

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## Tese de Doutorado

# Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total

George Rossany Soares de Lira

Campina Grande - Paraíba - Brasil

© George R. S. Lira, Julho de 2012.

George Rossany Soares de Lira

## Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total

*Tese de doutorado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Edson Guedes da Costa, D.Sc.

Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Julho de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L768m Lira, George Rossany Soares de  
Monitoramento de para-raios de óxido de zinco com base na medição da corrente de fuga total / George Rossany Soares de Lira. - Campina Grande, 2012.

108f. : il., color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Orientador: Prof. D.Sc. Edson Guedes da Costa.

Referências.

1. Monitoramento de Para-Raios. 2. Diagnóstico. 3. Corrente de Fuga Total 4. Para-raios de Óxido de Zinco. 5. Identificação Paramétrica. 6. Redes Neurais Artificiais. I. Título.

CDU 621.316.938-047.36 (043)

**MONITORAMENTO DE PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO COM BASE NA  
MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA TOTAL**

**GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA**

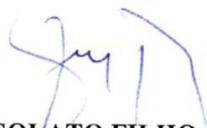
Tese Aprovada em 06.07.2012



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Orientador



**IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES, Ph.D., UFMG**  
Componente da Banca



**JOSÉ PISSOLATO FILHO, Dr., UNICAMP**  
Componente da Banca



**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca



**DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR**  
Componente da Banca

**CAMPINA GRANDE – PB**  
**JULHO - 2012**

À minha família.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as graças alcançadas. Sem Ele não teria conseguido iniciar este trabalho, muito menos finalizá-lo.

Agradeço aos meus pais Raimundo e Fátima, pelo amor, compreensão, educação e dedicação na formação do meu caráter.

À minha esposa Cristiane e às minhas filhas Clarice e Letícia, pelo amor, incentivo, paciência e por todos os momentos felizes compartilhados.

Aos meus irmãos Jorge, Giuseppe e Gislando por serem grandes amigos, companheiros e conselheiros.

As minhas tias Socorro, Francisca e Marta por terem ajudado, sempre com amor e carinho, na minha criação e no meu desenvolvimento pessoal. E a todos os meus parentes que de uma forma ou de outra contribuíram para minha formação pessoal.

Ao professor Edson Guedes pela amizade, confiança, orientação e incentivo.

Aos professores Damásio Fernandes e Benemar Alencar por todas contribuições dadas à minha formação e pela confiança, em mim, depositada.

Aos professores Ivan Lopes e José Pissolato por suas sugestões e contribuições para melhoria deste trabalho.

Aos amigos Euler, Flávio, Karcus, Kleber, Marcos, Max, Robson e Tarso pelo companheirismo, amizade e contribuições na minha vida acadêmica e profissional.

Aos meus alunos de graduação Valdemir, Luiz e Ademir pela ajuda fornecida na realização dos experimentos.

Ao professor Genoilton Carvalho pela amizade e por sempre disponibilizar a infraestrutura do Laboratório de Alta Tensão (LAT) em favor da realização deste trabalho.

A Chesf, na pessoa do Eng. Marcelo Maia, por disponibilizar equipamentos e a estrutura da empresa para realização da pesquisa.

Ao CNPq pelo suporte financeiro concedido no início desta pesquisa.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

*George Rossany Soares de Lira*

"Chegar ao destino exige determinação,  
firmeza, sobriedade e fé."

*Clemente*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>Resumo</b>	<b>xvii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos e Contribuições . . . . .	3
1.3 Organização do Trabalho . . . . .	4
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	<b>6</b>
2.1 Para-raios de Óxido de Zinco . . . . .	6
2.1.1 Aspectos Construtivos . . . . .	7
2.1.2 Varistores de ZnO . . . . .	8
2.2 Características Elétricas . . . . .	8
2.3 Corrente de Fuga . . . . .	11
2.4 Características Térmicas . . . . .	12
2.5 Resumo . . . . .	14
<b>3 Revisão Bibliográfica</b>	<b>15</b>
3.1 Falhas em Para-raios . . . . .	15
3.2 Monitoramento de Para-raios . . . . .	23

---

3.2.1	Medição da Tensão de Referência . . . . .	23
3.2.2	Medição da Curva $V \times I$ . . . . .	24
3.2.3	Medição da Temperatura Externa . . . . .	24
3.2.4	Medição de Descargas Parciais . . . . .	26
3.2.5	Medição da Corrente de Fuga . . . . .	27
3.2.5.1	Técnicas Baseadas na Medição da Corrente de Fuga . . . . .	28
3.2.5.2	Discussões Gerais dos Métodos . . . . .	33
3.3	Resumo . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Ensaio e Medições</b>	<b>39</b>
4.1	Para-raios de ZnO Avaliados . . . . .	39
4.2	Abertura dos Para-raios . . . . .	41
4.3	Ensaio de Caracterização . . . . .	43
4.4	Fechamento dos Para-raios . . . . .	47
4.5	Ensaio de Aplicação da MCOV . . . . .	48
4.6	Inserção de Defeitos nos Para-raios . . . . .	50
4.7	Resumo . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Metodologia Proposta</b>	<b>63</b>
5.1	Visão Geral . . . . .	63
5.2	Extração de Características . . . . .	65
5.2.1	Identificação Paramétrica . . . . .	66
5.2.1.1	Método de Levenberg-Marquardt . . . . .	68
5.3	Construção da Base de Dados . . . . .	71
5.4	Classificador de Estados de Operação . . . . .	74
5.4.1	Rede SOM . . . . .	75
5.4.1.1	Treinamento da Rede SOM . . . . .	77
5.4.1.2	Classificação e Diagnóstico via Rede SOM . . . . .	79
5.5	Resumo . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Resultados e Análises</b>	<b>81</b>
6.1	Extração de Características . . . . .	81

---

6.2	Treinamento do Classificador . . . . .	85
6.3	Recomendações Práticas de Utilização . . . . .	94
6.4	Resumo . . . . .	96
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>97</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>101</b>

# Lista de Figuras

2.1	Estrutura de um para-raios de ZnO com invólucro de porcelana (HINRICHSEN, 2001). . . . .	7
2.2	Curva característica de um para-raios a ZnO de 475 kV (HINRICHSEN, 2001).	9
2.3	Forma de onda típica da corrente de fuga (HINRICHSEN, 2001). . . . .	10
2.4	Modelo de para-raios para baixas correntes. . . . .	12
2.5	Circuito utilizado na compensação diferencial capacitiva. . . . .	12
2.6	Curva de estabilidade térmica típica de um para-raios (HINRICHSEN, 2001).	13
3.1	Correntes de fuga externa ( $i_e$ ) e interna ( $i_i$ ) em um para-raios: (a) limpo e (b) poluído (FESER <i>et al.</i> , 1991). . . . .	17
3.2	Fotografia de descargas entre a coluna de varistores e a porcelana (CHRZAN, 2004). . . . .	20
3.3	Fotografia de varistores degradados devido à ação de descargas parciais (CHRZAN, 2004). . . . .	20
3.4	Fotografia de para-raios após a explosão do invólucro (LARSEN; LIEN, 2007).	21
3.5	Número de falhas de para-raios por ano (ROSSMAN <i>et al.</i> , 2010). . . . .	22
3.6	Termografia de para-raios em bom estado. . . . .	25
3.7	Termografia de para-raios defeituoso. . . . .	25
3.8	Termografia de para-raios com perda de estanqueidade. . . . .	26
3.9	Ilustração do método proposto por Hinrichsen (1997). . . . .	30
3.10	Relação entre a corrente resistiva e a diferença de fases (KARAWITA; RAGHUVVEER, 2006). . . . .	33
3.11	Amplitude da relação de tensão do TPC de 230 kV medida em laboratório (FERNANDES Jr., 2003). . . . .	35

---

3.12 Fase da relação de tensão do TPC de 230 kV medida em laboratório (FERNANDES Jr., 2003). . . . .	35
3.13 Curvas da corrente resistiva e da tensão aplicada em um para-raios (ZHAO <i>et al.</i> , 2005). . . . .	36
3.14 Histerese entre a corrente resistiva e a tensão aplicada em um para-raios (ZHAO <i>et al.</i> , 2005). . . . .	36
4.1 Fotografias de amostras dos para-raios avaliados. . . . .	40
4.2 Fotografias de alguns para-raios avaliados com: (a) Porcelana quebrada e suja; (b) Porcelana perfurada; e (c) Flange solta. . . . .	41
4.3 Fotografia do sistema de fixação da porcelana à flange. . . . .	42
4.4 Fotografias de varistores com colar isolante: (a) Carbonizado; e (b) Degradado por reações químicas. . . . .	43
4.5 Fotografias de varistores: (a) Oxidado; e (b) Lixado e limpo. . . . .	43
4.6 Fotografias: (a) Arranjo experimental; e (b) Mesa de controle e sistema de aquisição de dados. . . . .	44
4.7 Esquema do arranjo experimental utilizado no ensaio de caracterização. . .	45
4.8 Comparação das características de varistores de um para-raios do tipo A. .	46
4.9 Comparação das características de um varistor após secagem. . . . .	46
4.10 Coluna de blocos varistores de ZnO. . . . .	47
4.11 Fotografias: (a) Para-raios com flanges fixadas; (b) Colocação do aglomerante; e(c) Fundição do aglomerante. . . . .	48
4.12 Diagrama do arranjo experimental utilizado na medição da corrente de fuga.	49
4.13 Gráficos da tensão aplicada e da corrente de fuga total no para-raios. . . .	50
4.14 Curvas típicas de um para-raios do tipo A com perda de estanqueidade/bom estado: (a) Curvas $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total. . . . .	53
4.15 Fotografias: (a) Borrifando poluição no invólucro; e (b) Estado do invólucro após secagem da poluição. . . . .	54
4.16 Curvas típicas de um para-raios do tipo A com poluição superficial: (a) Curvas $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total. . . . .	55

---

4.17	Fotografia de uma coluna de varistores desalinhada. . . . .	56
4.18	Curvas típicas de um para-raios do tipo A com desalinhamento da coluna ativa: (a) Curvas $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total. . . . .	56
4.19	Fotografia de uma coluna de varistores com pastilhas curto-circuitadas. . .	57
4.20	Curvas típicas de um para-raios do tipo A com distribuição irregular de tensão: (a) Curvas $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total. . . . .	58
4.21	Fotografia de um varistor degradado. . . . .	59
4.22	Curvas típicas de um para-raios do tipo A com varistores degradados: (a) Curvas $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total. . . . .	60
4.23	Fotografia mostrando o processo de umidificação de um para-raios. . . . .	61
4.24	Curvas típicas de um para-raios do tipo A com varistores umedecidos: (a) Curvas $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total. . . . .	61
5.1	Fluxograma geral da metodologia proposta. . . . .	65
5.2	Exemplo de uma rede SOM bidimensional. . . . .	76
6.1	Comparação dos sinais de corrente medidos e estimados para um para-raios com umidade interna. . . . .	83
6.2	Comparação dos sinais de corrente medidos e estimados para um para-raios com varistores degradados. . . . .	84
6.3	Evolução dos parâmetros de avaliação do classificador para a Base A1. . . .	87
6.4	Evolução dos parâmetros de avaliação do classificador para a Base A2. . . .	88
6.5	Evolução dos parâmetros de avaliação do classificador para a Base B1. . . .	88
6.6	Evolução dos parâmetros de avaliação do classificador para a Base B2. . . .	89
6.7	Classificador treinado para a Base A1. . . . .	92
6.8	Classificador treinado para a Base A2. . . . .	92
6.9	Classificador treinado para a Base B1. . . . .	93
6.10	Classificador treinado para a Base B2. . . . .	93
6.11	Estado do mapa antes da detecção do defeito. . . . .	95
6.12	Estado do mapa após a detecção do defeito. . . . .	95

# Lista de Tabelas

3.1	Sinopse da revisão bibliográfica. . . . .	34
4.1	Dados técnicos dos conjuntos de varistores. . . . .	40
5.1	Codificação do estado de operação dos para-raios. . . . .	73
5.2	Formato geral das base de dados. . . . .	73
6.1	Estimativas iniciais das componentes harmônicas da corrente. . . . .	83
6.2	Componentes harmônicas estimadas da corrente de fuga de um para-raios com umidade interna. . . . .	84
6.3	Componentes harmônicas estimadas da corrente de fuga de um para-raios com varistor degradado. . . . .	84
6.4	Formato das base de dados utilizadas. . . . .	86

# Lista de Abreviaturas

- ANN - Artificial Neural Network (Rede Neural Artificial).
- BMU - Best Match Unit.
- CCR - Correct Classification Rate (Taxa de Classificação Correta).
- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- CFT - Corrente de Fuga Total.
- FFT - Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier).
- IEC - International Electrotechnical Commission.
- IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- LAT - Laboratório de Alta Tensão.
- MCOV - Maximum Continuous Operating Voltage (Máxima Tensão de Operação Contínua).
- MLM - Método de Otimização de Levenberg-Marquardt.
- MLP - Multilayer Perceptron (Perceptron de Múltiplas Camadas).
- MMQ - Método dos Mínimos Quadrados.
- POW - Point-on-Wave.
- RNA - Rede Neural Artificial.
- SiC - Carboneto de Silício.
- SOM - Self-Organizing Maps (Mapas Auto-Organizáveis).
- SSE - Sum of Squares Due to Error (Soma dos Erros Quadráticos).

- 
- SST - Total Sum of Squares (Soma Total dos Desvios com Relação à Média).
- TLC - Total Leakage Current (Corrente de Fuga Total).
- TPC - Transformador de Potencial Capacitivo.
- TVA - Tennessee Valley Authority.
- UFCG - Universidade Federal de Campina Grande.
- ZnO - Óxido de Zinco.

# Resumo

A maioria das técnicas de monitoramento de para-raios de óxido de zinco (ZnO) é baseada na decomposição da corrente de fuga total (CFT) em suas componentes capacitiva e resistiva. Entretanto, essas técnicas estão sujeitas a limitações financeiras, técnicas e práticas que podem inviabilizar sua aplicabilidade. Neste trabalho, uma nova técnica de monitoramento de para-raios é proposta. A técnica baseia-se na extração de características apenas dos sinais de CFT e na análise dessas características por um tipo especial de redes neurais artificiais (RNA) denominada mapas auto-organizáveis. Para a implementação e validação da técnica, realizou-se, em laboratório, ensaios de aplicação da Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV) em para-raios do tipo estação, com tensões nominais distintas, objetivando medir sinais de CFT. Nos ensaios, criou-se uma metodologia para geração artificial de estados de operação de para-raios, com objetivo de avaliar a capacidade da técnica em distinguir os estados a partir da análise apenas da CFT. Ao todo, foram criados seis estados distintos de operação, um deles correspondente ao para-raios em bom estado e os demais, a estados de mau funcionamento, onde os para-raios avaliados poderiam se encontrar com: poluição superficial, desalinhamento da coluna ativa, distribuição irregular de tensão, pastilhas degradadas e umidade interna. No processo de classificação dos estados de operação dos para-raios foram obtidas taxas de acerto maiores 98,5%, quando identificou-se apenas se o para-raios estava defeituoso ou não, e taxas maiores que 97,7% na identificação do tipo de defeito. Os resultados mostram que é possível realizar o monitoramento e diagnóstico de para-raios com base apenas na análise da CFT.

**Palavras-Chaves:** Monitoramento; Diagnóstico; Corrente de fuga total; Para-raios de óxido de zinco; Identificação paramétrica; Redes neurais artificiais.

# Abstract

The majority of the metal-oxide surge arrester (MOSA) monitoring techniques is based on total leakage current (TLC) decomposition on their capacitive and resistive components. However, these techniques are subject to some financial, technical and practical limitations, which can difficult their employment. In this work, a new monitoring technique for MOSA is proposed. The technique is based on the feature extraction of measured TLC signals and on the analysis of these characteristics by a special kind of artificial neural networks (ANN) called Self-Organizing Maps (SOM). On technique implementation and validation, it was carried out, in laboratory, Maximum Continuous Operating Voltage (MCOV) tests in station class surge arresters with different rated voltages, aiming to measure the TLC signals. On the lab tests, it was developed a methodology to create artificial MOSA operating conditions, with the purpose of to evaluate the technique capacity on distinguish the MOSA condition only from the TLC analysis. Altogether, they were created six different kind of MOSA operating conditions, one of them corresponding to good condition, and the others, corresponding to bad conditions, where, the evaluated MOSA could be with: superficial pollution, displacement along the active column, non-uniform voltage distribution, varistor degradation or internal humidity. On the MOSA operating condition classification process were obtained hit ratios greater than 98.5%, when the MOSA was classified as defective or non defective. Hit ratios greater than 97.7% were reached on the identification of the MOSA defect. The results show that it is possible to perform the MOSA monitoring and diagnosis from only the TLC.

**Keywords:** Monitoring; Diagnosis; Total Leakage Current; Metal Oxide Surge Arrester; Parameter Identification; Artificial Neural Networks.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Os para-raios à base de óxido de zinco (ZnO) são equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos contra sobretensões atmosféricas e de manobra. Dessa forma, eles contribuem decisivamente para o aumento da confiabilidade, economia e continuidade de operação dos sistemas os quais protegem. Devido à importância dos para-raios para os sistemas elétricos, faz-se necessário o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas e procedimentos para o correto monitoramento e diagnóstico do estado de operação dos para-raios instalados em campo, pois eventuais falhas nos para-raios podem conduzir a desligamentos não programados, danos a outros equipamentos de uma subestação e principalmente, podem implicar em risco de morte aos profissionais que trabalham em campo. Tudo isso traduz-se em prejuízos financeiros às concessionárias de energia elétrica, sejam através de multas por parte dos órgãos reguladores, processos judiciais ou danos à imagem das empresas.

A partir de meados do decênio de 1970, deu-se início a utilização, em campo, dos para-raios de ZnO sem centelhadores (SAKSHAUG, 1991). Desde então, vários métodos de monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de minimizar os problemas e transtornos causados pela falha de para-raios (CARLSON *et al.*, 1986; SHIRAKAWA *et al.*, 1988; LUNDQUIST *et al.*, 1990; COFEEN; MCBRIDE, 1991; SPELLMAN; HADDAD, 1997; KLEIN *et al.*, 1999; IEC, 2000; HEINRICH; HINRICHSEN, 2001; SOUZA, 2004; ZHAO *et al.*, 2005; LIRA, 2007; ALMEIDA *et al.*, 2009; WANDERLEY NETO *et al.*, 2009; LIRA *et al.*, 2010; LIRA *et al.*, 2011).

Normalmente, os métodos de monitoramento são agrupados de acordo com seu princípio de funcionamento. Assim, existem os métodos baseados em (IEC, 2000): desconectores, contadores de descargas, medição de temperatura e medição de corrente de fuga. Os primeiros são de baixa complexidade técnica e baixo custo de implementação, contudo possuem a grande desvantagem de serem baseados em processos eletro-mecânicos, os quais estão sujeitos a uma maior probabilidade de falhas. Os métodos mais eficientes e utilizados pelas empresas de energia elétrica são aqueles baseados nas medições de temperatura e de corrente de fuga, sendo muitas vezes empregados em conjunto.

Os métodos baseados na medição de temperatura externa no para-raios são bastante atraentes, pois não são invasivos, podem ser aplicados à distância, não demandam intervenções no sistema ou arranjos especiais de medição. Contudo, eles estão sujeitos a interpretações subjetivas dos resultados, uma vez que não se têm consolidado regras claras para identificação de defeitos em para-raios. Tais métodos estão sujeitos também a características específicas dos para-raios ou do ambiente de medição; e por fim, eles são métodos indiretos que não retornam diretamente uma grandeza elétrica, e sim, o efeito externo do aquecimento ocorrido no interior do para-raios devido à passagem da corrente de fuga.

Já os métodos de monitoramento baseados na medição da corrente de fuga total que percorre o para-raios durante sua operação em regime permanente são considerados métodos diretos, pois fornecem uma grandeza elétrica relacionada à operação do equipamento. Em geral, os métodos realizam a decomposição da corrente de fuga total em componentes resistiva e capacitiva, pois segundo vários estudos (SHIRAKAWA *et al.*, 1988; LUNDQUIST *et al.*, 1990; IEC, 2000; HEINRICH; HINRICHSEN, 2001; SOUZA, 2004; LIRA, 2007), contrariamente à corrente de fuga total, a componente resistiva e sua harmônica de 3<sup>a</sup> ordem apresentam variações significativas, tanto na forma, quanto na amplitude, proporcionais ao nível de degradação dos para-raios. Com isso, a maioria dos métodos de diagnóstico baseados na análise da corrente de fuga faz uso da componente resistiva e da sua harmônica de 3<sup>a</sup> ordem para fornecer o diagnóstico de para-raios.

Apesar de os métodos baseados na medição da corrente de fuga parecerem bastante apropriados para o monitoramento de para-raios, eles apresentam uma importante limi-

tação técnica e prática, que é a necessidade de se obter uma amostra da tensão aplicada no para-raios ou da fase desta tensão, para se realizar a decomposição da corrente. Obter uma referência de tensão em campo não é uma tarefa simples, pois existem dificuldades de acesso e conexão a dispositivos de medição de tensão (como os transformadores de potencial capacitivos - TPCs), tem-se a influência das fases vizinhas no sinal de tensão e tem-se um deslocamento da fase da tensão ao longo do para-raios devido à capacitâncias parasitas (IEC, 2000). Estas dificuldades de ordem prática muitas vezes inviabilizam o diagnóstico de para-raios em campo. Existem outros métodos (LUNDQUIST *et al.*, 1990; ABDUL-MALEK *et al.*, 2008) que afirmam superar as dificuldades citadas, contudo fazem uso de uma série de simplificações e aproximações que comprometem a exatidão dos resultados fornecidos.

Pelo exposto, torna-se evidente a necessidade de se desenvolver métodos de monitoramento e diagnóstico de para-raios que possam ser aplicados com maior facilidade e que ainda apresentem resultados confiáveis e precisos, os quais realmente auxiliem as equipes de manutenção das concessionárias de energia em suas atividades de manutenção preditiva e preventiva.

## 1.2 Objetivos e Contribuições

Neste trabalho, propõe-se desenvolver e validar uma técnica de monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO baseada na análise de características extraídas somente da corrente de fuga total que percorre os para-raios de ZnO. A técnica se contrapõe a trabalhos similares, encontrados na literatura, que argumentam a inviabilidade de utilizar a corrente de fuga total como grandeza para monitoramento de para-raios. São objetivos específicos da Tese:

- Mostrar a viabilidade de se realizar o monitoramento de para-raios de ZnO por meio da análise da corrente de fuga total;
- Simplificar o processo de monitoramento, uma vez que será necessário medir apenas uma grandeza elétrica: a corrente de fuga total.

Vislumbra-se as seguintes contribuições deste trabalho para o estado da arte:

- A utilização de uma técnica de identificação de componentes harmônicas (extração de características) de sinais medidos de corrente de fuga, capaz de superar limitações conhecidas da transformada de Fourier;
- A proposição de um modelo do sinal de corrente de fuga para região de baixas correntes. Este modelo é empregado pela técnica de identificação de componentes harmônicas do sinal de corrente. O princípio do modelo de corrente de fuga proposto poderá ser adaptado e utilizado inclusive para outros equipamentos, como os isoladores;
- O desenvolvimento de uma metodologia para simulação de estados de operação em para-raios de ZnO, a qual poderá ser aplicada em diversos trabalhos futuros, no desenvolvimento e teste de sistemas de classificação de estados de para-raios;
- A proposição e desenvolvimento de um sistema de classificação de estados de para-raios capaz de separar e agrupar (com elevadas taxas de acerto) os mais diversos estados de operação, analisando apenas poucas componentes harmônicas da corrente de fuga total. O sistema de classificação é flexível o suficiente para ser adaptado a situações distintas daquelas abordadas neste trabalho.

### 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos. No Capítulo 2, é realizada uma fundamentação teórica sobre para-raios de ZnO e suas principais características.

No Capítulo 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre monitoramento de para-raios, ressaltando o estado da arte. São discutidas em maior profundidade técnicas de monitoramento baseadas na análise da corrente de fuga.

No Capítulo 4, são apresentados os procedimentos experimentais e ensaios de aplicação de tensão de operação realizados em para-raios de ZnO. A partir destes ensaios, é possível registrar a corrente de fuga no para-raios para uma série de estados de operação,

artificialmente criados em laboratório. Todos os ensaios são executados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG.

No Capítulo 5, é apresentada a metodologia desenvolvida para realizar o monitoramento de para-raios de ZnO com base na análise da corrente de fuga total. A metodologia inclui o desenvolvimento e aplicação de técnicas para extração de informações significativas da corrente, e de um sistema de classificação de estados de operação baseado em redes neurais artificiais.

Em seguida, são apresentados no Capítulo 6, os resultados obtidos a partir do emprego da técnica de monitoramento e diagnóstico desenvolvida, assim como, as suas respectivas análises.

Por fim, no Capítulo 7, apresentam-se as conclusões e contribuições da Tese, além das perspectivas de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo é realizada uma fundamentação teórica sucinta sobre os para-raios de óxido de zinco e suas principais características. Estas informações fornecerão os subsídios necessários à compreensão do problema apresentado e da solução proposta.

### 2.1 Para-raios de Óxido de Zinco

Os para-raios de óxido de zinco (ZnO) utilizados como supressores de surtos são equipamentos empregados na proteção dos sistemas elétricos contra sobretensões de origem externa (por exemplo, descargas atmosféricas) ou interna (por exemplo, sobretensões de manobra). Seu papel é limitar o nível de tensão que atingiria equipamentos importantes, tais como os transformadores de potência, evitando que os mesmos sejam submetidos a níveis de tensões inadequadas à sua operação.

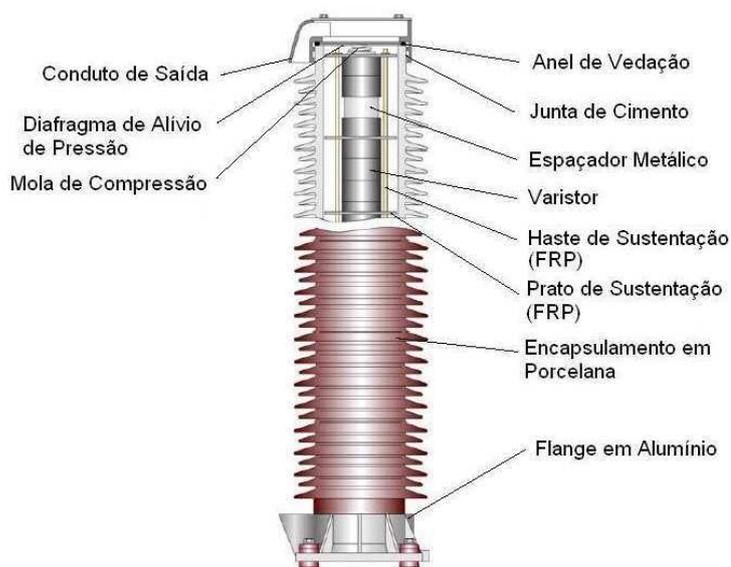
Inicialmente, utilizavam-se centelhadores separados pelo ar para a proteção dos sistemas elétricos contra descargas atmosféricas e de manobra. Na década de 1930 surgiram os resistores não-lineares à base de carboneto de silício (SiC). Estes resistores apresentavam uma característica  $V \times I$  que, quando associadas a um conjunto de centelhadores, promoviam a proteção contra surtos de maneira bem mais eficaz do que os para-raios até então utilizados (SAKSHAUG, 1991).

Em meados da década de 1970, surgiram os varistores de ZnO, capazes de suportar as elevadas tensões nominais dos sistemas elétricos sem a necessidade do uso de centelhadores. Este novo material, empregado inicialmente na proteção de dispositivos eletrônicos, passou a ser utilizado na composição de supressores de surtos, representando um grande avanço na proteção dos sistemas elétricos. Com eles, foi possível obter dispositivos mais

confiáveis, com uma característica  $V \times I$  mais não-linear e com capacidade de dissipação de energia duas vezes maior que a promovida pelos dispositivos de carboneto de silício (SAKSHAUG, 1991; HILEMAN, 1999; COSTA, 1999).

### 2.1.1 Aspectos Construtivos

Os para-raios a óxido de zinco são equipamentos de estrutura simples. Basicamente são constituídos de uma coluna de varistores envolvida por uma coluna de porcelana ou material polimérico, havendo ainda alguns outros componentes estruturais. Sua configuração depende do sistema ao qual será aplicado, mas no aspecto geral, se assemelha à ilustração mostrada na Figura 2.1.



**Figura 2.1** – Estrutura de um para-raios de ZnO com invólucro de porcelana (HINRICHSEN, 2001).

Os principais componentes dos para-raios são as pastilhas de óxido de zinco - varistores. Seu formato geralmente é cilíndrico, e seu diâmetro é definido de acordo com a capacidade de absorção de energia desejada para o equipamento, variando de 30 mm para sistemas de distribuição, até 100 mm ou mais para sistemas de alta ou extra-alta-tensão (HINRICHSEN, 2001). A altura das pastilhas geralmente varia entre 20 mm e 45 mm, dependendo dos métodos de produção utilizados e do grau de homogeneidade dos grãos de ZnO - quanto maior as dimensões do varistor mais difícil conseguir uma boa homogeneidade na distribuição interna do óxido de zinco.

Os varistores e os outros componentes internos são envolvidos por uma coluna isolante que pode ser constituída de porcelana ou material polimérico. Com isso, dificulta-se a infiltração de substâncias e o acúmulo de sujeira proveniente da poluição. A coluna de porcelana ou polimérica apresenta, externamente, aletas ao longo de todo o seu comprimento, que aumentam a distância de escoamento entre os terminais, com o objetivo de reduzir as correntes superficiais externas.

### 2.1.2 Varistores de ZnO

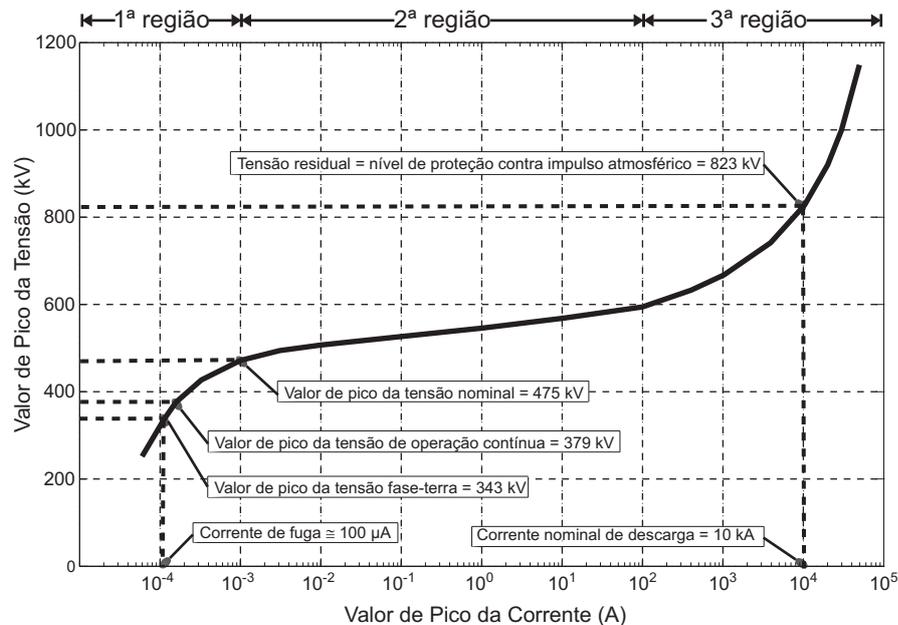
Os varistores de óxido de zinco são constituídos, além do ZnO, por outros óxidos aditivos, tais como óxidos de alumínio, antimônio, bismuto e manganês. Estes outros óxidos, principalmente os de bismuto e o de antimônio, são responsáveis pela formação da camada intergranular, ou seja, as camadas entre os grãos de ZnO que proporcionam ao material características não lineares exclusivas. As características dos varistores variam em função de sua composição e pureza (FRANCO, 1993; ABB, 2001; HADDAD; WARNED, 2009).

No processo de fabricação dos varistores, seus componentes básicos passam por um processo de mistura e moagem até que as partículas atinjam o tamanho adequado (da ordem de  $10^{-6}$  cm) formando uma pasta homogênea. Esta pasta é prensada no formato de pastilhas e sinterizada em fornos com tempo e temperatura programados. A pastilha já resfriada é então submetida a um processo de metalização de sua superfície e aplicação de um colar isolante em sua lateral (EDA, 1989; GUPTA, 1990). Finalmente, cada varistor é ensaiado com objetivo de definir suas características elétricas (COSTA, 1999).

## 2.2 Características Elétricas

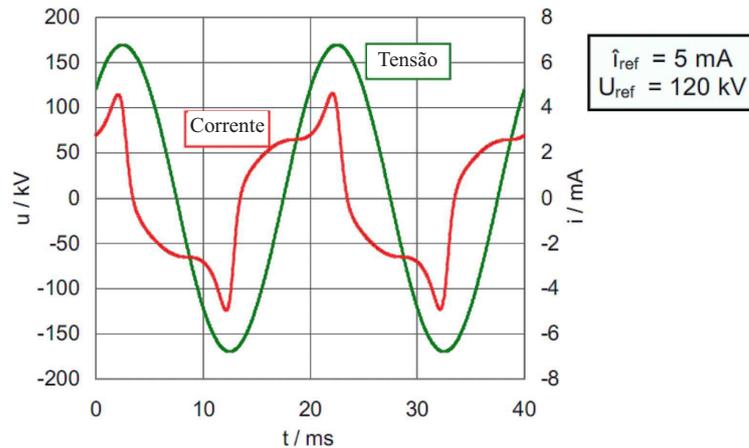
A principal característica do para-raios a ZnO é a sua não-linearidade em relação à curva  $V \times I$ . Esta característica representou um avanço em relação aos para-raios convencionais a carboneto de silício (SiC), isto porque, sua curva característica, ao contrário do que ocorre com o SiC, permite sua conexão direta com o sistema elétrico, gerando apenas uma corrente de fuga na ordem de alguns miliampères em condições normais de operação. Assim, dispensou-se o uso de centelhadores em série com a coluna de elementos varistores.

Uma curva característica típica, para um para-raios a ZnO de 420 kV, pode ser vista na Figura 2.2, onde são destacados suas principais regiões e pontos de interesse. A região 1 do gráfico corresponde à baixa corrente. É nesta região que o para-raios deve operar em regime permanente. O primeiro ponto em destaque aqui é o da corrente de fuga, cuja forma de onda típica é mostrada na Figura 2.3.



**Figura 2.2** – Curva característica de um para-raios a ZnO de 475 kV (HINRICHSEN, 2001).

A corrente de fuga total,  $i_t$ , é composta por uma componente capacitiva,  $i_c$ , e por uma componente resistiva,  $i_r$ . Valores típicos de  $i_t$  encontram-se na faixa de poucos miliamperes em condições normais de operação do para-raios e do sistema, enquanto que, as componentes capacitiva e resistiva variam de 0,2 a 3 mA e de 10  $\mu$ A a 600  $\mu$ A, respectivamente (LUNDQUIST *et al.*, 1990).



**Figura 2.3** – Forma de onda típica da corrente de fuga (HINRICHSEN, 2001).

Um pouco abaixo do joelho da curva fica o ponto de Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV (em inglês, *Maximum Continuous Operating Voltage*), o qual representa o nível máximo de tensão que o para-raios opera sem qualquer tipo de restrição. Geralmente, o valor da MCOV é definido em 5% acima da máxima tensão fase-terra do sistema, que para este caso correspondeu a algo em torno de 380 kV. Dessa forma, são levados em consideração os possíveis harmônicos presentes na tensão do sistema (HINRICHSEN, 2001).

Na segunda região da curva  $V \times I$  (região de alta não-linearidade), o para-raios conduz correntes elevadas, mesmo para pequenas variações de tensão. O primeiro ponto de interesse é o valor da tensão nominal. Apesar do que o nome possa sugerir, a tensão nominal do para-raios não representa a tensão que pode ser aplicada continuamente sobre o mesmo, e sim, a tensão que pode ser aplicada temporariamente (geralmente por um período de 10 s, no ensaio de ciclo de operação) sem o conduzir a um processo de avalanche térmica. O valor da tensão nominal corresponde, aproximadamente, a 1,25 vezes o valor da máxima tensão de operação.

A terceira região da curva é denominada região de alta corrente, e está diretamente relacionada ao nível de proteção oferecido pelo para-raios contra descargas atmosféricas. É uma região de condução aproximadamente linear e o seu principal ponto é o nível de proteção contra impulsos atmosféricos, representando a tensão sob o para-raios ao ser submetido a uma descarga de corrente nominal nos seus terminais.

Um outro aspecto a ser considerado no estudo das características elétricas dos para-raios é a distribuição de tensão ao longo da coluna de varistores. Pesquisas mostram que esta distribuição não é uniforme, de modo que os varistores mais próximos do terminal de alta tensão estão sujeitos a uma diferença de potencial superior a dos varistores da base. Conseqüentemente, os varistores superiores estão sujeitos a uma maior sollicitação térmica, degradando-se mais rapidamente que os demais (CHRZAN; GIELNIAK, 2003). Normalmente, na tentativa de se uniformizar a distribuição de tensão nos para-raios, utiliza-se anéis equalizadores nos terminais de alta tensão.

## 2.3 Corrente de Fuga

Normalmente, convencionam-se que, a corrente de fuga total do para-raios é composta por uma componente resistiva e outra capacitiva. Esta convenção é representada por meio do modelo elétrico de para-raios para baixas correntes, mostrado na Figura 2.4. Este modelo é composto por uma capacitância em paralelo com uma resistência não linear. A capacitância  $C$  correspondente à permissividade dos varistores de ZnO e às capacitâncias parasitas, sendo função também da tensão aplicada ao para-raios (ABB, 2010; IEC, 2000; LUNDQUIST *et al.*, 1990). A resistência não linear  $R$ , por sua vez, representa a característica não linear da curva  $V \times I$  do para-raios, a qual está relacionada ao processo de condução dos varistores de ZnO. A condução se dá através de mudanças na barreira de potencial formada na região intergranular dos varistores. Esta barreira muda de acordo com a intensidade do campo elétrico aplicado. A resistência  $R$  também é função da temperatura do varistor (ABB, 2010; IEC, 2000; LUNDQUIST *et al.*, 1990). Dessa maneira, tem-se a seguinte relação entre as correntes total ( $i_t$ ), capacitiva ( $i_c$ ) e resistiva ( $i_r$ ):

$$i_t(t) = i_c(t) + i_r(t), \quad (2.1)$$

em que:

$$i_c(t) = C \frac{dv(t)}{dt}, \quad (2.2)$$

sendo  $v(t)$  a tensão aplicada ao para-raios.

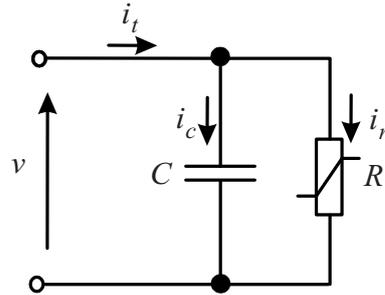


Figura 2.4 – Modelo de para-raios para baixas correntes.

Para se obter as componentes da corrente total, normalmente, emprega-se o método da compensação diferencial capacitiva (SHIRAKAWA *et al.*, 1988), onde a partir do circuito mostrado na Figura 2.5, é possível cancelar a componente capacitiva da corrente total, isolando-se a corrente resistiva. Para isso, ajusta-se iterativamente o valor da resistência R1, até que o sinal obtido na saída do amplificador diferencial (proporcional à componente resistiva da corrente de fuga) esteja em fase com a tensão aplicada. A corrente  $i_r$  pode ser obtida pela divisão da tensão no resistor R2 pela sua resistência.

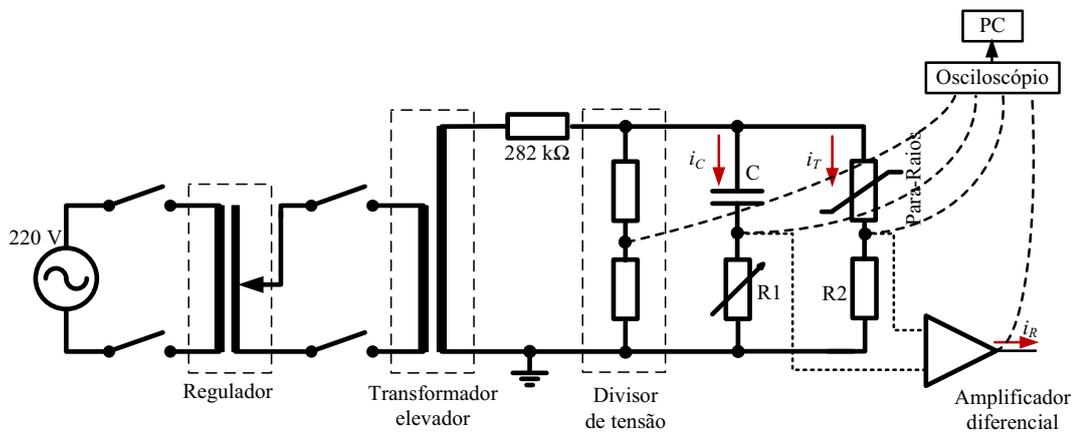


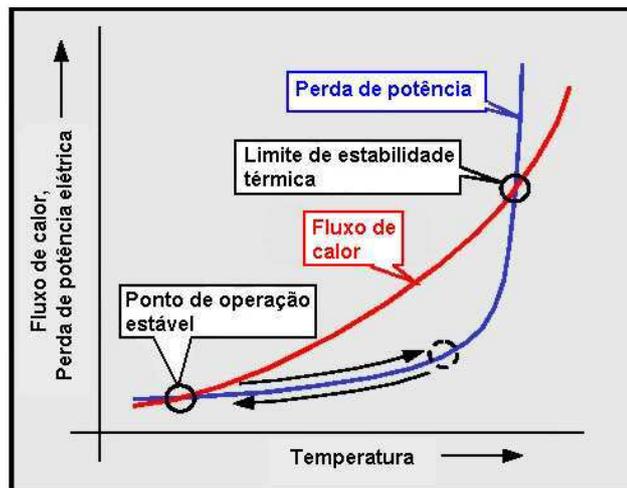
Figura 2.5 – Circuito utilizado na compensação diferencial capacitiva.

## 2.4 Características Térmicas

A principal característica térmica de um para-raios de ZnO é sua capacidade de absorção de energia. Em regime permanente, a corrente de fuga que circula pelos blocos varistores produz, devido ao efeito Joule, um pequeno aquecimento que o para-raios deve ter plena capacidade de suportar ou dissipar para o meio externo sem comprometer sua integridade. Já na ocorrência de surtos ou sobretensões temporárias, a corrente que percorre o para-

raios tende a aumentar, elevando as perdas ôhmicas e conseqüentemente, aumentando a temperatura interna do para-raios. Dependendo da quantidade de energia que seja injetada no para-raios, é possível que ele consiga suportá-la e dissipá-la para o meio externo, ou então, pode ser que o para-raios entre em um processo contínuo de elevação de temperatura e corrente de fuga, denominado avalanche térmica, que pode causar a sua destruição. Tudo vai depender da capacidade nominal de absorção de energia do projeto do para-raios em questão.

Na Figura 2.6, é apresentado um gráfico que explica o comportamento térmico dos para-raios. A curva do fluxo de calor representa a quantidade de calor que o para-raios pode dissipar para o meio exterior em função da temperatura. A curva da perda de potência (elétrica) representa o calor produzido pelos varistores (por efeito Joule) em função da temperatura e da corrente que os percorre. Com base no gráfico, fica evidente que enquanto a entrada de energia no para-raios for menor que sua capacidade de dissipação, ele manterá sua estabilidade térmica, sendo que o ponto ótimo de operação é aquele correspondente ao cruzamento mais à esquerda das duas curvas. O para-raios deve operar nessa região do gráfico, sendo permitido, eventualmente, deslocamentos ao longo da curva de perda de potência, sem jamais cruzar o ponto do limite de estabilidade térmica. Perdas acima deste ponto significam que está entrando mais energia no para-raios do que aquela que ele poderia dissipar, conduzindo-o então ao processo de avalanche térmica.



**Figura 2.6** – Curva de estabilidade térmica típica de um para-raios (HINRICHSEN, 2001).

Um para-raios corretamente projetado e especificado possui maiores chances de funcionar em equilíbrio térmico mantendo, portanto, sua estabilidade térmica, a qual existe quando:

- após a ocorrência de um surto, o para-raios retorna as suas condições normais, isto é, às condições nas quais ele se encontrava antes da ocorrência do surto;
- quando consegue manter sua capacidade de dissipação de calor durante o regime de operação contínua sem apresentar aquecimento excessivo.

## 2.5 Resumo

Neste capítulo, foram apresentados conceitos básicos e características operacionais dos para-raios de ZnO, com o objetivo de possibilitar o entendimento do trabalho. Foi dada ênfase especial às características elétricas e térmicas, pois juntas definem o estado de operação do para-raios, assim como, influenciam na vida útil do equipamento.

No próximo capítulo é apresentada uma revisão do estado da arte acerca dos mecanismos de falhas em para-raios de ZnO, destacando seus efeitos e consequências para os para-raios e para o sistema. Neste contexto, são apresentados e discutidos métodos para o monitoramento de para-raios, especialmente, aqueles baseados na medição da corrente de fuga do para-raios, uma vez que tais métodos estão dentro do escopo deste trabalho.

# Capítulo 3

## Revisão Bibliográfica

Este capítulo inicia-se com uma breve revisão acerca das causas mais comuns de falhas em para-raios. Na sequência, são apresentadas e discutidas algumas das principais técnicas de monitoramento e diagnóstico de para-raios. Ao final, é dada ênfase às técnicas baseadas na análise da corrente de fuga do para-raios, com o objetivo de tornar mais clara as contribuições deste trabalho.

### 3.1 Falhas em Para-raios

Ao longo do tempo, os para-raios instalados em campo sofrem alterações temporárias ou permanentes em suas características físicas, elétricas e térmicas que afetam significativamente seu desempenho. A intensidade dessas alterações está ligada diretamente ao nível de degradação dos para-raios, quanto mais degradado estiver o para-raios, maiores serão as alterações em suas características operacionais nominais. Para-raios degradados estão sujeitos a falhas permanentes que podem reduzir a confiabilidade dos sistemas elétricos, uma vez que outros equipamentos podem vir a falhar em cascata, devido à incapacidade de suportar elevados níveis de sobretensões, comprometendo, inclusive a segurança das pessoas, seja diretamente na subestação ou indiretamente devido a desligamentos não programados. Todos esses problemas culminam em multas severas às empresas de energia elétrica e em prejuízos financeiros consideráveis.

Existem vários fatores que contribuem para a degradação dos para-raios ou das suas condições operativas nominais, tais como (EDA, 1984; FESER *et al.*, 1991; KOURDI *et al.*, 1992; BARTKOWIAK *et al.*, 1999; HEINRICH; HINRICHSEN, 2001; CHRZAN, 2004; LARSEN;

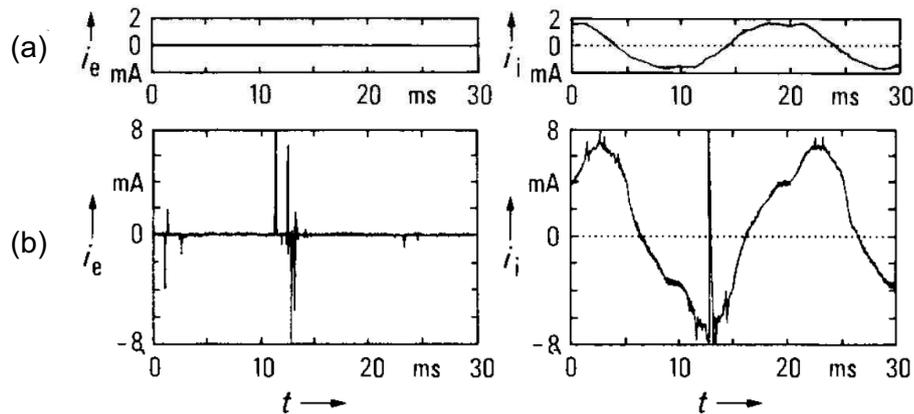
LIEN, 2007; ROSSMAN *et al.*, 2010): poluição superficial, esforços elétricos excessivos, reações químicas com o meio, erros de projeto, montagem ou transporte inadequados. A depender da intensidade ou da persistência destes fatores, o para-raios pode se degradar permanentemente, sendo portanto, necessário retirá-lo de operação.

Eda (1984) descreve o processo de destruição dos varistores de ZnO causado pela injeção de surtos de corrente de alta intensidade. No decorrer da pesquisa, o autor observou dois tipos de mecanismos de destruição dos varistores: a perfuração e a quebra dos varistores. No processo de quebra, os varistores são desintegrados em várias partes menores. Ela decorre da passagem de altas correntes com durações inferiores a  $50 \mu s$ , pois o calor gerado pelo surto não é transferido uniformemente para todas as regiões do varistor, devido à velocidade do surto, e com isso, gradientes elevados de temperatura podem ocorrer. Os gradientes de temperatura causam esforços mecânicos irregulares no varistor, os quais acabam quebrando o varistor em várias partes. Já a perfuração corresponde a um pequeno orifício formado no varistor, em decorrência da fundição de uma pequena área de sua superfície metalizada, quando submetida a elevadas correntes concentradas com durações maiores que  $100 \mu s$ . Por fim, é destacada a importância da uniformidade no processo de fabricação do varistor com a finalidade de se evitar concentrações de corrente.

Knobloch *et al.* (1991) verificaram que a poluição industrial ou a névoa salina e a umidade interna no para-raios, não só influenciam no aquecimento dos blocos de ZnO, mas também na geração de descargas parciais no interior do equipamento. Devido à poluição externa, a distribuição de tensão ao longo do para-raios torna-se mais irregular, produzindo campos elétricos elevados e, por conseguinte, descargas parciais. As descargas geradas dessa maneira, produzem uma redução na concentração de oxigênio no interior do para-raios e a formação simultânea de gases nocivos, tais como  $CO_2$  (dióxido de carbono), CO (monóxido de carbono),  $NO_2$  (dióxido de nitrogênio) e  $NH_3$  (amônia), além de ácido nítrico ( $HNO_3$ ). Segundo os autores, a diminuição na concentração de oxigênio implica na diminuição da barreira de potencial dos grãos de ZnO, devido a difusão de oxigênio dos varistores em direção às suas superfícies metalizadas. Esta diminuição na barreira de potencial dos grãos representa modificações na estrutura eletroquímica dos varistores e, conseqüentemente, modificações em sua característica não-linear, o que normalmente,

significa elevação da corrente de fuga do para-raios. Danos aos elementos internos do para-raios e ao colar isolante dos varistores também podem ocorrer, devido à ação dos gases produzidos internamente.

Feser *et al.* (1991) realizaram uma análise detalhada do comportamento dos para-raios de ZnO mediante a poluição de seu invólucro de porcelana. Foi constatado que devido à formação de bandas secas no invólucro poluído do para-raios energizado, os seguintes fenômenos ocorrem: (i) elevação da corrente de fuga, em pelo menos 4 vezes com relação àquela medida para o para-raios limpo, conforme mostrado na Figura 3.1, devido ao acoplamento capacitivo entre camada a poluída e a coluna de varistores; (ii) elevadas temperaturas em regiões da coluna de varistores próximas às bandas secas; (iii) descargas internas no para-raios devido aos campos elétricos radiais de alta intensidade, as quais podem ser verificadas através dos *spikes* de corrente presentes na corrente de fuga do equipamento.



**Figura 3.1** – Correntes de fuga externa ( $i_e$ ) e interna ( $i_i$ ) em um para-raios: (a) limpo e (b) poluído (FESER *et al.*, 1991).

Kourdi *et al.* (1992) reportaram a influência da poluição industrial ou marítima nos para-raios de ZnO, pois em decorrência do depósito de poluição no invólucro, tem-se que a distribuição de tensão ao longo do para-raios é modificada e alguns varistores podem ser submetidos a níveis de tensão mais intensos que os nominalmente esperados, podendo assim, ocorrer a degradação prematura. Os autores destacam ainda que, devido à má distribuição de tensão gerada pela poluição, podem ocorrer diferenças de potencial entre a coluna de varistores e a porcelana do invólucro. Essas diferenças de potencial geram

campos elétricos radiais, que a depender da intensidade, podem ocasionar descargas internas e danos aos varistores, pois foi observado que com o passar do tempo, a exposição dos varistores às descargas internas conduzem a modificações na característica  $V \times I$  devido à decomposição dos gases internos e à produção de impurezas no interior do para-raios. A condutividade dos varistores aumenta devido ao depósito de materiais condutivos nos varistores e a corrosão de seu colar isolante. Este aumento de condutividade pode levar a gradientes excessivos de temperatura e, conseqüentemente, ao risco de avalanche térmica e envelhecimento precoce dos para-raios em serviço.

Bartkowiak *et al.* (1999) estudaram a correlação entre a capacidade dos para-raios em absorver a energia proveniente de surtos e os modos de falhas permanentes de varistores. Nos testes realizados, foram identificados três modos de falhas dos varistores: avalanche térmica, perfuração e quebra da pastilha. A capacidade de absorção de energia do para-raios depende do tipo de falha predominante. As falhas, por sua vez, são função da forma e amplitude do pulso de corrente ao qual o varistor está submetido. A quebra e perfuração do varistor são causadas por concentrações de corrente que o aquecem localmente, causando esforços e expansões térmicas não uniformes. Elas não ocorrem para baixas correntes, pois o aquecimento gerado pode ser distribuído uniformemente. Já para densidades de corrente intermediárias, é comum ocorrer a perfuração, enquanto que a quebra do varistor é mais comum para altas densidades de corrente de surto. A avalanche, por sua vez, ocorre normalmente para densidades de corrente baixas ou muito altas.

Heinrich & Hinrichsen (2001) afirmaram que a degradação do para-raios é causada basicamente por três fatores: aplicação da MCOV, injeção de impulsos de corrente e reações químicas com o meio. O primeiro fator só era relevante nos primeiros projetos de para-raios. Projetos mais modernos são imunes à degradação em decorrência da simples aplicação da MCOV. Já com relação aos impulsos de corrente, é destacado que eles podem provocar mudanças significativas na característica  $V \times I$  do para-raios ou mesmo conduzi-lo à destruição, especialmente, quando são aplicados impulsos de alta corrente. Da mesma forma, as reações químicas causam modificações significativas na curva  $V \times I$  do para-raios, devido à liberação e formação de substâncias (moléculas) no interior do para-raios, que acabam enfraquecendo a barreira de potencial das regiões intergranulares nas vizinhanças

dos grãos de ZnO. Este enfraquecimento resulta em elevações na corrente de fuga total.

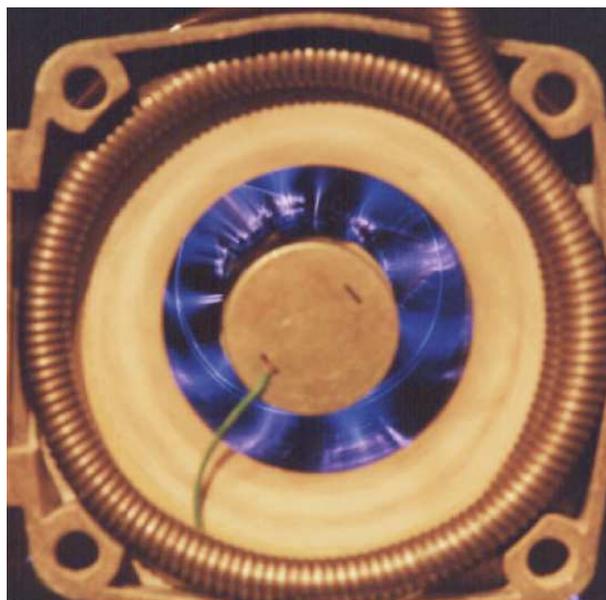
Chrzan (2004) observou a influência de umidade e descargas parciais internas na degradação de varistores de óxido metálico presentes em para-raios de alta tensão. Os para-raios hermeticamente selados são preenchidos, normalmente, com ar seco, nitrogênio ou SF<sub>6</sub>. Em condições normais, a umidade dos gases é baixa, entretanto, após anos de operação, a umidade interna dos para-raios aumenta devido à perda de estanqueidade. Valores elevados de umidade podem conduzir a descargas elétricas internas e elevar a condutância na coluna ativa, modificando a característica V×I do para-raios.

Na tensão de operação, os para-raios podem estar sujeitos a descargas de corona, entretanto, estas descargas não causam danos aos varistores, apenas são fontes de distúrbios eletromagnéticos. Caso estejam limpos e com invólucros secos, eles devem estar livres de descargas parciais internas. Contudo, quando o invólucro está poluído, a distribuição de tensão é bastante não uniforme ao longo do seu comprimento, enquanto que, a distribuição de tensão na coluna ativa é praticamente uniforme, com isso, campos elétricos radiais de alta intensidade são produzidos e descargas parciais internas são iniciadas na superfície do varistor, na parte interna da porcelana ou nos elementos estruturais do interior do para-raios (hastes, espaçadores, etc). É verificado que o tipo de descarga mais agressivo é aquele que causa a ruptura dielétrica do meio isolante entre os varistores e o invólucro (ver Figura 3.2). Estas descargas possuem carga aparente na faixa de nanocoloumb (nC)<sup>1</sup> e podem facilmente destruir o colar isolante do varistores ou danificar sua superfície (ver Figura 3.3).

Na ruptura do meio isolante existente no interior do para-raios, diversos novos compostos, como ozônio, NO<sub>x</sub> e SF<sub>x</sub> podem ser criados. O número de compostos químicos criados cresce consideravelmente na presença de umidade, oxigênio e materiais isolantes poliméricos, os quais podem ser degradados. Ácido nítrico é formado no ar a partir do óxido nítrico e água da umidade interna. Os compostos criados nessas reações podem degradar o varistor, os elementos estruturais e a vedação do para-raios.

---

<sup>1</sup>O valor máximo permitido de descargas parciais em para-raios é 10 pC.



**Figura 3.2** – Fotografia de descargas entre a coluna de varistores e a porcelana (CHRZAN, 2004).



**Figura 3.3** – Fotografia de varistores degradados devido à ação de descargas parciais (CHRZAN, 2004).

Larsen & Lien (2007) realizaram uma série de medições em campo onde foi possível detectar vários para-raios com problemas. Eles afirmam que o envelhecimento ou dano dos para-raios são causados por fatores oriundos da rede elétrica ou do meio onde os para-raios estão instalados. Dessa maneira, podem ocorrer dois tipos de degradação: aquela relacionada à característica isolante do para-raios e outra relacionada à característica de proteção. Ao perder sua característica isolante, o para-raios pode promover um curto-

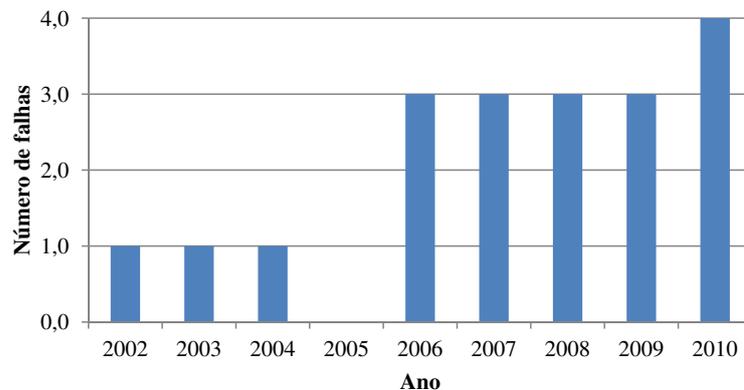
circuito no sistema, já a degradação da característica de proteção resulta em modificações no ponto de operação do equipamento, o que normalmente implica em correntes de fuga e temperaturas interna acima dos máximos níveis estipulados pelos fabricantes. Para os autores, os principais mecanismos que conduzem à degradação dos para-raios são: (i) a perda da estanqueidade, a qual permite a entrada de umidade; (ii) descargas devido a poluição superficial; (iii) sobrecarga devido a sobretensões temporárias ou transitórias; (iv) envelhecimento de longa duração na tensão de operação, em razão de uma especificação errônea do para-raios; e (v) descargas parciais internas. Nos para-raios retirados de serviço os autores detectaram principalmente a presença de umidade interna e a ação de descargas parciais na carbonização do colar isolante dos varistores. Eles ainda destacam que a não retirada em tempo hábil de para-raios degradados pode resultar em: explosão (porcelana) ou queima (polimérico) do invólucro, conforme mostrado na Figura 3.4, com a possibilidade de causar danos a outros equipamentos ou ao pessoal de campo; disrupções internas na porcelana, causando curto-circuitos no sistema; e danos aos equipamentos protegidos pelos para-raios, devido à degradação de suas características de proteção.



**Figura 3.4** – Fotografia de para-raios após a explosão do invólucro (LARSEN; LIEN, 2007).

Rossmann *et al.* (2010) identificaram, na última década, o crescimento da quantidade de falhas em para-raios de ZnO na Tennessee Valley Authority - TVA (uma companhia de energia elétrica americana). Mais especificamente, cerca de 19 para-raios de 132 kV falharam, conforme mostrado no gráfico da Figura 3.5. Durante a análise dos para-raios,

os autores detectaram que todas as falhas ocorreram no interior do para-raios, logo, suspeitaram que poderiam ser problemas na coluna de varistores ou então, disrupções no gás existente entre as colunas de varistores e porcelana. Ao testar os varistores, observaram que eles mantinham suas características nominais, logo, imaginaram que o problema poderia ser decorrente de deslocamentos na coluna no momento da montagem ou instalação dos para-raios. Contudo, ao observar os elementos de vedação dos para-raios, notaram a existência de canais de passagem que possibilitariam a entrada de umidade no interior do invólucro. A partir da umidade interna deu-se início o surgimento de descargas parciais internas, as quais ionizavam o ar interno, reduzindo suas propriedades isolantes. O ar com menor rigidez dielétrica possibilitou a ocorrência de uma disrupção interna entre os terminais do para-raios, causando a falha do equipamento e o desligamento de parte do sistema elétrico. Os autores, ao final das análises dos para-raios defeituosos concluem que, a principal causa dos defeitos ocorridos foi a vedação inadequada dos para-raios na fábrica, a qual possibilitou entrada de umidade.



**Figura 3.5** – Número de falhas de para-raios por ano (ROSSMAN *et al.*, 2010).

Pelo exposto, fica evidente que existem várias causas e mecanismos de falhas em para-raios de ZnO, entre as causas, as mais comuns são: poluição superficial e perda de estanqueidade com conseqüente entrada de umidade. Ainda foram registrados vários problemas relacionados a erros de projeto, especificação ou instalação de para-raios e absorção de sobretensões de alta intensidade ou de múltipla ocorrência. Todos os tipos de degradação em para-raios resultam em alterações significativas na curva  $V \times I$ , na intensidade e forma da corrente de fuga, na temperatura interna e externa do para-raios e por fim, na formação e concentração de substâncias nocivas no interior do equipamento.

Os efeitos da degradação dos para-raios também foram relatados. Devido à degradação dos para-raios podem ocorrer danos permanentes a si e a outros equipamentos de subestação, explosões, desligamentos não programados do sistema e riscos à integridade do pessoal de campo. Logo, existe a necessidade clara de se realizar o monitoramento dos para-raios de ZnO com a finalidade de possibilitar o diagnóstico do seu estado de operação, permitindo assim, a retirada de um equipamento degradado antes de sua falha permanente.

## 3.2 Monitoramento de Para-raios

Na literatura é possível encontrar várias técnicas destinadas ao monitoramento e ao diagnóstico *on-line* e *off-line* de para-raios de ZnO (HEINRICH; HINRICHSEN, 2001; LARSEN; LIEN, 2007). As técnicas *on-line* não exigem a desconexão do para-raios do sistema elétrico, podendo ser empregada em campo. Já as *off-line* requerem a retirada do para-raios do serviço e a sua submissão a ensaios em ambientes e condições controladas. Essas técnicas podem ser agrupadas ainda, segundo seus princípios de funcionamento, ou seja, à maneira pela qual elas percebem a degradação dos para-raios (IEC, 2000; HEINRICH; HINRICHSEN, 2001). Sendo assim, existem técnicas baseadas nas medições da tensão de referência, da curva  $V \times I$ , da corrente de fuga e suas componentes, da temperatura externa e descargas parciais. A seguir é realizada uma breve descrição de cada categoria de métodos de monitoramento.

### 3.2.1 Medição da Tensão de Referência

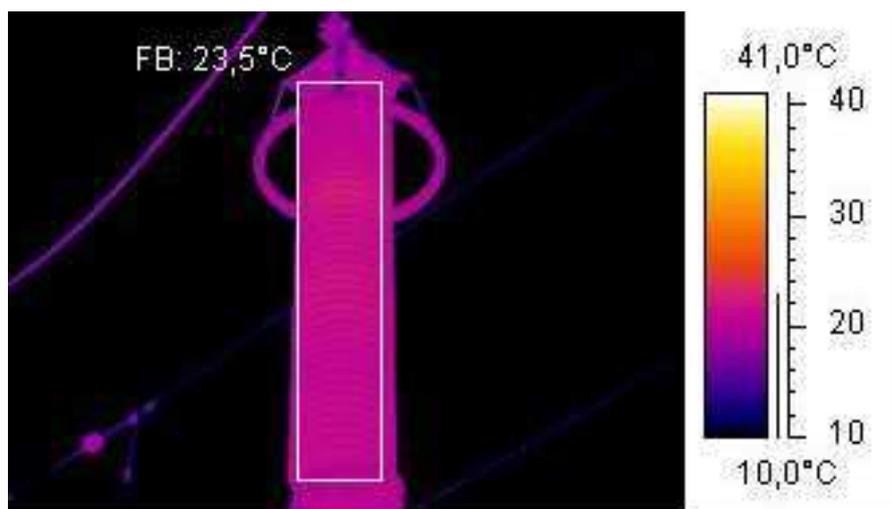
Este é um método *off-line* que consiste em medir a tensão (de referência) nos terminais do para-raios quando o mesmo é percorrido pela corrente de referência (IEC, 2001). A corrente de referência é definida pelo fabricante e pode variar entre 1 e 10 mA. Dependendo de como ela seja definida com relação à região de joelho da curva  $V \times I$ , as mudanças no valor de tensão poderão ser imperceptíveis. Dessa maneira, este método torna-se inadequado até mesmo para uso em laboratório (HEINRICH; HINRICHSEN, 2001).

### 3.2.2 Medição da Curva $V \times I$

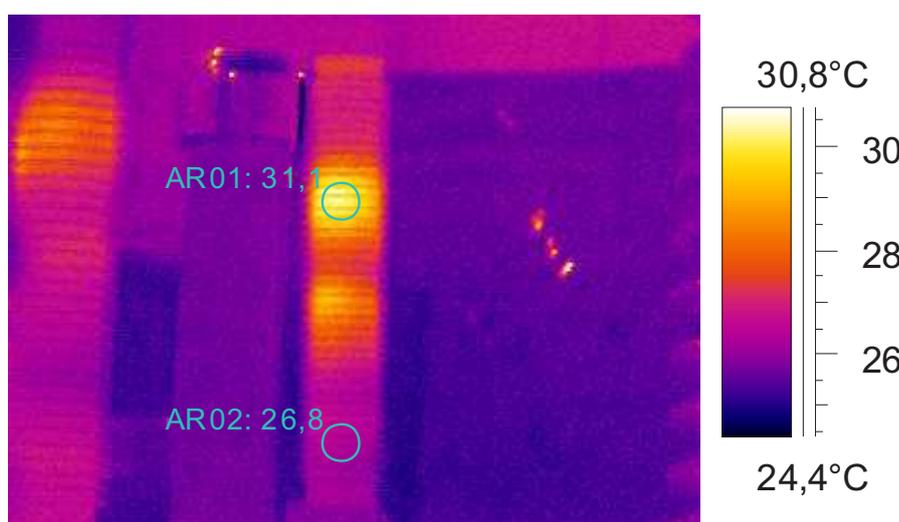
Medição da curva  $V \times I$  é um método *off-line*, onde é realizado o levantamento da curva  $V \times I$  do para-raios para tensões entre 50% da sua MCOV e a tensão de referência (HEINRICH; HINRICHSEN, 2001). Ele é considerado um dos métodos mais confiáveis de monitoramento de para-raios, uma vez que todos os mecanismos de falhas em para-raios de ZnO provocam alterações na curva característica, logo, comparações entre curvas podem evidenciar a degradação dos para-raios. O método pode ser aplicado tanto em sistemas CC quanto CA. A principal desvantagem do método está relacionada ao fato de que ele é aplicável apenas em ambientes controlados (como laboratórios de alta tensão), fazendo uso de fontes de alta tensão e sistemas de medição de alto valor financeiro, ou seja, os custos envolvidos neste tipo de técnica de monitoramento são elevados.

### 3.2.3 Medição da Temperatura Externa

Existem vários métodos, *on-line*, de monitoramento baseados na análise da temperatura externa dos para-raios (MARTINS *et al.*, 2005; GALINDO *et al.*, 2006; CHRZAN, 2007; WANDERLEY NETO *et al.*, 2009; ALMEIDA *et al.*, 2009; LIRA *et al.*, 2010; LIRA *et al.*, 2011). Normalmente, as medições de temperatura são realizadas por meio de um termovisor, o qual é capaz de registrar a radiação infra-vermelha (calor) oriunda dos objetos inspecionados, retornando ao usuário do instrumento um perfil térmico. A análise detalhada deste perfil térmico pode indicar que tipo de problema está ocorrendo com o para-raios, através da comparação do perfil obtido com um padrão, correspondente a um equipamento em bom estado. Isto pode ser visto nas Figuras 3.6 e 3.7, nas quais são mostradas termografias de um para-raios em bom estado e outro defeituoso, respectivamente.



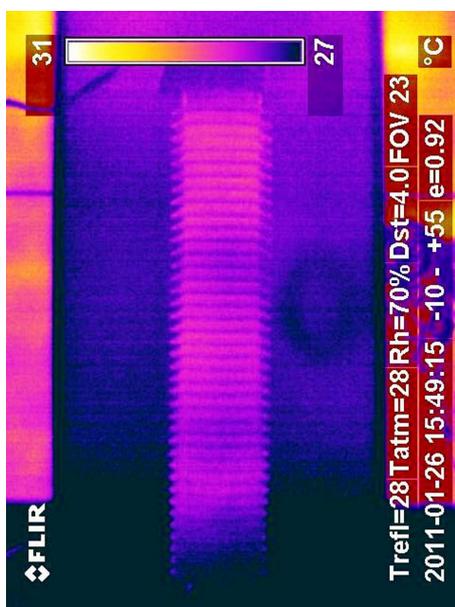
**Figura 3.6** – Termografia de para-raios em bom estado.



**Figura 3.7** – Termografia de para-raios defeituoso.

De acordo com empresas de energia, o diagnóstico por termografia tem se mostrado consistente para o diagnóstico do estado de operação de para-raios, tendo como principal vantagem o fato de ser uma técnica não-destrutiva e não-invasiva, realizada a distância, indicada para o monitoramento de equipamentos operando sob altos níveis de tensão ou conduzindo uma corrente elevada. Contudo, esta técnica possui pelo menos quatro grandes problemas ou inconvenientes: (i) um deles está relacionado ao fato de que a temperatura externa do para-raios nem sempre corresponde aos níveis de temperatura nas pastilhas, logo, é possível ter um varistor com temperatura acima da normal e mesmo assim, não

ser possível observar níveis de temperatura significativos no invólucro; (ii) alguns defeitos relativamente severos não produzem elevações significativas de temperatura no invólucro, conforme mostrado na Figura 3.8, onde a diferença entre as temperaturas máxima e mínima ao longo da coluna de porcelana foi de aproximadamente  $0,5^{\circ}\text{C}$ ; (iii) mesmo se obtendo elevações perceptíveis de temperatura no invólucro, resta ainda determinar com exatidão o valor de temperatura a partir do qual um determinado para-raios pode ser considerado como defeituoso; (iv) a termovisão deve ser realizada no período noturno para evitar a interferência da luz solar, logo, não há possibilidade de se realizar o monitoramento em tempo-real do para-raios.



**Figura 3.8** – Termografia de para-raios com perda de estanqueidade.

Alguns trabalhos (WANDERLEY NETO *et al.*, 2009; LIRA *et al.*, 2010; LIRA *et al.*, 2011) tem reportado bons resultados no emprego de técnicas relacionadas à medição de temperatura externa em para-raios de ZnO. Apesar dos bons resultados, os problemas ou inconvenientes listados anteriormente persistem.

### 3.2.4 Medição de Descargas Parciais

A norma IEC (2001) prevê um ensaio para detecção e medição de descargas parciais internas nos para-raios. Neste ensaio (método *off-line*), o para-raios é energizado durante

2 a 10 s com a tensão nominal e, em seguida, a tensão aplicada é reduzida para 1,05 vezes a MCOV. Caso sejam medidos níveis de descargas parciais maiores que 10 pC, o para-raios é dito defeituoso.

A medição de descargas parciais em para-raios com o objetivo de se avaliar o seu estado de degradação vem sendo empregada há algum tempo (MORAES, 1987), especialmente em laboratório. Contudo, só mais recentemente, alguns pesquisadores vem desenvolvendo métodos *on-line* (BACEGA *et al.*, 2009a; BACEGA *et al.*, 2009b) para medir descargas parciais em campo. Estes métodos não estão plenamente desenvolvidos devido, principalmente, às dificuldades de se realizar medições de descargas parciais em campo, pois são sinais de baixa intensidade e de alta frequência facilmente sobrepostos pelo ruído ambiente.

### 3.2.5 Medição da Corrente de Fuga

Outro conjunto de técnicas de monitoramento e diagnóstico de para-raios bastante empregado pelas concessionárias de energia elétrica, baseia-se na medição da corrente de fuga que percorre o para-raios em direção à conexão com a terra. Os para-raios por estarem diretamente conectados ao sistema, permitem a passagem de uma corrente de fuga na faixa de miliamperes constantemente, quando em regime normal de operação e uma elevada corrente, na faixa de centenas ou milhares de amperes em situações adversas, tais como sobretensões temporárias, de manobra, atmosféricas ou defeitos internos.

A principal vantagem deste tipo técnica de monitoramento é a possibilidade de medição direta de uma grandeza elétrica do equipamento, a qual é bastante sensível ao nível de degradação do para-raios (CARLSON *et al.*, 1986), sem a necessidade de retirá-lo de operação. Por isso mesmo, diversos estudos vêm sendo realizados com o intuito de se obter uma técnica confiável que indique o grau de degradação dos para-raios.

Inserido neste contexto, este trabalho dedica-se à proposição e desenvolvimento de um método de monitoramento baseado na medição da corrente de fuga total. Dessa maneira, é apresentado a seguir, um levantamento do estado da arte, com o objetivo de evidenciar as contribuições desta Tese.

### 3.2.5.1 Técnicas Baseadas na Medição da Corrente de Fuga

Shirakawa *et al.* (1988) desenvolveram um sistema para medição da corrente de fuga total do para-raios com a finalidade de estimar a componente da corrente responsável pelas perdas de potência (componente resistiva da corrente). Para isso, diversas medições e comparações foram realizadas entre as componentes harmônicas da parte resistiva da corrente total, onde se detectou um aumento mais significativo da componente de 3<sup>a</sup> harmônica da corrente resistiva, tanto para elevações de tensão aplicada, quanto de temperatura. Ainda mais, constatou-se uma relação quase linear, para determinada faixa de operação, entre a amplitude da 3<sup>a</sup> harmônica e a corrente resistiva. Dessa maneira, os autores propõem um sistema de filtragem capaz de extrair a componente de 3<sup>a</sup> harmônica da corrente total (não mais a resistiva) e com isso, aplicando-se um fator de proporcionalidade tem-se uma estimativa da corrente resistiva. Os autores apontam como principal vantagem, a não necessidade de se medir a tensão aplicada no para-raios para determinar a corrente resistiva, realizando, por exemplo, a decomposição da corrente total via método da compensação capacitiva. Contudo, este método apresenta algumas desvantagens como a alta sensibilidade dos resultados fornecidos a harmônicos de 3<sup>a</sup> ordem na tensão aplicada ao para-raios. Além disso, o método baseia-se em estimar a componente resistiva a partir da componente de 3<sup>a</sup> ordem, através de fatores de proporcionalidade, os quais podem mudar de para-raios para para-raios.

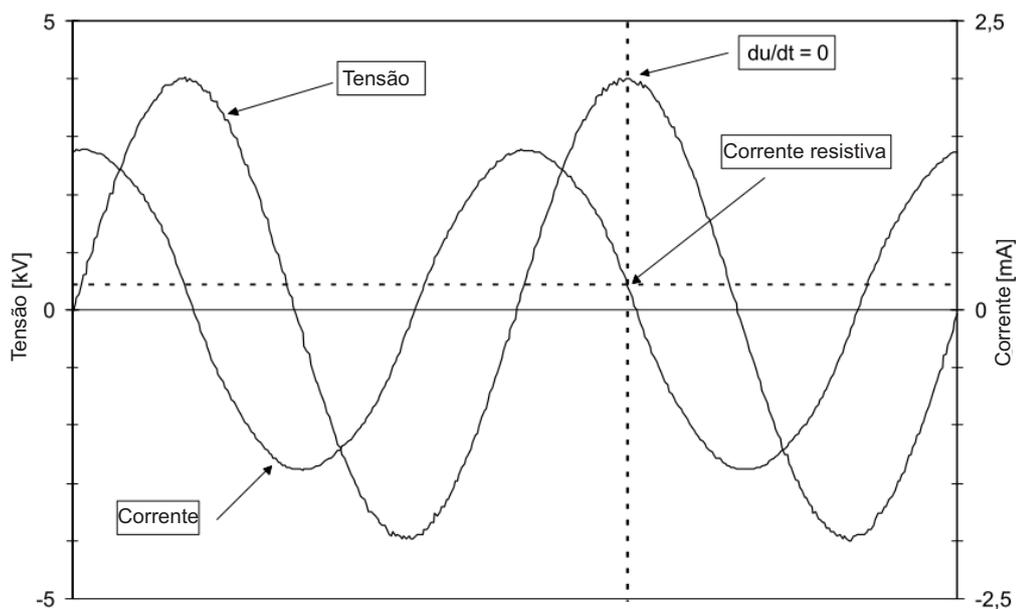
Lundquist *et al.* (1990) apresentaram um método para análise da corrente de fuga baseado na análise das suas componentes harmônicas. O método baseia-se na técnica da compensação, na qual a corrente harmônica de terceira ordem gerada pela tensão do sistema é eliminada e apenas a componente de terceira ordem gerada pelo para-raios é utilizada na medição. Para isso, é estabelecida uma relação entre a componente harmônica de terceira ordem da corrente resistiva e a corrente de fuga total do sistema. Os autores apontam como principal vantagem deste método sua baixa sensibilidade a harmônicos na tensão do sistema. Segundo os autores, a exatidão dos resultados depende da configuração do para-raios e dos níveis da tensão aplicada. A margem de erro na relação entre a corrente resistiva total e a componente resistiva de 3<sup>a</sup> harmônica pode ser de 20 a 25 % dependendo

da tensão de carregamento do para-raios. Entretanto, em medições comparativas para um mesmo para-raios, os resultados são mais precisos. Apesar de o método apresentar eficácia comprovada, ele é limitado para medições comparativas, ou seja, na primeira medição com para-raios novo admite-se que a corrente de fuga resistiva inicial é de 0,3 p.u. Caso o valor da corrente ultrapasse 1,0 p.u. ao longo de sua vida útil, o para-raios deve ser retirado de serviço (DOBLE, 2000).

Cofeen & McBride (1991) propuseram uma técnica para o cálculo da corrente de fuga resistiva através da medição das perdas de potência e da tensão RMS aplicada ao para-raios, chamada de técnica HI-VARC (High Voltage AC Resistive Current). Esta técnica permite a obtenção da corrente de fuga mesmo com a presença de harmônicos, tanto na tensão aplicada, quanto na corrente. A vantagem da técnica é que não há necessidade de se armazenar a forma de onda da corrente de fuga capacitiva, nem há a necessidade de se repetir a exata configuração da geometria do sistema para a realização de testes sucessivos. Uma outra vantagem é que se trata de uma técnica de propósito geral, podendo ser utilizada para a medição da perda de isolamento em diversos tipos de equipamentos. Entretanto, ela possui algumas limitações, tais como: erros na aquisição da corrente e da tensão no para-raios, e erros de truncamento durante a digitalização dos valores, além de erro de atraso de tempo diferencial devido ao sistema de conversão analógico para digital do sistema de aquisição de dados empregado nas medições. A medição da tensão no para-raios constitui outra limitação, pois nem sempre é possível medi-la em situações práticas.

Hinrichsen (1997) apresentaram uma maneira relativamente simples de se determinar o pico da corrente de fuga resistiva a partir dos sinais de corrente total e tensão aplicada ao para-raios. O método baseia-se no fato de que a componente capacitiva da corrente é nula quando a tensão aplicada ao para-raios possui derivada primeira nula (ver Equação (2.2)). Neste caso, o valor de pico da corrente resistiva é igual ao valor instantâneo da corrente total, conforme se pode constatar pela Equação (2.1). Este método fica bem ilustrado através dos gráficos mostrados na Figura 3.9. Apesar da simplicidade do método, ele pode errar na estimativa da corrente resistiva devido à aplicação de sinais de tensão distorcidos nos para-raios, pois um sinal distorcido pode ter vários pontos de derivada nula, o que

difícil o emprego do método. Outra limitação é a necessidade de medir a tensão aplicada ao para-raios. Portanto, este método é mais conveniente para aplicações em laboratório, onde é mais prático medir a tensão aplicada ao para-raios, além do que ela segue determinados padrões de qualidade. Em laboratório, este método pode ser utilizado como método de referência.



**Figura 3.9** – Ilustração do método proposto por Hinrichsen (1997).

Spellman & Haddad (1997) propuseram uma técnica de monitoramento *on-line* na qual a corrente de fuga resistiva é determinada através da análise de um ciclo completo da tensão aplicada e da corrente de fuga total, sem a necessidade de análise das componentes harmônicas da corrente. A técnica, chamada de *Point-on-Wave* (POW), se baseia em um sistema de equações, através do qual a corrente resistiva é determinada a partir dos valores da tensão e da corrente de fuga, tomados em dois instantes de tempo, e assumindo que a curva de tensão e de corrente para o para-raios são únicas, e que as componentes capacitiva e resistiva da corrente de fuga dependem apenas do nível de tensão. Esta técnica foi testada em laboratório com sucesso. No entanto, algumas dificuldades vêm sendo encontradas na tentativa de aplicá-la em campo. Entre as dificuldades tem-se, principalmente, o desenvolvimento de equipamentos adequados para a obtenção dos sinais de corrente e tensão na subestação de modo a não influenciar no sistema e evitar a interferência nos inúmeros ruídos presentes no ambiente.

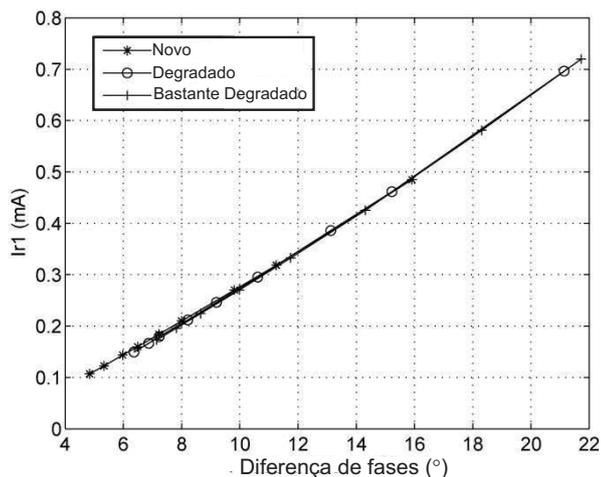
Klein *et al.* (1999) mostraram o desenvolvimento de um sistema de monitoramento *on-line* capaz de acompanhar e armazenar os sinais de corrente obtidos através de sensores sem haver necessidade de contato com o sistema elétrico. Este sistema é constituído de duas partes principais: sensores de corrente e um computador pessoal. Os sensores medem a corrente de fuga e os impulsos de corrente, e são constituídos de transdutores indutivos colocados no aterramento dos para-raios de um sistema trifásico. Na medição da corrente de fuga, os sensores utilizados são elementos toroidais com núcleo de ferrite. No caso das correntes impulsivas, o núcleo é de ar, evitando o efeito de saturação na ferrite. A vantagem deste sistema é a de fazer um monitoramento constante, armazenando informações a respeito do comportamento do para-raios ao mesmo tempo em que alerta para irregularidades. Dessa forma, pode-se criar uma espécie de histórico do equipamento. O maior inconveniente da técnica é a necessidade de se medir as tensões de fase, o que apresenta um custo elevado e nem sempre é possível.

Souza (2004) apresentou um método computacional para compensação da componente capacitiva da corrente de fuga do para-raios chamado de Ponte Virtual. Este método utiliza o princípio da ponte de compensação capacitiva, sendo que o ramo RC presente na montagem (ver Figura 2.5) é dispensado, e um valor correspondente à sua capacitância é calculado iterativamente através de uma rotina computacional. O método forneceu bons resultados em laboratório. Contudo, sua aplicabilidade em campo está limitada a possibilidade de medição da tensão sobre o para-raios.

Lee & Kang (2005) descreveram o desenvolvimento de um novo algoritmo e instrumento de medição para estimar a componente resistiva da corrente total. O algoritmo de estimação é baseado no método do deslocamento no tempo, o qual consiste em realizar um atraso de um quarto de ciclo no sinal de corrente total medido, deslocando-o no tempo, em seguida, somar o sinal deslocado com o originalmente medido, com o objetivo de determinar o instante de tempo correspondente ao valor de pico do sinal somado. Segundo os autores, esse instante de tempo é o mesmo para o qual a tensão atinge seu valor de pico, e portanto, corresponde ao instante, na curva do sinal de corrente total, no qual o valor de pico da corrente resistiva ocorre. Com esta metodologia, relativamente simples, os autores conseguiram estimar o valor de pico da corrente resistiva, sem realizar medições

de tensão e processos, mais complexos, de decomposição da corrente de fuga total. Bons resultados são mostrados no trabalho. Contudo, os autores partiram da premissa de que a defasagem entre as correntes capacitiva e resistiva (em fase com a tensão) será sempre de  $90^\circ$  (um quarto de ciclo), o que geralmente não é verdade como demonstrado por Heinrich & Hinrichsen (2001).

Karawita & Raghuveer (2006) propuseram um novo método para diagnóstico de para-raios baseado na componente fundamental da corrente resistiva. Para obter a corrente resistiva, os autores fazem uso de uma relação, verificada experimentalmente, entre o valor de pico da componente fundamental da corrente resistiva e a diferença de fases existente entre as correntes capacitiva e total, conforme mostrado na Figura 3.10. Os autores mostraram ainda, que esta relação é independente do nível de degradação do para-raios, da temperatura dos varistores e da influência de harmônicos na tensão, uma vez que a técnica baseia-se na componente fundamental da corrente. Outra característica dessa relação, é que ela é única para cada tipo de para-raios. A partir da solução de um conjunto de equações por meio de um método iterativo e curvas obtidas em laboratório para determinado projeto de para-raios, é possível estimar o valor de pico da corrente resistiva. Apesar dos bons resultados reportados pelos autores, a técnica apresenta o inconveniente de necessitar de ensaios em laboratório para determinar as curvas utilizadas no método iterativo e que relacionam a corrente resistiva e a diferença de fases. A aplicação prática desta técnica está limitada à necessidade de se ensaiar, previamente, todos os para-raios a serem monitorados, para só então empregar a técnica.



**Figura 3.10** – Relação entre a corrente resistiva e a diferença de fases (KARAWITA; RAGHUVVEER, 2006).

Lira (2007) e Macedo (2010) desenvolveram um sistema de monitoramento remoto do nível de degradação dos para-raios baseado na medição e análise da sua corrente de fuga. Para a medição da corrente, o sistema utiliza um sensor indutivo com alta permeabilidade magnética baseado em ligas de composição nano-cristalina. A decomposição da corrente de fuga em suas componentes resistiva, capacitiva e harmônica de 3<sup>a</sup> ordem é realizada através da medição da defasagem entre os sinais de tensão e corrente no para-raios. Os sinais decompostos podem ser enviados, por meio de um sistema de comunicação sem fio, a um concentrador existente na sala de controle da subestação para tratamento posterior dos dados. A velocidade e exatidão das decomposições realizadas e a possibilidade de monitoramento remoto são as principais vantagens do sistema desenvolvido. Um fator que pode limitar sua aplicabilidade em campo é a necessidade de se obter uma referência da tensão no para-raios para que seja possível determinar a defasagem entre os sinais de tensão e corrente.

### 3.2.5.2 Discussões Gerais dos Métodos

Pelo exposto, torna-se evidente que existe uma série de técnicas de monitoramento de para-raios de ZnO, baseadas na análise da corrente de fuga. Algumas utilizam a decomposição da corrente total em suas componentes resistiva e capacitiva, outras realizam a decomposição harmônica, algumas utilizam métodos numéricos e computacionais associados ao conhecimento de determinadas características dos para-raios e, por fim, existem

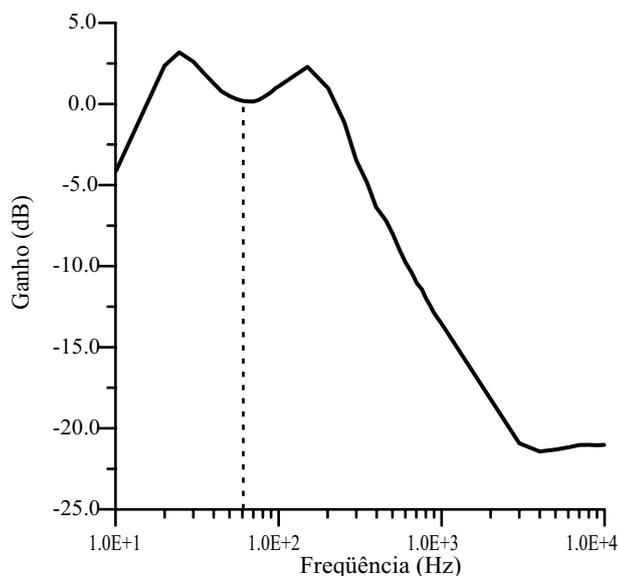
**Tabela 3.1** – Sinopse da revisão bibliográfica.

Referência	Proposição	Requisitos para aplicação
(SHIRAKAWA <i>et al.</i> , 1988)	Estima a corrente resistiva via 3 <sup>a</sup> harmônica da corrente total.	Corrente total, tensão sem harmônicos e fator de proporcionalidade.
(LUNDQUIST <i>et al.</i> , 1990)	Estima a corrente resistiva compensando harmônicos da tensão, medida por meio de sensor campo elétrico.	Corrente total, geometria da instalação (para-raios+linhas), equações empíricas e posicionamento adequado do sensor.
(COFEEN; MCBRIDE, 1991)	Cálculo da corrente resistiva através das perdas de potência e da tensão aplicada.	Medição da corrente total e da tensão aplicada.
(HINRICHSSEN, 1997)	Determina corrente resistiva quando $dv/dt = 0$ .	Medição da corrente total e da tensão aplicada.
(SPELLMAN; HADDAD, 1997)	Determina corrente resistiva a partir da tensão aplicada.	Medição da corrente total e da tensão aplicada.
(KLEIN <i>et al.</i> , 1999)	Sistema de medição <i>on-line</i> da corrente de fuga e impulsos de corrente.	Medição da corrente total, impulsos de corrente e da tensão aplicada.
(SOUZA, 2004)	Estima corrente resistiva a partir da compensação capacitiva via ponte virtual.	Medição da corrente total e da tensão aplicada.
(LEE; KANG, 2005)	Estima corrente resistiva a partir da total, considerando defasagem constante.	Medição da corrente e total premissas simplificadores sobre a defasagem das correntes.
(KARAWITA; RAGHUVVEER, 2006)	Estima corrente resistiva a partir da defasagem entre as correntes capacitiva e resistiva.	Medição da corrente total e conhecimento prévio da defasagem das correntes.
(LIRA, 2007)	Decomposição da corrente via medição da defasagem entre tensão e corrente total.	Medição da corrente total e da tensão aplicada.

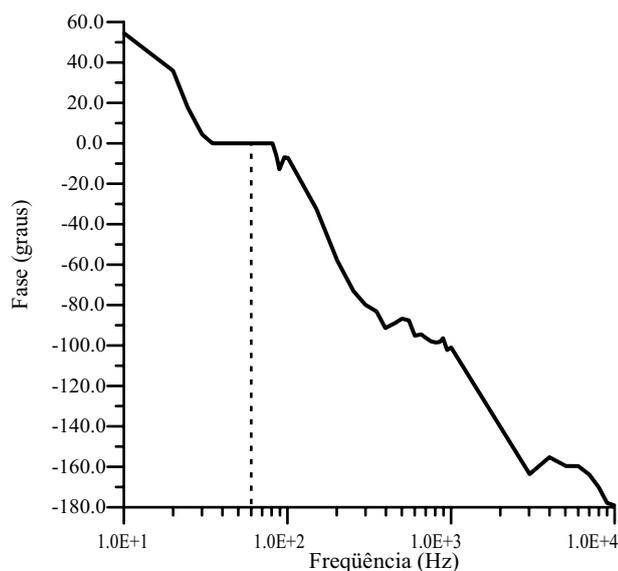
aqueles que são híbridas. Na Tabela 3.1 é apresentada uma sinopse do levantamento bibliográfico realizado sobre os trabalhos que abordam o monitoramento de para-raios via corrente de fuga, ou seja, aqueles que estão dentro do escopo desta pesquisa.

Conforme pode-se observar na Tabela 3.1, a maioria dos métodos de monitoramento de para-raios baseados na medição da corrente de fuga, requer a medição da tensão aplicada sobre o para-raios. Estes métodos estão sujeitos a alguns tipos de erros de medição que comprometem a confiabilidade dos resultados (CHRZAN; KOEHLER, 1999). Os erros de medição devem-se principalmente às capacitâncias dos cabos, resistências e capacitâncias de entrada do instrumento de medição (CHRZAN; KOEHLER, 1999). Além disso, tem-se

que a resposta dos equipamentos de medição, como os TPCs, geralmente não é exata quando se tem a presença de harmônicos na tensão, uma vez que este tipo de instrumento é ajustado para responder com ganho unitário e defasem nula somente para frequências próximas de 60 Hz, conforme pode ser visualizado nos gráficos da resposta em frequência de um TPC típico de 230 kV, mostrados nas Figura 3.11 e 3.12.

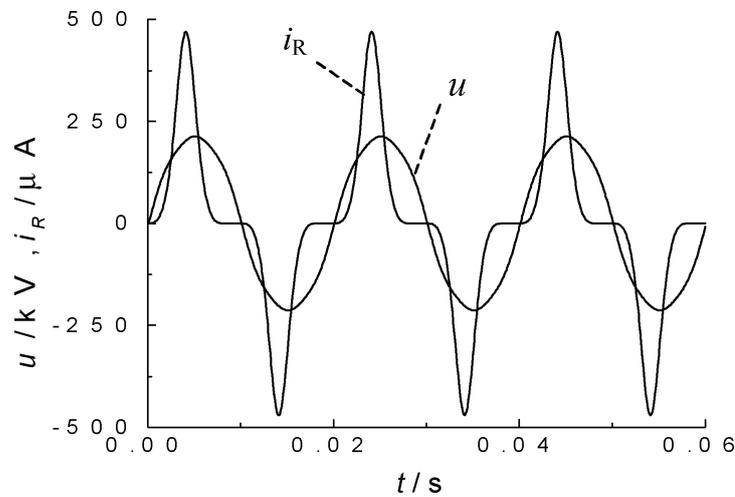


**Figura 3.11** – Amplitude da relação de tensão do TPC de 230 kV medida em laboratório (FERNANDES Jr., 2003).

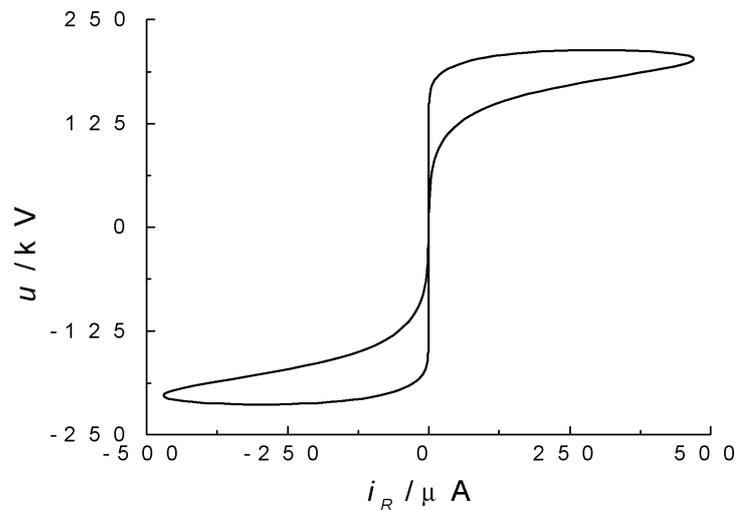


**Figura 3.12** – Fase da relação de tensão do TPC de 230 kV medida em laboratório (FERNANDES Jr., 2003).

Todos os métodos apresentados, baseados na decomposição da corrente de fuga, partem do pressuposto de que a corrente de fuga resistiva está em fase com a tensão aplicada. Contudo, foi verificado que existe uma defasagem e um fenômeno de histerese entre esses sinais (ZHAO *et al.*, 2005), de forma que, todos os métodos baseados na decomposição da corrente de fuga total, em suas componentes resistiva e capacitiva, incorrem em erros de estimação, que podem prejudicar o processo de monitoramento de para-raios. Nas Figuras 3.13 e 3.14 são exemplificadas a defasagem e a histerese entre os sinais de corrente resistiva e tensão aplicada, respectivamente.



**Figura 3.13** – Curvas da corrente resistiva e da tensão aplicada em um para-raios (ZHAO *et al.*, 2005).



**Figura 3.14** – Histerese entre a corrente resistiva e a tensão aplicada em um para-raios (ZHAO *et al.*, 2005).

Por fim, a maioria dos métodos apresentados são influenciados pela presença de harmônicos na tensão, os quais podem degenerar significativamente a estimação da componente resistiva da corrente ou de sua 3ª harmônica, a ponto da estimação da corrente de um para-raios degradado ser similar àquela de um para-raios novo (ZHU; RAGHUVVEER, 2001), impossibilitando o monitoramento ou diagnóstico do equipamento. Um dos métodos apresentados (LUNDQUIST *et al.*, 1990) (o comumente utilizado pelas empresas do setor elétrico) afirma realizar a compensação do 3º harmônico presente na tensão através de medições indiretas da 3ª harmônica da corrente capacitiva, por meio de sensores de campo elétrico. Este método resulta em erros de estimação da corrente devido: à pressuposição de que só existem harmônicos de 3ª ordem na tensão; à desconsideração da influência dos harmônicos de tensão na corrente resistiva (ZHU; RAGHUVVEER, 2001; KARAWITA; RAGHUVVEER, 2006); utilização de equações empíricas obtidas para determinadas configurações de para-raios em campo; e à necessidade do posicionamento adequado do sensor de campo elétrico por parte do operador do sensor (KARAWITA; RAGHUVVEER, 2006). Outros exemplos e análises comparativas de métodos de monitoramento e diagnóstico de para-raios por meio da análise da corrente podem ser encontrados em Brito *et al.* (2012).

Pelo exposto, torna-se evidente que ainda não existe um método de monitoramento de para-raios, baseado na análise da corrente de fuga, confiável, prático e preciso. É nesse contexto que este trabalho pretende fornecer uma contribuição para o estado da arte, ao propor um método capaz de realizar o monitoramento de para-raios de ZnO com base apenas na medição da corrente de fuga total, dispensando a medição da tensão aplicada sobre o para-raios, a decomposição da corrente total em suas componentes resistiva e capacitiva, o uso de premissas simplificadoras, o emprego de equações empíricas e conhecimento prévio de informações ou características dos para-raios, sejam elas obtidas nos catálogos do fabricante ou em ensaios prévios de laboratório. No Capítulo 5 é detalhado o método proposto.

### 3.3 Resumo

Neste capítulo, foi apresentado um levantamento do estado arte dos processos de falhas de para-raios de ZnO e das técnicas empregadas no seu monitoramento e diagnóstico. Ficou evidente que as principais causas de falhas em para-raios são a perda de estanqueidade com a consequente entrada de umidade no interior do para-raios e a poluição superficial, além é claro, de estresses elétricos decorrentes de sobretensões com alta energia. Os fatores de falhas conduzem a modificações físico-eletro-químicas nos para-raios e em seus componentes internos. Tais modificações, normalmente, provocam alterações na curva  $V \times I$  e na corrente de fuga total do para-raios, além de, elevações na temperatura interna e externa. Caso o para-raios entre em um ciclo de elevações de corrente de fuga e temperatura, será desencadeado um processo de avalanche que culminará no dano permanente do equipamento.

Foi mostrado também que, as principais técnicas de monitoramento e diagnóstico de para-raios são baseadas na análise da temperatura externa do invólucro e na medição e decomposição da corrente de fuga total. Deu-se ênfase, principalmente, às técnicas baseadas na medição da corrente de fuga, por elas estarem dentro do escopo do trabalho. Realizou-se uma discussão geral de vários métodos de monitoramento e diagnóstico baseados na medição da corrente de fuga, onde se pôde levantar as características, requisitos para aplicação e vantagens de cada um, assim como, as desvantagens e restrições para aplicação. Foi possível concluir ao final que, dentre os trabalhos encontrados na literatura e analisados aqui, não existia um método de monitoramento e diagnóstico de para-raios confiável, prático e acurado, sendo esta a principal justificativa para o desenvolvimento desta Tese.

# Capítulo 4

## Ensaio e Medições

Este capítulo trata das atividades de planejamento, montagem e execução de ensaios de laboratório necessários ao desenvolvimento e aplicação da técnica de monitoramento de para-raios proposta.

Inicialmente, são apresentadas e avaliadas as amostras de para-raios utilizadas nos ensaios. A avaliação se deu em termos de inspeções visuais minuciosas dos equipamentos e análises das suas características elétricas.

No processo de avaliação foram detectados tanto defeitos físicos quanto elétricos nas amostras. Assim, deu-se início ao processo de desmontagem dos equipamentos visando a realização de uma análise mais aprofundada, baseada em ensaios de caracterização de todos os blocos varistores pertencentes às amostras avaliadas.

Após o processo de avaliação, foram escolhidos os melhores blocos para montagem de alguns para-raios. Realizou-se, então, a caracterização dos para-raios montados e, em seguida, deu-se início ao processo de inserção artificial de defeitos e aplicação da máxima tensão de operação contínua (MCOV), objetivando a medição da corrente de fuga correspondente a cada defeito inserido nos para-raios.

### 4.1 Para-raios de ZnO Avaliados

Para realização dos ensaios em laboratório foram disponibilizados, por algumas concessionárias de energia elétrica, 08 para-raios da Siemens com tensão nominal de 96 kV e 02 para-raios de 72 kV da Hitachi. Os para-raios de 96 kV e 72 kV serão denominados, daqui em diante, de para-raios do tipo A e B, respectivamente. Na Tabela 4.1 são apresentados

os dados técnicos dos para-raios A e B, respectivamente. Na Figura 4.1 são apresentadas fotografias de amostras dos para-raios do tipo A e B.

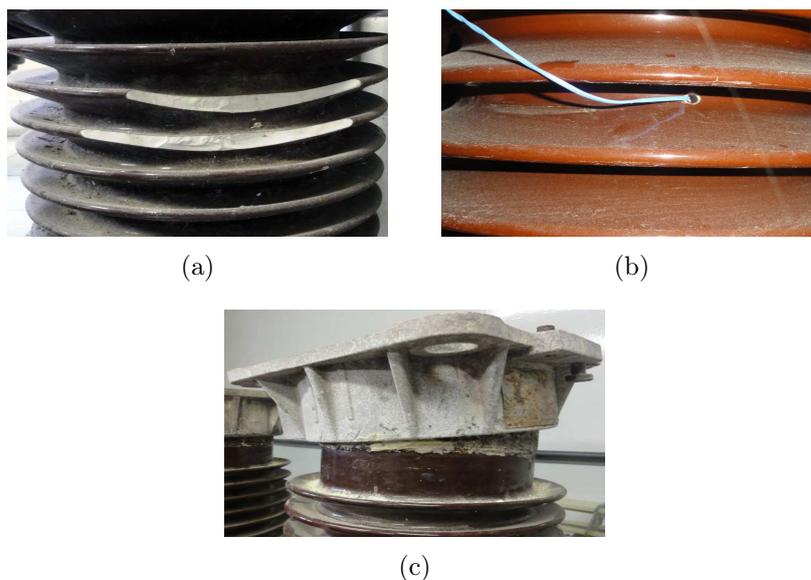
**Tabela 4.1** – Dados técnicos dos conjuntos de varistores.

Dados técnicos/Para-raios	Tipo A	Tipo B
Tensão nominal	96 kV	72 kV
Tensão de operação contínua	76,5 kV	42 kV
Corrente nominal de descarga	20 kA	20 kA
Tensão residual para impulso atmosférico de 5 kA	212 kV	-
Tensão residual para impulso atmosférico de 10 kA	226 kV	-
Tensão residual para impulso atmosférico de 20 kA	248 kV	180 kV



**Figura 4.1** – Fotografias de amostras dos para-raios avaliados.

Ao se realizar uma inspeção visual nos para-raios disponíveis, foram constatados alguns problemas, tais como: para-raios com porcelana quebrada (ver Figura 4.2(a)) ou perfurada (ver Figura 4.2(b)); alguns estavam abertos em função de ensaios anteriores (ver Figura 4.2(c)); e outros estavam bastante sujos devido a um mau acondicionamento (ver Figura 4.2(a)).



**Figura 4.2** – Fotografias de alguns para-raios avaliados com: (a) Porcelana quebrada e suja; (b) Porcelana perfurada; e (c) Flange solta.

## 4.2 Abertura dos Para-raios

Após a inspeção visual, decidiu-se por desmontar completamente os para-raios com problemas aparentes, retirando as colunas de varistores.

Os para-raios que já se encontravam abertos, devido a ensaios anteriores, tiveram apenas suas flanges retiradas de forma a permitir a saída da coluna de varistores. Os para-raios que possuíam danos na porcelana foram descartados, sendo aproveitados apenas alguns blocos varistores. Aqueles que possuíam as flanges fixadas à porcelana, por meio de uma junta com aglomerante de vedação, passaram por um processo de fundição do aglomerante de forma a permitir a liberação da flange. No processo de retirada da flange, o para-raios foi colocado na posição horizontal sob uma superfície de apoio, em seguida, foi utilizado um maçarico para fundir o aglomerante da junta até o total desprendimento da flange. Após o resfriamento das partes metálicas e da porcelana, foi possível retirar a coluna de varistores.

Outro conjunto de para-raios possuía as flanges fixadas à porcelana por meio de buchas e parafusos, conforme mostrado na Figura 4.3. Neste caso, colocou-se o para-raios na posição horizontal e realizou-se o desprendimento das flanges por meio da retirada dos

parafusos de fixação. Em seguida, retirou-se, do interior do invólucro de porcelana, a coluna de varistores.



**Figura 4.3** – Fotografia do sistema de fixação da porcelana à flange.

Um total de 226 blocos varistores foram obtidos após a abertura dos para-raios. Muitos foram descartados por apresentarem problemas como: carbonização do colar isolante (ver Figura 4.4(a)) e da superfície metálica, rachaduras e trincas, além de desgaste do material devido a reações químicas (ver Figura 4.4(b)). Alguns outros varistores, que apresentavam sinais de oxidação e depósito de materiais na sua superfície, foram lixados e limpos com a finalidade de verificar se as propriedades eletro-térmicas mantinham-se próximas das nominais. Na Figura 4.5(a) é apresentada a fotografia de um varistor nas condições de degradação descritas anteriormente, enquanto na Figura 4.5(b), tem-se o mesmo varistor após o processo de lixagem e limpeza. Conforme pode-se notar, o varistor ficou com aparência semelhante à de um varistor em bom estado. Esse procedimento foi realizado para todos os varistores, tendo-se sempre o cuidado de manter o mais intacto possível o colar isolante e a superfície metálica de contato dos varistores.



**Figura 4.4** – Fotografias de varistores com colar isolante: (a) Carbonizado; e (b) Degradado por reações químicas.



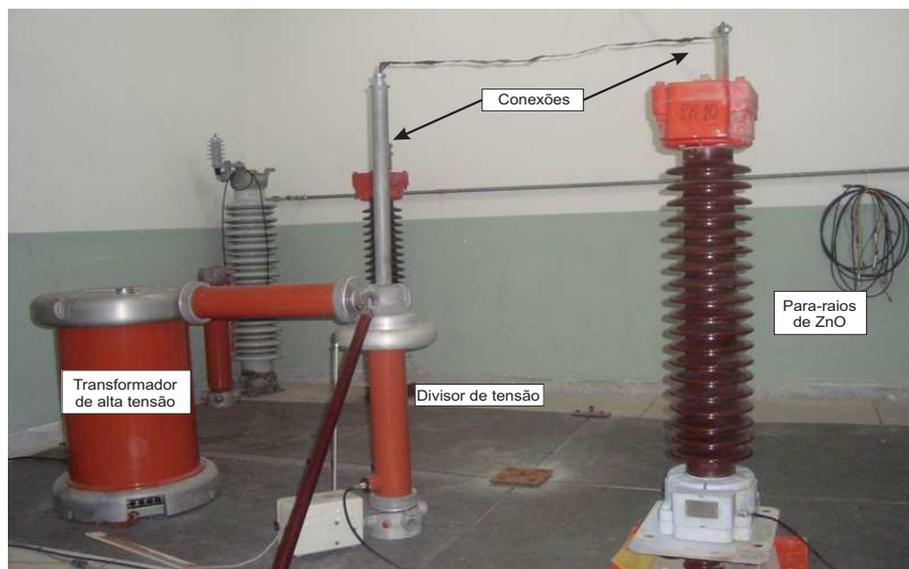
**Figura 4.5** – Fotografias de varistores: (a) Oxidado; e (b) Lixado e limpo.

Os varistores selecionados foram numerados e divididos em grupos de acordo com o equipamento ao qual pertenciam, para que futuramente fosse possível organizar adequadamente os ensaios de caracterização das pastilhas e identificar os problemas intrínsecos de cada para-raios. A seguir, é apresentado o procedimento adotado na caracterização dos varistores e para-raios.

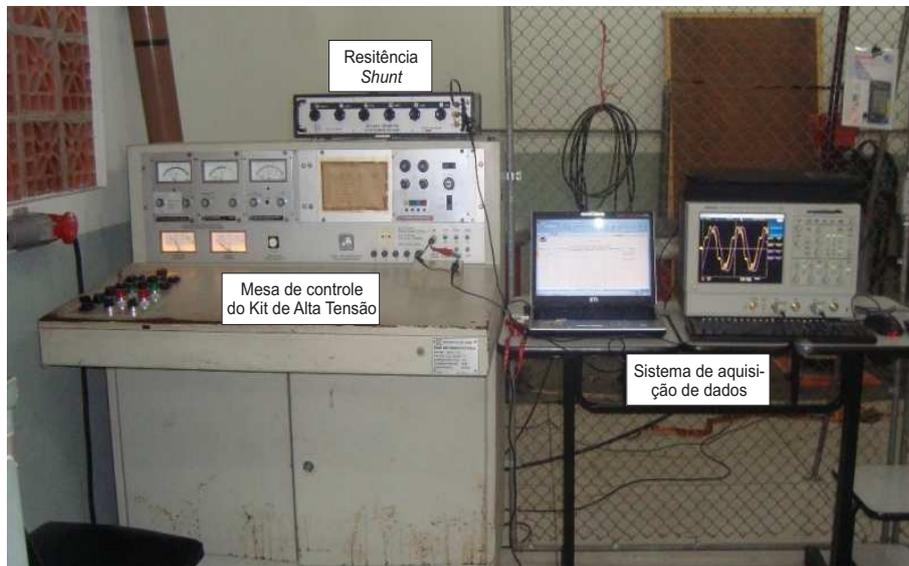
### 4.3 Ensaios de Caracterização

Este ensaio tem por finalidade submeter os varistores de ZnO (ou para-raios) a níveis crescentes de tensões na frequência industrial. Para cada nível de tensão aplicado, mede-se a corrente que percorre o para-raios. Com os pares de tensão e corrente é possível determinar a curva característica de cada varistor na região de baixa corrente da curva  $V \times I$  do para-raios. Estes ensaios foram realizados com o auxílio do Kit de Alta Tensão

existente no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Fotografias do Kit de Alta Tensão com o arranjo experimental, da sua mesa de controle e do sistema de aquisição de dados utilizado no ensaio são mostradas na Figura 4.6.



(a)



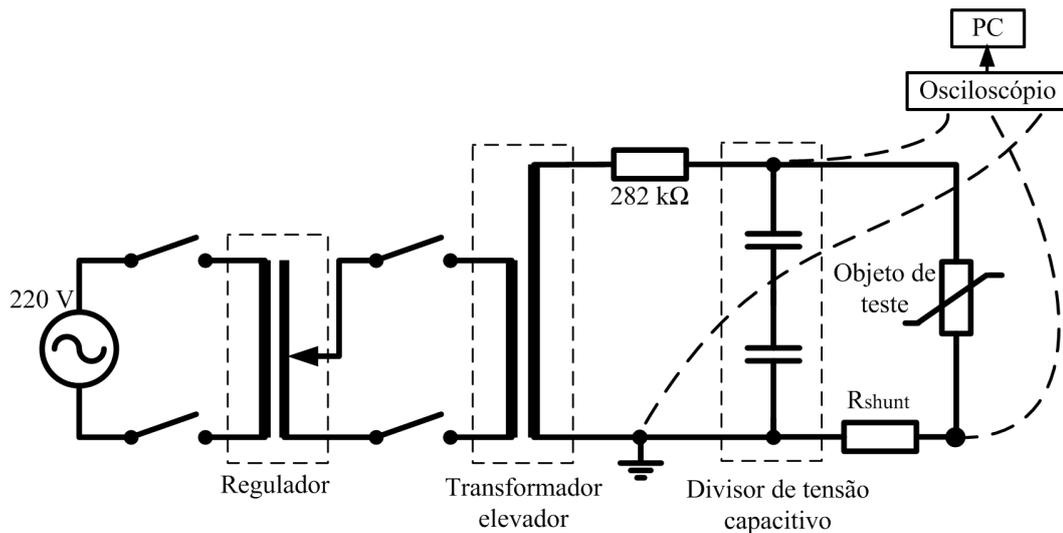
(b)

**Figura 4.6** – Fotografias: (a) Arranjo experimental; e (b) Mesa de controle e sistema de aquisição de dados.

O diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado no ensaio de caracterização dos blocos varistores e dos para-raios é mostrado na Figura 4.7. O circuito, basicamente,

é composto por uma fonte de tensão senoidal regulável (tensão de 0 a 220 V), um transformador elevador de tensão (tensão de 0 a 100 kV), uma resistência de proteção  $R$  (282 k $\Omega$ ) em série com um varistor (objeto de teste) e com uma resistência “shunt” ( $R_{shunt}$ ) de 1 k $\Omega$ . A fonte de tensão utilizada atende aos requisitos da norma IEEE (1995) para ensaios em alta tensão, a qual determina que a distorção máxima da fonte corresponde a razão entre os valores de pico e RMS da tensão, devendo ser aproximadamente igual  $\sqrt{2}$  com tolerância de  $\pm 5\%$ . Com isso, minimiza-se o efeito da inserção de componentes harmônicos externos nas medições.

Os sinais de tensão e corrente no varistor são medidos através de um divisor capacitivo (relação de aproximadamente 1917,6 para 1) e uma resistência “shunt” ( $R_{shunt}$ ), respectivamente, em conjunto com um sistema de aquisição de dados, formado essencialmente por pontas de prova e um osciloscópio digital com banda passante de 1 GHz. Os sinais de corrente medidos são, então, armazenados em um PC para tratamento posterior.



**Figura 4.7** – Esquema do arranjo experimental utilizado no ensaio de caracterização.

Durante os ensaios foram observadas características bem distintas entre as pastilhas ensaiadas que, em tese, deveriam apresentar comportamentos semelhantes, pois pertenciam a um mesmo equipamento ou um similar. Na Figura 4.8 essas diferenças podem ser verificadas, evidenciando assim, vários níveis de degradação dos blocos. Com base nessas análises parciais, aparentemente seria necessário reduzir a quantidade de varistores selecionados, *a priori*, deixando apenas aqueles com características bem semelhantes en-

tre si e próximas das nominais. Entretanto, como muitos blocos apresentavam excesso de umidade, resolveu-se colocá-los em uma estufa na temperatura de aproximadamente  $60^{\circ}\text{C}$  por 72 horas. Ao realizar os ensaios de caracterização nos varistores que passaram pelo processo de secagem foi observado uma melhoria significativa nas suas características elétricas, conforme fica evidente na Figura 4.9, onde são mostradas as curvas características de um varistor típico avaliado antes e após o processo de secagem na estufa.

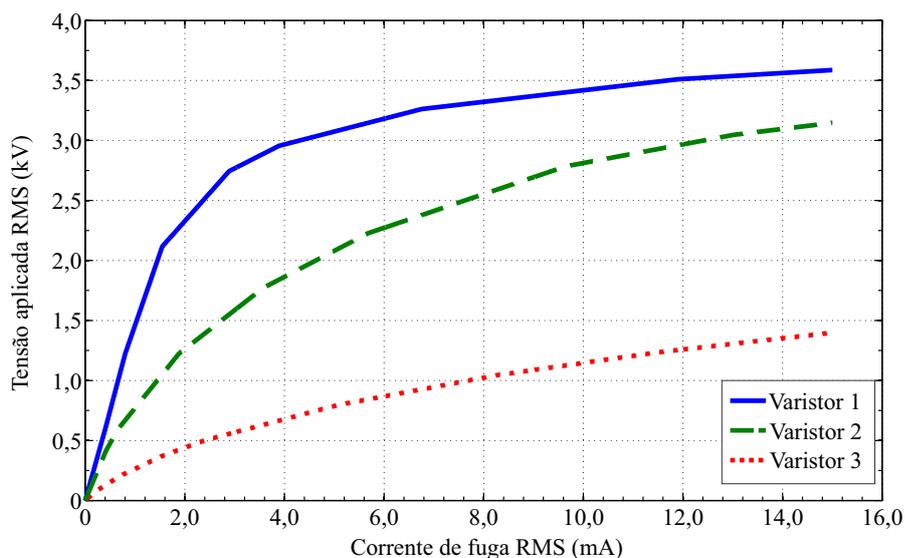


Figura 4.8 – Comparação das características de varistores de um para-raios do tipo A.

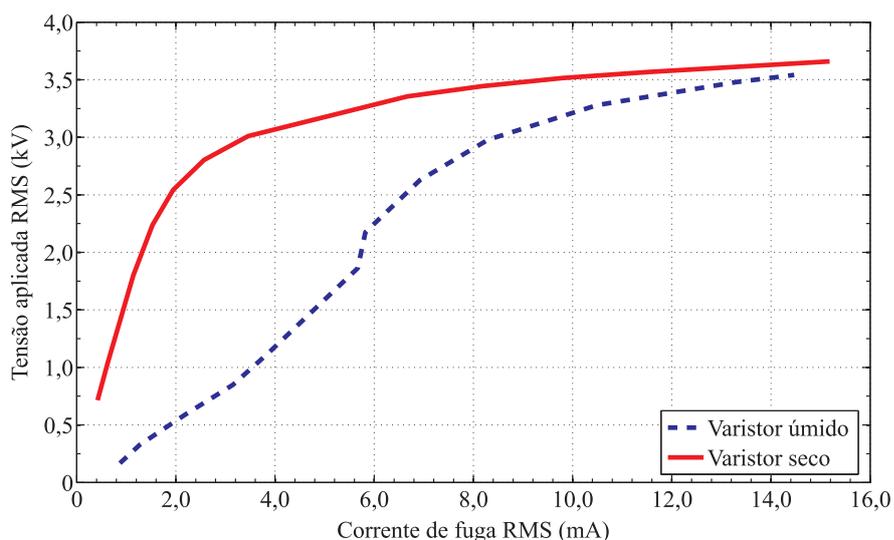


Figura 4.9 – Comparação das características de um varistor após secagem.

## 4.4 Fechamento dos Para-raios

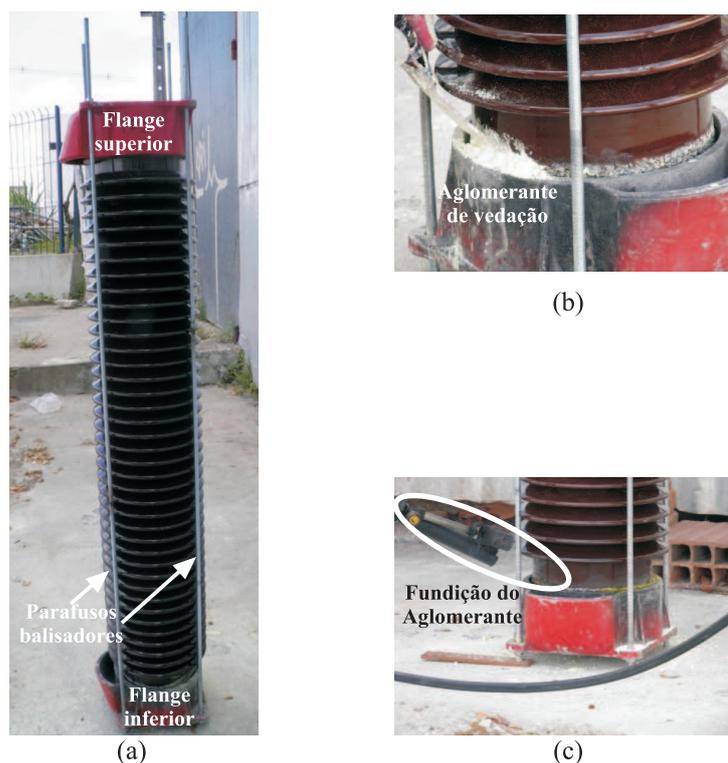
Ao término do processo de caracterização dos varistores de ZnO, foi possível selecionar uma quantidade suficiente de blocos para montar quatro para-raios com características físicas e elétricas semelhantes, sendo dois do tipo A e dois do tipo B.

Na montagem dos para-raios, inicialmente os blocos foram dispostos e alinhados em forma de coluna seguindo o projeto original do equipamento, isto é, a quantidade e localização dos blocos varistores, espaçadores e absorvedores por região foram mantidas. Na Figura 4.10 tem-se a fotografia de uma coluna de varistores pronta para ser colocada no interior da coluna de porcelana do para-raios do tipo A.



**Figura 4.10** – Coluna de blocos varistores de ZnO.

Após a montagem da coluna de varistores, iniciou-se ao processo de fechamento do para-raios. No caso dos para-raios do tipo A, colocou-se a coluna ativa no interior do invólucro de porcelana e fixou-se as flanges metálicas superior e inferior com o auxílio de parafusos balisadores, conforme mostrado na Figura 4.11 (a). Estes parafusos garantiram a acomodação e o alinhamento adequados das flanges superior e inferior na porcelana. Na sequência, foi inserido um aglomerante à base de enxofre nas lacunas existentes entre a porcelana e as flanges (ver Figura 4.11 (b)), e em seguida, este aglomerante foi fundido com um maçarico (ver Figura 4.11 (c)) de forma a possibilitar a vedação completa do para-raios. Ao término deste processo, o para-raios encontrava-se montado e pronto para ser ensaiado.

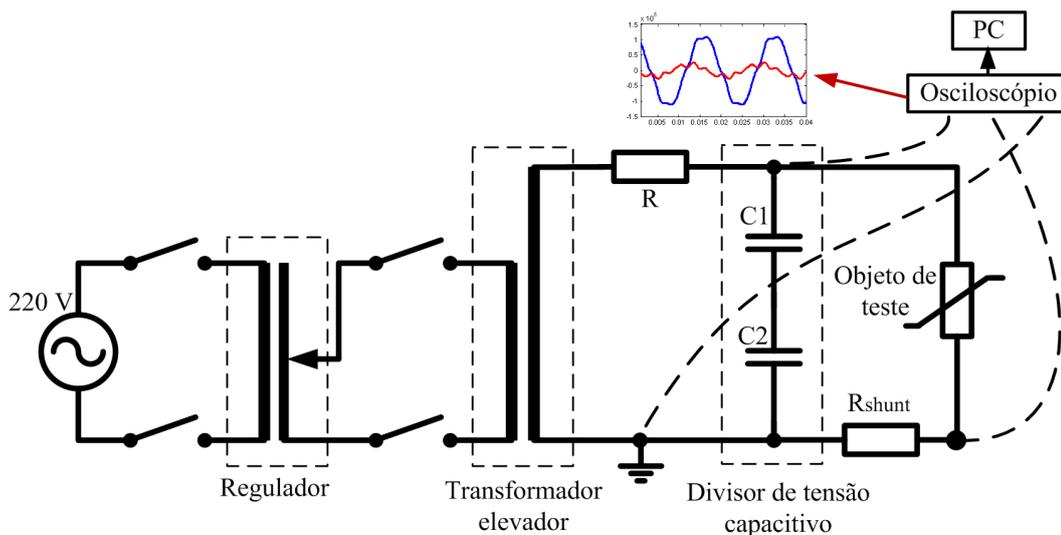


**Figura 4.11** – Fotografias: (a) Para-raios com flanges fixadas; (b) Colocação do aglomerante; e(c) Fundição do aglomerante.

O processo de fechamento dos para-raios do tipo B foi relativamente mais simples, uma vez que dispensou o uso da fundição de aglomerantes de vedação. Foi necessário apenas, inserir a coluna de varistores no interior do invólucro de porcelana, alinhá-la por meio de uma conexão mecânica existente na flange superior e, então, fixar as flanges à porcelana por meio de parafusos e buchas apropriados, os quais acompanham o para-raios.

## 4.5 Ensaio de Aplicação da MCOV

Após a montagem e fechamento dos para-raios, deu-se início ao processo de obtenção dos dados necessários ao desenvolvimento, implementação e teste da técnica proposta. Estes dados nada mais são do que a forma de onda da corrente de fuga total do para-raios de ZnO. Para obter o sinal de corrente, foi realizado o ensaio de aplicação da Máxima de Tensão de Operação Contínua (MCOV) do para-raios. Esta tensão é aquela que pode ser continuamente aplicada ao equipamento sem lhe causar danos. O diagrama do arranjo experimental empregado neste ensaio é mostrado na Figura 4.12.



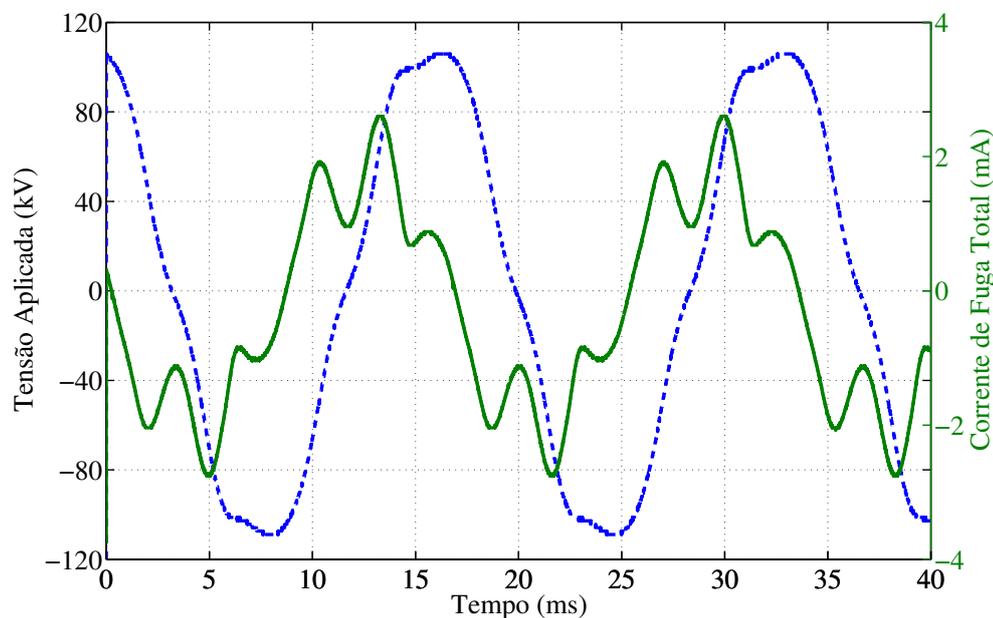
**Figura 4.12** – Diagrama do arranjo experimental utilizado na medição da corrente de fuga.

O arranjo experimental empregado neste ensaio é igual àquele utilizado no ensaio de caracterização (apresentado na Seção 4.3). Assim, serão comentadas apenas as principais diferenças entre os procedimentos adotados nos testes. A primeira delas refere-se ao fato de que as tensões sobre os para-raios foram mantidas aproximadamente constantes durante o ensaio, com valores iguais a 77 kV para o para-raios tipo A e 42 kV para o tipo B. Esses níveis de tensão correspondem à MCOV dos equipamentos ensaiados.

Antes de iniciar a aquisição dos sinais de corrente através do conjunto resistência *shunt*, osciloscópio e PC, resolveu-se manter o para-raios energizado por cerca de duas horas, com a finalidade de fazê-lo atingir sua estabilidade térmica e elétrica. Após este tempo, iniciou-se a aquisição da forma de onda da corrente em intervalos regulares de aproximadamente 10 minutos.

Na Figura 4.13, é apresentada a forma de onda medida da corrente de fuga total de um para-raios de ZnO, em função da tensão aplicada. Nela é possível observar as distorções no sinal de corrente causadas pela característica não linear do para-raios, assim como, pela distorção harmônica existente na tensão. Durante os ensaios de aplicação da MCOV, tanto a amplitude da tensão variou (no máximo 0,8% do valor desejado), quanto a distorção harmônica total (no máximo 0,7%). Além disso, houve variações na temperatura ambiente (entre 25 e 30 graus Celsius) e na umidade (de 55% a 80%). Todas essas variações influenciam na forma e amplitude da corrente de fuga total, caracterizando

assim, um maior grau de dificuldade no processo de identificação do estado de operação de para-raios de ZnO.



**Figura 4.13** – Gráficos da tensão aplicada e da corrente de fuga total no para-raios.

## 4.6 Inserção de Defeitos nos Para-raios

Nesta seção, são descritos os tipos de defeitos inseridos artificialmente nos para-raios avaliados com objetivo de simular defeitos reais que possam ocorrer durante a sua operação em campo, e com isso, avaliar a capacidade da técnica apresentada no próximo capítulo, em distinguir entre diversos estados de operação de para-raios de ZnO.

A escolha dos defeitos baseou-se em alguns estudos reportados na literatura, nos quais foram descritos problemas em para-raios relacionados principalmente à: poluição superficial, perda de estanqueidade e degradação dos blocos varistores. Além destes defeitos, foram avaliados também a presença de umidade interna no para-raios, a distribuição irregular de tensão ao longo da coluna ativa e o desalinhamento da coluna ativa. Os dois primeiros são muitas vezes decorrentes da perda de estanqueidade e da poluição superficial (KNOBLOCH *et al.*, 1991; FESER *et al.*, 1991; CHRZAN, 2004), mas também podem ser decorrentes de falhas na fabricação. Além dos estudos encontrados na literatura, levou-se em consideração a experiência adquirida pelo grupo de pesquisa, em trabalhos passados

(WANDERLEY NETO, 2007; WANDERLEY NETO *et al.*, 2009; LIRA *et al.*, 2010) e alguns relatos de profissionais da área, na simulação, inclusive, de defeitos menos comuns como o desalinhamento da coluna ativa.

Os defeitos típicos propostos podem não corresponder a todos os tipos de defeitos existentes em para-raios durante sua operação em campo, contudo foram aqueles dos quais se obtiveram relatos. A maior dificuldade de se realizar um levantamento aprofundado dos tipos de defeitos em para-raios, deve-se ao fato de que as equipes de manutenção das concessionárias de energia elétrica, ao detectarem anomalias, simplesmente retiram o equipamento de operação realizando a substituição por um novo. Por vezes, nenhum estudo posterior é realizado para identificar as causas do defeito detectado e mesmo quando isso acontece, os relatórios, ou informes decorrentes das análises, dificilmente são publicados ou divulgados ao público em geral. Apesar disso, espera-se que os defeitos propostos correspondam à maioria dos defeitos encontrados em campo.

A seguir, são descritos os defeitos inseridos artificialmente nos para-raios avaliados. Eles são apresentados na sequência na qual foram inseridos. Esta sequência visou diminuir o processo de preparação das amostras, especialmente os tempos envolvidos na montagem e desmontagem de para-raios, além do tempo de secagem dos varistores em estufa. Por exemplo, caso o primeiro defeito a ser inserido fosse umidade interna, seria necessário aguardar o tempo de secagem dos blocos varistores em estufa para realizar os ensaios com os demais tipos de defeitos. Nesse período de tempo, os recursos humanos e físicos (estrutura de laboratório) estariam ociosos.

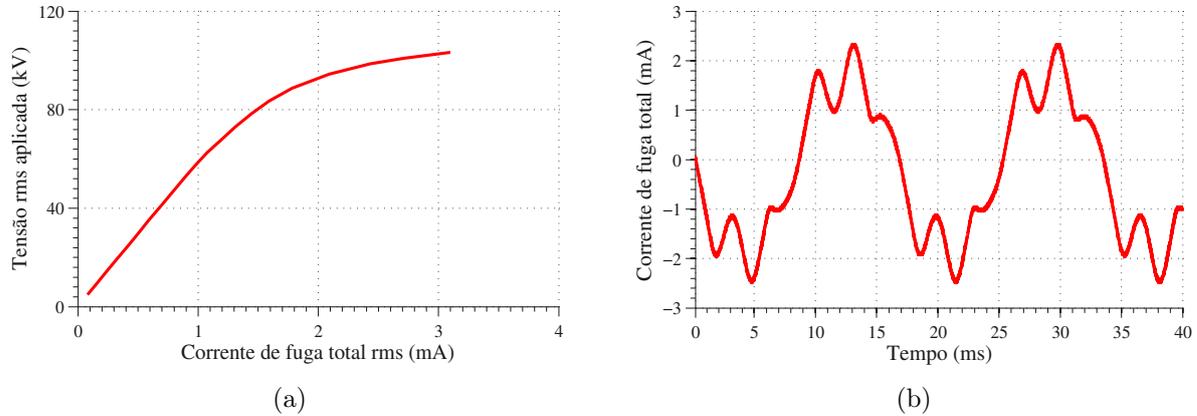
• **Perda de estanqueidade** - Um para-raios perde sua estanqueidade quando ocorre a existência de um canal aberto entre os meios interno e externo do equipamento, ou seja, quando a isolamento entre os meios é falha ou ineficiente. Este defeito pode ocorrer devido ao desgaste do anel de vedação das flanges dos para-raios, a fissuras na porcelana ou deterioração (oxidação, por exemplo) das flanges. A perda de estanqueidade favorece, portanto, a entrada e saída de compostos além da circulação de ar. Isto tem implicações sérias tanto no comportamento térmico do para-raios quanto em seu comportamento elétrico, de forma que a confiabilidade do equipamento é reduzida sensivelmente.

Ao permitir a circulação de ar o sistema de alívio de pressão que tem a função de evitar a explosão da porcelana devido a uma elevação da pressão interna do para-raios pode não funcionar adequadamente, uma vez que o ar pressurizado pode vaziar por canais indesejados, não exercendo pressão suficiente no diafragma (dispositivo que ao romper cria um canal permanente entre os meios interno e externo do para-raios) do sistema de alívio e portanto, não causando a ruptura do mesmo. Com isso, mesmo a pressão interna mantendo-se elevada pode não ser suficiente para romper o diafragma. A pressão interna elevada produzirá uma elevação na temperatura interna e conseqüentemente uma elevação na corrente de fuga do para-raios, pois a corrente também é função da temperatura. Uma corrente mais elevada produzirá um maior aquecimento nos blocos varistores devido ao efeito Joule e este aquecimento elevará a temperatura e pressão internas, de forma que este ciclo de elevações de corrente, temperatura e pressão poderão conduzir a uma explosão súbita do equipamento ou de seus componentes internos.

A entrada de compostos por sua vez, pode vir a modificar sensivelmente a característica  $V \times I$  do para-raios produzindo elevações indesejadas na corrente de fuga e um conseqüente aumento na temperatura interna do para-raios, que no mínimo causará uma diminuição da sua vida útil. Outro problema da entrada de compostos devido à perda de estanqueidade é o surgimento de descargas parciais internas que levarão a uma degradação prematura dos componentes internos do para-raios, em especial, os varistores de óxido de zinco (KNOBLOCH *et al.*, 1991; CHRZAN, 2004).

Neste trabalho, não foi possível simular este defeito adequadamente, pois não se dispunha de para-raios novos, nos quais pudessem ser criados canais artificiais de comunicação entre os meios interno e externo, caracterizando assim, a perda de estanqueidade. Só estavam disponíveis para-raios já abertos em ensaios anteriores ou retirados do serviço, justamente por apresentar perda de estanqueidade. Logo, considerou-se que todos os para-raios avaliados já estavam com perda de estanqueidade. Dessa maneira, resolveu-se adotar o estado inicial de perda de estanqueidade do para-raios (obtido logo após a montagem do equipamento), como o bom estado de operação, uma vez que, não se dispunha de para-raios realmente em bom estado de operação. Na Figura 4.14 são mostrados uma curva característica e um sinal de corrente típicos, obtidos de para-raios do tipo A em “bom”

estado de operação (essas curvas serão tomadas como referências em todas comparações realizadas adiante).



**Figura 4.14** – Curvas típicas de um para-raios do tipo A com perda de estanqueidade/bom estado: (a) Curvas  $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total.

- **Poluição superficial** - A poluição superficial é um problema comum não apenas em para-raios, mas em grande parte dos equipamentos ou estruturas que necessitam prover um nível mínimo de isolamento entre terminais com diferentes níveis de tensão, como é o caso de isoladores e buchas de equipamentos em geral.

A poluição superficial nos para-raios modifica a distribuição de campo elétrico e tensão ao longo do seu invólucro, produzindo descargas superficiais, internas ou parciais e elevação da corrente superficial, as quais contribuem para uma degradação prematura do para-raios (FESER *et al.*, 1991).

As distribuições não uniformes de campo elétrico e tensão ao longo da coluna devem-se principalmente à formação de bandas secas ou à condução de corrente superficial ao longo do invólucro. As bandas secas são regiões do invólucro compreendidas entre regiões com maior grau de poluição. Os diferentes níveis de poluição modificam a distribuição de tensão ao longo do invólucro que, devido ao acoplamento capacitivo entre a porcelana e a coluna de varistores, submetem os varistores próximos das bandas secas a estresses termo-elétricos excessivos, os quais poderão conduzir a uma degradação prematura dos varistores (FESER *et al.*, 1991).

A intensidade da corrente superficial e da corrente interna no para-raios poluído vai depender dos níveis de poluição sobre o invólucro, da resistividade da poluição e da loca-

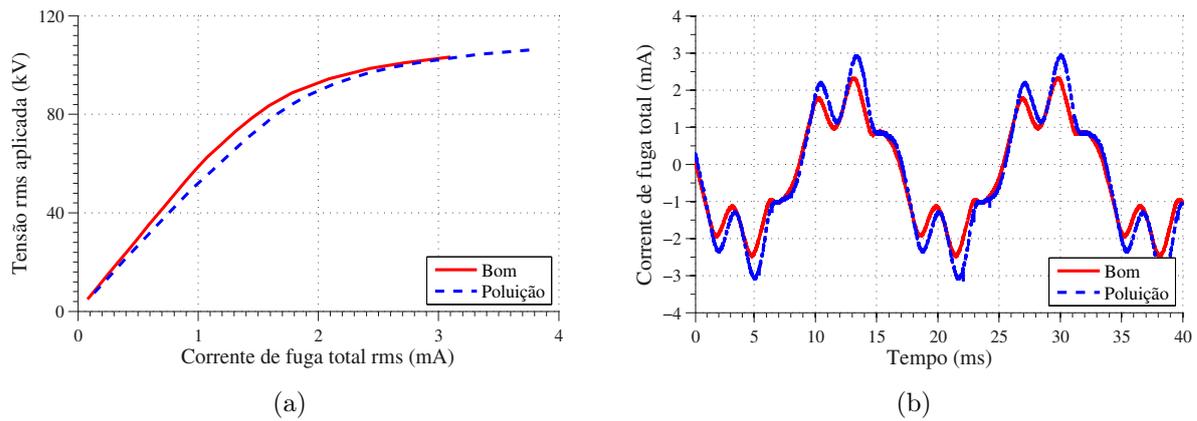
lização das bandas secas (FESER *et al.*, 1991). Corrente elevadas também causam estresses termo-elétricos nos varistores diminuindo sua vida útil. A presença de poluição na superfície da porcelana dos para-raios é uma das causas comuns de falhas ou aquecimento excessivo destes equipamentos em subestações.

Para simular este defeito em laboratório, borrifou-se, por toda superfície do para-raios, uma mistura salina à base de bentonita (40 g/L de água), cloreto de sódio (5 g/L de água) e água, com condutividades de aproximadamente 10 mS/cm, conforme indicado em Feser *et al.* (1991). Na Figura 4.15 são mostradas fotografias de um para-raios do tipo B sendo borrifado com a mistura salina, e seu estado, após o processo de secagem da mistura.



**Figura 4.15** – Fotografias: (a) Borrifando poluição no invólucro; e (b) Estado do invólucro após secagem da poluição.

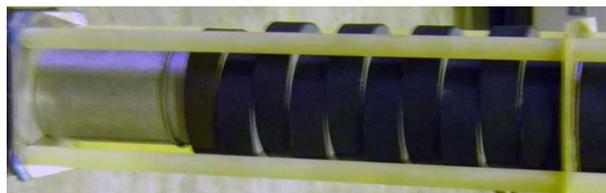
Na Figura 4.16, são apresentados uma curva  $V \times I$  e um sinal de corrente de fuga total típicos de um para-raios tipo A poluído. É possível observar nos gráficos modificações sutis tanto na curva  $V \times I$  quanto no sinal de corrente fuga medido, se comparado com o para-raios em bom estado. A elevação na corrente de fuga deveu-se ao aumento da condutividade na porcelana em decorrência do depósito de poluição. As distorções na forma de onda são similares aquelas dos para-raios em bom estado, pois houve incremento mais expressivo da componente capacitiva da corrente e ao invés da componente resistiva, a qual distorce o sinal de corrente. Contudo, em situações mais severas de poluição pode-se haver uma elevação significativa da componente resistiva, conforme mostrado no Capítulo 3.



**Figura 4.16** – Curvas típicas de um para-raios do tipo A com poluição superficial: (a) Curvas  $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total.

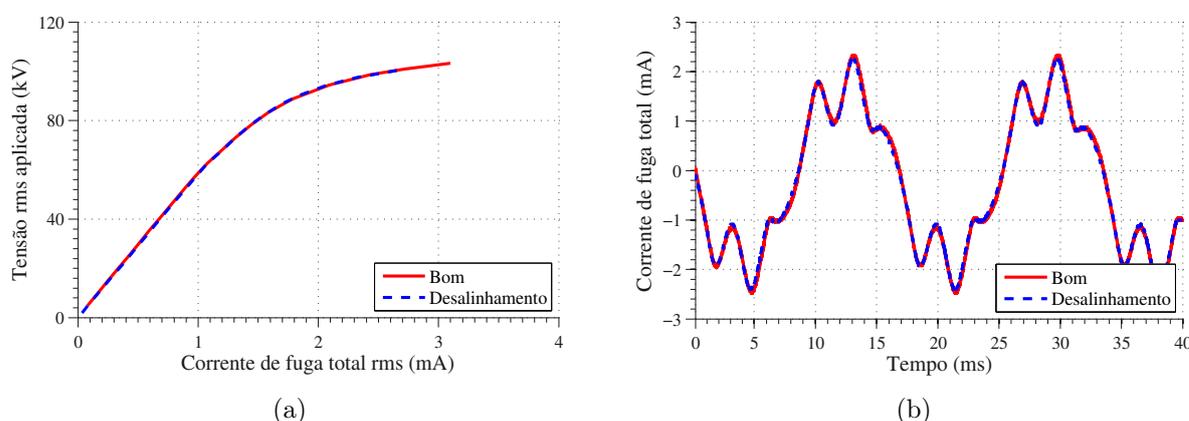
• **Desalinhamento da coluna ativa** - O desalinhamento dos varistores ao longo da coluna é um defeito pouco comum, embora seja observado em alguns equipamentos após sua abertura. Geralmente é resultado do transporte e armazenamento inadequado do equipamento, mas pode também ser decorrente de uma falha durante a montagem do para-raios. Esta última possibilidade, no entanto, apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa, já que a maioria dos fabricantes de para-raios de alta tensão apresenta um alto nível de controle de qualidade no processo de montagem. O desalinhamento dos varistores provoca o surgimento de caminhos condutivos preferenciais nas regiões em que eles fazem contato, de forma que há um sobreaquecimento nessas regiões provocando o seu desgaste prematuro. Para reduzir o risco de ocorrência deste problema, é importante observar com rigor as condições de transporte e armazenamento dos para-raios, principalmente aqueles que já estão há algum tempo em estoque.

Na simulação deste defeito, foram realizados descolamentos nos varistores com a finalidade de simular tanto o efeito da acomodação horizontal, devido à armazenagem inadequada, quanto o efeito das trepidações durante o transporte. Na Figura 4.17 é mostrada uma fotografia de uma coluna ativa com este tipo de defeito. Este defeito foi simulado apenas nos para-raios do tipo A, uma vez que, os do tipo B não dispunham de espaço suficiente entre os varistores, as haste de sustentação e a parte interna da porcelana, que permitisse o desalinhamento da coluna.



**Figura 4.17** – Fotografia de uma coluna de varistores desalinhada.

Na Figura 4.18, são apresentados uma curva  $V \times I$  típica de um para-raios tipo A com coluna ativa desalinhada e o gráfico de um sinal de corrente de fuga total. A curva  $V \times I$  está praticamente sobreposta àquela do para-raios em bom estado. O sinal de corrente de fuga total também não apresenta modificações significativas com relação ao sinal do para-raios em bom estado de operação. Isto deve-se ao fato de que, boa parte de área de contato dos varistores foi mantida após o desalinhamento. Logo, só com o passar do tempo é que essas áreas de contato serão deterioradas e modificações significativas no comportamento do para-raios serão percebidas. Conforme será mostrado mais adiante, no capítulo de resultados, mesmo situações como essa, com variações praticamente imperceptíveis das características elétricas, serão detectadas pelo sistema proposto.



**Figura 4.18** – Curvas típicas de um para-raios do tipo A com desalinhamento da coluna ativa: (a) Curvas  $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total.

- **Distribuição irregular de tensão** - A distribuição irregular de tensão é característica de equipamentos elétricos que apresentam um maior comprimento, havendo um maior distanciamento entre os terminais de alta e baixa tensão. Nos para-raios, ela se evidencia pela ocorrência de níveis mais altos de tensão nos varistores próximos ao terminal

de alta tensão, enquanto que os varistores mais próximos do terminal aterrado são submetidos a níveis menores de tensão. Os gradientes de tensão são causados normalmente por capacitâncias parasitas ao longo do invólucro e o acoplamento capacitivo entre a coluna de varistores e a superfície (normalmente poluída) da porcelana.

Uma solução relativamente simples para reduzir os efeitos das capacitâncias parasitas é a utilização de anéis equalizadores, permitindo que a tensão seja distribuída de modo mais regular entre os diversos varistores da coluna do para-raios. Parte da solução deste problema é indicada pelos próprios fabricantes às empresas de energia elétrica, através do fornecimento de especificações técnicas e recomendações para utilização dos anéis equalizadores ou mesmo fornecendo-os juntamente com os para-raios.

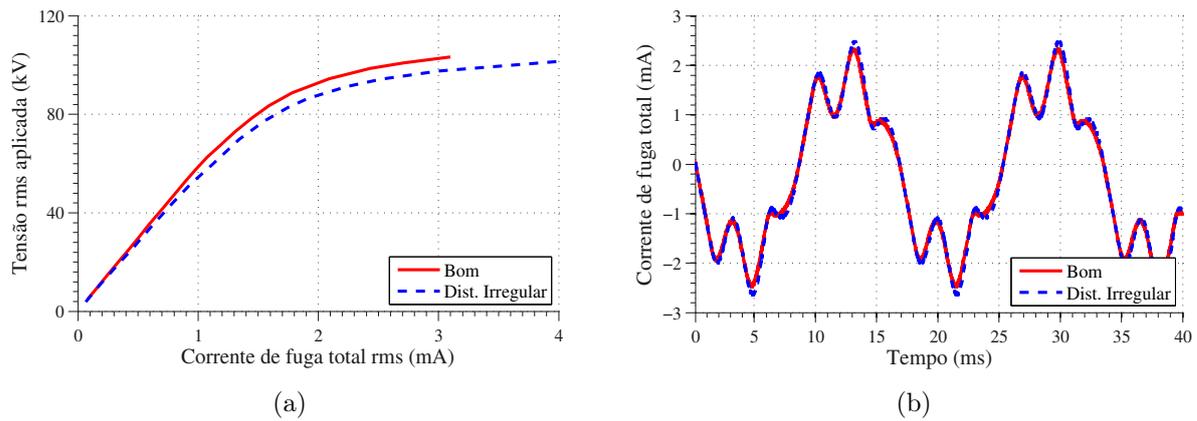
A presença de poluição ao longo do invólucro do para-raios é um fator agravante no que se refere à irregularidade na distribuição de tensão ao longo do equipamento, pois leva à criação de capacitâncias parasitas mais intensas entre a porcelana e os varistores.

Para simular este defeito, foram utilizados condutores metálicos para provocar o curto-circuito em seções internas dos para-raios avaliados a fim de se provocar uma alteração no campo elétrico que o envolve, conforme mostrado na Figura 4.19.



**Figura 4.19** – Fotografia de uma coluna de varistores com pastilhas curto-circuitadas.

Na Figura 4.20, tem-se gráficos típicos da característica  $V \times I$  e da corrente de fuga total em um para-raios do tipo A, com distribuição irregular de tensão ao longo da coluna ativa. Neste caso, tanto a característica  $V \times I$  quanto a corrente de fuga total, tiveram alterações mais perceptíveis tanto na forma quanto na amplitude. Isto decorre do fato de que o desequilíbrio na distribuição de tensão causa uma elevação dos esforços elétricos em alguns varistores, os quais resultam em uma elevação da corrente de fuga total.



**Figura 4.20** – Curvas típicas de um para-raios do tipo A com distribuição irregular de tensão: (a) Curvas  $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total.

• **Pastilhas degradadas** - A degradação dos varistores é evidenciada por mudanças significativas nas suas características termo-elétricas, podendo ser decorrente de processo de envelhecimento natural ou envelhecimento precoce.

O processo de envelhecimento natural está relacionado, normalmente, aos para-raios mais antigos que, após várias atuações na proteção do sistema elétrico, estão atingindo o fim da sua vida útil estimada (cerca de 25 anos). Esta degradação ocorre devido à exposição contínua aos campos elétricos intensos do sistema e à corrente de fuga e, em uma parcela bem menos significativa, ao envelhecimento natural dos materiais que compõem o equipamento.

O envelhecimento precoce de para-raios é caracterizado por varistores que apresentam um nível elevado de degradação antes do prazo estimado para o final da sua vida útil. Estes varistores geralmente são aqueles que sofreram solicitações mais severas por parte do sistema elétrico ou estiveram submetidos a condições ambientais desfavoráveis. Neste caso, o envelhecimento se dá principalmente devido aos estresses térmicos e está diretamente ligado à capacidade de absorção térmica do varistor, resultando em quebra dos blocos varistores ou na formação de caminhos preferenciais para a corrente.

A degradação precoce dos varistores é um fator que pode contribuir para que um para-raios entre em processo de avalanche térmica (elevação descontrolada de temperatura e corrente de fuga), e conseqüentemente, sofra danos permanentes que inviabilizem sua utilização em campo. Há ainda alguns fatores externos que devem ser considerados ao

se avaliar o envelhecimento precoce dos varistores. Entre eles a temperatura ambiente e a entrada de umidade. Sabe-se que esses fatores favorecem o aumento da corrente de fuga e, como visto anteriormente, como consequência há um aumento de temperatura e aceleração no processo de envelhecimento.

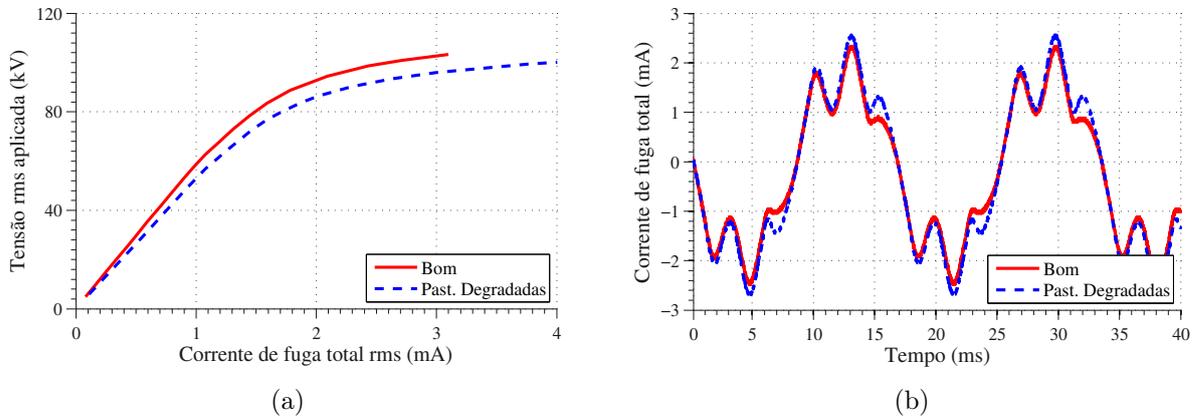
A simulação da degradação de varistores foi realizada, em laboratório, por meio da aplicação de cerca de 15 a 20 impulsos de corrente atmosféricos (forma de  $8/20\mu s$ ) de 20 kA em quatro varistores com características eletro-térmicas semelhantes aos varistores dos para-raios tipo A e B. Na Figura 4.21, é mostrado um varistor degradado do para-raios tipo B, contendo perfurações, trincas e quebras do colar isolante. Após a aplicação dos impulsos de corrente, os varistores degradados foram colocados no centro da coluna ativa, substituindo aqueles que estavam em bom estado de operação.



**Figura 4.21** – Fotografia de um varistor degradado.

Nos gráficos da Figura 4.22 pode-se observar algumas mudanças (com relação ao para-raios em bom estado) na característica  $V \times I$  do para-raios e no sinal de corrente de fuga total para MCOV. Estas alterações eram esperadas, dado que os varistores degradados estão atuando quase como um curto-circuito, diminuindo assim, a impedância total do para-raios, e conseqüentemente, tem-se uma elevação da corrente de fuga total. Vale ressaltar que os gráficos da Figura 4.22 são para um para-raios do tipo A, que normalmente, apresenta cerca de 37 blocos varistores na sua coluna ativa. Logo, ao se substituir 4 blocos bons por degradados não se consegue elevações significativas da corrente de fuga, uma vez que praticamente 90% dos blocos restantes ainda estão bons. Contudo, pode-se de-

tectar maiores distorções harmônicas no sinal de corrente devido à inserção dos varistores degradados.



**Figura 4.22** – Curvas típicas de um para-raios do tipo A com varistores degradados: (a) Curvas  $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total.

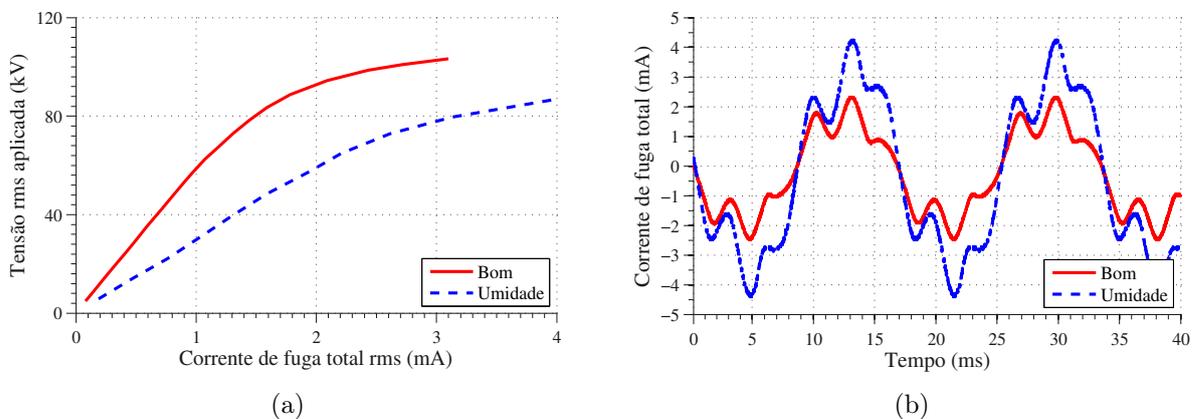
- **Umidade interna** - A umidade interna em um para-raios a ZnO pode decorrer de duas causas principais. A primeira seria um problema de fabricação, resultado de alguma falha ocorrida durante o fechamento do para-raios. A segunda causa seria a perda de estanqueidade ou falha na vedação do equipamento, como visto anteriormente. O principal problema causado pela umidade é a ocorrência de descargas parciais causadas pela formação de vapor de água no meio interno. O acúmulo de água na base do para-raios pode se transformar em vapor, seja por aquecimento externo (radiação solar), seja por aquecimento interno (efeito joule). Como resultado, podem ocorrer descargas tanto ao longo da coluna de varistores, como entre os varistores e a parte interna do invólucro do para-raios. Além disso, em períodos em que a temperatura interna do para-raios esteja mais amena, como no período noturno, o vapor de água acumulado no interior do para-raios pode condensar. Esta condensação ocorre com a formação de gotículas que se acumulam sobre a superfície dos varistores ou da parte interna da porcelana, formando-se então, um caminho úmido, o qual favorece a falha no isolamento seguida de ruptura elétrica.

Na simulação desse defeito, os para-raios foram abertos e água limpa (com condutividade em torno de 0,8 mS/cm) foi borrifada sobre a coluna de varistores, conforme mostrado na Figura 4.23. Em seguida, realizou-se o fechamento do para-raios.



**Figura 4.23** – Fotografia mostrando o processo de umidificação de um para-raios.

Uma curva característica típica e o gráfico de um sinal de corrente de fuga total de um para-raios do tipo A, com umidade interna, são mostrados na Figura 4.24. Diferentemente dos outros casos, nessa situação houve mudanças significativas no comportamento elétrico do para-raios se comparado ao bom estado de operação. A curva  $V \times I$  deslocou-se para direita (evidência de degradação do para-raios) devido a uma elevação substancial da corrente de fuga total para a MCOV (praticamente o dobro dos casos anteriores). Esta elevação deveu-se ao fato de que a umidade interna facilita a passagem de corrente pelo colar isolante e pela parte interna do invólucro (umedecido após evaporação parcial da água existente na coluna ativa), além da passagem de corrente pelo interior do varistor. Este é um dos tipos de defeitos de para-raios mais críticos, pois rapidamente o conduz ao fim de sua vida útil.



**Figura 4.24** – Curvas típicas de um para-raios do tipo A com varistores umedecidos: (a) Curvas  $V \times I$ ; e (b) Corrente de fuga total.

## 4.7 Resumo

Neste capítulo, foram apresentados os ensaios e medições necessários ao desenvolvimento, validação e teste da técnica de monitoramento apresentada no próximo capítulo.

Foram avaliados e ensaiados para-raios de duas classes distintas, com características físicas e eletro-térmicas diferentes. Estados artificiais de operação de para-raios foram criados em laboratório, com o intuito representar defeitos reais e avaliar a capacidade da técnica proposta em distinguir as mais sutis diferenças de comportamento dos para-raios avaliados.

# Capítulo 5

## Metodologia Proposta

Neste capítulo, é apresentado o método proposto para monitoramento e diagnóstico de para-raios de óxido de zinco com base na análise da corrente de fuga total. Inicialmente, é apresentada uma visão geral do método, em seguida, são detalhadas cada uma das etapas necessárias à aplicação da técnica. A primeira etapa consiste na implementação de uma técnica para extração de características (atributos) do sinal de corrente de fuga, em seguida, descreve-se o processo de construção da base de dados empregada no treinamento de um classificador de estados de operação. Por fim, a metodologia de classificação é discutida.

### 5.1 Visão Geral

Com base na revisão bibliográfica e nos ensaios realizados, constatou-se que o grau de distorção harmônica e a amplitude da corrente de fuga no para-raios, em especial a componente resistiva da corrente, constituem fortes indicadores do seu nível de degradação (SHIRAKAWA *et al.*, 1988; LUNDQUIST *et al.*, 1990; IEC, 2000). Sendo assim, parece razoável extrair características deste sinal com a finalidade de treinar um classificador de estados de operação de para-raios de ZnO. Contudo, vale ressaltar que a abordagem aqui proposta difere daquelas comumente empregadas na literatura, isto é, abordagens baseadas na decomposição das componentes capacitivas e resistivas da corrente de fuga.

Neste trabalho, as características, para efeitos de classificação de defeitos são extraídas do sinal de corrente de fuga total e não de suas componentes resistiva e capacitiva. Dessa maneira, evita-se uma série de restrições de ordem prática e técnica, já comentadas na revisão, mas aqui relembradas: para realizar a decomposição da corrente é preciso ter

uma amostra da tensão aplicada para estimar a defasagem entre a tensão e a corrente total; medir tensão de fase em campo nem sempre é possível; mesmo realizando a medição da tensão, a decomposição por vezes é realizada através de métodos imprecisos; e quando não se realiza a medição de tensão, métodos numéricos são utilizados no sentido de estimar as componentes. De uma forma geral, as metodologias empregadas possuem restrições que podem inviabilizar seu uso ou denegrir a confiabilidade dos resultados.

Na Figura 5.1 é apresentada uma visão geral da técnica proposta. Ela é dividida em cinco etapas distintas. Na primeira etapa obtém-se em laboratório ou em campo os sinais de corrente de fuga total do(s) para-raios sob análise. Em seguida, é realizada a extração de características (componentes harmônicas) do sinal de corrente de fuga total. A partir das características extraídas é construída uma base de dados, que relaciona as características extraídas com o estado de operação do para-raios. Na quarta etapa, a base de dados é utilizada no treinamento de um sistema de classificação de estado de operação de para-raios, baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA). A última etapa consiste em realizar o processo de classificação e diagnóstico dos para-raios.

Vale ressaltar, ainda, os dois modos de operação da quinta etapa (classificação) da técnica. O classificador pode ser empregado logo após o processo de treinamento da rede neural para estimar, por exemplo, a sua taxa de acerto. Esse é modo de funcionamento mais comum e corresponde à trajetória de linhas cheias do fluxograma. O outro modo de operação (evidenciado pela linha tracejada na Figura 5.1) consiste em submeter as características extraídas dos sinais de corrente de fuga total, que estão armazenados na base de dados, diretamente ao sistema de classificação de estado de operação. Dessa maneira, não se realiza um novo treinamento da rede neural, seja porque a rede já está devidamente treinada ou porque não se possui um conjunto de dados de treinamento suficientemente grande, e deseja-se realizar apenas uma análise comparativa entre alguns poucos sinais de corrente, com o objetivo de determinar diferentes perfis de operação. Essa é uma característica importante do sistema de classificação utilizado neste trabalho, pois ele dispensa o conhecimento prévio de exemplos ou estados típicos de funcionamento para que possa funcionar adequadamente, uma vez que o classificador possui a característica de clusterizar (separar) classes (estados) automaticamente.

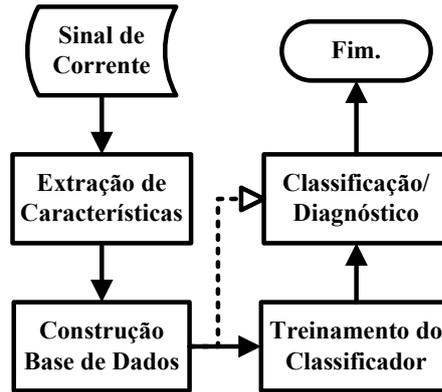


Figura 5.1 – Fluxograma geral da metodologia proposta.

## 5.2 Extração de Características

Conforme dito anteriormente, foram extraídas características do sinal de corrente de fuga total para a identificação do estado de operação de para-raios. Especificamente, avaliou-se se conteúdo harmônico do sinal de corrente constitui um conjunto de características apropriado ao diagnóstico de para-raios. Vale ressaltar que é imprescindível que as componentes harmônicas do sinal de corrente de fuga total sejam extraídas com exatidão, uma vez que, as mais sutis variações nas componentes podem ajudar a distinguir um para-raios em bom estado de um defeituoso, conforme mostrado nas comparações realizadas no Capítulo 4.

Vários estudos reportam que a corrente de fuga total do para-raios pode ser decomposta em suas componentes harmônicas ímpares (SHIRAKAWA *et al.*, 1988; COFEEN; MCBRIDE, 1991; LEE; KANG, 2005), ou seja, na soma da 1<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, ..., componentes harmônicas do sinal. Após a análise de trabalhos anteriores e de resultados obtidos em laboratório, constatou-se que os sinais de corrente de fuga total poderiam ser representados com boa exatidão por meio do somatório das suas 5 primeiras harmônicas ímpares:

$$s(t) = \sum_{i=1}^5 A_i \cos[(2i - 1)\omega t + \theta_i], \quad (5.1)$$

em que,  $A_i$  e  $\theta_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) são a amplitude e ângulo de fase da  $i$ -ésima componente harmônica ímpar do sinal de corrente,  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular,  $f$  é a frequência fundamental do sistema.

A forma clássica de se estimar o conteúdo harmônico de um sinal é empregar a Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*). Contudo, existe uma série de problemas conhecidos da FFT, que podem incorrer em erros de estimação das componentes harmônicas de um sinal (COSTA, 2005; COSTA *et al.*, 2005; GIRGIS; HAM, 1980): estimação de frequências espúrias (*leakage*), superposição de espectros ou recobrimento (*aliasing*) e estimação incorreta das amplitudes de componentes de frequências que não são múltiplas inteiras do tempo de amostragem do sinal (*picket-fence effect*). Estes problemas da FFT podem resultar em uma versão distorcida do espectro real do sinal, devido a erros na estimação das componentes harmônicas (frequência, amplitude e ângulo de fase). Em Araujo *et al.* (2012) são realizadas uma série de análises comparativas entre alguns métodos para estimação de harmônicos em sistemas de potência, onde foi possível verificar uma série de efeitos negativos da FFT e o desempenho superior de métodos de identificação paramétrica de modelos, como o apresentado a seguir.

### 5.2.1 Identificação Paramétrica

Para determinar os parâmetros do modelo (5.1) e portanto, determinar as amplitudes e fases das componentes harmônicas do sinal de corrente, utilizou-se a técnica de estimação paramétrica proposta em Lira (2008). Esta técnica baseia-se no emprego do método dos mínimos quadrados associado ao algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) para estimar os parâmetros do modelo de forma a minimizar o erro (aproximando-o de zero) entre o sinal fornecido pelo modelo e o medido, ou seja, minimizar a equação (função objetivo) (5.2) dada por:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k [r_j(\mathbf{x})]^2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{r}(\mathbf{x})\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{r}(\mathbf{x})^T \mathbf{r}(\mathbf{x}), \quad (5.2)$$

onde a função  $\mathbf{r}(\mathbf{x})$  (sendo  $\mathbf{r}(\mathbf{x})^T$  a transposta de  $\mathbf{r}(\mathbf{x})$ ) é chamada de *resíduo*, à qual é definida da seguinte maneira:

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = \mathbf{s}_m - \mathbf{s}, \quad (5.3)$$

em que:

$\mathbf{x}$  é o vetor paramétrico ( $\mathbf{x} = \{A_1, \theta_1, A_2, \theta_2, A_3, \theta_3, A_4, \theta_4, A_5, \theta_5\}$ ) de dimensão  $n$ ;

$k$  é o número de pontos capturados na forma de onda da corrente de fuga;

$\mathbf{s}_m$  é o vetor de dimensão  $k$ , correspondente aos valores medidos da corrente de fuga;

$\mathbf{s}$  é o vetor de dimensão  $k$ , correspondente aos valores calculados através da Equação (5.1), para o vetor paramétrico  $\mathbf{x}$ .

Neste tipo de problema, é possível encontrar dois tipos de *minimizadores* para a função objetivo (5.2): o local e o global. A seguir, são apresentadas as definições dos minimizadores.

**Definição 5.2.1 (Minimizador Local).** Suponha que  $f(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é uma função real definida em um conjunto  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ . Um vetor  $\mathbf{x}^* \in \Omega$  é um minimizador local de  $f(\mathbf{x})$  sobre  $\Omega$  se existe  $\epsilon > 0$  tal que  $f(\mathbf{x}) \geq f(\mathbf{x}^*)$  para todo  $\mathbf{x} \in \Omega$ ,  $\mathbf{x}^* \in \Omega$  e  $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\| < \epsilon$

**Definição 5.2.2 (Minimizador Global).** Um vetor  $\mathbf{x}^* \in \Omega$  é minimizador global de  $f(\mathbf{x})$  sobre  $\Omega$  se  $f(\mathbf{x}) \geq f(\mathbf{x}^*)$  para todo  $\mathbf{x} \in \Omega$  e  $\mathbf{x}^* \in \Omega$ .

Idealmente, deseja-se encontrar o minimizador global de uma função, contudo, esta é uma tarefa bastante árdua. Normalmente, na prática, é suficiente determinar um dos minimizadores locais<sup>1</sup> da função objetivo (CHONG; ZAK, 2001). Dessa forma, deve-se estabelecer condições necessárias e suficientes para que um vetor  $\mathbf{x}$  seja minimizador local de uma determinada função objetivo (condições de otimalidade). A seguir, são apresentados definições e teoremas relacionados às condições de otimalidade.

**Definição 5.2.3.** Uma matriz simétrica  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  é *positiva definida*  $\Leftrightarrow \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{x} \neq 0$ :  $\mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} > 0$ .  $\mathbf{H}$  é *positiva semi-definida*  $\Leftrightarrow \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{x} \neq 0$ :  $\mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} \geq 0$ .

**Teorema 5.2.1 (Condições Necessárias de Primeira e Segunda Ordens).** Seja  $f(\mathbf{x})$  duas vezes continuamente diferenciável e seja  $\mathbf{x}^*$  um minimizador local de  $f(\mathbf{x})$ . Então,  $\nabla f(\mathbf{x}^*) = 0$ , e mais ainda  $\nabla^2 f(\mathbf{x}^*)$  é positiva semi-definida.

**Teorema 5.2.2 (Condição Suficiente de Segunda Ordem).** Seja  $f(\mathbf{x})$  duas vezes continuamente diferenciável nas vizinhanças de  $\mathbf{x}^*$ . Assuma que  $\nabla f(\mathbf{x}^*) = 0$  e que  $\nabla^2 f(\mathbf{x}^*)$  é positiva definida. Então  $\mathbf{x}^*$  é minimizador local de  $f(\mathbf{x})$ .

Após a definição das condições de otimalidade, é apresentado na seção seguinte o método de Levenberg-Marquardt utilizado neste trabalho.

<sup>1</sup>Uma função objetivo pode ter mais de um minimizador local.

### 5.2.1.1 Método de Levenberg-Marquardt

O Método de Levenberg-Marquardt (MLM) é um técnica iterativa, baseada no método de Newton, normalmente utilizada para encontrar o mínimo de uma função multivariável expressa em termos da soma dos quadrados de funções reais não-lineares. Dessa forma, assim como no método de Newton, o MLM utiliza uma aproximação da função objetivo definida em (5.2) baseada em um modelo quadrático ( $m(\mathbf{d})$ ), o qual é obtido através da expansão em série de Taylor da função  $f(\mathbf{x}_0)$  em torno de  $\mathbf{x}_0$ , onde os termos de ordem maior que dois são desconsiderados. Daí, obtém-se:

$$m(\mathbf{d}) \equiv f(\mathbf{x}_0) + \mathbf{d}^T \nabla f(\mathbf{x}_0) + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \nabla^2 f(\mathbf{x}_0) \mathbf{d}, \quad (5.4)$$

onde  $\mathbf{d} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$  é a direção de busca do MLM,  $\mathbf{x}_0$  é uma estimativa inicial e  $\mathbf{x}$  é o novo vetor paramétrico.

O gradiente ( $\nabla f(\mathbf{x}_0)$ ) e a Hessiana ( $\nabla^2 f(\mathbf{x}_0)$ ) de  $f(\mathbf{x}_0)$  normalmente são expressos em uma forma mais conveniente, em termos da matriz Jacobiana de  $\mathbf{r}(\mathbf{x}_0)$ , a qual é uma matriz  $k \times n$  das derivadas parciais de 1ª ordem, definida por:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_i}{\partial x_j} \end{bmatrix}_{\substack{i=1,2,\dots,k \\ j=1,2,\dots,n}}. \quad (5.5)$$

Sendo assim, tem-se que o gradiente de  $f(\mathbf{x}_0)$  é dado por:

$$\begin{aligned} \nabla f(\mathbf{x}_0) &= \frac{\partial f}{\partial x_j}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^k r_i(\mathbf{x}_0) \frac{\partial r_i}{\partial x_j}(\mathbf{x}_0) \Rightarrow \\ \mathbf{g} &\equiv \nabla f(\mathbf{x}_0) = \mathbf{J}(\mathbf{x}_0)^T \mathbf{r}(\mathbf{x}_0). \end{aligned} \quad (5.6)$$

E a matriz Hessiana (matriz das derivadas parciais de 2ª ordem) de  $f(\mathbf{x}_0)$  é definida da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \nabla^2 f(\mathbf{x}_0) &= \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_z}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial r_i}{\partial x_j}(\mathbf{x}_0) \frac{\partial r_i}{\partial x_z}(\mathbf{x}_0) + r_i(\mathbf{x}_0) \frac{\partial^2 r_i}{\partial x_j \partial x_z}(\mathbf{x}_0) \right), \\ \nabla^2 f(\mathbf{x}_0) &= \mathbf{J}(\mathbf{x}_0)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_0) + \sum_{i=1}^k r_i(\mathbf{x}_0) \mathbf{r}_i''(\mathbf{x}_0). \end{aligned} \quad (5.7)$$

O método de Levenberg-Marquardt realiza duas modificações na matriz Hessiana. A primeira delas é considerar que a função resíduo  $\mathbf{r}(\mathbf{x}_0)$  é aproximadamente linear nas

vizinhanças de  $\mathbf{x}_0$ . Dessa forma, o segundo termo da matriz Hessiana é desprezado. A segunda modificação é a que realmente caracteriza o método, e consiste na inserção de um termo de amortecimento,  $\mu$ , na aproximação da matriz Hessiana, de forma a garantir que a mesma seja positiva definida, e que a direção de busca do algoritmo seja sempre uma direção descendente. Portanto, a matriz Hessiana com a modificação de Levenberg-Marquardt, torna-se:

$$\mathbf{H} \approx \mathbf{J}(\mathbf{x}_0)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_0) + \mu \mathbf{I}, \quad (5.8)$$

onde  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade e  $\mu$  é uma constante maior que zero.

Sendo assim, pode-se reescrever o modelo quadrático de  $f(\mathbf{x})$  (Equação (5.4)), da seguinte maneira:

$$m(\mathbf{d}) = f(\mathbf{x}_0) + \mathbf{d}^T \mathbf{g} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{H} \mathbf{d}, \quad (5.9)$$

onde  $\mathbf{g}$  e  $\mathbf{H}$  são definidas através das Equações (5.6) e (5.8), respectivamente.

Para encontrar um minimizador local de  $f(\mathbf{x}_0)$  deve-se aplicar as condições de otimalidade ao modelo quadrático,  $m(\mathbf{d})$ , de acordo com o **Teorema 5.2.1**:

$$\begin{aligned} \nabla m(\mathbf{d}) = 0 &\Rightarrow \\ \mathbf{g} + \mathbf{d} \mathbf{H} &= 0. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Reescrevendo a Equação (5.10), é possível determinar a nova direção de busca do MLM através da solução do seguinte sistema:

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{d} = -\mathbf{g}. \quad (5.11)$$

Daí, então, obtém-se a fórmula de recorrência responsável pela atualização do vetor paramétrico:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{d}. \quad (5.12)$$

Mesmo com todo este equacionamento, o método de Levenberg-Marquardt ainda não está totalmente completo, pois falta definir a estratégia de atualização do termo de amortecimento  $\mu$ . O termo de amortecimento é de fundamental importância para a robustez do método, já que é este termo que garante que a matriz Hessiana seja positiva definida, e portanto, que o novo valor do vetor paramétrico  $\mathbf{x}$ , encontrado através da Equação (5.12), seja um minimizador local de  $f(\mathbf{x})$ , de acordo com o **Teorema 5.2.2**. Vários

autores (FLETCHER, 1980; PRESS *et al.*, 1992; RAO, 1996; KELLEY, 1999; MADSEN *et al.*, 2004) têm apresentado estratégias para atualização do termo de amortecimento  $\mu$ . Após alguns testes, constatou-se que a estratégia mais simples e eficiente (pelo menos para o problema abordado aqui) foi aquela proposta por Rao (1996), a qual consiste basicamente, em atribuir inicialmente, um valor elevado a  $\mu$  fazendo com que o método de Levenberg-Marquardt comporte-se como o método do máximo declive descendente. Em seguida, avalia-se se a direção de busca,  $\mathbf{d}$ , é uma direção descendente ( $f(\mathbf{x}) < f(\mathbf{x}_0)$ ). Em caso afirmativo, diminui-se gradativamente o valor de  $\mu$  fazendo com que o MLM comporte-se como um método de Newton, cuja convergência é mais rápida. Caso a direção de busca não seja uma direção descendente, torna-se a elevar o valor de  $\mu$ , fazendo com que o MLM comporte-se como o do máximo declive descendente, que apesar de ter convergência garantida é mais lento que o método de Newton.

A seguir é apresentado o algoritmo básico, utilizado para determinar o valor de  $\mathbf{x}$  que minimiza  $f(\mathbf{x})$ .

1. Obter uma estimativa inicial do vetor paramétrico, ( $\mathbf{x} = \{A_1, \theta_1, A_2, \theta_2, A_3, \theta_3, A_4, \theta_4, A_5, \theta_5\}$ );
2. Entrar com vetor  $\mathbf{s}_m$  correspondente ao sinal de corrente total medido no para-raios na tensão de operação;
3. Entrar com o valor da tolerância desejada ( $\varepsilon$ ) e com o número máximo de iterações permitas ( $i_{\max}$ );
4. Fazer  $i = 0$ ,  $\mu = 10^4$ ;
5. Calcular  $\mathbf{s}$  a partir da Equação (5.1);
6. Calcular  $\mathbf{J}$  e  $\mathbf{H}$  a partir das Equações (5.5) e (5.8), respectivamente;
7. Calcular  $\mathbf{r}(\mathbf{x}_0)$  e  $\mathbf{g}$  a partir das Equações (5.3) e (5.6), respectivamente;
8. Calcular  $f(\mathbf{x}_0)$  de acordo com a Equação (5.2);
9. Enquanto  $i < i_{\max}$ :

- (a) Calcular a direção de busca  $\mathbf{d}$  e o novo valor do vetor paramétrico  $\mathbf{x}$  através das Equações (5.11) e (5.12), respectivamente;
- (b) Calcular  $f(\mathbf{x})$ ;
- (c) Se  $|f(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x}_0)| < \varepsilon$ , finalizar o algoritmo;
- (d) Caso  $f(\mathbf{x}) < f(\mathbf{x}_0)$ :
  - i. Dividir  $\mu$  por 10;
  - ii. Recalcular  $\mathbf{J}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{r}(\mathbf{x})$  e  $\mathbf{g}$ ;
- (e) Caso  $f(\mathbf{x}) \geq f(\mathbf{x}_0)$ :
  - i. Multiplicar  $\mu$  por 10;
  - ii. Recalcular  $\mathbf{H}$ ;
- (f) Fazer  $f(\mathbf{x}_0) = f(\mathbf{x})$ ;
- (g) Incrementar  $i$ ;
- (h) Voltar ao passo 9.

### 5.3 Construção da Base de Dados

Após a extração de características dos sinais de corrente de fuga total de para-raios, foi dado início ao próximo passo na metodologia proposta, que é a construção da base de dados de características. Esta base é empregada nas etapas de treinamento e teste do classificador de estados de operação de para-raios apresentado na próxima seção.

A base de dados é formada pela junção das características extraídas de todos os sinais de corrente obtidos em laboratório e submetidos à técnica de extração mostrada na seção anterior. O MLM retorna um conjunto de parâmetros  $\mathbf{x} = \{A_1, \theta_1, A_2, \theta_2, A_3, \theta_3, A_4, \theta_4, A_5, \theta_5\}$ , correspondente às amplitudes e fases das componentes harmônicas do sinal analisado. As amplitudes dos harmônicos são função da temperatura dos blocos varistores, tensão aplicada sobre o para-raios, do nível de degradação dos varistores e dos níveis de harmônicos do sistema (DENGLER *et al.*, 1997; ZHU; RAGHUVVEER, 2001). Conforme dito no Capítulo 4, durante as medições da corrente de fuga no para-raios ocorreram variações de temperatura, umidade, tensão e distorção da tensão. A componente fundamental da

corrente é afetada por todas essas variações. Logo, com o intuito de minimizar a influência desses fatores, resolveu-se normalizar as amplitudes das componentes harmônicas com relação à amplitude da fundamental, a qual majora o comportamento do sinal. Dessa maneira, as amplitudes das harmônicas foram substituídas pelas distorções harmônicas individuais da corrente ( $An_i$ ), dadas pela seguinte equação:

$$An_i = \frac{A_i}{A_1}, \quad (i = 1, \dots, 5). \quad (5.13)$$

Em testes preliminares, detectou-se que, os ângulos de fase estimados não contribuíam para melhoria dos resultados fornecidos pelo sistema de classificação de estados de operação de para-raios, uma vez que, sem uma referência de tensão, essas grandezas perdem seu significado físico. Mesmo adotando, como referência, a fase da componente fundamental de corrente, não verificou-se melhorias nos resultados obtidos. Logo, para este caso específico, decidiu-se por não utilizar os ângulos de fase estimados, no processo de treinamento e teste do classificador de estados. Sendo assim, as características dos sinais de corrente total que irão compor a base de dados serão apenas os índices de distorção individual ( $An_i$ ) para cada sinal analisado, excetuando-se o  $An_1$  que sempre será unitário para todos os sinais, devido ao processo de normalização empregado (ver Equação (5.13)).

Com este procedimento, consegue-se diminuir significativamente a dimensionalidade do problema, ou seja, a quantidade de variáveis ou parâmetros necessários para se obter um conjunto de características que possibilite identificar diferentes padrões de comportamento ou operação em conjunto de dados. Neste caso específico, os sinais de corrente corrente medidos foram digitalizados e armazenado em vetores com 50 mil elementos cada, enquanto que, a base dados utilizada no treinamento e teste do classificador é constituída por um vetor de dados de entrada com apenas 04 elementos (os índices de distorção harmônica individual). Dessa maneira, pode-se constar uma redução significativa na dimensionalidade do problema (aproximadamente 99,99%), o que impacta diretamente na velocidade do processo de treinamento e teste do classificador.

Como cada sinal analisado corresponde a um determinado estado do para-raios (defeituoso ou não), cada item da base de dados é composto pelo agrupamento dos índices de distorção individual mais um rótulo que identifica o estado do para-raios. Dois conjuntos

de rótulos foram avaliados neste trabalho. O primeiro deles é utilizado apenas para identificar o estado do para-raios, ou seja, se o para-raios está defeituoso (rótulo *def*) ou não (rótulo *ok*). O segundo conjunto é composto por rótulos que identificam não só o estado do para-raios, mas também, o tipo de defeito presente no equipamento. Na Tabela 5.1 são apresentados os rótulos utilizados para cada um dos estados de operação dos para-raios avaliados.

**Tabela 5.1** – Codificação do estado de operação dos para-raios.

Estado	Rótulo
Rótulos do tipo 1	
Bom	<i>ok</i>
Defeituoso	<i>def</i>
Rótulos do tipo 2	
Perda de estanqueidade	<i>est</i>
Poluição superficial	<i>pol</i>
Degradação de varistores	<i>deg</i>
Umidade interna	<i>umi</i>
Desalinhamento da coluna ativa	<i>des</i>
Distribuição irregular de tensão	<i>dis</i>

Com intuito de avaliar o desempenho do classificador tanto na identificação do estado do para-raios quanto na identificação do tipo de defeito, decidiu-se construir duas bases de dados: uma que leva em consideração os Rótulos do tipo 1 e outra os do tipo 2. Assim, o formato geral das bases de dados fica conforme mostrado na Tabela 5.2, onde a seção *Entradas* refere-se ao vetor dos índices de distorção individual, isto é, refere-se as amplitudes normalizadas das componentes harmônicas do sinal analisado. A seção *Saídas* diz respeito ao estado do para-raios (conhecido *a priori*) rotulado segundo a Tabela 5.1.

**Tabela 5.2** – Formato geral das base de dados.

Entradas				Saídas
$An_2$	$An_3$	$An_4$	$An_5$	rótulo

Todos os sinais de corrente obtidos em laboratório foram processados e agrupados de acordo com o formato mostrado na Tabela 5.2. Com isso, foram obtidas as bases de dados a serem empregadas no processo de treinamento e teste do classificador de estados de operação mostrado a seguir.

## 5.4 Classificador de Estados de Operação

Identificar o estado de operação de para-raios pode ser enquadrado como uma atividade de reconhecimentos de padrões, onde os padrões neste caso são as componentes harmônicas do sinal de corrente de fuga total de um para-raios em operação. Segundo Jain *et al.* (2000), reconhecimento de padrões tem sido realizado basicamente de duas maneiras: utilizando uma abordagem estatística ou mais recentemente, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA).

Neste trabalho decidiu-se por utilizar uma abordagem baseada em RNA, pois este tipo de abordagem vem fornecendo resultados bastante satisfatórios na área de reconhecimento de padrões, principalmente, por apresentarem: capacidades intrínsecas de extração de características e classificação dados; habilidade de aprender/entender relações de entrada/saída não-lineares complexas; e capacidade de adaptação automática aos dados avaliados (JAIN *et al.*, 2000).

Uma Rede Neural Artificial é uma estrutura de processamento de informação paralela e distribuída composta de elementos de processamento (os neurônios artificiais), que possuem entrada e saída, interconectados através de sinapses (pesos sinápticos). Dessa maneira, as RNA podem adquirir, armazenar e utilizar o conhecimento experimental em diversas aplicações. São características desejáveis de uma RNA (PANDYA; MACY, 1996):

- **Adaptabilidade** - Algoritmos de treinamento e regras de auto-organização poderosas permitem que as RNA se adaptem continuamente às mudanças nos sistemas em análise;
- **Processamento não-linear** - Consiste na habilidade de realizar tarefas envolvendo relações não-lineares ou mediante ruído;
- **Processamento paralelo** - É possível realizar o processamento paralelo e distribuído da informação diferentemente dos algoritmos sequenciais.

Algumas outras importantes vantagens e características das RNAs com relação a outras técnicas são sua capacidade de fornecer bons resultados mesmo quando os dados a serem processados (MASTERS, 1993):

- São difusos, mal definidos ou sujeitos a grandes erros;
- Possuem padrões bastantes sutis ou difíceis de serem distinguidos até por especialistas na área ou ferramentas estatísticas padrões;
- Exibem não-linearidades significativas e imprevisíveis;
- São caóticos no sentido matemático da palavra.

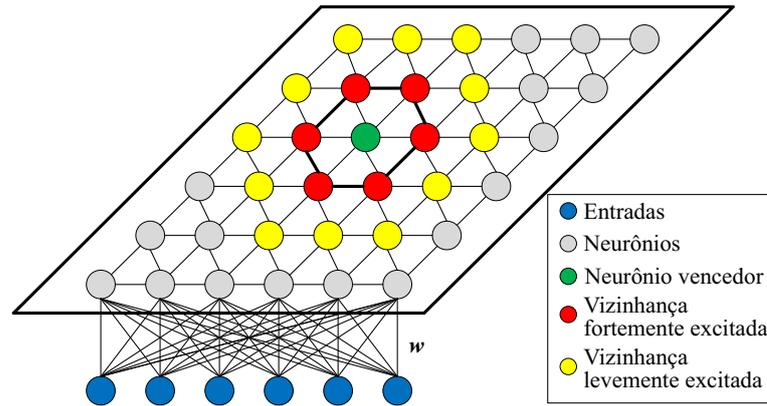
Em pesquisa anterior (LIRA *et al.*, 2012), avaliou-se redes neurais do tipo Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP - *Multilayer Perceptron*) como classificador de estados de operação. Este tipo de rede forneceu bons resultados nos estudos realizados. Contudo, ele apresenta o inconveniente de necessitar de um treinamento supervisionado (com auxílio de um especialista) para fornecer bons resultados. Isto implica em duas restrições: nem sempre é possível ter um especialista disponível para instruir a rede sobre cada tipo de situação diferente que ela poderá detectar no futuro; e, normalmente, o treinamento deste tipo de rede requer uma quantidade razoável de exemplos de situações, as quais espera-se que ela seja capaz de identificar.

Nesta perspectiva, resolveu-se adotar neste trabalho, um classificador de estados (sistema de reconhecimento de padrões) baseado em um tipo especial de RNA denominado Mapas Auto-Organizáveis (*Self-Organizing Map* - SOM).

### 5.4.1 Rede SOM

Os Mapas Auto-Organizáveis correspondem a uma classe especial de grades neurais baseadas na aprendizagem competitiva e treinamento não supervisionado do tipo *feedforward* (alimentado para frente). Em uma rede SOM, os neurônios estão colocados em nós de uma grade, normalmente unidimensional ou bidimensional, não possuindo uma forma topológica padrão, podendo ser hexagonal, retangular, triangular, etc. Cada neurônio está conectado a todas as entradas da rede (KOHONEN, 2000; HAYKIN, 1998).

A rede SOM possui topologia básica de duas camadas, sendo elas: a camada de entrada  $I$ , responsável por ler o vetor de entrada e apresentar à rede as informações que serão classificadas; e a camada de saída  $U$ , que forma uma resposta. A entrada da



**Figura 5.2** – Exemplo de uma rede SOM bidimensional.

rede corresponde a um vetor no espaço  $n$ -dimensional em  $\mathbb{R}^n$ , representado por:  $\mathbf{x}_i = [\xi_1, \dots, \xi_n]^T$ , ( $i = 1, \dots, d$ ), sendo  $d$  o número de vetores de entrada. Cada neurônio  $j$  da camada de saída possui um vetor de código (ou peso sináptico)  $\mathbf{w}$ , também no espaço  $\mathbb{R}^n$ , associado ao vetor de entrada  $\mathbf{x}_i$ ,  $\mathbf{w}_j = [w_{j1}, \dots, w_{jn}]^T$ .

Os neurônios da rede SOM estão localmente interconectados por uma relação de vizinhança, a qual determina a topologia do mapa. Em um mapa bidimensional, a vizinhança pode ser hexagonal ou retangular. A Figura 5.2 apresenta um exemplo de rede SOM retangular, bidimensional com vizinhança hexagonal. Na Figura 5.2 pode-se observar o neurônio vencedor (na cor verde) e sua vizinhança imediata com seis vizinhos (na cor vermelha). O formato do arranjo da vizinhança influencia diretamente a adaptação da rede SOM, sendo que o modelo hexagonal oferece tradicionalmente resultados melhores que a vizinhança retangular (KOHONEN, 2000).

A rede SOM permite que características estatísticas intrínsecas do vetor de dados  $\mathbf{x}$  estimule determinada região do mapa neural da rede. Vetores com características semelhantes sempre irão sensibilizar a mesma região do mapa. Este comportamento é conhecido com paradigma topológico de organização. Com isso, a rede simula o comportamento do cérebro humano, onde entradas sensoriais distintas são mapeadas em regiões específicas do córtex cerebral (visual, auditivo, etc). Esta característica é denominada de distribuição de probabilidade codificada por localização.

Ao final deste trabalho, espera-se que, o classificador de estados desenvolvido apresente as características descritas anteriormente, ou seja, seja capaz de distinguir entre diver-

sos padrões de entrada, alocando-os topologicamente, segundo os graus de semelhanças em regiões específicas da rede SOM. Assim, determinados estados, como para-raios com unidade interna serão agrupados em uma determinada região do mapa, enquanto que, para-raios com varistores degradados serão agrupados em uma região distinta.

#### 5.4.1.1 Treinamento da Rede SOM

O algoritmo de aprendizado da rede SOM é composto por três fases (KOHONEN, 2000): (i) competição, (ii) cooperação e (iii) adaptação. Na fase de competição, para cada padrão de entrada selecionado aleatoriamente na base de dados e apresentado à rede, é realizada a determinação do neurônio vencedor, ou seja, aquele que apresenta a melhor resposta para o vetor de entrada. A determinação da melhor resposta, normalmente, baseia-se no cálculo da distância euclidiana entre o vetor de entrada e o vetor de pesos dos neurônios. Com isso, o neurônio que apresentar a menor distância euclidiana é escolhido como sendo o vencedor, pois foi aquele que teve as sinapses mais adaptadas aos dados de entrada. O neurônio vencedor é por vezes denominado de BMU (*Best Match Unit*).

Na fase cooperativa é definida a vizinhança, em torno do BMU, segundo alguma função de vizinhança  $h(t)$ . A vizinhança é influenciada pelo neurônio vencedor de forma decrescente, isto é, à medida que a distância entre um determinado neurônio e o BMU aumenta, decresce a influência do vencedor naquele neurônio (ver Figura 5.2). Dessa maneira, uma função de vizinhança bastante utilizada é gaussiana, definida a seguir:

$$h(t) = e^{\left(-\frac{l^2}{2\sigma^2(t)}\right)}, \quad (5.14)$$

em que,  $l^2$  é distância lateral (euclidiana para uma grade bidimensional) entre o BMU e qualquer outro neurônio da grade neural,  $\sigma$  é a largura efetiva da vizinhança topológica, a qual deve diminuir ao passar do tempo, com o objetivo de restringir a vizinhança, tornando-a mais especializada na detecção de determinado padrão. A largura efetiva é função de um valor inicial  $\sigma_0$ , do número de iterações,  $t$ , do processo de treinamento e de uma constante de amortização  $\tau_1$ :

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)}. \quad (5.15)$$

Na fase adaptativa, os vetores de código (pesos) do neurônio vencedor e de sua vizinhança são ajustados. Com o ajuste dos vetores de código, o valor da resposta do neurônio vencedor à aplicação subsequente do mesmo padrão de treinamento é melhorada. Assim, os padrões de entrada promovem uma organização topológica dos neurônios da rede. O ajuste nos pesos sinápticos ( $\Delta \mathbf{w}_j$ ) é dado pela seguinte equação:

$$\Delta \mathbf{w}_j = \eta(t)h(t)(\mathbf{x}_k - \mathbf{w}_j), \quad (5.16)$$

em que,  $\eta(t)$  é a taxa de aprendizagem da rede SOM, a qual está entre 0 e 1. A taxa de aprendizagem deve partir de um valor inicial  $\eta_0$  e ir diminuindo gradualmente ao longo do treinamento da rede, com o objetivo de sedimentar o conhecimento adquirido, evitando que novos dados desorganizem os *clusters* (classes de informações) outrora estabelecidos. Dessa maneira, define-se a taxa de aprendizagem da seguinte forma:

$$\eta(t) = \eta_0 e^{(-\frac{t}{\tau_1})}. \quad (5.17)$$

A seguir é apresentado o algoritmo básico de treinamento de uma rede SOM (PANDYA; MACY, 1996; BRAGA *et al.*, 2007; LUDWIG Jr.; MONTGOMERY, 2007).

1. Inicializar os pesos sinápticos  $\mathbf{w}_j$  aleatoriamente;
2. Inicializar as constantes  $\sigma_0$ ,  $\tau_1$ ,  $\eta_0$  e número máximo de épocas de treinamento ( $t_{max}$ );
3. Enquanto  $t < t_{max}$ 
  - (a) Apresentar um padrão de entrada,  $\mathbf{x}_i$ ;
  - (b) Determinar o neurônio vencedor  $c$  que satisfaça a seguinte equação:

$$c = \operatorname{argmin}_j \{ \|\mathbf{x}_k - \mathbf{w}_j\| \}, j = 1, \dots, m, \quad (5.18)$$

onde  $m$  corresponde ao número de neurônios na rede.

- (c) Para cada neurônio da rede:
  - i. Calcular a largura efetiva  $\sigma(t)$  através de (5.15);
  - ii. Calcular a distância lateral  $l^2$ ;

- iii. Determinar a vizinhança topológica por meio de  $h(t)$ ;
- iv. Calcular a taxa de aprendizagem  $\eta(t)$ , por meio de (5.17);
- v. Determinar o vetor de ajuste dos pesos sinápticos  $\Delta\mathbf{w}_j$ ;
- vi. Atualizar os pesos sinápticos  $\mathbf{w}_j$ :

$$\mathbf{w}_j(t+1) = \mathbf{w}_j(t) + \Delta\mathbf{w}_j(t); \quad (5.19)$$

- (d) Incrementar  $t$ ;

Ao término do treinamento, a rede SOM estará topologicamente ajustada para reconhecer novos padrões e agrupá-los segundo suas semelhanças.

#### 5.4.1.2 Classificação e Diagnóstico via Rede SOM

No módulo de classificação/diagnóstico mostrado na Figura 5.1 é implementada a metodologia para identificar a que grupo da rede SOM pertence determinado padrão de entrada, e com isso fornecer um diagnóstico do para-raios.

Adicionalmente, durante a etapa de treinamento, este módulo pode ser invocado para fornecer uma estimativa da taxa de acerto do classificador. Isto é feito a partir da comparação entre o rótulo (a identificação ou estado esperado) de um determinado padrão e o rótulo fornecido pelo neurônio vencedor no processo competitivo. Dessa forma, caso os rótulos sejam semelhantes, a rede acertou no diagnóstico, caso sejam diferentes um erro é contabilizado.

É possível utilizar o módulo de classificação sem realizar o treinamento prévio da rede. Por exemplo, caso se deseje saber se dois conjuntos de dados pertencem a uma mesma classe de estado de para-raios, basta utilizar este módulo para determinar a região da grade neural que será excitada, caso as regiões para os dois padrões sejam coincidentes ou próximas pode-se inferir que os padrões correspondem a um determinado estado. Caso contrário, conclui-se que os padrões referem-se a estados distintos.

## 5.5 Resumo

Apresentou-se neste capítulo, a técnica de monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO proposta neste trabalho, a qual consiste em: obter os sinais de corrente de fuga

total de um para-raios, extrair as componentes harmônicas deste sinal através do método de Levenberg-Marquardt, construir uma base de dados com as componentes harmônicas extraídas, treinar uma rede neural do tipo SOM a partir da base de dados criada e testar a rede neural (estimar a taxa de acerto). Para realizar o processo de classificação em si, é necessário apenas carregar os dados de entrada em uma rede treinada previamente e executar o procedimento de teste (simulação) e com isso, obter um resultado acerca do estado de funcionamento do para-raios avaliado. A classificação pode ser realizada, também, em uma rede não treinada devido à capacidade de clusterização da rede neural utilizada.

No próximo capítulo são apresentados os principais resultados da aplicação da técnica na base de dados de corrente de fuga total, a qual foi gerada a partir dos sinais medidos em laboratório, conforme mostrado no Capítulo 4.

# Capítulo 6

## Resultados e Análises

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos após a aplicação da metodologia para monitoramento de para-raios de ZnO com base na análise da corrente de fuga total. Inicialmente, são apresentados alguns resultados obtidos a partir da aplicação da técnica de extração de características dos sinais de corrente medidos. Em seguida, é descrito o procedimento de treino do classificador de estados de operação. Por fim, são mostrados os resultados da classificação do estado dos para-raios avaliados para diversas situações.

### 6.1 Extração de Características

A primeira etapa da metodologia consiste em extrair características dos sinais de corrente de fuga total. Inicialmente, foi proposto um modelo matemático para o sinal de corrente, o qual é composto pelo somatório das cinco primeiras componentes harmônicas ímpares da corrente de fuga, conforme explicitado na Equação (5.1). Na sequência, aplicou-se uma técnica de estimação de parâmetros, baseada no Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) associado ao Método de Levenberg-Marquardt (MLM), para estimar as amplitudes e ângulos de fases das componentes harmônicas do sinal de corrente. Após essa estimação, o sinal de corrente pôde ser reconstruído ou estimado por meio da substituição das amplitudes e fases estimadas, na Equação (5.1), o modelo matemático para o sinal de corrente de fuga total adotado neste trabalho.

A qualidade da estimação de parâmetros, e conseqüentemente, do sinal de corrente estimado, foi avaliada a partir do coeficiente de determinação ou estatística  $R^2$ , o qual é normalmente empregado em situações práticas como a mostrada aqui, uma vez que pos-

sibilita análises mais confiáveis que inspeções visuais realizadas nos gráficos das correntes (MATHWORKS, 2007).

O coeficiente de determinação  $R^2$  é uma medida da capacidade que um modelo, ajustado para um conjunto de parâmetros, possui em representar um determinado conjunto de dados. Ele é definido como sendo um (01) menos a razão entre a soma quadrática dos erros entre os sinais medido e estimado ( $SSE$ ) e a soma dos erros quadráticos com relação à média do sinal medido ( $SST$ ), de acordo com a seguinte equação (MATHWORKS, 2007; SPIEGEL *et al.*, 2001):

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (6.1)$$

onde:

$$SSE = \sum_{h=1}^k [\mathbf{s}_m(h) - \mathbf{s}(h)]^2 \quad \text{e} \quad SST = \sum_{h=1}^k [\mathbf{s}_m(h) - \bar{\mathbf{s}}_m]^2,$$

em que,  $\mathbf{s}_m(h)$  e  $\mathbf{s}(h)$  são os valores medidos e estimados da corrente de fuga total, respectivamente;  $k$  é o número de amostras; e  $\bar{\mathbf{s}}_m$  é valor médio da corrente medida. Quando  $SSE$  tende a zero, significa que o sinal de corrente de fuga estimado e o medido são bastante concordantes entre si. Com isso, o coeficiente de determinação  $R^2$  se aproximará de um (01), indicando, portanto, que o sinal de corrente foi estimado com boa exatidão.

Antes de aplicar o método de extração de característica para estimar as componentes harmônicas do sinal de corrente de fuga total, faz-se necessário adotar estimativas iniciais das componentes harmônicas, para que ao decorrer do processo iterativo, o MLM possa determinar as estimativas ótimas (aqueles que retornam os menores erros de estimação), segundo o critério dos MMQ. Quanto mais próximas estiverem as estimativas iniciais dos valores finais (ótimos), mais rápido é processo de convergência do MLM<sup>1</sup>. Em todas as situações analisadas, adotou-se como estimativas iniciais, os dados apresentados na Tabela 6.1, os quais nada mais são do que percentuais típicos de cada componente harmônica, em termos do valor de pico ( $I_p$ ) do sinal de corrente de fuga total. Os ângulos de fase foram iniciados como zero.

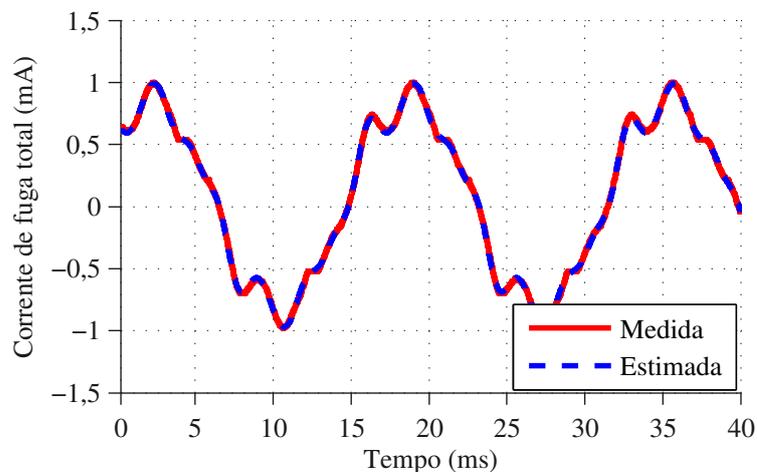
<sup>1</sup>Mesmo para estimativas iniciais distantes dos valores ótimos, o MLM irá convergir, só que mais lentamente.

**Tabela 6.1** – Estimativas iniciais das componentes harmônicas da corrente.

$A_1$ (mA)	$\theta_1$ (rad)	$A_2$ (mA)	$\theta_2$ (rad)	$A_3$ (mA)	$\theta_3$ (rad)	$A_4$ (mA)	$\theta_4$ (rad)	$A_5$ (mA)	$\theta_5$ (rad)
$0,9I_p$	0	$0,1I_p$	0	$0,5I_p$	0	$0,2I_p$	0	$0,1I_p$	0

Após a definição das estimativas iniciais das componentes harmônicas dos sinais de corrente a serem avaliados, deu-se início ao processo de extração de características e avaliação do sinal reconstruído. A seguir, são dados apenas alguns exemplos típicos do processo de extração e reconstrução, uma vez que 880 sinais foram avaliados, dos quais 480 (40 sinais para cada tipo de defeito) foram oriundos dos para-raios tipo A e 400 (40 sinais para cada tipo de defeito) dos para-raios tipo B.

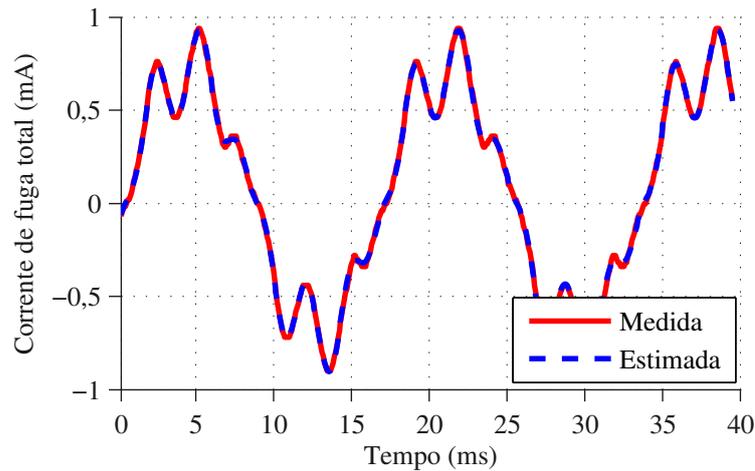
Na Figura 6.1, é apresentada a comparação de um sinal de corrente de fuga total medido, em um para-raios do tipo B com umidade interna, e o respectivo sinal reconstruído a partir das componentes estimadas, as quais são apresentadas na Tabela 6.2. Conforme pode-se constatar a partir dos gráficos dos sinais e do valor do  $R^2$  mostrado na tabela, o sinal de corrente foi reconstruído com boa exatidão, sobrepondo-se totalmente ao sinal medido. Este caso corresponde à pior estimativa que o método de extração de características desenvolvido realizou, mesmo assim, foi obtido um valor de  $R^2 = 0,988$ , mostrando assim, a eficácia da técnica.

**Figura 6.1** – Comparação dos sinais de corrente medidos e estimados para um para-raios com umidade interna.

**Tabela 6.2** – Componentes harmônicas estimadas da corrente de fuga de um para-raios com umidade interna.

$A_1$ (mA)	$\theta_1$ (rad)	$A_2$ ( $\mu$ A)	$\theta_2$ (rad)	$A_3$ (mA)	$\theta_3$ (rad)	$A_4$ ( $\mu$ A)	$\theta_4$ (rad)	$A_5$ ( $\mu$ A)	$\theta_5$ (rad)	$R^2$
0,86	-0,77	21,70	0,99	0,12	1,45	60,94	0,91	19,92	8,98	0,9880

Na Figura 6.2 são apresentados os gráficos dos sinais de corrente medido e reconstruído referentes a um para-raios do tipo B com varistores degradados. Novamente, a técnica de extração de características desenvolvida, conseguiu estimar as componentes harmônicas do sinal medido (ver Tabela 6.3), de tal forma que o sinal reconstruído a partir das componentes se sobrepôs totalmente ao medido. Esta foi a melhor estimativa de componentes harmônicas e reconstrução de sinal alcançadas neste trabalho, na qual foi possível obter um valor de  $R^2 = 0,9995$ , conforme mostrado na tabela.

**Figura 6.2** – Comparação dos sinais de corrente medidos e estimados para um para-raios com varistores degradados.**Tabela 6.3** – Componentes harmônicas estimadas da corrente de fuga de um para-raios com varistor degradado.

$A_1$ (mA)	$\theta_1$ (rad)	$A_2$ ( $\mu$ A)	$\theta_2$ (rad)	$A_3$ (mA)	$\theta_3$ (rad)	$A_4$ ( $\mu$ A)	$\theta_4$ (rad)	$A_5$ ( $\mu$ A)	$\theta_5$ (rad)	$R^2$
0,73	-14,27	22,06	-1,78	0,16	2,34	95,35	11,71	17,06	-0,97	0,9995

Com relação às componentes harmônicas estimadas para cada sinal medido, notou-se variações nas amplitudes, tanto para o mesmo estado quanto para estados distintos, conforme fica evidente nas Tabelas 6.2 e 6.3, contudo, não foi possível construir regras simples

de diferenciação de estados, baseadas por exemplo, na utilização de limiares (*thresholds*), uma vez que, as variações nas amplitudes das componentes estão relacionadas ao grau de degradação dos para-raios, à temperatura ambiente e ao nível de tensão aplicada aos para-raios, considerando aí suas oscilações e distorções. Dessa maneira, regras complexas de discriminação são necessárias, para que seja possível identificar o estado de operação dos para-raios. A seguir, é apresentado o processo de treinamento e os resultados fornecidos pelo classificador de estados desenvolvido, o qual é baseado em regras mais complexas de discriminação de classes.

## 6.2 Treinamento do Classificador

Após a aplicação da técnica de extração de características aos sinais de corrente de fuga total, medidos em laboratório, construiu-se, conforme descrito na Seção 5.3, dois tipos de bases de dados para treinamento do classificador de estados. Uma delas com rótulos do tipo 1 e outra com rótulos do tipo 2. Logo, para cada tipo de para-raios (A ou B) existem duas bases de dados, perfazendo um total de quatro bases de dados (A1, A2, B1 e B2) a serem avaliadas neste trabalho.

A base A1 com características dos sinais dos para-raios tipo A possui 480 padrões (vetores de dados) com 4 parâmetros de entrada (correspondentes aos índices de distorção harmônica individuais do sinal) e um parâmetro de saída (com rótulo tipo 1 do estado do para-raios, conforme Tabela 5.1). A base A2 é similar à A1, exceto que o parâmetro de saída é composto por um dos rótulos tipo 2 (um dos 6 estados de operação criados em laboratório), mostrados na Tabela 5.1. A base B1 é semelhante à A1, com exceção de que os parâmetros de entrada são os índices de distorção dos para-raios tipo B (400 padrões ao todo). A base B2 também corresponde às características extraídas dos para-raios tipo B, contudo, diferenciando-se da B1 nos parâmetros de saída que são cinco dos seis estados de operação descritos no trabalho (o estado desalinhamento da coluna ativa não pôde ser avaliado). Na Tabela 6.4, é apresentado um resumo das características das bases de dados criadas para o treinamento do classificador de estados desenvolvido.

**Tabela 6.4** – Formato das base de dados utilizadas.

Base	# de padrões	Entradas	Saídas
A1	480	$An_2$ $An_3$ $An_4$ $An_5$	<i>ok</i> ou <i>def</i>
A2	480	$An_2$ $An_3$ $An_4$ $An_5$	<i>est</i> , <i>pol</i> , <i>deg</i> , <i>umi</i> , <i>des</i> ou <i>dis</i>
B1	400	$An_2$ $An_3$ $An_4$ $An_5$	<i>ok</i> ou <i>def</i>
B2	400	$An_2$ $An_3$ $An_4$ $An_5$	<i>est</i> , <i>pol</i> , <i>deg</i> , <i>umi</i> ou <i>dis</i>

Com a definição das bases de dados a serem empregadas no treinamento do classificador de estados, resta estabelecer a arquitetura do classificador e alguns mecanismos para avaliação da qualidade da classificação após o processo de aprendizagem.

Iniciando pelos mecanismos de avaliação, um dos mais utilizados é o erro da quantização vetorial ( $E_q$ ) (KOHONEN, 2000), o qual é definido como sendo igual à média do erro correspondente à diferença entre o vetor de características  $\mathbf{x}_i$  (dimensão  $n$ ) e o vetor de pesos sinápticos,  $\mathbf{w}_{BMU}$ , correspondente ao neurônio vencedor no processo competitivo para o padrão  $\mathbf{x}_i$ :

$$E_q = \frac{\sum_{i=1}^n \|\mathbf{x}_i - \mathbf{w}_{BMU}\|}{n}. \quad (6.2)$$

Outro mecanismo utilizado para avaliar a exatidão do sistema de classificação, foi a Taxa de Classificação Correta (*CCR - Correct Classification Rate*), definida como:

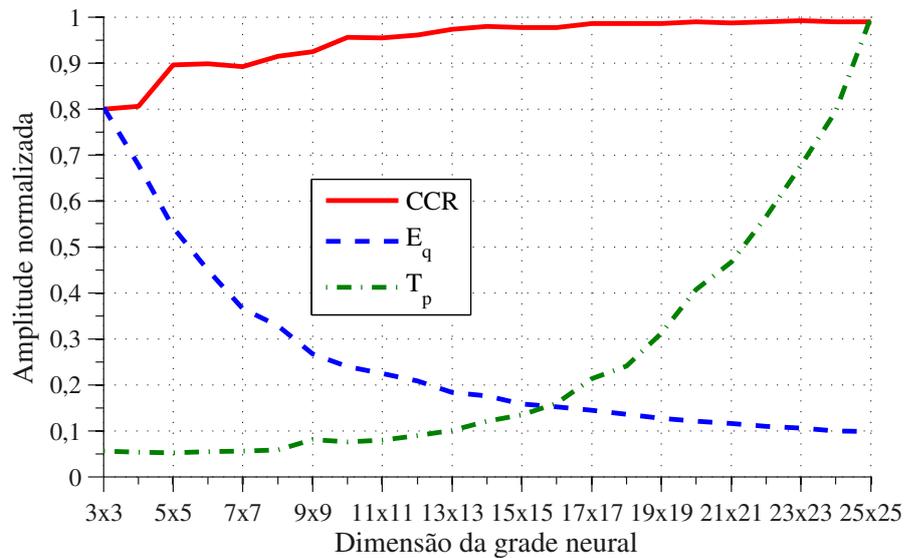
$$CCR = \frac{c}{d} \times 100, \quad (6.3)$$

em que  $c$  é o número de padrões classificados corretamente, e  $d$  é o número total de padrões.

Com relação à arquitetura do classificador (basicamente a dimensão do mapa de características, neste caso), não existem regras bem definidas. Normalmente, são efetuados testes com diferentes configurações da rede antes de decidir os melhores parâmetros para um determinado conjunto de dados (KOHONEN, 2000). Para grandes volumes de dados, mapas razoavelmente grandes são mais adequados, contudo, comprometem o desempenho do algoritmo. É preciso obter um ponto de equilíbrio entre tamanho da grade e a exatidão do resultado fornecido. Dessa forma, a taxa de acerto (*CCR*), o erro de quantização ( $E_q$ ) e o tempo de treinamento ( $T_p$ ) da rede foram plotados para redes SOM com grades de

tamanhos distintos (grades de 3x3 a 22x22). Os parâmetros de avaliação foram normalizados com relação ao valor máximo obtido durante os testes, com os objetivos de tornar as análises independentes do sistema computacional utilizado e facilitar a visualização dos resultados.

Nas Figuras de 6.3 a 6.6, são apresentadas as evoluções dos parâmetros de avaliação do treinamento do classificador de estados de operação, para as bases de dados A1, A2, B1 e B2, respectivamente. O tempo de treinamento,  $T_p$ , aumenta exponencialmente com a dimensão da grade neural devido a maior quantidade de unidades de processamento a serem tratadas. Esse é um comportamento esperado, que deve ser observado e levado em consideração (na maioria dos casos) ao se escolher uma determinada topologia de rede. Neste trabalho, os tempos de treinamentos foram no máximo 2,9 s, tornando, este parâmetro de avaliação não tão decisivo na escolha do classificador de estados mais adequado para cada base de dados.



**Figura 6.3** – Evolução dos parâmetros de avaliação do classificador para a Base A1.

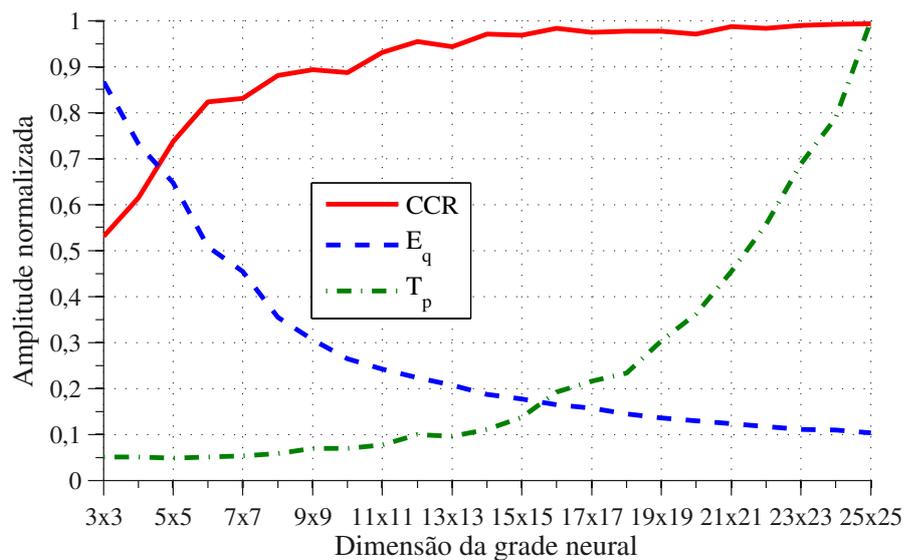


Figura 6.4 – Evolução dos parâmetros de avaliação do classificador para a Base A2.

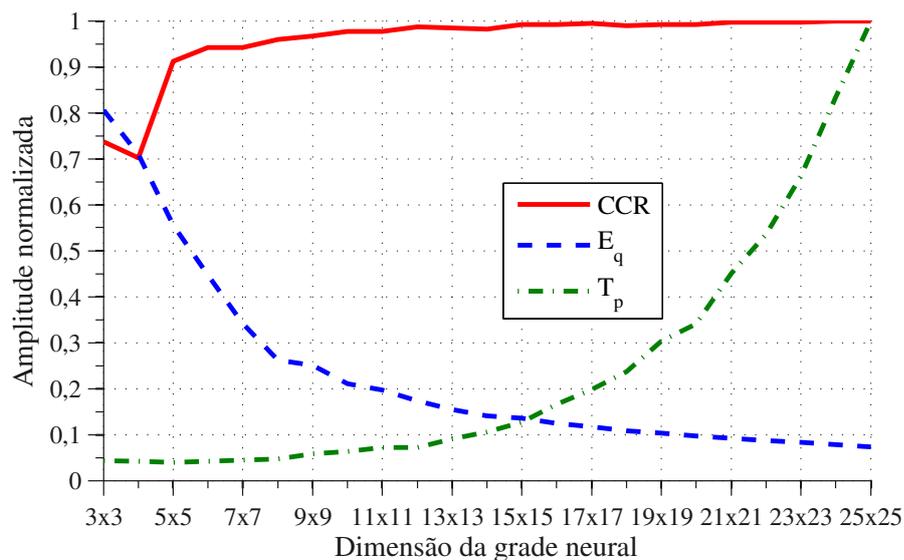
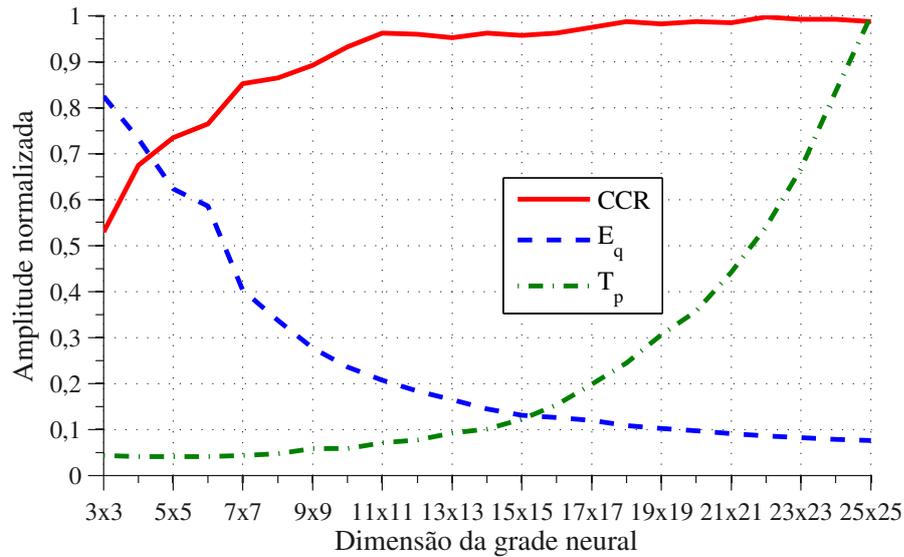


Figura 6.5 – Evolução dos parâmetros de avaliação do classificador para a Base B1.



**Figura 6.6** – Evolução dos parâmetros de avaliação do classificador para a Base B2.

A taxa de acerto,  $CCR$ , iniciou-se com valores modestos (entre 53% e 73%) para grades neurais com dimensão 3x3 e atingiu taxas bastante elevadas (de 98,75% a 100%) para grades com dimensão de 25x25. Este efeito também era esperado uma vez que, à medida que se aumenta a quantidade de elementos de processamento (neurônios da grade), elevam-se as chances do classificador conseguir decodificar e representar adequadamente determinado comportamento do conjunto de dados utilizado no treinamento. Isto torna-se evidente no treinamento do classificador com mapa 3x3 para as bases A2 e B2, onde a quantidade de estados a serem identificados é da mesma ordem de magnitude das unidades de processamento. Nesta situação, foram obtidas taxas de acerto de no máximo 80%, as quais podem ser consideradas baixas, em problemas de reconhecimento de padrões. Os resultados já são melhores, quando o mesmo classificador é treinado com as bases A1 e B1, pois nesta situação deseja-se que a rede tenha capacidade de diferenciar apenas entre dois estados de operação.

O processo de aumento da quantidade de neurônios, e conseqüentemente, da grade neural, com o objetivo de elevar a taxa de acerto do processo de classificação, deve ser realizado com precaução, pois existe o risco de fazer com que o classificador memorize todos os padrões (sobre-ajuste - *overfitting*), ao invés decodificá-los ou identificá-los nos sinais de corrente. Dessa maneira, uma das formas de se identificar a memorização de

padrões, é avaliar as variações no valor da  $CCR$  (incrementos e decrementos) com relação ao tamanho da grade neural. Com isso, caso a  $CCR$  não varie significativamente, ou seja, caso ela atinja uma certa região de patamar, pode-se inferir que a rede está, a partir daí, apenas memorizando os dados ou, então que, a arquitetura utilizada não se presta à decodificação dos dados de entrada.

Outra maneira de identificar se a rede está memorizando padrões ou decodificando-os, é analisar o erro de quantização,  $E_q$ . Quanto mais próximo de zero for o  $E_q$ , maior é a adaptação da grade neural ao conjunto de dados utilizado no treinamento. Apesar do que, valores muito próximos de zero indicam um sobre-ajuste dos dados (KOHONEN, 2000). O  $E_q$ , calculado durante os testes, geralmente partiu de valores próximos a 0,3 para grades de menor dimensão e atingiu valores próximos de 0,028 para grades de maior dimensão. A redução média no erro de quantização foi em torno de 90%, conforme pode ser observado nos gráficos das Figuras de 6.3 a 6.6. Pode-se notar também, que a partir de determinada dimensão de grade neural, as reduções no valor de  $E_q$  são menos significativas, indicando assim, baixa evolução no processo de treinamento e classificação. Nesta situação, a rede está apenas memorizando os dados.

Com o objetivo de se determinar a melhor grade neural e, portanto, a melhor topologia do classificador de estados de operação de para-raios, realizou-se uma avaliação conjunta dos tempos de processamento, taxas de acerto e erro de quantização, para cada base de dados avaliada. Decidiu-se nesta análise, considerar que o melhor classificador seria aquele obtido quando a rede atingisse taxas de acerto próximas do patamar médio (estabilização da  $CCR$ ), cerca de 98%, o erro de quantização apresentasse reduções em torno de 85% (região de patamar média) e o tempo de processamento não estivesse na zona de crescimento abrupto. Dessa maneira, a dimensão de grade neural que atendeu a todos os critérios estabelecidos acima foi a da rede 18x18. O classificador de estados baseado na grade 18x18 forneceu taxas de acerto de 98,54%, 97,71%, 99,00% e 98,75% para as bases A1, A2, B1 e B2, respectivamente. Essas são taxas de acerto bastante elevadas dada a complexidade do problema, a qual pode ser evidenciada por meio da análise das curvas  $V \times I$  e dos gráficos de corrente de fuga total, mostrados no Capítulo 4, onde mesmo o para-raios estando sujeito a diferentes tipos de defeitos, modificações sutis ocorrem em

suas curvas, de modo que uma análise visual ou baseada em limiares pré-estabelecidos de algumas grandezas (valor de pico, rms, etc.) podem conduzir a erros de diagnóstico significativos.

Outro resultado bastante interessante, fornecido pela rede SOM, é o estado do mapa neural treinado com a identificação dos *clusters* (regiões com características e informações semelhantes) no mapa. Nas Figuras de 6.7 a 6.10 são apresentados mapas neurais organizados após os processos de treinamento e classificação dos dados de entrada, para as bases de dados A1, A2, B1 e B2. Cada célula corresponde a um neurônio. Cada classe de estado (segundo a Tabela 5.1) é destacada nos mapas neurais. No caso do mapa gerado para a base A1 (ver Figura 6.7), todos sinais de corrente correspondentes a estados de bom funcionamento ativaram os neurônios da parte superior do mapa, identificados pela rótulo *ok*. Os demais, obviamente, correspondem ao estado defeituoso (*def*). Na Figura 6.8 é mostrado o mapa do classificador treinado para a base A2. Neste caso, cada estado de operação simulado em laboratório ativa determinadas regiões do mapa, por exemplo, sinais de corrente de fuga total correspondentes a um para-raios do tipo A com umidade interna sensibilizarão os neurônios existentes no canto superior esquerdo do mapa neural. Dessa maneira, sempre que sinais não utilizados no treinamento ativarem neurônios nessa região, o classificador de estados irá informar que o para-raios encontra-se com umidade interna. A mesma análise pode ser realizada para os demais estados de operação.

Os resultados apresentados nas Figuras 6.9 e 6.10 para as bases B1 e B2, respectivamente, apresentam comportamentos similares àqueles obtidos para as bases A1 e A2. A única diferença é que o mapa correspondente à base B2 possui uma divisão de regiões (clusterização) ligeiramente melhor que aquela obtida para a base A2. Isto deve-se tanto às características intrínsecas dos para-raios e dos sinais avaliados, quanto à quantidade de estados avaliados que foi menor, uma vez que o estado de operação com desalinhamento da coluna ativa não pôde ser avaliado. Esta melhor clusterização acaba implicando em uma taxa de acerto maior do classificador.

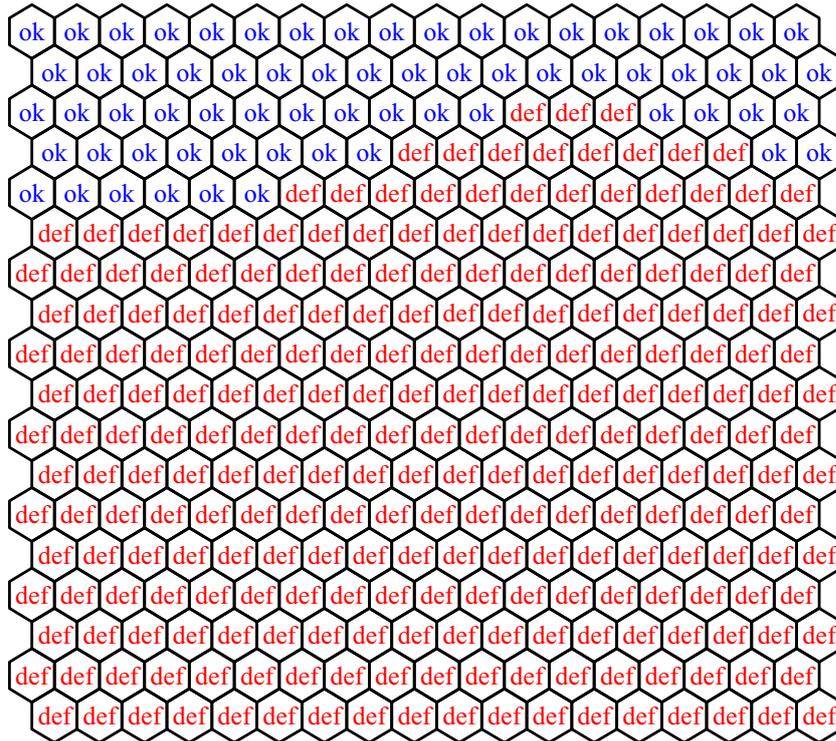


Figura 6.7 – Classificador treinado para a Base A1.

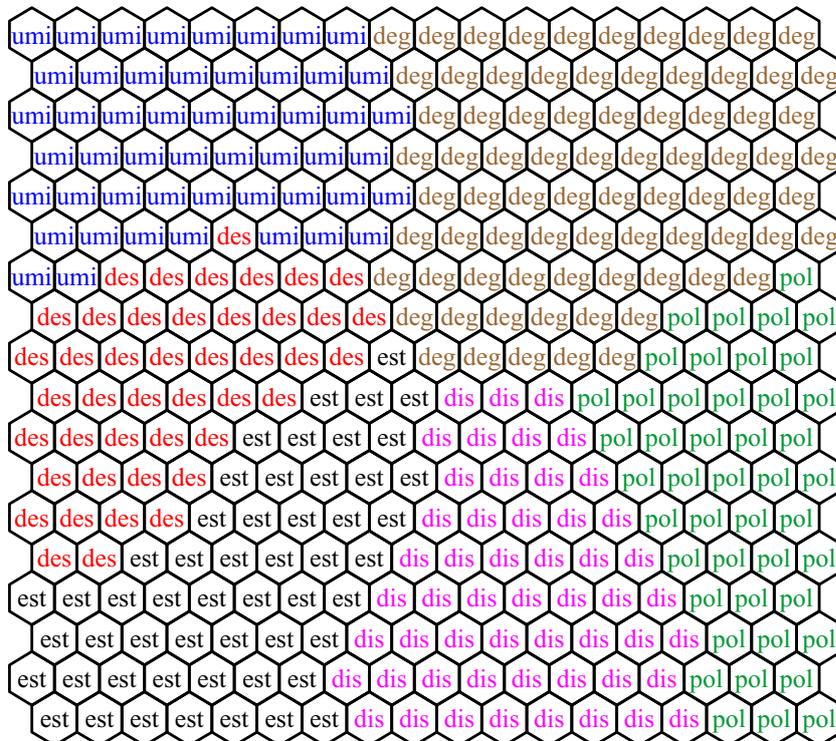


Figura 6.8 – Classificador treinado para a Base A2.

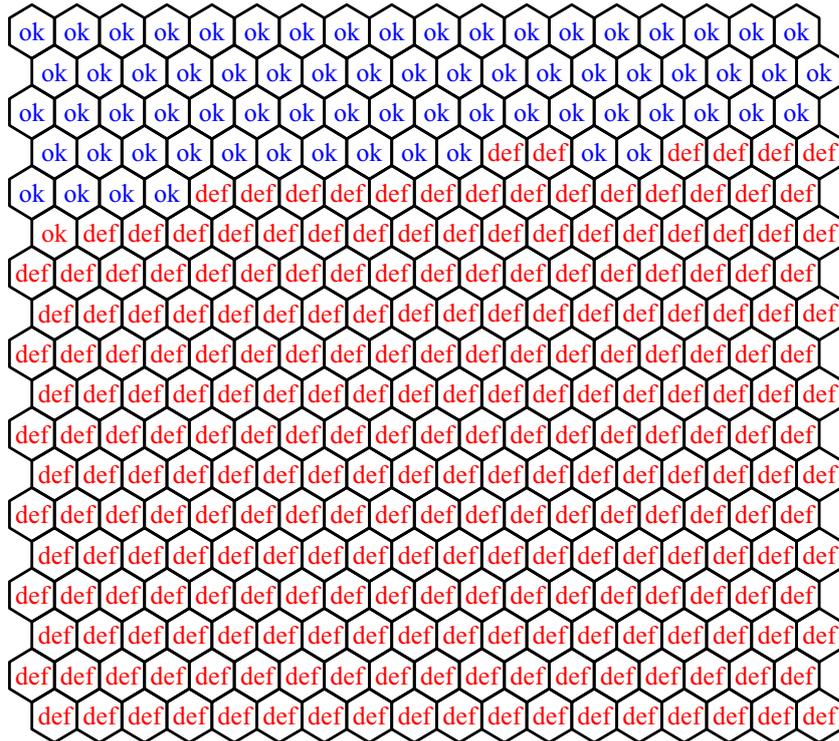


Figura 6.9 – Classificador treinado para a Base B1.

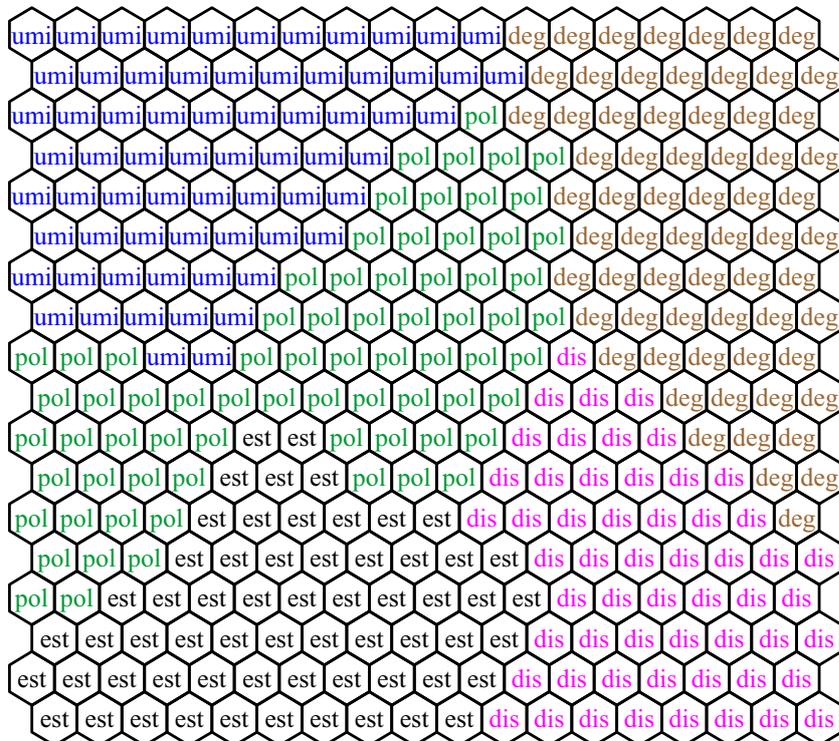


Figura 6.10 – Classificador treinado para a Base B2.

### 6.3 Recomendações Práticas de Utilização

Em situações reais de monitoramento e diagnóstico de para-raios, normalmente, não se dispõe de dados para o treinamento prévio do classificador de estados. Neste caso, recomenda-se que o classificador seja treinado com os índices de distorção harmônica dos dados que estão sendo medidos no momento, pois no instante em que o classificador detectar um padrão (estado de operação) diferente daqueles que vinham sendo utilizados no seu treinamento, ele irá auto-organizar o mapa neural, criando um novo *cluster* (região no mapa neural) para este novo padrão. Com isso, é possível detectar uma mudança no perfil operacional do para-raios. Caso essa mudança perdure, pode-se concluir que o para-raios teve seu comportamento alterado, devido, possivelmente, a presença de algum tipo de defeito. Neste caso, recomenda-se uma avaliação mais aprofundada do equipamento ou, até mesmo, sua retirada de operação.

Para ilustrar esse tipo de situação é mostrado na Figura 6.11 o mapa neural do classificador quando treinado apenas com padrões correspondentes a um bom estado de operação. Nessa situação, todos os neurônios são marcados com o rótulo *ok*. Caso seja inserido no processo de treinamento, um padrão correspondente a um estado diferente (defeituoso) daqueles utilizados no treinamento realizado até o momento, o classificador irá re-organizar o mapa, criando um cluster para o novo estado (*def*), conforme mostrado na Figura 6.12. Com essa abordagem é possível realizar o monitoramento *on-line* de para-raios, mesmo sem haver a disponibilidade de bases de dados de treinamento do classificador, graças às características auto-organizacionais e adaptativas do classificador proposto.

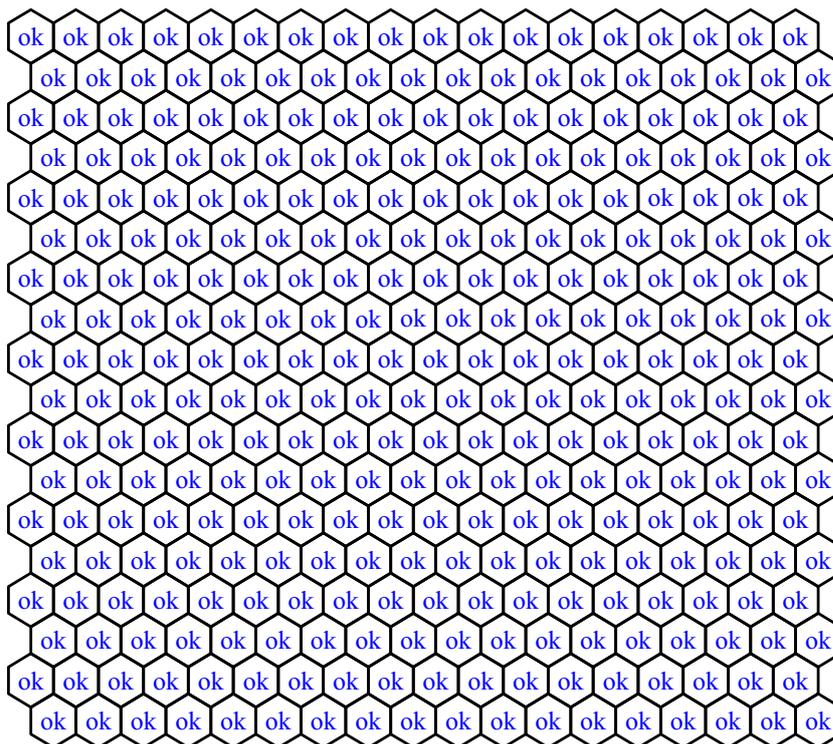


Figura 6.11 – Estado do mapa antes da detecção do defeito.

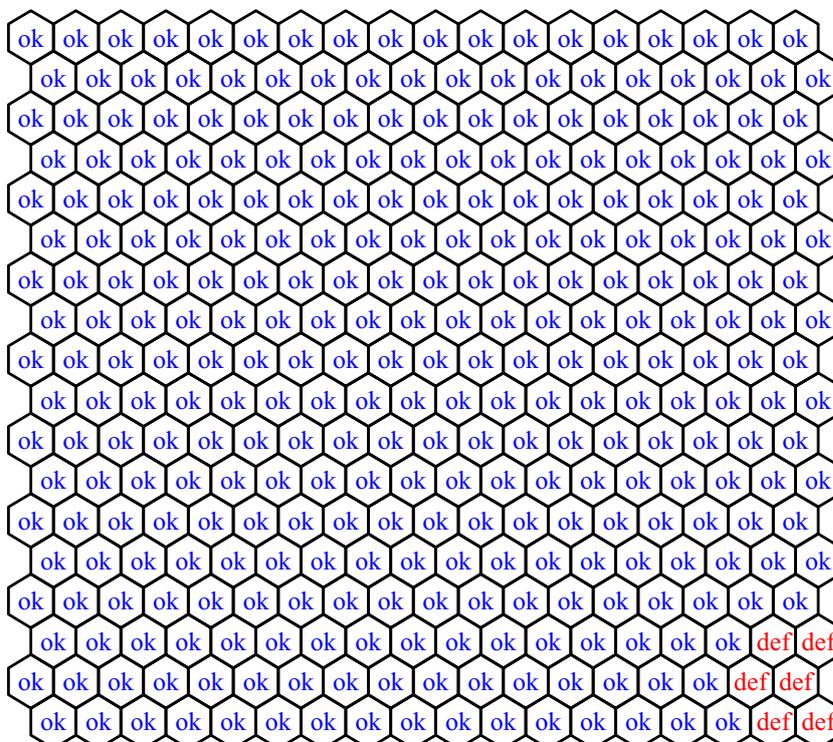


Figura 6.12 – Estado do mapa após a detecção do defeito.

Pretende-se avaliar essas recomendações de utilização, em situações reais, com para-raios instalados em campo, assim que for possível dispor de infraestrutura, recursos e um sistema elétrico para avaliar a técnica proposta.

## 6.4 Resumo

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da técnica desenvolvida, em sinais de corrente de fuga total medidos em laboratório. Inicialmente, empregou-se a técnica de extração de características aos sinais de corrente de fuga. A partir dos resultados obtidos (componentes harmônicas dos sinais de corrente) foi possível reconstruir os sinais de corrente com excelente grau de exatidão, conforme ficou demonstrado graficamente e através da estatística  $R^2$ , que sempre retornou valores maiores que 0,988 (o máximo é 1,0).

Após a estimação das componentes harmônicas dos sinais de corrente total, construiu-se bases de dados para o treinamento e teste do classificador de estados proposto, o qual é baseado em redes neurais auto-organizáveis. Ao término do processo de treinamento, avaliou-se o desempenho do classificador, onde se pôde constatar resultados bastante satisfatórios, em que taxas de acerto de, no mínimo 97,7%, foram obtidas na identificação do tipo de defeito existente no para-raios avaliado.

Ao término do processo de treinamento, foram plotados os mapas neurais treinados, os quais podem ser utilizados em atividades futuras de diagnóstico de para-raios, bastando para isso, que a rede seja alimentada com um novo padrão e que se verifique graficamente qual região do mapa foi ativada para o padrão avaliado. A região ativada indica o estado de operação do para-raios.

Ao final do capítulo, foram apresentadas algumas recomendações práticas de utilização do classificador proposto.

# Capítulo 7

## Conclusões

Neste trabalho, foi apresentada uma técnica capaz de realizar o monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO com base apenas na medição da corrente de fuga total, dispensando a medição da tensão aplicada sobre o para-raios, a decomposição da corrente total em suas componentes resistiva e capacitiva, o uso de premissas simplificadoras, o emprego de equações empíricas e o conhecimento prévio de informações ou características dos para-raios, sejam elas obtidas nos catálogos do fabricante ou em ensaios prévios de laboratório.

A técnica desenvolvida realiza a análise de sinais de corrente de fuga total medidos em para-raios de ZnO submetidos à sua tensão de operação. Baseado nos sinais medidos, foi desenvolvido um modelo matemático capaz de representar estes sinais com boa exatidão. O modelo é composto pelo somatório das cinco primeiras componentes harmônicas ímpares do sinal de corrente. A partir do modelo desenvolvido e dos sinais medidos, foi possível extrair características dos sinais, mais especificamente suas componentes harmônicas. Com as características extraídas dos sinais de corrente avaliados, realizou-se a construção de bases de dados a serem utilizadas no treinamento e teste de um classificador de estados de operação dos para-raios. O classificador é baseado em Redes Neurais Artificiais denominadas Mapas Auto-Organizáveis (SOM - *Self-Organizing Maps*).

Foram propostos e realizados ensaios e medições em laboratório, com o objetivo de construir bases de dados de sinais de corrente de fuga a serem utilizadas nos testes e validação da técnica desenvolvida. Para isso, foram utilizados para-raios de estação retirados de operação, nos quais uma série de defeitos artificiais foram inseridos, no intuito de simular defeitos reais, tais como: perda de estanqueidade, poluição superficial, degradação

de varistores, umidade interna, desalinhamento da coluna ativa e distribuição irregular de tensão. Cada para-raios avaliado foi submetido à Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV), com o objetivo de se registrar sinais de corrente de fuga total, os quais, após o processo de extração de características e normalização, compunham a base de dados.

Desenvolveu-se uma técnica para realizar a extração de características de sinais de corrente, baseada na aplicação do Método de Levenberg-Marquardt ao modelo de corrente de fuga proposto, de forma a identificar os parâmetros ótimos do modelo, segundo o critério dos Mínimos Quadrados Não Lineares. Com esta técnica foi possível extrair as componentes harmônicas dos sinais e reconstruí-los com alto grau de fidelidade, conforme ficou demonstrado tanto por meio da análise visual dos gráficos medidos e estimados dos sinais de corrente, quanto por meio dos valores máximos e mínimos da estatística  $R^2$ , os quais foram 0,9995 e 0,9880, respectivamente, para todos os sinais avaliados. Quanto mais próximo de 1,0 for o valor da estatística  $R^2$ , maior é a exatidão do sinal estimado.

Foram construídas quatro bases de dados (duas para cada tipo de para-raios avaliado) para treinamento e teste de um classificador de estados de operação, a partir das características extraídas dos sinais de corrente. Cada base é constituída por conjunto de dados de entrada correspondentes às distorções harmônicas individuais dos sinais de corrente, e um rótulo de saída, que identifica o estado do para-raios. Os rótulos poderiam identificar se o para-raios está bom ou defeituoso, ou ainda, identificar o tipo de defeito (dentre aqueles simulados em laboratório) ao qual o para-raios estaria submetido. Esta diferenciação foi realizada com o objetivo de avaliar a capacidade do classificador de estados em distinguir diversos estados de funcionamento dos para-raios, alguns inclusive, com características elétricas (curva  $V \times I$  e sinal de corrente total) bastante semelhantes.

Por fim, foi proposto, testado e validado com dados experimentais um classificador de estados de operação de para-raios de ZnO, baseado na utilização de redes neurais auto-organizáveis (rede SOM), as quais são capazes de realizar o agrupamento automático de padrões segundo o grau de similaridade. Com isso, obtém-se a formação de regiões em um mapa neural composto por padrões (características extraídas dos sinais) correspondentes a determinado estado de operação dos para-raios. O classificador foi testado tanto com as bases de dados que permitiam apenas identificar se o para-raios estava defeituoso ou

não, quanto com as bases de dados que possibilitaram a identificação do tipo de defeito (dentre aqueles simulados em laboratório). No primeiro caso, foram obtidas taxas de acerto mínimas de 98,54%, enquanto que, no segundo caso foram obtidas taxas de acerto mínimas de 97,71%. Estes resultados são bastante expressivos, dada a complexidade do problema. O classificador conseguiu detectar estados de operação com diferenças sutis, em que regras simples de classificação, baseadas em limiares, por exemplo, certamente iriam falhar.

Dessa maneira, conclui-se que não apenas é possível realizar o monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO a partir da análise apenas da corrente de fuga total, como é possível afirmar que, com a técnica de monitoramento apresentada, estes procedimentos são realizados com boa exatidão, uma vez que elevadas taxas de acerto de classificação de estados de operação de para-raios de ZnO foram encontradas, para diversas situações analisadas. Com isso, tem-se que a técnica de monitoramento proposta neste trabalho foi desenvolvida, testada e validada com sucesso, de sorte que, a partir de agora, espera-se aplicá-la no monitoramento *on-line* de para-raios, empregando um aparato de medição e aquisição de dados, relativamente simples, uma vez que medições de tensão são desnecessárias.

A seguir, são listadas algumas sugestões de trabalhos futuros decorrentes da pesquisa realizada neste trabalho:

- Análise de sinais de corrente de fuga de para-raios instalados em campo, com a finalidade de testar o desempenho do classificador desenvolvido em situações reais. A partir dos sinais obtidos em campo e de outros obtidos em laboratório a partir de novas campanhas de medições, será possível construir bases de dados mais robustas e representativas para efeitos práticos de diagnóstico de para-raios;
- Atualmente, os para-raios de ZnO com invólucro polimérico vem sendo instalados no sistema com uma frequência cada vez maior. Logo, é imprescindível testar a técnica desenvolvida neste tipo de para-raios, com o objetivo de propor e desenvolver um técnica confiável para o monitoramento de para-raios poliméricos;
- Para-raios de classes de operação inferiores utilizados, especialmente, em sistemas

de distribuição de energia elétrica constituem boa parte dos para-raios instalados em campo. O monitoramento desses para-raios é bastante precário ou inexistente. Pretende-se adaptar a técnica desenvolvida e aplicá-la ao monitoramento de para-raios de distribuição;

- Avaliação da correlação entre as componentes harmônicas dos sinais de corrente com nível e tipo de degradação dos para-raios utilizando análise estatística;
- Além dos para-raios de estação e distribuição, sugere-se a aplicação desta técnica no monitoramento de outros equipamentos de subestação sujeitos à passagem de corrente de fuga, tais como os isoladores poliméricos. Sabe-se que, assim como nos para-raios, o nível de corrente de fuga em isoladores está ligado diretamente ao seu nível de degradação;
- Avaliação do desempenho de outros tipos de classificadores, sejam aqueles baseados em novas arquiteturas de redes neurais sejam aqueles baseados em ferramentas estatísticas ou ainda classificadores híbridos. Poderão ser comparados, então, a exatidão e confiabilidade dos resultados, o tempo de treinamento e o esforço computacional de cada classificador, com o objetivo de determinar um classificador ótimo, que atenda, satisfatoriamente, todos os parâmetros de comparação;
- Proposição de um sistema capaz de detectar apenas a poluição dos para-raios, uma vez, que este é um problema que pode ser eliminado, devolvendo aos para-raios, suas características operacionais nominais;
- Desenvolvimento de um sistema embarcado com algoritmos e *hardware* capazes de realizar, em campo, o monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO.

# Referências Bibliográficas

ABB. *Physical Properties of Zinc Oxide Varistors*. [S.l.], 2001.

ABB. *Excourt II - User's Manual*. [S.l.], 2010.

ABDUL-MALEK, Z.; NOVIZON; AULIA. A New Method to Extract the Resistive Component of the Metal Oxide Surge Arrester Leakage Current. In: IEEE 2ND INTERNATIONAL POWER AND ENERGY CONFERENCE. [S.l.], 2008. p. 399–402.

ALMEIDA, C. A. L.; BRAGA, A. P.; NASCIMENTO, S.; PAIVA, V.; MARTINS, H. J. A.; TORRES, R.; CAMINHAS, W. M. Intelligent Thermographic Diagnostic Applied to Surge Arresters: A New Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 2, p. 751–757, April 2009.

ARAUJO, J. F.; LIRA, G. R. S.; FERREIRA, T. V. Estudo Comparativo de Técnicas de Estimacão de Harmônicos em Sistemas de Potência. In: ANAIS DO IV SBSE - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. Goiânia, Brasil, 2012.

BACEGA, W. R.; KANASHIRO, A. G.; TATIZAWA, H.; ZANOTTI Jr., M.; OBASE, P. F. Diagnóstico do Estado dos Para-raios em Operao no Sistema de Transmissão. In: ANAIS DO V CITENEL - CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA ELÉTRICA. Belém, Brasil, 2009a.

BACEGA, W. R.; TATIZAWA, H.; KANASHIRO, A. G. Técnica de Identificao do Processo de Degradao de Para-raios de ZnO em Campo. In: ANAIS DO XX SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Recife, Brasil, 2009b.

- BARTKOWIAK, M.; COMBER, M. G.; MAHAN, G. D. Failure Modes and Energy Absorption Capability of ZnO Varistors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 1, p. 152–162, January 1999.
- BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. *Redes Neurais Artificiais: Teorias e Aplicações*. São Paulo, Brasil: LTC, 2007.
- BRITO, V. S.; LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; ALMEIDA, G. J. C. Estudo Comparativo de Métodos de Decomposição da Corrente de Fuga Total em Para-Raios ZnO. In: ANAIS DO IV SBSE - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. Goiânia, Brasil, 2012.
- CARLSON, W. G.; GUPTA, T. K.; SWEETANA, A. A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 1, n. 2, p. 67–73, April 1986.
- CHONG, E. K. P.; ZAK, S. H. *An Introduction to Optimization*. New York, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- CHRZAN, K.; KOEHLER, W. Diagnostics of High Voltage Metal Oxide Arresters Procedure Errors. In: PROCEEDINGS OF THE 11TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. London - UK, 1999.
- CHRZAN, K. L. Influence of Moisture and Partial Discharges on the Degradation of High-Voltage Surge Arresters. *European Transactions on Electrical Power*, v. 14, n. 3, p. 175–184, May 2004.
- CHRZAN, K. L. Termovision Diagnostics of Metal Oxide Surge Arresters. In: PROCEEDINGS OF THE 15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Ljubljana, Slovenia, 2007.
- CHRZAN, K. L.; GIELNIAK, J. Voltage Distribution Along Metal Oxide Surge Arresters. In: PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Delft - Netherlands, 2003.

- COFEEN, L. T.; MCBRIDE, J. E. High Voltage AC Resistive Current Measurements Using a Computer Based Digital Watts Technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 2, p. 550–556, April 1991.
- COSTA, E. G. *Análise do Desempenho de Para-raios de Óxido de Zinco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, abril 1999.
- COSTA, F. F. *Estimação de Harmônicos e Inter-Harmônicos em Sistemas Elétricos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, setembro 2005.
- COSTA, F. F.; NAIDU, S. R.; COSTA, E. G.; FERNANDES, D. A.; SOARES, R. Metodologia de Estimação de Harmônicos e Inter-Harmônicos em Sistemas Elétricos de Distribuição. In: EPIM'2005 - 6 ENCUESTRO DE POTENCIA, INSTRUMENTACION Y MEDIDAS. Montevideo, Uruguai, 2005.
- DENGLER, K.; FESER, K.; KOHLER, W.; SCHMIDT, W.; RICHTER, B. On-line Diagnosis of MO-Varistors. In: PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Montreal - Canada, 1997.
- DOBLE. *LCM500 - Leakage Current Monitor: On-line Assessment of Surge Arresters*. [S.l.], 2000.
- EDA, K. Destruction Mechanism of ZnO Varistors due to High Currents. *Journal of Applied Physics*, v. 56, n. 10, p. 2948–2955, November 1984.
- EDA, K. Zinc Oxide Varistors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 5, n. 6, p. 28–41, 1989.
- FERNANDES Jr., D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, dezembro 2003.
- FESER, K.; KOHLER, W.; QIU, D.; CHRZAN, K. Behaviour of Zinc Oxide Surge Arresters Under Pollution. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 2, p. 688–695, April 1991.

- FLETCHER, R. *Practical Methods of Optimization Volume 1 - Unconstrained Optimization*. Scotland, U.K.: John Wiley & Sons, Ltd, 1980.
- FRANCO, J. L. *Estudo das Propriedades Elétricas dos Varistores de ZnO na Região de Baixas Tensões Aplicadas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, dezembro 1993.
- GALINDO, T. C. L.; CALAZANS, A.; MIRANDA, A.; LUIZ, E.; RODRIGUES, E.; DOMINGOS, J.; BELTRÃO, J.; NORAT, M.; VENICIO, M. Monitoring of Surge Arresters through Thermographic Inspection - Case Studies. In: PROCEEDINGS OF THE INFRARED CAMERA APPLICATIONS CONFERENCE. Las Vegas, USA, 2006.
- GIRGIS, A. A.; HAM, F. M. A Quantitative Study of Pitfalls in the FFT. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, v. 16, n. 4, p. 434–439, July 1980.
- GUPTA, T. K. Application of Zinc Oxide Varistors. *J. Am. Ceram. Soc.*, v. 73, n. 7, p. 1817–1840, 1990.
- HADDAD, A.; WARNED, D. *Advances in High Voltage Engineering*. New York, USA: Institution of Engineering and Technology, 2009.
- HAYKIN, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. New York: Prentice Hall, 1998.
- HEINRICH, C.; HINRICHSEN, V. Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks-Comparison of Existing and Newly Developed Procedures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 1, p. 138–143, January 2001.
- HILEMAN, A. R. *Insulation Coordination for Power Systems*. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 1999.
- HINRICHSEN, V. Monitoring of High Voltage Metal Oxide Surge Arresters. In: PROCEEDINGS OF THE VI JORNADAS INTERNACIONALES DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO. Bilbao - Espanha, 1997.

- HINRICHSEN, V. *Metal Oxide Surge Arrester Fundamentals*. Siemens AG, Berlin - Germany, 2001.
- IEC. *IEC 60099-5 Surge Arresters - Selection and Application Recommendations*. [S.l.], 2000.
- IEC. *IEC 60099-4 Surge Arresters—Part 4: Metal-oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems*. [S.l.], 2001.
- IEEE. *IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing*. [S.l.], 1995.
- JAIN, A. K.; DUIN, R. P. W.; MAO, J. Statistical Pattern Recognition: A Review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 22, n. 1, p. 4–37, January 2000.
- KARAWITA, C.; RAGHUVVEER, M. R. Onsite MOSA Condition Assessment — A New Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 3, p. 1273–1277, July 2006.
- KELLEY, C. T. *Iterative Methods for Optimization*. Philadelphia, USA: SIAM, 1999.
- KLEIN, T.; KOHLER, W.; FESER, K.; SCHMIDT, W.; BEBENSEE, R. A New Monitoring System for Metal Oxide Surge Arresters. In: PROCEEDINGS OF THE 11TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. London - UK, 1999.
- KNOBLOCH, H.; GOHLER, R.; KUHNE, W.; REICHELT, K.; SOLBACH, H. B.; BRUCHHAUS, R.; HOLUBARSCH, W. Influence of the Surrounding Medium and Service Behaviour of Metal Oxide Resistors for High Voltage Arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 2, p. 680–687, April 1991.
- KOHONEN, T. *Self-Organizing Maps*. Berlin, Alemanha: Springer, 2000.
- KOURDI, M. B.; BUI, A.; LOUBIERE, A.; KHEDIM, A. Behaviour of Metal-Oxide-Based Varistors Subjected to Partial Discharges in Air. *J. Phys. D: Appl. Phys*, v. 25, n. 3, p. 548–551, March 1992.

- LARSEN, V.; LIEN, K. In-Service Testing and Diagnosis of Gapless Metal Oxide Surge Arresters. In: IX INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION. [S.l.], 2007.
- LEE, B. H.; KANG, S. M. A New On-line Leakage Current Monitoring System of ZnO Surge Arresters. *Materials Science and Engineering B*, v. 119, n. 1, p. 13–18, 2005.
- LIRA, G. R. S. *Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico de Para-raios de Óxido de Zinco*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, março 2008.
- LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; ALMEIDA, C. W. D. Self-Organizing Maps Applied to Monitoring and Diagnosis of ZnO Surge Arresters. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION LATIN AMERICA. São Paulo, Brazil, 2010.
- LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; BRITO, V. S. Diagnóstico de Para-raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total. In: ANAIS DO IV SBSE - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. Goiânia, Brasil, 2012.
- LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; BRITO, V. S.; NOBREGA, L. A. M. M. Adaptive Resonance Theory Applied to MOSA Monitoring. In: PROCEEDINGS OF THE XVII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Hannover, Germany, 2011.
- LIRA, J. G. A. *Sistema de Aquisição de Dados para Monitoramento e Diagnóstico Remoto das Condições de Para-raios de Óxido de Zinco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, outubro 2007.
- LUDWIG Jr., O.; MONTGOMERY, E. *Redes Neurais: Fundamentos e Aplicações com Programas em C*. Rio de Janeiro, Brasil: Ciência Moderna, 2007.
- LUNDQUIST, J.; STENSTROM, L.; SCHEI, A.; HANSEN, B. New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service. *IEEE Trans. Power Del.*, v. 5, n. 4, p. 1811–1822, October 1990.

- MACEDO, E. C. T. *Sistema de Avaliação do Nível de Degradação de Para-Raios de Óxido de Zinco*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, março 2010.
- MADSEN, K.; NIELSEN, H. B.; TINGLEFF, O. *Methods for Non-Linear Least Squares Problems*. [S.l.], April 2004.
- MARTINS, H. J. A.; TORRES, R. J.; LAURENTYS, C. A.; NASCIMENTO, S. T.; CAMINHAS, W. M.; BRAGA, A. P. Intelligent Detection and Diagnosis of Surge Arresters Faults Using Neural Network Techniques. In: PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Beijing, China, 2005.
- MASTERS, T. *Practical Neural Network Recipes in C++*. California, USA: Academic Press, 1993.
- MATHWORKS. *Curve Fitting Toolbox User's Guide*. [S.l.], 2007.
- MORAES, H. M. *Verificação de Degradação de Blocos Cerâmicos à Base de Óxido de Zinco através da Medição de Descargas Parciais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, dezembro 1987.
- PANDYA, A. S.; MACY, R. B. *Pattern Recognition with Neural Networks in C++*. Florida, USA: CRC Press, 1996.
- PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. New York, USA: Cambridge University Press, 1992.
- RAO, S. S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. New York, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 1996.
- ROSSMAN, J. B.; NELSON, J. H.; DROKE, M. A. Reliability and Failure Analysis of Porcelain High-Voltage Surge Arresters. In: PROCEEDINGS OF THE 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION (ICHVE). New Orleans, USA, 2010. p. 604–607.

- SAKSHAUG, E. C. A Brief History of AC Surge Arresters. *IEEE Power Engineering Review*, v. 11, n. 8, p. 11–1, August 1991.
- SHIRAKAWA, S.; ENDO, F.; KITAJIMA, H.; KOBAYASHI, S.; KURITA, K.; GOTO, K.; SAKAI, M. Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector. *IEEE Trans. Power Del.*, v. 3, n. 3, p. 998–1003, July 1988.
- SOUZA, R. T. *Medição e Análise Harmônica da Corrente de Fuga Resistiva em Varistores de ZnO*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, agosto 2004.
- SPELLMAN, C. A.; HADDAD, A. A Technique for On-Line Monitoring of ZnO Surge Arresters. In: PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Montreal - Canada, 1997.
- SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, R. A. *Probability and Statistics*. New York, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.
- WANDERLEY NETO, E. T. *Monitoramento e Diagnóstico de Para-raios a ZnO através de Redes Neurais Artificiais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, março 2007.
- WANDERLEY NETO, E. T.; COSTA, E. G.; MAIA, M. J. A. Artificial Neural Networks Used for ZnO Arresters Diagnosis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 3, p. 1390–1395, July 2009.
- ZHAO, T.; LI, Q.; QIAN, J. Investigation on Digital Algorithm for On-Line Monitoring and Diagnostics of Metal Oxide Surge Arrester Based on an Accurate Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 751–756, April 2005.
- ZHU, H.; RAGHUVVEER, M. R. Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 4, p. 599–603, October 2001.