto de silício (SiC) apresentando centelhadores (“gaps”) em série com estes.

Os pára-raios de Óxido de Zinco utilizam como resistor não linear o óxido de zinco (ZnO) e, ao contrário dos pára-raios de carboneto de silício, não possuem centelhadores série.

A título de exemplo, mostra-se na Figura 2.2 um pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO). Tais pára-raios são compostos por um conjunto de resistores não-lineares de ZnO, podendo possuir um encapsulamento cerâmico ou polimérico. Os custos dos pára-raios ZnO para 138 kV estão atualmente na faixa de U\$ 400 a U\$ 1000 por unidade.



**Figura 2.2 - Cortes de um pára-raios constituído por resistores de ZnO**

## **2.4 – Descrição das Variáveis Amostradas em Pára-Raios**

Além da exposição às mais diversas condições climáticas, os pára-raios sofrem solicitações de natureza elétrica e térmica, que podem se conjugar com fatores ambientais como por exemplo, a poluição. Em muitas situações a perigosa combinação de poluição e umidade acarretará o aumento da corrente de fuga, podendo resultar em explosão ou queima dos pára-raios.

Durante o processo de medição coletam-se diversas variáveis referentes aos sistemas de pára-raios como imagens térmicas, corrente de fuga, radiointerferência além de muitas outras. Uma análise criteriosa sobre o conjunto de medições possibilita a manutenção preditiva e diagnóstico de falhas no pára-raios.

Esse tópico descreve 3 técnicas que são contempladas nessa dissertação: a de Termografia, a de Corrente de Fuga, e a de Radiointerferência. São descritas também as variáveis de Identificação de pára-raios. Tais técnicas são detalhadas a seguir.

### **2.4.1 - Termografia**

Resumidamente, termografia é a técnica de registrar em forma gráfica e visível a radiação infravermelha que todos os corpos acima do zero absoluto ( $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) irradiam. Defini-se como sendo uma técnica de inspeção, não destrutiva, que tem como base a detecção da radiação infravermelha, que é emitida naturalmente pelos corpos, permitindo efetuar medições de temperaturas, sem contato físico com os equipamentos a serem inspecionados. A análise termográfica permite uma melhor programação, minimizando a mão-de-obra e

recursos envolvidos, uma vez que possibilita a identificação do sobreaquecimento nas instalações sem a interrupção do processo produtivo.

A termografia é uma técnica já consagrada em diversos serviços de manutenção, tendo grande praticidade de uso e a vantagem de não exigir o desligamento dos equipamentos sob inspeção. Em pára-raios, exige-se maiores cuidados de leitura, uma vez que pequenos diferenciais de temperatura podem indicar início de defeitos nos pára-raios. Os critérios utilizados em termografia têm sido objeto de reavaliação permanente em função da grande variedade de fabricantes e projetos de pára-raios. A análise termográfica possibilita a determinação da condição operativa de equipamentos mecânicos e elétricos.

As variáveis termográficas de pára-raios são coletadas com o auxílio de um equipamento chamado de termovisor. Esse equipamento capta uma imagem térmica (termograma) através das radiação infravermelha emitidas pelos pára-raios. O termovisor é um dispositivo sem contato que detecta a radiação infravermelha (calor) e a converte em um sinal digital que pode ser processado para produzir uma imagem térmica e executar cálculos de temperatura. A temperatura medida pelo termovisor pode ser detectado com alta precisão ( $0,1^{\circ}\text{C}$ ) permitindo identificar ou avaliar a severidade de falhas relacionadas com calor. A Figura 2.3 mostra uma termovisor ThermaCam dos Sistemas FLIR.



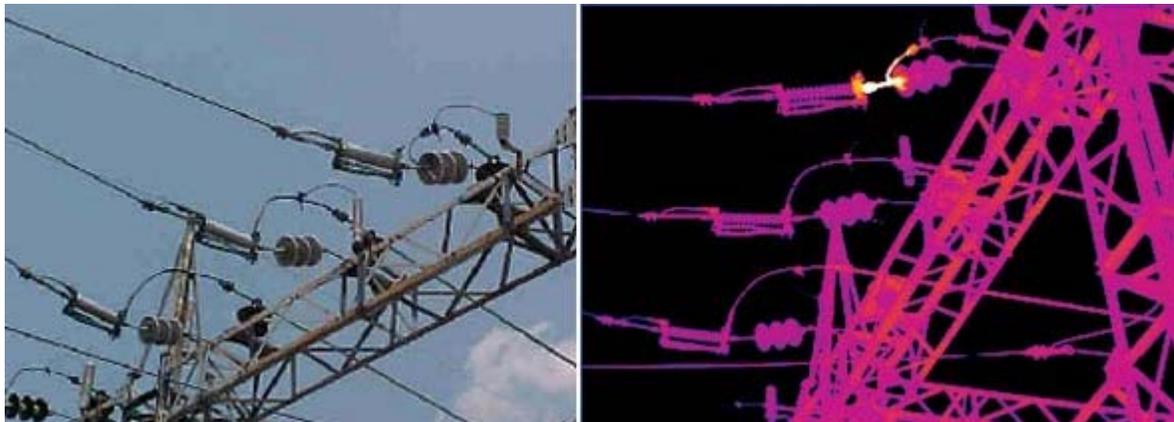
**Figura 2.3 - Foto do termovisor ThermaCAM (Fonte: Sistemas FLIR)**

As características térmicas do termovisor da figura 2.3 são evidenciados na tabela 2.1.

Material de Detecção	Mercúrio / Cádmió / Telúrio
Precisão da Medida	2% ou 2°C
Faixa de Medição de Temperatura	-20 a 500 °C
Campo de Visão	20 X 20 Graus
Resolução Espacial	Dependente das Lentes
Sensitividade Térmica	< 0.10 em 30 °C
Ajuste de Emissividade	.10 a 1.00
Capacidade de Armazenamento de Imagens	35 Imagens por Disquete
Meio Físico de Gravação	Disquetes 3.5
Temperatura de Operação	-15 a 50 °C
Peso da Máquina	12 Lbs.
Tamanho da Câmera	4 X 10 X 20 Inches
Fornecimento de Energia	Baterias ou A/C

**Tabela 2.1 – Características disponíveis para o termovisor da FLIR.**

Em se utilizando o termovisor, torna-se possível captar uma imagem térmica por meio das ondas eletromagnéticas na faixa do infravermelho, emitidas pelos pára-raios, como a apresentada na Figura 2.4.



**Figura 2.4 - Termograma de um conjunto de pára-raios de uma subestação e seus diferentes comportamentos (Fonte: Sumter Electric Cooperative, 2003)**

A imagem termográfica, também conhecida como termograma, amostrada durante as medições de campo, fornece o perfil de temperatura superficial da paisagem que contém o pára-raios. Outras variáveis, tais como: umidade relativa do ar (**H%**) e temperatura ambiente (**T<sub>amb</sub>**), a distância (**d**) e a emissividade (**e**) são obtidas durante as medições, através de outros equipamentos como os termohigrômetros e trenas.

Processando-se digitalmente o termograma, pode-se obter outras 3 importantes variáveis: temperatura máxima (**T<sub>máx.</sub>**), temperatura mínima (**T<sub>mín.</sub>**) e conseqüentemente a diferença de temperatura (**ΔT**) ao longo do corpo do pára-raios. O processamento digital é detalhado no capítulo 4.

Para que um termograma seja tratado e analisado com eficiência, o analista necessita de quatro variáveis: distância, emissividade, temperatura ambiente e umidade relativa. Outras 3 variáveis são obtidas pela processamento do termograma: temperatura máxima, temperatura

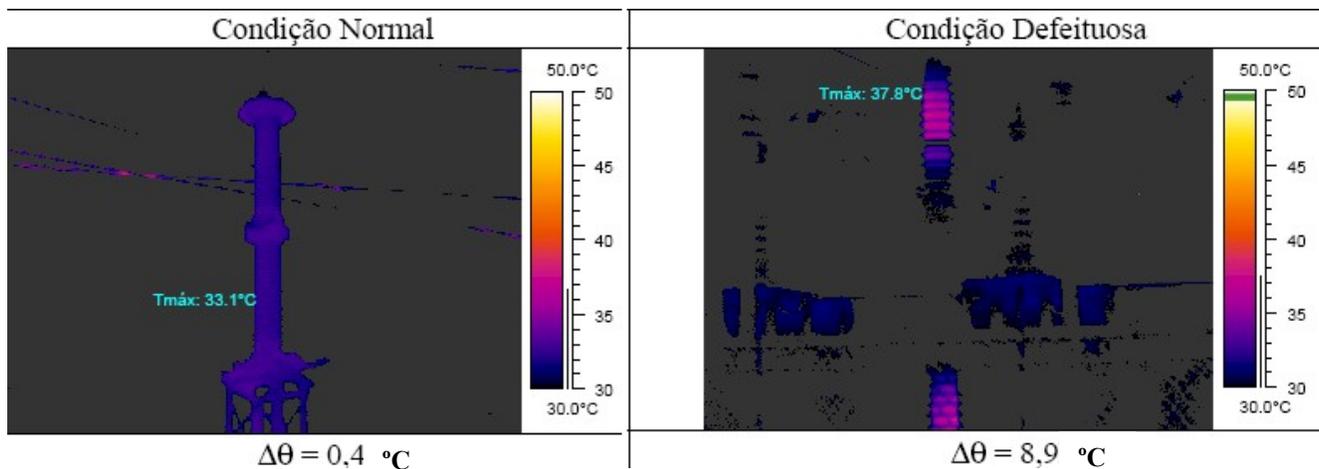
mínima e a diferença de temperatura ao longo do corpo do pára-raios. Essas variáveis constituem o grupo de variáveis obtidos pela técnica de termografia. Um exemplo de termograma é mostrado na Figura 2.5.



**Figura 2.5 - Termograma para um sistema de pára-raios  
(Fonte: Sumter Electric Cooperative, 2003)**

Os termogramas podem ainda ser comparados com termogramas anteriores objetivando a visualização da dinâmica de evolução de uma possível falha.

Qualitativamente, quando a diferença de temperatura aumenta de forma significativa no pára-raios é um indicativo forte da presença de falha no pára-raios. A título de ilustração mostra-se na Figura 2.6, um pára-raios considerado normal e outro com falha num termograma efetuado pelo CEPEL.



**Figura 2.6 - Termogramas comparativos de pára-raios na condição normal e defeituosa  
(Fonte: Cepel, 2003)**

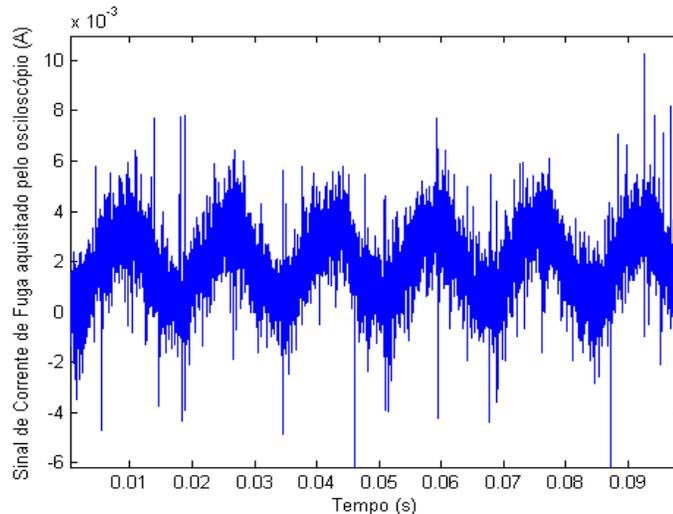
A penetração de umidade tem sido a principal causa de falhas em pára-raios. A mesma se infiltra devido a trincas que se formam ao longo do tempo. Essas falhas ocorrem devido à corrosão dos dispositivos de sobretensão ou a variações bruscas de temperatura.

## 2.4.2 - Técnica de Corrente de Fuga

A corrente de fuga consiste na medição da corrente que flui através do pára-raios estando o mesmo energizado pela tensão fase-terra nominal do sistema [12].

O sinal é medido com auxílio de um osciloscópio digital, armazenado e, posteriormente, processado de forma digital. O processamento do sinal de corrente de fuga é executado com dois fins: filtragem para remoção de ruído de alta frequência e obtenção de parâmetros da corrente de fuga. O processamento digital é detalhado no Capítulo 3.

Um sinal típico de um pára-raios é mostrado na Figura 2.7.



**Figura 2.7 - Corrente de fuga de um pára-raios amostrada por meio de um osciloscópio digital. (Fonte: CEPEL, 2003)**

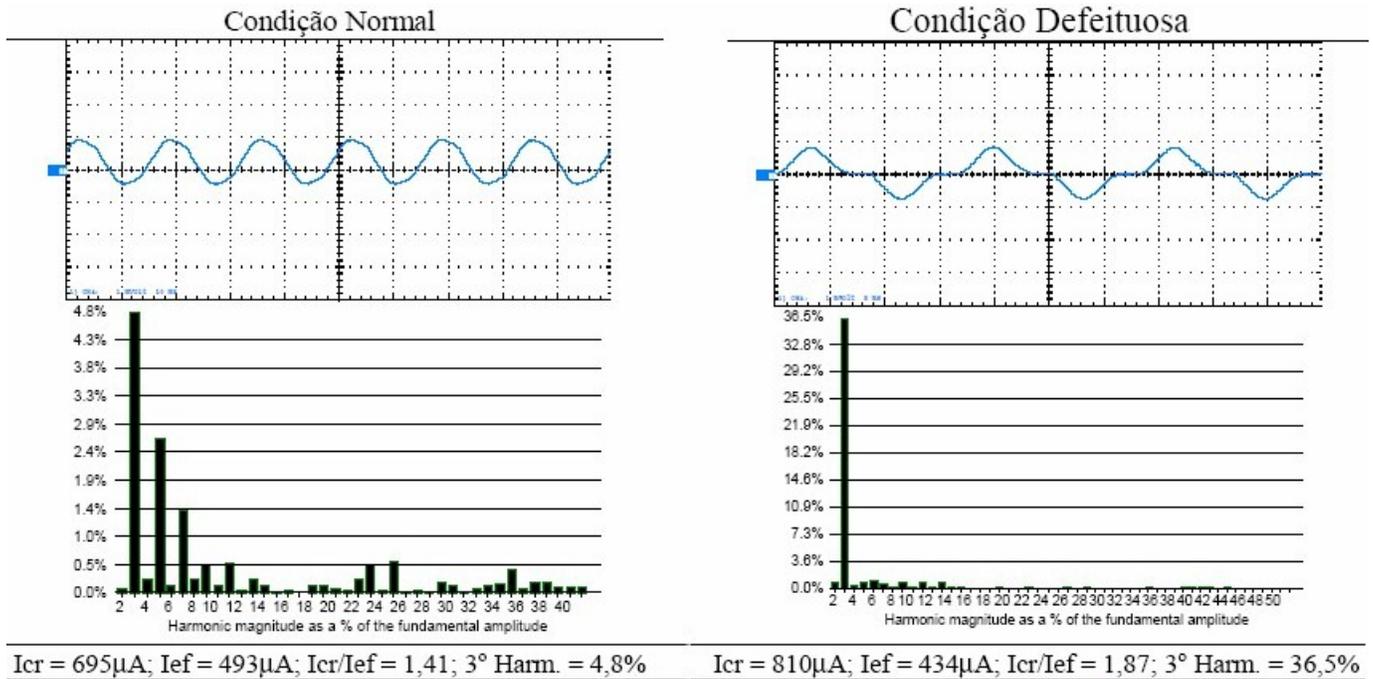
O processamento digital da corrente de fuga visa o cálculo das seguintes variáveis:

- **Corrente de Crista ( $I_{ck}$ ):** essa variável corresponde à metade do valor da corrente de pico à pico da corrente de fuga;
- **Corrente Eficaz ( $I_{ef}$ ):** este dado corresponde ao valor RMS da corrente de fuga;
- **Razão entre Corrente de Crista e Corrente Eficaz ( $I_{ck}/I_{ef}$ ):** obtido pela divisão da corrente de crista e da eficaz;
- **3º harmônico (3ºharm):** corresponde à amplitude em valor percentual do 3º harmônico do sinal de corrente de fuga [21]/[22].

O grupo de variáveis obtidos pela técnica de corrente de fuga é composto das 4 variáveis citadas.

Um forte indício qualitativo de falhas em pára-raios via análise de corrente de fuga é quando a mesma apresenta a componente de 3º harmônico acentuada, conforme mostra o pára-raios na condição de defeito na Figura 2.8. Tal alteração pode se dever a penetração de

umidade pelos pára-raios, o que faz com que a corrente de fuga sofra alterações significativas, como aquelas evidenciadas na Figura 2.8.



**Figura 2.8 - Comparativo das formas de onda das correntes de fuga para um pára-raios na condição normal e outro na condição defeituosa; logo abaixo suas respectivas decomposições harmônicas como função da amplitude da frequência fundamental. (Fonte: CEPEL, 2003)**

Observando a Figura 2.8, percebe-se que no pára-raios denominado normal a forma da onda não apresenta distorção significativa se comparada à forma de onda de condição defeituosa. Analisando a morfologia das correntes de fuga apresentadas, percebe-se a presença do sinal não-senoidal na condição defeituosa. Essa forma se deve ao aumento da corrente resistiva não-senoidal (conforme o circuito equivalente apresentado na Figura 1.1) indicando uma possível condição operativa de defeito no pára-raios.

Na tensão operativa dos pára-raios em condição normal a amplitude da corrente total de escoamento não é muito representativa do estado dos resistores, já que a componente capacitiva é muito maior que a resistiva (usualmente da ordem de 70% a 90% da corrente total). Dessa forma um aumento da corrente resistiva não-senoidal indica efetivamente a ocorrência de deterioração do pára-raios.

Na técnica de corrente de fuga é vital a execução de medições após a entrada em operação do pára-raios. Estas medições devem ser efetuadas regularmente (recomendação do fabricante entre 3 e 6 meses), especialmente em locais onde existe muita poluição causada por indústrias ou salinidade.

A medição periódica da corrente de fuga, além de oferecer um diagnóstico confiável, propicia a visualização e o acompanhamento do estado do pára-raios.

### 2.4.3 - Técnica de Radiointerferência

A aquisição dos valores correspondentes à radiointerferência de um pára-raios consiste na medição de sinais de alta frequência gerados pelo mesmo [12].

Esses sinais são captados por um transformador de corrente tipo janela (TC), cujo valor absoluto é fornecido por meio de um medidor portátil de radiointerferência com sensibilização de 1MHz. Esse grupo é constituído somente dessa variável.

### 2.4.4 - Variáveis de Identificação do Pára-raios

Essas variáveis são adicionadas com intuito de permitir ao usuário efetuar busca, criação e inserção de medições de pára-raios baseando-se nas características dos mesmos ou da subestação onde se encontram.

Além de serem utilizadas para o gerenciamento de medições as variáveis de identificação são também utilizadas no sistema de diagnóstico, como entradas para as redes *Neurofuzzy* implementadas.

As seguintes variáveis são utilizadas:

- **Material do pára-raios:** podendo ser ZnO polimérico, ou ZnO porcelana,
- **Fabricante do pára-raios:** refere-se à empresa que construiu o pára-raios,
- **Tensão Nominal do pára-raios:** refere-se a tensão fase-terra do pára-raios,
- **Índice de poluição:** é obtido a partir de medição em mg/cm<sup>2</sup> das partículas de poluição presentes no ar. São definidos quatro níveis: leve, médio, pesado e muito pesado, conforme descrição apresentada na tabela 2.1.

**Tabela 2.2 - Os quatro níveis definidos para a variável índice de poluição  
(Fonte: International Electrotechnical Commission IEC Report –  
Publication 815 – First Edition – 1989)**

<i>Faixa (mg/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Classificação</i>
< 0,06	Leve
0,06 a 0,1	Médio
0,1 a 0,2	Pesado
> 0,2	Muito Pesado

## 2.5 – Conclusão

Esse capítulo apresentou os pára-raios, fazendo um breve histórico dos mesmos. Foram evidenciadas as principais estruturas presentes nos mesmos.

Citou-se as variáveis amostradas durante o processo de medição, focando nos pára-raios presentes em subestações de energia.

Esse capítulo apresentou as principais técnicas utilizadas para diagnóstico em pára-raios: Termografia, Corrente de Fuga e Radiointerferência. A instrumentação necessária nesse processo foi mencionada.

Foram citadas as variáveis responsáveis pela identificação de pára-raios. Essas variáveis além de serem utilizadas para o gerenciamento de medições. As variáveis de identificação são utilizadas no sistema de diagnóstico, como entradas para as redes *Neurofuzzy* implementadas.

Durante o desenvolver desse capítulo foi apresentado o sistema de pára-raios enfatizando, qualitativamente, como essas técnicas podem vir a detectar uma falha num pára-raios.

# Capítulo 3 – Metodologia para Diagnóstico Inteligente de Falhas em Pára-Raios

---

## 3.1 – Introdução

Apresenta-se nesse capítulo uma metodologia para o diagnóstico de falhas em pára-raios. Com a metodologia apresentada é possível efetuar o diagnóstico da condição operativa dos pára-raios por meio da utilização das técnicas de termografia, corrente de fuga e radiointerferência.

A metodologia aborda o problema de diagnóstico de falhas em pára-raios como um problema de classificação de padrões. Tal metodologia propõe a geração de um diagnóstico parcial para cada técnica e um diagnóstico final.

Utiliza-se para a geração de cada diagnóstico parcial um conjunto de sistemas de inferência *Neurofuzzy* adaptativo. Ressalta-se que o voto majoritário desse conjunto gera um diagnóstico parcial para técnica.

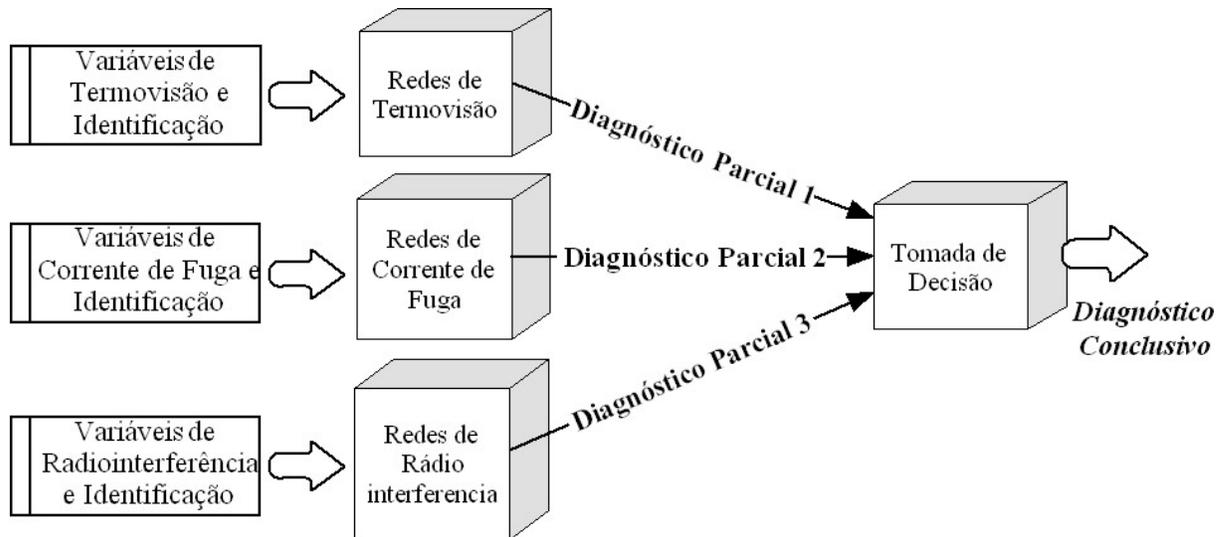
O treinamento e validação da estrutura de classificação desenvolvida utilizam dados reais, fornecidos pelo Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (CEPEL). Tal banco de dados permite a simulação de diversos cenários de falhas em pára-raios e o índice de acerto foi aproximadamente de 90%.

## 3.2 – Metodologia para Diagnóstico de Falhas

A metodologia proposta nessa dissertação faz uso das seguintes técnicas para diagnóstico da condição operativa de pára-raios: Termografia, Corrente de Fuga e Radiointerferência. Essas técnicas e suas variáveis foram descritas com maiores minúcias no Capítulo 2.

Gera-se um diagnóstico para cada técnica proposta. São gerados 3 diagnósticos parciais, ou seja, um para cada técnica de medição efetuada nos pára-raios, descritas detalhadamente no Capítulo 2. Um diagnóstico final é gerado pela combinação do diagnóstico de cada um dos diagnósticos parciais.

A cada técnica encontra-se associado um conjunto de variáveis, sendo esse utilizado como entrada para o referido diagnóstico parcial, conforme ilustra a Figura 3.1. Ressalta-se que além de fazer uso das variáveis que identificam a técnica de medição, todos os diagnósticos utilizam as variáveis de identificação de pára-raios para efetuar seus diagnósticos. Essas variáveis foram descritas no Capítulo 2.



**Figura 3.1 – Conjunto de técnicas utilizadas para o diagnóstico de falhas em pára-raios**

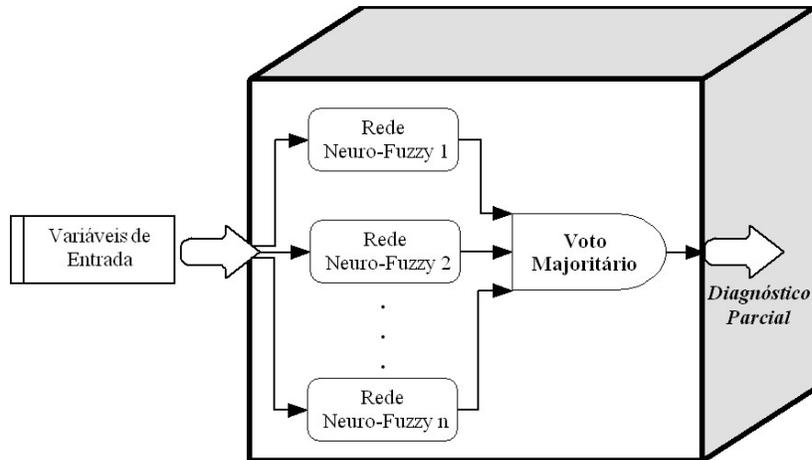
Cada um dos módulos de diagnóstico parcial utiliza um conjunto de redes *Neurofuzzy* para processar as suas variáveis de entrada e obter o diagnóstico final.

Obtém-se o diagnóstico conclusivo pela pior condição detectada nos diagnósticos parciais, conforme evidencia a topologia mostrada na Figura 3.1. O diagnóstico conclusivo classifica o pára-raios segundo a sua condição operacional, podendo assumir os seguintes valores:

- pára-raios em condição normal (NORMAL),
- pára-raios em condição suspeita (SUSPEITO),
- pára-raios em condição defeituosa (DEFEITO).

Cada técnica de diagnóstico é implementada por um conjunto de redes *Neurofuzzy*. Obtém-se o diagnóstico parcial por meio do voto majoritário de todas as redes *Neurofuzzy* que implementam esse método de diagnóstico. Caso haja empate o pior diagnóstico é selecionado.

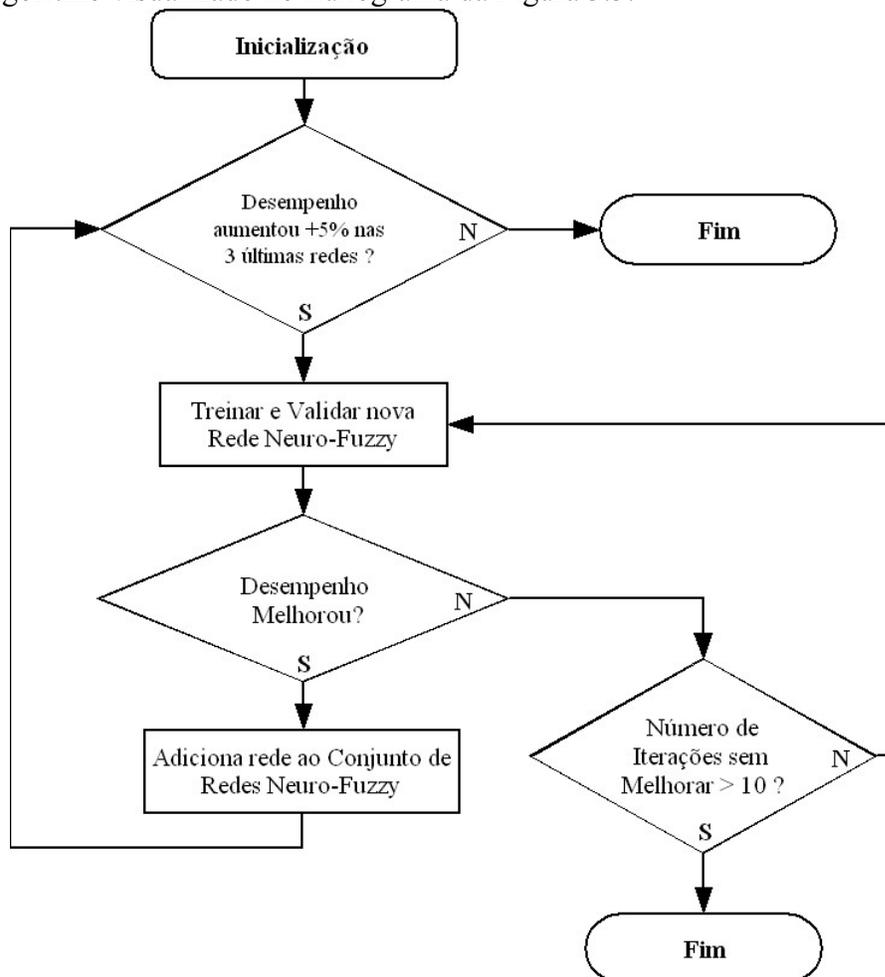
Com intuito ilustrativo de como cada técnica calcula seu diagnóstico parcial, apresenta-se na Figura 3.2 uma técnica genérica, com suas variáveis de entrada, suas  $n$  redes *Neurofuzzy* e um módulo para contabilização do diagnóstico majoritário entre as redes constituintes, gerando o diagnóstico parcial para a técnica.



**Figura 3.2 – Visão de um diagnóstico genérico, baseado em conjuntos de redes *Neurofuzzy***

Utilizando-se da técnica do comitê de redes para cada diagnóstico parcial é possível melhorar o poder de generalização da rede *Neurofuzzy* [23].

Para se determinar o número de redes *Neurofuzzy* em cada diagnóstico parcial, foi utilizado o algoritmo visualizado no fluxograma da Figura 3.3.



**Figura 3.3 – Fluxograma evidenciando como foi escolhido o número de redes *Neurofuzzy* para constituir cada técnica de diagnóstico parcial**

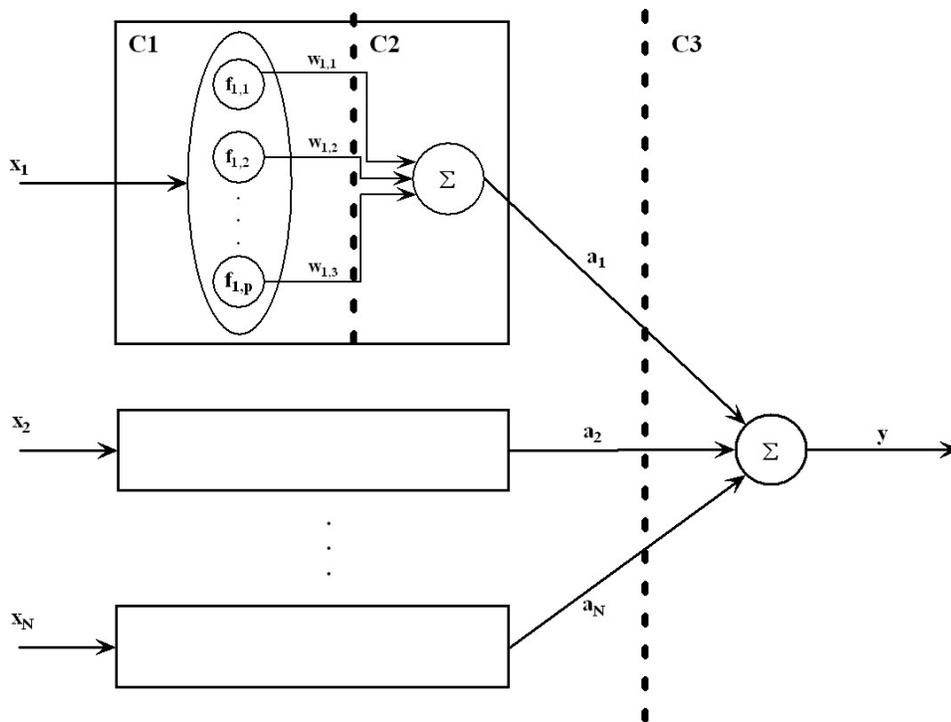
### 3.3 – Descrição da Rede *Neurofuzzy*

#### 3.3.1 – Comentários Iniciais

Proposto por Yamakawa et al. em 1992 o Neo-Fuzzy-Neuron (NFN) é uma representação matemática de um sistema *fuzzy* de inferência [24]. O NFN é linear nos parâmetros, ou seja, o ajuste de pesos dispensa algoritmos complexos de otimização. Essa estrutura apresenta também alto poder de generalização devido ao fato de possuir um determinado grau de rigidez em sua estrutura. Devido às características mencionadas o NFN tem sido utilizado com sucesso em problemas relacionados a monitoramento de sistemas dinâmicos e diagnóstico de falhas baseados em estimação de pesos on-line [25]\*.

#### 3.3.2 – Topologia e Formulação da Rede *Neurofuzzy*

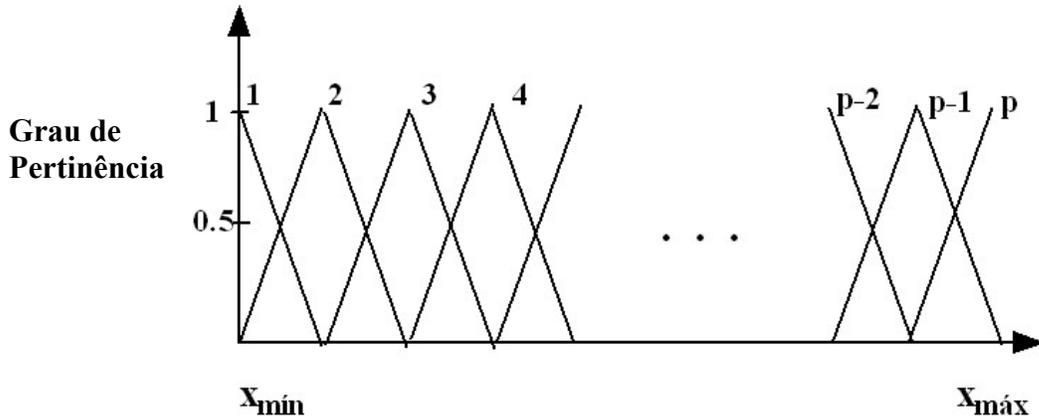
O NFN é constituído por uma topologia de 3 camadas: a de entrada, a camada de agregação de regras e a camada de saída, conforme evidencia a Figura 3.4.



**Figura 3.4 – Topologia da rede *neurofuzzy* utilizada nos diagnósticos**

Cada um dos  $N$  nós que compõem a camada de entrada possui  $p$  funções de pertinência triangulares, fixas e regularmente distribuídas no espaço de excursão da variável associada. A Figura 3.5 mostra esquematicamente as funções de pertinência dos nós de entrada do NFN.

\* Para completo entendimento da topologia do NFN é altamente recomendada a leitura das referências [24] e [25]. Uma literatura fácil



**Figura 3.5 – Funções de pertinência de cada nó da camada de entrada**

Pode-se notar que devido a forma das  $p$  funções de pertinência e sua disposição no espaço, no máximo duas delas estarão ativas para um dado valor  $x_i$  da variável de entrada. Nota-se também que a soma do valor das funções ativas,  $f_{ij}(x_i) + f_{i,j+1}(x_i)$ , é sempre igual a 1.

A  $j$ -ésima partição de um nó de entrada  $i$  é ponderada por um peso  $w_{i,j}$ . Na camada de agregação de regras utiliza-se o sistema de inferência *Max-Min*, visando agregar as regras ativas. Assim, pode-se escrever a saída do  $i$ -ésimo nó de entrada como:

$$a_i = \sum_{j=1}^p f_{i,j}(x_i) w_{i,j} \quad (1)$$

Onde os pesos  $w_{i,j}$  são ajustados durante o processo de treinamento do NFN.

Na camada de saída ocorre a desnebulização. Nessa topologia utiliza-se o centro de gravidade para determinação dos valores de saída da rede *Neurofuzzy*.

$$y = \sum_{i=1}^N a_i \quad (2)$$

### 3.3.3 – Treinamento da Rede *Neurofuzzy*

De forma similar à rede neural, o método de aprendizagem do NFN consiste de seus parâmetros e funções. Será adotado o treinamento supervisionado onde somente serão ajustados os parâmetros  $w_{i,j}$ , os conseqüentes das regras fuzzy, denominados nessa dissertação como pesos.

A grande vantagem de ajustar somente os pesos é que a função objetivo a ser otimizada torna-se quadrática e convexa, não apresentando mínimos locais e garantindo a convergência do algoritmo de treinamento.

Para atualização dos pesos utiliza-se do algoritmo do gradiente descendente visando

minimizar o erro quadrático da rede *Neurofuzzy*, definido por:

$$w_{ij}^{k+1} = w_{ij}^k - \alpha^k \frac{\partial E(w_{ij}^k)}{\partial w_{ij}^k} \quad \text{onde}$$

$$w_{ij}^{k+1} = w_{ij}^k - \alpha^k (y_t^k - y_d) \quad (3)$$

Onde  $y_d$  é o valor desejado da saída e  $y_t^k$  é a saída atual da rede. O tamanho do passo, o parâmetro  $\alpha^k$ , é chamado de taxa de aprendizado. Tal termo pode ser determinado empiricamente ou utilizando algum método de busca unidirecional indireto (seção áurea, Fibonacci e outros). Tais métodos não levam em conta as propriedades da rede *neurofuzzy*, que é o fato da função objetivo ser quadrática. Utilizando essa propriedade é possível obter uma taxa ótima de aprendizado [24], dada por.

$$\alpha = \frac{1}{\sum_{i=1}^N [f_{ij}(x_i)^2 + f_{i(j+1)}(x_i)^2]} \quad (4)$$

Tal propriedade foi utilizada para treinamento de todas as técnicas de diagnósticos, apresentadas nessa dissertação.

Ressalta-se que antes dos cálculos das saídas das redes *Neurofuzzy* foi necessário um tratamento nas variáveis de entrada das redes *Neurofuzzy*, conforme será descrito no tópico seguinte.

### 3.4 – Tratamento das Variáveis de Entrada da Rede *Neurofuzzy*

Antes de efetuar o processamento do diagnóstico de falhas, os grupos de variáveis recebem ainda um tratamento. Esses tratamentos são descritos a seguir.

#### 3.4.1 - Codificação das Variáveis de Identificação

Inicialmente todas as variáveis de identificação foram codificadas de modo a tornarem-se entradas válidas para a rede *Neurofuzzy*. Observou-se o desempenho do sistema na presença e ausência de cada variável de identificação. Verificou-se melhora no desempenho após o acréscimo dessas variáveis para o diagnóstico.

#### 3.4.2 - Normalização das Variáveis de Medição

As variáveis de medição são normalizadas da seguinte forma: subtrai-se a média e divide-se por duas vezes o valor do desvio padrão. A média e o desvio padrão, relativos a

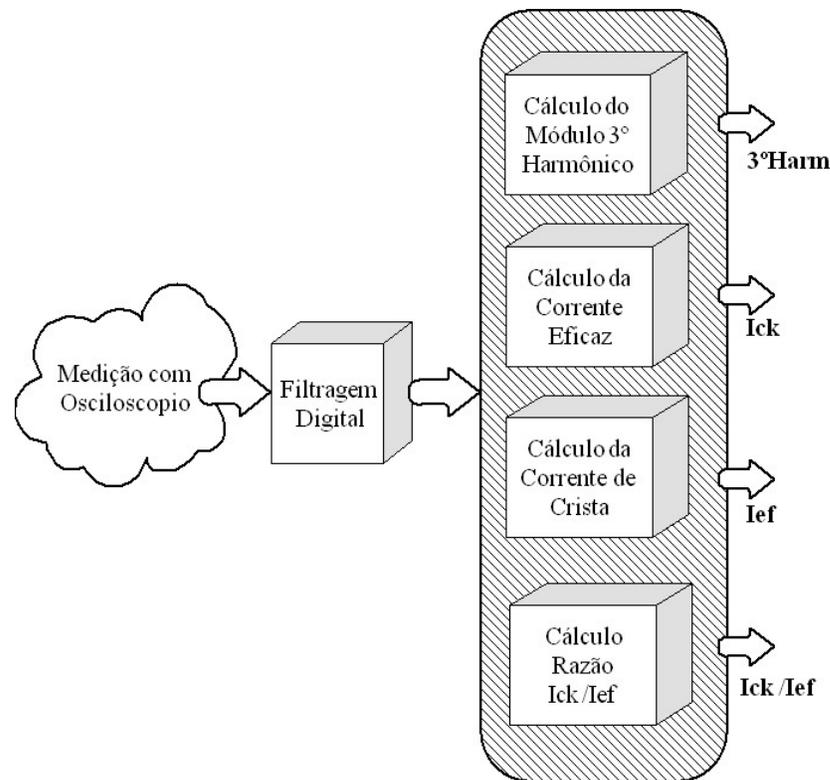
cada variável, são constantes obtidas a partir das medições presentes na base de dados inicial.

Assegura-se, dessa forma, a homogeneização e a polarização das entradas efetivas da rede, que passam a assumir valores, em sua maioria, dentro do intervalo  $-1$  a  $+1$ .

### 3.4.3 - Processamento Digital do Sinal de Corrente de Fuga

Essa funcionalidade permite o processamento digital da corrente de fuga obtida por meio de osciloscópio.

O processamento digital da corrente de fuga efetua a filtragem e o cálculo de parâmetros desse sinal, conforme Figura 3.6.

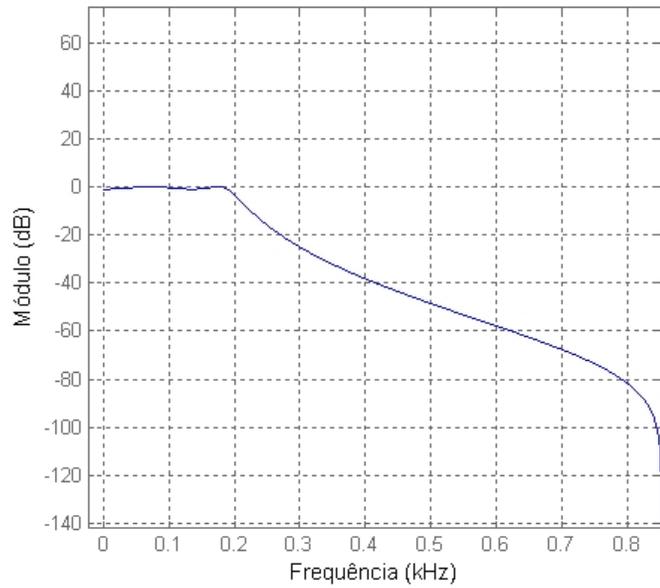


**Figura 3.6 - Metodologia de processamento das variáveis de Corrente de Fuga**

O sinal de corrente de fuga medido pelo osciloscópio é inicialmente filtrado antes de ser digitalmente processado. A filtragem torna-se necessária uma vez que parâmetros como corrente de pico, corrente eficaz podem ter seus valores alterados na presença de ruído.

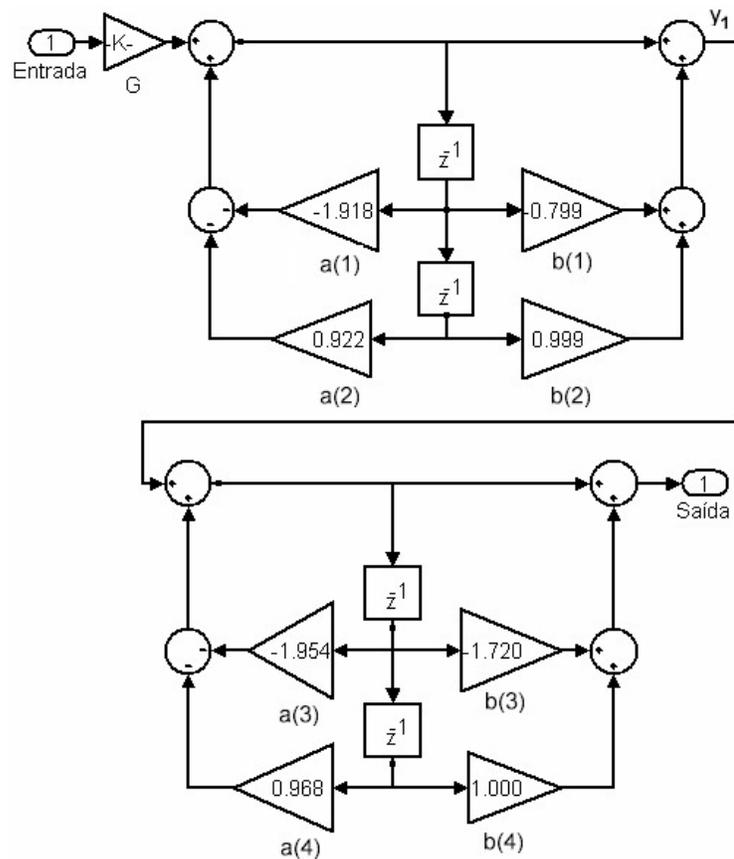
A filtragem digital de corrente de fuga permite a remoção de ruídos existentes com frequência superior a 185Hz.

O filtro foi projetado de forma que a resposta em frequência do sinal permanecesse inalterada até a frequência de 185Hz. Essa frequência foi escolhida de modo a não alterar a amplitude do 3º harmônico da corrente de fuga. A resposta em frequência do filtro projetado é mostrada na Figura 3.7. O projeto do filtro foi feito utilizando-se o Matlab 6.0.



**Figura 3.7 - Resposta em frequência do filtro projetado com frequência de corte em 185 Hz**

A resposta em frequência da Figura 3.7 é resultado do projeto de um filtro do tipo passa-baixo com arquitetura visualizada na Figura 3.8.



**Figura 3.8 - Realização do filtro elíptico no domínio da transformada Z**

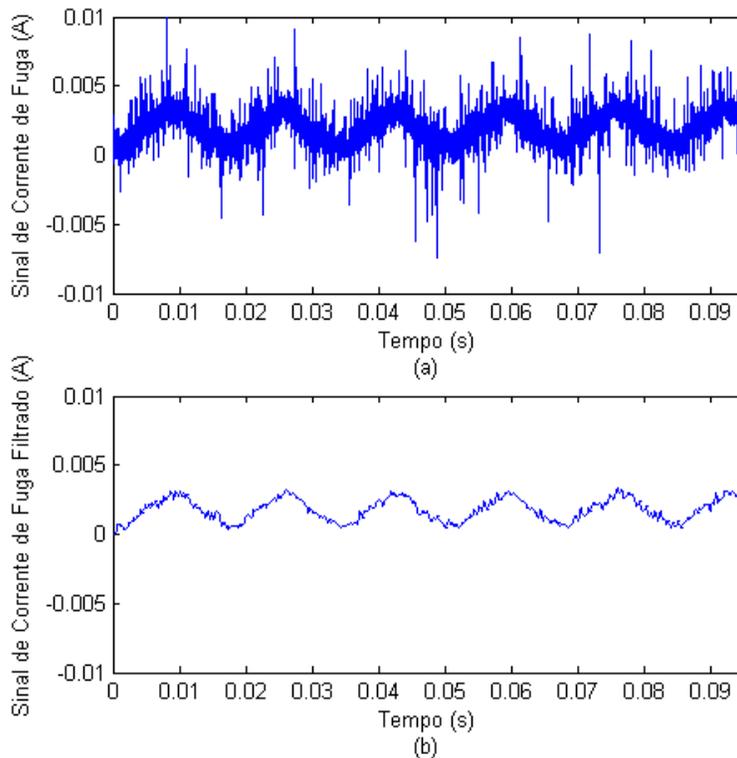
Onde  $a(i)$  e  $b(j)$  são os coeficientes dos filtros. O ganho do filtro ( $G$ ) vale  $10^{-4}$ .

Analisando a arquitetura mostrada na Figura 3.8, obtém-se a realização do filtro no tempo, obtida por (5) e (6).

$$y_1(n) = G * x(n) + \sum_{i=1}^2 [G * b(i) * x(n-i)] - \sum_{j=1}^2 [a(j) * y(n-j)] \quad (5)$$

$$y_f(n) = y_1(n) + \sum_{i=1}^2 [b(i+2) * y_1(n-i)] - \sum_{j=1}^2 [a(j+2) * y_f(n-j)] \quad (6)$$

Utilizando-se (5) e (6) é possível filtrar o sinal  $x(t)$  no tempo. A Figura 3.9 evidencia a ação do filtro num sinal real de corrente de fuga para tempo de amostragem de  $10^{-5}$  s.



**Figura 3.9 - (a) Sinal de Corrente de Fuga obtido pelo osciloscópio (b) Sinal de Corrente de Fuga obtido pelo osciloscópio filtrado**

Obtido o sinal filtrado, procede-se com o cálculo das variáveis deste grupo por meio de processamento digital do sinal resultante da filtragem.

Para execução do cálculo das variáveis, é determinado o ponto de máximo ( $I_{máx}$ ) e mínimo ( $I_{mín}$ ) do sinal para cálculo da corrente de crista do sinal utilizando (7).

$$I_{ck} = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{2} \quad (7)$$

Em seguida ocorre o processamento da corrente eficaz do sinal de corrente de fuga utilizando (8).

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^{k=T} ([i(k)]^2 * \Delta t)} \quad (8)$$

Onde T é o tempo total de amostragem da corrente de fuga, i(k) é o valor instantâneo da corrente de fuga da k-ésima amostra e  $\Delta t$  é o tempo de amostragem do osciloscópio.

Calcula-se a terceira variável do grupo de corrente de fuga pela divisão da corrente de crista e da eficaz calculada em (7) e (8).

Para completar esse grupo, calcula-se a FFT (fast fourier transformer) para obtenção do módulo do 3º harmônico do sinal [21]/[22] completando o cálculo de todas as variáveis desse grupo.

### 3.5 - Diagnóstico Parcial de Termografia

Para o diagnóstico parcial de termografia, a rede tem como entrada seis variáveis além de quatro variáveis de identificação, totalizando dez entradas. A Figura 3.10 evidencia a estrutura citada. Com essa estrutura, a rede foi capaz de, durante o treinamento, relacionar devidamente as variáveis de entrada de forma a produzir a saída desejada para a rede.

O diagnóstico de termografia foi composto por 20 redes *Neurofuzzy*. Esse número foi obtido pela utilização do algoritmo da Figura 3.3 para determinação do número de redes *Neurofuzzy* nesse diagnóstico.

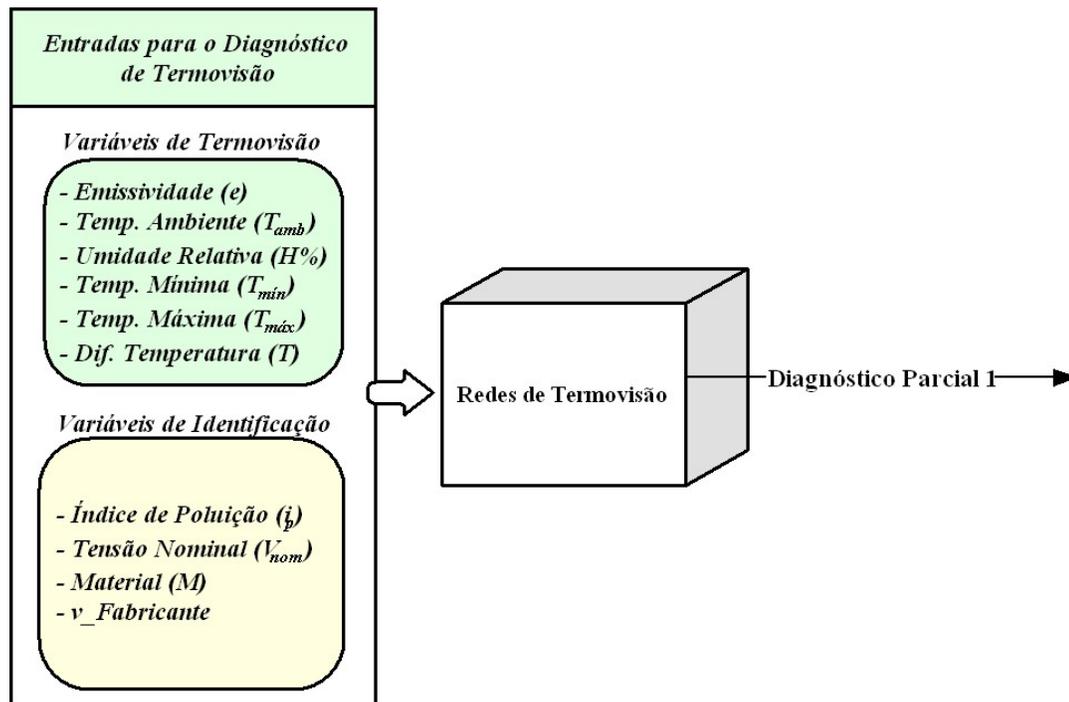


Figura 3.10 – Topologia da Rede de Termografia.

### 3.6 - Diagnóstico Parcial de Corrente de Fuga

O tratamento das variáveis desse método é diferente dos demais, cada variável do método de corrente de fuga representa, por si só, um método de diagnóstico. Assim sendo, para o método de corrente de fuga, foram criadas quatro redes, sendo que cada uma delas tem como entrada uma das variáveis de medição do método mais quatro variáveis de identificação.

O diagnóstico do 3º Harmônico foi composto por 21 redes *Neurofuzzy*, o de Corrente de Crista por 12 redes, o de Corrente Eficaz por 32 redes e o diagnóstico da Razão da Corrente de Crista e Corrente Eficaz por 25 redes *Neurofuzzy*. Esse número foi obtido pela utilização do algoritmo da Figura 3.3 para determinação do número de redes *Neurofuzzy* nesse diagnóstico.

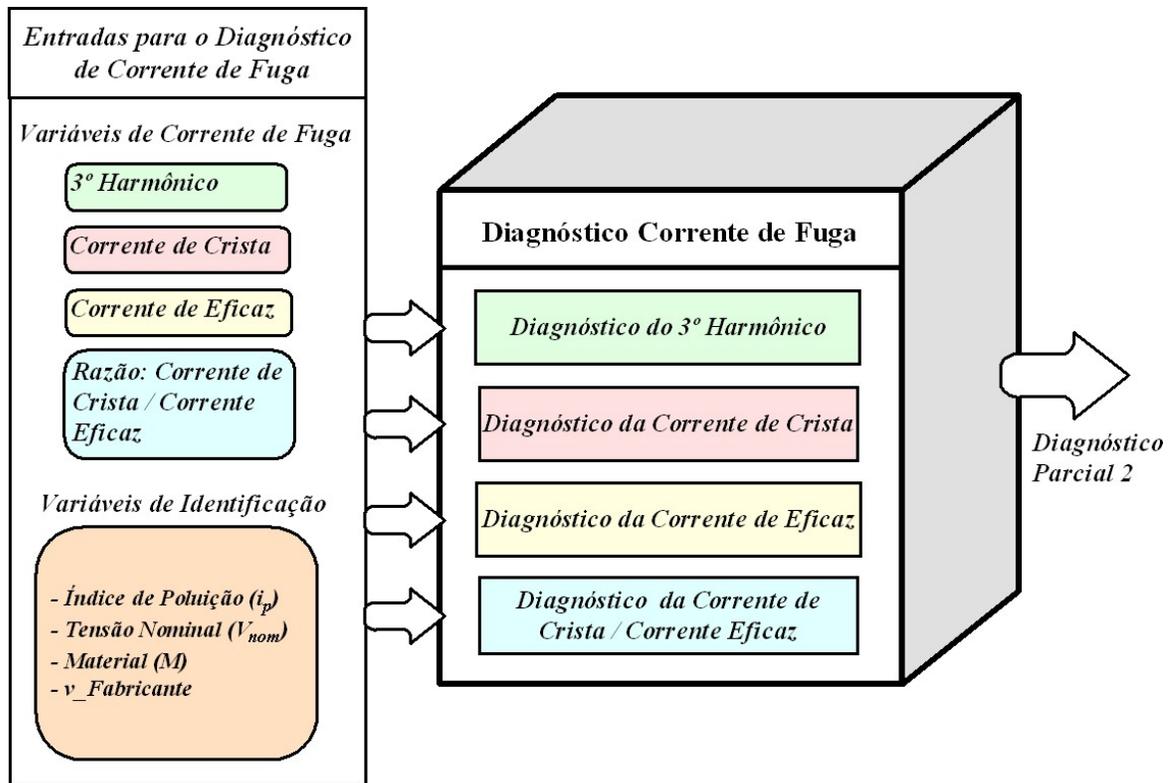


Figura 3.11 – Configuração da Rede de Corrente de Fuga.

### 3.7 - Diagnóstico Parcial de Radiointerferência

Para o método radiointerferência, a rede tem como entrada a variável do método mais quatro variáveis de identificação.

O diagnóstico de radiointerferência foi composto por 13 redes *Neurofuzzy*. Esse número também foi obtido pela utilização do algoritmo da Figura 3.3 para determinação do número de redes *Neurofuzzy* nesse diagnóstico.

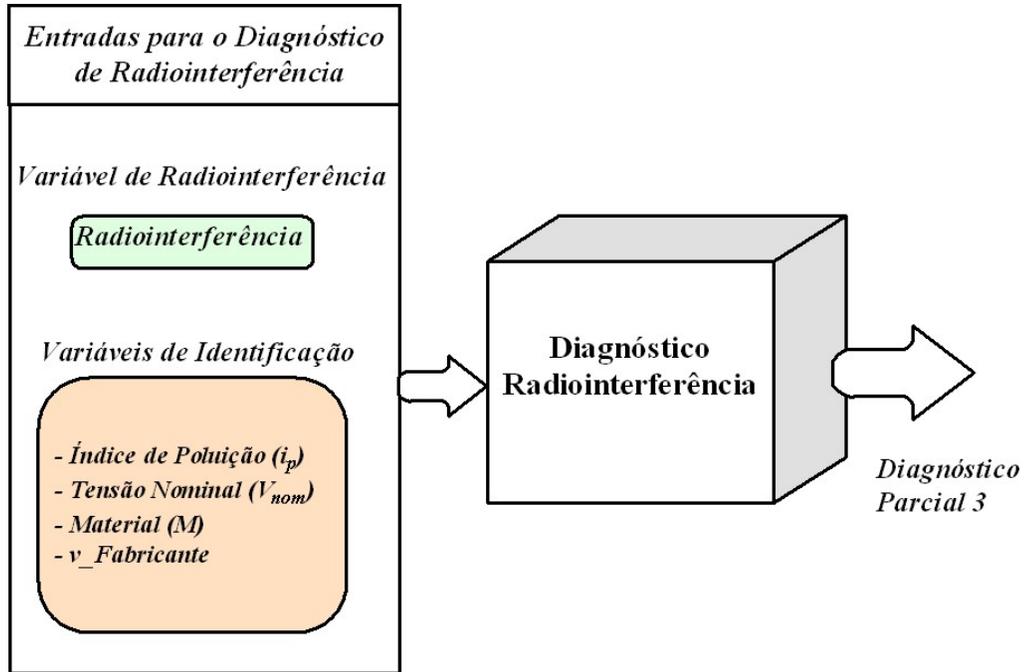


Figura 3.12 – Topologia da Rede de Radiointerferência.

### 3.8 - Resultados

A topologia da rede *Neurofuzzy* evidenciada na Figura 3.4 foi implementada no Matlab assim como o fluxograma que permite a configuração do número de redes *Neurofuzzy* por diagnóstico da Figura 3.3.

Foi utilizada uma base de dados fornecida pelo CEPEL contendo diversos cenários de falhas de pára-raios. Utilizando essa base foi possível efetuar o treinamento e a validação para cada um dos diagnósticos propostos nessa dissertação.

Durante a fase de treinamento, as redes *Neurofuzzy* eram selecionadas seguindo os critérios do Fluxograma 3.3 e seus pesos salvos em arquivos, para posterior execução dessa rede. A Figura 3.13 evidencia o número de redes obtidas para cada um dos diagnósticos parciais.

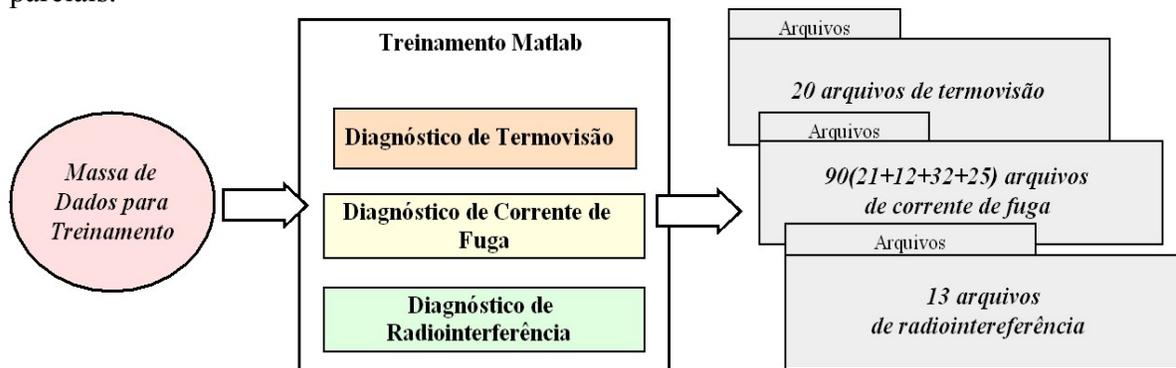


Figura 3.13 – Funcionamento do treinamento das redes *Neurofuzzy*.

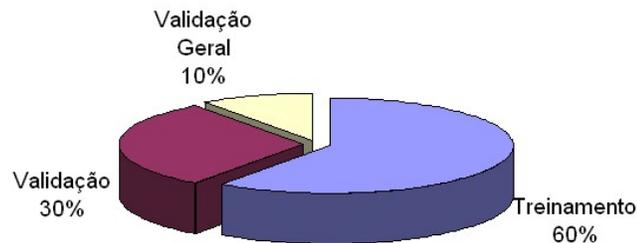
A base de dados utilizada para implementação da topologia do diagnóstico de falhas proposto nessa dissertação constituía-se de 764 medições, obtidas em diversas subestações, com os mais diferentes índices de poluição, pertencentes a seis clientes do CEPTEL. A base de dados era composta por 8 fabricantes diferentes: ABB, Alstom, Asea, Hitachi, McGraw, Sorester, Sprecher e Westinghouse.

A tabela 3.1 indica o número de pára-raios de Carboneto de Silício e de Óxido de Zinco utilizados nessa dissertação.

**Tabela 3.1 – Número de Medições por tipo de Pára-Raios**

TIPO DE PÁRA-RAIOS	NÚMERO MEDIÇÕES
SiC	626
ZnO	138

Foram separados 3 grupos de dados: um para executar o treinamento, outro para a validação de cada método de diagnóstico de falhas proposto e uma parte para validação geral do sistema. Cada uma das proporções utilizadas para cada uma dessas etapas pode ser visualizada na Figura 3.14.



**Figura 3.14 – Utilização dos dados para treinamento, validação e validação geral.**

Uma vez que o banco de dados consistia de informação de diversas subestações e diversos fabricantes procurou-se manter um certo equilíbrio na amostragem de dados, tanto em relação à classe de diagnóstico (normal, suspeito, defeito) quanto em relação às subestações de origem das medições. Utilizou-se esse equilíbrio para que as redes *Neurofuzzy* não ficassem tendenciosas a diagnosticar uma condição de falha ou de normalidade de um pára-raios.

Foram reservados 10% dos dados iniciais para validação geral do sistema. Durante o processo de treinamento cada uma das redes escolhia, dentre os 90% dos dados restantes, 60% dos dados para treinamento e, 30% dos dados que sobraram para a validação do mencionado treinamento. Essa divisão da massa de dados foi utilizada para a geração dos conjuntos de redes de cada um dos métodos de diagnósticos utilizados nessa dissertação.

Ao fim do processo de validação mencionado, um outro processo de validação foi executado. Uma validação final é aplicada sobre o conjunto de redes *Neurofuzzy* gerado. Essa validação foi aplicada com os 10% de dados reservados. Dessa forma o conjunto de redes *Neurofuzzy* foi validado com dados nunca antes vistos pelas redes que compõe a técnica de diagnóstico. Os resultados da validação final são apresentados na tabela 3.1.

**Tabela 3.2 - Índices de coincidência de diagnóstico obtidos para cada técnica por tipo de pára-raios na validação**

<b>TÉCNICA APLICADA DE ACORDO COM O TIPO DE PÁRA-RAIOS</b>	<b>ÍNDICE DE COINCIDÊNCIA DE DIAGNÓSTICO (%)</b>
Termografia p/ ZnO	85,9
Termografia p/ SiC	90,6
Corrente de Fuga p/ ZnO	76,1
Corrente de Fuga p/ SiC	89,7
Radiointerferência p/ ZnO	85,8
Radiointerferência p/ SiC	92,2

O índice de acerto do método corrente de fuga consiste na média de acerto das quatro variáveis de medição desse método. Pode-se verificar um acerto médio global foi de aproximadamente 90%.

Apresenta-se na tabela 3.3 o número percentual de amostras com diagnóstico falso-positivo obtido durante o processo de validação, ou seja amostras que o sistema de diagnóstico deveria detectar como defeituosas mas não o fez.

**Tabela 3.3 - Índices de falso-positivo para cada técnica de diagnóstico**

<b>TÉCNICA</b>	<b>ÍNDICE DE FALSO-POSITIVO CONSIDERANDO TODAS AS AMOSTRAS (%)</b>	<b>ÍNDICE DE FALSO-POSITIVOS CONSIDERANDO AMOSTRAS DE DIAGNÓSTICO NÃO COINCIDENTES (%)</b>
Termovisão p/ ZnO	2,17	23,1
Termovisão p/ SiC	0,79	8,1
Corrente de Fuga p/ ZnO	2,17	23,1
Corrente de Fuga p/ SiC	1,75	17,7
Radiointerferência p/ ZnO	1,45	15,3
Radiointerferência p/ SiC	0,64	6,5

Ressalta-se que os resultados obtidos se aplicam ao conjunto de dados fornecidos pelo CEPTEL. Uma vez que as técnicas de Inteligência estão sendo aplicadas as redes *Neurofuzzy* podem sofrer um novo processo de treinamento para aprender novos dados. Essa é uma das grandes vantagens de se utilizar técnicas de inteligência computacional.

Executado o treinamento e validação dos comitês de especialistas e, conseqüentemente, obtidos os arquivos que representam as redes *Neurofuzzy* treinadas (como evidência a Figura 3.13) foi implementado um sistema computacional utilizando o Visual C++ 6.0. O sistema desenvolvido, o DIPRA, permitiu a execução das redes *Neurofuzzy* através dos arquivos salvos.

### 3.9 - Conclusão

Esse capítulo apresentou uma metodologia para o diagnóstico de falhas em pára-raios. A metodologia é baseada em 3 diagnósticos parciais: Termografia, Corrente de Fuga e Radiointerferência e um diagnóstico conclusivo.

Foi descrita a unidade básica para a geração do diagnóstico, o *Neo-Fuzzy-Neuron* (NFN) e como o mesmo foi treinado. A metodologia proposta nessa dissertação baseia-se na geração de conjuntos de redes *Neurofuzzy* para cada uma das técnicas, visando o diagnóstico da condição operativa dos pára-raios em: Normal, Suspeito e Defeito.

Foi descrito o pré-processamento dos dados pertinentes para o diagnóstico como a filtragem da corrente de fuga e a codificação das variáveis utilizadas para o diagnóstico.

Cada uma das técnicas de diagnóstico utilizadas nessa dissertação foi descrita por meio de um modelo indicando suas entradas e o número de redes que compõem tal diagnóstico.

O sistema foi validado utilizando-se dados reais, presentes num banco de dados, e apresentou índice de acerto aproximadamente de 90% para um banco de dados com inúmeros cenários de falhas distintos de pára-raios das mais diferentes categorias.

# Capítulo 4 – Sistema de Integração e Gerenciamento Avançado de Pára-Raios

---

## 4.1 - Introdução

O presente capítulo descreve o SIGAP, o Sistema de Integração e Gerenciamento Avançado de Pára-raios. O SIGAP é um sistema computacional que implementa um ambiente de trabalho completamente integrado, permitindo que as informações pertinentes de medições de pára-raios tornem-se disponíveis aos seus usuários de forma transparente.

No decorrer do capítulo apresenta-se a modelagem UML (Unified Modeling Language) do SIGAP, ressaltando suas funcionalidades e seus impactos para os usuários.

Concebe-se o sistema utilizando uma arquitetura de software de 2 camadas. Essa arquitetura é detalhada juntamente com suas vantagens e desvantagens.

O novo paradigma de gerenciamento e processamento de informações de pára-raios implementados pelo SIGAP tem sido utilizado pelo CEPEL como ferramenta para gerenciamento de medição de pára-raios.

## 4.2 - Considerações Iniciais

Vivencia-se hoje a era da informação, na qual as empresas utilizam ferramentas digitais para monitorar e aperfeiçoar novos ou antigos processos, operar automaticamente seus sistemas de produção, visando a melhoria de qualidade de vida dos clientes, empresas e empregados [26].

Atualmente o sucesso das empresas relaciona-se diretamente com sua habilidade de inovar nas áreas de produtos, serviços e processos. Nesse contexto, a tecnologia de informação assume um papel crítico, permitindo às organizações modificarem-se rapidamente e levarem essas inovações ao mercado.

A necessidade de operar num ambiente dinâmico faz com que as empresas concentrem-se em adquirir excelência operacional, exigindo disponibilidade de sistemas de informações integrados a fim de obter eficiência e maior controle operacional sobre seus mais diversos processos.

Hoje em dia, as concessionárias de energia elétrica mais importantes do Brasil não dispõem de um sistema integrado que comporte os dados de medições dos pára-raios presentes em seus sistemas. As conseqüências desse fato são: a complicada manipulação de dados de pára-raios para controle operacional, alto custo devido à variedade de sistemas computacionais não integrados e a baixa confiabilidade dos dados devido à importação manual. Tais fatos evidenciam a ausência de integração entre a obtenção de variáveis dos pára-raios e seu armazenamento.

Diante da necessidade de um ambiente que permitisse a completa integração, tratamento, organização lógica e controle operacional de informações de pára-raios foi desenvolvido o SIGAP.

O SIGAP implementa um ambiente de trabalho completamente integrado, permitindo que as informações pertinentes de medições de pára-raios tornem-se disponíveis aos seus usuários de forma transparente. O sistema aumenta significativamente a produtividade, a confiabilidade, a qualidade e disponibilidade das informações de medições de pára-raios.

Utiliza-se no SIGAP uma arquitetura de 2 camadas. Tal arquitetura garante alta performance, flexibilidade [27] se comparado a arquiteturas com uma única camada [28]/[29].

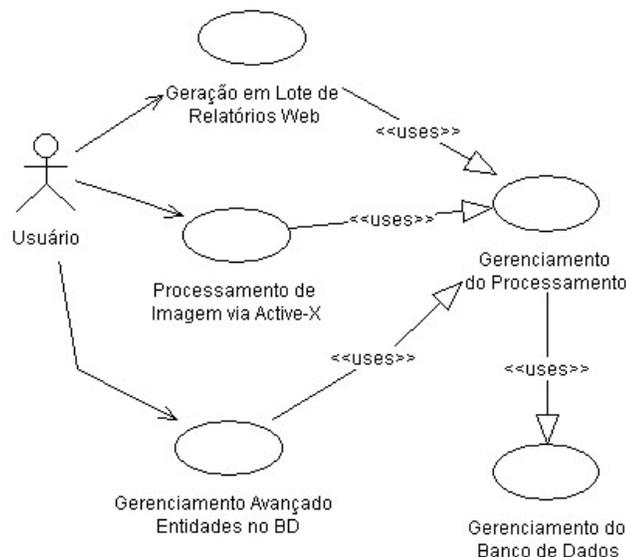
Com sua arquitetura o SIGAP permite que o sistema torne-se acessível de forma distribuída, fazendo com que computadores da mesma rede privada tenham acesso ao mesmo banco de dados.

### 4.3 – Modelagem UML do SIGAP

Neste tópico o sistema computacional SIGAP é descrito por meio de um dos diagramas da UML (Unified Modeling Language). UML é uma linguagem padrão para visualizar, especificar, construir e documentar sistemas intensamente baseados em software.

As funcionalidades do sistema citado serão descritas por meio de um diagrama UML denominado diagrama de caso de uso. Diagramas de caso de uso modelam as funcionalidades de um sistema computacional utilizando atores e casos de uso [30].

Casos de uso são serviços ou funções geradas pelo sistema para seus usuários. Um caso de uso descreve um objetivo que um ator executa no mesmo. Seguindo a representação descrita apresenta-se, na Figura 4.1, o diagrama de caso de uso do SIGAP.



**Figura 4.1 - Diagrama de caso de uso do SIGAP**

Analisando o diagrama de caso de uso da Figura 4.1 verifica-se que o usuário do SIGAP tem acesso direto às seguintes funcionalidades: Geração em Lotes de Relatórios WEB, Processamento de Imagens via Active-X e Gerenciamento Avançado de Entidades no Banco de Dados.

As funcionalidades não acessadas diretamente pelo usuário são: Gerenciamento do Processamento e do Banco de dados. Essas funcionalidades são referentes aos componentes da arquitetura de 2 camadas implementada, sendo descritos no tópico 4.4.

Descreve-se nos itens seguintes cada uma das funcionalidades acessadas diretamente pelo usuário.

### **4.3.1 - Geração em Lotes de Relatórios Web**

O caso de uso Geração em Lotes de Relatórios Web permite ao usuário gerar, dinamicamente, relatórios em formato HTML para as medições de um determinado conjunto de pára-raios.

Essa funcionalidade visou gerar um ganho de produtividade para o usuário do sistema. Antes do SIGAP, a tarefa de geração de relatórios era feita de forma completamente manual. Essa tarefa requiritava tempo e destreza por parte do profissional para não se equivocar durante a importação dos dados das medições para o relatório.

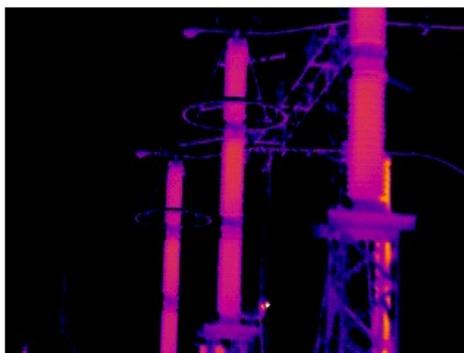
Com o uso do SIGAP a geração de relatórios tornou-se uma tarefa completamente automática, reduzindo o desgaste do usuário, poupando-lhe significativamente tempo e aumentando a confiabilidade das informações contidas nos mesmos.

Ressalta-se que os relatórios são construídos utilizando linguagem HTML, podendo os mesmos ser colocados disponíveis para acesso via Internet. Com a introdução da geração em lotes de pára-raios a tarefa de montar e disponibilizar um relatório tornou-se mais dinâmica e confiável. A título ilustrativo mostra-se na Figura 4.2 um exemplo de um relatório gerado pelo SIGAP.

# Relatório de Para-Raios

Gerado em :22/8/2004 às 9:19:18

Informações da Medição:	
Número sequencial da medição: 1	Fabricante do para-raios: ABB
Nome da Subestação: Água Fria	Identificação: PAR01
Nome da LT: BAR-LI-TSU-JP1	Tipo de Montagem: Aterramento com franklin
Tensão Fase/Terra da LT: 127.00	Fase: A



Termovisão	Corrente de Fuga
Emissividade: 0.00	Valor de Crista (uA): 0.00147
Distância (m): 0.00	Valor Eficaz (uA): 0.00136
Temperatura Ambiente (°C): 0.00	ICR / IEF: 2.03924
Umidade Relativa (%): 1.00	3° Harmônico : 2.03924
Temperatura Máxima (°C): 26.84	
Temperatura Mínima (°C): 23.84	
Diferença de Temperatura (°C): 3	
	RadioInterferência
	Nível de Sinal (dB): 2

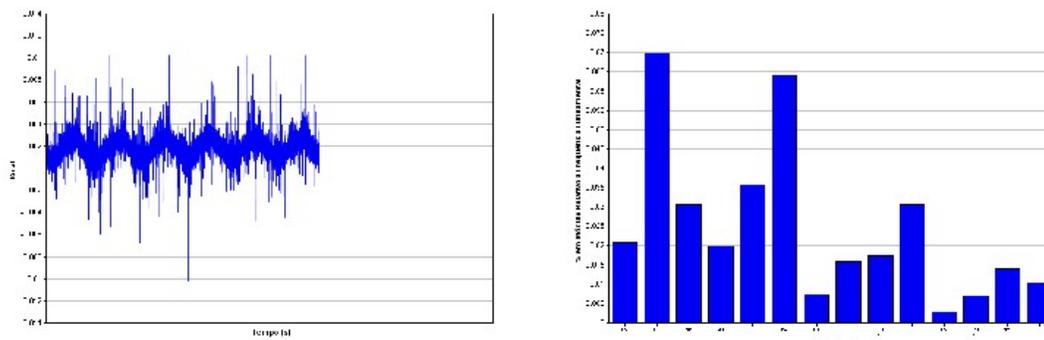


Figura 4.2 - Relatório gerado pelo SIGAP

O relatório evidencia diversas informações do para-raios além do termograma e suas informações, dados da radiointerferência além das informações de corrente de fuga como o sinal da corrente de fuga e os harmônicos presentes nesse sinal.

### 4.3.2 - Processamento Digital de Imagem via Active-X

As seguintes informações são coletadas diretamente com a utilização do termovisor e de outros equipamentos como os termohigrômetros e as trenas: termograma, umidade relativa

do ar (**H%**) e temperatura ambiente (**Tamb**) e emissividade (**e**).

Faz-se necessário um processamento da imagem para que possam ser obtidas as variáveis restantes desse grupo a saber: temperatura máxima (**Tmáx**), temperatura mínima (**Tmín**) e a diferença entre elas.

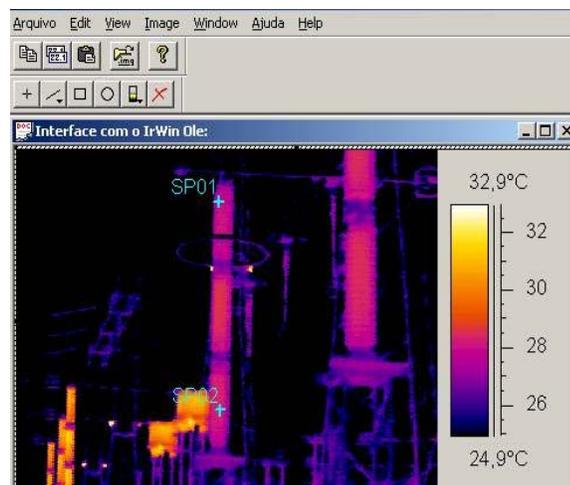
O SIGAP permite o processamento digital da imagem comunicando-se com um software proprietário do equipamento de termovisor. Através dessa comunicação o usuário acessa de forma transparente o software proprietário. O SIGAP se encarrega de obter os parâmetros de termografia processados pelo software.

O SIGAP utiliza a tecnologia Active-X [31] para efetuar a comunicação com o software proprietário, permitindo que a extração das informações de temperatura máxima e mínima e processe a diferença de temperatura.

A comunicação com o software via Active-X faz com que os mesmos controles disponíveis no software do termovisor estejam disponíveis para utilização no SIGAP.

Mantém-se o procedimento para tratamento do termograma no SIGAP, não alterando o modo de fazer a análise do mesmo. A alteração significativa implementada pelo SIGAP é a integração do software do termovisor com o sistema. O analista utiliza a ferramenta de processamento de imagem dentro do próprio SIGAP, não necessitando de importação de dados manuais e permitindo que esses dados sejam salvos automaticamente no banco de dados.

O SIGAP é capaz de comunicar-se ao componente Active-X\*, como mostra a Figura 4.3, permitindo o processamento digital de imagens termográficas do conjunto de pára-raios.



**Figura 4.3 - Módulo de interfaceamento com o sistema que processa digitalmente a imagem**

\* Active-X é uma tecnologia que padroniza a comunicação entre componentes de software, permitindo que outros sistemas acessem suas

### 4.3.3 - Gerenciamento Avançado de Entidades no BD

O SIGAP possui inúmeras interfaces para permitir ao usuário do sistema efetuar procura, visualização, edição, cadastro e exclusão de entidades no banco de dados. Cada uma dessas funcionalidades é descrita a seguir.

Disponibiliza-se a funcionalidade de busca e visualização de informações de medições e de pára-raios fazendo uso de interfaces compostas de filtros e tabelas de informações.

Por meio do filtro o usuário seleciona restrições para a busca no banco de dados e as informações são retornadas na tabela de informações. Mostra-se uma interface para busca de pára-raios na Figura 4.4.

Material	SubEstação	Fabricante	Cliente	Linha de Transmis...
ZnO sem Centelhador (Polimérico)	Cascadura	ABB	Cliente Y	CCD-GRA4
ZnO sem Centelhador (Polimérico)	Cascadura	ABB	Cliente Y	LTA-66-138
ZnO sem Centelhador (Polimérico)	Cascadura	ABB	Cliente Y	LTA-98-138
ZnO sem Centelhador (Polimérico)	Cascadura	ABB	Cliente Y	CCD-SJS2
ZnO sem Centelhador (Polimérico)	Cascadura	ABB	Cliente Y	LTA-81-138
ZnO sem Centelhador (Polimérico)	Cascadura	ABB	Cliente Y	CCD-GRA4

**Figura 4.4 - Módulo de busca e visualização de informações de pára-raios**

Analisando a Figura 4.4 percebe-se que o pára-raios pode ser filtrado informando-se o nome do seu fabricante e/ou seu tipo de aterramento e/ou o material e/ou a linha de transmissão que o mesmo se encontra e/ou a subestação ou pelo nome do cliente.

Selecionado um pára-raios pode-se cadastrar uma medição para o mesmo. A interface mostrada na Figura 4.5 evidencia a entrada de dados.

Dados do Pára-Raios

Fabricante:  Nome da Sub-Estacao:  Nome da LT:

Identificação:  Tipo de Aterramento:  Fase:

Tensao Fase Terra da LT:  Sequencia:

---

Termovisão

Emissividade:  Umidade Relativa:  Diferença Temperatura:

Distância:  Temperatura Máxima:  Data Medição:

Temperatura Ambiente:  Temperatura Mínima:

Arquivo Termovisão (IMG):

Escolhendo a opção de Processar Imagem salvar arquivo do tipo Matlab File em c:\Ole.mat

---

Radio Interferência:

Observações:

---

Corrente de Fuga:

Arquivo Osciloscópio (CSV):

I<sub>Crista</sub>:  I<sub>eficaz</sub>:  I<sub>ck/Ief</sub>:  3<sub>Harmonico</sub>:

**Figura 4.5 - Módulo de cadastro de medições de pára-raios**

Através do módulo de cadastro de medições é possível inserir informações relativas às técnicas de termografia, radiointerferência e corrente de fuga comentadas com maiores detalhes no Capítulo 2.

Ressalta-se que o módulo de termografia permite o processamento digital de imagens via Active-X e o módulo de corrente de fuga o processamento digital da corrente de fuga amostrada durante o processo de medição.

Além do cadastro de pára-raios e medições, o usuário é capaz de cadastrar novos clientes, fabricantes, materiais, tipo de montagem, linhas de transmissão e subestações. A título de exemplificação mostra-se a tela de cadastro de clientes do SIGAP na Figura 4.6.

**Cadastro de Clientes :**

Cadastro de Cliente :

Nome do Cliente :  Código do Cliente :

Endereço :

Bairro :

Estado :

Responsável :

Telefone :

Email :

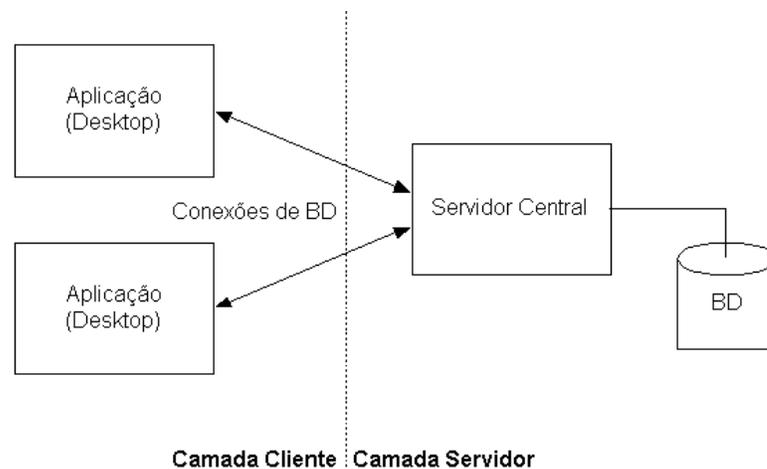
**Figura 4.6 - Módulo de cadastro de clientes**

O usuário pode ainda editar, criar e apagar um determinado pára-raios ou medições de um pára-raios utilizando as interfaces disponíveis no SIGAP.

Tais funcionalidades garantem ao usuário um completo e transparente controle sobre as informações de medições de pára-raios e caracterizam o SIGAP como um sistema de informação de pára-raios.

#### 4.4 - Arquitetura lógica do SIGAP

O sistema computacional SIGAP é desenvolvido utilizando a arquitetura de 2 camadas, cliente/servidor como mostra Figura 4.7



**Figura 4.7 - Arquitetura Lógica do SIGAP**

A arquitetura de software cliente/servidor é uma infra-estrutura versátil e modular desenvolvida para melhorar a usabilidade, flexibilidade, interoperabilidade e escalabilidade se comparado com arquiteturas de 1 única camada. Outra grande vantagem é deixar o acesso ao banco de dados distribuído e transparente para o usuário.

A melhora de escalabilidade se refere ao fato de poder acomodar até 100 usuários no sistema ao invés de uma dúzia de usuários como nas arquiteturas de 1 camada. Essa melhoria possibilita a distribuição e configuração da execução da aplicação para satisfazer vários volumes de transação de cada usuário.

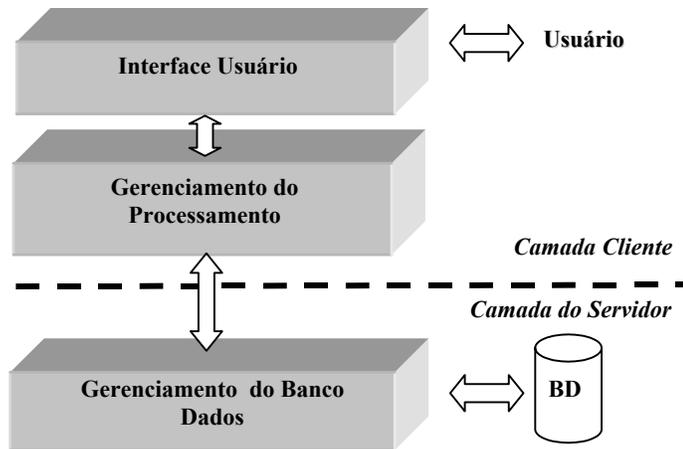
O ganho de flexibilidade é obtido do compartilhamento de informação num ambiente homogêneo, possibilitando satisfazer rapidamente novos requisitos para uma funcionalidade.

A arquitetura de 2 camadas melhora a usabilidade disponibilizando uma interface amigável, permitindo ao usuário a busca facilitada, visualização de informações no banco de dados.

A arquitetura desenvolvida ainda permite o desacoplamento dos problemas de exibição e processamento do problema de acesso aos dados.

Arquiteturas de 2 camadas possui: a camada cliente (entidade que faz pedido de serviços) e camada do servidor (que fornece os serviços). Em geral essa arquitetura é

composta de três componentes: Interface com o Usuário, Gerenciamento do Processamento e Gerenciamento do Banco de Dados. Apresenta-se a seguir uma breve descrição de cada camada e o funcionamento de seus componentes no SIGAP. Essa topologia é apresentada na Figura 4.8.



**Figura 4.8 - Arquitetura de 3 componentes do SIGAP e sua distribuição nas 2 camadas**

#### 4.4.1 - Camada do Cliente

A camada do cliente consiste de 2 componentes: Interface com o Usuário e o Gerenciamento do Processamento.

O componente de Interface com o usuário é responsável pela entrada e saída de dados para os usuários e outros sistemas. A sua função primordial é apresentar dados, fazer validações básicas e repassar informações para o componente de Gerenciamento do Processamento.

O componente de interface do SIGAP é composto de inúmeras telas que permitem que o usuário efetue operações de busca, criação, exclusão e edição de registros existentes no banco de dados. Além das telas citadas esse componente disponibiliza uma tela para configuração do acesso ao banco de dados. Essa tela permite ao usuário informar a senha e o nome do servidor de banco de dados.

O componente de Gerenciamento do Processamento, é responsável pelo acoplamento entre a camada do cliente e a camada do servidor. Ela recebe pedidos de alteração, criação ou exclusão do componente de Interface e de outros sistemas (p.e. Active-X), e é capaz de construir uma pesquisa no banco de dados.

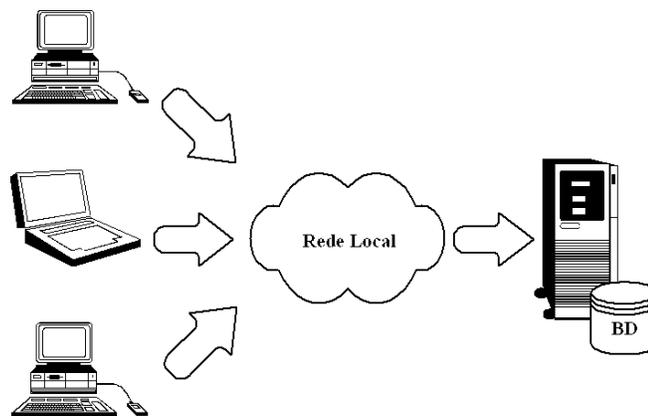
Essa manipulação é toda realizada por meio de objetos escritos em C++. O componente de Gerenciamento do Processamento é completamente orientado a objetos.

#### 4.4.2 - Camada do Servidor

O terceiro componente, denominado Gerenciamento do Banco de Dados, é responsável pelo acesso e execução de pesquisas e busca de informações no banco de dados. Esse módulo é capaz de gravar no banco todas as alterações de estado ocorridas nos componentes de processamento e buscar o resultado de pesquisas no banco de dados.

Uma vez que se utiliza uma arquitetura de 2 camadas é possível implementar o acesso distribuído ao banco de dados. Nesse acesso cada cliente deverá informar uma senha e o nome do servidor de banco de dados que deseja acessar.

Essa arquitetura permite que os usuários acessem transparentemente um único banco de dados, como mostra a Figura 4.9. Utilizou-se o MySQL 4.0.9 como servidor de banco de dados do SIGAP.



**Figura 4.9 - Acesso transparente ao banco de dados via rede local**

#### 4.5 – Conclusão

O SIGAP é caracterizado como um sistema de informação computacional que permite a integração, gerenciamento e processamento de 3 grupos de variáveis de pára-raios: termografia, Corrente de Fuga, Radiointerferência e de Identificação.

O sistema computacional desenvolvido permite, com seus módulos de integração, que a informação coletada do pára-raios torne-se disponível ao usuário do software de forma transparente. O mesmo é caracterizado com um sistema de informações de pára-raios, que implementa um ambiente integrado utilizando um banco de dados único.

O SIGAP provê o completo gerenciamento de dados de medições de pára-raios, sendo capaz de gerar relatórios, em formato digital. Essa funcionalidade foi projetada para reduzir o tempo requerido para geração de relatórios, implementando uma organização lógica das informações referentes a medições de pára-raios.

Utilizou-se a arquitetura de 2 camadas para desenvolvimento do SIGAP. Essa arquitetura permite toda a integração descrita com gravação num único banco de dados.

A implantação do SIGAP vem trazendo ganhos de produtividade, confiabilidade, qualidade e disponibilidade das informações de medições de pára-raios com alta performance, flexibilidade, reusabilidade e escalabilidade para seu usuário.

O SIGAP abre uma nova frente para execução do diagnóstico de pára-raios, uma vez que se integra, computacionalmente, todas as informações pertinentes de pára-raios.

O novo paradigma para acesso, gerenciamento e processamento de informações de pára-raios implementados pelo SIGAP se traduz na melhora de qualidade e disponibilidade das informações pertinentes aos pára-raios e na redução custos, ao passo que se evita a compra de licenças de softwares proprietários.

## Capítulo 5 – Conclusões

---

### 5.1 – Conclusões

Nessa dissertação, foram feitas contribuições, mencionadas a seguir.

No campo do Gerenciamento de Eventos Anômalos (GEA), foi proposta uma metodologia para diagnóstico de falhas em pára-raios. Tal metodologia baseou-se no histórico das medições efetuadas em pára-raios. O problema de diagnóstico de falhas em pára-raios foi tratado como um problema de classificação de padrões.

A metodologia proposta foi baseada numa topologia de comitês de especialistas composta das 3 principais técnicas para diagnóstico da condição operativa de pára-raios, a saber: a técnica de termografia, a de corrente de fuga total e a de radiointerferência.

Cada uma das técnicas compôs um diagnóstico parcial, sendo que o diagnóstico final foi gerado a partir da pior condição verificada pelos diagnósticos parciais.

A metodologia proposta foi validada por meio de um banco de dados fornecido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL) obtendo um índice de acerto médio de aproximadamente 90%.

No campo da tecnologia da informação, juntamente com campo de diagnóstico de falhas, foi desenvolvido um sistema computacional, denominado **DIPRA – Diagnóstico Inteligente de Pára-Raios**. Esse sistema computacional foi implementado baseando-se na metodologia de diagnóstico de falhas em pára-raios proposta nessa dissertação. O DIPRA é uma ferramenta de apoio a tomada de decisão para diagnóstico de falhas em pára-raios. Esse sistema é atualmente utilizado pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL) como sistema auxiliar de geração de diagnósticos de pára-raios.

Novamente, no campo da tecnologia da informação, foi desenvolvido um sistema computacional denominado **SIGAP – Sistema Inteligente de Gerenciamento Avançado de Pára-Raios**. O **SIGAP** é um sistema computacional que permite a integração dos dados de medições e das informações de pára-raios. Tal integração permite ao usuário do sistema, trabalhar num ambiente completamente integrado. O sistema aumentou a produtividade do usuário, a confiabilidade, qualidade e disponibilidade das informações de medições de pára-raios com alta performance, flexibilidade e escalabilidade. Contribuiu-se portanto com a implementação de um sistema de informação de pára-raios.

O **SIGAP** foi concebido utilizando uma arquitetura de software de 2 camadas, permitindo acesso distribuído às informações de pára-raios.

O novo paradigma para acesso, gerenciamento e processamento de informações de pára-raios implementados pelo **SIGAP** se traduz na melhora de qualidade e disponibilidade das informações pertinentes aos pára-raios e na redução custos, ao passo que se evita a compra de licenças de softwares proprietários.

## 5.2 – Propostas de Continuidade

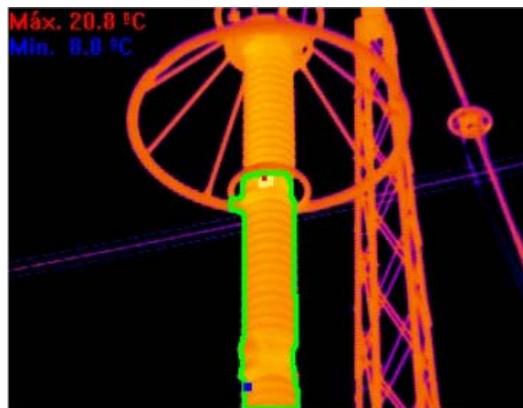
A seguir são sugeridos temas adicionais de pesquisa, com o objetivo de dar continuidade ao trabalho desenvolvido. O estudo e o acréscimo de novas funcionalidades ao problema poderão torná-lo mais completo e agregam mais valor a solução implementada, uma vez que novas facilidades tornam a tarefa de diagnóstico mais automática, eliminando a possibilidade de erro humano e agilizando a tarefa de obtenção do diagnóstico.

### 5.2.1 - Processamento Digital de Termogramas

Conforme evidenciado o SIGAP permite o acesso via active-x a um software proprietário responsável por efetuar a análise da fotografia térmica do pára-raios.

A utilização desse sistema além de trazer aumento de encargos ao usuário, uma vez que o mesmo deverá possuir uma licença e o usuário deverá fazer um treinamento específico para utilizá-lo. Além de impactar no custo, o tempo e o trabalho necessários para efetuar as operações requeridas, visando obter as variáveis do termograma é relativamente alto.

A idéia é de agilizar e, ao mesmo tempo, retirar os encargos provenientes com um procedimento automático de processamento digital de imagens termográficas. Nesse processamento o pára-raios deve ser extraído da fotografia de termografia por meio de técnicas de segmentação e devem ser obtidas as temperaturas mínimas e máximas no corpo do pára-raios. Todo esse procedimento deve ser executado de forma automática podendo o usuário interferir em casos específicos. A Figura 5.1 mostra um processamento digital de uma imagem termográfica com intuito de ilustrar essa proposta de continuidade.



**Figura 5.1 – Processamento Digital Automático da imagem termográfica. Em verde o resultado da segmentação da imagem, em azul tem-se o ponto frio (temperatura mínima no corpo do pára-raios) em vermelho tem-se o ponto quente (temperatura máxima no corpo do pára-raios)**

### **5.2.2 – Análise Quantitativa de Evolução do Ponto Quente no Pára-raios**

A idéia desse tópico é utilizar técnicas de processamento de imagens para delimitar a área do ponto quente do pára-raios, como aquela mostrada em amarelo na Figura 5.1.

De posse de um histórico de medições de um determinado pára-raios a idéia é tentar avaliar quantitativamente diferenças no ponto quente do pára-raios.

Dessa forma é possível identificar um avanço de uma possível falha no pára-raios antes do mesmo apresentá-la de forma pronunciada.

## Referências Bibliográficas

---

1. Scientific American Brasil  
<  
[www2.uol.com.br/sciam/conteudo/materia/materia\\_39.html](http://www2.uol.com.br/sciam/conteudo/materia/materia_39.html) >  
Acesso em 20 ago. 2004.
2. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
< <http://www.inpe.br>>  
Acesso em 20 ago. 2004.
3. Venkatasubramanian, V., Rengaswamy R., Yin K. A review of fault detection and diagnosis. *Computer and Chemical Engineering* (27) (2003) 293-311.
4. Bailey, S. J., From desktop to plant floor, a CRT is the control operators window on the process. *Control Engineering* 31 (6), 86-90, (1984).
5. Kavuri, S., Venkatasubramanian P., Combining pattern classification and assumption-based techniques for process fault diagnosis. *Computers and Chemical Engineering* 16 (4), 299-312, (1992).
6. Brittes J. L. P., Ribeiro J. E., Avaliação do estado e do comportamento de pára-raios de média e alta tensão, dos tipos de carboneto de silício (SiC) e de óxido metálico de zinco (ZnO), XVII SNPTEE, Minas Gerais: 2003.
7. Calazans A., Ximenes R., Rezende Z., Equipamentos elétricos e materiais de subestação Diagnóstico de pára-raios de óxido de zinco através de técnicas preditivas. XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém (1997).
8. Academia de Treinamento em Infravermelho  
<<http://www.infraredtraining.net/thermographer.htm>>  
Acesso em 20 set. 2004.
9. Grupo de Sistemas de Imagens  
<<http://www.istimaging.com/Links.html>>  
Acesso em 20 set. 2004.
10. Nyholt J. J., “Infrared Thermography in BP Almoco – Petrochemical Applications”, NDE Corporate (2-5), 2001.
11. LeClercq, C. J., “The art of Furnace Tube Skin Temperature Analysis”, Inframation – Infrared Camera Application, 2003.

12. Barreto J. T., Carvalho S. G., Oliveira J. M., Torres, R. J. M. Diagnóstico de campo da condição operativa de pára-raios de óxido de zinco em subestações de 138Kv, XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém (1997).
13. Emmanouilidis C., MacIntyre J., Cox C. Neurofuzzy Computing Aided Machine Fault Diagnosis: University of Sunderland (168-182), 1999.
14. Lorenz A., Blüm M., Ermert H., Senge T. Comparison of Different *Neurofuzzy* Classification Systems for the Detection of Prostate Cancer in Ultrasonic Images, Dept. of Electrical Engineering, Ruhr University of Bochum, Germany.
15. Nauck D., Neuro Fuzzy System: A Review and Prospects, Technical University of Braunschweig, Alemanha (1997).
16. Breiman, L. Heuristics of instability in model selection. Technical Report TR416, Statistics Department, University of California at Berkeley, California, 1994.
17. L. Breiman. Bagging predictors. *Machine Learning*, 24:123-140, 1996.
18. Zhou Z., Jianxin W. W., Tang Z. C. Selectively Ensembling Neural Classifiers In: Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, Honolulu, HI, 2002, vol.2, pp.1411-1415.
19. Bewley L. V., Traveling Waves on Transmission Systems, AIEE Transaction, 1933.
20. Peterson H. A., Protection Tubes for Power Systems. AIEE Transaction, Vol.59, 1940.
21. Duhamel, P. and M. Vetterli, Fast Fourier Transforms: A Tutorial Review and a State of the Art, *Signal Processing*, Vol. 19, Abril 1990, pp. 259-299.
22. Oppenheim, A. V. and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, 1989, p. 619.
23. Sollich P., Krogh A., Learning with ensembles: how over-fitting can be useful, In D. S. Touretzky, M. C. Mozer, and M. E. Hasselmo eds., *Advances in Neural Information Processing Systems 8*, Denver, CO, MIT Press, Cambridge, MA, pp.190-196, 1996.
24. Yamakawa T., Uchimo E., Miki T. e Kusanagi T. A neo fuzzy neuron and its applications to system identification and prediction to system behavior. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IIZUKA, páginas 477-483, Japan, 1992.
25. Caminhas W. M., Gomide F. A. C. e Tavares H. M. F. Detecção de Falhas em sistemas Dinâmicos: Abordagem baseada em redes NeuroFuzzy com aprendizado on-line. V Congresso Brasileiro de Redes Neurais, páginas 613-618 Rio de Janeiro 2001. Anais do V Congresso Brasileiro de Redes Neurais.
26. Lira, W. S., Impactos da Tecnologia de Informação nas Organizações, Núcleo de Estudos em Gestão da Informação, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2000.

27. *IEEE Standard Computer Dictionar, IEEE: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries.* New York, NY: 1990.
28. Newell, D., Jones, O., & Machura, M. Interoperable Object Models for Large Scale Distributed Systems, 30-31. Proceedings. International Seminar on Client/Server Computing. La Hulpe, Bélgica, 1995. Londres, Inglaterra: IEE, 1995.
29. Edelstein, H., "Unraveling Client/Server Architecture." *DBMS 7*, Maio, 1994.
30. Quatrani, T., *Visual Modeling with Rational Rose and UML*, Editora Addison Wesley, Massachusetts, 1998.
31. Chappell, David. *Understanding ActiveX and OLE.* Redmond, WA: Microsoft Press, 1996.