

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
**Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica**

GERALDO BEZERRA LIMA JÚNIOR

Monitoramento de Para-Raios de Óxido de Zinco em  
Campo

Campina Grande, Paraíba  
Setembro de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
**Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica**

Monitoramento de Para-Raios de Óxido de Zinco em  
Campo

GERALDO BEZERRA LIMA JÚNIOR

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Energia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Edson Guedes da Costa, D.Sc.  
George Rossany Soares de Lira  
Orientadores

Campina Grande – PB  
Setembro - 2014



"MONITORAMENTO DE PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO EM CAMPO"

GERALDO BEZERRA LIMA JÚNIOR

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 02/09/2014

  
EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG  
Orientador(a)

  
GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG  
Orientador(a)

  
WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, Ph.D., UFCG  
Examinador(a)

  
KARCUS MARCELLUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG  
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*À minha família, filhas, esposa, pais e irmãos por me fazerem fortes na conduta e perseverante nos objetivos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por me fazer entender que na vida, com fé, esforço, respeito, dedicação e trabalho as conquistas são possíveis. E por me fazer firme nos momentos que mais precisei para alcançar esse objetivo.

Aos meus pais que sempre valorizaram, incentivaram e motivaram seus filhos desde cedo aos estudos.

A minha esposa e filhas, pelo carinho, sorrisos e pela compreensão com minhas faltas familiares.

Aos meus irmãos por me fazerem sempre acreditar que o objetivo era possível.

Aos professores que ajudaram a formar a base de conhecimento necessário a este trabalho, e de forma especial aos orientadores George Rossany e Edson Guedes que me direcionaram e conduziram durante a pesquisa.

A Chesf pelo programa de desenvolvimento do conhecimento, ao Eng. Alexandre Guaraná da Gerência Regional Leste, pela oportunidade e ao Eng. Roberto Paiva do Serviço de Manutenção de Subestação de Recife pelo apoio e compreensão.

Ao técnico e colega Alcides Bonfim pela grande ajuda na realização das atividades em campo.

Ao colega Valdemir da UFCG pela colaboração e apoio na realização de experimentos no laboratório.

Aos colegas da turma do mestrado pela convivência, ajuda e conhecimento intercambiados.

*“Cada ponto de vista é à vista de um ponto”*

(Leonardo Boff)

## RESUMO

Nos dias atuais a confiabilidade e a continuidade no fornecimento de energia elétrica são cada vez mais exigidos. Os para-raios tem uma importante função neste processo que é de proteger os demais equipamentos integrantes da rede elétrica de sobretensões atmosféricas e de manobra. Quando falham, normalmente provocam o desligamento de linhas de transmissão ou de transformadores, penalizando severamente a concessionária pela indisponibilidade ou por multas impostas pela agência reguladora. Como todo equipamento importante para o sistema elétrico, os para-raios necessitam de técnicas eficazes de monitoramento. Na literatura e na indústria podem ser encontradas diversas técnicas, procedimentos ou equipamentos destinados ao seu monitoramento. Todos os procedimentos ou equipamentos possuem suas limitações, vantagens e desvantagens, sejam elas técnicas, econômicas ou operacionais. Visando suplantar algumas das limitações existentes nas técnicas e procedimentos normalmente empregados no setor elétrico, encontra-se proposto neste trabalho uma metodologia de análise da condição operacional de para-raios em campo, com base em medições da corrente de fuga total. Com esta metodologia pretende-se minimizar as dificuldades operacionais relacionadas às atividades de monitoramento, uma vez que será medida apenas a corrente de fuga total, diferentemente de técnicas e procedimentos usuais que requerem também a medição da tensão aplicada. Um banco de dados de correntes de fuga foi obtido com medições realizadas em 05 (cinco) subestações. As medições foram agrupadas por modelo/fabricante e tempo de operação dos para-raios. O instrumento de medição utilizado é composto de um amperímetro do tipo alicate e um osciloscópio digital portátil. O processo de medição em campo mostrou-se efetivo e prático devido à facilidade de manuseio do instrumento utilizado. Ensaio em laboratório foram realizados para avaliação da metodologia e dos instrumentos de medição. A partir da base de dados produzida, foi possível com emprego de técnicas de processamento de sinais e estatística, observar o comportamento gaussiano dos dados e o crescimento do valor médio da componente de 3ª harmônica da corrente total em função do tempo de operação, evidenciando, assim, a correlação entre a elevação da corrente de fuga e a diminuição da vida útil dos para-raios.

**Palavras Chaves:** Para-raios; Corrente de fuga total; Monitoramento; Vida útil.

## ABSTRACT

Nowadays the reliability and continuity in the electricity supply are increasingly required. The surge arresters has an important function in this process, which is to protect the other utility equipment against lightning and switching surges. When they fail, usually causing the shutdown of transmission lines or transformers, severely penalizing the power utility for the unavailability or regulator fines. As any important equipment for the electrical system, surge arresters need effective monitoring techniques. In the literature and industry several techniques, procedures or equipment for their monitoring can be found. All procedures or devices have their limitations, advantages and disadvantages, whether technical, economic or operational. Aiming to overcome some of the limitations in existing techniques and procedures commonly employed in the electrical industry, a methodology for analyzing the surge arrester operational condition based on measurements of total leakage current is proposed in this paper. With this methodology is intended to minimize operational difficulties associated with monitoring activities, since it will only measure the total leakage current unlike the usual techniques and procedures, which require the measurement of the applied voltage, too. A database of leakage currents with measurements performed in five (05) power substations was obtained. Measurements were grouped by arresters model/manufacturer and operation time. The measuring instrument used consists of a clamp type ammeter and a portable digital oscilloscope. The process of field measurement was effective and practical due to the ease of handling of the used instrument. Laboratory tests were performed to evaluate the methodology and measuring instruments. From the database produced, it was possible through the use of techniques of signal processing and statistical observe the Gaussian behavior of the data and the average increase of the 3rd harmonic component of the total current as a function of operating time, which highlights thus, the correlation between the increase of the leakage current and the decrease of the lifetime of the surge arrester.

**Keywords:** Surge arrester; Leakage current total; Monitoring; Lifetime.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	xiv
<b>Capítulo 1</b> .....	1
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização da Dissertação.....	3
<b>Capítulo 2</b> .....	4
2. Fundamentação Teórica.....	4
2.1. Para-Raios.....	4
2.2. Principais Parâmetros do Para-Raios de Óxido de Zinco.....	6
2.3. Características Construtivas dos Para-Raios de Óxido de Zinco.....	8
2.4. Características Básicas e Elétricas do Para-Raios de Óxido de Zinco.....	11
2.4.1. Região de baixas correntes.....	13
2.4.2. Região de operação altamente não linear.....	15
2.4.3. Região superior ou de alta corrente.....	15
<b>Capítulo 3</b> .....	16
3. Revisão Bibliográfica.....	16
3.1. Tipos de Defeitos em Para-raios de ZnO.....	16
3.2. Monitoramento e Detecção de Defeitos em Para-raios de ZnO.....	18
3.3. Análise das Técnicas Preditivas de Diagnostico de Para-raios.....	19
3.3.1. Termografia infravermelha.....	20
3.3.2. Contador de operações e medição da corrente de fuga total.....	22
3.3.3. Medição e análise da corrente de fuga resistiva e do 3º harmônico da corrente de fuga total.....	24
3.3.4. Métodos de medição da corrente de fuga.....	30
<b>Capítulo 4</b> .....	36
4. Metodologia e Critérios.....	36
4.1. Metodologia.....	36
4.2. Seleção dos Para-raios.....	37
4.3. Medição da Corrente de Fuga.....	38

4.3.1. Escolha da técnica de medição .....	38
4.3.2. Instrumentos de medição .....	39
4.4. Técnica de processamento e análise dos dados .....	40
4.4.1. Média móvel .....	41
4.4.2. Fast Fourier Transform (FFT) .....	42
4.4.3. Estatística .....	42
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>49</b>
5. Resultados e Análises.....	49
5.1. Validação em Laboratório .....	49
5.2. Validação em Campo .....	56
5.2.1. Seleção dos para-raios .....	56
5.2.2. Medições de campo.....	57
5.2.3. Processamento de sinais.....	59
5.2.4. Análise estatística dos dados .....	68
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>85</b>
6. Conclusões .....	85
<b>Referências</b> .....	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - SOBRETENSÕES EM SISTEMA DE EXTRA ALTA TENSÃO (EAT).....	4
FIGURA 2.2 - CARACTERÍSTICA $V \times I$ DE PARA-RAIOS DE ZNO E SIC.....	5
FIGURA 2.3 - EXEMPLO DA CURVA DE SUPORTABILIDADE $V \times T$ .....	7
FIGURA 2.4 - CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PARA-RAIOS À ZNO DE 475 kV. ....	8
FIGURA 2.5 - ESTRUTURA DE UM PARA-RAIOS DE ZNO COM INVÓLUCRO DE PORCELANA. ....	9
FIGURA 2.6 - ESTRUTURA DE UM PARA-RAIOS DE ZNO COM INVÓLUCRO POLIMÉRICO.....	10
FIGURA 2.7 - VARISTORES COM DIÂMETROS E ALTURAS DIFERENTES.....	10
FIGURA 2.8 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MICROESTRUTURA DOS VARISTORES. ....	11
FIGURA 2.9 - CIRCUITO SIMPLIFICADO DE VARISTOR DE ZNO. ....	12
FIGURA 2.10 - GRANDEZAS PRESENTES NA CORRENTE DE FUGA DE UM PARA-RAIOS DE ZNO. .....	12
FIGURA 2.11 - CURVA V-I CARACTERÍSTICA DE UM VARISTOR DE ZNO.....	13
FIGURA 2.12 - FORMA DE ONDA DA TENSÃO E CORRENTE APLICADA A UM VARISTOR ZNO EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO. ....	14
FIGURA 2.13 - COMPORTAMENTO $V \times I$ /VARISTOR ZNO PARA DIFERENTES VALORES DE TENSÃO E TEMPERATURA.....	15
FIGURA 3.1 - PERFIL TÉRMICO COMPARATIVO DE PARA-RAIOS DE MESMO TIPO E MODELO. .	20
FIGURA 3.2 - PERFIL TÉRMICO EM ÂNGULO DE PARA-RAIOS DE MESMO TIPO E MODELO. ....	21
FIGURA 3.3 - VISTA FRONTAL DE UM MEDIDOR DE CORRENTE DE FUGA ANALÓGICO COM CONTADOR DE DESCARGA MECÂNICO. ....	22
FIGURA 3.4 - INCREMENTO RELATIVO DA CORRENTE DE FUGA TOTAL X INCREMENTO RELATIVO DA COMPONENTE RESISTIVA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL. ....	23
FIGURA 3.5 - CURVA $V \times I$ POR DEGRADAÇÃO DO VARISTOR, APÓS LONGO PERÍODO SUBMETIDO A TENSÃO CONSTANTE. ....	24
FIGURA 3.6 - CURVA CARACTERÍSTICA TENSÃO X CORRENTE DE UM VARISTOR DE ZNO APRESENTANDO A CORRENTE TOTAL, SUA COMPONENTE RESISTIVA E A 3º HARMÔNICO DA CORRENTE TOTAL.....	25
FIGURA 3.7 - COMPORTAMENTO RELATIVO DA COMPONENTE RESISTIVA E A DE 3º HARMÔNICO DA CORRENTE TOTAL EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	26
FIGURA 3.8 - COMPORTAMENTO RELATIVO DA COMPONENTE RESISTIVA E A DE 3º HARMÔNICO DA CORRENTE TOTAL EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO APLICADA AO PARA-RAIOS E A TENSÃO DE OPERAÇÃO CONTÍNUA.....	26
FIGURA 3.9 - FATOR DE CORREÇÃO DA CORRENTE COM A TENSÃO.....	27
FIGURA 3.10 - FATOR DE CORREÇÃO DA CORRENTE COM A TEMPERATURA. ....	27
FIGURA 3.11 -DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL 230 kV SE DA CHESF. ....	29
FIGURA 3.12 - AMPLITUDE DE HARMÔNICAS 1ª A 15ª SE 230 kV DA CHESF. ....	29
FIGURA 3.13 - HISTÓRICO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL (DHI) MÉDIA DE TENSÃO DA HARMÔNICA DE 3ª ORDEM DE UMA SE 230 kV DA CHESF. ....	30
FIGURA 3.14 - MEDIDOR DE CORRENTE DE FUGA LCM II.....	34
FIGURA 3.15 - MEDIDOR DE CORRENTE DE FUGA EXCOUNT II.....	35
FIGURA 4.1 – FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES DA METODOLOGIA PROPOSTA. ....	37
FIGURA 4.2 - ALICATE AMPERÍMETRO. ....	39
FIGURA 4.3 - OSCILOSCÓPIO PORTÁTIL DIGITAL COM MEMÓRIA. ....	39
FIGURA 4.4 - REPRESENTAÇÃO DOS EXTREMOS E QUARTIS DE UMA DISTRIBUIÇÃO. ....	44
FIGURA 4.5 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UM <i>BOX-PLOT</i> COM SUAS MEDIDAS.....	45

FIGURA 4.6 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO AJUSTE DE PONTOS POR UMA RETA COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS.....	46
FIGURA 4.7 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE NORMAL COM SEUS PARÂMETROS M E $\Sigma$ .....	48
FIGURA 4.8 – CRITÉRIO PARA DIAGNÓSTICO DE PARA-RAIOS COM BASE NA DISTRIBUIÇÃO NORMAL COM PARÂMETROS M E $\Sigma$ .....	48
FIGURA 5.1 - ARRANJO DO CIRCUITO UTILIZADO NO ENSAIO DE MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA. ....	50
FIGURA 5.2 - ARRANJO DO CIRCUITO FÍSICO UTILIZADO NO ENSAIO DE MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA. ....	51
FIGURA 5.3 - FORMA DA ONDA DE TENSÃO E CORRENTE DO PARA-RAIOS NA CONDIÇÃO LIMPO. ....	52
FIGURA 5.4 - (A) OSCILOGRAFIA DA CORRENTE DE FUGA NO ESTADO OPERACIONAL NORMAL. (B) OSCILOGRAFIA DA CORRENTE DE FUGA NO ESTADO OPERACIONAL IMEDIATAMENTE APÓS UMA SOBRETENSÃO. (C) OSCILOGRAFIA DA CORRENTE DE FUGA EM ESTADO OPERACIONAL ANORMAL. ....	52
FIGURA 5.5 - (A) INVÓLUCRO DO PARA-RAIOS COM A POLUIÇÃO SECA OSCILOGRAFIA DA TENSÃO (AZUL), CORRENTE DE FUGA INTERNA (LARANJA) E CORRENTE DE FUGA SUPERFICIAL (ROSA). (B) INVÓLUCRO DO PARA-RAIOS COM A POLUIÇÃO ÚMIDA OSCILOGRAFIA DA TENSÃO (AZUL), CORRENTE DE FUGA TOTAL (LARANJA).....	53
FIGURA 5.6 - (A) TENSÃO APLICADA AO PARA-RAIOS, COM E SEM FILTRO. (B) ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA TENSÃO NO PARA-RAIOS. (C) CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS COM INVÓLUCRO LIMPO, COM E SEM FILTRO. (D) ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS COM INVÓLUCRO LIMPO. (E) CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS COM INVÓLUCRO POLUÍDO, COM E SEM FILTRO. (F) ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS COM INVÓLUCRO POLUÍDO. (G) CORRENTE DE FUGA SUPERFICIAL NO INVÓLUCRO DO PARA-RAIOS, NA CONDIÇÃO POLUÍDO, COM E SEM FILTRO. (H) ESPECTRO DE FREQUÊNCIA CORRENTE DE FUGA SUPERFICIAL NO INVÓLUCRO DO PARA-RAIOS, NA CONDIÇÃO POLUÍDO. ....	55
FIGURA 5.7 - ILUSTRAÇÃO DE MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA TOTAL EM CAMPO. ....	58
FIGURA 5.8 - (A) PARA-RAIOS COM CABO DE ATERRAMENTO DUPLO TIPO “BIGODE”. (B) PARA-RAIOS COM DOIS CONECTORES DE ATERRAMENTO E SEM ESPAÇAMENTO PRA BASE. (C) PARA-RAIOS COM GRANDE ALTURA.....	59
FIGURA 5.9 - ILUSTRAÇÃO DO FILTRO DE RUÍDO DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DE UM PARA-RAIOS 69kV. ....	60
FIGURA 5.10 - DETALHE AMPLIADO DO FUNCIONAMENTO DO FILTRO DE RUÍDO LEITURA DE UM PARA-RAIOS DE 69kV.....	60
FIGURA 5.11 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DE UM PARA-RAIOS DE 69kV APÓS A UTILIZAÇÃO DO FILTRO. ....	60
FIGURA 5.12 - TELA DO OSCILOSCÓPIO APRESENTANDO FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DE UM PARA-RAIOS DE 69kV. ....	61
FIGURA 5.13 - OSCILOGRAFIA DE PARA-RAIOS DE 69 kV APRESENTANDO ALTA FREQUÊNCIA. ....	61
FIGURA 5.14 - (A) <i>BY-PASS</i> NO CONTADOR DE OPERAÇÕES DO PARA-RAIOS VISTA LATERAL. (B) <i>BY-PASS</i> NO CONTADOR DE OPERAÇÕES DO PARA-RAIOS VISTA FRONTAL. ....	62
FIGURA 5.15 - TELA DO OSCILOSCÓPIO APRESENTANDO A FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS RC72T1C E GRANDEZAS ELÉTRICAS.....	63
FIGURA 5.16 – FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS JR72M9A. ....	63

FIGURA 5.17 -FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS JR72M9B.	64
FIGURA 5.18 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS JR72M9C. .....	64
FIGURA 5.19 - TERMOGRAMA PR JR72M9.....	65
FIGURA 5.20 - CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS JR72M9A CONDICIONADA EM PROGRAMA.....	65
FIGURA 5.21 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA CORRENTE DE FUGA TOTAL DO PARA-RAIOS JR72M9A CONDICIONADA EM PROGRAMA. ....	66
FIGURA 5.22 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA CORRENTE DE FUGA DO TOTAL DO PARA-RAIOS JR72M9B. ....	66
FIGURA 5.23 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA CORRENTE DE FUGA DO TOTAL DO PARA-RAIOS JR72M9B AMPLIADO PARA OBSERVAÇÃO DAS COMPONENTES DE 3ª, 5ª E 7ª HARMÔNICAS. ....	67
FIGURA 5.24 - PERFIL TÉRMICO DAS SE DURANTE AS MEDIÇÕES DA CORRENTE DE FUGA TOTAL. ....	68
FIGURA 5.25 - GRÁFICO DA REGRESSÃO LINEAR PR HZL2. ....	71
FIGURA 5.26 – <i>BOX-PLOT</i> I3ªH PR HZL2, 1-PR 8 ANOS, 2-PR 15 ANOS E 3 - PR 28 ANOS. .....	72
FIGURA 5.27 -DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS TRÊS FAIXAS DE TEMPO DE OPERAÇÃO PR HZL2. ....	72
FIGURA 5.28 - GRÁFICO DA REGRESSÃO LINEAR PR SE202. ....	74
FIGURA 5.29 – <i>BOX-PLOT</i> I3ªH PR SE202, 1-PR 11 ANOS, 2-PR 24 ANOS. ....	75
FIGURA 5.30 -DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS DUAS FAIXAS DE TEMPO DE OPERAÇÃO PR SE202. ....	75
FIGURA 5.31 – GRÁFICO DA REGRESSÃO LINEAR PR HZL2.....	77
FIGURA 5.32 – <i>BOX-PLOT</i> I1ªH PR HZL4, 1-PR 10 ANOS, 2-PR 15 ANOS.....	78
FIGURA 5.33 – <i>BOX-PLOT</i> I3ªH PR HZL4, 1-PR 10 ANOS, 2-PR 15 ANOS.....	78
FIGURA 5.34 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS DUAS FAIXAS DE TEMPO DE OPERAÇÃO PR HZL4.....	79
FIGURA 5.35 - GRÁFICO DA REGRESSÃO LINEAR PR S314 (9 ANOS).....	81
FIGURA 5.36 - GRÁFICO DA REGRESSÃO LINEAR PR S314 (16 ANOS).....	81
FIGURA 5.37 - GRÁFICO DA REGRESSÃO LINEAR PR S314 (9 E 16 ANOS). ....	82
FIGURA 5.38 – <i>BOX-PLOT</i> I1ªH PR S314, 1-PR 9 ANOS, 2-PR 16 ANOS. ....	82
FIGURA 5.39 – <i>BOX-PLOT</i> I3ªH PR S314, 1-PR 9 ANOS, 2-PR 16 ANOS. ....	83
FIGURA 5.40 – <i>BOX-PLOT</i> I3ªH/ I1ªH PR S314, 1-PR 9 ANOS, 2-PR 16 ANOS. ....	83
FIGURA 5.41 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS DUAS FAIXAS DE TEMPO DE OPERAÇÃO PR S314.....	84

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - LIMITES DA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO. ....	28
TABELA 3.2 - AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE MONITORAMENTO DA CORRENTE DE FUGA. ....	32
TABELA 4.1 - ESPECIFICAÇÕES DO ALICATE AMPERÍMETRO.....	40
TABELA 4.2 - ESPECIFICAÇÕES DO OSCILOSCÓPIO.....	40
TABELA 5.1 - DADOS TÉCNICOS DO PARA-RAIOS.....	50
TABELA 5.2 - COMPONENTE DE 3ª HARMÔNICA ENCONTRADO NOS EXPERIMENTOS. ....	56
TABELA 5.3 - RELAÇÃO FABRICANTE, TIPO E SUBESTAÇÃO DOS PARA-RAIOS SELECIONADOS. .....	56
TABELA 5.4 - DADOS DE PARA-RAIOS SELECIONADOS.....	57
TABELA 5.5 - AMPLITUDE DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE DOS PARA-RAIOS DO TERMINAL 72M9 SE JR. ....	67
TABELA 5.6 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA TEMPERATURA NAS SE DURANTE AS MEDIÇÕES DA CORRENTE DE FUGA. ....	69
TABELA 5.7 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS TENSÕES REGISTRADAS DURANTE AS MEDIÇÕES NAS SE.....	69
TABELA 5.8 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA I3ªH DOS DADOS MEDIDOS PARA O PR HZL2 (VALORES DE PICO). ....	70
TABELA 5.9 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA REGRESSÃO PR HZL2. ....	71
TABELA 5.10 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA I3ªH DOS DADOS MEDIDOS PARA O PR SE202 (VALORES DE PICO). ....	73
TABELA 5.11 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA REGRESSÃO PR SE202. ....	74
TABELA 5.12 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA I3ªH DOS DADOS MEDIDOS PARA O PR HZL4 (VALORES DE PICO). ....	76
TABELA 5.13 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA REGRESSÃO PR HZL2. ....	77
TABELA 5.14 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA I3ªH DOS DADOS MEDIDOS PARA O PR S314 (VALORES DE PICO). ....	80
TABELA 5.15 - VALORES DO R2 PARA REGRESSÃO PR S314. ....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRATE	-	Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica.
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica.
CHESF	-	Companhia Hidroelétrica do São Francisco.
DHT	-	Distorção Harmônica Total.
FT	-	Função de Transmissão.
FFT	-	Fast Fourier Transform.
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).
MMQ	-	Método dos mínimos Quadrados.
NCT	-	Não Conformidade Térmica.
PR	-	Para-raios.
SEP	-	Sistema Elétrico de Potência.
RN	-	Resolução Normativa.
SiC	-	Carboneto de Silício.
SIGA	-	Sistema Integrado de Gestão de Ativos.
TC	-	Transformador de Corrente.
TP	-	Transformador de Potencial.
TPC	-	Transformador de Potencial Capacitivo.
UFMG	-	Universidade Federal de Campina Grande.
Ur	-	Tensão Nominal.
ZnO	-	Óxido de Zinco.

# Capítulo 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO

Para-raios de óxido de zinco (ZnO) são equipamentos utilizados largamente no sistema elétrico de potência (SEP). Sua função é proteger os demais equipamentos que se encontram em sua vizinhança de sobretensões atmosféricas, de manobra. Sendo assim, possuem papel importante para confiabilidade das Funções de Transmissão (FT) do sistema elétrico.

Em geral, o para-raios (PR) é um dos equipamentos que possui menor custo dentre os demais integrantes de uma subestação e, com exceção de situações especiais, não possuem sinalização de nenhuma espécie na sala de controle, nem indicação externa de seu mau estado de funcionamento.

O modelo atual do Sistema Elétrico Brasileiro, fortemente regulado na área de Transmissão e Distribuição, no qual as empresas estão submetidas, institui através da Resolução Normativa (RN) Nr. 270 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade das instalações integrantes da rede básica. Segundo esta resolução as empresas são remuneradas pela disponibilidade em horas de suas FT que são compostas por Linhas de Transmissão, Transformadores, Compensadores Síncronos, Compensadores Estáticos, dentre outros, e o para-raios é um componente integrante destas funções. Sua falha ou defeito pode provocar o desligamento ou danos a equipamentos integrantes da FT protegidos por ele, que possuem normalmente preços bem mais elevados. Para intervenções programadas de manutenção nas FT, os valores deduzidos da receita da empresa variam de 2,5 a 10 vezes do valor recebido por hora de operação normal, e em casos não programadas e desligamentos intempestivos estes valores podem chegar a 150 vezes. Além da penalização normalmente prevista pela indisponibilidade, podem ainda advir multas, e danos à imagem da empresa perante consumidores e investidores (ANEEL, 2007).

Outro aspecto a ser considerado é o da segurança de pessoas que estão constantemente acessando o SEP para atividades de manutenção, operação ou inspeção, pois a falha dos para-raios pode ser acompanhada da explosão do seu invólucro, o que poderá ocasionar sequelas graves ou a morte de pessoas que estejam nas proximidades do equipamento.

Atualmente no setor elétrico não há consenso sobre o uso de técnicas de monitoramento envolvendo medição de corrente de fuga de para-raios (ABRATE, 2012) apesar dos vários trabalhos que vem sendo desenvolvidos nos últimos anos. (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; VIDEIRA, 2011; ALMEIDA et al., 2009; LIRA, 2012).

Diante deste cenário, é de grande importância o estudo e desenvolvimento de uma técnica para minimizar os custos associados à operação das FT e os riscos de acidentes por falhas em para-raios.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é aplicar uma metodologia de monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO instalados em campo através da avaliação da corrente de fuga total. Como objetivos específicos têm-se:

- Aplicar técnica de monitoramento e diagnóstico de para-raios que seja operacional em campo;
- Desenvolver procedimento de medição da corrente de fuga;
- Dispor de banco de dados de leituras para análises;
- Avaliar com base nos dados adquiridos em campo a condição da vida útil dos para-raios monitorados;
- Analisar a forma de onda adquirida com osciloscópio para diagnóstico de possíveis problemas.

A validação da metodologia aplicada será feita com base na análise comparativa da diferença de idade dos para-raios monitorados de mesmo modelo e fabricante e na medição comparativa feita em laboratório para verificação do desempenho dos instrumentos de medição utilizados.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

O texto desta dissertação está dividido em seis capítulos, iniciado pela presente introdução.

No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica sobre para-raios de ZnO, descrevendo suas características construtivas, elétricas e térmicas, bem como os principais problemas que podem ocorrer em um para-raios de ZnO.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais métodos de monitoramento de PR ZnO, ressaltadas as suas vantagens e desvantagens, sendo destacado os mais empregados nas empresas do setor elétrico. As características de alguns equipamentos disponíveis no mercado e sua filosofia de funcionamento também são abordadas.

No Capítulo 4 são descritos a metodologia e os critérios empregados para obtenção da corrente de fuga dos PR: seleção, organização dos dados, padronização do processo de medição, dificuldades, análise estatística e avaliação.

No Capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados das medições da corrente de fuga total e da harmônica de 3ª ordem obtidos em laboratório e em campo, para os modelos monitorados com o emprego da metodologia de avaliação proposta.

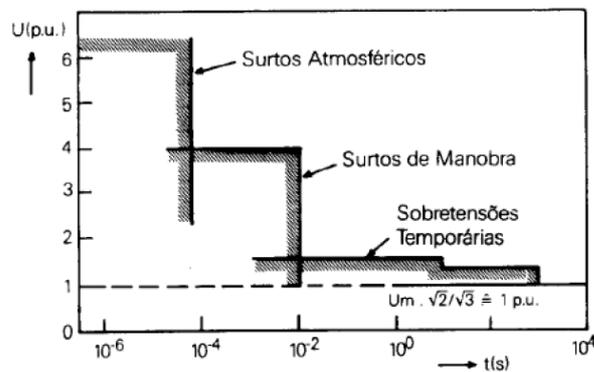
Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões, sumarizações das contribuições e propostas para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. PARA-RAIOS

Os para-raios ou supressores de surto são destinados a proteger equipamentos do sistema elétrico (transformadores, disjuntores, chaves, banco capacitores, etc.) contra sobretensões, que são distúrbios de *origem externa* a rede elétrica como a descarga atmosférica, ou de *origem interna* causada por eventos dentro da própria rede elétrica, como curto-circuito, manobra de equipamentos, perda súbita de carga, dentre outras. Estas sobretensões ocorrem entre fases e entre fase e terra, e tradicionalmente são classificadas quanto a sua origem em sobretensões atmosféricas, de manobra e temporárias, diferindo quanto a sua amplitude e tempo de duração. Na Figura 2.1 é ilustrado o comportamento destas sobretensões em um sistema de Extra Alta Tensão (D'AJUZ et al., 1985).



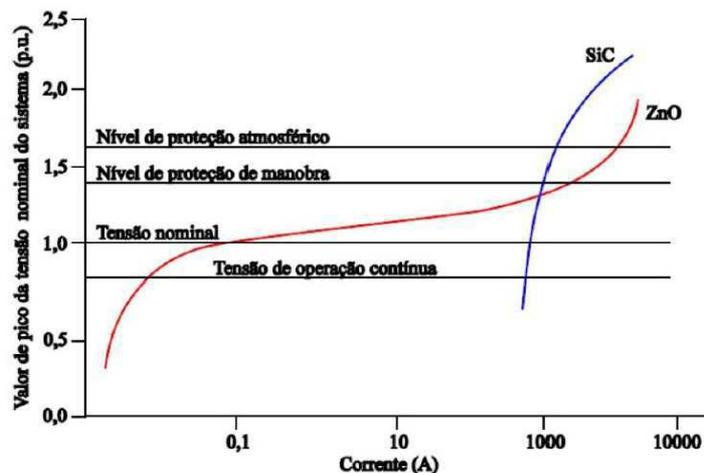
**Figura 2.1** - Sobretensões em sistema de Extra Alta Tensão (EAT).  
Fonte: (D'AJUZ et al., 1985).

Sendo assim, a função básica do para-raios é limitar a amplitude das sobretensões nos terminais dos equipamentos protegidos a valores que possam ser suportados de modo que não seja comprometida a sua isolação.

Embora os para-raios, de modo geral, sejam baratos se comparado aos demais equipamentos existentes na rede elétrica, se corretamente aplicados, possibilitam uma redução considerável nos custos dos equipamentos protegidos, pois a isolação dos equipamentos constitui uma parcela considerável na composição final de preço, principalmente em equipamentos de alta e extra-alta tensão.

Dentro dessa filosofia, o para-raios ideal deve possuir impedância infinita entre seus terminais em operação normal, conduzir instantaneamente durante a sobretensão, mantendo a amplitude de tensão próxima da nominal do sistema, parar de conduzir quando a sobretensão cessa, e não possuir limitação térmica.

Atualmente os para-raios de Carbureto de Silício (SiC) vem sendo substituídos pelos PR de óxido de zinco (VIANA, J. C. C, 2009), pois os PR SiC apresentam menor não linearidade (curva  $V \times I$ ) e necessitam do emprego de centelhadores internos, “gaps”, pois em condições normais de operação, sem os centelhadores, tem-se uma alta amplitude de corrente a frequência industrial, conforme ilustrado na Figura 2.2. Já os para-raios de óxido de zinco (ZnO), devido a sua alta não linearidade apresentam alta impedância para níveis normais de tensão, podendo com isso serem conectados diretamente ao sistema elétrico, sem a necessidade de gaps. A corrente de fuga total destes para-raios é da ordem de mA quando submetidos até a sua tensão de operação nominal, e devem atuar rapidamente quando submetidos a sobretensões, tendo um tempo de resposta melhor que os de SiC, assim como, uma tensão residual menor.

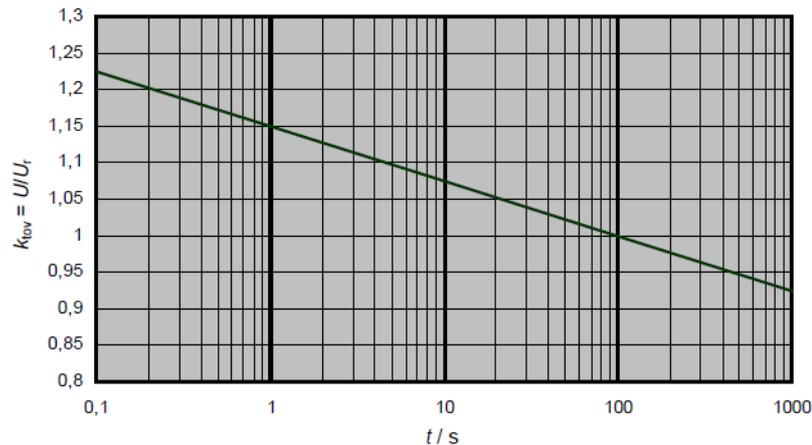


**Figura 2.2** - Característica  $V \times I$  de para-raios de ZnO e SiC.  
Fonte: (ABB,1995).

## 2.2. PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

A seguir são apresentados os principais parâmetros dos PR ZnO:

- *Tensão nominal  $U_r$  (kV rms)* - Indica a tensão máxima, a frequência industrial, a qual o para-raios pode ser submetido em condições de sobretensão temporária, assim como definido no teste de ciclo de operação (IEC 60099-4, 2004).
- *Máxima Tensão de operação contínua (MCOV) (kV rms)* - máxima tensão de operação contínua a frequência industrial que o para-raios pode ser submetido (IEEE C62.11-2005, 2005).
- *Corrente de descarga* - corrente de impulso que passa pelo para-raios definida pela forma de onda, amplitude e polaridade.
- *Corrente de descarga nominal do para-raios* - valor de pico da corrente de descarga para uma forma de onda de 8/20 $\mu$ s.
- *Corrente de fuga* - corrente que percorre o para-raios estando submetido à tensão de operação na frequência industrial.
- *Capacidade de sobretensão temporária* - Informa qual a suportabilidade tensão x tempo (ver Figura 2.3) do para-raios em regime contínuo de operação sem que haja o comprometimento da sua funcionalidade.



**Figura 2.3 - Exemplo da Curva de suportabilidade  $V \times T$ .**  
 Fonte: (HINRICHSEN, 2011).

- *Capacidade de absorção de energia* - máxima quantidade de energia, em condições definidas, que pode ser absorvida pelo para-raios sem a perda de suas características de proteção, quando do retorno às suas condições normais de operação.
- *Nível de proteção a impulso de manobra (kV pico)* - O nível de proteção a impulso de manobra depende da corrente de condução no para-raios, a qual aumenta à medida que o valor do impulso de tensão aumenta.
- *Tensão residual (kV pico)* - valor de crista da tensão que se estabelece nos terminais de um para-raios quando da passagem da corrente de descarga, a depender da forma e intensidade da mesma.

A Figura 2.4 apresenta a curva característica de um para-raios de 475kV com os valores dos principais parâmetros definidos acima.

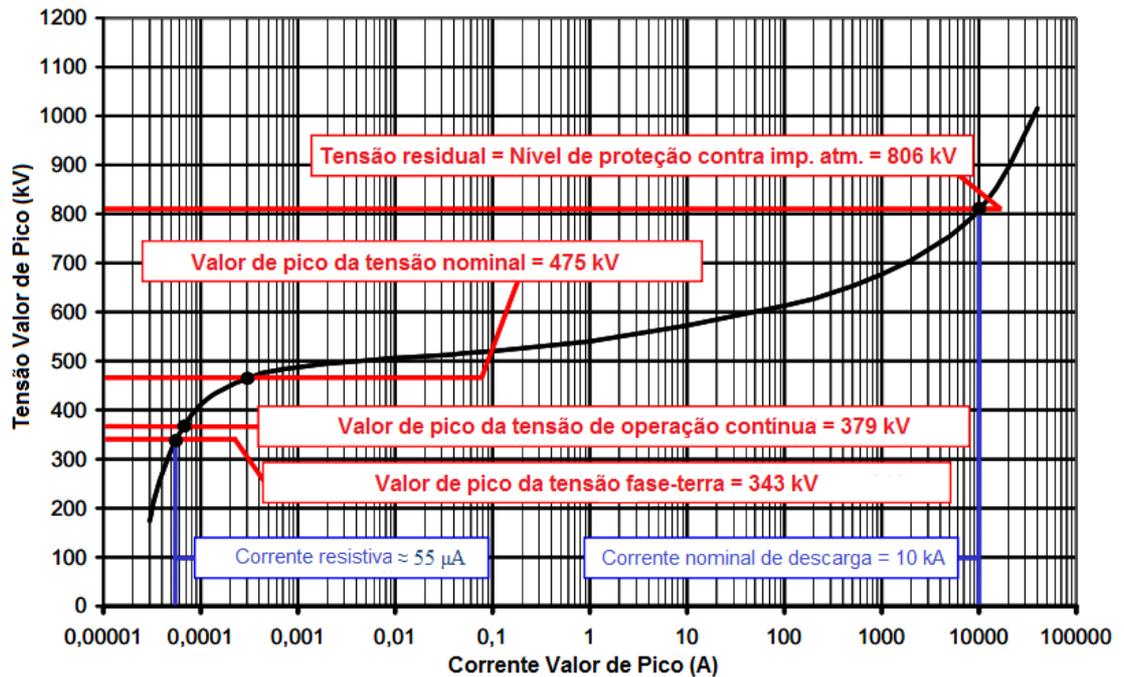


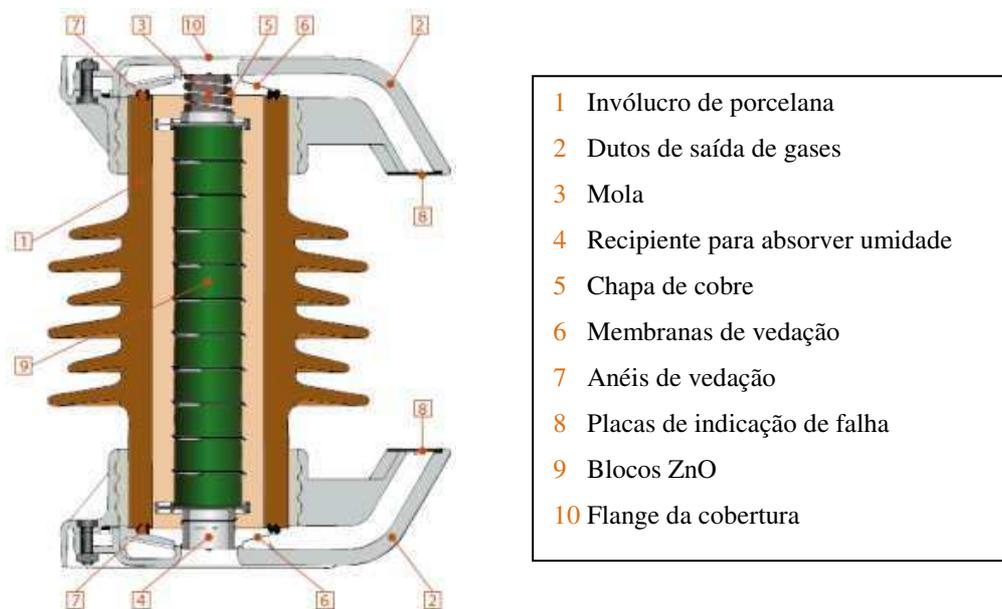
Figura 2.4 - Curva característica de um para-raios à ZnO de 475 kV.  
Fonte: (HINRICHSEN, 2011).

### 2.3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

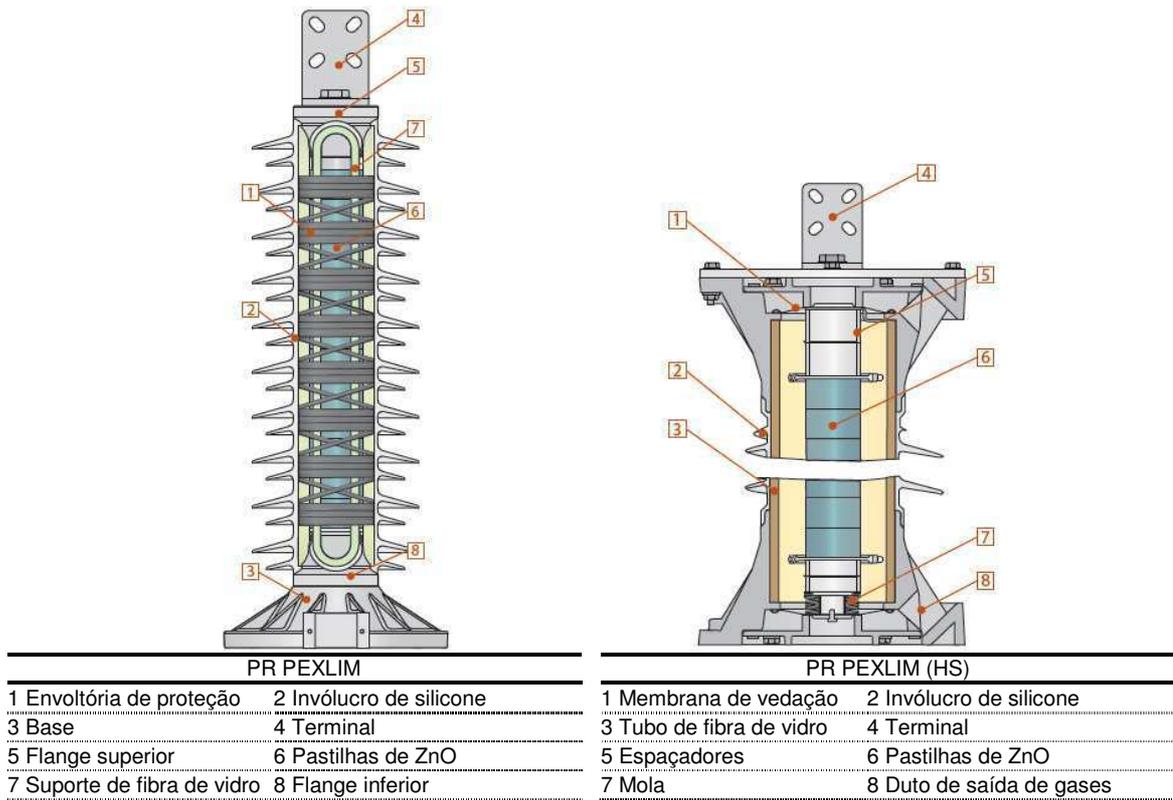
O para-raios de óxido de zinco, Figura 2.5, tem sua construção simples se comparada a outros equipamentos do setor elétrico, tais como Transformador de Potencial Capacitivo (TPC), disjuntores, etc. Basicamente é composto pela coluna de pastilhas de varistores ZnO, mola para manter o bom contato elétrico dos componentes, invólucro de porcelana que possui função estrutural e isolante, os condutos de saída de gases para alívio de sobrepressões internas com intuito de evitar explosões, flanges inferior e superior e os anéis de vedação posicionados para impedir a penetração de umidade no interior do para-raios. Alguns para-raios ainda possuem anéis equalizadores localizado junto ao conector de alta tensão, que são utilizados para distribuir melhor a tensão ao longo dos blocos de ZnO, aumentando a sua vida útil (ABB, 2012).

Com a evolução tecnológica surgiu o invólucro polimérico. Ele vem substituindo o invólucro de porcelana, e sua adoção, em alguns modelos de para-raios, simplificou ainda mais a quantidade de componentes.

Figura 2.6 são apresentados dois tipos de para-raios com invólucro polimérico. Em um deles, o mais comercializado, o invólucro é vulcanizado junto à coluna de varistores, sendo eliminados vários componentes. Dentre eles, os anéis e membranas de vedação, placas de identificação de falha e o dispositivo de alívio de pressão.



**Figura 2.5 - Estrutura de um para-raios de ZnO com invólucro de porcelana.**  
Fonte: (ABB, 2012).



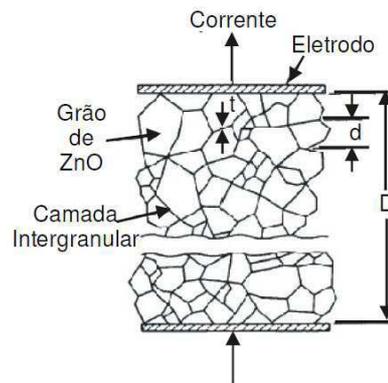
**Figura 2.6** - Estrutura de um para-raios de ZnO com invólucro polimérico.  
Fonte: (ABB, 2012).

A altura e espessura das pastilhas de ZnO, Figura 2.7, vão variar de acordo com o projeto e características do para-raios. De modo geral, quanto maior a seção das pastilhas de ZnO maior é a sua capacidade de absorver energia e quanto maior a altura, maior a sua suportabilidade a tensão.



**Figura 2.7** - Varistores com diâmetros e alturas diferentes.  
Fonte: (HINRICHSEN, 2001).

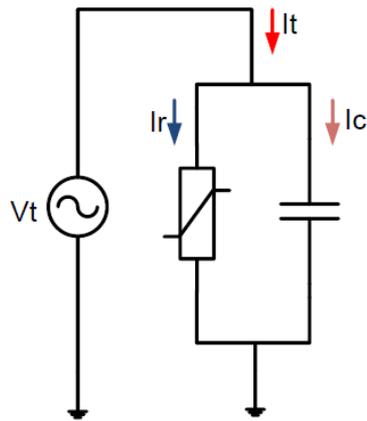
A microestrutura interna de um varistor é apresentada na Figura 2.8. No processo de fabricação os grãos de óxido de zinco são contornados por um material intergranular composto de diversos materiais dopantes. A região do entorno do grão é composta por uma camada de material que apresenta elevada resistividade ( $\rho$  entre  $10^{10}$  e  $10^{12}$   $\Omega$ .cm). No interior do grão prevalece a baixa resistividade ( $\rho$  entre 0,1 e 10  $\Omega$ .cm) (FRANCO,1993).



**Figura 2.8** - Representação esquemática da microestrutura dos varistores.  
Fonte: (FRANCO, 1993).

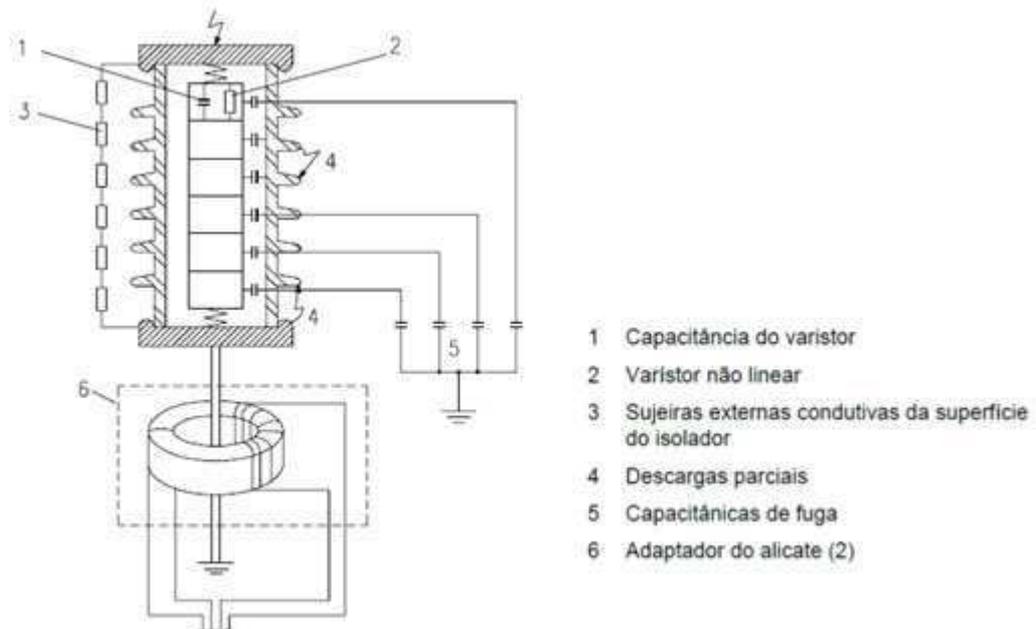
#### 2.4. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS E ELÉTRICAS DO PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

O para-raios de ZnO pode ser representado de forma simplificada pelo circuito apresentado na Figura 2.9, onde tem-se em um ramo a representação da resistência não linear do varistor e no outro a sua capacitância. Este modelo é apropriado para representar o para-raios operando na região de baixas correntes à frequência industrial.



**Figura 2.9** - Circuito simplificado de varistor de ZnO.  
Fonte: (BRITO, 2013).

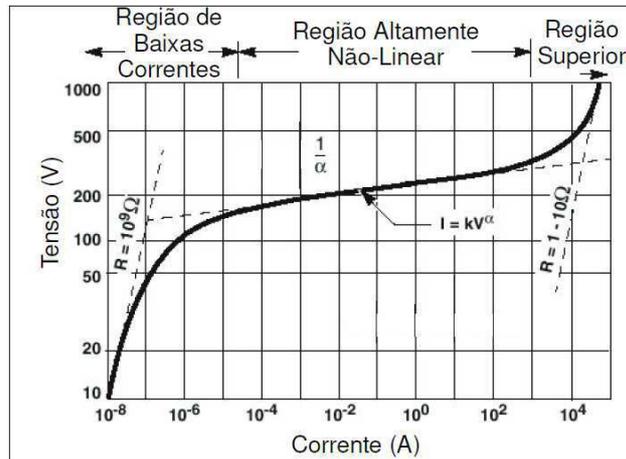
Na Figura 2.10 são ilustradas as presenças de capacitâncias parasitas, descargas, dentre outros fenômenos que compõem a corrente de fuga total de um para-raios quando o invólucro está poluído.



**Figura 2.10** - Grandezas presentes na corrente de fuga de um para-raios de ZnO.  
Fonte: (TRIDELTA, 2007).

A curva característica, *tensão x corrente*, do para-raios de ZnO descreve o seu comportamento nas diversas faixas de tensão de entrada. E é através dela que se pode observar a sua principal característica, o elevado comportamento não linear.

Na Figura 2.11 é apresentada a curva característica de um varistor ZnO, a qual pode ser dividida em 03 regiões distintas de operação (BARBOSA, 2007), conforme detalhado mais a seguir.



**Figura 2.11** - Curva V-I característica de um varistor de ZnO.  
Fonte: (BARBOSA, 2007).

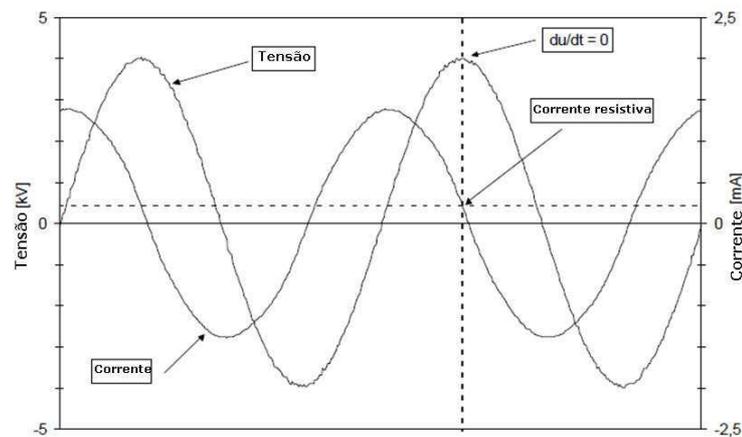
#### 2.4.1. Região de baixas correntes

Nesta região a tensão aplicada ao para-raios normalmente corresponde à faixa de 70% a 85% de sua tensão nominal, mas é comum encontrar aplicações com tensões da ordem de 50% a 80% da nominal (ABB, 2010). A corrente que flui pelo varistor é dependente da alta impedância proveniente do material que circunda os grãos ZnO. Seu comportamento é aproximadamente linear até próximo a sua tensão nominal e a pequena corrente de fuga que flui pelo varistor é composta de uma componente capacitiva e outra resistiva.

A corrente capacitiva é predominante, tendo valores da ordem de 0,2 a 3 mA<sub>PICO</sub>. Em condições normais de operação, ela representa as capacitâncias parasitas e a permissividade dos varistores de ZnO. A capacitância destes elementos é tipicamente da ordem de 60 pF.kV/cm<sup>2</sup> a 150 pF.kV/cm<sup>2</sup> (IEC 60099-5, 2000).

A componente resistiva é a responsável pelas perdas joules, devendo ser controlada, pois provoca a instabilidade térmica dos varistores. Esta corrente é da

ordem de 5 a 20% da corrente de fuga total, e seus valores giram em torno de 10 a 600  $\mu\text{A}$  a 20°C dependendo do tamanho e de como são feitos os varistores (IEC 60099-5, 2000). Na Figura 2.12 é apresentada a corrente em um varistor ZnO submetido, em laboratório, a tensão de operação contínua. O valor de pico da corrente total é de 1,4 mA e o da corrente resistiva 230  $\mu\text{A}$ . A componente resistiva é obtida no instante de tempo no qual  $du/dt = 0$ , ou seja, no pico da tensão aplicada ao para-raios.<sup>1</sup>

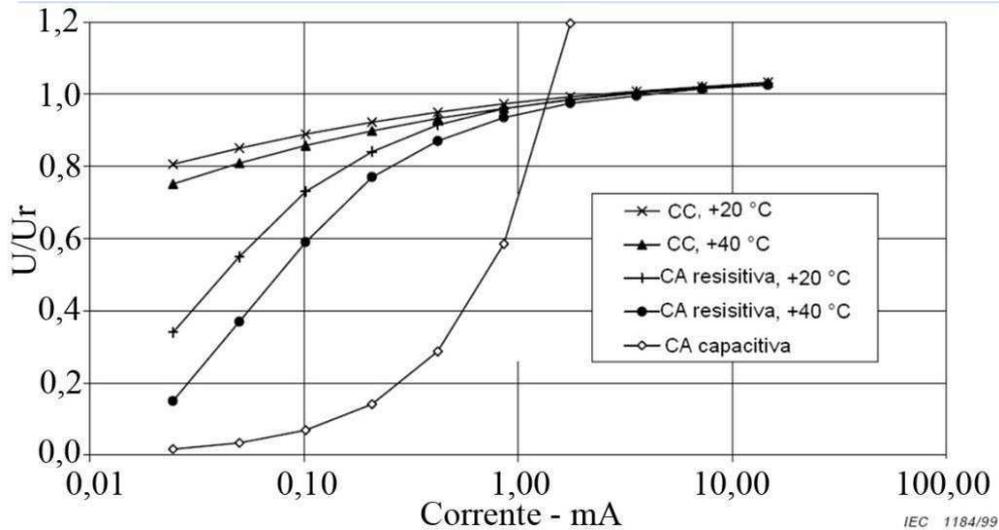


**Figura 2.12** - Forma de onda da tensão e corrente aplicada a um varistor ZnO em condições de laboratório.

Fonte: (HINRICHSEN, 1997).

A corrente resistiva sofre influência da tensão e da temperatura aplicadas aos para-raios, já a corrente capacitiva sofre influência apenas da tensão aplicada. A Figura 2.13 apresenta o comportamento descrito acima.

<sup>1</sup> Método de cálculo da corrente resistiva simplificado que possui restrições técnicas. Outros métodos podem ser verificados em IEC 60099-5 (2000) e BRITO (2013).



**Figura 2.13** - Comportamento  $V \times I$  / varistor ZnO para diferentes valores de tensão e temperatura. Fonte: (IEC 60099-5, 2000).

#### 2.4.2. Região de operação altamente não linear

Na região de alta não linearidade o varistor conduz elevados valores de corrente para pequenas variações de tensão, sendo destinada para eventos transitórios, quando correntes de impulso atmosférico ( $\mu\text{s}$ ) ou de manobra (ms) fluem pelo mesmo. Essa corrente sofre pouca influência da temperatura e é predominantemente resistiva. Quanto mais não linear for a curva V-I do para-raios, melhor será sua característica de proteção.

#### 2.4.3. Região superior ou de alta corrente

Esta região está diretamente relacionada ao nível de proteção oferecida pelo para-raios contra descargas atmosféricas, sendo caracterizada por altos valores de corrente e é conhecida como região de *Upturn*. A curva característica volta a ter um comportamento aproximadamente linear, porém com a tensão aumentando mais rapidamente que a corrente.

# Capítulo 3

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais tipos de defeitos em para-raios, técnicas e métodos de monitoramento, sendo ressaltadas as vantagens e desvantagens de cada um.

### 3.1. TIPOS DE DEFEITOS EM PARA-RAIOS DE ZNO

Diversos fatores podem influenciar no desempenho e na degradação da vida útil de um para-raios de ZnO. De modo geral, esses fatores estão ligados às condições de operação e ao processo de produção. Para os dois casos, o atendimento às normas técnicas aplicadas é fundamental para um desempenho duradouro e satisfatório do para-raios (HINRICHSEN, 2011).

O processo de produção está vinculado à qualidade dos materiais empregados, ao processo de montagem e ao atendimento as características elétricas e mecânicas definidas em projeto, e comprovadas nos ensaios de tipo e de rotina.

As condições de operação abrangem diversos fatores, especificação, condição de instalação, ambiente, manutenção, tensões e surtos que são submetidos os para-raios.

Os defeitos e fatores degradantes mais comuns encontrados em para-raios são a perda da estanqueidade, umidade interna, poluição superficial, distribuição irregular de tensão, degradação e desalinhamento dos varistores (WANDERLEY NETO et al., 2005).

- *A perda da estanqueidade é causada por envelhecimento ou degradação prematura dos anéis de vedação ou do polímero permitindo a entrada e saída de gases. A estabilidade interna do para-raios é então comprometida e reações internas podem ocorrer, prejudicando o seu isolamento interno com a ocorrência de descargas superficiais.*

- A umidade é um dos principais fatores de degradação dos para-raios, podendo penetrar no PR por degradação da estanqueidade ou por falha no processo produtivo. Ela também é responsável pela degradação prematura das pastilhas de ZnO que compõem a coluna dos para-raios.
- A *poluição superficial* é um problema muito comum aos equipamentos que compõem uma subestação desabrigada e que precisam prover um nível de isolamento satisfatório entre partes energizadas e a terra. Ela pode variar de agressividade a depender do local onde se encontre a subestação, como exemplo, pode-se citar a proximidade de indústrias e de áreas salinas. O efeito da poluição superficial é diminuir a distância de escoamento superficial para a corrente elétrica, desta forma, possibilita a ocorrência de descargas superficiais na superfície da porcelana ou do polímero que constitui o invólucro do para-raios. Estas descargas alteram o campo elétrico na região e provocam o aquecimento dos varistores localizados na altura em que as bandas secas são formadas, além de influenciar a distribuição de tensão ao longo da coluna de varistores.
- A *distribuição de tensão* irregular impõe níveis de tensão diferentes ao longo da coluna de varistores do para-raios, e, por conseguinte, as exigências elétricas a que são submetidas cada pastilha são diferentes, podendo afetar sua vida útil. As pastilhas mais próximas ao condutor de alta tensão são submetidas a tensões maiores que as próximas ao terminal aterrado. Este fato é causado principalmente pela presença de capacitâncias parasitas. Anéis equalizadores são comumente usados pelos fabricantes como parte da solução para minimizar estes efeitos, porém a poluição depositada ao longo do invólucro do para-raios pode modificar a intensidade das capacitâncias parasitas.
- O *desalinhamento da coluna de varistores* altera a área de contato entre os varistores. Este não é um defeito comum de ser observado e pode ser provocado durante o transporte ou armazenamento feito de forma inadequada, ou falha no processo produtivo. Esforços mecânicos

excessivos do cabo de conexão da linha ao para-raios com invólucro polimérico, pode provocar este defeito o desalinhamento.

- *A degradação dos varistores* pode ser resultado do seu envelhecimento natural, ou do seu envelhecimento precoce provocado pelos fatores citados acima, podendo a degradação provocar a fissura ou avalanche térmica nas partilhas de varistores. Em muitos casos, ao se fazer o diagnóstico de um varistor degradado, são encontrados vestígios de vários fatores.

### **3.2. MONITORAMENTO E DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PARA-RAIOS DE ZNO**

Diversos métodos de monitoramento ou diagnóstico de para-raios estão disponíveis na literatura (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; VIDEIRA, 2011; ALMEIDA et al., 2009; LIRA, 2012), porém não há ainda um consenso entre as empresas transmissoras no Brasil quanto à técnica e ao método mais apropriado para o monitoramento de para-raios.

Segundo os fabricantes a vida útil dos para-raios gira em torno de 20 anos considerando apenas critérios técnicos. Existem no sistema elétrico brasileiro para-raios em operação há mais de 30 anos e outros relativamente novos instalados há 5 anos apresentando falha (ABRATE, 2012). O controle patrimonial das empresas considera o tempo de vida contábil da ordem de 24 anos, porém a garantia normalmente fornecida pelos fabricantes gira em torno de apenas 1 ano.

A grande diferença na vida útil dos para-raios pode ser creditada a problemas de projeto, fabricação, aplicação e operação. Sendo importante um diagnóstico preciso desses equipamentos para o apoio a tomada de decisão, haja vista os aspectos financeiros e de segurança envolvidos em uma falha.

Solicitações impostas aos para-raios como tensão de operação, sobretensões temporárias, de manobra e de descargas atmosféricas, contaminação externa do invólucro, variações climáticas, exposições a raios ultravioletas e umidade contribuem para a degradação dos para-raios podendo provocar perda de

estanqueidade com penetração de umidade, descargas corona interna e descargas parciais, reduzindo a expectativa de vida útil do PR.

A degradação das pastilhas de ZnO alteraram a característica  $V \times I$  na área de baixa corrente, acarretando o crescimento da componente resistiva da corrente de fuga em regime permanente, e por conseguinte, das perdas, reduzindo a capacidade de absorção de energia, podendo levar o equipamento a falha (BARBOSA, 2007).

### **3.3. ANÁLISE DAS TÉCNICAS PREDITIVAS DE DIAGNOSTICO DE PARA-RAIOS**

O para-raios é um equipamento de construção simples e não apresenta variáveis que possibilitem facilmente o monitoramento de seu estado. A observação associativa das condições de estresse em termos da intensidade e frequência do impulso de corrente, e da condição do para-raios em termos de suas propriedades de isolamento em serviço normal possibilitam um controle efetivo do seu estado (ABB, 2010). Apesar dos fabricantes indicarem a medição da corrente de fuga resistiva como ferramenta eficaz e viável para o diagnóstico do estado de para-raios, a sua aplicação nas empresas transmissoras ainda é pequena (ABRATE, 2012).

As técnicas de monitoramento de para-raios podem ser divididas em dois tipos: fora de serviço e em serviço.

- Monitoramento de para-raios fora de serviço - O monitoramento de para-raios fora de serviço (desenergizado) perdeu espaço ao longo do tempo para técnicas preditivas com melhor custo benefício como a termografia. O desligamento de uma FT para realização de ensaios de baixa tensão com medição da corrente de fuga, perdas dielétricas e isolamento CC, geram custos e normalmente são utilizados em comissionamento ou em situações de aproveitamento do desligamento de uma FT.

- Monitoramento de para-raios em serviço - Este tipo de monitoramento se destaca por ser realizado com o equipamento em operação, sem a necessidade do desligamento da rede.

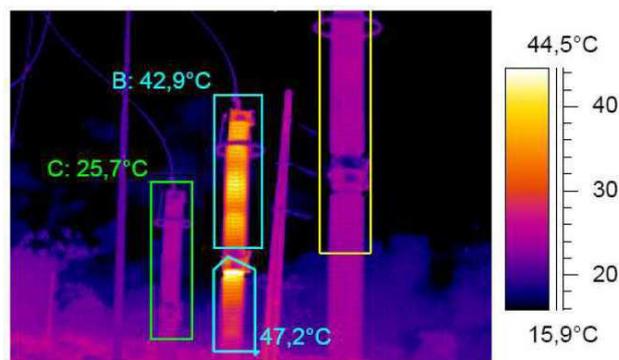
Algumas dessas técnicas são apresentadas a seguir.

### 3.3.1. Termografia infravermelha

Esta técnica é a mais utilizada pelas empresas do setor elétrico brasileiro. A mesma possui metodologia de aplicação bem definida, com diagnósticos positivos de defeitos em todas as empresas da Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica (ABRATE). Isso se deve ao:

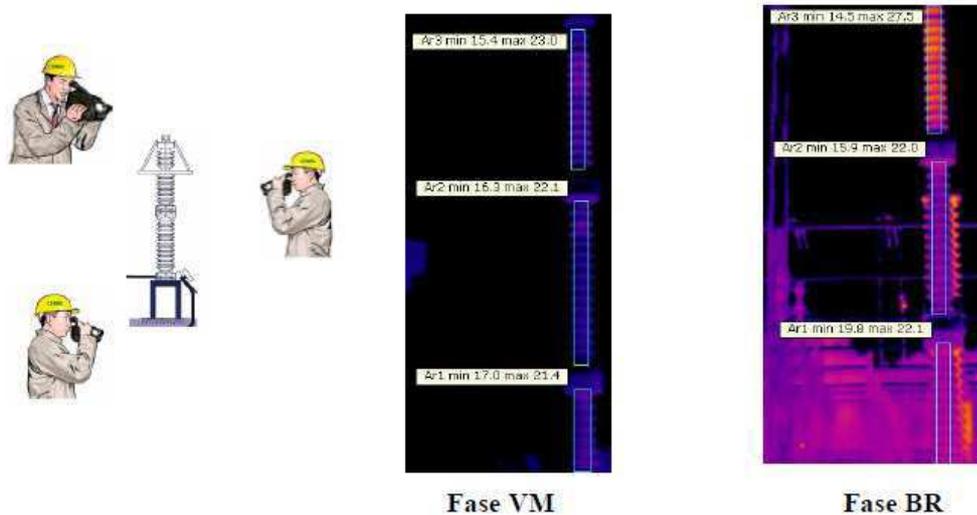
- Custo benefício - a técnica pode ser empregada de forma concomitante em diversos equipamentos de uma subestação na ocasião de uma inspeção, e não requer grande quantidade de homem hora para sua realização;
- Redução do custo e a melhoria na qualidade da resolução dos termovisores;
- Programas de processamento dos termogramas.

A técnica, de modo geral, consiste em analisar o perfil térmico do para-raios por comparação com unidades adjacentes de mesmo tipo e modelo, conforme ilustrado na Figura 3.1, ou pela comparação do gradiente de temperatura no invólucro com a temperatura ambiente.



**Figura 3.1** - Perfil térmico comparativo de para-raios de mesmo tipo e modelo.  
Fonte: (Chesf).

Outra forma de análise muito comum é a verificação do perfil térmico em 03 ângulos (a cada 120º) (ABRATE, 2012), conforme esquematizado na Figura 3.2.



**Figura 3.2** - Perfil térmico em ângulo de para-raios de mesmo tipo e modelo.  
Fonte: (Chesf).

Esta técnica possibilita checar se o aquecimento é homogêneo e circular no entorno da coluna (360º) ou se é apenas pontual em uma das faces, neste último caso, tem-se a caracterização de poluição e normalmente uma limpeza no invólucro pode normalizar o perfil térmico do equipamento.

A detecção da não conformidade térmica é feita pela geração de calor no para-raios provocado pelo incremento da corrente resistiva, podendo ser causada por diversos fatores, poluição no invólucro, degradação dos varistores, penetração de umidade, dentre outros.

Embora a termovisão seja bastante empregada no setor elétrico e muito conhecida, ela é limitada a algumas condições de detecção. A inspeção deve ser realizada em horário em que o invólucro do para-raios tenha resfriado, ou seja, tenha irradiado o calor recebido do sol e a temperatura ambiente seja a mais baixa possível. Isto permitirá com mais facilidade a detecção de pequenos gradientes de temperatura de forma confiável. O incremento da corrente de fuga deve permitir a geração de calor de forma sustentada e lenta de forma a permitir sua detecção em uma inspeção. Esta técnica não permite avaliar a evolução da degradação e nem a vida útil do equipamento.

A resposta térmica dos para-raios também varia entre modelos que possuem espaçamento entre a coluna de varistores e o invólucro, e os que não possuem o espaçamento. Estes últimos possuem melhor resposta térmica, pois o invólucro polimérico é vulcanizado junto à coluna de varistores.

### 3.3.2. Contador de operações e medição da corrente de fuga total

Esta é uma técnica presente em algumas empresas da ABRATE (2012), com poucos casos de diagnóstico efetivo de defeito. Na Figura 3.3 é apresentada a vista frontal de um medidor de corrente de fuga analógico com contador de descarga mecânico associado.

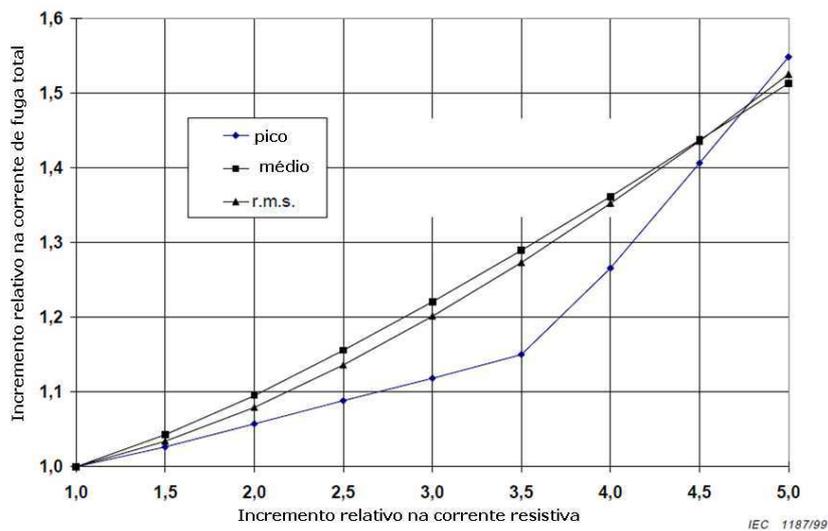


**Figura 3.3** - Vista frontal de um medidor de corrente de fuga analógico com contador de descarga mecânico.  
Fonte: (Chesf).

O contador de descarga apresenta o número de impulsos de corrente ou sobretensões acima de certa amplitude e duração que ocorreram no sistema, suficiente para sensibilizar o mecanismo do contador. Como a degradação do para-raios ocorre normalmente em picos de amplitude elevada e muito longos, o número de surtos não é um indicador do estado, uma vez que o mesmo pode suportar milhares de surtos que estejam dentro da sua capacidade de funcionamento. A falta de informação da amplitude e do tempo da descarga para este tipo de contador inviabiliza um diagnóstico definitivo.

A corrente de fuga total, como visto no Capítulo 2, representa a corrente que passa pela coluna de varistores e pelo invólucro do para-raios. Ela é composta de

uma componente capacitiva e de uma componente resistiva. Sendo a componente resistiva da ordem de 5 a 20% da corrente total. Assim, é necessário um grande incremento na corrente resistiva antes que seja possível detectar um incremento considerável na corrente de fuga total, tornando o método inadequado para determinação de um diagnóstico definitivo e seguro. Na Figura 3.4 são ilustradas as relações, em termos de amplitude, das correntes de fuga total e resistiva.



**Figura 3.4** - Incremento relativo da corrente de fuga total x incremento relativo da componente resistiva da corrente de fuga total.

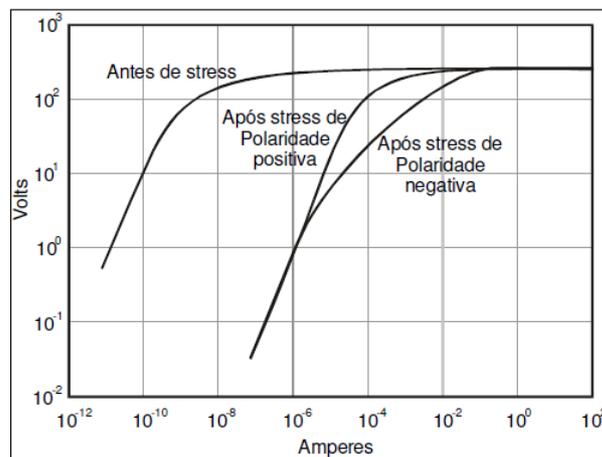
Fonte: (IEC 60099-5, 2000).

Comparar as medições com os para-raios instalados em fases adjacentes de mesmo modelo, tipo, tempo de instalação e submetido às mesmas condições de operação é uma informação viável como apoio a tomada de decisão, que seja, para propor uma manutenção ou diagnóstico, ou como indicativo de poluição na superfície do isolador com necessidade de lavagem ou desengraxe (ABB, 2012).

Para um correto funcionamento do contador de descargas e do miliamperímetro, o para-raios deve ser isolado da terra por isoladores na sua base, com o contador montado em série a uma altura que possa ser lido a nível de solo, e o mais próximo da sua base de forma a evitar ao máximo a medição de correntes induzidas no cabo de aterramento.

### 3.3.3. Medição e análise da corrente de fuga resistiva e do 3º harmônico da corrente de fuga total.

O varistor depois de submetido a estresses, descargas, aplicação de tensão constante por um longo período de tempo tem sua curva característica alterada, sendo possível a observação do fato pela comparação da curva característica ( $V \times I$ ) antes e depois do condicionamento. A degradação ou alteração das características elétricas ocorre principalmente na região linear de baixa corrente, ficando a região de alta corrente inalterada pelo estresse aplicado ao bloco (CLARKE,1999). A Figura 3.5 ilustra o fato.

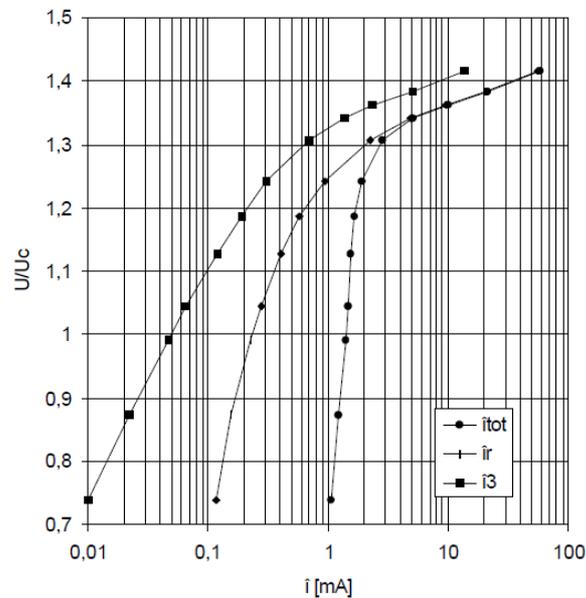


**Figura 3.5** - Curva  $V \times I$  por degradação do varistor, após longo período submetido a tensão constante. Fonte: (CLARKE,1999).

O monitoramento da corrente de fuga realizado na região de baixa corrente possibilita a identificação da degradação do para-raios, sendo a componente resistiva da 3ª harmônica mais sensível a essa alteração (ABB, 2012; DOBLE, 2007).

Estando o para-raios energizado com uma tensão senoidal pura, as amplitudes das harmônicas produzidas na corrente total ocorrem em função do grau de não linearidade da curva característica tensão-corrente do varistor, da tensão aplicada, da temperatura e da construção do para-raios. O harmônico de 3ª ordem da corrente total possui valores típicos da ordem de 10 a 40% da componente resistiva da corrente total (ABB, 2010).

A Figura 3.6 apresenta a curva característica tensão-corrente de um varistor de ZnO, com a corrente total, sua componente resistiva e sua componente de 3º harmônico da corrente total.



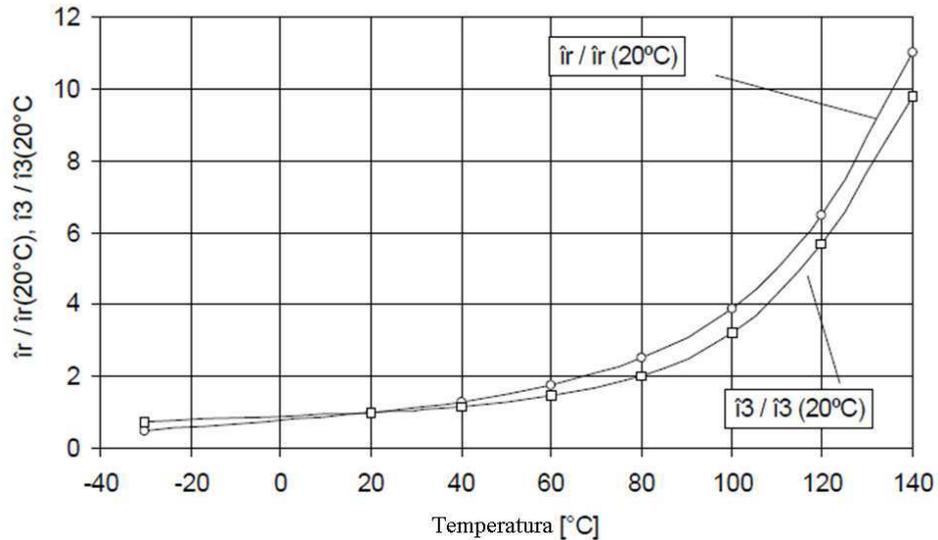
**Figura 3.6** - Curva característica tensão x corrente de um varistor de ZnO apresentando a corrente total, sua componente resistiva e a 3ª harmônica da corrente total.  
Fonte: (HINRICHSEN, 1997).

O uso do 3º harmônico da corrente total como parâmetro para avaliação do estado do para-raios é justificado pelo seu comportamento dependente da tensão ser similar à componente resistiva, Figura 3.6.

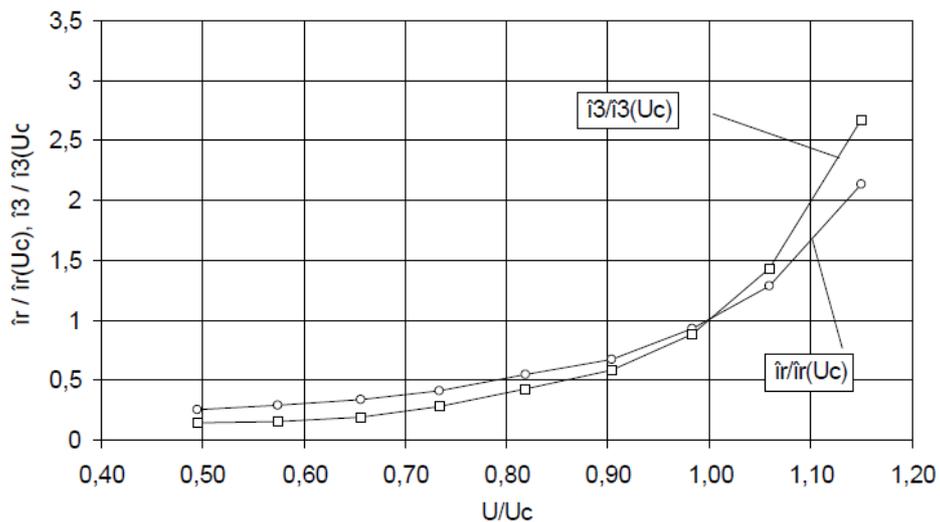
A corrente total, resistiva, capacitiva e a componente de 3ª harmônica da corrente total sofrem influência de fatores como temperatura, tensão e harmônicos do sistema elétrico.

A temperatura real dos varistores de um para-raios instalado em campo é desconhecida, e a depender das condições impostas à diferença de temperatura entre os varistores e a superfície externa do invólucro do para-raios pode ser alta (COSTA, 1999). Normalmente os varistores encontram-se a alguns graus acima da temperatura ambiente, em função das perdas de potência, mas principalmente devido à radiação solar ou descargas na superfície do isolador em condições de poluição. A Figura 3.7 apresenta o comportamento da corrente resistiva e a da componente de 3ª ordem da corrente de fuga total em função da temperatura tomando como base a temperatura de 20°C para um para-raios de ZnO qualquer. A Figura 3.8 apresenta o comportamento da componente resistiva e da componente

de 3º harmônico da corrente de fuga total em função da tensão aplicada ao para-raios tomando como referência a tensão de operação contínua.



**Figura 3.7** - Comportamento relativo da componente resistiva e a de 3º harmônico da corrente total em função da temperatura.  
Fonte: (HINRICHSEN, 1997).

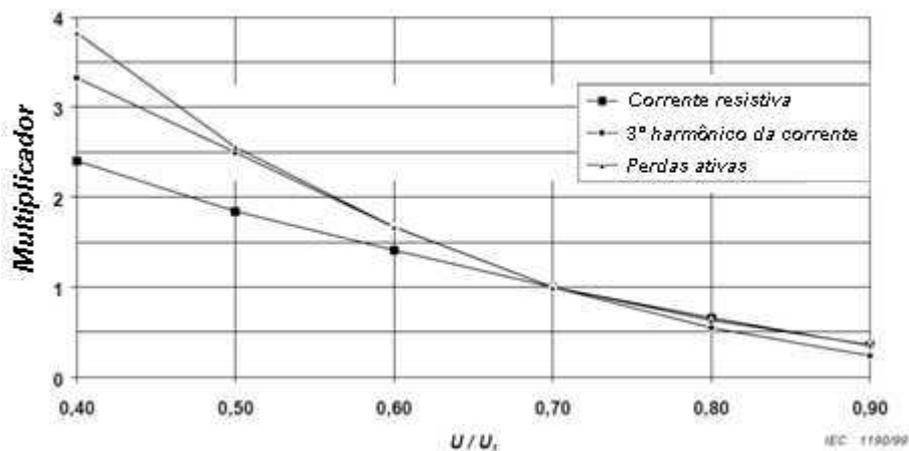


**Figura 3.8** - Comportamento relativo da componente resistiva e a de 3º harmônico da corrente total em função da relação entre a tensão aplicada ao para-raios e a tensão de operação contínua.  
Fonte: (HINRICHSEN, 1997).

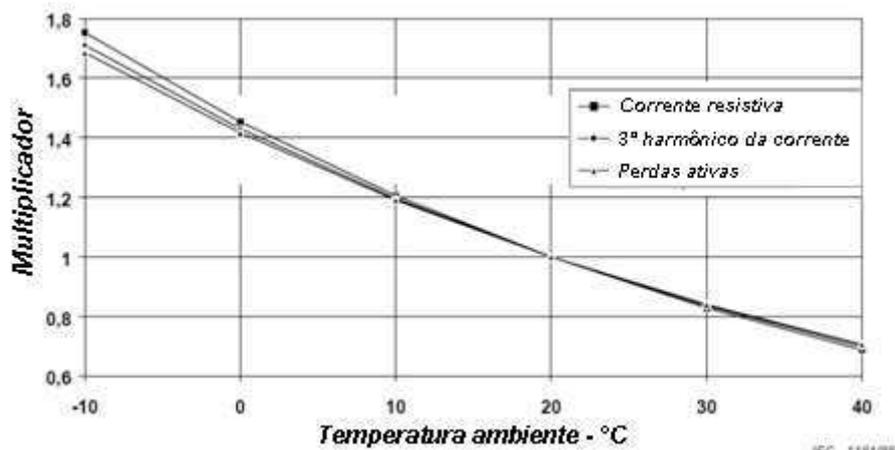
Embora o comportamento entre a componente resistiva e a de 3ª ordem da corrente total sejam parecidos, tanto para variação da tensão aplicada ao para-raios quanto para a temperatura, a componente resistiva apresenta uma dependência maior para temperatura do que a harmônica de 3ª ordem. Esta influência passa a ser

considerável a partir dos 40° Celsius. O crescimento da temperatura de 20° para 60° representa um acréscimo de 70% para a componente resistiva e de 50% para o 3° harmônico da corrente de fuga total.

Na Figura 3.9 e na Figura 3.10 são apresentados valores típicos de correção para temperatura e tensão das correntes resistiva e 3° harmônico da corrente de fuga total. A dependência da corrente de fuga com relação à tensão é apresentada como uma função da tensão de serviço dividida por uma tensão de referência ( $U_r$ ) com o valor normalizado para 0,7  $U_r$ . A dependência com relação à temperatura é apresentada em função da temperatura ambiente normalizado para 20°C. Embora os valores apresentados sejam típicos, estes podem variar de acordo com cada fabricante.



**Figura 3.9** - Fator de correção da corrente com a tensão.  
Fonte: (IEC 60099-5, 2000).



**Figura 3.10** - Fator de correção da corrente com a temperatura.  
Fonte: (IEC 60099-5, 2000).

A presença de conteúdo harmônico na tensão da rede elétrica pode causar também erros na medição. Variações na amplitude e no ângulo da distorção harmônica de 3ª ordem da tensão alteram de forma mais branda o valor medido para a componente resistiva do que para a componente de 3ª ordem, a qual sofre grande influência devido à presença da componente capacitiva em sua composição (SHIRAKAWA et al., 1988; IEC 60099-5, 2000; ZHU; RAGHUVVEER, 200; VIDEIRA, 2011). Caso não exista distorção harmônica na rede elétrica, toda distorção harmônica de 3ª ordem da corrente de fuga total será devido a não linearidade da curva característica do para-raios, de modo que a degradação possa ser avaliada por este parâmetro.

Segundo HINRICHSEN (1997) em sistemas de 420 kV é usual encontrar valores menores que 1% para distorção harmônica de 3ª ordem da tensão. A IEEE 519 (1992) estabelece valores limites para controle da distorção harmônica de tensão total e individual em sistemas elétricos de potência, seus valores são apresentados na Tabela 3.1. Para o sistema elétrico brasileiro a ANEEL (2010) estabelece valores para tensões superiores a 69 kV e inferiores a 138 kV, 3% de distorção harmônica total e 2% para harmônica de 3ª ordem.

**Tabela 3.1** - Limites da distorção harmônica de tensão.

<i>Tensão (kV)</i>	<i>Distorção individual de tensão (%)</i>	<i>Distorção total da tensão (%)</i>
≤ 69	3,0	5,0
> 69 e ≤ 161	1,5	2,5
> 161	1,0	1,5

Fonte: (IEEE 519, 1992).

Em sistema de alta e extra-alta tensão é possível encontrar aplicativos, acessados pela rede corporativa da empresa (acesso remoto), com diversas informações de qualimetria da tensão e corrente em tempo real. A exportação dos dados para planilhas eletrônicas, inclusive de histórico também é possível. A seguir são apresentados valores típicos de distorção harmônica de uma subestação de 230 kV da Chesf.

A Figura 3.11 apresenta a tela do aplicativo de qualimetria com os valores de Distorção Harmônica Total (DHT) de tensão,  $V1(ab)=0,5\%$ ,  $V2(ca)=0,3\%$  e

V3(BC)=0,4%. Na Figura 3.12 é apresentada tela com os dados da amplitude e do ângulo de fase da 1ª a 15ª harmônica (V1=547,8 V e 142°, V2=260,2 V e 124° e V3= 97 V e 154°). Na Figura 3.13 é mostrado o comportamento histórico referente ao mês de julho de 2014 da distorção individual de tensão da harmônica de 3ª ordem, todos os valores menores que 0,5%. Portanto os valores apresentados encontram-se dentro dos limites da distorção harmônica de tensão apresentado na Tabela 3.1.

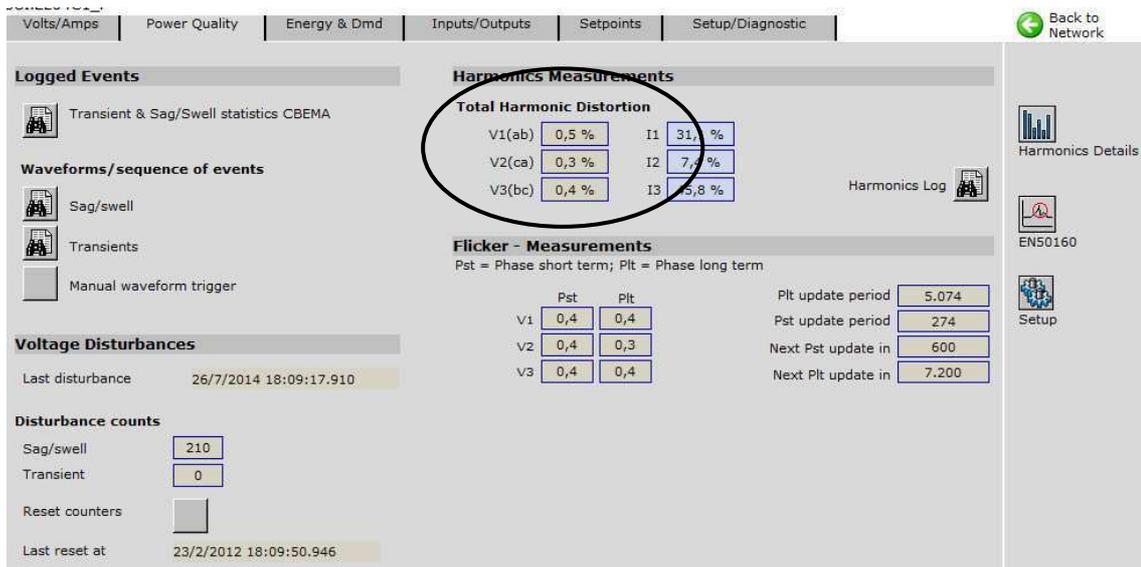
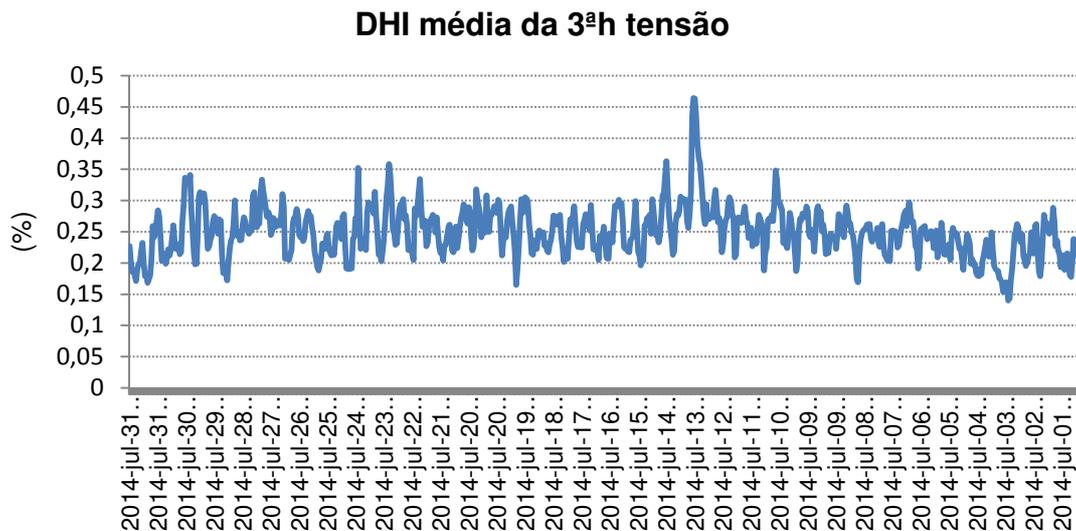


Figura 3.11 -Distorção harmônica total 230 kV SE da Chesf.

	V1		V2		V3	
	Volts HD	Phase Angle	Volts HD	Phase Angle	Volts HD	Phase Angle
1st	133.142,9	0	133.435,1	-120	133.826,3	120
2nd	55,0	-48	72,6	-42	82,8	91
3rd	547,8	142	260,2	124	97,0	157
4th	85,8	-138	91,5	114	101,3	-19
5th	316,6	105	298,1	-127	206,9	9
6th	0,0	-103	0,0	-163	0,0	17
7th	100,9	-45	143,4	172	157,9	32
8th	0,0	165	0,0	-75	0,0	49
9th	45,2	-6	0,0	-71	0,0	-20
10th	0,0	-152	0,0	-152	0,0	118
11th	47,8	-40	0,0	95	0,0	177
12th	0,0	33	0,0	33	0,0	33
13th	0,0	36	0,0	-54	0,0	148
14th	0,0	129	0,0	-141	0,0	-141
15th	0,0	131	0,0	131	0,0	41

Figura 3.12 - Amplitude de harmônicas 1ª a 15ª SE 230 kV da Chesf.



**Figura 3.13** - Histórico da Distorsão Harmônica Individual (DHI) média de tensão da harmônica de 3ª ordem de uma SE 230 kV da Chesf.

### 3.3.4. Métodos de medição da corrente de fuga

Diversas formas de medição da corrente de fuga total para monitoramento de para-raios são apresentadas na IEC 60099-5 (2000). Três métodos principais são apresentados e subdivididos em grupos e avaliada a sua sensibilidade a influências, eficiência do diagnóstico e experiência em serviço. Cada método apresenta vantagens, desvantagens, e incertezas associadas às medições. A seguir são apresentadas as características principais dos métodos de medição e na Tabela 3.2 a avaliação de cada um deles.

**Método A:** Medição da componente resistiva da corrente total, sem compensação da componente harmônica.

A1⇒ Usado o sinal de tensão como referência.  
A tensão aplicada ao para-raios é utilizada como referência para determinar a corrente resistiva, ver Figura 2.11.

A2⇒ Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga usando sinal de tensão.

A tensão aplicada ao para-raios é utilizada em circuito ponte de compensação para eliminar a componente capacitiva da corrente de fuga, ou seja, é feito a subtração da corrente de fuga capacitiva.

A3⇒ Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga sem usar o sinal de tensão.

Semelhante ao método A2, porém não usa o sinal de referência da tensão aplicada ao para-raios. Utiliza como referência sinal criada sinteticamente utilizando a própria corrente de fuga. O ajuste da amplitude e ângulo de fase pode ser feito automaticamente ou com uso de osciloscópio, podendo ser realizado os ajustes com diferentes graus de sofisticação.

A4⇒ Compensação da componente capacitiva pela combinação da corrente de fuga das três fases.

O método baseia-se na soma da corrente de fuga dos para-raios das três fases, sendo canceladas as componentes fundamentais, e como resultado tem-se a soma das componentes harmônicas das três fases.

**Método B:** Determinação da componente resistiva pela análise da harmônica da corrente de fuga.

B1⇒ Análise da harmônica de terceira ordem da corrente de fuga. Não utilizada sinal de referência da tensão, pois assume que toda componente harmônica é proveniente da curva características do varistor. A conversão para corrente resistiva pode ser feita com os dados fornecidos pelo fabricante.

B2⇒ Análise da harmônica de terceira ordem da corrente de fuga com a compensação das harmônicas da tensão.

Semelhante ao método B1, mas a sensibilidade aos harmônicos

da tensão da rede é fortemente reduzida pela inserção da compensação da harmônica de 3ª ordem da corrente de fuga capacitiva.

B3⇒ Análise da harmônica de primeira ordem.

A componente fundamental da corrente resistiva é obtida pela filtragem e integração da corrente de fuga, obtendo-se um sinal proporcional à componente resistiva. O método também necessita da obtenção do sinal de tensão da rede.

**Método C:** Determinação direta das perdas ativas.

A perda é expressa em termos do produto dos valores rms da tensão e da corrente resistiva. O método é pouco influenciado pelos harmônicos da rede devido ao processo de integração e multiplicação, sendo neste método necessário o sinal de tensão da rede.

**Tabela 3.2** - Avaliação dos métodos de monitoramento da corrente de fuga.

Método de monitoramento da corrente de fuga	Nr. do Método	Sensibilidade do método			Eficiência no diagnóstico		Experiência em serviço
		Harmônicos na tensão	Deslocamento de fase na medição da tensão ou corrente	Corrente superficial	Qualidade da informação	Complexidade de manuseio	
<i>Medição da corrente de fuga total</i>		Baixa	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Extensiva
<i>Medição da corrente de fuga resistiva</i>							
⇒ Usando referência de tensão	A1	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
⇒ Usando capacitor de compensação	A2	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
⇒ Usando compensação sintética	A3	Média	Alta	Alta	Média	Baixa	Sem avaliação
⇒ Usando cancelamento da corrente capacitiva	A4	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Limitada
<i>Análise harmônica da corrente de fuga</i>							
⇒ Usando terceira harmônica	B1	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Extensiva
⇒ Usando terceira harmônica com compensação	B2	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Extensiva
⇒ Usando harmônica de primeira ordem	B3	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
<i>Medindo as perdas ativas</i>	C	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Sem avaliação

Fonte: Adaptação (IEC 60099-5, 2000).

Dos métodos relacionados acima, os que necessitam de informação da tensão aplicada ao para-raios, tem sua utilização limitada, devido à grande dificuldade de se conseguir a informação de tensão. Outro ponto que limita o uso das técnicas é a complexidade do manuseio e o custo associado aos equipamentos. A maioria dos métodos apresenta qualidade do diagnóstico média, mas somente o método B2 apresenta qualidade de diagnóstico alta.

Segundo ABRATE (2012) a medição da componente resistiva e a do conteúdo de 3º harmônico da corrente de fuga total tem sua relativa confiabilidade, porém é de difícil implementação, não sendo implantados nas rotinas de manutenção, face o custo do equipamento, pouca experiência no diagnóstico e a necessidade de mão de obra especializada, haja visto a medição ser afetada pela distribuição de tensão irregular ao longo do para-raios, pelas capacitâncias parasitas para a terra e para os equipamentos adjacentes e pelas corrente induzidas no cabo de terra dos para-raios.

Devido às incertezas envolvidas na medição, são consideradas normais variações na amplitude da componente resistiva, 3ª harmônica da total e da corrente de fuga total. Segundo ABRATE (2012) considera-se evidência da degradação do para-raios a tendência de crescimento entre as medições e a variações da ordem de 100% ou mais na medição da componente de 3ª harmônica da corrente de fuga total.

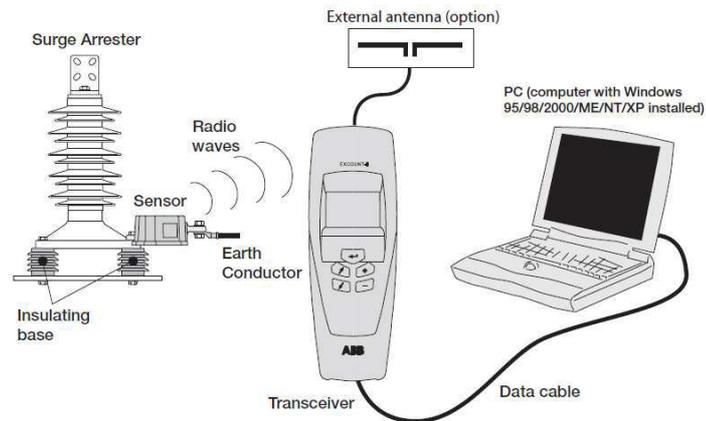
Ensaio realizados em laboratório, sob condições controladas, com instrumentos de diagnósticos de para-raios pelo método B2 apresentados em (ABRATE, 2012), mostraram diferenças nas medições, usando instrumentos de mesmo tipo/modelo. Em um segundo teste, foi usado o mesmo sensor de campo para todos os equipamentos e os valores se mostraram mais coerentes, porém, não sendo possível afirmar a realidade dos valores devido à ausência de referência do fabricante do para-raios testado. Foram também realizados testes em subestações e verificado que os campos magnéticos podem ser captados pela sonda de corrente e somados ao campo produzido pela corrente de fuga, aumentando a incerteza. As interferências eletromagnéticas, variam de acordo com a posição dos sensores, sendo necessário um padrão para as medições, visando à uniformização das medições.

Testes em campo foram realizados para avaliar os resultados de instrumento usando o método B2 da IEC 60099-5 (2000). Variabilidade no resultado também foi verificada para mudança na posição dos sensores (VIDEIRA, 2011).

Os instrumentos existentes no mercado que medem a corrente de fuga resistiva usando o método B2 da IEC 60099-5 (2000) com compensação do 3º harmônico presente na forma de onda da tensão, podem ser fixos, associados aos para-raios ou móveis. Estes instrumentos possuem valores elevados e para o caso dos fixos, normalmente seu uso só é visto em para-raios com tensões elevadas, a partir de 500kV, quando o seu custo se torna viável. Estes equipamentos ainda fornecem e registram a contagem dos surtos, duração, amplitude, data e horário, que segundo HINRICHSEN (1997) são informações importantes para avaliação da degradação do para-raios, pois o envelhecimento elétrico dos varistores sob condições normais de operação pode ser certamente excluída pelo longo tempo de estabilidade térmica apresentada durante os testes de desenvolvimento dos varistores, e do controle de qualidade na sua produção. Seu manuseio é simples diferentemente do instrumento de medição móvel. Uma série de opções quanto a tratamento e armazenamento de dados por softwares também é possível. Na Figura 3.14 é apresentado um modelo de instrumento móvel e na Figura 3.15 um modelo de instrumento que fica fixo na base do para-raios.



**Figura 3.14** - Medidor de corrente de fuga LCM II.  
Fonte: (DOBLE TRANSINOR, 2007).



**Figura 3.15** - Medidor de corrente de fuga EXCOUNT II.  
Fonte: (ABB, 2010).

Equipamentos que se utilizam do método de medição B1 da IEC 60099-5 também estão disponíveis no mercado, são bem mais leves, portáteis, fáceis de usar e bem mais baratos que os do método B2, pode-se citar o SCAR-10 e o DIAG. Este último fornece além da corrente de 3ª harmônica, a corrente total, fator de crista e ainda possibilita a saída para avaliação da forma de onda da corrente com osciloscópio.

Segundo ABRATE (2012) o desempenho avaliado em campo utilizando instrumento de método B1 que utiliza a 3ª harmônica da corrente total foi satisfatório. As influências das harmônicas da tensão da rede não se mostraram expressivas. Neste estudo também se verificou que a corrente de 3ª ordem sofre menos influência da temperatura que a componente resistiva, e que a amplitude da tensão da rede pode influenciar na leitura, todavia, a tensão em geral é estável e seu reflexo na corrente de fuga é pequeno.

# Capítulo 4

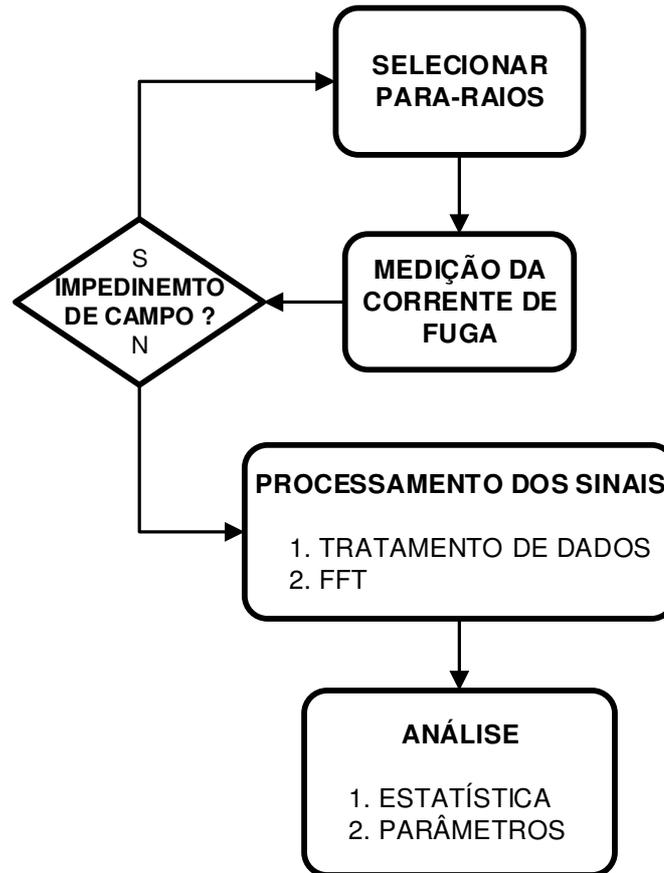
## 4. METODOLOGIA E CRITÉRIOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia e critérios empregados para obtenção da corrente de fuga dos PR: unidades selecionadas, organização dos dados, padronização do processo de medição, dificuldades, análise estatística e avaliação.

### 4.1. METODOLOGIA

O trabalho visa avaliar o estado operacional de para-raios no sistema elétrico, baseando-se na leitura da corrente de fuga total e na análise da forma de onda. A corrente de fuga será analisada em programa computacional através da decomposição em série de Fourier, para análise harmônica da corrente. A avaliação do estado do para-raios será feita com base na forma de onda, inspeção visual do invólucro, e na medição da corrente de fuga que comporá um banco de dados das medições realizadas em campo com base nos para-raios selecionados. A seleção dos para-raios tem como base o modelo/tipo, tempo de operação e configuração da instalação. A análise dos dados das leituras obtidas em campo visando avaliar a degradação do para-raios será feita utilizando a estatística. A validação do processo se dará pela realização de testes em laboratório, a fim de avaliar o desempenho dos instrumentos utilizados nas medições em campo, na coerência dos resultados obtidos entre as medições e na ordem de grandezas dos valores das correntes.

A seguir é apresentado na Figura 4.1, fluxograma ilustrando a sequência das atividades descritas acima.



**Figura 4.1** – Fluxograma de atividades da metodologia proposta.

## 4.2. SELEÇÃO DOS PARA-RAIOS

Os para-raios selecionados fazem parte do sistema Chesf, empresa de porte na área de geração e transmissão do setor elétrico brasileiro. A Chesf utiliza o Sistema Integrado de Gestão de Ativo (SIGA) como ferramenta computacional para apoio ao gerenciamento de ativos.

O banco de dados do aplicativo foi acessado, e levantado os dados de todos os para-raios instalados no sistema Chesf com as características destacadas abaixo de forma a permitir a seleção dentro dos critérios desejados:

- Subestação;
- Localização (codificação operacional);
- Nível de tensão;
- Fabricante;
- Modelo/tipo;

- Ano de fabricação;
- Tempo de operação;
- Tipo de invólucro.

Os dados foram trabalhados em planilha eletrônica, e os para-raios selecionados.

O primeiro critério estabelecido na seleção dos para-raios foi o de idade e tempo de operação. Todos os modelos/tipos que possuíam unidades instaladas no sistema Chesf com tempos de operação os mais distintos possíveis foram selecionados.

O segundo critério estabelecido, o geográfico, visou restringir a distância entre os para-raios a uma área que permitisse de forma operacional a realização das medições. Com este critério buscou-se também subestações com um perfil de tensão e uma uniformidade na temperatura média semelhantes.

O terceiro critério priorizou para-raios de subestações distintas, de forma que as medições pudessem ser avaliadas em situações com perfil de carga e interferências eletromagnéticas diferentes.

### **4.3. MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA**

#### **4.3.1. Escolha da técnica de medição**

A IEC 60099-5 (2000) define vários métodos possíveis de avaliação da corrente de fuga de para-raios. Analisando os métodos de medição disponíveis sob a ótica da viabilidade prática, técnica, operacional e econômica.

- Prática – permitir a realização de leituras de forma rápida com equipamentos simples e pequenos.
- Técnica – possuir qualidade da informação para diagnóstico pelo menos média, permitir a verificação da forma de onda e de grandezas elétricas no momento da medição, com registro das leituras em memória para análise dos dados.

- Operacional – não necessitar da obtenção de sinal da tensão aplicada ao para-raios, face dificuldade de obtenção desta informação de forma prática em campo.
- Econômica – equipamento de custo acessível.

O método B1 da IEC 60099-5 (2000) que utiliza a componente de 3ª harmônica da corrente total foi o escolhido por ser considerado o mais adequado aos critérios adotados.

#### 4.3.2. Instrumentos de medição

Os instrumentos de medição utilizados foram um amperímetro do tipo alicate com saída digital, (ver fotografia na Figura 4.2), e um osciloscópio digital portátil com memória, (ver fotografia na Figura 4.3).



Figura 4.2 - Alicate amperímetro.



Figura 4.3 - Osciloscópio portátil digital com memória.

Nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2 são apresentadas algumas características do alicate amperímetro e do osciloscópio, respectivamente.

**Tabela 4.1** - Especificações do alicate amperímetro.

<i>Fabricante/País:</i>	HIOKI / Japão
<i>Modelo:</i>	3283
<i>Precisão de saída:</i>	$\pm 2\%$ leitura $\pm 5$ dígitos (40 a 2 kHz)
<i>Escala 0 a 10mA:</i>	Resolução 0,01 mA

**Tabela 4.2** - Especificações do osciloscópio.

<i>Fabricante/País:</i>	HIOKI / Japão
<i>Modelo:</i>	8870-20
<i>Taxa amostragem máxima</i>	1MS/s
<i>Base de tempo (precisão)</i>	$\pm 0,01\%$

#### 4.4. TÉCNICA DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados realizada tem como base a oscilografia da corrente de fuga total medida e a análise estatísticas dos valores obtidos da harmônica de 3ª ordem usando a *Fast Fourier Transform* (FFT).

A análise da oscilografia da corrente de fuga total baseia-se nas amplitudes e formas de onda de TRIDELTA (2007) e nas obtidas nos experimentos de laboratório.

As medições da corrente de fuga total dos para-raios são separadas em grupos, tipo/modelo, e subgrupos com base no tempo de operação e ano de fabricação. Em cada grupo diversas leituras são realizadas.

Cada medição passa por um filtro que usa a média móvel para retirada de ruído, em seguida é executada a transformada de Fourier e obtido o espectro de frequência, possibilitando a obtenção do valor de pico da harmônica de 3ª ordem.

Com os diversos valores da harmônica de 3ª ordem da corrente de fuga total armazenadas em grupos (tipo/modelo) e subgrupos (tempo de operação), são calculados os parâmetros estatísticos dos dados e realizado o teste de aderência usando como referência o critério do  $R^2$  (MAGALHÃES et. al., 2002). Com os parâmetros das distribuições de probabilidade obtidas para os subgrupos de PR, são gerados dados aleatórios e os resultados apresentados em gráfico de frequências e em diagrama de caixas (*box-plot*). Com a análise gráfica comparativa e quantitativa nos subgrupos, faz-se a avaliação do comportamento do tipo/modelo do PR.

As incertezas entre os valores obtidos para corrente de fuga total permanecerão sem ajustes para tensão e temperatura, partindo da premissa de que as medições serão comparativas, que entre subestações próximas o perfil de tensão não sofra grandes variações e que a temperatura média no entorno de 60 km de Recife-PE, onde se encontram as subestações, não sofram variações consideráveis durante o período de sol.

A validação dos instrumentos de medição, a coerência encontrada no histórico dos valores das leituras das correntes de fugas dentro do mesmo modelo/tipo de para-raios, os valores médios convencionados para a corrente de fuga total, da harmônica de 3ª ordem e a coerência estatística, serão parâmetros considerados para validar o método descrito neste trabalho.

#### 4.4.1. Média móvel

A média móvel é uma técnica que possui várias aplicações, uma delas bastante utilizada, é na eliminação de ruídos em sinais atuando como filtro passa baixa.

Sendo  $y$  uma distribuição discreta qualquer com  $n$  pontos, e  $k$  o número de pontos utilizados para obtenção da média (cinco, neste caso), e  $yy$  a função filtro desejada, pode-se escrever:

$$yy(n) = \frac{y(n-2) + y(n-1) + y(n) + y(n+1) + y(n+2)}{k} \quad (4.1)$$

O método de cálculo implementado neste trabalho, utiliza um algoritmo robusto que atribui menor peso a valores *outliers* e peso zero a dados externos com seis desvios médios absolutos (THE MATHWORKS, INC., 2012).

#### 4.4.2. Fast Fourier Transform (FFT)

A *Fast Fourier Transform* (FFT) é uma ferramenta matemática muito utilizada em processamento de sinais, pois permite a partir de um sinal discreto, realizar a sua decomposição espectral, sendo possível analisar a amplitude presente nas componentes de frequências do sinal.

A FFT é representada na Equação (4.2), onde  $y$  é a função discreta no tempo,  $\bar{Y}$  é a função transformada,  $N$  é o número de pontos de  $y$ , e  $w_N$  é definida na Equação (4.3) (HAYKIN; VEEN, 2001; THE MATHWORKS, INC., 2012).

$$\bar{Y}(k) = \sum_{l=1}^N y(l) w_N^{(l-1)(k-1)} \quad (4.2)$$

$$w_N = e^{\frac{-2\pi j}{N}} \quad (4.3)$$

#### 4.4.3. Estatística

A estatística é uma técnica muito utilizada para coletar, organizar, descrever, analisar e interpretar dados provenientes de experimentos. A análise exploratória dos dados com base em medidas estatísticas permite descrever o comportamento dos dados.

Considerando  $n$  o número de observações e  $x_i$  a variável aleatória analisada, algumas medidas clássicas e de dispersão podem ser definidas (BARBETA et al, 2004):

- *Média aritmética* de uma amostra, ou média amostral é uma medida central que aponta para onde mais se concentram os dados. A média é descrita na Equação (4.4):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (4.4)$$

- A *variância* de uma amostra, Equação (4.5), é uma medida de dispersão que indica a média do quadrado dos desvios em relação à média.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.5)$$

- O *desvio padrão* indica o quanto os dados estão dispersos em relação à média. É dado pela raiz quadrada da variância, Equação (4.6).

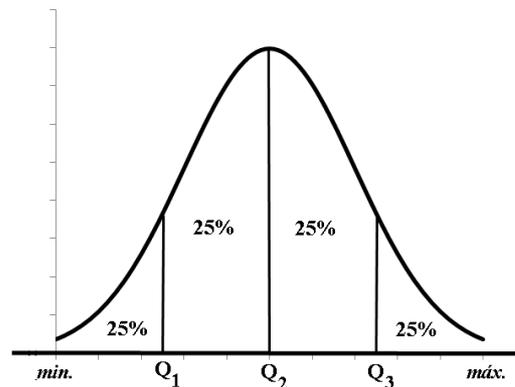
$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.6)$$

A média e o desvio padrão são medidas bastante utilizadas, porém são fortemente influenciadas por valores discrepantes. Em amostras são possíveis ocorrer valores discrepantes e enviesar a análise. Algumas medidas importantes e menos influenciadas por estes valores são descritas a seguir (BARBETA et al, 2004):

- *Mediana ou segundo quartil* ( $Q_2$ ) é o valor que divide a distribuição ao meio deixando 50% dos valores abaixo e 50% dos valores acima.
- *Primeiro quartil ou quartil inferior* ( $Q_1$ ) é o valor que delimita os 25% menores valores.
- *Terceiro quartil ou quartil superior* ( $Q_3$ ) é o valor que delimita os 25% maiores valores.

- *Extremo Inferior* é o menor valor do conjunto de valores.
- *Extremo superior* é o maior valor do conjunto de valores.

A Figura 4.4 representa uma distribuição com as medidas da mediana, quartis e extremos.

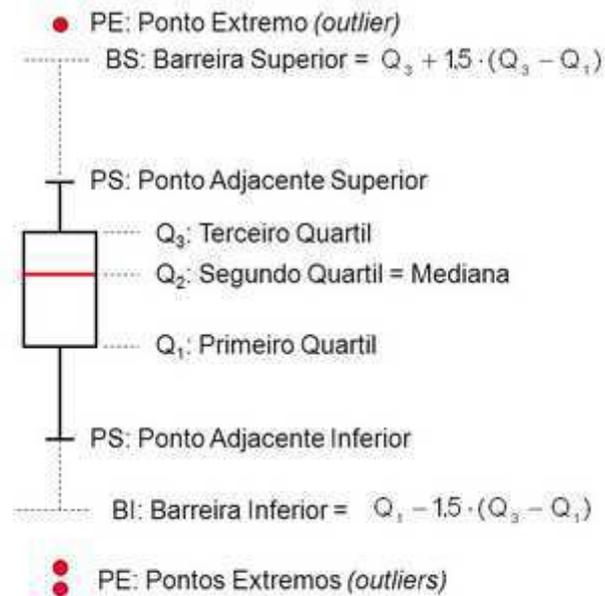


**Figura 4.4** - Representação dos extremos e quartis de uma distribuição.

O diagrama de caixas (*box-plot*) é uma ferramenta gráfica que mostra de forma simples e prática uma distribuição de dados com os seus quartis, valores máximos, mínimos e valores discrepantes, conhecidos também como *outlier*. O *box-plot* é uma ferramenta muito importante quando se quer comparar o comportamento de distribuições. A Figura 4.5 apresenta o diagrama de caixas com a indicação de suas medidas, onde:

- BS (Barreira Superior) e BI (Barreira Inferior) são valores limites que, caso sejam superados, indicam a existência de Pontos Extremos (PE). São calculados conforme Figura 4.5.
- PE – Pontos Extremos (*outlier*) são valores de uma distribuição de dados superiores ou inferiores à BS e BI. São valores discrepantes de uma amostra de dados.

- PS – Ponto Adjacente Superior e Inferior. É o maior ponto da distribuição de dados menor que BS (ponto adjacente superior) e menor ponto da distribuição maior que BI (Ponto adjacente inferior).



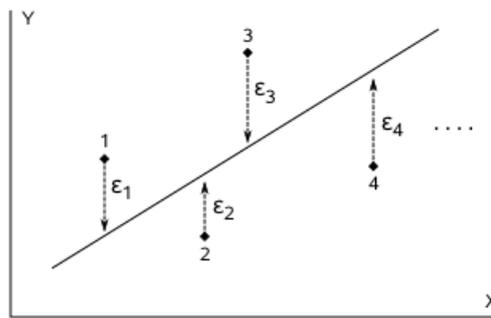
**Figura 4.5** - Representação gráfica de um *box-plot* com suas medidas.

Os dados amostrados podem ser representados por uma distribuição de probabilidade que descreva melhor o seu comportamento. Lognormal, Exponencial, Weibull e Normal são algumas das distribuições que podem ser utilizadas. O teste de aderência é usado para verificar a semelhança do comportamento dos dados com uma distribuição testada. O coeficiente de determinação  $R^2$  é uma medida de avaliação desta semelhança. Assume valores entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1 maior é o ajuste do modelo. Ele é definido como sendo a divisão da  $SQ_{reg}$  - soma dos quadrados da regressão pela  $SQ_{tot}$  - soma dos quadrados da distribuição da Equação (MAGALHÃES et. al., 2002).  $SQ_{reg}$  e  $SQ_{tot}$  estão definidos nas equações (4.14) e (4.15).

$$R^2 = \frac{SQ_{reg}}{SQ_{tot}} \quad (4.7)$$

Como uma distribuição de probabilidade pode ter um comportamento aproximadamente linear, a regressão pode ser utilizada para verificar a aderência

dos dados com uma distribuição qualquer. A regressão linear é um método utilizado para se estimar por uma reta o comportamento de dados. A Figura 4.6 ilustra os pontos 1, 2, 3 e 4 de uma amostra qualquer. O erro entre cada ponto da amostra e a reta estimada é denotado por  $\varepsilon$ . O melhor ajuste ocorre quando se minimiza os erros. O método dos mínimos quadrados (MMQ) pode ser usado para tal. Ele representa a soma quadrática dos erros (MAGALHÃES et. al., 2002), sendo descrito pela Equação (4.8), onde  $y_i$  é o valor observado (amostra) e  $\hat{y}_i$  valor estimado pela regressão.



**Figura 4.6** - Representação gráfica do ajuste de pontos por uma reta com seus respectivos desvios.

$$SQ = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.8)$$

O valor de  $\hat{y}_i$  estimado pela Equação da reta é calculado pela expressão (4.9), onde  $\beta_0$  é o ponto de intersecção da reta com o eixo das ordenadas,  $\beta_1$  o coeficiente angular da reta e  $\varepsilon_i$  o erro de cada ponto estimado.

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (4.9)$$

Os estimadores  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são os valores que minimizam a soma dos quadrados dos erros ( $SQ$ ). Eles podem ser obtidos diferenciando a Equação (4.8) com relação a  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , Equação (4.10 e 4.11).

$$\frac{\partial SQ}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial SQ}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) \quad (4.11)$$

Igualando a zero as derivadas parciais e resolvendo o sistema de equações para  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , eles podem ser calculados pelas equações (4.12) e (4.13), onde  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são a média de  $x$  e  $y$ , respectivamente.

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.12)$$

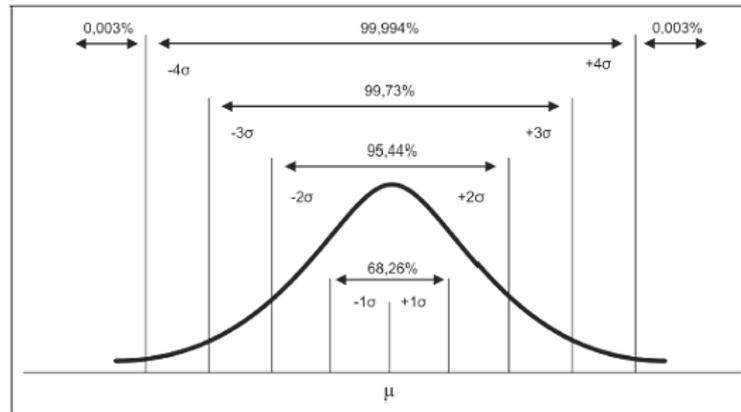
$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (4.13)$$

$$SQ_{reg} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4.14)$$

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.15)$$

A distribuição de probabilidade gaussiana (normal) possui um vasto campo de aplicação, permitindo modelar diversos fenômenos naturais. Um deles é o comportamento dos dados de medições para diagnóstico de defeito de para-raios por apresentar uma boa aderência dos dados. (ABRATE, 2012; BARRETO JUNIOR et al., 2001; MARTINS; BARBOSA; CRUZ, 2010). A sua função de probabilidade possui uma característica peculiar, por seu gráfico descrever uma curva na forma de sino, existindo maior probabilidade de ocorrer eventos próximos do centro. A sua distribuição de probabilidade é expressa pela Equação (4.16) e o seu comportamento é apresentado na Figura 4.7.

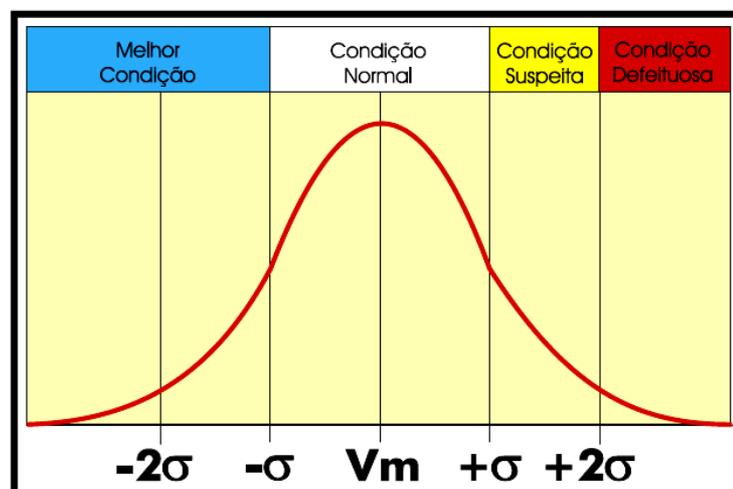
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad -\infty < x < +\infty \quad (4.16)$$



**Figura 4.7** - Representação gráfica da função densidade de probabilidade normal com seus parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ .  
Fonte: internet.

A partir das medições realizadas em campo e do posterior condicionamento do sinal, um banco de dados formado com os valores da componente da corrente de fuga total modelado por uma distribuição normal é utilizado para avaliar a condição operativa do para-raios.

O critério utilizado para avaliação da degradação do para-raios com base na distribuição normal é apresentado na Figura 4.8. O diagnóstico é feito enquadrando o para-raios na condição melhor (15,85%), normal (68,26%), suspeita (13,59%) e defeituosa (2,27%) (ABRATE, 2012; BARRETO JUNIOR et al., 2001; MARTINS; BARBOSA; CRUZ, 2010). A condição defeituosa é indicada para  $\mu+2\sigma$ , faixa em que a probabilidade de ocorrer amplitudes da componente de 3ª harmônica da corrente de fuga total da amostra obtida é pequena, 2,27%.



**Figura 4.8** – Critério para diagnóstico de para-raios com base na distribuição normal com parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ .  
Fonte: (ABRATE, 2000).

# Capítulo 5

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos e as análises na validação em laboratório e em campo da metodologia adotada.

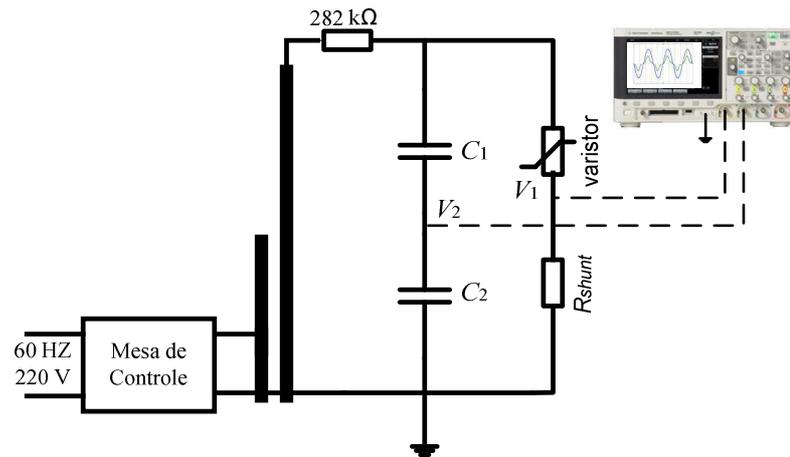
Para as medições efetuadas em laboratório serão avaliados os instrumentos de medição e os procedimentos experimentais para entendimento do comportamento da corrente de fuga e teste da técnica adotada. Nas medições efetuadas em campo serão apresentados os resultados, as suas análises e a comparação com as medições realizadas em laboratório.

### 5.1. VALIDAÇÃO EM LABORATÓRIO

Antes de realizar as medições da corrente de fuga nas subestações, se fazia necessário avaliar, em laboratório, a pertinência da metodologia adotada, visando entender o comportamento da corrente de fuga total em condições de operação imposta, sendo conhecida a tensão (amplitude e harmônicas), temperatura (28,4 °C), umidade (57%), pressão (962 mbar) e o estado do equipamento testado.

Os ensaios também tiveram o objetivo de avaliar o desempenho dos instrumentos adotados para realização das medições em campo e as técnicas utilizadas para processamento de sinais e análise dos dados. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

A Figura 5.1 apresenta o circuito utilizado para medição da corrente de fuga do para-raios, composto por uma mesa de controle, um transformador elevador de tensão (0-100 kV), um resistor de proteção (282 k $\Omega$ ), um resistor “*shunt*” ( $R_{shunt} = 1000\Omega$ ) e um divisor capacitivo (relação 1917,63). A tensão aplicada ao para-raios é medida através do divisor capacitivo ( $V_2$ ), e a corrente de fuga total é medida indiretamente, através da queda de tensão no resistor “*shunt*” ( $V_1$ ).



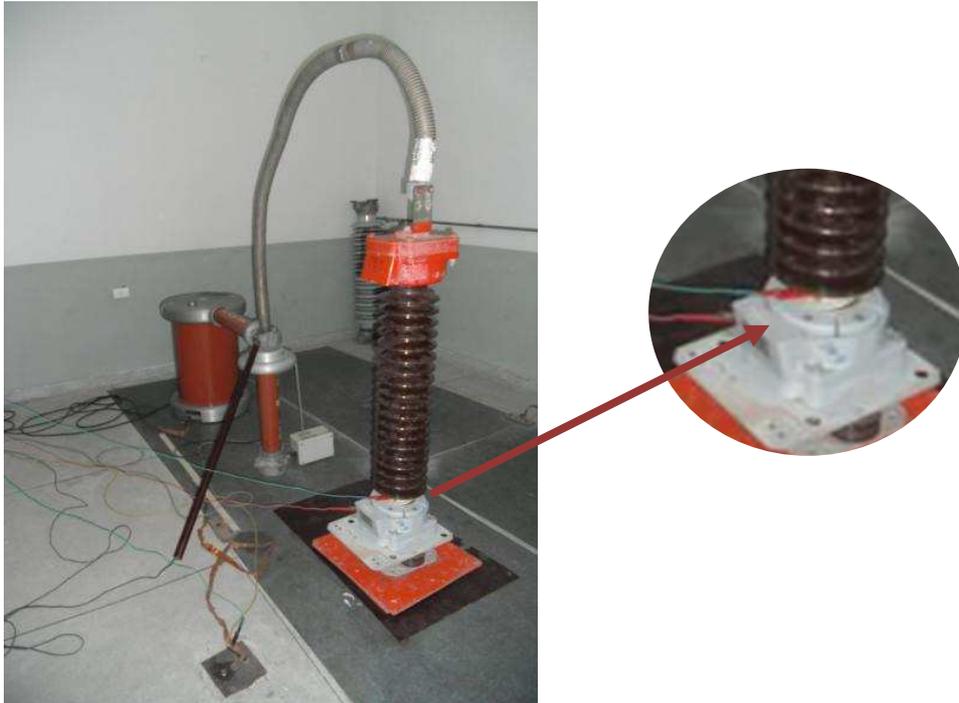
**Figura 5.1** - Arranjo do circuito utilizado no ensaio de medição da corrente de fuga.

Na Tabela 5.1 são apresentados os dados de placa do para-raios utilizado nos experimentos.

**Tabela 5.1** - Dados técnicos do para-raios.

<i>Dados técnicos</i>	<i>Para-raios</i>
Tipo	HZL2
Tensão nominal	72kV <sub>RMS</sub>
Tensão de operação contínua	42kV <sub>RMS</sub>
Tensão residual máxima (8/20µs, 20kA)	180kV <sub>PICO</sub>
Corrente nominal de descarga	20kA
NBI	350kV <sub>PICO</sub>
Varistor	ZnO

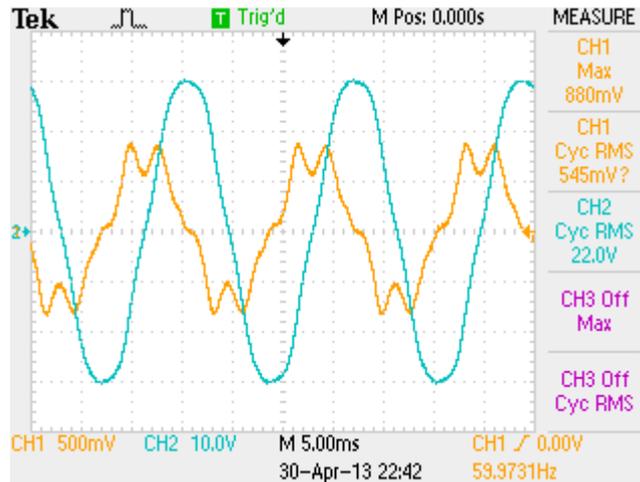
Foram realizados ensaios no para-raios com a porcelana limpa e impregnada com solução de 8,9 mS/cm simulando funcionamento em condição de poluição superficial (FESER et al., 1991). A corrente de fuga superficial foi medida com o uso de uma cinta metálica instalada na parte inferior da porcelana do para-raios. A Figura 5.2 apresenta uma visão geral do arranjo físico utilizado no laboratório.



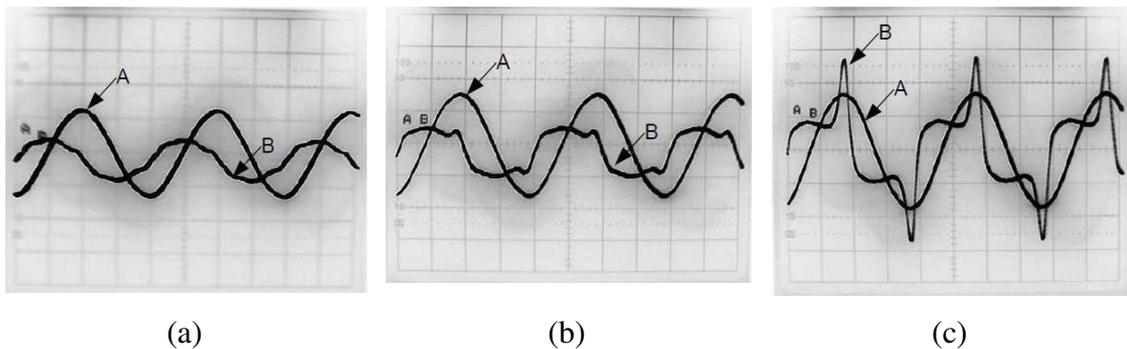
**Figura 5.2** - Arranjo do circuito físico utilizado no ensaio de medição da corrente de fuga.

Na Figura 5.3 são apresentadas as formas de ondas de tensão e corrente obtidas para o para-raios com o invólucro de porcelana limpo. Na cor azul tem-se a forma de onda da tensão aplicada ( $42 \text{ kV}_{\text{RMS}}$ ) e na cor laranja a forma de onda da corrente de fuga total ( $0,88 \text{ mA}_{\text{PICO}}$ ). Como esperado a corrente de fuga total apresenta-se predominantemente capacitiva, adiantada da tensão, e fortemente distorcida, confirmando a condição ruim do para-raios testado. TRIDELTA (2007) apresenta oscilografias da tensão e da corrente de um para-raios, na condição normal, imediatamente após uma sobretensão e degradado, Figura 5.4. Ainda estabelece valores limite para alguns parâmetros de controle:

- Valor de pico da corrente total não ultrapassa  $4 \text{ mA}$
- Valor eficaz da corrente total não ultrapassa  $2 \text{ mA}$
- $3^{\text{a}}$  harmônica da corrente total não ultrapassa  $0,1 \text{ mA}$  ( $100 \mu\text{A}$ ).



**Figura 5.3** - Forma da onda de tensão e corrente do para-raios na condição limpo.

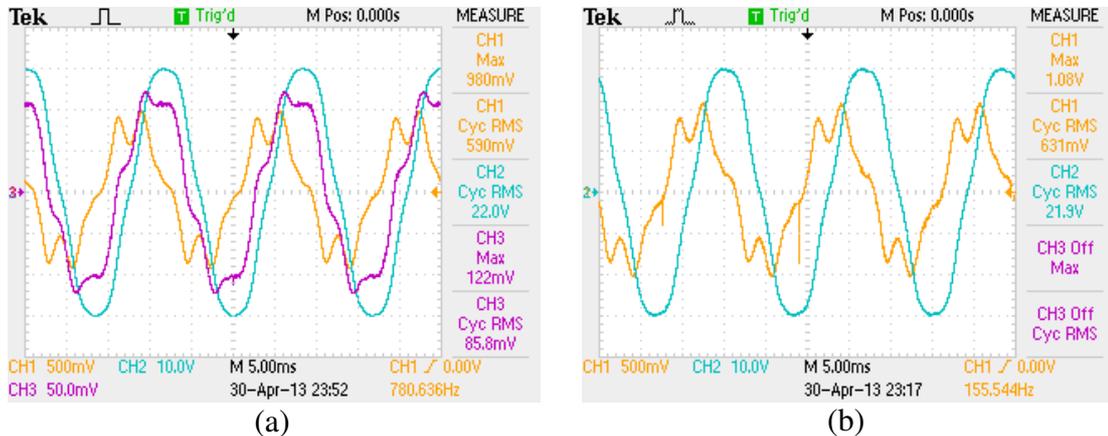


**Figura 5.4** - (a) Oscilografia da corrente de fuga no estado operacional normal. (b) Oscilografia da corrente de fuga no estado operacional imediatamente após uma sobretensão. (c) Oscilografia da corrente de fuga em estado operacional anormal.

Fonte: (TRIDELTA, 2007).

Outro experimento realizado foi a medição da corrente de fuga simulando o para-raios sujo com a poluição seca e sujo com a poluição úmida. Na Figura 5.5(a) tem-se em azul a forma de onda da tensão aplicada, em laranja a corrente de fuga total e em rosa a corrente que fluiu pelo invólucro de porcelana, considerando a poluição seca. Na Figura 5.5(b) é apresentada a forma de onda da tensão (cor azul) e a forma de onda da corrente de fuga total (cor laranja) considerando a poluição úmida. Para os valores reais de tensão considerar o fator multiplicador de 1917,63 e para corrente a leitura é direta (considerar A no lugar de V).

O valor da corrente de fuga total no experimento da Figura 5.5(a) foi de 1,06 mA<sub>PICO</sub>, dado pela soma da corrente interna (laranja) e da superficial (rosa). A forma de onda da corrente total permaneceu semelhante à da corrente interna (laranja).



**Figura 5.5** - (a) Invólucro do para-raios com a poluição seca oscilografia da tensão (azul), corrente de fuga interna (laranja) e corrente de fuga superficial (rosa). (b) Invólucro do para-raios com a poluição úmida oscilografia da tensão (azul), corrente de fuga total (laranja).

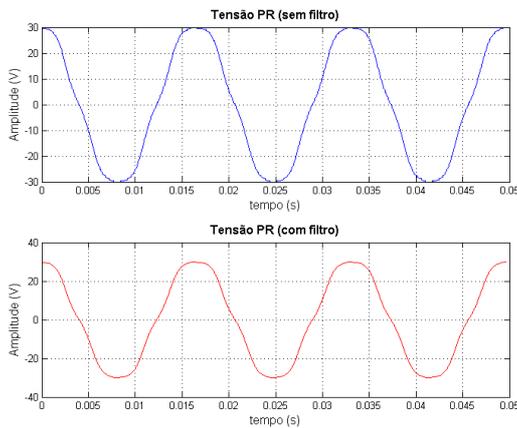
Na Figura 5.5(a) é possível observar o comportamento resistivo da corrente de fuga superficial (rosa) com pequeno defasamento em relação à tensão aplicada, e a corrente de fuga interna (laranja) predominantemente capacitiva. Na Figura 5.5(b), para-raios com a poluição úmida, é possível perceber o incremento no valor da corrente de fuga total e pequenas descargas em relação à Figura 5.5(a).

Os instrumentos da Figura 4.2 e Figura 4.3 foram testados de forma comparativa com os instrumentos do LAT durante os experimentos e os resultados foram satisfatórios.

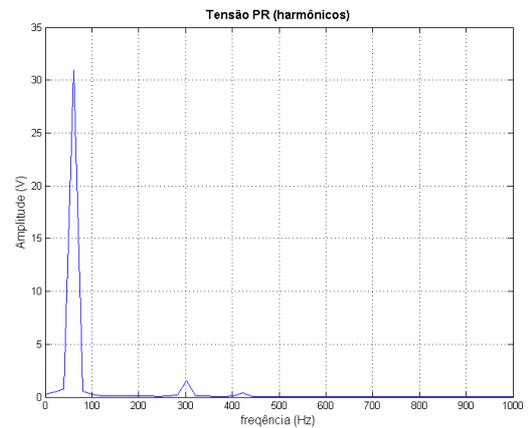
A análise harmônica da tensão aplicada e da corrente de fuga foi realizada, com uso de programa computacional desenvolvido para esse fim. Os dados brutos foram filtrados, visando reduzir os ruídos sobrepostos aos sinais e no passo seguinte foi feita a sua decomposição na frequência. Resultados são apresentados na Figura 5.6 de (a) a (h). Nestas figuras são apresentados os sinais de tensão ou corrente com e sem tratamento (com e sem filtragem), e o espectro de frequência.

- Figuras (a) e (b) tensão aplicada ao para-raios;

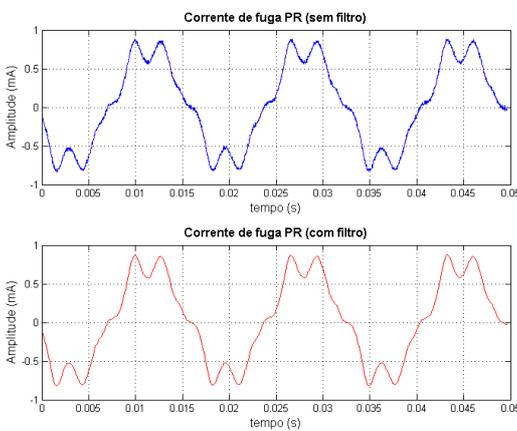
- Figuras (c) e (d) corrente de fuga total do para-raios com invólucro de porcelana limpo;
- Figuras (e) e (f) corrente de fuga total do para-raios com invólucro de porcelana poluído;
- Figuras (g) e (h) corrente de fuga superficial do para-raios com invólucro de porcelana poluído (corrente de fuga sobre a porcelana);



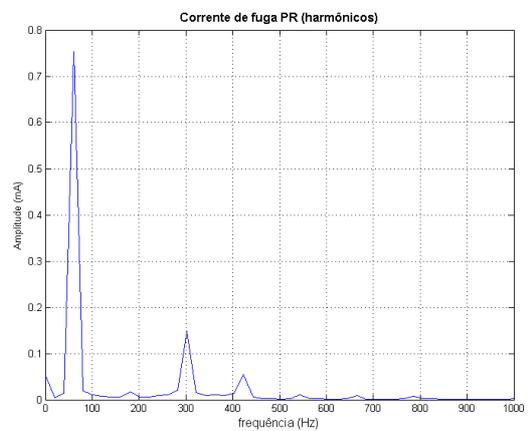
(a)



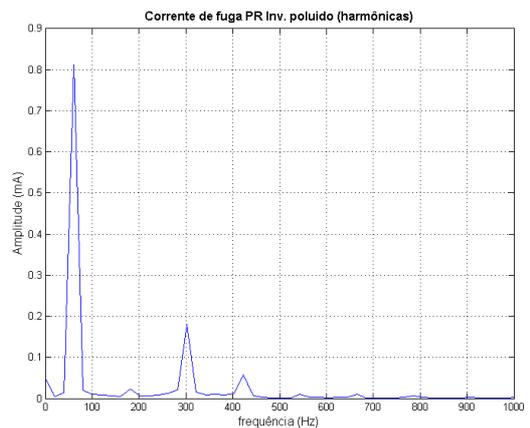
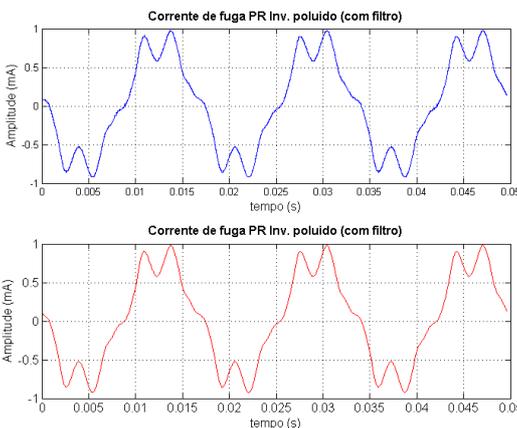
(b)

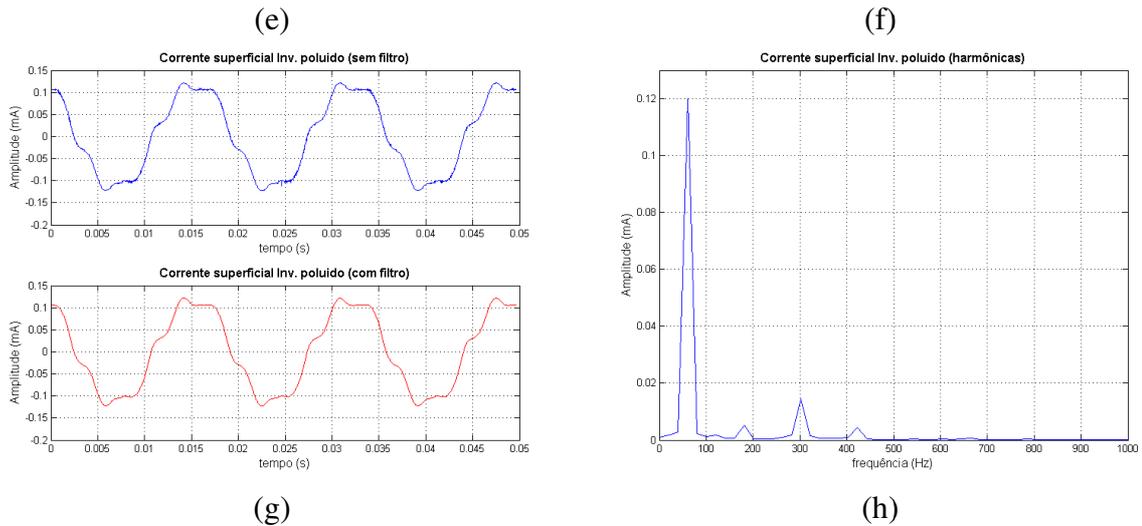


(c)



(d)





**Figura 5.6** - (a) Tensão aplicada ao para-raios, com e sem filtro. (b) Espectro de frequência da tensão no para-raios. (c) Corrente de fuga total do para-raios com invólucro limpo, com e sem filtro. (d) Espectro de frequência da corrente de fuga total do para-raios com invólucro limpo. (e) Corrente de fuga total do para-raios com invólucro poluído, com e sem filtro. (f) Espectro de frequência da corrente de fuga total do para-raios com invólucro poluído. (g) Corrente de fuga superficial no invólucro do para-raios, na condição poluído, com e sem filtro. (h) Espectro de frequência corrente de fuga superficial no invólucro do para-raios, na condição poluído.

Nas Figura 5.6(a), (c), (e) e (g) pode-se verificar o comportamento adequado do filtro utilizado. Na Figura 5.6(b) pode-se verificar que a distorção harmônica da tensão concentra-se fortemente na 5<sup>a</sup> e na 7<sup>a</sup> harmônicas. Na Figura 5.6(c) é possível ver o aparecimento de várias frequências em função da não linearidade da curva característica do para-raios testado, e de forma mais significativa a 5<sup>a</sup> e a 7<sup>a</sup> influenciadas pelas harmônicas da tensão. Na Figura 5.6(f) condição do invólucro do para-raios poluído, vê-se o maior aumento da componente fundamental, em função do comportamento resistivo da corrente superficial.

A Tabela 5.2 apresenta os valores da componente de 3<sup>a</sup> harmônica determinada nos experimentos apresentados acima.

**Tabela 5.2** - Componente de 3ª harmônica encontrado nos experimentos.

<i>Experimento</i>	<i>Componente 3ª harmônica</i>
Espectro de frequência da tensão no para-raios.	$0,1214 \cdot 1917,63 = 233 \text{ V}_{\text{PICO}}$
Espectro de frequência da corrente de fuga total do para-raios com invólucro limpo.	$0,0171 \text{ mA}_{\text{PICO}}$
Espectro de frequência da corrente de fuga total do para-raios com invólucro poluído.	$0,0238 \text{ mA}_{\text{PICO}}$
Espectro de frequência corrente de fuga superficial no invólucro do para-raios, na condição poluído.	$0,0053 \text{ mA}_{\text{PICO}}$

## 5.2. VALIDAÇÃO EM CAMPO

Nesta etapa são apresentados os resultados da seleção dos para-raios, medições de campo, processamento de sinais e cálculos estatísticos.

### 5.2.1. Seleção dos para-raios

Os para-raios selecionados foram de 69 kV e 230 kV de 6 subestações nas classes de tensão 500 kV e 230 kV, em um total de 8 tipos/modelos de para-raios de 4 fabricantes diferentes.

A Tabela 5.3 mostra o resumo dos para-raios selecionados com a associação do fabricante com o tipo/modelo e com as subestações, todos com nome fantasia. Dentre os modelos selecionados, um possui para-raios com três faixas distintas de tempo de operação, outros com duas e outros com uma. Já na Tabela 5.4 é apresentado um detalhamento dos dados de uma amostra dos para-raios selecionados.

**Tabela 5.3** - Relação fabricante, tipo e subestação dos para-raios selecionados.

<i>Fabricante</i>	<i>Tipo/modelo</i>	<i>Subestações</i>
M	MZS2	RC, BG
H	HZL2	BG, MR
	HZL4	RC, MR
A	AEX2	JR, BG, PR, RI
	AEX4	RC, PR
S	S214	RC, MR
	S314	BG, PR
	S202	BG, PR, RIB

**Tabela 5.4** - Dados de para-raios selecionados.

Instal	Localiz	Fase	Fabricsan	Tipo	Tensão	Idade (anos)	Ano Fabric	Tempo operação (anos)	Invólucro
BG	72J5	A	H	HZL2	069,0 KV	31	1982	29	Porcelana
BG	72J5	B	H	HZL2	069,0 KV	31	1982	29	Porcelana
BG	72J5	C	H	HZL2	069,0 KV	31	1982	29	Porcelana
PR	72J2	A	S	S202	069,0 KV	26	1987	24	Porcelana
PR	72J2	C	S	S202	069,0 KV	26	1987	24	Porcelana
PR	72J2	B	S	S202	069,0 KV	26	1987	24	Porcelana
BG	72J2	A	A	AEX2	069,0 KV	13	2000	11	Porcelana
BG	72J2	B	A	AEX2	069,0 KV	13	2000	11	Porcelana
BG	72J2	C	A	AEX2	069,0 KV	13	2000	11	Porcelana
BG	74T4	A	S	S314	230,0 KV	26	1987	15	Porcelana
BG	74T4	B	S	S314	230,0 KV	26	1987	15	Porcelana
BG	74T4	C	S	S314	230,0 KV	26	1987	15	Porcelana
BG	72J1	A	S	S202	069,0 KV	27	1986	11	Porcelana
BG	72J1	B	S	S202	069,0 KV	27	1986	11	Porcelana
BG	72J1	C	S	S202	069,0 KV	27	1986	11	Porcelana
JR	72M9	A	A	AEX2	069,0 KV	13	2000	7	Porcelana
JR	72M9	B	A	AEX2	069,0 KV	13	2000	7	Porcelana
JR	72M9	C	A	AEX2	069,0 KV	13	2000	7	Porcelana
MR	72J5	A	H	HZL2	069,0 KV	21	1992	16	Porcelana
MR	72J5	B	H	HZL2	069,0 KV	21	1992	16	Porcelana
MR	72J5	C	H	HZL2	069,0 KV	21	1992	16	Porcelana

### 5.2.2. Medições de campo

Como forma de manter um padrão e homogeneidade das leituras e minorar as influências eletromagnéticas, as medições foram realizadas seguindo padrão pré-definido. Também foram respeitados todos os processos inerentes às normas regulamentares.

Inicialmente foram realizados testes para avaliar o comportamento do instrumento diante dos campos eletromagnéticos presentes nas instalações. De modo geral, pode-se dizer que o desempenho do equipamento foi satisfatório. Em algumas situações testadas percebeu-se a ação dos campos, principalmente com relação ao posicionamento do alicate. A existência de correntes induzidas no cabo de terra dos para-raios foi confirmada variando a posição de leitura do alicate amperímetro ao longo do mesmo. À medida que o alicate se afasta da base do para-raios os valores vão sofrendo alterações e a medição torna-se errônea.

A Figura 5.7 ilustra a medição da corrente de fuga total em um para-raios instalado no sistema elétrico de 69 kV. Nela pode ser visto o posicionamento do alicate, na base do para-raios, com o cabo de aterramento na perpendicular e passando no centro do alicate.

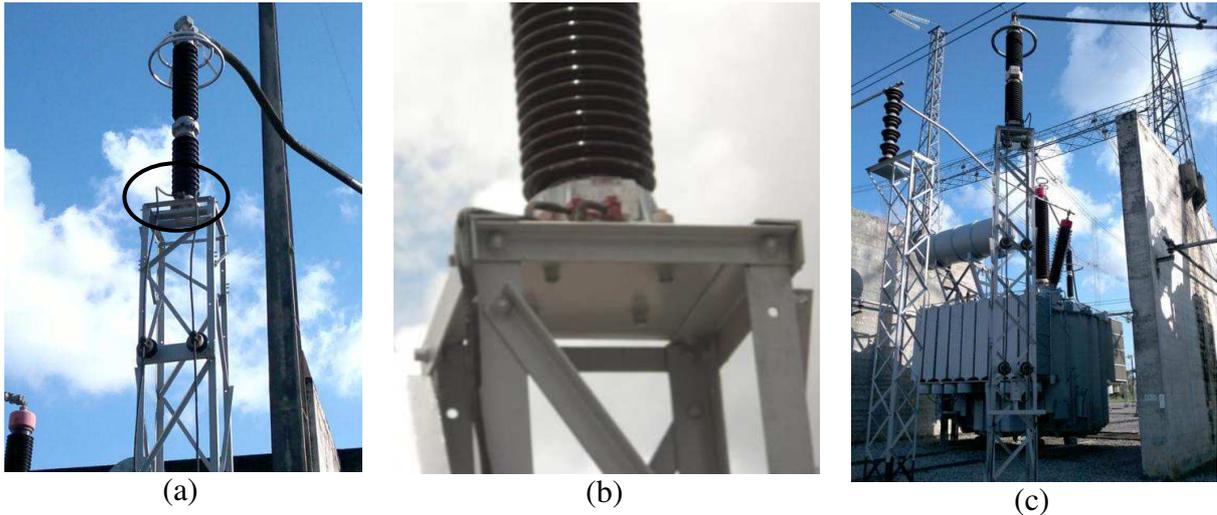
No início da leitura em cada subestação, eram checados os parâmetros dos instrumentos e condições das baterias. Antes de cada medição era verificada a condição nula dos instrumentos. Em cada subestação eram realizados os registros do horário, da temperatura, da umidade, e da tensão do barramento. Em cada medição era registrado o número da leitura e o valor da corrente de fuga total, assim como analisado a forma de onda da corrente.



**Figura 5.7** - Ilustração de medição da corrente de fuga total em campo.

O processo de medição apresentou dificuldade no tocante a alguns arranjos físicos e alguns para-raios selecionados tiveram que ser retirados do monitoramento em função do tempo que seria gasto para realização das medições, como também a necessidade de adaptação de dispositivo. Nas Figura 5.8(a), (b) e (c) são apresentadas algumas dessas configurações. Na Figura 5.8(a) o cabo de aterramento é duplo, “bigode”, na Figura 5.8(b) duas conexões de aterramento na base do para-raios sem espaçamento para a base e na Figura 5.8(c) grande altura.

Definidos os para-raios monitorados, padronizado o trajeto entre as subestações, os registros, o procedimento e a sequência das medições, foram realizadas 209 medições.

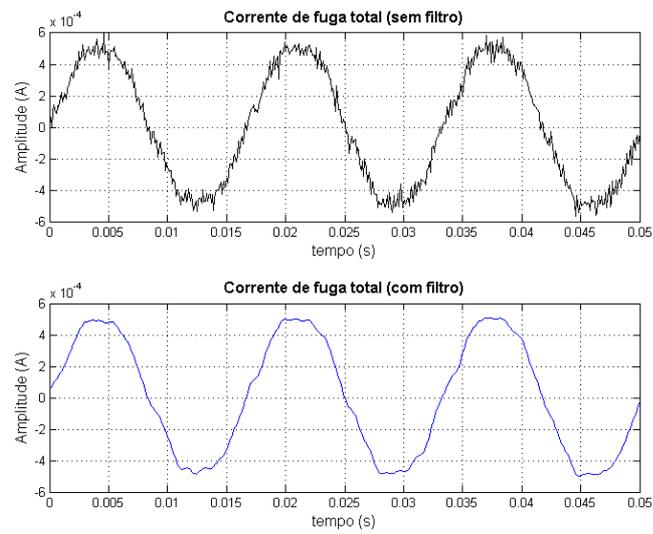


**Figura 5.8** - (a) Para-raios com cabo de aterramento duplo tipo “bigode”. (b) Para-raios com dois conectores de aterramento e sem espaçamento pra base. (c) Para-raios com grande altura.

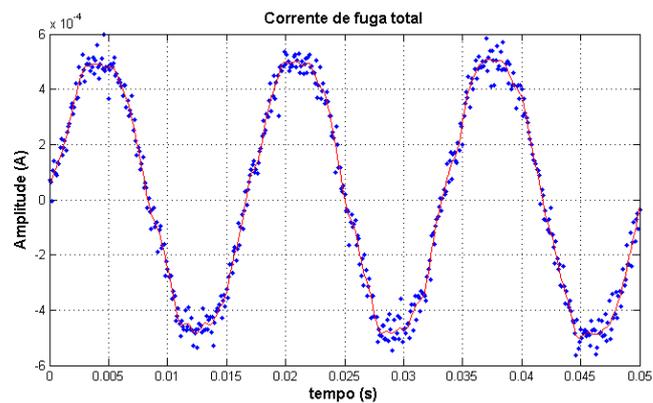
### 5.2.3. Processamento de sinais

Durante as aquisições de dados o osciloscópio estava ajustado com uma base de tempo de 20 ms/div, o que resultou em registros com mais de 21 ciclos. Os dados foram processados, sendo analisada a forma de onda da corrente de fuga total para posterior filtragem dos dados e cálculo da componente de 3ª ordem da corrente de fuga total. A seguir é apresentado o resultado referente a medições da corrente de fuga em um para-raios de 69 kV na SE MR da marca H, assim como o resultado da função filtro e o espectro de harmônicos da corrente de fuga total.

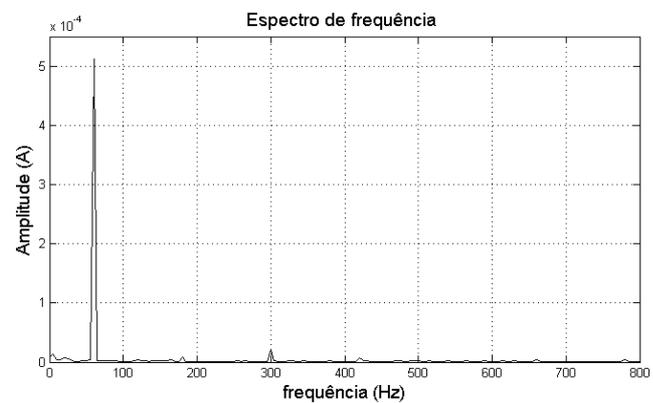
Na Figura 5.9 é possível verificar o comportamento da forma de onda da corrente total antes e após a aplicação do processo de filtragem do sinal adquirido em campo. Na Figura 5.10 é feita a apresentação detalhada da corrente de fuga total, sendo possível observar os pontos em azul dos dados medidos e a forma de onda filtrada em vermelho. Na Figura 5.11 é apresentado o espectro de frequência da corrente de fuga do para-raios apresentado na Figura 5.9, enquanto na Figura 5.12 é mostrada a tela do osciloscópio com a forma de onda da corrente de fuga total e as grandezas medidas. Corrente Eficaz ( $I_{RMS}$ ), Valor de pico positivo da corrente ( $I_{MAX}$ ), Valor de pico negativo da corrente ( $I_{MIN}$ ) e a Frequência.



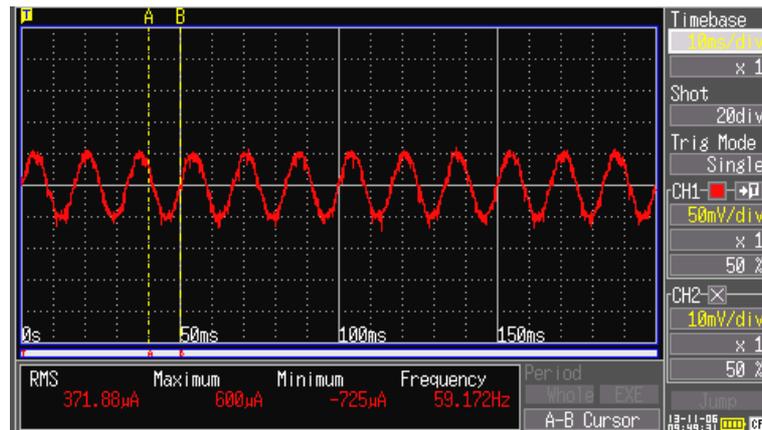
**Figura 5.9** - Ilustração do filtro de ruído da corrente de fuga total de um para-raios 69kV.



**Figura 5.10** - Detalhe ampliado do funcionamento do filtro de ruído leitura de um para-raios de 69kV.



**Figura 5.11** - Espectro de frequência da corrente de fuga total de um para-raios de 69kV após a utilização do filtro.

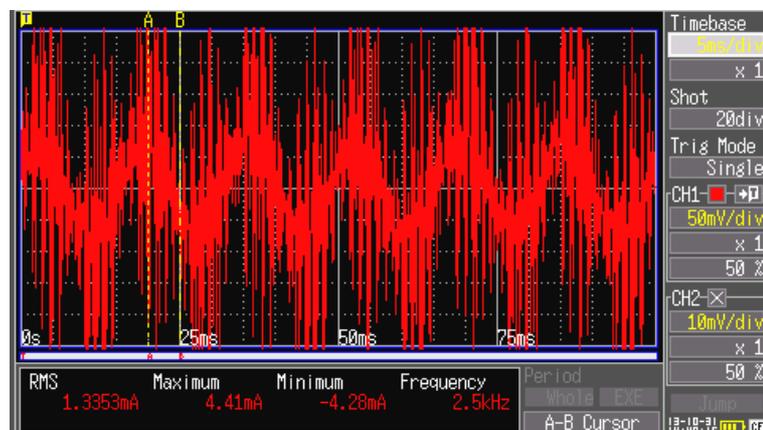


**Figura 5.12** - Tela do osciloscópio apresentado forma de onda da corrente de fuga total de um para-raios de 69kV.

Todas as formas de onda das correntes de fuga total obtidas em campo foram analisadas e apresentaram comportamento bastante semelhante ao da Figura 5.9 diferindo com respeito à amplitude e ao nível de ruído. Distorção indicativa de defeito como da Figura 5.4 (c) não foi observado. A exceção foram três para-raios de uma linha de 69 kV da SE JR, fabricante A e um para-raios de 69 kV da SE RC, fabricante M, apresentados abaixo.

### PARA-RAIOS SE RC 72T1C

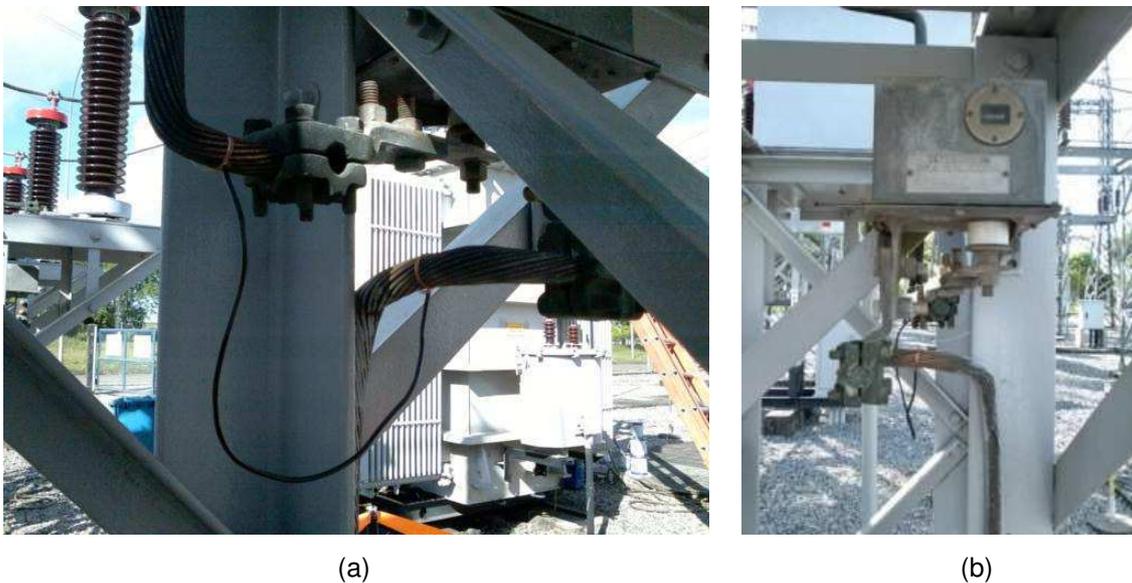
Foi verificada alta frequência (kHz) na oscilografia do para-raios conforme apresentado na Figura 5.13 e valores máximos e mínimos de correntes elevados.



**Figura 5.13** - Oscilografia de para-raios de 69 kV apresentando alta frequência.

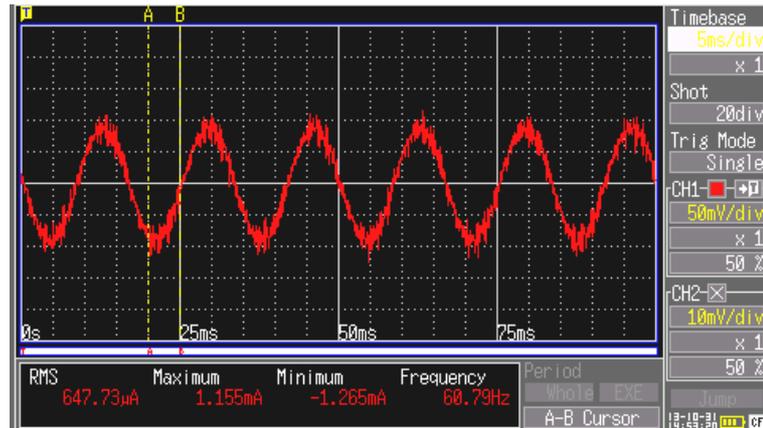
Em teste realizado com equipamento amplamente utilizado no mercado (LCM) que utiliza o método B2 da IEC 60099-5 (2000), o mesmo apresentou a mensagem de erro “altas frequências”. O resultado do teste corroborou com o indicado pelo osciloscópio. Uma inspeção termográfica foi realizada na busca de um possível aquecimento. Foi constatada a normalidade térmica do para-raios.

Na realização de uma nova leitura, em outra oportunidade, foi feito o *by-pass* do contador de operações. Conforme mostrado nas Figura 5.14(a) e (b).



**Figura 5.14** - (a) *By-pass* no contador de operações do para-raios vista lateral. (b) *By-pass* no contador de operações do para-raios vista frontal.

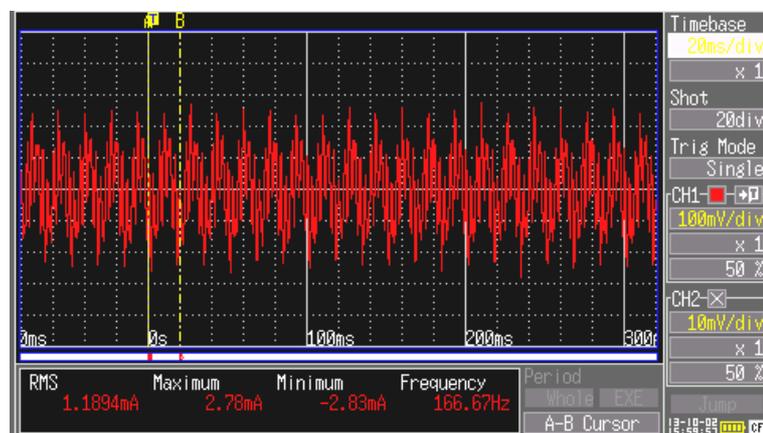
Após a realização da leitura a forma de onda da corrente de fuga total normalizou, a frequência e a amplitude da corrente apresentaram-se coerentes, conforme mostrado na Figura 5.15. Portanto, conclui-se que o contador apresentava algum defeito interno que estava impossibilitando as leituras por parte do instrumento.



**Figura 5.15** - Tela do osciloscópio apresentando a forma de onda da corrente de fuga total do para-raios RC72T1C e grandezas elétricas.

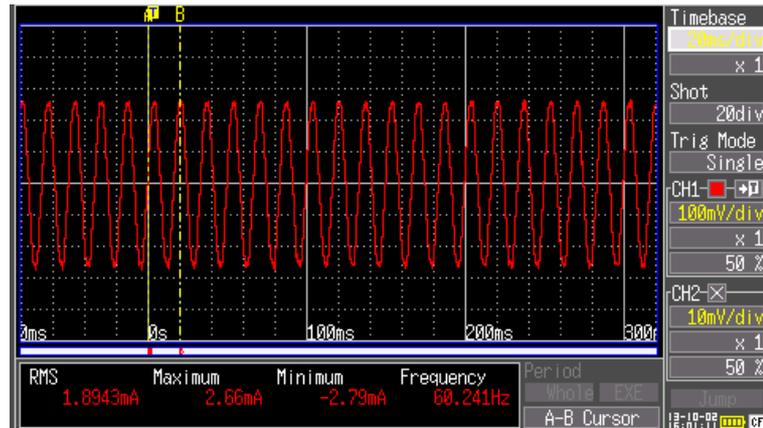
### PARA-RAIOS SE JR 72M9A, 72M9B E 72M9C

A oscilografia da corrente de fuga total do para-raios da fase A (JR72M9A) apresentou frequência anormal, como pode ser verificado na Figura 5.16.



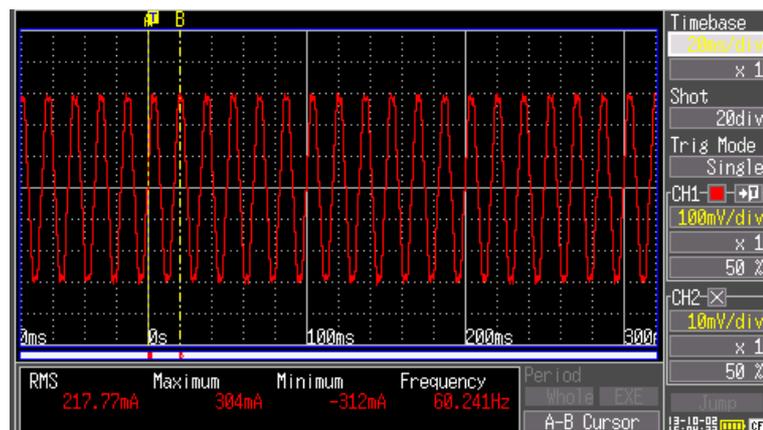
**Figura 5.16** – Forma de onda da corrente de fuga total do para-raios JR72M9A.

O para-raios da fase B, JR72M9B, apresentou frequência normal, forma de onda praticamente sem ruído, mas com elevado valor de corrente de fuga,  $I_{PICO}$  2,66 mA, conforme mostrado na Figura 5.17.



**Figura 5.17** -Forma de onda da corrente de fuga total do para-raios JR72M9B.

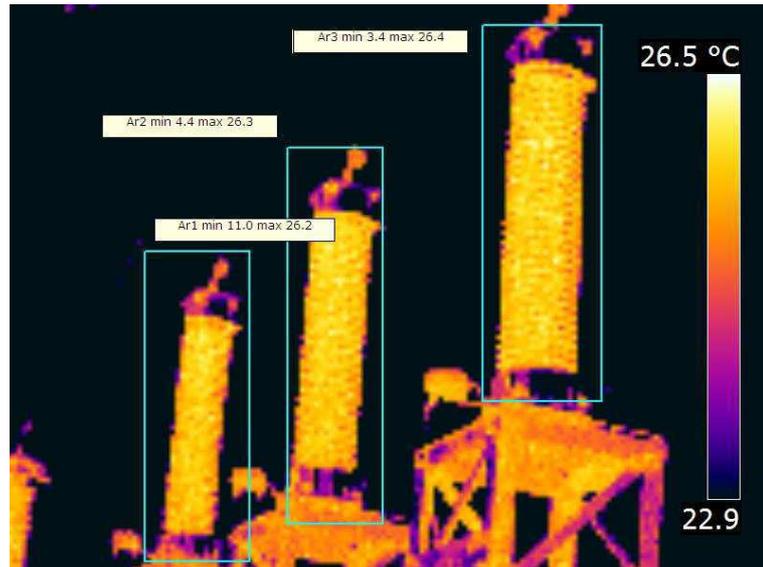
O para-raios da fase C, JR72M9C, assim como da fase B, apresentou frequência normal, mas com o valor da corrente de fuga total extremamente elevado (304 mA).



**Figura 5.18** - Forma de onda da corrente de fuga total do para-raios JR72M9C.

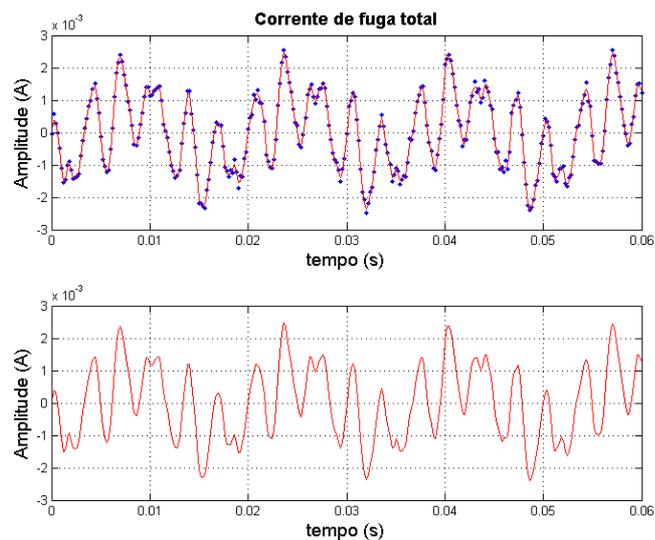
No para-raios da JR72M9A foi realizado o *by-pass* do contador de operação e nenhum efeito foi verificado. Foi realizada inspeção termográfica nas três unidades sem constatação de anormalidade térmica, conforme pode ser verificado na Figura 5.19. Em teste realizado com equipamento comercial (LCM) que utiliza o método B2 da IEC 60099-5 (2000), o mesmo apresentou as seguintes mensagens de erro quando da realização da medição:

- JR72M9A - “altas frequências”.
- JR72M9B e JR72M9C – “entrada alta” (indica que a entrada de corrente está com valor elevado).



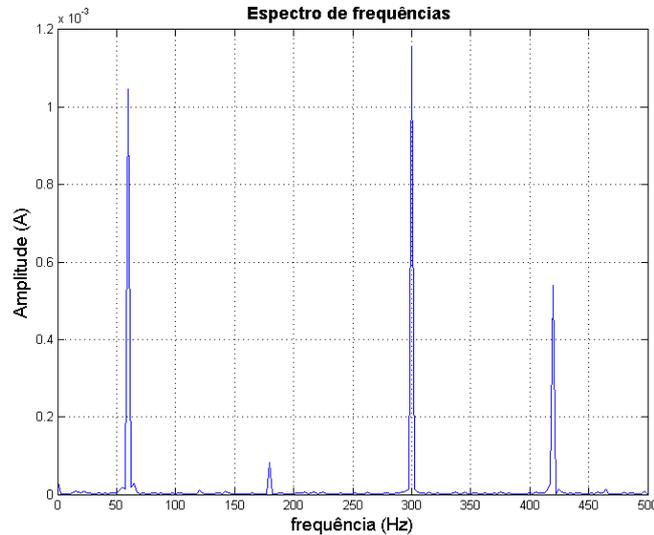
**Figura 5.19** - Termograma PR JR72M9.

A análise da forma de onda da corrente total do para-raios JR72M9A, Figura 5.20, com os dados analisados após a filtragem e em uma escala de tempo mais adequada, indicou a presença de uma onda periódica com frequência de 60 Hz sobreposta por outras de maior frequência.



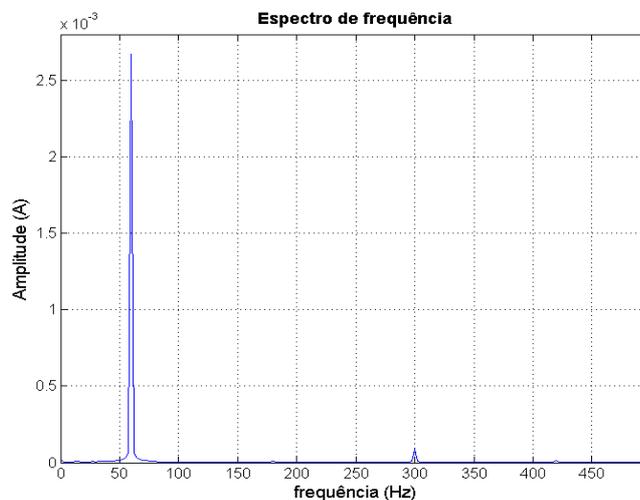
**Figura 5.20** - Corrente de fuga total do para-raios JR72M9A condicionada em programa.

Na Figura 5.21, é apresentado o espectro de frequência da corrente de fuga total do para-raios JR72M9A, apresentando um elevado conteúdo de componente de 5ª e 7ª ordem.

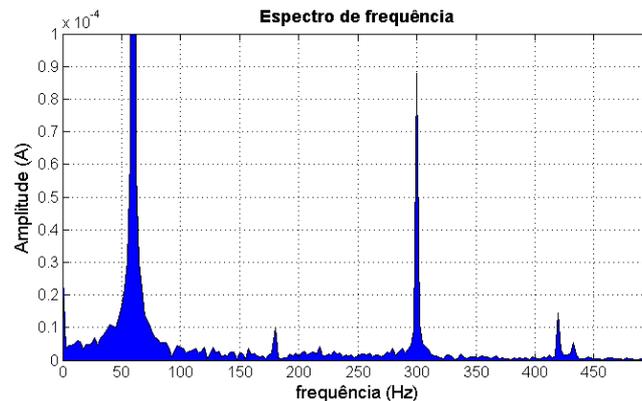


**Figura 5.21** – Espectro de frequência da corrente de fuga total do para-raios JR72M9A condicionada em programa.

O espectro de frequência para o para-raios JR72M9B é apresentado na Figura 5.22, enquanto na Figura 5.23 é mostrado em detalhes as componentes de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas. O para-raios JR72M9C tem comportamento semelhante ao PR JR72M9B. Na Tabela 5.5 são apresentados os valores de pico das componentes harmônicas obtidas para as correntes dos para-raios do terminal 02M9 da SE JR.



**Figura 5.22** - Espectro de frequência da corrente de fuga do total do para-raios JR72M9B.



**Figura 5.23** - Espectro de frequência da corrente de fuga do total do para-raios JR72M9B ampliado para observação das componentes de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas.

**Tabela 5.5** - Amplitude dos harmônicos de corrente dos para-raios do terminal 72M9 SE JR.

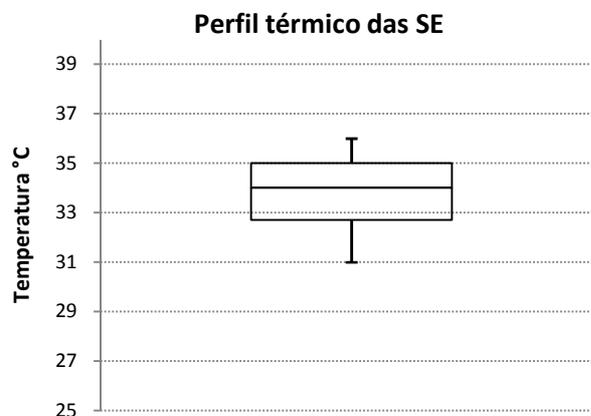
Para-raios	Harmônicos $I_{PICO}$ (A)		
	3ª ordem	5ª ordem	7ª ordem
JR72M9A	$82,32 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$0,54 \cdot 10^{-3}$
JR72M9B	$10,12 \cdot 10^{-6}$	$87,89 \cdot 10^{-6}$	$14,13 \cdot 10^{-6}$
JR72M9C	$7,62 \cdot 10^{-6}$	$16,61 \cdot 10^{-6}$	$2,69 \cdot 10^{-6}$

Com base nas medições e inspeções de campo realizadas nos para-raios do terminal da SE JR, constatou-se que não há poluição no invólucro, nem aquecimento nos PR, concluindo-se que as correntes elevadas das fases B e principalmente C não os percorrem e que a amplitude da harmônica de 3ª ordem tem valores dentro do aceitável. Porém a corrente da fase A apresenta distorção harmônica elevada, chegando a 5ª harmônica ultrapassar a amplitude da componente fundamental. Influência nas medições, problemas no aterramento dos para-raios e estruturas metálicas suporte, assim como, problemas nos pequenos isoladores suporte de pedestal da base dos para-raios podem ser a causa desta anomalia. Até a conclusão deste estudo, não foi possível determinar a causa fim do comportamento apresentado na forma de onda dos para-raios da SE JR, necessitando de uma intervenção com desligamento do terminal para uma melhor avaliação.

#### 5.2.4. Análise estatística dos dados

As componentes de 3ª ordem da corrente de fuga total obtidas das leituras realizadas em campo e agrupadas por tipo/modelo foram divididas em subgrupos por tempo de operação. Em alguns modelos foi possível contemplar faixas de tempo de operação (entre 0 e 10 anos, 10 e 20 anos, e acima de 20 anos), sendo possível obter uma distribuição de probabilidade que representa o comportamento da vida de determinado tipo/modelo. Quando as amostras não contemplam todas as fases da vida do equipamento a distribuição de probabilidade representa o comportamento esperado para aquele tempo de operação. Outro ponto importante a ser observado na análise é o comportamento da temperatura ambiente e da tensão nas barras encontrados nas subestações. Ao se realizar medições em campo, a norma IEC 60099-5 (2000) prevê que as grandezas temperatura e tensão aplicada ao para-raios sejam corrigidas para referência de 0,7 da tensão nominal e 20° C. Então foi realizado um levantamento do comportamento estatístico da temperatura e tensões ao longo das medições.

O perfil de temperatura observado durante as medições em campo é apresentado na Figura 5.24 e a estatística descritiva dos dados na Tabela 5.6. Para as tensões registradas nas barras das subestações os dados são apresentados na Tabela 5.7. Em ambos os casos, o desvio padrão indica pouca variação na temperatura e na tensão das barras.



**Figura 5.24** - Perfil térmico das SE durante as medições da corrente de fuga total.

**Tabela 5.6** – Estatística descritiva da temperatura nas SE durante as medições da corrente de fuga.

<b>Medidas</b>	<b>Valores (°C)</b>
Média	33,76
Mediana	34,00
Desvio padrão	1,81
Variância da amostra	3,26
Mínimo	31,00
Máximo	36,00

**Tabela 5.7** - Estatística descritiva das tensões registradas durante as medições nas SE.

<b>Medidas</b>	<b>Barra 230 (kV)</b>	<b>Barra 69 (kV)</b>
Média	233,04	70,17
Mediana	232	70
Desvio padrão	2,85	0,45
Variância da amostra	8,17	0,20
Intervalo	13	2,47
Mínimo	226	69,13
Máximo	239	71,6
Número de medições	83	179

As amostras são analisadas de forma comparativa, sendo os valores considerados como referência as médias da temperatura e tensões observadas durante as medições. As correções dos valores das harmônicas de 3ª ordem da corrente de fuga total com relação às médias de tensão e temperatura, por serem pouco significativas, também serão desconsideradas, fazendo parte das incertezas associadas à metodologia proposta, assim como as incertezas do processo relativas às harmônicas da tensão.

Nos resultados apresentados a seguir, será mostrado o teste de aderência dos dados com o valor do  $R^2$ , a estatística descritiva dos dados, a distribuição de probabilidade para as medidas obtidas e o *box-plot* dos dados.

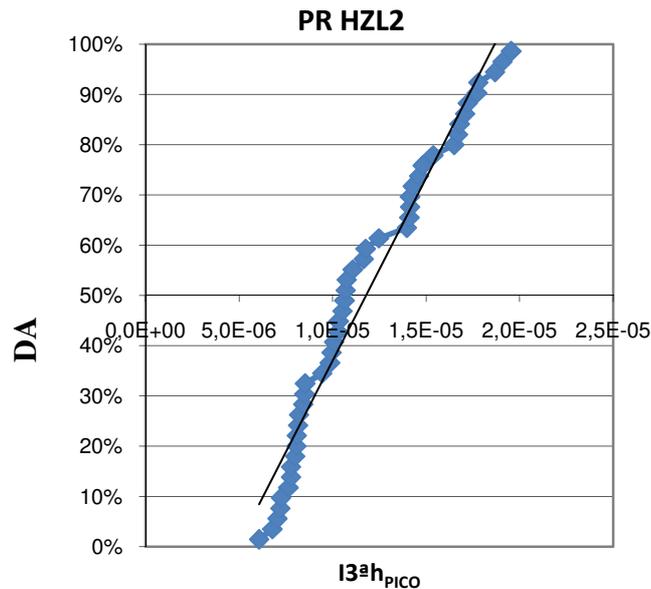
**PARA-RAIOS HZL2 (69kV)**

A Tabela 5.8 apresenta a estatística descritiva com os valores de pico das componentes de 3ª ordem da corrente de fuga total (I3ªh) para os PR HZL2, dividida em grupos com base no tempo de operação. O número de leituras de cada amostra (por grupo de idade) também é apresentada.

**Tabela 5.8** - Estatística descritiva I3ªh dos dados medidos para o PR HZL2 (valores de pico).

<b>Medidas</b>	<b>PR 8 anos</b>	<b>PR 15 anos</b>	<b>PR 28 anos</b>	<b>Todos PR</b>
Média	8,58E-06	9,59E-06	1,61E-05	1,18E-05
Mediana	8,33E-06	9,66E-06	1,66E-05	1,07E-05
Desvio padrão	1,56E-06	1,97E-06	2,11E-06	3,90E-06
Variância da amostra	2,44E-12	3,89E-12	4,46E-12	1,52E-11
Intervalo	4,68E-06	7,09E-06	7,89E-06	1,35E-05
Mínimo	6,07E-06	7,06E-06	1,17E-05	6,07E-06
Máximo	1,07E-05	1,42E-05	1,96E-05	1,96E-05
Número de medições	12	18	18	48

A aderência dos dados à distribuição normal em todos os grupos de idade forneceram  $R^2$  acima de 93% usando a técnica da regressão linear. A Figura 5.25 apresenta a regressão para todas as 48 leituras referentes ao modelo PR HZL2, com o eixo vertical apresentado a Distribuição Acumulada (DA) dos dados e o eixo horizontal o valor de pico da componente de 3ª ordem da corrente total. Na Tabela 5.9 têm-se os valores das variáveis da regressão.

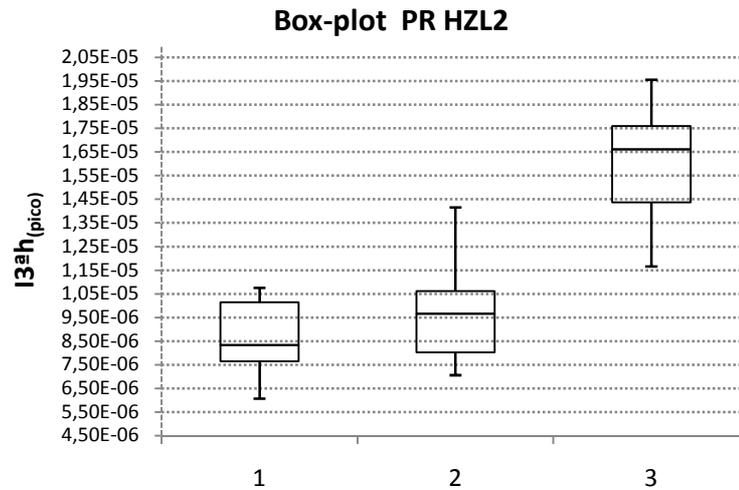


**Figura 5.25** - Gráfico da regressão linear PR HZL2.

**Tabela 5.9** – Parâmetros estatísticos da regressão PR HZL2.

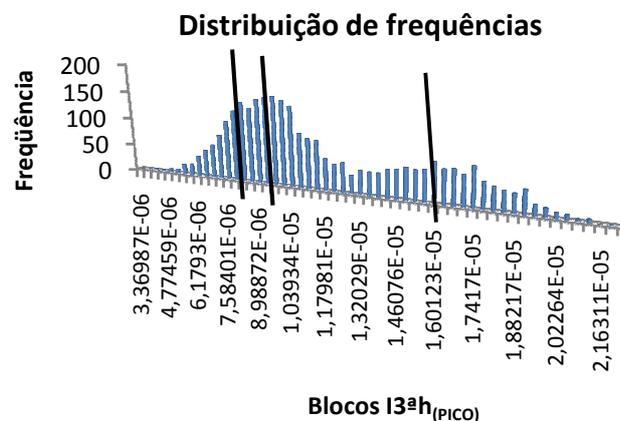
<b>Medidas</b>	<b>Valores</b>
SQ Regressão	3,7812
SQ Resíduo	0,1511
SQ Total	3,9324
R-Quadrado	0,9615
Coeficiente interseção ( $\beta_0$ )	-0,3564
Coeficiente angular ( $\beta_1$ )	72666,89

Na Figura 5.26 é apresentado o diagrama de caixas, *box-plot*, com os 03 grupos de dados divididos por idade do PR modelo HZL2. Na Coluna 1 amostras do PR de 8 anos, na Coluna 2 do PR de 15 anos e na Coluna 3 do PR de 28 anos. Não foi verificado pontos *outliers*, indicando uma boa consistência nos dados. O intervalo interquartil entre os dados da Coluna 1 e 2 são parecidos, porém para os dados da Coluna 3 a um incremento indicando aumento da variância dos dados. Outra medida verificada é a mediana, sendo possível observar o aumento proporcional da Coluna 1 para Coluna 2 e um grande incremento para Coluna 3.



**Figura 5.26** – Box-plot  $I_{3^a h}$  PR HZL2, 1-PR 8 anos, 2-PR 15 anos e 3 - PR 28 anos.

Foram gerados 1000 números aleatórios, com os parâmetros da distribuição normal, de cada grupo (idade) de dados do PR modelo HZL2 apresentados na Tabela 5.8. Com os 3000 pontos obtidos (1000 para cada grupo), foi traçada a distribuição apresentada na Figura 5.27, sendo possível identificar duas distribuições próximas PR de 8 e 15 anos e uma outra PR de 28 anos. Os traços em preto indicam a posição da média em ordem crescente para os PR de 8, 15 e 28 anos, respectivamente.



**Figura 5.27** -Distribuição de frequência das três faixas de tempo de operação PR HZL2.

O PR modelo HZL2 apresentou valores da componente de 3ª ordem da corrente de fuga total, coerentes com os resultados obtidos em laboratório para o para-raios de mesmo modelo. No *box-plot* é possível ver de forma comparativa o aumento da mediana e da dispersão à medida que o PR envelhece, assim como no gráfico da distribuição de frequência pelo deslocamento da distribuição, aumento da média, e aumento da variância dos dados. O  $R^2$  obtido indica boa aderência dos dados à distribuição normal, sendo possível avaliar com boa aproximação o envelhecimento do PR pela análise da corrente de fuga. A indicação do estado de degradação do PR para condição suspeita é dada pelo critério da média mais um desvio ( $1,57E-05 A_{PICO}$ ), e defeituoso, média mais dois desvios ( $1,96E-05 A_{PICO}$ ). O desgaste da condição operacional do PR se torna bastante evidente na amostra com mais de 20 anos, indicando a condição suspeita para a maioria dos PR desta faixa de idade.

### **PARA-RAIOS SE202 (69kV)**

A Tabela 5.10 apresenta os parâmetros da estatística descritiva do PR SE202 para duas amostras de dados. Uma delas para PR de até 11 anos e outra com PR de 24 anos. A Figura 5.28 apresenta a regressão para todas as medições (contagem 36) da amostra referente ao PR SE202. Na Tabela 5.11 têm-se os valores das variáveis da regressão.

**Tabela 5.10** - Estatística descritiva I3ªh dos dados medidos para o PR SE202 (valores de pico).

<b>Medidas</b>	<b>PR 11 anos</b>	<b>PR 24 anos</b>	<b>Todos PR</b>
Média	2,64E-05	3,33E-05	2,98E-05
Mediana	2,61E-05	3,33E-05	2,92E-05
Desvio padrão	1,9E-06	2,55E-06	4,12E-06
Variância da amostra	3,61E-12	6,49E-12	1,70E-11
Intervalo	6,63E-06	9,96E-06	1,35E-05
Mínimo	2,32E-05	2,67E-05	2,32E-06
Máximo	2,98E-05	3,67E-05	3,67E-05
Número de medições	18	18	36

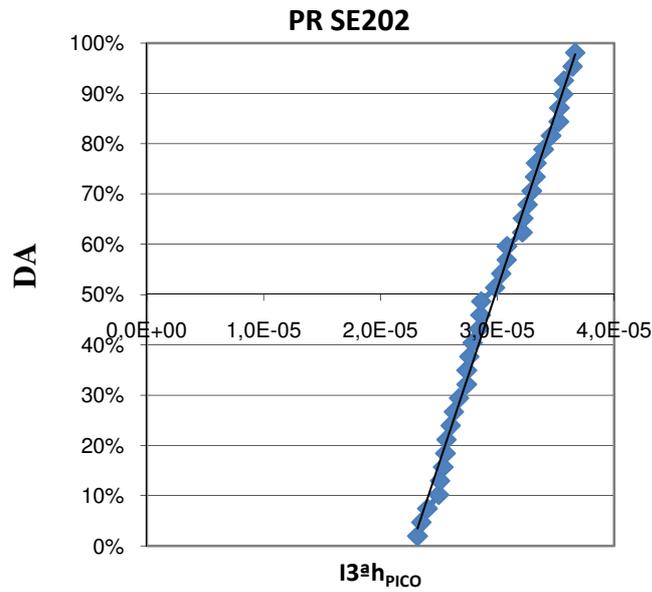
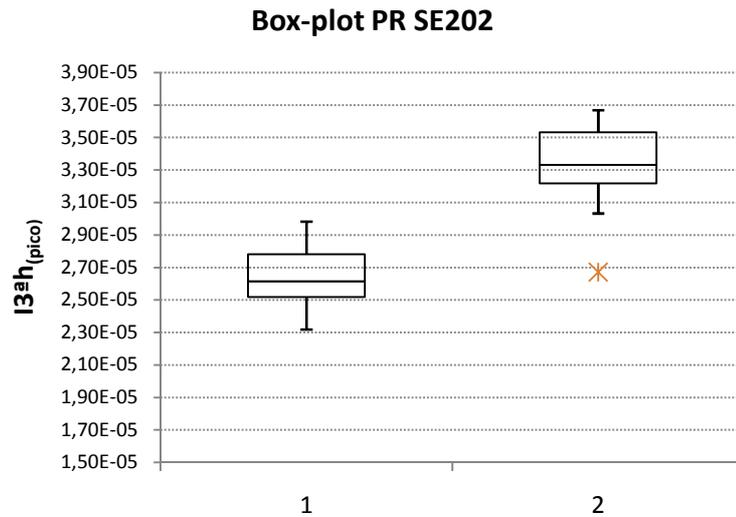


Figura 5.28 - Gráfico da regressão linear PR SE202.

Tabela 5.11 - Parâmetros estatísticos da regressão PR SE202.

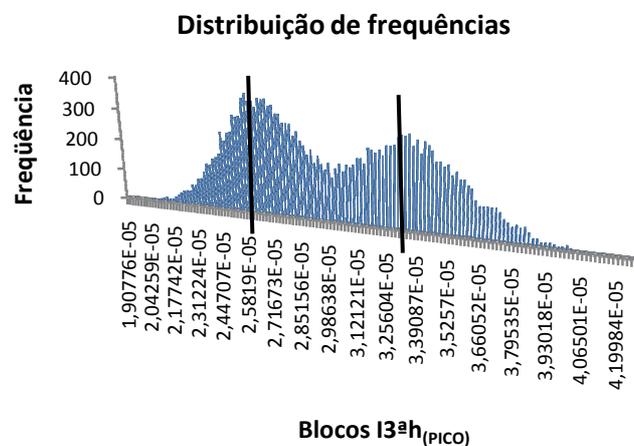
<b>Medidas</b>	<b>Valores</b>
SQ Regressão	2,9074
SQ Resíduo	0,0248
SQ Total	2,9322
R-Quadrado	0,9915
Coeficiente interseção ( $\beta_0$ )	-1,5861
Coeficiente angular ( $\beta_1$ )	69895,89

Na Figura 5.29 é apresentado o diagrama de caixas, *box-plot*, com os dois grupos de dados do PR SE202. Na Coluna 1 amostras do PR com 11 anos e na Coluna 2 PR com 24 anos. A amostra da Coluna 2 apresenta um ponto *outlier* inferior, este ponto atípico, corresponde a uma medição da corrente que ultrapassou o valor da BI (Barreira inferior 27,5  $\mu\text{A}_{\text{PICO}}$ ) em apenas 0,77  $\mu\text{A}_{\text{PICO}}$ .



**Figura 5.29** – *Box-plot*  $I_{3^a h}$  PR SE202, 1-PR 11 anos, 2-PR 24 anos.

Foram gerados 1000 números aleatórios com os parâmetros da distribuição normal de cada amostra do PR modelo SE202 apresentados na Tabela 5.10. Com os pontos obtidos, foi traçada a distribuição apresentada na Figura 5.30 sendo possível identificar duas distribuições uma para o PR de até 11 anos e outra para o PR de 24 anos. Traços em preto indicam a localização da média de cada distribuição em ordem crescente, PR mais novos e mais velhos respectivamente. Analisando comparativamente as duas distribuições, pode-se perceber o deslocamento da média e o aumento da variância para a amostra de PR mais velhos.



**Figura 5.30** -Distribuição de frequência das duas faixas de tempo de operação PR SE202.

No *box-plot* é possível ver de forma comparativa o aumento da mediana e da variância à medida que o PR SE202 envelhece, assim como, no gráfico da distribuição de frequência obtido a partir dos parâmetros calculados. O  $R^2$  de 0,9915 indica excelente aderência dos dados à distribuição normal, sendo possível verificar com boa aproximação, pelo critério da média mais um desvio ( $3,39E-05 A_{PICO}$ ), a condição suspeita dos PR mais velhos.

### **PARA-RAIOS HZL4 (230kV)**

A estatística descritiva dos dados obtidos das medições em campo referente à 3ª harmônica da corrente de fuga total para este modelo de para-raios encontra-se na Tabela 5.12, com equipamentos de 10 e 15 anos de operação. As médias apresentam valores semelhantes, mas o desvio padrão valores bastante diferentes.

**Tabela 5.12** – Estatística descritiva I3ªh dos dados medidos para o PR HZL4 (valores de pico).

<b>Medidas</b>	<b>PR 10 anos</b>	<b>PR 15 anos</b>	<b>Todos PR</b>
Média	2,17E-05	2,14E-05	2,13E-05
Mediana	2,18E-05	2,18E-05	2,18E-05
Desvio padrão	1,93E-06	4,11E-06	3,50E-06
Variância da amostra	3,71E-12	1,69E-12	1,22E-11
Intervalo	6,48E-06	1,53E-05	1,53E-05
Mínimo	1,79E-05	1,28E-05	1,28E-06
Máximo	2,48E-05	2,81E-05	2,81E-05
Número de medições	8	18	26

A Figura 5.31 apresenta a regressão para todos os dados da amostra referente ao PR HZL4. Na Tabela 5.13 são mostrados os valores das variáveis da regressão.

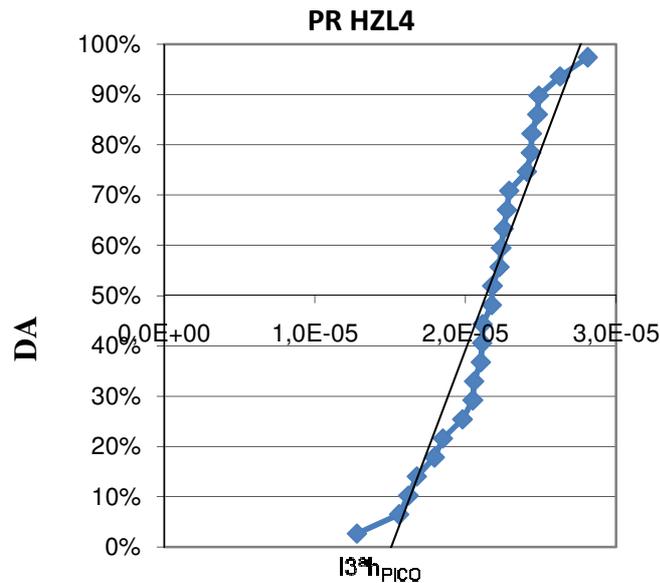


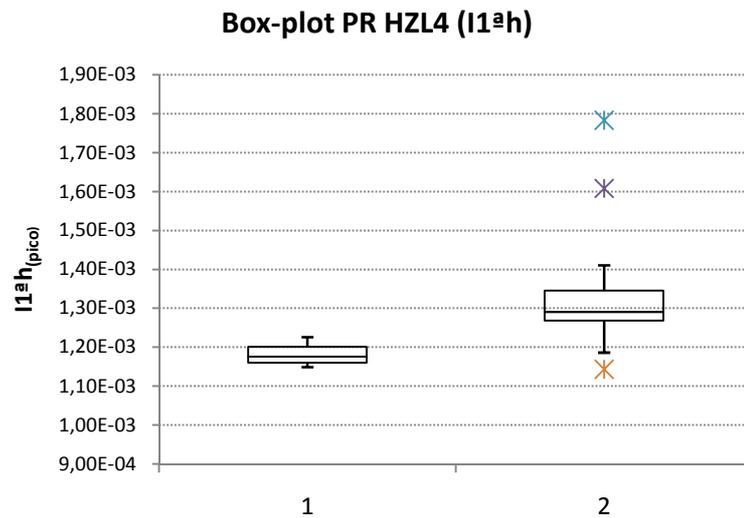
Figura 5.31 – Gráfico da regressão linear PR HZL2.

Tabela 5.13 – Parâmetros estatísticos da regressão PR HZL2.

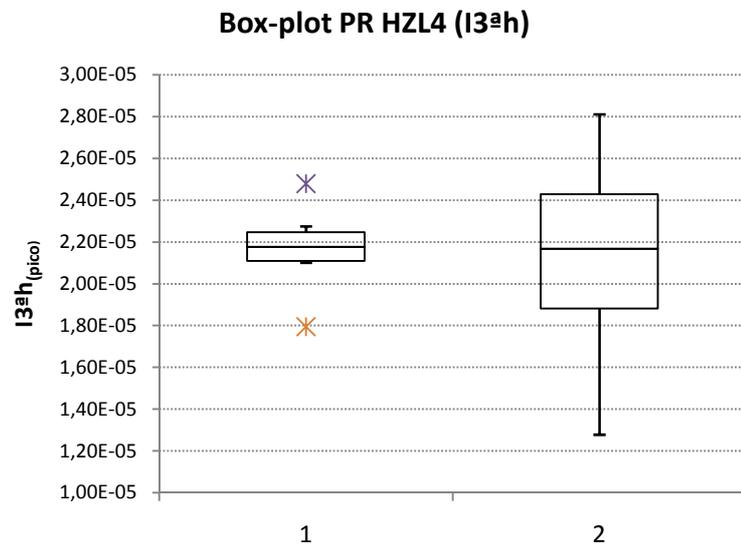
<b>Medidas</b>	<b>Valores</b>
SQ Regressão	1,9322
SQ Resíduo	0,1661
SQ Total	2,0984
R-Quadrado	0,9208
Coefficiente interseção ( $\beta_0$ )	-1,1973
Coefficiente angular ( $\beta_1$ )	79506,81

A componente de primeira harmônica representa em condições normais aproximadamente o valor pico da corrente de fuga total, na Figura 5.32 é apresentado o box-plot desta componente para as duas amostras analisadas, sendo possível verificar o deslocamento aproximado de 0,1 mA entre a amostra da Coluna 1 (PR 10 anos) e da Coluna 2 (PR 15 anos), os valores *outlier* para os dados da Coluna 2 são devido à variação na medição em campo. Na Figura 5.33 é apresentado o *box-plot* da componente de 3ª ordem, com a Coluna 1 composta pelos PR de 10 anos e a Coluna 2 pelos PR de 15 anos. As duas amostras apresentam valor da mediana semelhante, porém, na amostra da Coluna 2, a maior variação na amplitude dos dados observada pelo intervalo interquartil, indica um

maior desgaste na condição operacional de alguns PR. A relação percentual de  $I3^{\text{a}}h/I1^{\text{a}}h$  minimiza uma possível influência na variação da tensão aplicada (LIRA, 2012). Para este modelo a relação apresentou valores de 1,27% a 2,02%, indicando pelo critério  $\mu+\sigma$  que PR está em boas condições.



**Figura 5.32** – Box-plot  $I1^{\text{a}}h$  PR HZL4, 1-PR 10 anos, 2-PR 15 anos.



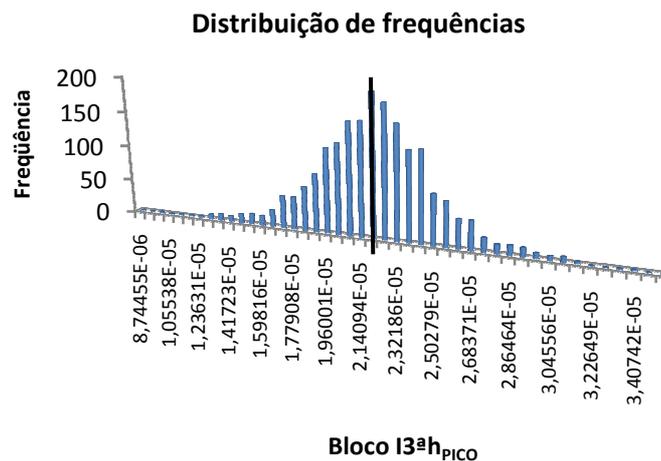
**Figura 5.33** – Box-plot  $I3^{\text{a}}h$  PR HZL4, 1-PR 10 anos, 2-PR 15 anos.

Observando ainda a Figura 5.32 e Figura 5.33 de forma comparativa é possível perceber o maior crescimento proporcional da  $I3^{\text{a}}h$  do PR mais novo

quando comparado com o mais velho, já que a mediana de sua componente de I1<sup>ª</sup>h é menor. Como a condição de poluição das porcelanas das duas amostras de PR mais velho e mais novo eram boas, há a suspeita de que exista uma pequena componente harmônica na tensão da SE dos PR mais novos que aproxime a média das duas distribuições (10 e 15 anos) ou alguns dos PR apresentam desgastes diferentes.

. A dispersão maior dos dados referente ao PR mais velho é esperada em função da sua vida útil. A I3<sup>ª</sup>h do PR novo assim como o da I1<sup>ª</sup>h apresenta baixa dispersão. A análise relativa das componentes de 1<sup>ª</sup> e 3<sup>ª</sup> ordem da corrente de fuga total juntamente com os demais dados estatísticos possibilitam uma análise mais detalhada das medições, do comportamento da corrente de 3<sup>ª</sup> ordem e da influência da tensão aplicada.

Foram gerados um total de 2000 números aleatórios para as amostras dos parâmetros da distribuição normal do PR HZL4 apresentados na Tabela 5.12, sendo 1000 para cada faixa de tempo de operação. Com os pontos obtidos, foi traçada a distribuição apresentada na Figura 5.34, onde é possível observar que as duas distribuições se sobrepõem em função da semelhança entre as médias.



**Figura 5.34** - Distribuição de frequência das duas faixas de tempo de operação PR HZL4.

### **PARA-RAIOS S314 (230kV)**

Para este tipo de PR, foi possível selecionar unidades com tempo de operação de 9 e 16 anos. A estatística descritiva para os dados levantados da componente de 3ª harmônica da corrente de fuga total (valores de pico) são apresentados na Tabela 5.14.

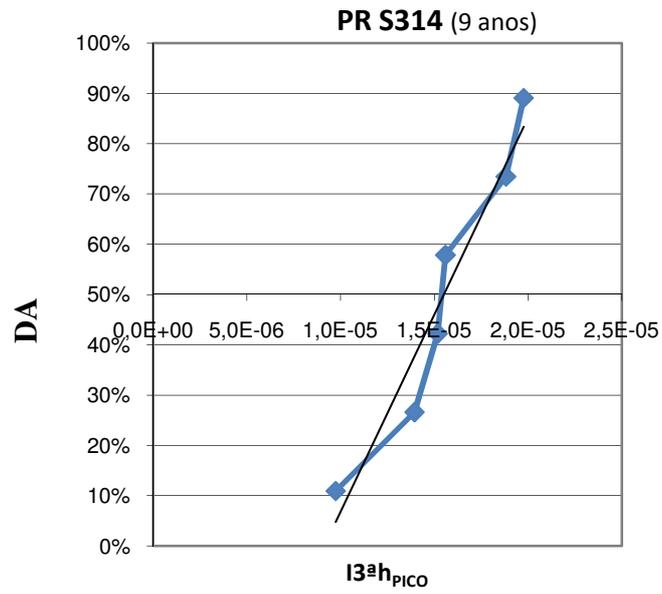
**Tabela 5.14** - Estatística descritiva I3ªh dos dados medidos para o PR S314 (valores de pico).

<b>Medidas</b>	<b>PR 9 anos</b>	<b>PR 16 anos</b>	<b>Todos PR</b>
Média	1,55E-05	4,79E-05	3,98E-05
Mediana	1,54E-06	4,76E-05	4,54E-05
Desvio padrão	3,60E-06	4,96E-06	1,50E-05
Variância da amostra	1,30E-11	2,45E-11	2,27E-10
Intervalo	1,00E-05	1,57E-05	4,58E-05
Mínimo	9,74E-06	3,98E-05	9,74E-06
Máximo	1,98E-05	5,51E-05	5,55E-05
Número de medições	6	18	24

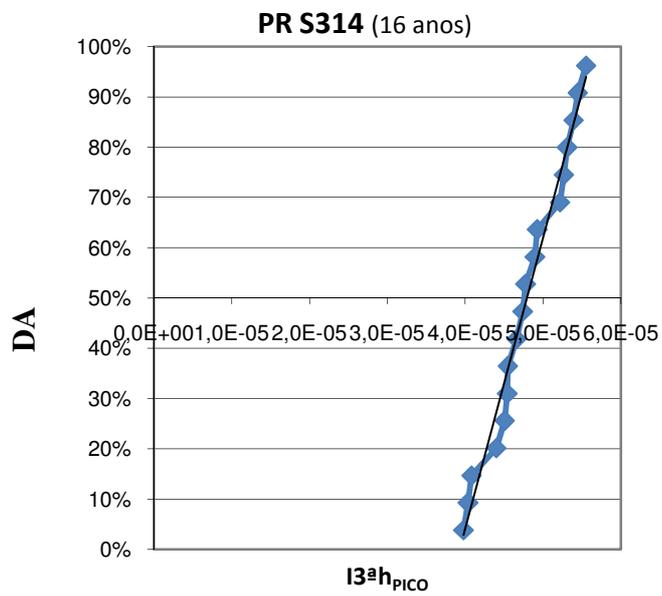
Os valores encontrados mostram uma grande diferença entre o PR mais novo e o mais velho. A regressão para a distribuição de probabilidade normal do PR mais novo, Figura 5.35, e mais velho, Figura 5.36, foi boa, porém, a regressão para todos os dados foi apenas regular, Figura 5.37, indicando o deslocamento entre as duas distribuições. Na Tabela 5.15 é apresentado o valor do  $R^2$  de cada regressão.

**Tabela 5.15** - Valores do  $R^2$  para regressão PR S314.

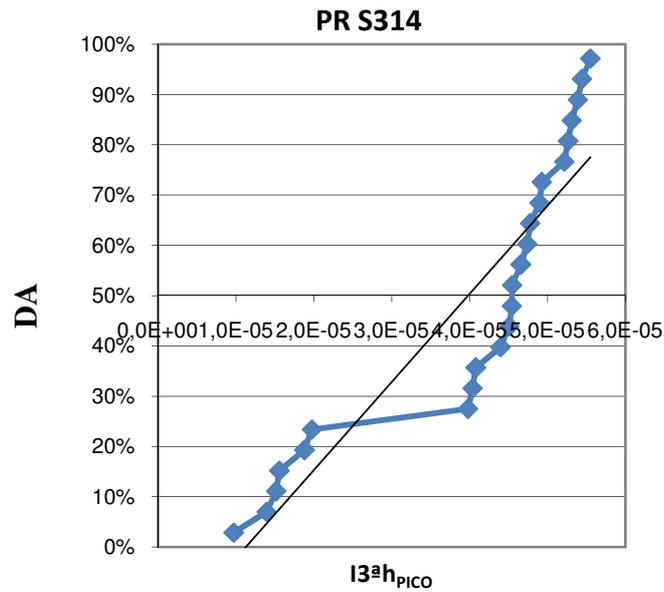
<b>Medidas</b>	<b>PR 9 anos</b>	<b>PR 16 anos</b>	<b>Todos PR</b>
R-Quadrado	0,9348	0,9801	0,8285



**Figura 5.35** - Gráfico da regressão linear PR S314 (9 anos).

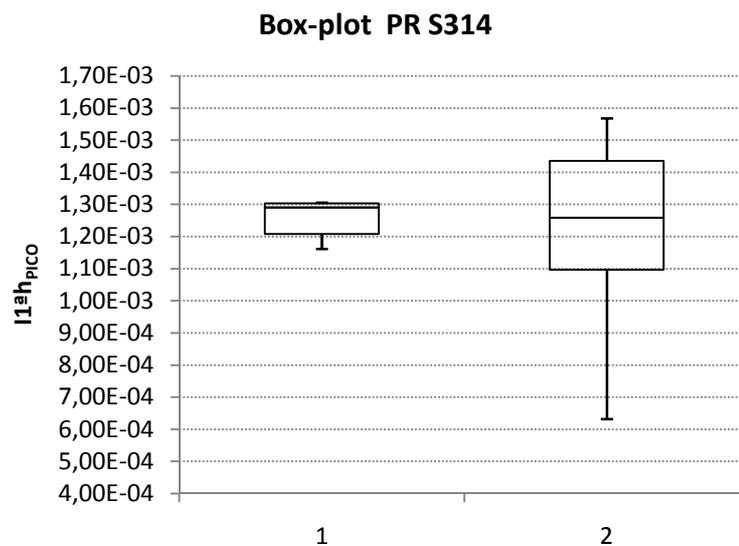


**Figura 5.36** - Gráfico da regressão linear PR S314 (16 anos).

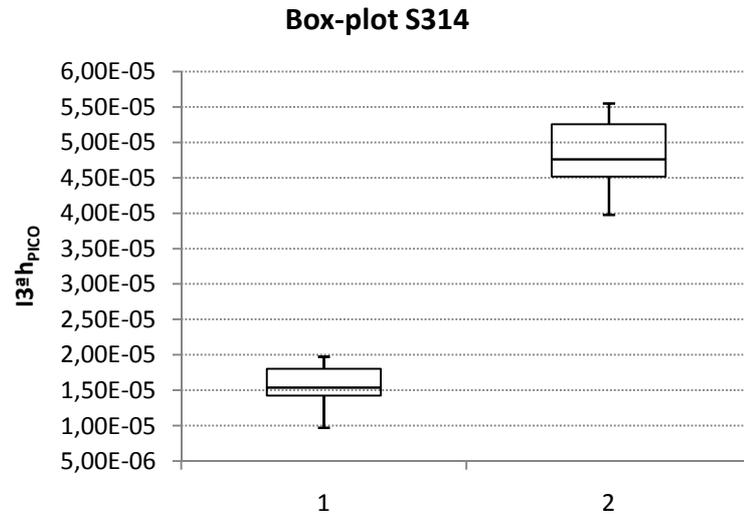


**Figura 5.37** - Gráfico da regressão linear PR S314 (9 e 16 anos).

Nos box-plots apresentados nas Figura 5.38, Figura 5.39 e Figura 5.40 a Coluna 1 refere-se a PR com tempos de operação de 9 anos e a Coluna 2 de 16 anos. O box-plot da Figura 5.38 apresenta o comportamento da harmônica fundamental, a Figura 5.39 da componente de 3ª harmônica e a Figura 5.40 a relação entre a componente de 3ª harmônica e a fundamental.

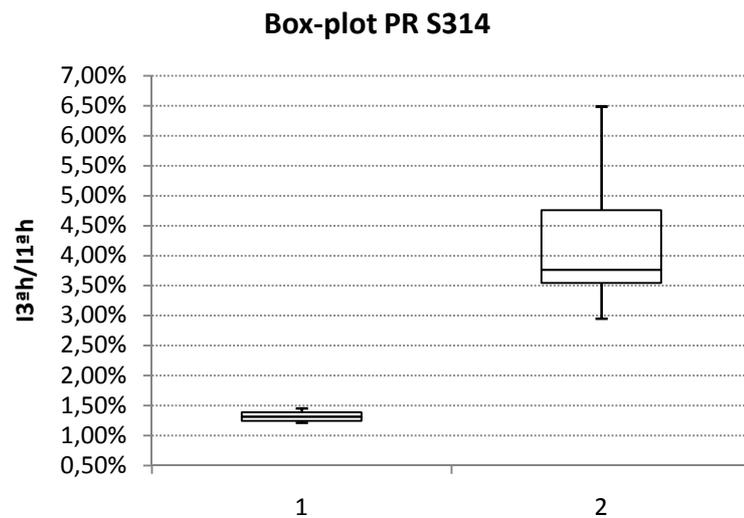


**Figura 5.38** – Box-plot I1ªh PR S314, 1-PR 9 anos, 2-PR 16 anos.



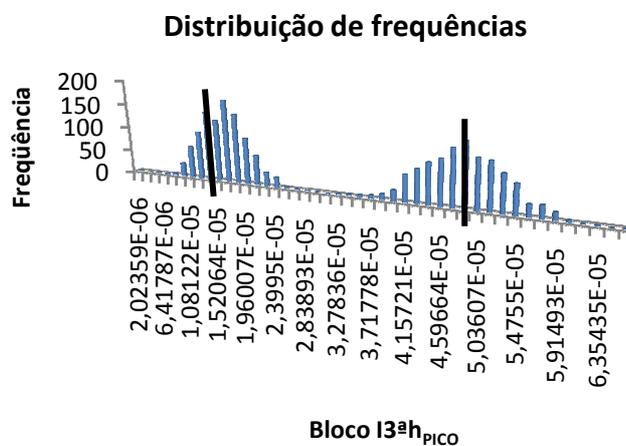
**Figura 5.39** – Box-plot  $I3^{ah}$  PR S314, 1-PR 9 anos, 2-PR 16 anos.

Pela análise do diagrama de caixas da Figura 5.38 verifica-se que a componente fundamental não apresenta sensibilidade efetiva a redução da vida útil do PR, já a componente de 3ª harmônica apresenta variação indicando uma degradação do PR mais velho, uma vez que no sistema de qualimetria da Chesf não se verificou indicação de distorção harmônica.



**Figura 5.40** – Box-plot  $I3^{ah}/I1^{ah}$  PR S314, 1-PR 9 anos, 2-PR 16 anos.

Analisando a distribuição de frequência, Figura 5.41, gerada de 2000 pontos, com base nos dados da Tabela 5.14, sendo 1000 pontos referente à distribuição do para-raios de 9 anos e 1000 da distribuição do para-raios de 16 anos, pode-se verificar o deslocamento entra a distribuição da amostra do PR mais novo e a do PR mais velho em função do aumento da média indicada por traços pretos. Pelo critério de avaliação estabelecido como base na média mais um desvio ( $\mu + \sigma = 5,48E-5$  A), o PR mais velho, chega próximo, mais não entra na condição suspeita.



**Figura 5.41** - Distribuição de frequência das duas faixas de tempo de operação PR S314.

O desgaste dos para-raios foi avaliado nos casos apresentados acima de forma comparativa através dos diagramas de caixa (box-plot). Valores da componente fundamental, juntamente com a componente de 3ª ordem, e a relação entre eles também foram apresentados. Parâmetros de degradação do para-raios com base na média e no desvio padrão também foram discutidos.

Para os modelos avaliados pode-se verificar a expectativa de vida útil dos para-raios, apresentando de forma geral desempenho operacional até os 20 anos. Para os equipamentos avaliados com idades superiores há 20 anos foi possível perceber um aumento considerável na amplitude de 3ª harmônica. Portanto, mostrou-se neste trabalho que é possível realizar o monitoramento de para-raios em campo de forma mais confiável, empregando um arranjo de medição mais simplificado apenas com a medição da corrente de fuga.

# Capítulo 6

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para acompanhamento do estado operacional de para-raios com base na análise da forma de onda e da componente de 3ª ordem da corrente de fuga total.

O trabalho avaliou diversos para-raios de níveis de tensão de 69 kV e 230kV alocados em subestações e sob condições operacionais diferentes.

Os para-raios basicamente foram selecionados tomando como referência o tipo/modelo e o tempo de operação de forma a possibilitar a avaliação da degradação ou envelhecimento do para-raios com base na corrente de fuga.

Uma análise das técnicas de monitoramento comumente apresentadas na literatura e empregadas pelos fabricantes e concessionárias de energia foi realizada com o objetivo de determinar vantagens e desvantagens técnicas, práticas e econômicas de cada uma. Após um estudo preliminar resolveu-se empregar a análise harmônica da corrente de fuga total, mais especificamente a componente harmônica de 3ª ordem como parâmetro para avaliar o nível de degradação dos para-raios.

Antes do início da aquisição dos dados foram realizados experimentos no LAT da UFCG, sob condições controladas, visando entender o comportamento da corrente de fuga, a influência do invólucro poluído nas medições, do harmônico da tensão, assim como, validar os instrumentos que seriam utilizados nas medições de campo.

A ferramenta de análise do sinal adquirido foi apresentada, na qual utiliza a média móvel para filtrar os ruídos de alta frequência indesejados e a FFT para obter o espectro de frequência do sinal. Os dados obtidos nos experimentos do LAT foram utilizados para validar a metodologia e fornecer um valor de referência para a componente de 3ª harmônica.

As incertezas inerentes ao método de medição como interferências eletromagnéticas no momento da medição e as variáveis que influem no resultado do valor da componente harmônica da corrente, os quais sejam, temperatura, tensão

e harmônicos da tensão da rede foram discutidos e as considerações feitas analisadas. A grande incerteza do método, ligado à distorção harmônicas da tensão aplicada ao para-raios, foi avaliada com base nos valores típicos que ocorrem na alta-tensão, sendo apresentada referência bibliográfica indicando valores tipicamente baixos e a qualimetria existente na empresa Chesf. Em muitos casos foi possível, com a qualimetria, além de verificar o nível de distorção harmônica total, verificar o próprio espectro de frequência da tensão.

A metodologia de análise estatística dos dados adotada foi apresentada, sendo explicados os parâmetros mais comuns da estatística descritiva, o método de regressão e o diagrama de caixas utilizado na apresentação dos dados.

Durante as medições em campo foram identificados, pela forma de onda, problemas relativos a altas frequências e amplitudes elevadas da corrente de fuga total, assim como, observar o ruído no sinal adquirido. Solução para os problemas identificados foram discutidos, sendo possível, em um dos casos, apresentar o resultado da correção, que estava relacionada à alta impedância no circuito do contador de operações.

Na análise estatística dos dados, as correções relativas à tensão aplicada e à temperatura não foram aplicadas. O método comparativo adotado na avaliação, indiretamente minimizava o fato, sendo considerado o erro sistemático destas influências, aceitável.

Foram apresentados resultados de diferentes tipo/modelos de para-raios com três e duas faixas de tempos de operação distintas. Nestes casos, foi possível determinar e avaliar os parâmetros e a aderência dos dados à distribuição de probabilidade normal. Os resultados apresentaram bons valores para o  $R^2$ . Um dos modelos monitorados em campo é de mesmo tipo/modelo do para-raios ensaiado em laboratório, sendo encontrados valores muito próximos para a amplitude da componente de 3ª harmônicos.

O desgaste do para-raios foi avaliado nos casos apresentados de forma comparativa através dos diagramas de caixa (box-plot). Valores da componente fundamental, juntamente com a componente de 3ª ordem, e a relação entre eles também foram apresentados. Parâmetros de degradação do para-raios com base na média e no desvio padrão também foram discutidos.

Para os modelos avaliados pode-se verificar a expectativa de vida útil dos para-raios, apresentando de forma geral desempenho operacional até os 20 anos.

Para os equipamentos com idades superiores há 20 anos foi possível perceber um aumento considerável na amplitude de 3ª harmônica. A exceção foi um único modelo que apresentou crescimento na amplitude na proximidade dos 20 anos. As condições de operação podem afetar a expectativa de vida útil do equipamento, a intensidade das descargas a que são submetidos os para-raios é uma variável importante a ser considerada neste processo.

A superposição de técnicas de monitoramento de para-raios é importante para um diagnóstico preciso da condição do para-raios. O trabalho desenvolvido alcançou o objetivo que foi propor uma metodologia de indicação do estado operacional do para-raios.

Diversos outros trabalhos podem ser propostos para aperfeiçoar o trabalho aqui desenvolvido:

- Implementar a correção para a temperatura e tensão;
- Desenvolver programa computacional para processamento automático dos dados, fornecendo análise estatística por grupos tipo/família, subestação e tempo de operação.
- Aplicar a correção para distorção harmônica da tensão com base na qualimetria disponível nas subestações;
- Analisar estatisticamente e definir intervalo ótimo de monitoramento (medições da corrente de fuga) que propicie menor custo e maior confiabilidade;
- Definir metodologia de manutenção preditiva com a integração dos métodos de monitoramento existentes.

# Referências

ABB. **Surge Arresters - Buyer's Guide**. ed. 9.2., 2012.

ABB. **EXCOUNT-II Users Manual**, ed. 9.2., 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 395/2009**. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, PRODIST módulo 8 qualidade da energia elétrica, ed.1., de 01 de janeiro de 2010. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8\\_Revisao\\_1\\_Retificacao\\_1.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_1_Retificacao_1.pdf)> Acesso em: 22 julho 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa n. 270**, de 26 de Junho de 2007. Estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade das instalações integrantes da Rede Básica, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2007270.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS GRANDES EMPRESAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (ABRATE). **FT técnicas preditivas de diagnóstico de para-raios**. Subgrupo de manutenção de equipamentos. [s.l.], Novembro 2012.

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.

BARBETA, PEDRO ALBERTO; REIS, MARCELO MENEZES; BORNIA, ANTÔNIO CESAR. **Estatística para cursos de Engenharia e Informática**, ed. Atlas S.A, 2004, São Paulo.

BARBOSA, F. B. **Técnicas de Diagnóstico e Correlação com Fenômenos de Degradação em Varistores ZnO**. 2007, 146 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

BARRETO JUNIOR, J. T.; CARVALHO, S. G.; OLIVEIRA, M. J.; TORRES, R. J. M. **Diagnóstico de Campo da Condição Operativa de para-raios de óxido de zinco em subestações de 138kV**. CITENEL, 2001.

BRITO, V. S. **Modelo Adaptativo de Para-Raios de Óxido de Zinco para a Região de Baixa Corrente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

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, 1999.

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.

CLARKE, D. R. **“Varistor Ceramics”**. Journal of the American Ceramic Society, v. 82, n. 3, p. 485–502, March 1999.

DOBLE. **LCM II - Users Manual**, ed.1.07, 2007.

D’AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; FILHO, J. A.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; FILHO, O. K.; MORAIS, S. de A. **Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão**, ed. Universidade Federal Fluminense, 1985.

DOBLE TRANSINOR. **LCM II User Manual**, Ver. 07, 2007.

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.

FRANCO, J.L., **Estudo das propriedades dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1993.

IEC. IEC 60099-4 **Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems**. ed. 2, 2004.

IEC. IEC 60099-5 **Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations**. ed. 1.1, 2000.

IEEE Standard C62.11-2005. **Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)**, 2005.

IEEE Standard 519-1992. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**, 1992.

HAYKIN, S.; VEEN, B. V. **Sinais e Sistemas**. Tradução José Carlos Barbosa dos Santos. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HINRICHSEN, V. **Metal Oxide Surge Arrester Fundamentals**. Siemens AG, Berlin - Germany, 2001.

HINRICHSEN, V. **Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems Fundamentals**. ed. 3, 2011.

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.

HINRICHSEN, V. **Monitoring of High Voltage Metal Oxide Surge Arresters**. VI JORNADAS INTERNACIONALES DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO. Paper 6.4. Bilbao- Espanha, 1997.

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.

LIRA, G. R. S. **Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total**. 2012. 108f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 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.

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 Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 4, p. 1811–1822, October 1990.

MAGALHÃES, MARCOS NASCIMENTO; DE LIMA, ANTÔNIO CARLOS PEDROSO, **Noções de Probabilidade e Estatística**, 5 ed., São Paulo, Editora Universitária de São Paulo (Edusp), 2002. – (Acadêmica; 40).

MARTINS, H.; BARBOSA, F.B.; CRUZ, W. **Evaluation and Diagnosis Technique for Surge Arresters**. High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2010 International Conference, p. 614, 617, 11-14 October 2010.

MATHWORKS INC. **MATLAB R2012a**, 2012.

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 Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 3, p. 998–1003, July 1988.

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.

TRIDELTA, **Equipamento de diagnóstico para a avaliação do estado operacional de pára-raios óxido-metálicos - DIAG**. Tradução: ELOS, Jul, 2007.

VIANA, J. C. C. **Estudo de aplicação de pára-raios zno em linhas de transmissão em regiões de nível cerâmico e resistência de aterramento elevados**. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica), 2009.

VIDEIRA, A.G. **Desenvolvimento de subsídios para aplicação em testes de avaliação de para-raios de ZnO**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica), 2011.

WANDERLEY NETO, E. T.W; COSTA, E. G.; FERREIRA T. V.; MAIA, M. J. A. **Diagnóstico de defeitos em pára-raios a ZnO**. In: Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas. 6º, 2005, Montevideo, Uruguay, P. 46.

ZHU, H.; RAGHUVeer M. R. **Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics**. IEEE Trans. Power Del., v. 16, n. 4, October 2001.