

ESTUDO DO THD DA CORRENTE DE FUGA DE PARARRAIOS COMO  
PARÂMETRO INDICADOR DE DEGRADAÇÃO

Daniel Moreira dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Rio de Janeiro  
Março de 2015

ESTUDO DO THD DA CORRENTE DE FUGA DE PARARRAIOS COMO  
PARÂMETRO INDICADOR DE DEGRADAÇÃO

Daniel Moreira dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

---

Prof. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando, D.Sc.

---

Dr. Cesar Cosenza de Carvalho, D.Sc.

---

Dr. Fábio Vieira Batista de Nazaré, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2015

Santos, Daniel Moreira dos

Estudo do THD da Corrente de Fuga de Pararraios como Parâmetro Indicador de Degradação/ Daniel Moreira dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2015.

XXI, 218 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 145-151.

1. Pararraios. 2. Diagnóstico. 3. Monitoramentos. 4. THD. 5. Corrente de fuga. I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

# Dedicatória

Dedico esta dissertação a minha amada mãe Marilene e meu tio Carlos, grande amigo, que sempre me apoiaram e incentivaram em minha jornada, cujo o esforço conjunto despendido foi essencial para que eu tenha chegado até aqui.

# Agradecimentos

A minha família, pais, irmãos, tios, primos, namorada, todos que me acompanharam e torceram por mim nesta jornada.

Ao meu orientador, professor Marcelo Martins Werneck, por ter abraçado o tema deste trabalho e ter me ajudado em momentos cruciais que sem dúvida determinaram o sucesso do projeto.

Aos meu colegas do Laboratório de Instrumentação e Fotônica, em especial ao Cesar que sempre acreditou no sucesso do trabalho e contribuiu com ideias que foram importantes para o desenvolvimento. E também ao Fernando que me ajudou em muitos dos experimentos associados a dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DO THD DA CORRENTE DE FUGA DE PARARRAIOS COMO  
PARÂMETRO INDICADOR DE DEGRADAÇÃO

Daniel Moreira dos Santos

Março/2015

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho investiga a utilização da distorção harmônica total da corrente de fuga de pararraios como parâmetro indicativo do seu nível de degradação. Foi utilizada uma metodologia singular para avaliação da técnica, na qual pastilhas de Óxido de Zinco formadoras do dispositivo foram consideradas pararraios individuais de menor tensão nominal. A técnica foi avaliada com base em critérios de classificação de pararraios presentes na literatura. Um protótipo de bancada para obtenção do sinal de corrente de fuga dos pararraios foi desenvolvido e testado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF SURGE ARRESTER LEAKAGE CURRENT THD AS  
DETERIORATION INDICATOR PARAMETER

Daniel Moreira dos Santos

March/2015

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Department: Electrical Engineering

This dissertation investigates the use of total harmonic distortion of leakage currents of the surge arrester as indicative parameter of its level of degradation. A novel methodology was used to evaluate the technique in which the non-linear resistors of the device were considered individual surge arrester with lower nominal voltage. The technique was evaluated based on classification criteria of surge arrester found in the literature. A laboratory prototype for obtaining the surge arrester leakage current signal was developed and tested.

# Sumário

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Siglas.....</b>	<b>xx</b>
<b>Lista de Símbolos .....</b>	<b>xxi</b>
<b>Capítulo I. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa .....	2
1.2 Objetivo .....	3
1.3 Organização.....	4
<b>Capítulo II. Fundamentos Teóricos.....</b>	<b>5</b>
2.1 Sobretensões.....	5
2.1.1 Sobretensões originadas por descargas atmosféricas .....	6
2.1.2 Sobretensões originadas por chaveamento .....	9
2.1.3 Sobretensões originadas por defeito monopolar .....	9
2.1.4 Classificação das sobretensões .....	10
2.1.5 Proteção contra sobretensões .....	12
2.2. Pararraios .....	13
2.2.1 Evolução dos pararraios .....	16
2.2.2 Forma de atuação e características dos pararraios .....	22
2.2.3 Características construtivas .....	25
2.2.4 Defeitos típicos encontrados em Pararraios.....	27
2.3 Ferramentas analíticas utilizadas no projeto .....	29
2.3.1 Série e transformada de Fourier contínua.....	29
2.3.2 Série e transformada de Fourier discreta .....	33
2.3.3 Difractometria de raios X.....	40

<b>Capítulo III. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>48</b>
3.1 Indicadores de falha.....	49
3.2 Desconectores.....	50
3.3 Contador de descargas .....	50
3.4 Termografia.....	52
3.5 Monitoramento da corrente de fuga .....	55
3.5.1 Propriedades da corrente de fuga.....	56
3.5.2 Monitoramento da corrente de fuga total .....	61
3.5.3 Monitoramento da corrente de fuga resistiva ou perda de potência .....	63
3.5.4 Informações sobre a corrente de fuga fornecidas pelo fabricante do pararraios .....	71
3.6 Medição da resistência de isolamento .....	73
3.7 Medição de perdas dielétricas .....	74
3.8 Avaliação pelo monitoramento de descargas parciais.....	74
3.9 Sumário dos métodos de diagnósticos .....	76
3.10 Experiência das empresas brasileiras quanto a aplicação dos métodos de diagnóstico de pararraios. ....	79
3.11 Considerações Gerais.....	86
<b>Capítulo IV. Metodologia .....</b>	<b>88</b>
4.1 Testes preliminares .....	89
4.2 Ensaio das pastilhas de ZnO .....	92
4.2.1 Desmembramento do Pararraios .....	93
4.2.2 Procedimento de ensaio dos varistores.....	93
4.3 Tratamento dos dados obtidos.....	96
4.3.1 Cálculo do valor de THD .....	99
4.3.2 Separação das correntes resistiva e capacitiva.....	100
4.4 Difratomia de raios X das pastilhas de ZnO .....	101
4.5 Ensaio de temperatura do varistor .....	101

4.6 Projeto e desenvolvimento do protótipo para diagnóstico de pararraios.....	102
4.7 Testes em laboratório com o protótipo .....	104
<b>Capítulo V. Resultados e Discussões .....</b>	<b>106</b>
5.1 Testes preliminares.....	106
5.2 Ensaios das pastilhas de ZnO do pararraios.....	112
5.3 Análise dos dados provenientes dos ensaios das pastilhas de ZnO.....	114
5.4 Difractometria de raios X.....	127
5.5 Ensaio de temperatura.....	129
5.6 Projeto e desenvolvimento do protótipo para diagnóstico de pararraios.....	130
5.7 Resultados dos testes em laboratório com o protótipo .....	135
<b>Capítulo VI. Conclusões .....</b>	<b>140</b>
6.1 Desenvolvimentos futuros .....	143
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>145</b>
<b>Apêndice. A .....</b>	<b>152</b>
<b>Apêndice. B .....</b>	<b>170</b>
<b>Apêndice. C .....</b>	<b>188</b>
<b>Apêndice. D .....</b>	<b>206</b>
<b>Apêndice. E .....</b>	<b>208</b>
<b>Apêndice. F.....</b>	<b>213</b>
<b>Apêndice. G.....</b>	<b>215</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1: Distribuição das cargas elétricas na nuvem (adaptado de [6]).	6
Figura 2.2: Ilustração da formação das descargas atmosféricas (adaptado de [6]).	7
Figura 2.3: Representação de ondas transientes geradas por descarga atmosférica [6].	8
Figura 2.4: Representação de uma onda transiente [6].	9
Figura 2.5: Classes e formas de onda das solicitações de tensão [1].	10
Figura 2.6: Característica "tensão-corrente" de um pararraios ideal [8].	15
Figura 2.7: Curva V-I para o SiC e o ZnO [7].	15
Figura 2.8: Representação da evolução dos pararraios. (a) Com centelhador e dielétrico a ar; (b) centelhador em série com blocos não lineares; (c) centelhador com alongador de arco em série com blocos não lineares; (d) formado apenas por resistores não lineares [8].	16
Figura 2.9 Detalhes construtivos dos centelhadores tipo "chifre" [7].	18
Fig. 2.10. Proteção de um transformador (a) Representação simbólica da instalação (b) Diagrama elétrico do funcionamento do pararraios (modificado de [6]).	23
Figura 2.11: Pararraios de ZnO com invólucro de porcelana (esquerda) e polimérico (direita) [1].	26
Figura. 2.12. (a) Sinal não periódico $x(t)$ ; (b) sinal periódico formado pela extensão periódica de $x(t)$ [12].	31
Figura 2.13: Interpretação gráfica da equação 2.17 [12].	33
Fig. 2.14. (a) Sequência finita não periódica $x[n]$ ; (b) sequência periódica formada pela extensão periódica de $x[n]$ [12].	37
Figura. 2.15. Interpretação gráfica da equação 2.39 [12].	38
Figura 2.16: Estrutura cristalina do NaCl mostrando arranjo regular dos íons $\text{Na}^{+1}$ e $\text{Cl}^{-1}$ [13].	41
Figura 2.17: Interferência entre raios a nível planar [14].	41
Figura 2.18: Padrões de simetria e seus parâmetros [14].	42
Figura 2.19: Plano cortando o cristal seguindo a diagonal das faces [14].	43
Figura 2.20: Célula unitária hexagonal [14].	44
Figura 2.21. Plano cortando célula unitária hexagonal [14].	44
Figura 2.22: Padrão de difração de pó do NaCl [14].	46

Figura 2.23: Ficha com dados de estrutura cristalina e picos difratados do talco [13]...	47
Figura 3.1: (a) Indicador de falha; (b) Montagem típica do indicador de falha; (Adaptado de [21]).....	49
Figura 3.2: (a) Exemplo de um desconector; (b) Montagem típica de um desconector em um subestação; (c) Ilustração dos momentos anterior e posterior da operação do desconector (adaptado de [22]).....	50
Figura 3.3: Fotografia de um típico contador de descargas disponível no mercado. ....	51
Figura 3.4: Montagem típica do contador de descargas [25]. ....	51
Figura 3.5: Inspeção termográfica em três ângulos [11].....	52
Figura 3.6: Metodologia de inspeção proposta por Álvares [26]. ....	53
Figura 3.7: Exemplo de termografia de um pararraios em serviço [27]. ....	55
Figura 3.8: Corrente de fuga típica de um resistor óxido metálico não-linear em condições de laboratório (adaptado de [15]). ....	56
Figura 3.9: Amostra de corrente de fuga de pararraios em serviço (adaptado de [15])..	57
Figura 3.10: Características tensão x corrente típicas para resistores óxidos metálicos não-lineares [15]. ....	58
Figura 3.11: Dependência da tensão a +20°C [16].....	59
Figura 3.12: Dependência da temperatura na tensão de MCOV [16].....	59
Figura 3.13: Influência do aumento da corrente de fuga resistiva na corrente de fuga total (adaptado de [15]). ....	62
Figura 3.14: Diagrama do arranjo para medição da corrente de fuga utilizado por LIRA <i>et al.</i> [2]. ....	63
Figura 3.15: Estrutura do sistema proposto por LIRA [30], para aquisição da corrente de fuga e a tensão sobre o pararraios.....	65
Figura 3.16: Corrente remanescente depois da compensação da componente capacitiva (adaptado de [16]). ....	66
Figura 3.17: Erro na avaliação do 3° harmônico da corrente de fuga para diferentes ângulos de fase do 3° harmônico do sistema de tensão, considerando variáveis capacitâncias e características tensão-corrente dos resistores não-lineares [15].....	68
Figura 3.18: Informação para conversão para condições de tensão de operação padrão [16].....	72
Figura 3.19: Informação para conversão para condições de temperatura ambiente padrão [16]. ....	73

Figura 3.20: Ilustração de um TC de alta frequência instalado no cabo de aterramento do pararraios utilizado por TATIZAWA <i>et al.</i> [40]. .....	75
Figura 3.21: Tipo de defeitos no pararraios de ZnO detectáveis pela técnica proposta por ALVES [41].....	79
Figura 3.22: Técnicas preditivas de diagnóstico de pararraios utilizadas pelas empresas integrantes da ABRATE [11]. .....	81
Figura 4.2: Estrutura do primeiro teste preliminar .....	90
Figura 4.3: Estrutura do segundo teste preliminar.....	91
Figura 4.4: Estrutura do terceiro teste preliminar destinado a avaliar o sinal de alimentação.....	92
Figura 4.5: (a) Módulo inferior do pararraios; (b) Módulo desmontado. ....	93
Figura 4.6: Diagrama do ensaio dos resistores não-lineares. ....	94
Figura 4.7: Fluxograma do processamento manual de dados para cálculo do valor de THD. ....	97
Figura.4.8: Algoritmo para separação das componentes capacitiva e resistiva da corrente de fuga.....	98
Figura 4.9: Ensaio de temperatura das pastilhas de ZnO. ....	102
Figura 4.10: Diagrama em blocos do sistema para obtenção da corrente de fuga de pararraios.....	103
Figura 4.11: Diagrama em bloco do teste em bancada do protótipo. ....	104
Figura 5.1: Tensão fornecida pelo gerador de sinais. ....	106
Figura 5.2: DFT do sinal programado no gerador de sinais.....	107
Figura 5.3: Tensão aferida utilizando o cabo-a. ....	108
Figura 5.4: DFT do sinal aferido utilizando o cabo-a.....	108
Figura 5.5: Tensão aferida utilizando o cabo-a. ....	109
Figura 5.6: DFT do sinal aferido utilizando o cabo-b.....	109
Figura 5.7: Tensão da fonte de alimentação.....	111
Figura 5.8: DFT do sinal da fonte de alimentação.....	111
Figura 5.9: Corrente de fuga da pastilha 4. ....	113
Figura 5.10: Curva característica “tensão x corrente r.m.s.” da pastilha 4. ....	114
Figura 5.11: Amplitude do conteúdo harmônico da corrente de fuga da pastilha 4.....	114
Figura. 5.12: Gráfico dos valores do THD das pastilhas após serem organizadas em função do valor de sua corrente de fuga total r.m.s.. ....	121

Figura. 5.13: Gráfico dos valores do THD das pastilhas após serem organizadas em função do valor do 3° harmônico de sua corrente de fuga total .....	122
Figura 5.14: Gráfico dos valores do THD das pastilhas após serem organizadas em função do valor de temperatura. ....	122
Figura 5.15: Variação da componente capacitiva das pastilhas. ....	123
Figura 5.16: Variação da componente resistiva das pastilhas. ....	124
Figura 5.17: Variação do conteúdo do 1° harmônico da componente resistiva das pastilhas.....	125
Figura 5.18. Variação do conteúdo do 3° harmônico da componente resistiva das pastilhas.....	126
Figura 5.19: Escolha das pastilhas para ensaio. ....	127
Figura 5.20. Variação do parâmetro “c”. ....	128
Figura 5.21. Variação da corrente de fuga da pastilha 4, quando submetida ao ensaio de temperatura. ....	129
Figura 5.22: Diagrama em blocos do protótipo.....	130
Figura 5.23: circuito somador.....	131
Figura 5.24: Circuito de acionamento do LED. ....	132
Figura 5.25: Janela de transmissão da POF [56]. ....	132
Figura 5.26: Circuito de conversão fibra óptica – Serial. ....	133
Figura 5.27: Tela do software de aquisição de dados com sinal da pastilha 4 representado.....	134
Figura 5.28: Diagrama de Bode do sistema. ....	135
Figura 5.29. Arquivo de entrada para configuração do gerador de sinais. ....	136
Figura 5.30: Corrente de fuga da pastilha 4 aferida pelo sistema de monitoramento... 136	
Figura 5.31: Erro dos valores de THD calculados em relação a entrada do sistema.... 137	
Figura 5.32: Erro dos valores de THD corrigidos calculados em relação a entrada do sistema..... 138	
Figura 5.33: Comparação entre os valores de THD da saída corrigidos e os valores de THD da entrada..... 139	
Figura A.1. Corrente de fuga da pastilha 1. ....	152
Figura. A.2. Corrente de fuga da pastilha 2. ....	152
Figura. A.3. Corrente de fuga da pastilha 3. ....	153
Figura. A.4. Corrente de fuga da pastilha 4. ....	153
Figura. A.5. Corrente de fuga da pastilha 5. ....	154

Figura. A.6. Corrente de fuga da pastilha 6 .....	154
Figura. A.7. Corrente de fuga da pastilha 8. ....	155
Figura. A.8. Corrente de fuga da pastilha 9. ....	155
Figura. A.9. Corrente de fuga da pastilha 10.....	156
Figura. A.10. Corrente de fuga da pastilha 11.....	156
Figura. A.11. Corrente de fuga da pastilha 12.....	157
Figura. A.12. Corrente de fuga da pastilha 13.....	157
Figura. A.13. Corrente de fuga da pastilha 14.....	158
Figura. A.14. Corrente de fuga da pastilha 15.....	158
Figura. A.15. Corrente de fuga da pastilha 16.....	159
Figura. A.16. Corrente de fuga da pastilha 18.....	159
Figura. A.17. Corrente de fuga da pastilha 19.....	160
Figura. A.18. Corrente de fuga da pastilha 20.....	160
Figura. A.19. Corrente de fuga da pastilha 21.....	161
Figura. A.20. Corrente de fuga da pastilha 22.....	161
Figura. A.21. Corrente de fuga da pastilha 23.....	162
Figura. A.22. Corrente de fuga da pastilha 24.....	162
Figura. A.23. Corrente de fuga da pastilha 25.....	163
Figura. A.24. Corrente de fuga da pastilha 26.....	163
Figura. A.25. Corrente de fuga da pastilha 27.....	164
Figura. A.26. Corrente de fuga da pastilha 28.....	164
Figura. A.27. Corrente de fuga da pastilha 29.....	165
Figura. A.28. Corrente de fuga da pastilha 30.....	165
Figura. A.29. Corrente de fuga da pastilha 31.....	166
Figura. A.30. Corrente de fuga da pastilha 32.....	166
Figura. A.31. Corrente de fuga da pastilha 33.....	167
Figura. A.32. Corrente de fuga da pastilha 34.....	167
Figura. A.33. Corrente de fuga da pastilha 35.....	168
Figura. A.34. Corrente de fuga da pastilha 36.....	168
Figura. A.35. Corrente de fuga da pastilha 38.....	169
Figura. C.1. Curva “tensão-corrente” das pastilha 1.....	188
Figura. C.2. Curva “tensão-corrente” das pastilha 2.....	188
Figura. C.3. Curva “tensão-corrente” das pastilha 3.....	189
Figura. C.4. Curva “tensão-corrente” das pastilha 4.....	189

Figura. C.5. Curva “tensão-corrente” das pastilha 5.....	190
Figura. C.6. Curva “tensão-corrente” das pastilha 6.....	190
Figura. C.7. Curva “tensão-corrente” das pastilha 8.....	191
Figura. C.8. Curva “tensão-corrente” das pastilha 9.....	191
Figura. C.9. Curva “tensão-corrente” das pastilha 10.....	192
Figura. C.10. Curva “tensão-corrente” das pastilha 11.....	192
Figura. C.11. Curva “tensão-corrente” das pastilha 12.....	193
Figura. C.12. Curva “tensão-corrente” das pastilha 13.....	193
Figura. C.13. Curva “tensão-corrente” das pastilha 14.....	194
Figura. C.14. Curva “tensão-corrente” das pastilha 15.....	194
Figura. C.15. Curva “tensão-corrente” das pastilha 16.....	195
Figura. C.16. Curva “tensão-corrente” das pastilha 18.....	195
Figura. C.17. Curva “tensão-corrente” das pastilha 19.....	196
Figura. C.18. Curva “tensão-corrente” das pastilha 20.....	196
Figura. C.19. Curva “tensão-corrente” das pastilha 21.....	197
Figura. C.20. Curva “tensão-corrente” das pastilha 22.....	197
Figura. C.21. Curva “tensão-corrente” das pastilha 23.....	198
Figura. C.22. Curva “tensão-corrente” das pastilha 24.....	198
Figura. C.23. Curva “tensão-corrente” das pastilha 25.....	199
Figura. C.24. Curva “tensão-corrente” das pastilha 26.....	199
Figura. C.25. Curva “tensão-corrente” das pastilha 27.....	200
Figura. C.26. Curva “tensão-corrente” das pastilha 28.....	200
Figura. C.27. Curva “tensão-corrente” das pastilha 29.....	201
Figura. C.28. Curva “tensão-corrente” das pastilha 30.....	201
Figura. C.29. Curva “tensão-corrente” das pastilha 31.....	202
Figura. C.30. Curva “tensão-corrente” das pastilha 32.....	202
Figura. C.31. Curva “tensão-corrente” das pastilha 33.....	203
Figura. C.32. Curva “tensão-corrente” das pastilha 34.....	203
Figura. C.33. Curva “tensão-corrente” das pastilha 35.....	204
Figura. C.34. Curva “tensão-corrente” das pastilha 36.....	204
Figura. C.35. Curva “tensão-corrente” das pastilha 38.....	205

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Influência do 3º harmônico da tensão no 3º da corrente resistiva [39]. .....	70
Tabela 3.2: Resumo da experiência com os métodos de diagnóstico (adaptado de [16]). .....	76
Tabela 3.3: Características dos métodos de medida da corrente de fuga (adaptado de [16]).	77
Tabela 3.4. Técnicas atuais de diagnósticos de pararraios de ZnO e suas desvantagens (adaptado de [41]).	78
Tabela 3.5: Resumo da experiência das empresas da ABRATE com os métodos de diagnóstico (adaptado de [11]).	82
Tabela 3.6: Características dos métodos de medida da corrente de fuga, conforme experiência das empresas da ABRATE (adaptado de [11]).	82
Tabela 3.7: Características dos instrumentos de medição de corrente de fuga de pararraios de ZnO [11].	84
Tabela 3.8: Análise comparativa das técnicas preditivas de diagnóstico de pararraios de acordo com a experiência das empresas brasileiras [11].	85
Tabela 4.1: Tabela utilizada para registro das medidas de temperatura durante o ensaio. .....	95
Tabela 4.2: Exemplo da tabela para levantamento da curva tensão-corrente das pastilhas.	96
Tabela 5.1: Características do sinal do gerador de função.	107
Tabela 5.2: Características do sinal obtido utilizando o cabo-a.	108
Tabela 5.3: características do sinal obtido utilizando o cabo-b.	110
Tabela 5.4: Comparativo entre os sinais.	110
Tabela 5.5: Características do sinal de alimentação.	111
Tabela 5.6: Resultado térmico da pastilha 4.	113
Tabela 5.7: Valores de THD (%) calculados para as pastilhas de ZnO.	115
Tabela 5.8: Pastilhas de ZnO ordenadas do menor para o maior valor de corrente de fuga total.	116
Tabela 5.9: Pastilhas de ZnO ordenadas do menor para o maior valor da componente de 3º harmônico da corrente de fuga total.	117

Tabela 5.10 Pastilhas de ZnO ordenadas do menor para o maior valor de temperatura. .....	117
Tabela 5.11: Comparação entre os critérios de avaliação, em ordem crescente do nível de degradação. ....	118
Tabela 5.12. Pastilhas com corrente de fuga entre 1mA e 2mA. ....	119
Tabela 5.13. Pastilhas com corrente de fuga entre 2mA e 3mA. ....	120
Tabela 5.14. Pastilhas com corrente de fuga entre 3mA e 4mA. ....	120
Tabela 5.15. Pastilhas com corrente de fuga entre 4mA e 8mA. ....	120
Tabela 5.16. Pastilhas com corrente de fuga acima de 10mA. ....	120
Tabela. 5.17: Parâmetros das pastilhas ensaiadas (nm). ....	128
Tabela B.1. Resultado térmico da pastilha 1. ....	170
Tabela B.2. Resultado térmico da pastilha 2. ....	171
Tabela B.4. Resultado térmico da pastilha 4. ....	172
Tabela B.5. Resultado térmico da pastilha 5. ....	172
Tabela B.6. Resultado térmico da pastilha 6. ....	173
Tabela B.7. Resultado térmico da pastilha 8. ....	173
Tabela B.8. Resultado térmico da pastilha 9. ....	174
Tabela B.9. Resultado térmico da pastilha 10. ....	174
Tabela B.10. Resultado térmico da pastilha 11. ....	175
Tabela B.11. Resultado térmico da pastilha 12. ....	175
Tabela B.12. Resultado térmico da pastilha 13. ....	176
Tabela B.13. Resultado térmico da pastilha 14. ....	176
Tabela B.14. Resultado térmico da pastilha 15. ....	177
Tabela B.15. Resultado térmico da pastilha 16. ....	177
Tabela B.16. Resultado térmico da pastilha 18. ....	178
Tabela B.17. Resultado térmico da pastilha 19. ....	178
Tabela B.18. Resultado térmico da pastilha 20. ....	179
Tabela B.19. Resultado térmico da pastilha 21. ....	179
Tabela B.20. Resultado térmico da pastilha 22. ....	180
Tabela B.21. Resultado térmico da pastilha 23. ....	180
Tabela B.22. Resultado térmico da pastilha 24. ....	181
Tabela B.23. Resultado térmico da pastilha 25. ....	181
Tabela B.24. Resultado térmico da pastilha 26. ....	182
Tabela B.25. Resultado térmico da pastilha 27. ....	182

Tabela B.26. Resultado térmico da pastilha 28. ....	183
Tabela B.27. Resultado térmico da pastilha 29. ....	183
Tabela B.28. Resultado térmico da pastilha 30. ....	184
Tabela B.29. Resultado térmico da pastilha 31. ....	184
Tabela B.30. Resultado térmico da pastilha 32. ....	185
Tabela B.31. Resultado térmico da pastilha 33. ....	185
Tabela B.32. Resultado térmico da pastilha 34. ....	186
Tabela B.33. Resultado térmico da pastilha 35. ....	186
Tabela B.34. Resultado térmico da pastilha 36. ....	187
Tabela B.35. Resultado térmico da pastilha 38. ....	187
Tabela D.1. Conteúdo harmônico das pastilhas de ZnO ensaiadas. ....	206

# Lista de Siglas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

Eletronorte - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A

LIF - Laboratório de Instrumentação e Fotônica

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

THD – *Total harmonic distortion* - Distorção Harmônica Total

MCOV - Máxima tensão de operação contínua

ICDD - *International Center for Diffraction Data*

ABRATE - Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica

RMS - *Root mean square* (valor eficaz)

DFT – Transformada de Fourier Discreta

ABB - *Asea Brown Boveri*

# Lista de Símbolos

$U_c$  - Máxima tensão de operação contínua

ZnO - óxido de zinco

$U_r$  - tensão nominal

$U_m$  - Tensão máxima eficaz do equipamento

$U_s$  - Valor de pico da sobretensão

SiC – Carboneto de Silício

$I_r$  - corrente resistiva

$I_c$  - corrente capacitiva

# Capítulo I. Introdução

A qualidade e a confiabilidade do sistema de energia elétrica estão associadas ao fornecimento da energia de forma ininterrupta e sem perturbações momentâneas significativas. Os índices de qualidade da rede elétrica podem ser influenciados por diversos fatores envolvendo variações súbitas de tensões e correntes, submetendo os equipamentos da subestação a condições severas e que podem ultrapassar suas capacidades nominais. Quando falham, os ativos da concessionária podem sofrer danos, onerando a empresa com o custo de manutenção e custos relativos à indisponibilidade dos equipamentos.

Dentre os fenômenos que ameaçam a confiabilidade do sistema, pode-se citar as sobretensões, classificadas em internas, quando provenientes de ocorrências no sistema, ou externas, quando geradas por distúrbios atmosféricos. As descargas atmosféricas merecem maior atenção, seja por terem sido reportadas como a principal causa de desligamentos não programados ou pela imprevisibilidade de sua ocorrência e extensão dos danos que podem causar. As descargas atmosféricas podem ocorrer diretamente, tendo consequências normalmente severas, ou indiretamente, devido a tensões induzidas por descargas próximas às linhas de transmissão. Apesar de causarem menor dano, as descargas indiretas são mais frequentes [1].

O nível de tensão de operação dos equipamentos e dispositivos de uma subestação não deve ultrapassar sua tensão máxima de operação. O dispositivo mais indicado para garantir que os equipamentos da subestação não sejam danificados com os transientes de tensão e corrente da rede elétrica são os pararraios.

Os pararraios de alta tensão têm sido largamente utilizados em sistemas de potência na proteção contra sobretensões. Estes equipamentos atuam como limitadores de tensão, mantendo-a em valores aceitáveis e evitando danos a outros equipamentos, normalmente de custos mais elevados.

Devido à importância dos pararraios para os sistemas elétricos, faz-se necessário o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas e dos procedimentos para o correto monitoramento e diagnóstico do estado dos pararraios instalados em campo [2]. A falha intempestiva de um pararraios pode causar oscilações no sistema, danos aos equipamentos periféricos e também colocar em risco a integridade física das pessoas

que, porventura, estejam trabalhando nas proximidades dos pararraios no instante da falha [3].

## **1.1 Justificativa**

Diversos fatores podem contribuir para a degradação dos pararraios. Entre eles, pode-se destacar: a perda da estanqueidade e penetração de umidade; a contaminação externa do invólucro (poluição superficial); as descargas parciais internas; as descargas de longa duração ou de curta duração com alta intensidade; a degradação dos varistores; o desalinhamento da coluna ativa; e a distribuição irregular da tensão. Alguns desses fatores, contribuindo isoladamente ou em conjunto, podem provocar a atuação do dispositivo para a tensão operativa do sistema, provocando explosão ou queima [2].

Métodos e indicadores para identificar possível deterioração e perda das propriedades de isolamento têm sido utilizados desde o advento dos pararraios. Os métodos de diagnósticos utilizados variam em suas proposições: termografia, análise da parcela resistiva da corrente de fuga, análise das componentes harmônicas da corrente de fuga total, avaliação através da detecção e análise de descargas parciais.

Apesar de serem dispositivos utilizados há muito tempo, ainda não existem técnicas de diagnóstico consensuais para indicar quando um pararraios deve ser retirado de operação [4]. Embora algumas técnicas de avaliação, como a inspeção térmica e a medição do terceiro harmônico da corrente de fuga, sejam bastante difundidas e ofereçam bons resultados, não há uma uniformização de procedimentos para a avaliação do estado funcional do pararraios [1].

A preocupação na avaliação dos pararraios não é algo recente, algumas concessionárias já estão fazendo pesquisas e estudos a respeito do assunto, atualizando tecnológica e cientificamente seus quadros, desenvolvendo metodologias de manutenção próprias. Com o aumento do parque e a penalização pela indisponibilidade das funções da rede básica do sistema de transmissão, juntamente com a ampliação da planta elétrica brasileira, há a elevação do número de pararraios em operação. Isto justifica o estudo e o desenvolvimento de metodologias de avaliação do estado operacional do pararraios.

Inserida nesse contexto, e fazendo uso da regulamentação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) segundo a qual concessionárias e permissionárias de distribuição, geração e transmissão de energia elétrica devem aplicar anualmente um

percentual mínimo de sua receita operacional líquida no programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor de Energia Elétrica, a Eletronorte, Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A, buscou em parceria com o Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) ligado à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), o desenvolvimento de uma metodologia própria e singular para o diagnóstico do nível de degradação de pararraios.

Neste trabalho é proposto um novo método para diagnóstico do nível de degradação de pararraios de óxido de zinco (ZnO), e baseia-se na análise da Distorção Harmônica Total (THD) da corrente de fuga total do dispositivo, quando submetido a sua máxima tensão de operação contínua (MCOV ou  $U_c$ ). O método foi avaliado através de ensaios das pastilhas de ZnO provenientes de um exemplar de pararraios previamente diagnosticado pela Eletronorte, concessionária proprietária, como degradado. As pastilhas foram tratadas individualmente como pararraios de menor tensão nominal ( $U_r$ ) e  $U_c$ , proporcionais à  $U_r$  e ao  $U_c$  do exemplar original e a quantidade de pastilhas. O uso dessa metodologia evitou a necessidade de se dispor de diversos exemplares desse dispositivo nessa fase da pesquisa, ou ainda que fosse necessário o envelhecimento de um exemplar completo.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de subsídios para utilização do valor do THD da corrente de fuga total de pararraios em operação, como parâmetro indicativo de seu nível de degradação. Podendo ser utilizado posteriormente como indicador para realização de manutenção preditiva e/ou corretiva do dispositivo.

O escopo do trabalho inclui a análise das pastilhas de ZnO formadoras de um exemplar de pararraios previamente diagnosticado como degradado, cedido ao LIF pela Eletronorte. O método de análise utilizado correlaciona os valores do THD das pastilhas com outros parâmetros previstos na literatura como indicadores do nível de degradação do pararraios.

Como objetivo secundário deste trabalho, um protótipo destinado a adquirir e armazenar a forma de onda da corrente de fuga total de pararraios em operação é desenvolvido. O protótipo deve usar um método de análise não intrusivo e realizar o monitoramento online.

### 1.3 Organização

Este trabalho está organizado em sete capítulos, os quais descrevem todas as etapas do projeto de pesquisa no qual se baseia esta dissertação. O capítulo 1 apresenta uma introdução acerca do tema desenvolvido neste documento. A justificativa da pesquisa é detalhada, apresentando uma visão geral do projeto e as entidades envolvidas na pesquisa. O objetivo do trabalho é então delineado, enquadrando este desenvolvimento dentro do escopo geral do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento do setor elétrico brasileiro.

Conceitos e fundamentos teóricos julgados importantes para o perfeito entendimento do trabalho são apresentados no capítulo 2. O fenômeno das sobretensões é explicado detalhadamente e um breve histórico do pararraios é apresentado, assim como seu princípio de funcionamento e características estruturais. As ferramentas analíticas utilizadas no projeto também são abordadas no capítulo 2.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica do tema de monitoramento e diagnóstico de pararraios. São apresentados os métodos de monitoramento e diagnósticos utilizados desde o advento deste dispositivo. São abordados os resultados das pesquisas envolvendo novas metodologias de análises obtidas contemporaneamente e um panorama dos métodos adotados pelas empresas brasileiras de energia.

Uma descrição detalhada da metodologia que norteou o desenvolvimento deste trabalho é apresentada no capítulo 4. Estão descritos neste capítulo todos os procedimentos adotados e os conceitos utilizados para elaboração e execução do pré-teste do sistema, quando foram verificados os cabos de dados e a fonte alimentação. Ainda são apresentados o diagrama e a descrição que detalham os ensaios das pastilhas de ZnO, assim como o conceito geral adotado para o projeto e desenvolvimento do protótipo. A metodologia utilizada para execução do teste de bancada do protótipo também é apresentada.

O capítulo 5 retoma as metodologias apresentadas no capítulo 4, apresentando os resultados de cada teste e ensaio realizado. Neste capítulo os resultados são analisados e discutidos, enquanto no capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho e indicado os próximos passos que podem ser usados para nortear a continuidade da pesquisa.

# Capítulo II. Fundamentos Teóricos

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e fundamentos necessários para o claro entendimento deste trabalho. Serão discutidos os temas sobretensões e pararraios, objetos de estudo desta dissertação e as ferramentas analíticas necessárias para o entendimento do projeto.

## 2.1 Sobretensões

Embora os sistemas elétricos operem em sua maior parte em regime permanente, estão sujeitos a fenômenos transitórios envolvendo variações de corrente e tensão. De forma geral, os estudos realizados para a obtenção de valores referentes aos fenômenos transitórios para a especificação de equipamentos do sistema elétrico são denominados “estudos de sobretensões” [1].

De acordo com a norma NBR 6939 [5], uma sobretensão  $U_s$  é definida como qualquer tensão entre fase e terra, ou entre fases, cujo valor de crista exceda o valor de crista deduzido da tensão máxima eficaz do equipamento ( $U_m$ ). Os valores para sobretensões entre fase e terra e entre fase e fase estão apresentados respectivamente na equação 2.1 e equação 2.2.

$$U_s \geq \frac{U_m \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

$$U_s \geq U_m \sqrt{2} \quad (2.2)$$

As sobretensões podem ter origens nas descargas atmosféricas, no chaveamento de sistemas de transmissão e nos defeitos monopolares [6].

### 2.1.1 Sobretensões originadas por descargas atmosféricas

Ao longo dos anos, várias teorias foram desenvolvidas para explicar o fenômeno dos raios. Atualmente tem-se como certo que a fricção entra as partículas de água e gelo que formam as nuvens, provocada pelos ventos ascendentes, de forte intensidade, dão origem a uma grande quantidade de cargas elétricas. Verifica-se experimentalmente que as cargas elétricas positivas ocupam a parte superior da nuvem, enquanto as cargas elétricas negativas se posicionam na sua parte inferior, acarretando, conseqüentemente, uma intensa migração de cargas positivas na superfície da terra para a área correspondente à localização da nuvem, conforme se pode observar na figura 2.1.

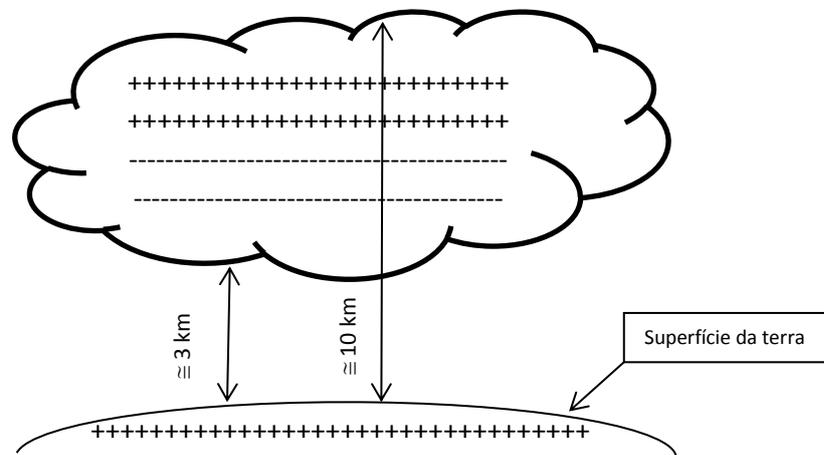


Figura 2.1: Distribuição das cargas elétricas na nuvem (adaptado de [6]).

A concentração de cargas elétricas positivas e negativas numa determinada região faz surgir uma diferença de potencial entre a nuvem e a terra. Entretanto, o ar apresenta uma determinada rigidez dielétrica, normalmente elevada, e que depende de certas condições ambientais. O aumento desta diferença de potencial, que se denomina gradiente de tensão, poderá atingir um valor que supere a rigidez dielétrica do ar, interposto entre a nuvem e a terra, fazendo com que as cargas elétricas negativas migrem na direção da terra, num trajeto tortuoso e normalmente cheio de ramificações, cujo fenômeno é conhecido como descarga piloto. O valor do gradiente de tensão para o qual a rigidez dielétrica do ar é rompida é de aproximadamente 1kV/mm.

A ionização do caminho seguido pela descarga piloto propicia condições favoráveis de condutibilidade do ar ambiente. Mantendo-se elevado o gradiente de

tensão na região entre a nuvem e a terra, surge em função da aproximação do solo, de uma das ramificações da descarga piloto, uma descarga ascendente. Essa descarga é constituída de cargas elétricas positivas e denominada descarga de retorno ou principal, de grande intensidade, responsável pelo fenômeno conhecido como trovão, que é o deslocamento da massa de ar circundante ao caminhar do raio, em função da elevação de temperatura e, conseqüentemente, do aumento de volume. Não se tem como precisar a altura do encontro entre estes dois fluxos de carga que caminham em sentidos opostos, mas acredita-se que seja a poucas dezenas de metros da superfície da terra.

A descarga de retorno ao atingir a nuvem provoca, numa determinada região, uma neutralização eletrostática temporária. Na tentativa de manter o equilíbrio dos potenciais elétricos no interior da nuvem, surgem intensas descargas que resultam na formação de novas cargas negativas na sua parte inferior, dando início às chamadas descargas reflexas ou secundárias, no sentido da nuvem para a terra, tendo como canal condutor aquele seguido pela descarga de retorno que em sua trajetória ascendente deixou o ar intensamente ionizado. A figura 2.2 ilustra graficamente a formação das descargas atmosféricas.

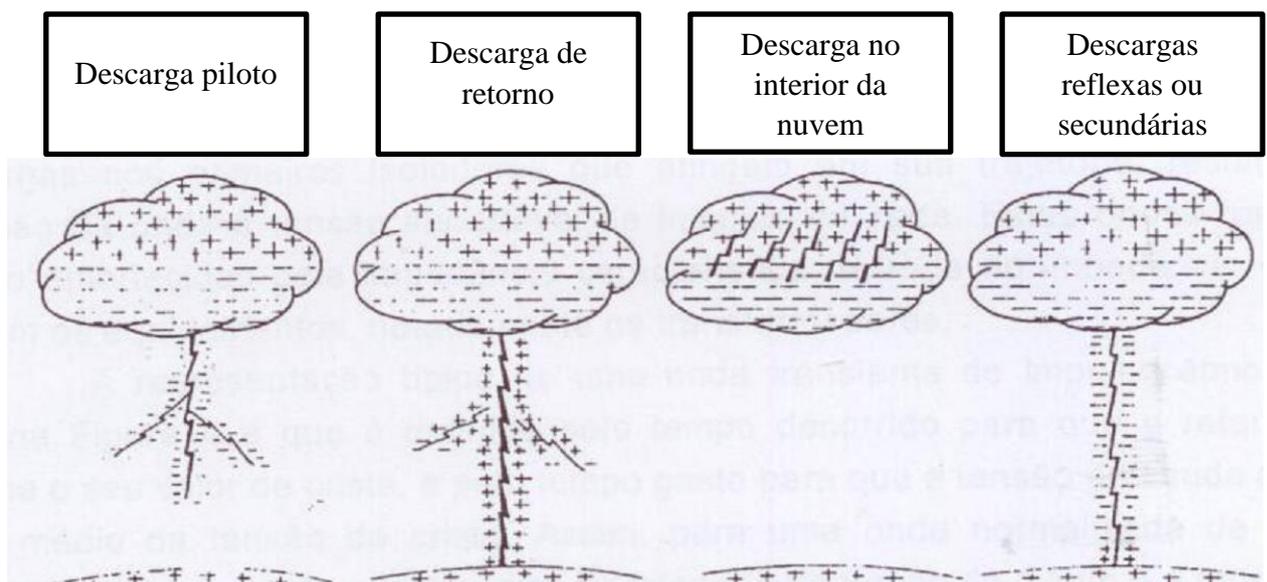


Figura 2.2: Ilustração da formação das descargas atmosféricas (adaptado de [6]).

As descargas reflexas ou secundárias podem acontecer por várias vezes, após cessada a descarga principal. Tomando-se como base medições feitas na Estação do Monte San Salvasori [6], as intensidades das descargas atmosféricas podem ocorrer nas seguintes probabilidades:

- $97\% \leq 10 \text{ kA}$
- $85\% \leq 15 \text{ kA}$
- $50\% \leq 30 \text{ kA}$
- $20\% \leq 50 \text{ kA}$
- $4\% \leq 80 \text{ kA}$

Constatou-se também que 90% das descargas atmosféricas têm polaridade negativa. Quando uma descarga atmosférica atinge diretamente uma rede aérea, surgem duas ondas de tensão de impulso denominadas ondas transientes, que caminham em sentidos opostos, conforme pode ser observado através da figura 2.3.

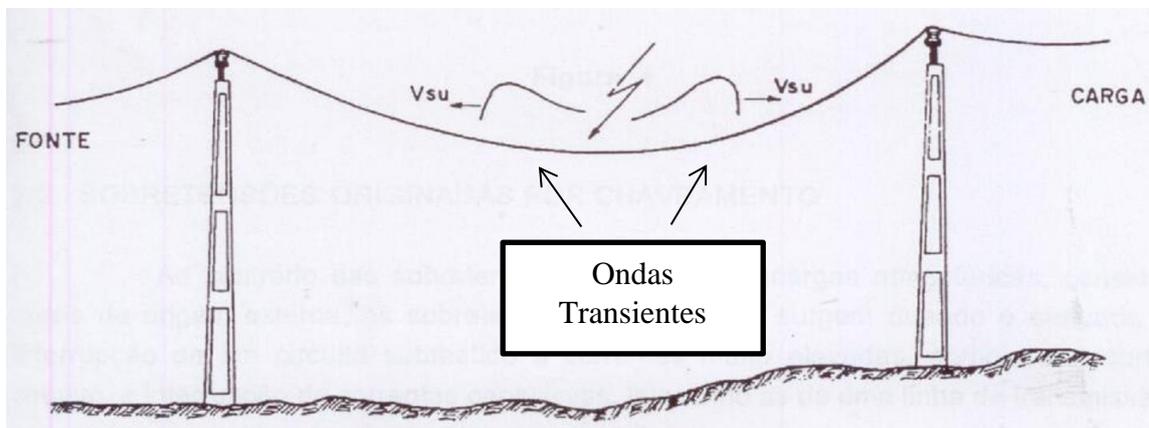


Figura 2.3: Representação de ondas transientes geradas por descarga atmosférica [6].

O valor de crista destas ondas está limitado à tensão suportável de impulso (TSI) da rede. Ondas com o valor de crista superior ao TSI do sistema provocam descargas nos primeiros isoladores que atingem em sua trajetória, resultando na limitação da onda à tensão suportável de impulso da rede. Estas ondas transientes, atingem os equipamentos, notadamente os transformadores [6].

A representação típica de uma onda transiente de impulso atmosférico é dada na figura 2.4 e que é definida pelo tempo decorrido para que a referida onda assuma o seu valor de crista, e pelo tempo gasto para que a tensão de cauda adquira o valor médio da tensão de crista. Assim, para uma onda normalizada de 1,2/50  $\mu\text{s}$  significa que a tensão de crista ocorre no intervalo de tempo de 1,2  $\mu\text{s}$  e a tensão média relativa à cauda se dá para um tempo igual a 50  $\mu\text{s}$ .

A frente de onda é caracterizada por sua taxa de velocidade de crescimento. Esta taxa é considerada como sendo a inclinação da reta que passa pelos pontos com valores de tensão iguais a 10 e 90% da tensão de crista  $V_c$ , conforme mostrado na figura 2.4. Assim, as descargas diretas apresentam uma taxa de crescimento da tensão na faixa de 100 a 1000 kV/ $\mu$ s [6].

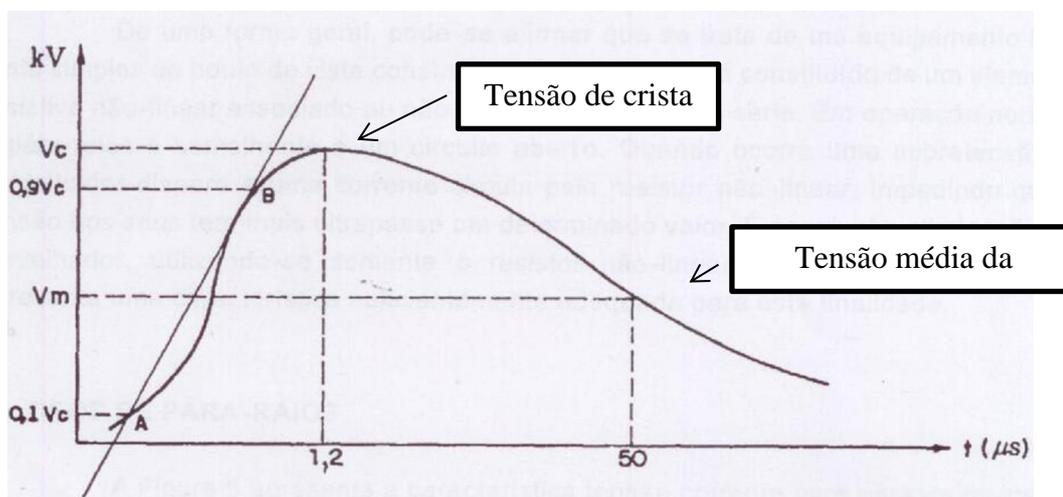


Figura 2.4: Representação de uma onda transiente [6].

### 2.1.2 Sobretensões originadas por chaveamento

Ao contrário das sobretensões devido às descargas atmosféricas, consideradas de origem externa, as sobretensões por manobra surgem quando é efetuada a interrupção de um circuito submetido a correntes muito elevadas, como a de curto-circuito, a interrupção de correntes capacitivas, tais como as de uma linha de transmissão operando em vazio ou de banco de capacitores, e finalmente, a interrupção de pequenas correntes indutivas, como as de reatores e transformadores energizados em vazio. Estas sobretensões são consideradas de origem interna ao sistema. Os surtos de tensão resultantes da energização de linhas de transmissão, por exemplo, atingem valores de 2,5 a 3 vezes a tensão nominal do sistema [6].

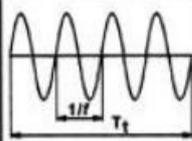
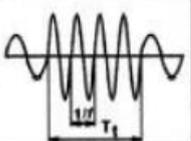
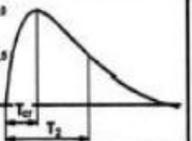
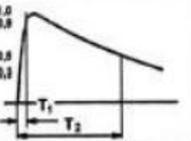
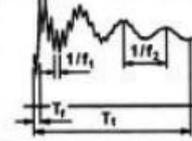
### 2.1.3 Sobretensões originadas por defeito monopolar

Quando ocorre um defeito monopolar, as fases não afetadas podem sofrer níveis elevados de sobretensão entre fase-terra, submetendo os equipamentos, principalmente

os parraios, a severas condições de operação. O valor da sobretensão é uma função da configuração do sistema e do tipo de aterramento adotado [6].

## 2.1.4 Classificação das sobretensões

As sobretensões podem ser classificadas de acordo com a forma de onda e a duração, seu efeito sobre a isolamento ou sobre o dispositivo de proteção. A figura 2.5 apresenta a representação das classes e as formas de onda das solicitações.

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_1 \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_1^*$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*

\*) A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.

Figura 2.5: Classes e formas de onda das solicitações de tensão [1].

- a) Sobretensões temporárias - São sobretensões de frequência fundamental de duração relativamente longa, podendo ser ou não fracamente amortecida, podendo também sua frequência ser várias vezes maior ou menor que a fundamental do sistema. Podem ser originadas devido a faltas, operações de chaveamento, fenômenos não lineares ou combinações destes fenômenos.
- b) Sobretensões transitórias - Sobretensões de curta duração (alguns milissegundos ou menos), podendo ser oscilatórias ou não, e usualmente fortemente amortecidas. As sobretensões transitórias podem ser classificadas em de frente lenta, frente rápida e frente muito rápida.

1. Sobretensões de frente lenta - São definidas como sobretensões transitórias usualmente unidirecionais, com tempo até a crista tal que  $20 \mu\text{s} \leq T_1 \leq 5000 \mu\text{s}$  e tempo até o meio valor (na cauda)  $T_2 \leq 20 \text{ms}$ . Normalmente, essas sobretensões têm origem em energização e religamento de linhas, aplicação e eliminação de faltas, rejeição de carga, energização de capacitores, chaveamento de correntes capacitivas e indutivas (manobras de reatores) e descargas atmosféricas no sistema em locais distantes do ponto considerado.
  2. Sobretensões de frente rápida - São definidas como sobretensões transitórias usualmente unidirecionais, com tempo até a crista tal que  $0,1 \mu\text{s} \leq T_1 \leq 20 \mu\text{s}$  e tempo até o meio valor (na cauda)  $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$ . Essas sobretensões têm origem em descargas atmosféricas diretamente nas linhas aéreas, em seus condutores fase, nos cabos dos para-raios, em estruturas próximas à linha considerada e em operações de manobra e faltas.
  3. Sobretensões de frente muito rápida - São definidas como sobretensões transitórias usualmente unidirecionais, com tempo até a crista tal que  $T_1 \leq 0,1 \mu\text{s}$ , duração total menor ou igual a 3ms e oscilações superpostas de frequências entre 30kHz e 100MHz. Ocorrem devido à operação de seccionadoras ou faltas dentro de subestações isoladas a gás (GIS), devido à disrupção rápida da isolação gasosa e propagação praticamente não amortecida do surto.
- c) Sobretensão combinada - Consiste em duas componentes de tensão simultaneamente aplicadas entre cada um dos terminais de uma isolação fase-fase e a terra. É classificada pela componente de maior valor de crista. Pode ter qualquer origem citada anteriormente para as outras sobretensões.
- d) Descargas atmosféricas - A principal causa de desligamentos não programados ocorridos em redes de distribuição, correspondendo a uma faixa de 30% a 60% dos desligamentos, é a ocorrência de descargas atmosféricas [1]. São caracterizadas por frentes de onda menores que  $20\mu\text{s}$  e tempo de cauda da ordem

de 50 $\mu$ s. São consideradas descargas atmosféricas, sobretensões fase-terra ou fase-fase devido a impulsos atmosféricos ou outro fenômeno cuja forma de onda seja similar a esta.

Os estudos das sobretensões nos sistemas elétricos têm adquirido uma maior importância nos últimos anos, à medida que se tem elevado os níveis de tensão dos sistemas e devido à necessidade de sistemas cada vez mais confiáveis e econômicos [7].

### **2.1.5 Proteção contra sobretensões**

Os equipamentos instalados em uma subestação estão sujeitos à severas condições de solicitações dielétricas causadas por sobretensões provenientes de manobras no Sistema Elétrico de Potência (SEP) e/ou descargas atmosféricas. Para realizar a coordenação de isolamento e com o objetivo de impedir que estes transientes de tensão danifiquem os equipamentos elétricos, torna-se necessária a instalação de dispositivos adequados para limitar os níveis máximos de sobretensões. O equipamento mais adequado para executar esta função é o pararraios [3].

A função dos pararraios é a de proteger a subestação e/ou os transformadores das sobretensões que surgem na rede, provenientes de descargas atmosféricas, manobras ou defeitos [2, 6]. Atuam como limitadores do nível de tensão nos terminais dos equipamentos de uma subestação, evitando que sobretensões em níveis superiores aos que eles suportam possam alcançá-los [3].

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

Devido à importância dos pararraios para os sistemas elétricos faz-se necessário o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas e procedimentos para o correto monitoramento e diagnóstico do estado dos pararraios instalados em campo. A

falha intempestiva de um pararraios pode causar oscilações no sistema, danos aos equipamentos periféricos e também colocar em risco a integridade física das pessoas que, porventura, estejam trabalhando nas proximidades do pararraios no instante da falha [3].

## **2.2. Pararraios**

Os equipamentos de uma subestação estão sujeitos a diversos tipos de sobretensões que podem danificá-los, sejam devido a surtos no sistema, manobras ou descargas atmosféricas, sendo estas últimas as maiores causas de desligamentos. Adicionalmente, os desligamentos não programados causam distúrbios no suprimento e na oferta de energia, acarretando na perda de faturamento em diversos casos. Para a proteção dos equipamentos da subestação, normalmente de alto custo, e a redução dos índices de desligamento não programados, é necessária a instalação de dispositivos de proteção que mantenham a qualidade e confiabilidade do sistema, sendo os pararraios os equipamentos mais adequados para esta finalidade [1].

Os pararraios ou, de forma mais genérica, supressores de surtos de tensão, são os equipamentos responsáveis pelo controle de parte das sobretensões existentes nos sistemas elétricos de potência, contribuindo decisivamente para a sua confiabilidade, economia e continuidade de operação.

A designação pararraios data do início do desenvolvimento e da aplicação destes dispositivos aos sistemas elétricos de potência, quando a maior parte das sobretensões era associada aos fenômenos das descargas atmosféricas [8]. As primeiras patentes nesta área de equipamentos elétricos datam do fim do século XIX e praticamente consistem de dispositivos denominados centelhadores, que ainda possuem aplicação específica. O desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência na forma de aumento das tensões de distribuição-transmissão, associado à crescente extensão física das redes, bem como das condições de aterramento do ponto de neutro, que pode ser de forma resumida: solidamente aterrado, ou neutro ressonantes, ou ainda sistemas isolados, determinou o modelo de desenvolvimento destes dispositivos. Hoje se encontram ainda centelhadores, pararraios com resistores não-lineares e centelhadores e pararraios somente com resistores não-lineares [8].

Os pararraios são dispositivos relativamente simples do ponto de vista construtivo. Sua parte ativa é constituída de um elemento resistivo não-linear que pode ou não estar

associado a um centelhador em série. Os pararraios são conectados entre o condutor de energia e a terra, tendo a tensão operacional do sistema aplicada continuamente sobre seus terminais. Idealmente, o dispositivo deve possuir as seguintes características [4, 9]:

- i. Sob tensão normal, apresentar uma impedância infinita, se comportando como um circuito aberto e não afetando a operação do sistema;
- ii. Mudar seu comportamento instantaneamente, entrando em condução quando da ocorrência de uma sobretensão, sob uma característica tensão-corrente não-linear mantendo a tensão sobre o equipamento que protege no nível de seu valor nominal;
- iii. Extinguir a corrente de descarga, normalizando a operação do sistema.

Conforme pode ser observado na figura 2.6, um pararraios ideal seria aquele que iniciaria o processo de condução após a tensão ter alcançado um determinado valor. Nestes casos, uma vez que se atinja a tensão de corte – disparo, inicia-se um processo de circulação de corrente através do pararraios sem que se verifiquem alterações no nível de tensão entre os seus terminais, que é mantido constante independentemente da amplitude da corrente descarregada. Na vida real, esta característica ideal não existe, sendo a característica não-linear tal como indicada na figura. 2.7. Se a característica do material utilizado no pararraios for suficientemente não-linear, o equipamento apresenta um comportamento similar a um resistor não-linear. Sendo as características do material utilizado no pararraios suficientemente não-linear, aproximando-se portanto do pararraios ideal, os “gaps” (centelhadores) série podem ser desprezados e o pararraios seria constituído somente de um resistor não-linear. A figura 2.7 mostra que o ZnO apresenta uma característica não-linear superior a do SiC (carboneto de silício), sem gap, na região de intensidade de correntes mais baixas.



Figura 2.6: Característica "tensão-corrente" de um para-raios ideal [8].

A figura 2.6 apresenta a característica tensão-corrente (V-I) para para-raios ideal e a figura 2.7 apresenta o mesmo tipo de curva para o carboneto de silício (SiC) e para o óxido de zinco (ZnO), elementos utilizados no componente não-linear do para-raios.

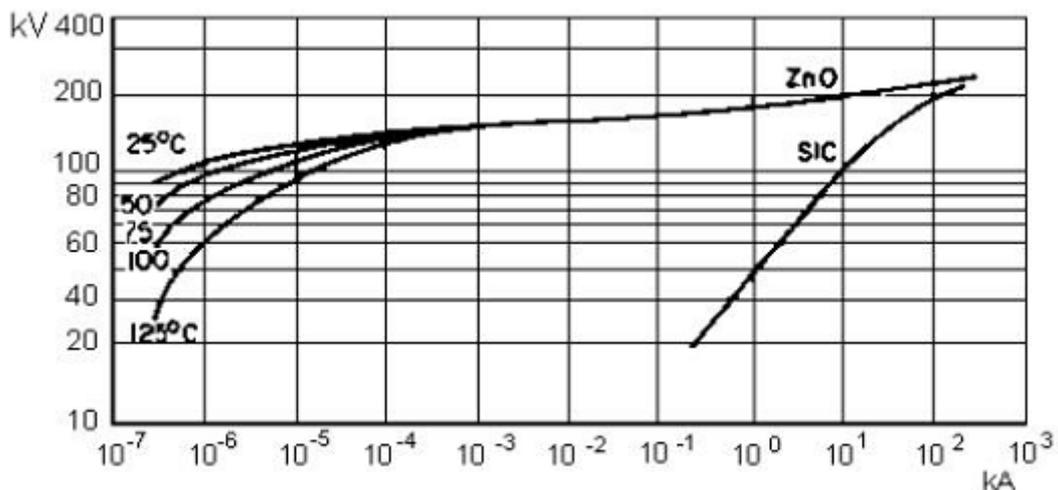


Figura 2.7: Curva V-I para o SiC e o ZnO [7].

Atualmente, os principais fabricantes de para-raios manufacturam somente para-raios de ZnO na área de transmissão de energia elétrica. Para os sistemas de distribuição, ainda estão sendo utilizados para-raios construídos com outros materiais [6].

Os para-raios de ZnO apresentam uma simplicidade construtiva muito grande porque são constituídos somente de pastilhas de elementos não-lineares, montados dentro de um invólucro de porcelana. Apesar dos fabricantes estarem voltados para a

construção de pararraios de ZnO, os sistemas já desenvolvidos utilizam pararraios convencionais, que são pararraios construídos com resistor não linear à base de carboneto de silício (SiC) e necessitam de um “gap” série para o seu correto funcionamento.

### 2.2.1 Evolução dos pararraios

Os pararraios podem ser construídos com centelhadores ou não, dependendo do material utilizado na construção dos elementos não-lineares, da aplicação, das solicitações impostas e da linha de projeto de cada fabricante. A figura 2.8 apresenta, a título de ilustração, o processo evolutivo destes dispositivos de proteção contra surtos de tensão.

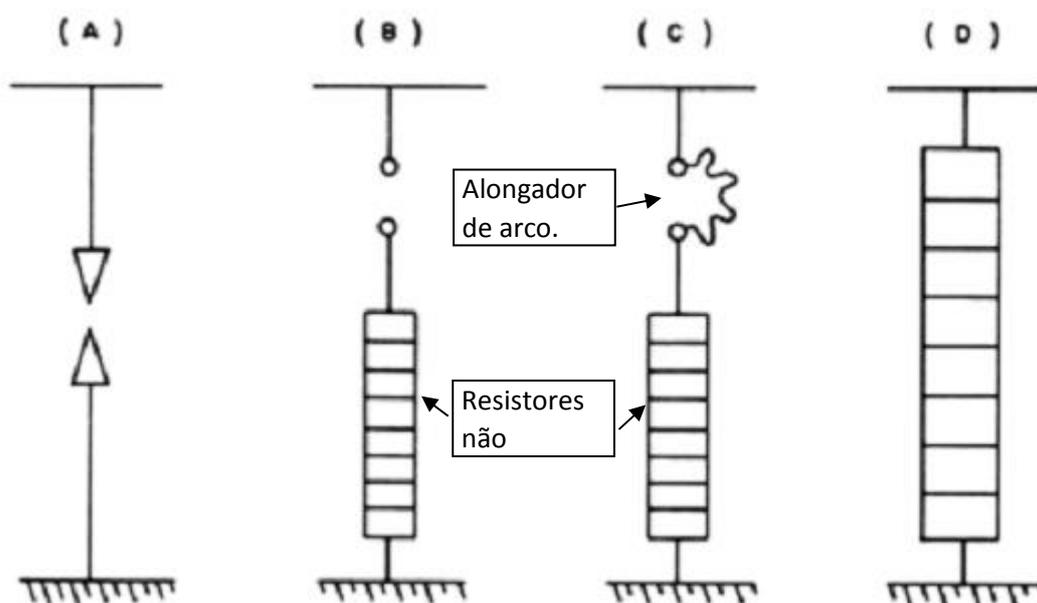


Figura 2.8: Representação da evolução dos pararraios. (a) Com centelhador e dielétrico a ar; (b) centelhador em série com blocos não lineares; (c) centelhador com alongador de arco em série com blocos não lineares; (d) formado apenas por resistores não lineares [8].

Na figura 2.8 (a) é ilustrado um par arraios com centelhador e dielétrico a ar, a figura 2.8 (b) mostra um dispositivo confeccionado com um centelhador em série com blocos resistivos não-lineares. A figura 2.8 (c) apresenta uma versão de pararraios com

centelhador ativo, cujo funcionamento é baseado no alongamento do arco dentro de câmaras de projeto específico para acomodar características adequadas à proteção frente a descargas de manobra, com o auxílio de um campo magnético. Deste modo, é desenvolvida uma queda de tensão nos centelhadores, o que auxilia no processo de limitação das correntes subsequentes que, assim, podem ser interrompidas em qualquer ponto da onda de tensão, em períodos de tempo inferiores a meio ciclo, inclusive na crista da tensão. Finalmente a figura 2.8 (d) representa o estágio atual de desenvolvimento dos pararraios para sistemas de potência, onde são utilizados na construção apenas blocos de resistores não-lineares. Os resistores são fabricados a partir de um processo cerâmico tendo o ZnO como principal componente.

#### a) Centelhadores com dielétrico de ar

O primeiro dispositivo utilizado na proteção contra sobretensões foi um simples centelhador, denominado de centelhador tipo “chifre”, instalado entre a fase e a terra nas terminações de linha e equipamentos importantes, e que utilizava como meio dielétrico o próprio ar. Esse dispositivo, entretanto, apresenta alguns pontos negativos à sua utilização, sendo as suas principais desvantagens [7]:

- A forte influência das condições atmosféricas em suas características disruptivas;
- A incapacidade de extinguir, na maioria das aplicações, o arco elétrico de baixa impedância formado quando acontece sua disrupção, ocasionando a passagem da corrente de curto-circuito do sistema, corrente essa que será mantida até que a proteção contra sobrecorrentes atue e a falta seja eliminada pelo sistema de proteção;
- Durante a operação do centelhador, há um corte brusco da tensão disruptiva (elevado efeito  $dv/dt$ ), que ocasiona uma solitação muito severa na isolação entre espiras dos enrolamentos de transformadores e reatores;

- A elevada corrente de arco produz uma rápida erosão dos eletrodos dos centelhadores, ocasionando uma variação progressiva nos seus níveis de proteção.

Detalhes construtivos dos centelhadores com dielétrico de ar, aplicados em redes de distribuição, são apresentados na figura 2.9.

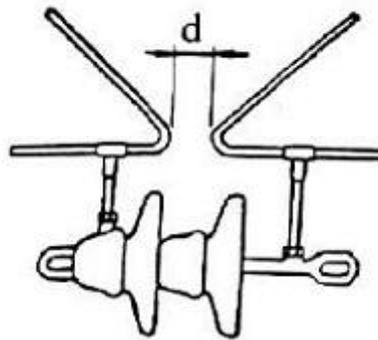


Figura 2.9 Detalhes construtivos dos centelhadores tipo “chifre” [7].

Outro fator crítico para os primeiros projetos de centelhadores, apresentado na figura 2.9 é a disrupção acidental provocada pela “queda” de pássaros, provocando um curto-circuito no sistema seguido pelo seu desligamento.

#### b) Pararraios tipo expulsão

Devido aos problemas encontrados com o uso de centelhadores a ar [7], surgiram, por volta de 1920, os primeiros pararraios do tipo expulsão. Estes eram constituídos basicamente por dois centelhadores montados em um tubo isolante e conectados em série. Uma vez que os dois centelhadores possuíam diferentes espaçamentos e eram constituídos por diferentes materiais dielétricos, não existia uma distribuição uniforme de tensão entre esses e o início da disrupção era sempre determinado pelo centelhador montado na parte superior do pararraios.

Com a disrupção do centelhador superior, toda a tensão passava a ser aplicada sobre o centelhador inferior, que iniciava o processo de formação do arco no seu dielétrico, constituído por um material fibroso com a propriedade básica de gerar gases

que provocavam a deionização do arco, provocando a interrupção da corrente de frequência fundamental de forma natural no momento que a corrente passava pelo zero.

O princípio de funcionamento do pararraios de expulsão é o mesmo atualmente adotado para os elos fusíveis de expulsão e chaves corta-circuito. A sua principal desvantagem era a pequena vida útil, limitada à durabilidade do material utilizado para a deionização do arco elétrico.

### c) Pararraios de Carboneto de Silício (SiC)

Os pararraios do tipo expulsão tiveram uma vida muito curta, sendo substituídos pelos pararraios tipo “válvula”, que foram desenvolvidos em paralelo com os pararraios tipo expulsão e acabaram por substituí-los totalmente. Estes pararraios eram formados basicamente por centelhadores montados em série com resistores não-lineares. Vários tipos de materiais foram originariamente empregados para a confecção dos resistores não-lineares, tais como Hidróxido de Alumínio, Óxido de Ferro e Sulfeto de Chumbo.

Posteriormente, foram desenvolvidos resistores não-lineares de Carboneto de Silício (SiC) formados a partir dos cristais de Carboneto de Silício. Estes pararraios, ainda hoje utilizados nos sistemas elétricos, apresentam um conjunto de centelhadores montados em série com os elementos de resistores não-lineares de SiC.

Neste tipo de pararraios os centelhadores apresentam duas funções:

1. "Isolar" o pararraios do sistema sob condições de regime permanente, uma vez que sem a presença dos centelhadores, os elementos de SiC apresentariam, sob condições normais de operação, uma elevada amplitude de corrente de frequência fundamental, que provocaria perdas apreciáveis e um aquecimento excessivo nos resistores não-lineares de SiC, acarretando a sua falha em poucos ciclos;
2. Auxiliar na extinção da corrente subsequente que flui através dos elementos não-lineares, quando da proximidade do zero ou da sua passagem pelo zero, dependendo do projeto construtivo do centelhador.

Apesar das melhorias sucessivas, a presença dos centelhadores na montagem dos pararraios tornou-se indesejável, principalmente devido aos seguintes fatores:

- A montagem dos centelhadores se dá, via de regra, de forma “artesanal” propiciando erros de montagem, detectados somente no momento da inspeção através de ensaios de rotina;
- Dispersões significativas nos valores das tensões disruptivas de frequência fundamentais e impulsivas;
- A disrupção dos centelhadores representa um transitório na tensão que ao atingir os enrolamentos dos equipamentos protegidos pode causar uma solicitação entre espiras muito severa;
- A dispersão dos centelhadores dificulta a aplicação de pararraios em paralelo, fundamental na proteção de grandes bancos de capacitores série, de estações HVDC (High Voltage Direct Current) e alguns sistemas de Extra Alta Tensão (345, 440 e 500 kV).

A impossibilidade de se obter melhorias tecnológicas substanciais nas propriedades não-lineares dos resistores a base de Carboneto de Silício, visando a redução ou a eliminação das correntes subsequentes, limitou a evolução tecnológica desse tipo de pararraios.

Apesar das limitações tecnológicas, ainda existe uma quantidade significativa de pararraios de SiC instalados nos sistemas elétricos, tanto nas redes de distribuição quanto nas subestações.

#### d) Pararraios de Óxido de Zinco (ZnO) com centelhadores.

A tecnologia dos varistores de SiC perdurou sem concorrência até o final da década de 60 [7], quando um novo tipo de dispositivo utilizado para a proteção contra sobretensões foi desenvolvido.

Este dispositivo, formado por elementos cerâmicos a base de ZnO e pequenas quantidades de outros óxidos metálicos adicionados ao ZnO, tem se tornado cada vez mais importante nas instalações de alta tensão. A razão é que, quando comparado com o pararraios de SiC, possui vantagens consideráveis, como por exemplo, significativa

redução de tamanho, rápida resposta a impulsos de corrente e desempenho superior [10].

Pararraios de ZnO apresentam um elevado grau de não linearidade na sua característica “tensão-corrente”, proporcionando aos elementos de ZnO baixos valores de corrente na região de operação, associados a uma boa estabilidade quando continuamente solicitados pela tensão normal de serviço. Esse elevado grau de não linearidade pode ser observado na figura 2.7, que apresenta a característica “tensão-corrente” dos elementos de ZnO. A curva do pararraios de SiC também é indicada para comparação. Pode-se observar que os elementos de ZnO apresentam, contrariamente aos de SiC, uma dependência da temperatura para os baixos valores de corrente.

Esses elementos não-lineares a base de ZnO começaram a ser produzidos em escala industrial a partir de 1968, sendo inicialmente destinados à proteção de circuitos eletrônicos, caracterizados por baixos valores de tensão e de energia. A partir desse desenvolvimento, diversas empresas iniciaram estudos visando o desenvolvimento de resistores não-lineares de alta capacidade de absorção de energia que pudessem ser utilizados em sistemas elétricos de potência.

Os primeiros pararraios de ZnO desenvolvidos para sistemas de potência foram apresentados ao mercado no final da década de 70. Na década de 80 diversas empresas japonesas, européias e americanas, desenvolveram e produziram pararraios de ZnO para aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão.

Um tipo construtivo de pararraios utilizado principalmente na aplicação em redes de distribuição é o de ZnO com centelhadores. Nesse projeto, os centelhadores são adicionados em série aos elementos não-lineares de ZnO e têm como função principal "isolar" o pararraios do sistema sob condições de regime permanente, reduzindo a possibilidade de degradação dos elementos de ZnO, que são geralmente de características inferiores àqueles utilizados na montagem dos pararraios sem centelhadores. Desta forma, os centelhadores utilizados nesse projeto podem ser de construção simplificada, quando comparados aos utilizados na montagem dos pararraios de SiC.

Entre as vantagens desse tipo de pararraios em relação aos pararraios de SiC, pode-se citar a maior não-linearidade na característica "tensão x corrente" dos elementos não-lineares de ZnO, que reduz a amplitude da corrente subsequente à descarga a valores muito baixos, e menores valores de tensão residual.

#### e) Pararraios de ZnO sem centelhadores

A ausência dos centelhadores (elementos indispensáveis na montagem dos pararraios de SiC) neste tipo de pararraios deve-se a elevada não-linearidade na característica “tensão- corrente” dos elementos de ZnO, associadas a sua estabilidade térmica e a sua elevada capacidade de absorção de energia para sobretensões temporárias e transitórias [7]. A não utilização dos centelhadores torna os projetos de pararraios de ZnO mais simplificados, além de oferecer muitas vantagens em suas características de proteção e de operação.

No entanto, pelo fato de não possuírem centelhadores os pararraios de ZnO além de estarem permanentemente submetidos a tensão fase-terra de operação dos sistemas e a condições climáticas algumas vezes adversas, podem ser eventualmente solicitados por sobretensões temporárias ou transitórias que impõem aos pararraios uma quantidade de energia que deve ser dissipada para o meio externo, a fim de garantir a estabilidade térmica do pararraios. Portanto, cuidados devem ser tomados quando da seleção do tipo e das características dos pararraios, em função das reais necessidades dos sistemas.

Pararraios de ZnO sem centelhadores vêm sendo largamente utilizados na proteção dos sistemas elétricos. Em alguns países, como por exemplo o Japão, praticamente a totalidade dos pararraios instalados em seu sistema elétrico são do tipo ZnO sem centelhadores. No Brasil, empresas concessionárias de energia e grandes consumidores industriais vêm adquirindo pararraios de ZnO, seja na substituição dos pararraios convencionais de SiC ou em novos projetos [7].

#### **2.2.2 Forma de atuação e características dos pararraios**

Os blocos de ZnO ficam continuamente submetidos à tensão de operação do sistema. Além disso, estão também diretamente sujeitos a todo tipo de sobretensão que ocorra. Tal situação é diferente daquela encontrada para os pararraios de SiC uma vez que, nestes últimos, a presença dos centelhadores em série acaba por manter os blocos desconectados do sistema quando em tensão nominal ou para pequenos valores de sobretensão.

Dois tipos de invólucros podem ser encontrados para os pararraios de ZnO: porcelana e polimérico. Os pararraios com invólucro de porcelana, mais tradicionais, possuem uma camada de ar na região intermediária entre o invólucro e

superfície lateral dos blocos. Tal construção pode levar à explosão do dispositivo no momento de sua falha. Já no caso de invólucro polimérico busca-se eliminar tal camada de ar intermediária, evitando esse tipo de problema [4].

A tendência atual está voltada para o projeto e utilização de pararraios de ZnO sem centelhadores. No Brasil, embora grande parte dos pararraios em subestações ainda seja de SiC, as empresas concessionárias de energia têm adquirido pararraios de ZnO para as novas instalações e substituição dos equipamentos antigos, quando necessário. Com o objetivo de proteger os equipamentos do sistema contra as sobretensões atmosféricas ou de manobra os pararraios impedem que as sobretensões alcancem os equipamentos do sistema, atuando de forma similar à apresentada na figura 2.10, onde:

$U_a$  - tensão de disparo do pararraios;

$U_p$  - tensão residual do pararraios;

$v$  - velocidade de propagação do surto.

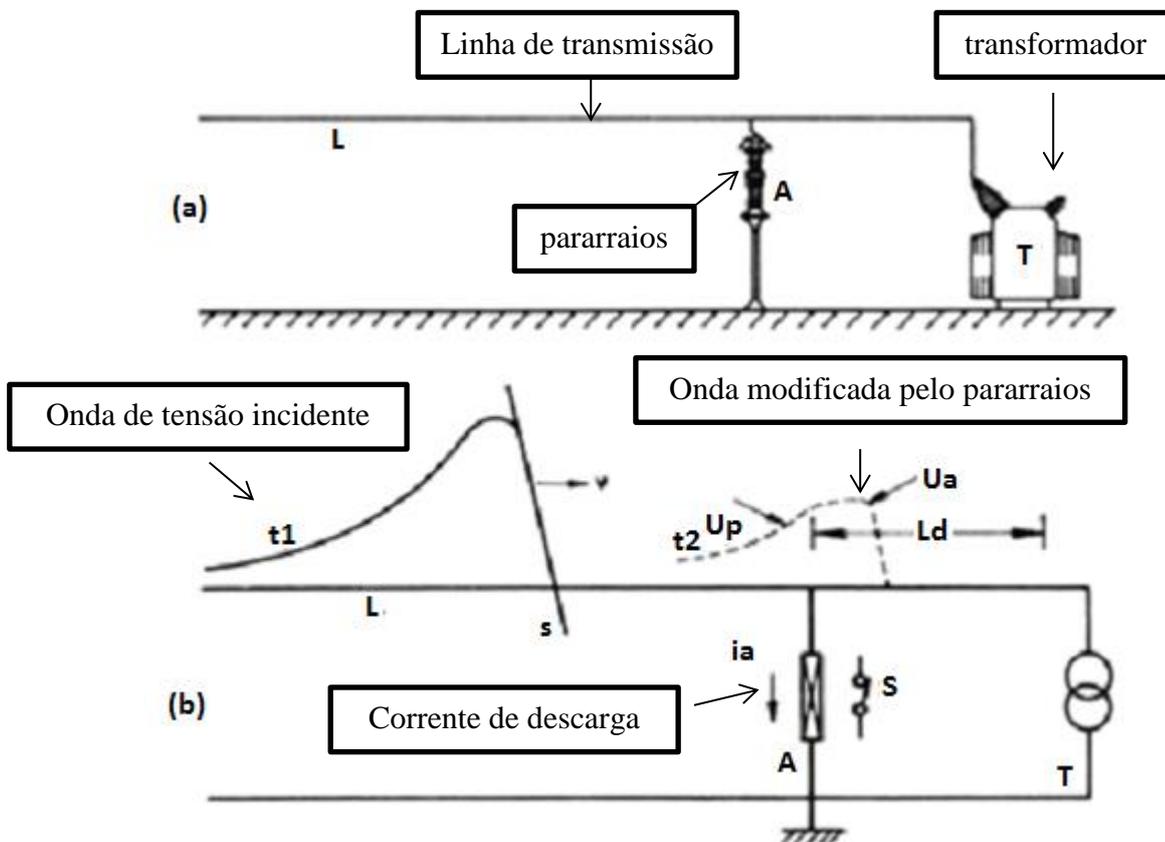


Fig. 2.10. Proteção de um transformador (a) Representação simbólica da instalação (b) Diagrama elétrico do funcionamento do pararraios (modificado de [6]).

Quando uma onda  $t_1$  incide em direção a um transformador T, tal como indicado na figura 2.10, o pararraios absorve uma onda de corrente  $i_a$  fazendo com que a sua tensão terminal seja apenas a onda  $t_2$ . No caso de uma sobretensão atmosférica, a amplitude de  $t_2$  não danificará o isolamento do transformador se a distância  $L_d$  é suficientemente pequena. A distância máxima permitida entre o pararraios e o transformador é convenientemente verificada através de simulações em programas digitais de transitórios eletromagnéticos [6].

O nível de proteção de um pararraios convencional (com centelhadores) é definido de acordo com o tipo de onda incidente da seguinte forma:

- Nível de proteção a impulso atmosférico – é o maior valor de crista da tensão de impulso atmosférico que pode ocorrer entre os terminais de um pararraios, sob condições especificadas, sendo fixado numericamente pelo valor máximo entre a tensão de impulso cortada na frente (dividida por 1,15), a tensão disruptiva de impulso atmosférico (onda  $1,2 \times 50 \mu s$ ) e a tensão residual para uma determinada corrente de descarga.
- Nível de proteção a impulso de manobra – é o maior valor de crista da tensão de impulso de manobra que pode ocorrer entre os terminais de um pararraios, sendo fixado numericamente pelo valor máximo entre a tensão residual para uma determinada corrente de descarga e a tensão disruptiva a impulso de manobra.

No caso de um pararraios desprovido de centelhador (pararraios de ZnO), o nível de proteção é definido de forma similar àquela utilizada para os pararraios convencionais, com exceção da tensão disruptiva que é uma característica exclusiva dos pararraios com centelhadores. Dito de outra forma, o pararraios tem que limitar a sobretensão a um valor menor que a suportabilidade do isolamento do transformador.

Segundo dados de 2010, colhidos das empresas integrantes da ABRATE (Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica), a população dos pararraios de SiC e ZnO até 500 kV é de 18.273 unidades, distribuídos em 42% de pararraios de SiC e 58% de pararraios de ZnO. Comparando esses dados com o percentual de pararraios de SiC e ZnO de 13,8 kV a 765 kV instalados no Sistema Elétrico Brasileiro, (dados de 2004), onde haviam 64% de pararraios SiC e 36% de pararraios de ZnO, percebe-se que os pararraios de SiC vêm sendo gradativamente

substituídos, o que evidencia que esses pararraios, de tecnologia obsoleta, estão chegando ao fim de sua vida útil [11]. Neste trabalho será utilizado apenas o pararraios de ZnO.

### **2.2.3 Características construtivas**

Os pararraios de ZnO são equipamentos de estrutura simples. No caso mais comum, sem a presença de centelhadores, consistem basicamente em uma coluna de blocos de resistores não-lineares de ZnO, responsável pela limitação das sobretensões, envolvida por um invólucro externo, responsável pela proteção mecânica, isolamento e estanqueidade dos componentes internos. Existem atualmente dois tipos de invólucro, de porcelana ou polimérico, sendo cada um com diferentes concepções de montagem.

Os resistores não-lineares de ZnO são os principais componentes dos pararraios. Seu formato geralmente é cilíndrico, com o diâmetro escolhido de acordo com a capacidade de absorção de energia desejada para o equipamento. As características dos materiais utilizados nestes varistores dependem da sua estrutura, sendo também dependentes da sua composição química e de seu tratamento térmico

Para a montagem do pararraios com invólucro de porcelana, de um modo geral, os varistores são mantidos de forma concêntrica, de modo a minimizar efeitos de distribuição não uniforme de campo elétrico e ionização interna. Para evitar explosão violenta do invólucro no caso de falha, são utilizados mecanismos de alívio de sobrepressão [1].

O surgimento dos pararraios de ZnO com invólucro polimérico acarretou em mudanças nas características mecânicas do pararraios. Atualmente, existem duas concepções de projetos de pararraios poliméricos. A primeira é equivalente aos projetos de pararraios com invólucro de porcelana, sendo primeiro feito o molde externo e então inserido o conjunto de blocos de ZnO. É normalmente colocado um tubo de fibra de vidro entre os blocos de varistores e o invólucro polimérico, aumentando a resistência mecânica do dispositivo. Este tipo de projeto também apresenta um espaçamento interno de ar, entre o polímero e os varistores, sendo necessária a utilização de dispositivos de alívio de sobrepressão. Na segunda concepção de projeto, mais utilizada, o invólucro é injetado diretamente sobre o conjunto de blocos de ZnO, eliminando quase totalmente a possibilidade de penetração de umidade. A figura 2.11 mostra

exemplos de pararraios, sendo um com invólucro de porcelana e outro com invólucro polimérico.

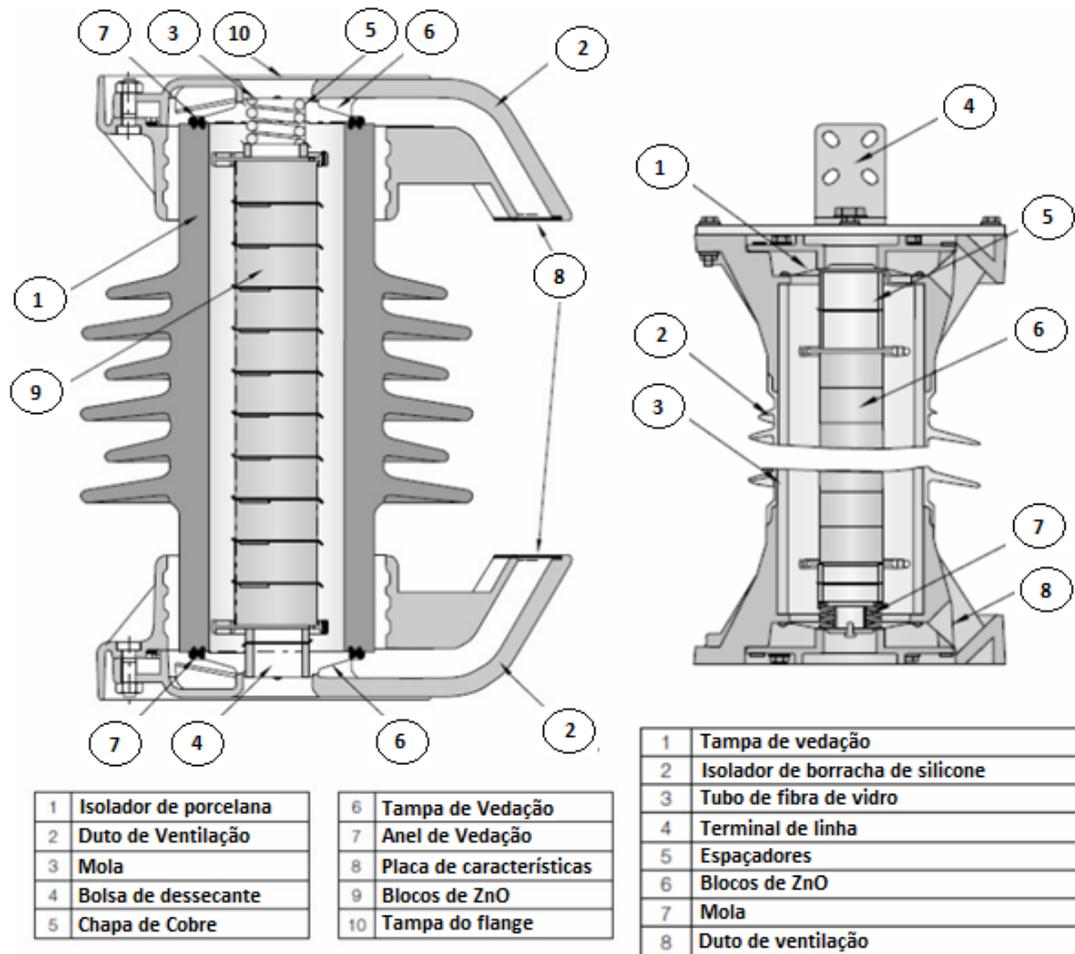


Figura 2.11: Pararraios de ZnO com invólucro de porcelana (esquerda) e polimérico (direita) [1].

Em sistemas que requerem maior capacidade de absorção de energia, alguns fabricantes vêm optando pela montagem de pararraios multi-coluna. Esta montagem consiste em colocar conjuntos de pastilhas de ZnO em paralelo, que podem estar em um mesmo invólucro ou separadas. Para ambas as construções, cuidados especiais devem ser tomados, para que a repartição de corrente seja a mais uniforme possível [1].

A seguir, descrevem-se alguns dos principais termos aplicados aos pararraios de ZnO sem centelhador:

- a) Tensão nominal ( $U_r$ ) - Valor máximo eficaz, em frequência industrial, para a qual o pararraios foi projetado a operar sem perder sua estabilidade térmica. É

utilizado como parâmetro de referência para a especificação das características de proteção e operação.

- b) Máxima tensão contínua de operação ( $U_c$  ou MCOV) - Máxima tensão em frequência industrial que pode ser aplicada continuamente sobre o pararraios, sem que sejam alteradas suas propriedades.
- c) Capacidade de sobretensão temporária - Função da característica de suportabilidade “tensão-duração”, indicando a quantidade de tempo para a qual é permitida a aplicação de tensão superior à tensão máxima de operação contínua.
- d) Corrente de referência - Valor de crista da componente resistiva da corrente na frequência industrial utilizada para definir sua tensão de referência. Parâmetro estabelecido pelo fabricante.
- e) Tensão de referência - Ponto de transição entre as regiões de baixas correntes e de alta não-linearidade. Valor eficaz da tensão que se estabelece nos terminais do pararraios quando se circula a corrente de referência.
- f) Tensão residual - Máximo valor da tensão que se estabelece no pararraios quando este é atravessado por uma corrente de impulso. A tensão residual depende da forma de onda, amplitude e taxa de crescimento da corrente de impulso aplicada.
- g) Capacidade de absorção de energia - Valor da maior quantidade de energia a que pode ser submetido o pararraios sem que sofra alterações significativas de suas características após o retorno às condições normais de operação. O pararraios deve garantir que essa energia seja dissipada eficientemente, evitando consequências sérias aos equipamentos do sistema elétrico e a si próprio.

#### **2.2.4 Defeitos típicos encontrados em Pararraios**

Diversos fatores podem contribuir para a degradação do pararraios. Entre eles, pode-se destacar a perda da estanqueidade e penetração da umidade, contaminação

externa do invólucro – poluição superficial, descargas parciais internas, descargas de longa duração ou de curta duração com alta intensidade, degradação dos varistores, desalinhamento da coluna ativa, distribuição irregular da tensão. Alguns desses fatores, contribuindo isoladamente ou em conjunto, podem provocar a atuação do dispositivo para a tensão operativa do sistema, provocando explosão ou queima.

A degradação dos pararraios de ZnO pode ocorrer devido a fatores tanto de natureza elétrica e térmica quanto de fatores externos e ambientais, modificando a condição de operação do equipamento. Essas alterações podem causar problemas para o próprio pararraios, levando o equipamento à interrupção na tensão operativa do sistema e ao aumento da corrente de fuga que passa por ele, podendo resultar em danos ao sistema elétrico. A seguir estão descritos alguns fatores que podem causar a degradação de pararraios de ZnO.

- a) Perda da estanqueidade e penetração da umidade - É considerada a principal causa de falha em pararraios. A umidade se infiltra através de trincas no invólucro do pararraios ou da deterioração do sistema de vedação e/ou dos dispositivos de alívio de sobrepressão. Com a penetração da umidade, pode haver a corrosão dos componentes metálicos. Ainda, devido à absorção de umidade pelos blocos de ZnO, a curva V-I<sub>r</sub> (corrente resistiva) pode ser alterada, aumentando a corrente de fuga resistiva e alterando os níveis de proteção, comprometendo o isolamento externo e reduzindo a capacidade de absorção de energia do equipamento.
- b) Contaminação externa - Com o depósito de materiais contaminantes, como umidade e poeira, ao longo do invólucro do pararraios, há uma alteração na distribuição da tensão, com conseqüente aquecimento do pararraios. A contaminação gera também ionização interna, através de descargas internas que produzem alterações irreversíveis na composição do gás interno devido a reações químicas, queima de oxigênio e a formação de compostos químicos. A ausência do oxigênio e os novos gases gerados pelas descargas causam o envelhecimento dos blocos de ZnO, aumentando a corrente de fuga resistiva, o que pode conduzir à instabilidade térmica do pararraios e sua falha.

- c) Descargas internas - As descargas internas que podem ocorrer no pararraios devido ao efeito corona originam gases que podem prejudicar as propriedades químicas e dielétricas do material que recobre os blocos de ZnO. Com isso, há o desvio de correntes para a superfície dos varistores, evitando a sua atuação na limitação e eliminação das correntes subsequentes aos disparos para surtos de tensão.
  
- d) Descargas de longa duração ou de alta intensidade com curta duração - As descargas de longa duração podem ocorrer com o chaveamento de grandes bancos de capacitores ou de linhas longas em vazio, ocasionando queimas ou rachaduras dos varistores. Os impulsos de alta intensidade e curta duração podem ocorrer se concentrando em um único ponto, podendo perfurar os blocos de ZnO. Esta forma de degradação também pode provocar uma redução na máxima temperatura para o qual o resistor não-linear tem capacidade de dissipar energia, podendo ocorrer instabilidade térmica no caso de a energia absorvida ser maior que a capacidade de dissipação dos resistores não-lineares.

## **2.3 Ferramentas analíticas utilizadas no projeto**

Nesta seção são apresentadas as ferramentas analíticas utilizadas ao longo do trabalho, sejam: Série e Transformada de Fourier contínua; série e transformada de Fourier discreta; e a difratometria a raios-x.

### **2.3.1 Série e transformada de Fourier contínua**

A série e a transformada de Fourier convertem sinais do domínio de tempo em representações no domínio de frequência (ou espectrais). Além de permitir representações espectrais de sinais, a análise de Fourier é também essencial à descrição de certos tipos de sistemas e de suas propriedades no domínio da frequência.

#### **a) Representação em série de Fourier de sinais periódicos**

Um sinal em tempo contínuo  $x(t)$  será periódico se existir um valor de  $T$  diferente de zero positivo, tal que

$$x(t + T) = x(t), \forall t \quad (2.3)$$

O período fundamental  $T_0$  de  $x(t)$  é o menor valor positivo de  $T$  para o qual a equação 2.3 é satisfeita, e  $1/T_0 = f_0$  é denominado frequência fundamental.

A representação em série de Fourier exponencial complexa de um sinal periódico  $x(t)$  com período fundamental  $T_0$  é dada por

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega_0 t}, \text{ onde } \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (2.4)$$

onde  $c_k$  são conhecidos como coeficientes de Fourier complexos e são dados por

$$c_k = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (2.5)$$

onde  $\int_{T_0}$  denota uma integração realizada no intervalo de um período, usando-se comumente os intervalos de 0 a  $T_0$  ou  $-T_0/2$  a  $T_0/2$  para a integração. Fazendo  $k=0$  na equação 2.5 tem-se

$$c_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) dt \quad (2.6)$$

Indicando que  $c_0$  é igual ao valor médio de  $x(t)$  em um período. Quando  $x(t)$  é real, então, da equação 2.5, decorre

$$c_{-k} = c_k^* \quad (2.7)$$

Onde o asterisco indica conjugado complexo.

#### b) Transformada de Fourier de sinais contínuos

Seja  $x(t)$  um sinal não periódico de duração finita, isto é,

$$x(t) = 0, \text{ onde } |t| > T_1 \quad (2.8)$$

Esse sinal é mostrado na figura 2.12 (a). Seja  $x_{T_0}(t)$  um sinal periódico formado pela repetição de  $x(t)$  tendo  $T_0$  como período fundamental, como mostrado na figura 2.12 (b). Fazendo  $T_0 \rightarrow \infty$ , chega-se a

$$\lim_{T_0 \rightarrow \infty} x_{T_0}(t) = x(t) \quad (2.9)$$

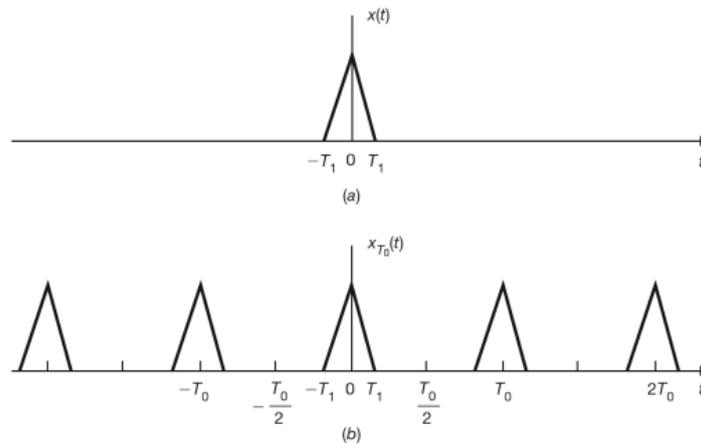


Figura. 2.12. (a) Sinal não periódico  $x(t)$ ; (b) sinal periódico formado pela extensão periódica de  $x(t)$  [12].

A série de Fourier exponencial complexa de  $x_{T_0}(t)$  é dada por

$$x_{T_0}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega_0 t}, \text{ onde } \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (2.10)$$

onde

$$C_k = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x_{T_0}(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (2.11)$$

Como  $x_{T_0} = x(t)$ , para  $|t| < T_0/2$ , e como também  $x(t) = 0$  fora desse intervalo, a equação 2.11 pode ser reescrita como

$$C_k = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (2.12)$$

Pode-se então definir  $X(\omega)$  como sendo

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.13)$$

A partir da equação 2.12 os coeficientes de Fourier complexos  $C_k$  podem ser expressos como

$$C_k = \frac{1}{T_0} X(k\omega_0) \quad (2.14)$$

Substituindo a equação 2.14 na equação 2.10 obtém-se como resultado

$$x_{T_0}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T_0} X(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t}$$

ou

$$x_{T_0}(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t} \omega_0 \quad (2.15)$$

Quando  $T_0 \rightarrow \infty$ ,  $\omega_0 = 2\pi/T_0$  torna-se infinitesimal ( $\omega_0 \rightarrow 0$ ). Assim sendo, fazendo  $\omega_0 = \Delta\omega$  a equação 2.15 torna-se

$$x_{T_0}(t)|_{T_0 \rightarrow \infty} \rightarrow \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k\Delta\omega) e^{jk\Delta\omega t} \Delta\omega \quad (2.16)$$

Portanto

$$x(t) = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} x_{T_0}(t) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k\Delta\omega) e^{jk\Delta\omega t} \Delta\omega \quad (2.17)$$

O somatório no lado direito da equação 2.17 pode ser visto como a área debaixo da função  $X(\omega)e^{j\omega t}$ , como mostrado na figura 2.13. Portanto,

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.18)$$

Que é a representação de Fourier de um sinal  $x(t)$  não periódico.

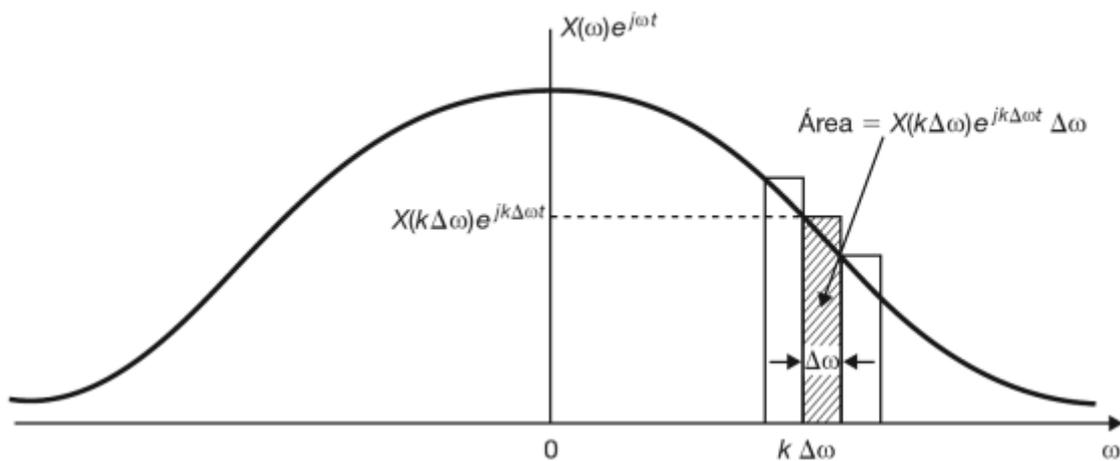


Figura 2.13: Interpretação gráfica da equação 2.17 [12].

A função  $X(\omega)$  definida pela equação 2.13, é denominada transformada de Fourier de  $x(t)$  e a equação 2.18 define a transformada de Fourier inversa de  $X(\omega)$ .

### 2.3.2 Série e transformada de Fourier discreta

A análise de Fourier desempenha o mesmo papel fundamental em tempo discreto e em tempo contínuo, como poderá ser percebido há muitas semelhanças entre

as técnicas da análise de Fourier em tempo discreto e as técnicas equivalentes em tempo contínuo. Contudo há importantes diferenças que devem ser levadas em conta.

a) Representação em série de Fourier de sinais discretos

Um sinal de tempo discreto  $x[n]$  será periódico se existir um inteiro positivo  $N$  para o qual

$$x[n + N] = x[n] \quad (2.19)$$

O período fundamental  $N_0$  de  $x[n]$  é o menor inteiro positivo de  $N$  para o qual a equação 2.19 é satisfeita. Dado a sequência exponencial complexa

$$x[n] = e^{j\left(\frac{2\pi}{N_0}\right)n} = e^{j\Omega_0 n} \quad (2.20)$$

Que é uma sequência periódica onde  $\Omega_0 = 2\pi/N_0$  e o período fundamental é  $N_0$ . Uma distinção muito importante entre as exponenciais complexas de tempo discreto e de tempo contínuo é que os sinais  $e^{j\omega_0 t}$  são diferentes para valores diferentes de  $\omega_0$ , entretanto, as sequências  $e^{j\Omega_0 t}$ , que são diferentes em frequências por um múltiplo de  $2\pi$ , são idênticas. Isto é,

$$e^{j(\Omega_0 + 2\pi k)n} = e^{j\Omega_0 n} e^{j2\pi kn} = e^{j\Omega_0 n} \quad (2.21)$$

Seja

$$\begin{aligned} \Psi_k[n] &= e^{jk\Omega_0 n}, \text{ onde } \Omega_0 = \frac{2\pi}{N_0} \quad k \\ &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned} \quad (2.22)$$

Então pela equação 2.21, obtém-se

$$\Psi_0[n] = \Psi_{N_0}[n] \quad \Psi_1[n] = \Psi_{N_0+1}[n] \quad \dots \quad \Psi_k[n] = \Psi_{N_0+k}[n] \quad (2.23)$$

e mais genericamente

$$\Psi_k[n] = \Psi_{k+mN_0}[n] \quad m = \text{inteiro} \quad (2.24)$$

Assim, as sequências  $\Psi_k[n]$  são distintas somente em um intervalo de  $N_0$  valores sucessivos de  $k$ . A representação em série de Fourier discreta de uma sequência periódica  $x[n]$  com período fundamental  $N_0$  é dada por

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N_0-1} C_k e^{jk\Omega_0 n}, \text{ onde } \Omega_0 = \frac{2\pi}{N_0} \quad (2.25)$$

onde  $C_k$  são os coeficientes de Fourier e são dados por

$$C_k = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} x[n] e^{-jk\Omega_0 n} \quad (2.26)$$

Decorrente da equação 2.24, a equação 2.25 e a equação 2.26 podem ser escritas como

$$x[n] = \sum_{k=(N_0)} C_k e^{jk\Omega_0 n}, \text{ onde } \Omega_0 = \frac{2\pi}{N_0} \quad (2.27)$$

$$C_k = \frac{1}{N_0} \sum_{n=(N_0)} x[n] e^{-jk\Omega_0 n} \quad (2.28)$$

onde  $\sum_{k=(N_0)}$  designa que o somatório é em relação a  $k$ , onde  $k$  varia em um intervalo de  $N_0$  inteiros sucessivos. Fazendo  $k = 0$  na equação 2.28 chega-se a

$$C_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{n=(N_0)} x[n] \quad (2.30)$$

Mostrando que  $C_0$  é igual ao valor médio de  $x[n]$  em um período. Os coeficientes de Fourier  $C_k$  são denominados frequentemente coeficientes espectrais de  $x[n]$  [12].

b) Transformada de Fourier de sinais discretos

Seja  $x[n]$  uma sequência não periódica de duração finita. Isto é, para algum inteiro positivo  $N_1$ ,

$$x[n] = 0 \quad |n| > N_1 \quad (2.31)$$

essa sequência está mostrada na figura 2.14 (a). Seja  $x_{N_0}[n]$  uma sequência periódica formada pela repetição de  $x[n]$ , com período fundamental  $N_0$ , como mostrado na figura 2.14 (b). Se  $N_0 \rightarrow \infty$ , então

$$\lim_{N_0 \rightarrow \infty} x_{N_0}[n] = x[n] \quad (2.32)$$

A série de Fourier discreta de  $x_{N_0}[n]$  é dada por

$$x_{N_0}[n] = \sum_{k=(N_0)} C_k e^{jk\Omega_0 n}, \quad \text{onde } \Omega_0 = \frac{2\pi}{N_0} \quad (2.33)$$

onde

$$C_k = \frac{1}{N_0} \sum_{n=(N_0)} x_{N_0}[n] e^{-jk\Omega_0 n} \quad (2.34)$$

como  $x_{N_0}[n] = x[n]$  para  $|n| \leq N_1$  e como também  $x[n] = 0$  fora desse intervalo, a equação 2.34 pode ser reescrita como

$$C_k = \frac{1}{N_0} \sum_{n=-N_1}^{N_1} x[n] e^{-jk\Omega_0 n} = \frac{1}{N_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-jk\Omega_0 n} \quad (2.35)$$

Define-se então  $X(\Omega)$  como

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\Omega n} \quad (2.36)$$

A partir da equação 2.35, os coeficientes de Fourier  $C_k$  podem ser expressos como

$$C_k = \frac{1}{N_0} X(k\Omega_0) \quad (2.37)$$

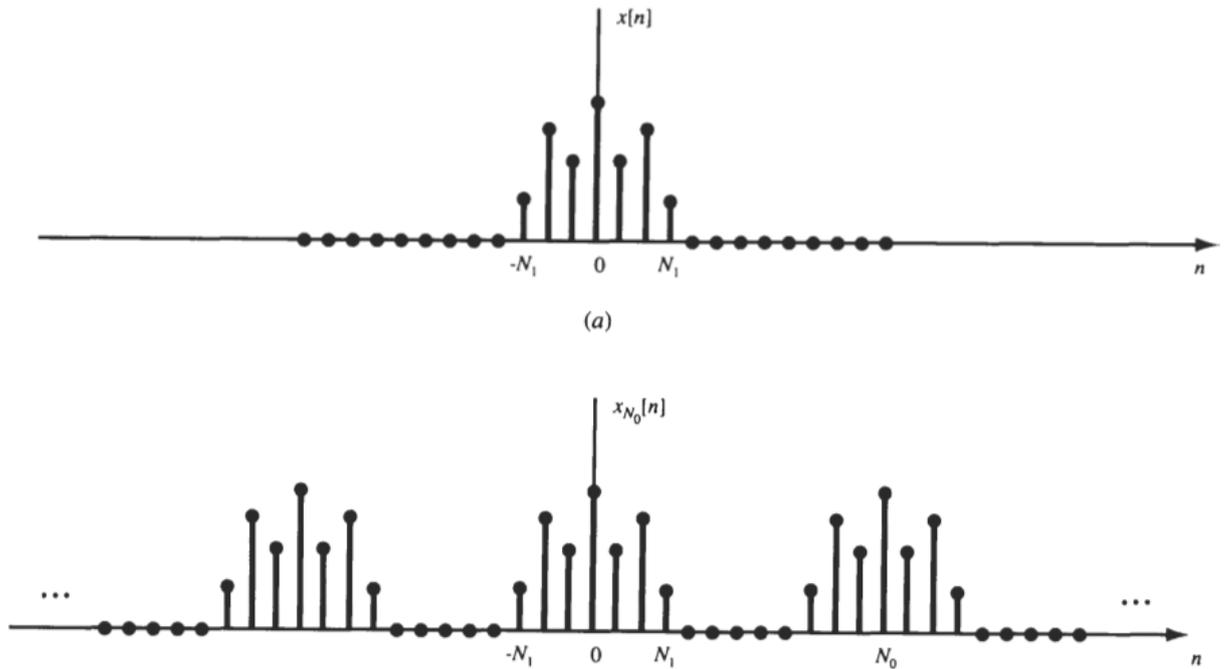


Fig. 2.14. (a) Sequência finita não periódica  $x[n]$ ; (b) sequência periódica formada pela extensão periódica de  $x[n]$  [12].

Substituindo a equação 2.37 na equação 2.33, chega-se a

$$x_{N_0}[n] = \sum_{k=(N_0)} \frac{1}{N_0} X(k\Omega_0) e^{jk\Omega_0 n} \quad (2.38)$$

ou

$$x_{N_0}[n] = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=(N_0)} X(k\Omega_0) e^{jk\Omega_0 n} \Omega_0 \quad (2.39)$$

Da equação 2.36,  $X(\Omega)$  é periódica com período  $2\pi$  e assim também é  $e^{j\Omega n}$ . Portanto, o produto  $X(\Omega) e^{j\Omega n}$  também será periódico com período  $2\pi$ . Como está mostrado na figura 2.15, cada termo do somatório da equação 2.39 representa a área de um retângulo de altura  $X(k\Omega_0) e^{jk\Omega_0 n}$  e largura  $\Omega_0$ . Quando  $N_0 \rightarrow \infty$ ,  $\Omega_0 = 2\pi/N_0$  torna-se infinitesimal ( $\Omega_0 \rightarrow 0$ ) e a equação 2.39 torna-se um integral. Além disso, como o somatório da equação 2.39 ocorre em  $N_0$  intervalos consecutivos de largura  $\Omega_0 = 2\pi/N_0$ , o intervalo total de integração terá sempre uma largura  $2\pi$ . Assim, quando  $N_0 \rightarrow \infty$  e tendo em vista a equação 2.32, a equação 2.39 torna-se

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(\Omega) e^{j\Omega n} d\Omega \quad (2.40)$$

Como  $X(\Omega) e^{j\Omega n}$  é periódica com período  $2\pi$ , o intervalo de integração na equação 2.40 pode ser tomado como sendo qualquer intervalo de comprimento  $2\pi$ .

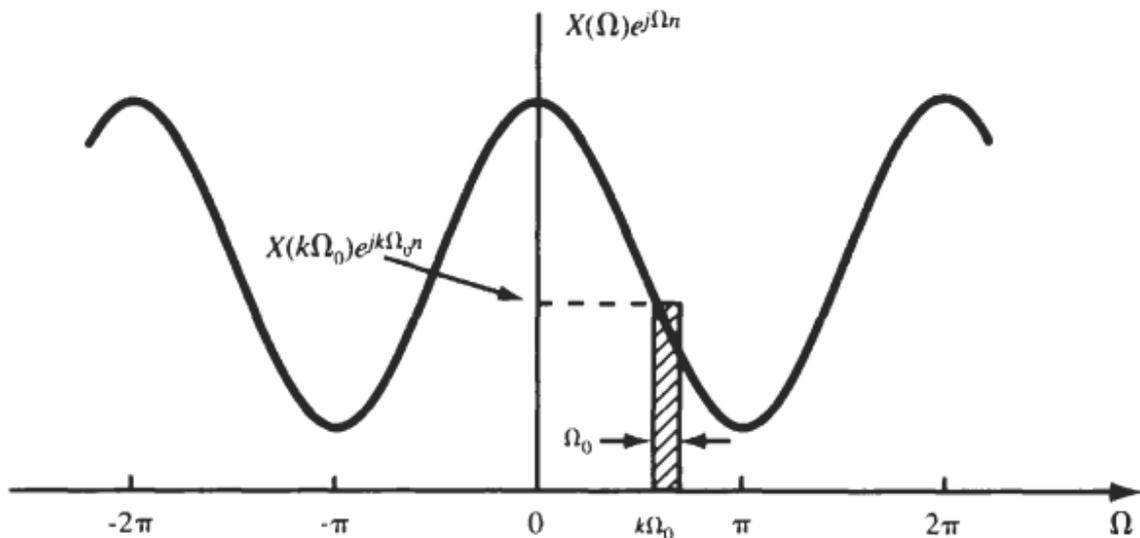


Figura. 2.15. Interpretação gráfica da equação 2.39 [12].

A função  $X(\Omega)$ , definida pela equação 2.36, é denominada transformada de Fourier de  $x[n]$  e a equação 2.40 define a transformada de Fourier inversa de  $X(\Omega)$ .

c) Transformada de Fourier de sinais discretos para sequências de comprimento finito (DFT)

Seja  $x[n]$  uma sequência de tamanho finito de comprimento  $N$ , isto é,

$$x[n] = 0 \text{ , fora do intervalo } 0 \leq n \leq N - 1 \quad (2.41)$$

A DFT de  $x[n]$ , representada por  $X[k]$ , é definida por

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn} \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2.42)$$

Onde  $W_N$  é a raiz de ordem  $N$  da unidade e é dada por

$$W_N = e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \quad (2.43)$$

A DFT inversa é dada por

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] W_N^{-kn} \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2.44)$$

As características importantes da DFT são as seguintes [12]:

- Há uma correspondência biunívoca entre  $x[n]$  e  $X[k]$ .
- Existe um algoritmo extremamente rápido, denominado transformada rápida de Fourier (FFT), para seu cálculo.
- A DFT relaciona-se de perto com a série de Fourier discreta e com a transformada de Fourier de sinais discretos.

- A DFT é a representação de Fourier adequada para uso em computadores digitais porque é discreta e de comprimento finito, nos domínios tanto de tempo como de frequência.

Pode-se observar que o valor escolhido de  $N$  na equação 2.42 não está fixado. Se  $x[n]$  tiver tamanho  $N_1 < N$ , pode-se fazer que  $x[n]$  tenha tamanho  $N$ , simplesmente acrescentando  $(N - N_1)$  amostras de valor 0. Esse acréscimo de amostras auxiliares é conhecido como preenchimento de zeros [12]. Por meio de uma escolha criteriosa do valor de  $N$  como, por exemplo, usar uma potência de 2, pode-se aumentar a eficiência dos cálculos computacionais.

### 2.3.3 Difractometria de raios X

Quando se fala em raios X, a primeira aplicação que vem à mente da maioria das pessoas é a radiografia, processo que usa os raios X para visualizar o interior de objetos (ou de pessoas) ao colocá-los entre uma fonte de raios x e uma chapa fotográfica. De fato, essa é a mais comum das aplicações desse tipo de radiação e a primeira a ser utilizada desde a descoberta desses raios. Porém, devido ao fenômeno da difração de raios X, é possível estudar materiais a nível atômico, descobrindo e estudando sua estrutura.

O espalhamento e a consequente difração de raios X é um processo que pode ser analisado em diferentes níveis. No mais básico deles, há o espalhamento de raios X por um elétron. Esse espalhamento pode ser coerente ou incoerente. No espalhamento coerente, a onda espalhada tem direção definida, mesma fase e mesma energia em relação à onda incidente. Trata-se de uma colisão elástica. No espalhamento incoerente, a onda espalhada não tem direção definida. Ela não mantém a fase nem a energia (é o chamado Efeito Compton). A colisão é inelástica, e a energia referente à diferença entre a onda incidente e a onda espalhada traduz-se em ganho de temperatura (vibração do átomo).

Se os átomos que geram este espalhamento estiverem arranjados de maneira sistemática, como em uma estrutura cristalina (figura 2.16), apresentando entre eles distâncias próximas ao do comprimento de onda da radiação incidente, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que efeitos de difração dos raios X podem ser observados em vários ângulos.

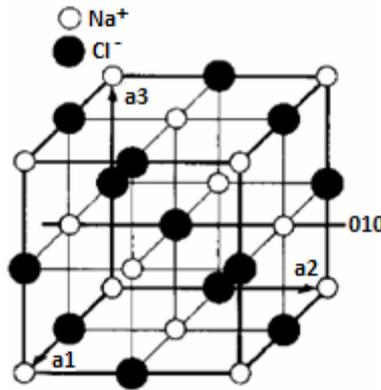


Figura 2.16: Estrutura cristalina do NaCl mostrando arranjo regular dos íons  $\text{Na}^{+1}$  e  $\text{Cl}^{-1}$ [13].

Considerando-se dois ou mais planos de uma estrutura cristalina, as condições para que ocorra a difração de raios X (interferência construtiva ou numa mesma fase) vão depender da diferença de caminho percorrida pelos raios X e o comprimento de onda da radiação incidente. Esta condição é expressa pela lei de Bragg, ou seja  $n\lambda = 2d\sin\theta$ , cujos parâmetros estão ilustrados na figura. 2.17. Onde  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente, “n” a um número inteiro que representa a ordem de difração, “d” à distância interplanar para o conjunto de planos hkl (índice de Miller) da estrutura cristalina e  $\theta$  ao ângulo de incidência dos raios X (medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos).

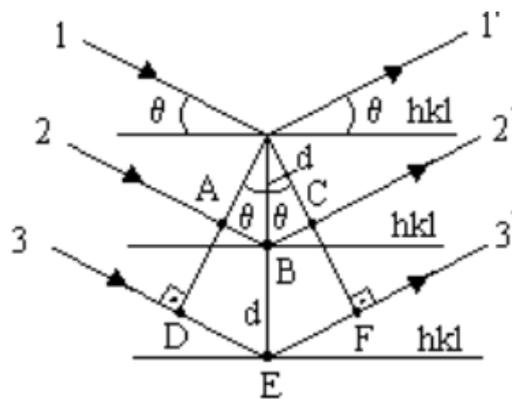


Figura 2.17: Interferência entre raios a nível planar [14].

As linhas horizontais representamos planos cristalinos, e as setas representam os raios X incidentes no cristal. Quando a condição  $\lambda = 2d\sin\theta$  é obedecida, há um pico de intensidade. A intensidade difratada, dentre outros fatores, é dependente do número de elétrons no átomo. Adicionalmente, os átomos são distribuídos no espaço, de tal forma

que os vários planos de uma estrutura cristalina possuem diferentes densidades de átomos ou elétrons, fazendo com que as intensidades difratadas sejam, por consequência, distintas para os diversos planos cristalinos.

#### a) Cristais e suas estruturas

Numa definição simples e concisa, cristais são arranjos atômicos ou moleculares cuja estrutura se repete numa forma periódica tridimensional. Um exemplo simples é o do sal de cozinha, NaCl, cuja estrutura consiste em átomos de Sódio e Cloro dispostos de forma que um átomo de sódio terá sempre átomos de cloro como vizinhos e vice-versa, como mostrado na figura 2.16.

A figura 2.16 mostra a célula unitária do NaCl. Célula unitária é a menor estrutura que representa um cristal, isto é, um cristal é formado por diversas células unitárias arranjadas tridimensionalmente (esse arranjo é também chamado de rede cristalina). Existem células unitárias com sete tipos de simetria: cúbica, tetragonal, ortorrômbica, romboédrica (ou trigonal), hexagonal, monoclínica e triclínica. O que diferencia esses tipos de células unitárias é a relação entre seus parâmetros de rede. Os seis parâmetros de rede definem a célula unitária da seguinte forma: a, b e c indicam o comprimento dos três eixos, enquanto  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são os três ângulos existentes em um vértice da célula. No caso do cristal de NaCl a simetria é cúbica com  $a = b = c = 5.64\text{Å}$  e  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ . A figura 2.18 define quais as relações entre os sete tipos de simetria e os parâmetros de rede de suas células unitárias.

Sistema	Parâmetros de rede
Cúbico	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ortorrômbico	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Romboédrico	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Hexagonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma \neq 120^\circ$
Monoclínico	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Triclínico	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

Figura 2.18: Padrões de simetria e seus parâmetros [14].

## b) Geometria

Para simplificar a representação de planos cristalinos, utiliza-se uma representação chamada espaço recíproco. Trata-se da utilização de três índices,  $h$ ,  $k$  e  $l$  (conhecidos como índices de Miller) que correspondem ao inverso do valor em que o plano corta os eixos convencionais. Para facilitar o entendimento da representação, a figura 2.19 mostra a representação de um plano que corta um cristal cúbico no espaço real e seus índices no espaço recíproco:

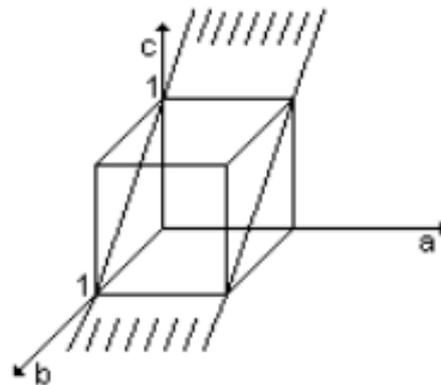


Figura 2.19: Plano cortando o cristal seguindo a diagonal das faces [14].

Na figura 2.19, o plano corta o cristal seguindo a diagonal das faces. Ele corta os eixos  $b$  e  $c$  em 1 e não corta o eixo  $a$ . Logo, para calcular os índices de Miller dos planos tem-se:

$$h = 1/\infty = 0$$

$$k = 1/1 = 1$$

$$l = 1/1 = 1$$

Pode-se chamar o plano de (011).

Quando o cristal é hexagonal, o sistema de índices utilizados é diferente. A figura 2.20 mostra a célula unitária de um cristal hexagonal. A célula unitária do cristal é delimitada pelos traços mais fortes. As outras duas partes do prisma hexagonal correspondem à rotações da célula unitária.

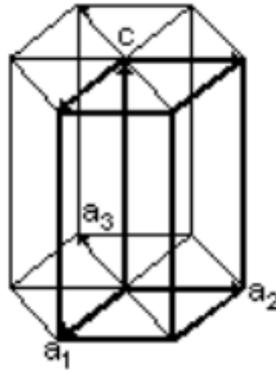


Figura 2.20: Célula unitária hexagonal [14].

Note que nesse caso há quatro eixos:  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $c$ . Seus índices de Miller são chamados  $h$ ,  $k$ ,  $i$  e  $l$ . É importante observar que o vetor  $i$  é o simétrico da soma dos vetores  $h$  e  $k$  (isto é,  $h + k = -i$ ). Para exemplificar a representação de planos em um cristal hexagonal é feito o cálculo do plano representado na figura 2.21.

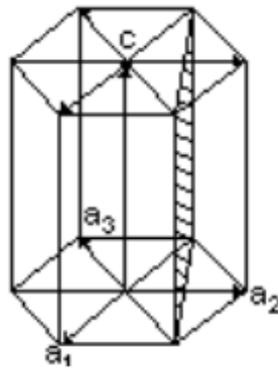


Figura 2.21. Plano cortando célula unitária hexagonal [14].

Na Fig. 2.21, o plano corta o cristal verticalmente. O eixo  $a_1$  e o  $a_3$ , são cortados pelo plano em  $-1$ . Em  $a_2$ , o plano corta o eixo em  $1/2$ . Fazendo,

$$h = 1/(-1) = -1$$

$$k = 1/(1/2) = 2$$

$$i = -(h + k) = -(1) = -1$$

$$l = 1/\infty = 0 \text{ (o plano não corta o eixo } c)$$

o plano pode então ser representado por  $(1 \bar{2} 1 \bar{0})$ . A utilização dos índices de Miller para representação de planos é prática por necessitar apenas de três (ou quatro) índices (e não de expressões geométricas) para representar os planos.

#### b) Identificação de fases cristalinas

Utilizando os índices de Miller para representação de planos, pode-se aplicá-los à lei de Bragg. Para calcular a distância entre dois planos cristalinos (distância interplanar), quando  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ , utiliza-se a equação 2.35.

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}}} \quad (2.35)$$

Onde a, b e c são os parâmetros de rede do cristal considerado. Para exemplificar será calculada a distância entre dois planos 220 ( $hkl = 220$ ) do cristal de NaCl (simetria cúbica, com parâmetros de rede  $a = b = c = 5,640\text{Å}$ ).

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2^2}{5,640^2} + \frac{2^2}{5,640^2} + \frac{0^2}{5,640^2}}} = 1,994\text{Å} \quad (2.36)$$

Substituindo então o valor na lei de Bragg, pode-se encontrar o ângulo de Bragg (ângulo onde há um pico de intensidade devido à interferência construtiva das ondas espalhadas) relativo a esse plano.

$$\begin{aligned} \lambda &= 2d_{hkl} \sin \theta \\ 1,54 &= 2(1,994) \sin \theta \\ \theta &= 22,7^\circ \end{aligned}$$

Foi usado o valor  $1,54\text{Å}$  para  $\lambda$ . Trata-se do comprimento de onda da radiação que o cobre emite quando usado como alvo em tubos de raios-x.

O significado desses cálculos é que, incidindo um feixe de raios X a um ângulo de incidência de  $22,7^\circ$ , haverá um pico de intensidade, devido ao plano 220. Se o feixe for incidido em ângulos variáveis em uma amostra com uma certa distribuição de

pequenos cristalitos e essas intensidades forem colocadas em função do ângulo de espalhamento  $2\theta$  (ângulo entre a onda incidente e a onda espalhada), tem-se um gráfico chamado difratograma, como o mostrado na figura 2.22.

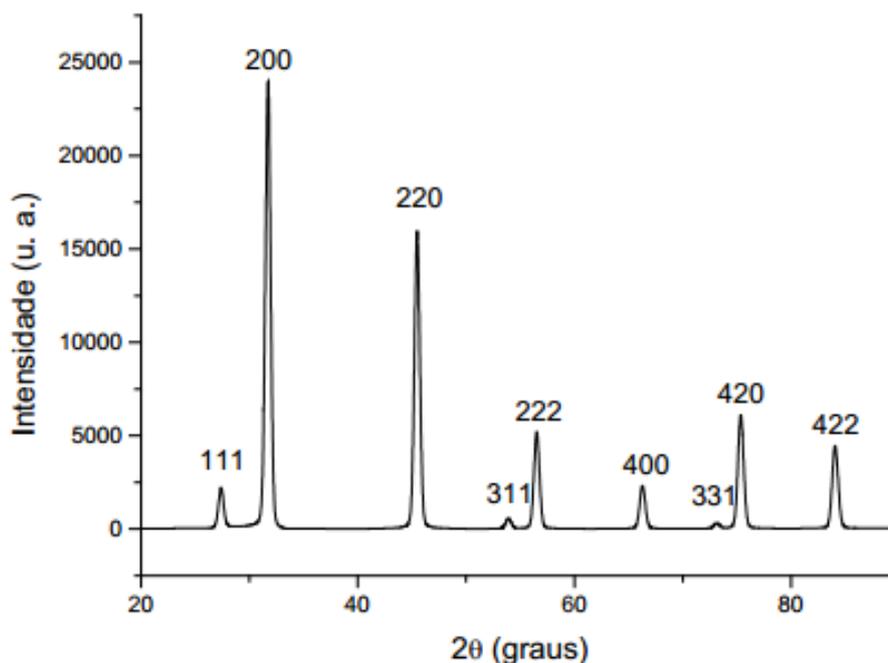


Figura 2.22: Padrão de difração de pó do NaCl [14].

Esse padrão de difração é único para cada tipo de cristal. Dessa forma, é possível descobrir a composição de materiais através da difração de raios X. Esse processo é chamado caracterização. Os planos de difração e suas respectivas distâncias interplanares, bem como as densidades de átomos (elétrons) ao longo de cada plano cristalino, são características específicas e únicas de cada substância cristalina, da mesma forma que o padrão difratométrico por ela gerado (equivalente a uma impressão digital) apresentado na figura 2.23.

Um banco de dados contendo informações cristalográficas básicas e algumas propriedades físicas de compostos cristalinos é mantido e continuamente atualizada pelo ICDD, *International Center for Diffraction Data*, com sede nos EUA. Atualmente são disponíveis informações referentes a mais de 70.000 compostos cristalinos, sendo que as mais importantes, para fins de identificação de um composto cristalino, são as distâncias interplanares e as intensidades difratadas normalizadas (relativas a 100%) para os vários planos (hkl) que difratam construtivamente os raios X. Um exemplo de uma ficha do banco de dados do ICDD referente ao talco é apresentada na figura 2.23.

PDF # 130558, Wavelength = 1.5418 (Å)																	
13-0558	Quality: I	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>															
CAS Number: 14807-96-6		Magnesium Silicate Hydroxide															
Molecular Weight: 379.27		Ref: Stemple, Brindley, J. Am. Ceram. Soc., 43, 34 (1960)															
Volume[CD]: 904.94																	
Dx: 2.784 Dm: 2.580																	
S.G.: C2/c (15)																	
Cell Parameters:		dÅ	int	h	k	l	dÅ	int	h	k	l	dÅ	int	h	k	l	
a 5.287	b 9.158	c 18.95	9.3400	100	0	0	2	2.3950	16	0	0	8	1.5270	40	0	6	0
α	β 99.5	γ	4.6600	90	0	0	4	2.2120	20	2	2	1	1.5090	10	3	3	0
SS/FOM: F30=2(0.053,300)		4.5500	30	1	1	1	2.1960	10	2	0	6	1.4600	6b	3	3	2	
I/Icor:		3.5100	4	1	1	4	2.1220	8	2	0	4	1.4060	16	3	1	6	
Rad: CuKα		3.4300	1	1	1	3	2.1030	20	1	3	6	1.3940	20	1	3	12	
Lambda: 1.5418		3.1160	100	0	0	6	1.9300	6b	2	2	4	1.3360	16	3	3	5	
Filter:		2.8920	1	0	2	5	1.8700	40	0	0	10	1.3180	10	2	4	8	
d-sp:		2.6290	12	2	0	2	1.7250	2	2	4	2	1.2970	10b	2	6	4	
Mineral Name:		2.5950	30	1	3	2	1.6820	20b	1	5	2	1.2690	10	1	7	0	
Talc-2M		2.4760	65	1	3	2	1.5570	20	0	0	12	1.1690	6	3	5	8	

Figura 2.23: Ficha com dados de estrutura cristalina e picos difratados do talco [13].

## Capítulo III. Revisão Bibliográfica

Desconsiderando os curtos momentos quando um pararraios está funcionando como um limitador de sobretensão, é esperado que no restante do tempo se comporte como um isolador. As propriedades isolantes são essenciais para determinação da vida útil do pararraios e para a confiabilidade da operação do sistema de potência.

Considerando as diversas solicitações elétricas, mecânicas e ambientais impostas aos pararraios, torna-se necessário um diagnóstico consistente ao longo da vida útil desses dispositivos para a prevenção de falhas [11]. Para desempenhar satisfatoriamente sua função e manter a confiabilidade, o pararraios necessita de avaliações periódicas que atestem sua condição normal de operação. Na ocasião de falhas, as consequências podem ser muito sérias, tanto para o sistema elétrico quanto para as pessoas que trabalham na subestação [1]. Os fabricantes estimam a expectativa de vida útil dos pararraios em 20 anos, porém, conforme Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico, esse tempo é regulado em 24 anos [11].

Métodos de diagnóstico e indicadores para identificar possíveis deterioração ou falha das propriedades isolantes tem sido utilizados desde a introdução dos pararraios. Os métodos de diagnósticos vão desde indicadores de falha e desconectores para indicar a falha de um dispositivo, até instrumentos capazes de detectar suaves mudanças na corrente de fuga resistiva ou a perda de potência nos pararraios [15].

Com a degradação do equipamento, há um aumento na corrente de fuga, sobretudo na componente resistiva, além de um aumento de sua temperatura. Em geral, os métodos para se avaliar o estado do pararraios estão associados ao valor, forma de onda ou aquecimento provocado pela corrente de fuga, sendo as principais técnicas utilizadas a da medição da corrente de fuga e a termovisão. Por serem equipamentos de grande importância para o contínuo funcionamento do sistema elétrico, é importante que seu nível de degradação seja avaliado constantemente [1]. Os métodos utilizados para avaliar o dispositivo são o indicador de falha, desconector, contador de descargas, termografia, medição de corrente de fuga total e/ou suas componentes, medição da perdas de potência, a medição da resistência de isolamento, medição de perdas dielétricas e avaliação por meio de descargas parciais [15-20].

### 3.1 Indicadores de falha

Indicadores de falha fornecem uma indicação visual clara de um pararraios completamente deteriorado, sem desconectar o dispositivo da linha de tensão. O indicador de falha pode ser parte integrante de um pararraios, ou uma unidade separada instalada em série com o dispositivo. O seu princípio de funcionamento é baseado na amplitude e duração da corrente do pararraios [16]. A figura 3.1 ilustra um típico indicador de falha da MV technology.

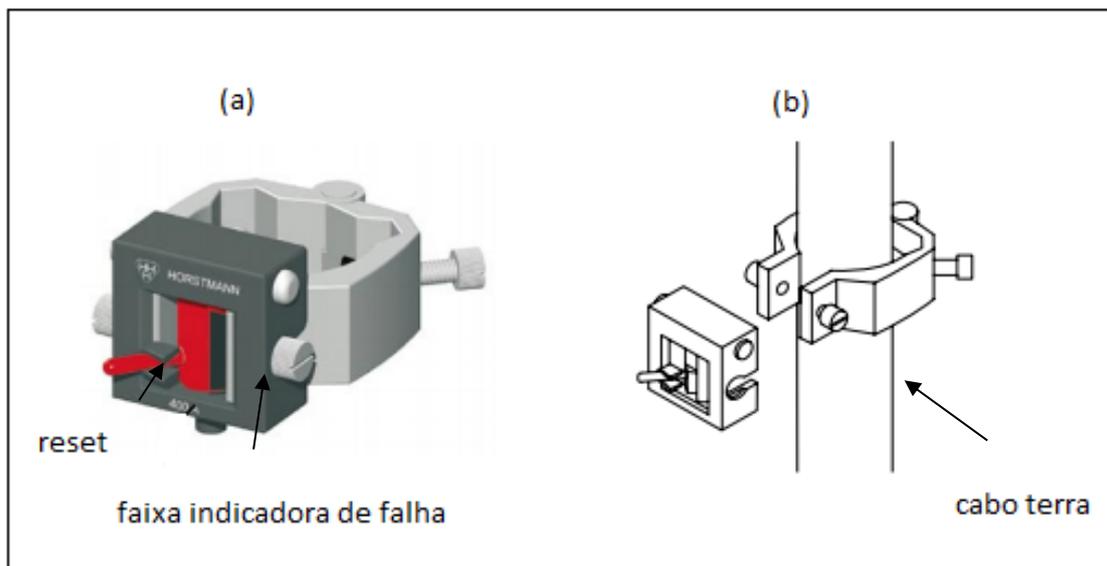


Figura 3.1: (a) Indicador de falha; (b) Montagem típica do indicador de falha;  
(Adaptado de [21]).

Na figura 3.1 (a) é apresentado um típico indicador de falha. Enquanto a faixa preta indicadora de falha estiver visível o dispositivo está operando dentro dos padrões convencionais, entretanto se o indicador de falha torna-se completamente vermelho indica que o pararraios está deteriorado. O indicador de falha é instalado no cabo de ligação ao potencial terra do pararraios (figura 3.1 (b)), e seu acionamento é realizado pela detecção do campo magnético proveniente da corrente que passa através do pararraios em direção ao potencial terra. Esse modelo de Indicador de falha após ser acionado pode ser reutilizado. Deve-se apenas encaixar o pino de reset em seu compartimento original.

### 3.2 Desconectores

Desconectores, geralmente usados em pararraios de média tensão, fornece um indicação visual de um pararraios em falha efetuando sua desconexão do circuito. O princípio de funcionamento dos desconectores se baseia em um dispositivo explosivo acionado pela corrente de falha. O desconector pode ser integrado ao pararraios, ou estar em uma unidade separada instalada em série com o pararraios. A vantagem do desconector é que a linha permanece em operação após a desconexão do pararraios. A maior desvantagem é a falta de proteção contra sobretensões até que o pararraios em falha seja descoberto e substituído. A figura 3.2 ilustra um modelo típico de desconector [16].

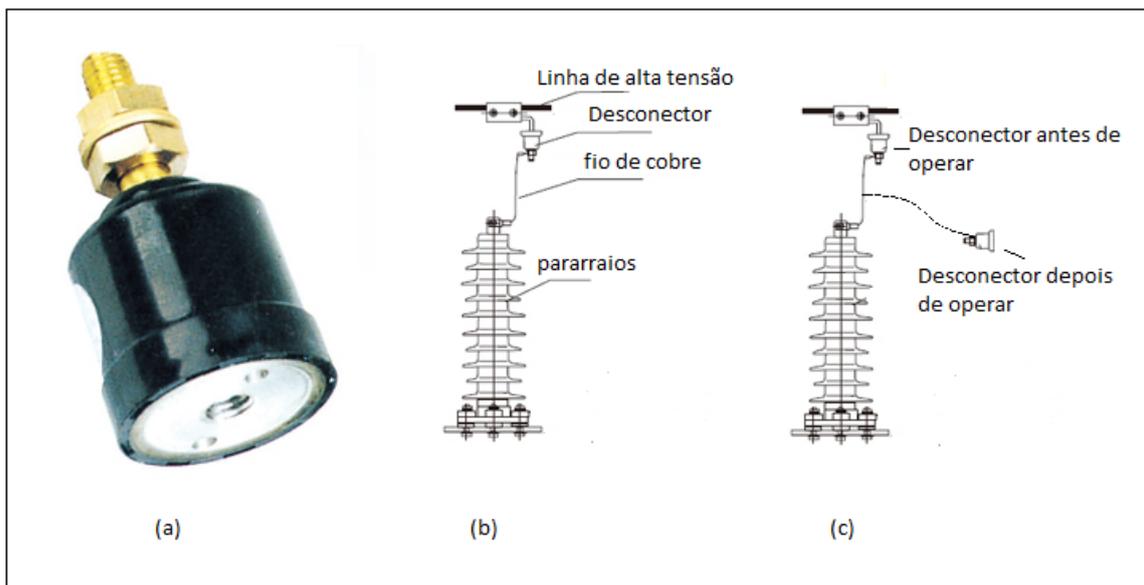


Figura 3.2: (a) Exemplo de um desconector; (b) Montagem típica de um desconector em um subestação; (c) Ilustração dos momentos anterior e posterior da operação do desconector (adaptado de [22]).

### 3.3 Contador de descargas

Contadores de descargas são acionados com impulsos de corrente com amplitude acima de determinado limite pré-estabelecido, ou acima de certa combinação da amplitude da corrente e sua duração. Entretanto, se o intervalo entre as descargas é

muito pequeno (menor que 50ms), o contador de descargas pode não computar todos os impulsos [15].

Dependendo do princípio de operação e da sensibilidade do contador, ele pode fornecer uma indicação sobre as sobretensões que apareceram no sistema, ou fornecer a informação sobre números de descargas de uma determinada energia. Os contadores não fornecem informações sobre o estado dos pararraios. A figura 3.3 ilustra um contador de descargas da ABB (*Asea Brown Boveri*) com um miliamperímetro interno, e a figura 3.4 apresenta uma montagem típica deste dispositivo. Na prática esses indicadores não são utilizados para diagnóstico do pararraios [23].

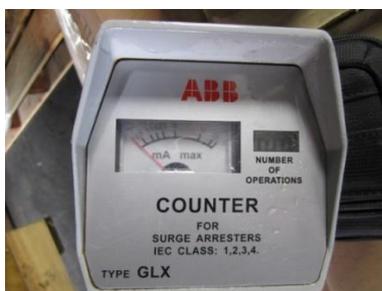


Figura 3.3: Fotografia de um típico contador de descargas disponível no mercado.

KLEIN *et al.* [24] explorou em sua metodologia de análise e diagnóstico a quantidade de descargas a que um pararraios foi submetido. Entretanto, seu objetivo, de posse da distribuição numérica e temporal das descargas, era poder identificar suas principais causas.

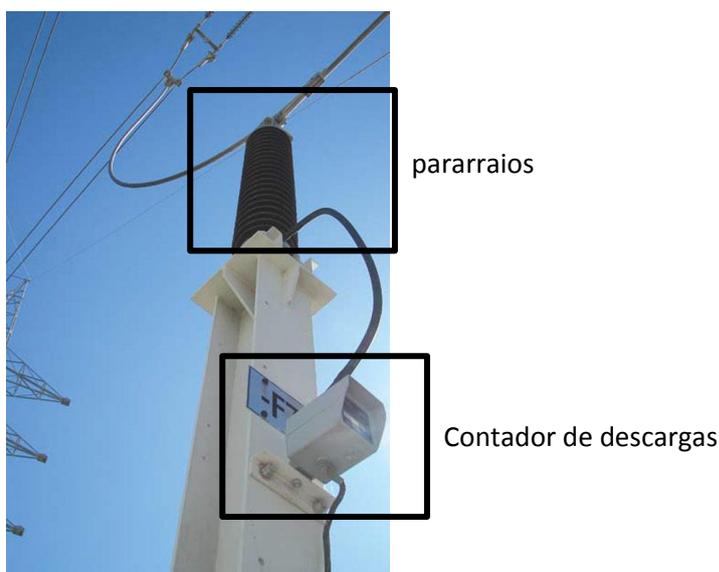


Figura 3.4: Montagem típica do contador de descargas [25].

### 3.4 Termografia

A termografia é um método de medição indireta de temperatura bastante utilizado para diagnóstico em equipamentos em subestação. Particularmente no caso de pararraios de ZnO, essa técnica é bastante útil, pois a presença de pontos quentes ao longo do corpo do dispositivo se constitui em um sinal representativo de que o mesmo já se encontra em processo de degradação [4].

A técnica consiste no registro, através de câmera especial, das emissões eletromagnéticas do objeto monitorado na faixa espectral do infravermelho térmico. Tais emissões podem então ser associadas à distribuição de temperatura no objeto e, para fins de visualização, associadas também a cores do espectro visível [4].

As medidas efetuadas por meios de métodos de imagem térmicas são indicativas do nível de degradação dos pararraios, contudo a queda de temperatura entre as resistências não-lineares e a superfície do invólucro pode ser substancial [16]. Entretanto, medidas comparativas realizadas sobre pararraios adjacentes podem indicar aquecimento excessivo, por exemplo. Com isso as concessionárias de energia elétrica têm desenvolvido metodologias próprias para aumentar a eficácia da técnica. Por exemplo, a metodologia específica de inspeção termográfica, com tomadas de imagens em 3 ângulos diferentes no pararraios, permite a identificação mais efetiva de anomalias térmicas na parte ativa como mostrado na figura 3.5 [11].

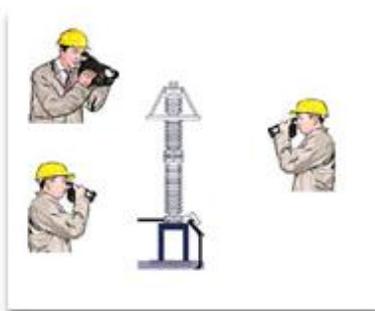


Figura 3.5: Inspeção termográfica em três ângulos [11].

ALVARES [26], em seu trabalho propôs adicionar mais 3 ângulos de medidas à metodologia de medição em 3 ângulos, totalizando 6 ângulos de inspeção como ilustrado na figura 3.6. Após análises concluiu que a termografia realizada em com seis pontos de medição mostrou-se melhor, uma vez que na tomada de medições em apenas uma ou três posições algumas anomalias térmicas podem não ser detectadas. Uma

desvantagem do método é a dificuldade da tomada das seis medidas igualmente espaçadas, já que dependendo do local de instalação do pararraios alguns obstáculos físicos atrapalham a medição.

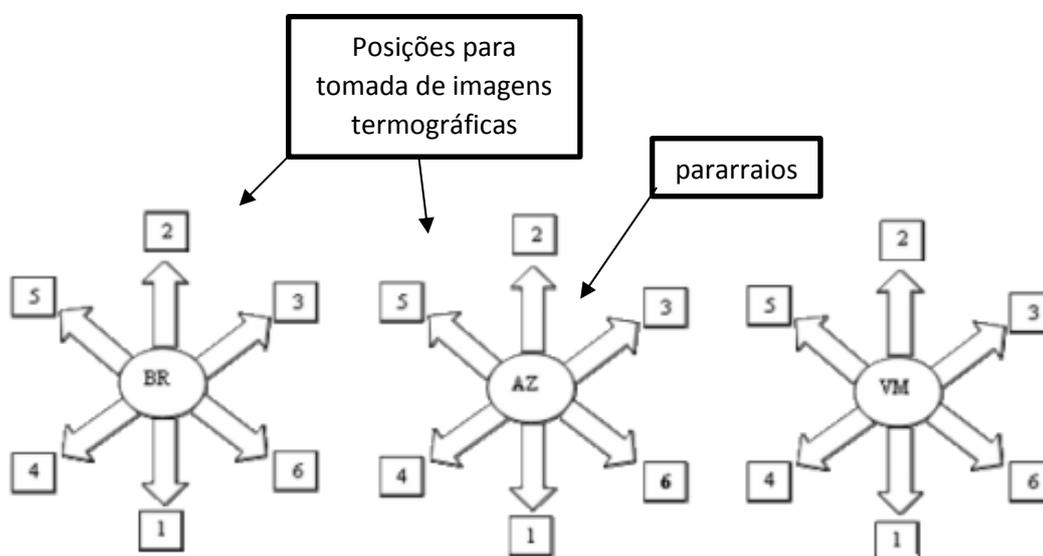


Figura 3.6: Metodologia de inspeção proposta por Álvares [26].

GOMES [11] descreve em seu trabalho que além da inspeção em 3 e 6 ângulos, destaca-se a utilização de 4 metodologias para a análise dos padrões térmicos do pararraios: análise da elevação de temperatura em relação à temperatura ambiente; análise comparativa em relação a pararraios adjacentes (mesmo modelo/família); análise do perfil térmico do pararraios ( $\Delta t$  intrínseco - temperatura máxima – temperatura média); e taxa de crescimento da temperatura e das diferenças de temperatura.

As metodologias devem ser desenvolvidas cautelosamente e a análise dos dados gerados deve ser minuciosa. SOARES JUNIOR *et al.*[4] em seu trabalho avaliou a aplicação da técnica da termografia e medição da corrente de fuga resistiva utilizando aparelhos comerciais de última geração a fim de avaliar metodologias de aplicação das técnicas, e ao final desenvolver um filosofia consistente para substituição programada dos pararraios. No entanto, ainda em seus testes iniciais ao analisar pararraios irmãos (instalados no mesmo ponto do sistema, mas em fases diferentes) constatou que nem sempre o dispositivo que tinha a maior temperatura possuía a maior corrente de fuga. Em verdade, essa coincidência só aconteceu em 38% dos casos avaliados.

GOMES [11] indica que um sistema de monitoramento termográfico contínuo em subestações de transmissão de forma abrangente pode não ser efetivo, devido às

dimensões dos equipamentos e distâncias envolvidas, além de ser bastante oneroso, considerando o grande número de câmeras e demais componentes do sistema. A termografia evita a falha, mas não permite avaliar a evolução da degradação dos blocos de ZnO para uma substituição planejada.

O valor de temperatura a partir da qual um determinado pararraios pode ser considerado defeituoso é difícil de se determinar. Ainda, a termografia é considerada relativamente complexa, requerendo treinamento e experiência do termografista para obtenção de bons resultados. Diversos parâmetros devem ser considerados, como por exemplo evitar medições durante períodos com alta insolação [11].

SOARES JUNIOR *et al.*[4] aponta alguns cuidados que devem ser observados na realização da inspeção termográfica de pararraios:

- Pequenas variações de temperatura podem indicar o início de degradação;
- Deve-se evitar realizar a medição durante períodos do dia de alta insolação;
- Deve-se ajustar adequadamente o termovisor para o fator de emissividade do objeto sob inspeção;
- Deve-se considerar o referencial de temperatura em relação ao objeto adjacente.
- A medição é apenas indicativa do estado do pararraios, pois a queda de temperatura entre os blocos de resistores não lineares e a superfície externa do invólucro (a qual é o alvo da medição) pode ser considerável.

DA SILVA *et al.* [27] investigou a influência do calor absorvido pelo pararraios devido à radiação solar e concluiu em seu trabalho que existem defeitos que são mascarados porque o aquecimento característico provocados por eles é inferior ao aquecimento devido à exposição à radiação solar. A figura 3.7 mostra, afim de ilustrar a técnica, uma termografia de um pararraios em serviço.

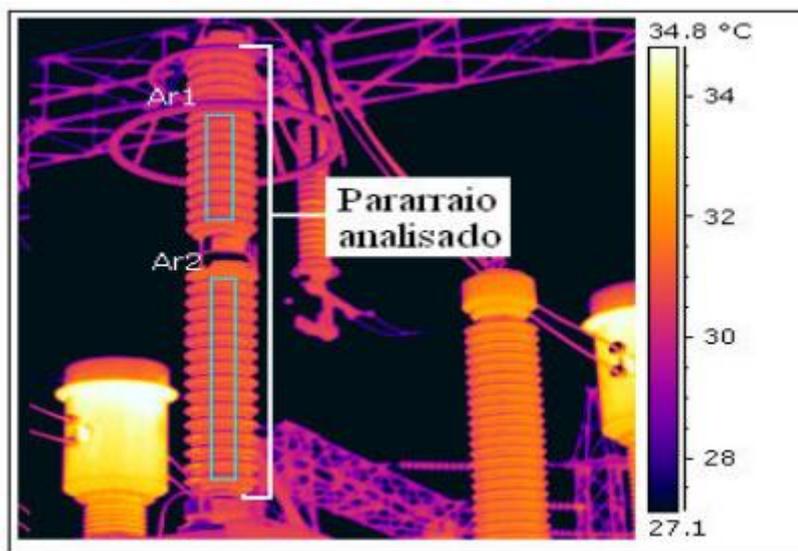


Figura 3.7: Exemplo de termografia de um pararraios em serviço [27].

Medidas diretas da temperatura dos resistores formadores dos pararraios fornecem uma precisa indicação da condição do pararraios [16], mas requer que o pararraios seja equipado com transdutores especiais no momento de sua fabricação. Portanto, este método só é utilizado em aplicações especiais dos pararraios.

### 3.5 Monitoramento da corrente de fuga

Qualquer deterioração das propriedades isolantes do pararraios causará um incremento na corrente de fuga resistiva ou perda de potência em dados valores de tensão e temperatura aos quais esteja submetido. A maioria dos métodos de diagnóstico para determinação da condição operacional do pararraios são baseados na medida da corrente de fuga [15].

Os procedimentos de medidas podem ser divididos em dois grupos: medidas *online*, quando o pararraios está conectado ao sistema e energizado com a tensão de serviço durante operação normal, e medidas *off-line*, quando o pararraios é desconectado do sistema e energizado com uma fonte de tensão independente.

Medidas *off-line* podem ser realizadas com fontes de tensão especialmente construídas para este fim. Uma boa exatidão pode ser obtida usando métodos *off-line*, desde que uma tensão de teste suficientemente elevada seja usada. As maiores desvantagens são o custo do equipamento e a necessidade de desconectar o pararraios do sistema [16].

Medidas executadas *online*, com o pararraios em serviço, é o método mais comumente usado. Por questões práticas e de segurança, a corrente de fuga é normalmente aferida na base aterrada do pararraios.

Medidas da corrente de fuga realizadas *online* são podem ser executadas utilizando equipamentos portáteis ou permanentes. Instrumentos portáteis são usualmente conectados ao terminal terra do pararraios por meio de um alicate, em equipamentos permanentes utiliza-se um transformador de corrente. Longos períodos de medida da corrente de fuga podem ser necessários para investigações mais minuciosas, especialmente se mudanças significativas nas condições do pararraios foram reveladas pelas medidas temporárias. Medidas remotas podem ser implementadas em sistemas automatizados para supervisão do pararraios.

### 3.5.1 Propriedades da corrente de fuga

A corrente de fuga pode ser dividida em uma parte capacitiva e outra parte resistiva, com predominância da parte capacitiva [16]. Isso pode ser visto na figura 3.8, que mostra um típica medida laboratorial da corrente de fuga de um único resistor não-linear de um pararraios, quando energizado com uma tensão equivalente  $U_c$  do pararraios completo.

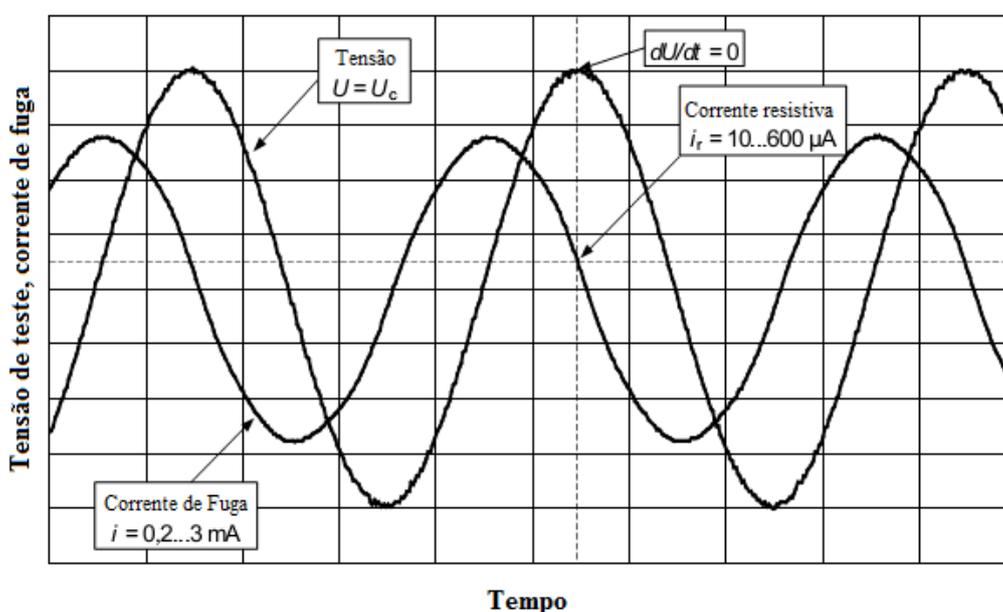


Figura 3.8: Corrente de fuga típica de um resistor óxido metálico não-linear em condições de laboratório (adaptado de [15]).

A componente puramente resistiva da corrente de fuga sob tensão alternada é definida como sendo a corrente de fuga no instante de tensão máxima ( $dU/dt = 0$ ), como indicado na figura 3.8. A corrente de fuga resistiva possui valor de pico entre 10 e 600  $\mu\text{A}$  em temperatura de  $20^\circ\text{C}$  [15].

Na figura 3.9 são mostrados os resultados das medidas de corrente de fuga executadas em dois pararraios diferentes em serviço submetidos a níveis de tensão levemente abaixo de  $U_c$ . Também pode ser observado na figura 3.9 a influência de diferentes níveis de conteúdo harmônico no sistema de tensão.

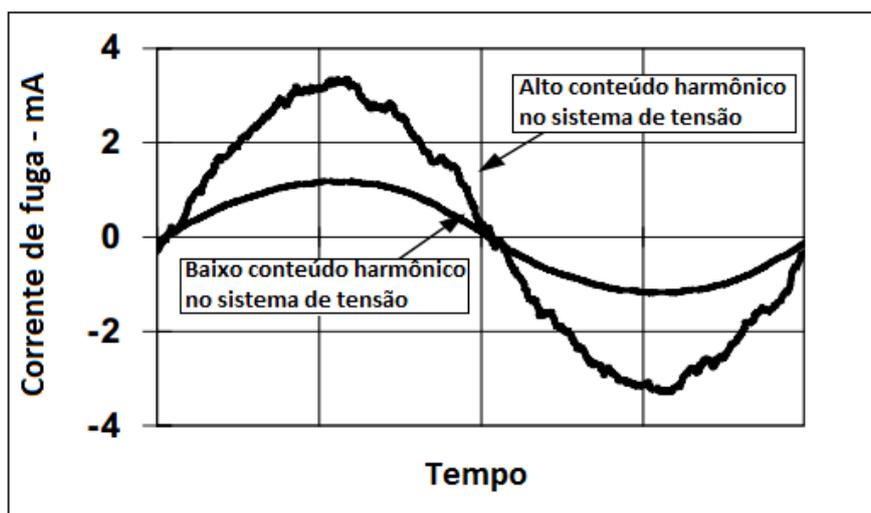


Figura 3.9: Amostra de corrente de fuga de pararraios em serviço (adaptado de [15]).

#### a) Corrente de fuga capacitiva

A corrente de fuga capacitiva medida no terminal terra de um pararraios é causada pela permissividade dos seus resistores não-lineares e capacitâncias parasitas. A capacitância específica de um elemento resistor está tipicamente entre  $60\text{pF.kV/cm}^2$  e  $150\text{pF.kV/cm}^2$ , resultando em um corrente de fuga capacitiva com valor de pico entre 0,2mA e 3mA em condições normais de serviço.

Não há evidências de que a corrente de fuga capacitiva mudaria significativamente devido à deterioração das características tensão-corrente dos resistores não-lineares formadores do pararraios [16]. Portanto, é improvável que o monitoramento da corrente de fuga capacitiva possa indicar com segurança a condição operacional de um pararraios.

## b) Corrente de fuga resistiva

A componente resistiva da corrente de fuga é um sensível indicador de mudanças nas características tensão-corrente dos resistores não-lineares. Um alto nível de corrente de fuga resistiva pode em último caso conduzir o pararraios para um estado de instabilidade térmica resultado na falha completa do dispositivo [28]. A corrente resistiva pode, portanto, ser utilizada como uma ferramenta para diagnóstico de pararraios, de fato é um verdadeiro indicador da saúde de um pararraios em serviço. Curvas representativas das características tensão-corrente de pararraios em tensão alternada são mostradas na figura 3.10, para comparação na mesma figura também são apresentadas curvas representativas das características tensão-corrente de pararraios em tensão contínua.

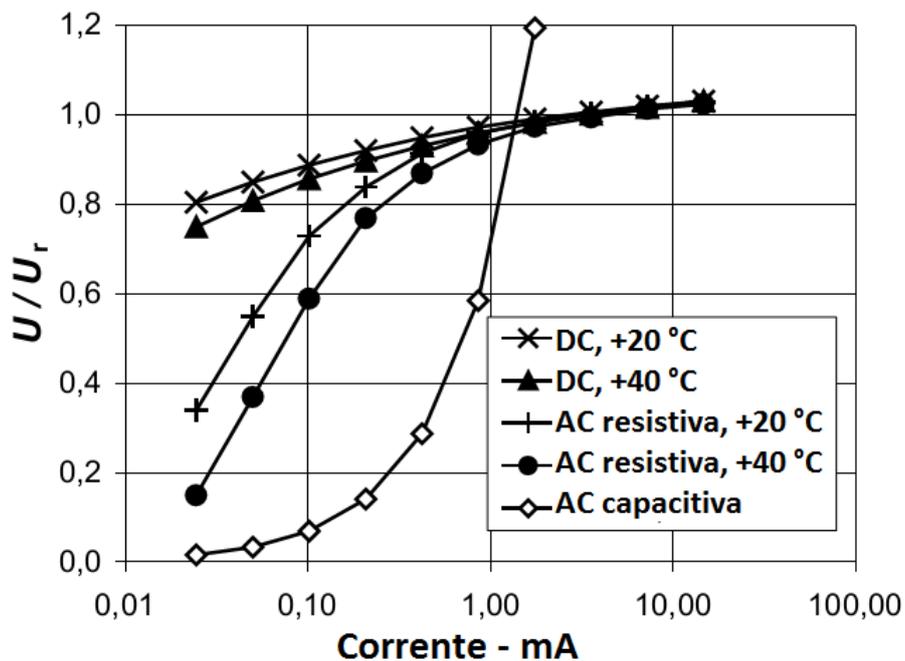


Figura 3.10: Características tensão x corrente típicas para resistores óxidos metálicos não-lineares [15].

A componente resistiva da corrente de fuga em tensão alternada é definida como o nível da corrente de fuga no instante que a tensão é máxima ( $dU/dt = 0$ ), como indicado na figura 3.8. A corrente de fuga resistiva de um resistor não linear corresponde a cerca de 5% a 20% da corrente capacitiva em condições normais de operação, ficando em torno de  $10\mu\text{A}$  a  $600\mu\text{A}$  de pico a temperatura de  $+20^\circ\text{C}$ , e é

dependente da tensão e da temperatura. A figura 3.11 e figura 3.12 ilustram essa dependência.

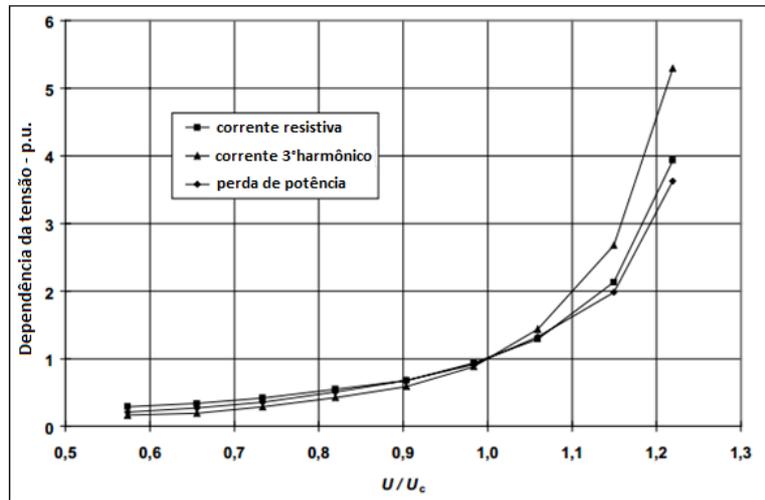


Figura 3.11: Dependência da tensão a +20°C [16].

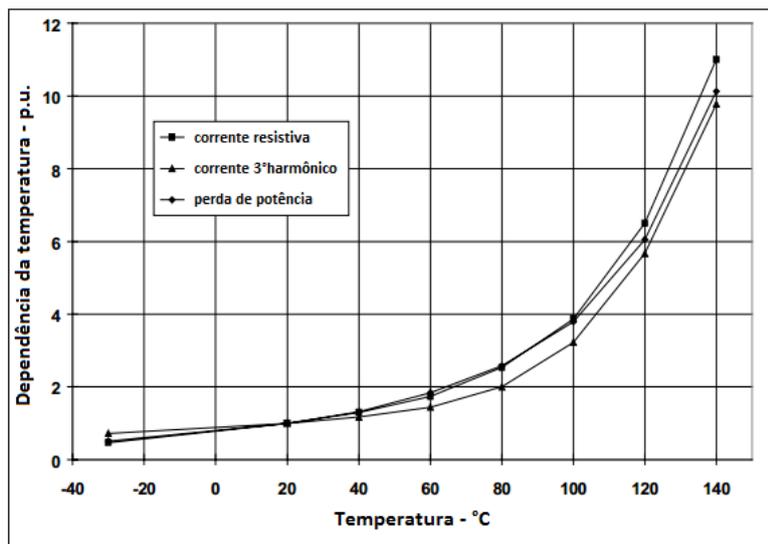


Figura 3.12: Dependência da temperatura na tensão de MCOV [16].

A distribuição de tensão ao longo de um pararraios pode ser desigual, principalmente devido às capacitâncias parasitas em relação ao terra e aos equipamentos adjacentes. A tensão sobre o resistor não-linear localizado na base aterrada do pararraios pode, portanto, ser diferente em ambos, magnitude e fase, dos valores médios aferidos ao longo do pararraios. Este fenômeno afeta a medida da corrente de fuga resistiva de duas maneiras. Primeiro, a corrente de fuga resistiva aferida na conexão aterrada do pararraios depende da magnitude da tensão sobre o resistor não-linear da

base aterrada do pararraios, assim a corrente de fuga resistiva aferida pode diferir da média da corrente de fuga resistiva ao longo do pararraios. Segundo, o deslocamento de fase da tensão sobre o resistor não-linear da base aterrada do pararraios influencia o resultado da corrente de fuga resistiva medida por métodos que usam a tensão sobre o pararraios completo como referência para o ângulo de fase.

Outro fenômeno similar que pode influenciar a medida da corrente de fuga resistiva é a corrente de fuga capacitiva induzida no cabo terra do pararraios por fases adjacentes.

#### c) Harmônicos na corrente de fuga

As características tensão-corrente dos resistores não-lineares do pararraios dão origem a harmônicos na corrente de fuga quando o pararraios é energizado com uma tensão senoidal. O conteúdo harmônico depende da magnitude da corrente resistiva e do grau de não-linearidade das pastilhas, que é uma função da tensão e da temperatura. Como exemplo, o conteúdo harmônico da corrente resistiva está entre 10% a 40% de seu total [15]. Portanto, o conteúdo harmônico pode ser usado como um indicador da corrente de fuga resistiva. A influência da tensão e temperatura no valor da componente do terceiro harmônico é mostrada na figura 3.11 e figura 3.12.

Outra fonte de harmônicos que pode consideravelmente influenciar a medida dos harmônicos na corrente de fuga, é o conteúdo harmônico do sistema de tensão. Os harmônicos da corrente de fuga capacitiva produzidos pelos harmônicos da tensão podem ser da mesma ordem de grandeza que as componentes harmônicas criadas pela resistência não-linear do pararraios. Um exemplo de harmônicos na corrente de fuga causados pelos harmônicos do sistema de tensão é mostrado na figura 3.9.

#### d) Perda de potência

A perda de potência pode ser usada para diagnóstico do pararraios assim como a corrente de fuga resistiva. Típicos valores de perda de potência vão de 5mW/kV até 300mW/kV na tensão de MCOV e +20°C [16]. A dependência da perda de potência com a temperatura e tensão é mostrada na figura 3.11 e figura 3.12.

#### e) Corrente de fuga na superfície do pararraios

Semelhante a qualquer isolador em operação em ambientes externos, corrente de fuga na superfície externa pode temporariamente ocorrer no invólucro do pararraios em situações de chuva suaves ou em condições de alta umidade combinada com poluição superficial do invólucro. Corrente de fuga superficial interna também pode ocorrer devido à penetração de umidade. Durante as medidas, a corrente superficial pode interferir na corrente de fuga dos resistores não-lineares, entretanto, a sensibilidade para as corrente superficiais interna e externa podem variar com o método utilizado. A influência da corrente de fuga superficial externa pode ser evitada, por exemplo realizando as medidas em condições ambientais secas.

### 3.5.2 Monitoramento da corrente de fuga total

A corrente de fuga total depende principalmente da corrente capacitiva, uma vez que a parte resistiva é apenas uma fração da componente da corrente capacitiva. Além disso, as correntes capacitivas e resistivas possuem uma diferença de fase de 90 graus entre si. Portanto, um grande aumento na corrente resistiva do pararraios é necessário antes que alguma mudança possa ser notada na corrente de fuga total. Adicionalmente, a corrente de fuga total é sensível a instalação, uma vez que a corrente de fuga capacitiva depende das capacitâncias parasitas.

Medidas *online* da corrente de fuga total são extensamente utilizadas na prática por meio de um miliamperímetro convencional incorporado ao contador de descargas ou como um instrumento portátil, mostrando o r.m.s., média e valor de pico da corrente de fuga total.

A sensibilidade dos valores r.m.s, média e pico da corrente de fuga total em relação às variações na corrente de fuga resistiva são mostrados na figura 3.13. A baixa sensibilidade para mudanças no nível da corrente resistiva fazem a medida da corrente de fuga total indicada como método de diagnóstico apenas nos raros casos quando a corrente resistiva é da mesma ordem de grandeza da corrente capacitiva.

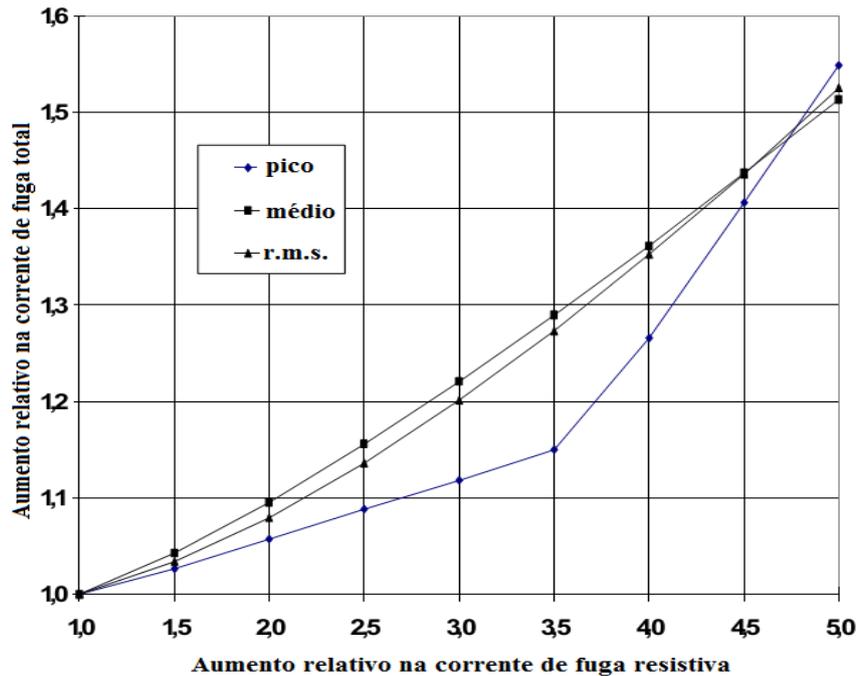


Figura 3.13: Influência do aumento da corrente de fuga resistiva na corrente de fuga total (adaptado de [15]).

GOMES [11] concluiu em seu trabalho que a medição da corrente de fuga total com miliamperímetro fixo ou portátil, e o contador de descargas não têm se mostrado eficazes nas rotinas de manutenção das empresas. No caso dos miliamperímetros, utilizados apenas em pararraios de ZnO, eles apresentam baixa sensibilidade para diagnosticar as condições de defeitos incipientes.

A medição da corrente de fuga total não fornece dados suficientes para o diagnóstico do estado do pararraios. Entretanto, foi mostrado [2] que sua análise pode contribuir na detecção de falhas no equipamento. Extraído da corrente de fuga total, e não de suas componentes resistivas e capacitivas, características para efeitos de classificação de defeitos.

LIRA *et al.* [2] analisou amostras de pararraios submetidos à sua máxima tensão de operação contínua (MCOV) e extraiu da corrente de fuga total informações das amplitudes dos harmônicos ímpares de 3 a 9. Construiu uma base de dados de características, que foi empregada no treinamento e teste de um sistema de classificação de defeitos baseado em Redes Neurais Artificiais. O diagrama de seu experimento é apresentado na figura 3.14.

Os sinais de tensão e corrente no varistor são adquiridos por meio de um divisor capacitivo (relação de 1917,6 para 1) e uma resistência shunt, respectivamente, em

conjunto com um sistema de aquisição de dados, formado essencialmente por pontas de prova e um osciloscópio digital com banda passante de 1 GHz. Os sinais de corrente medidos e adquiridos são, então, armazenados em um computador para tratamento posterior.

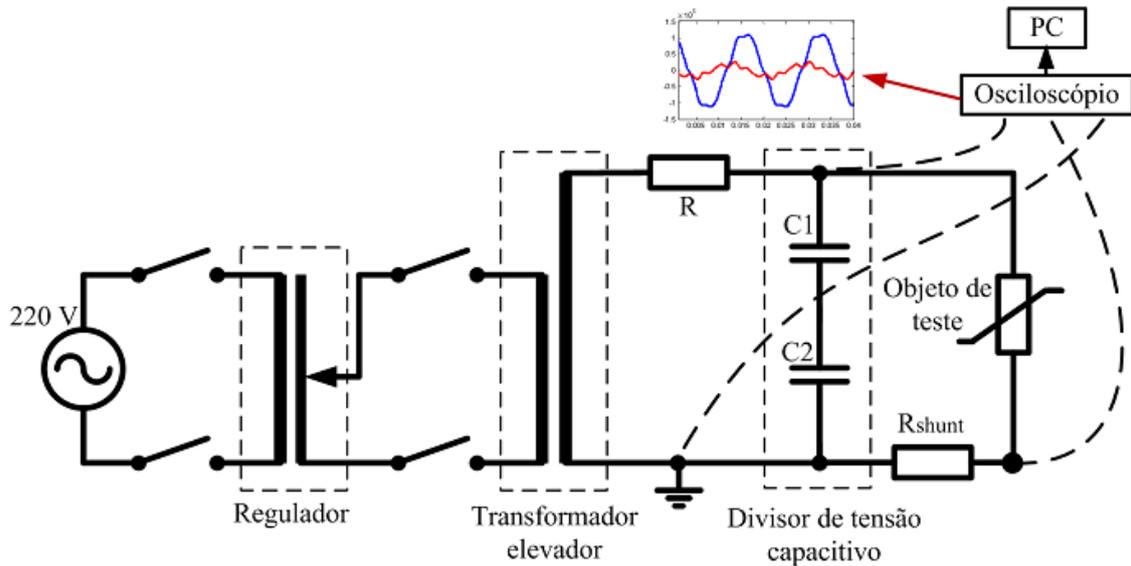


Figura 3.14: Diagrama do arranjo para medição da corrente de fuga utilizado por LIRA *et al.*[2].

### 3.5.3 Monitoramento da corrente de fuga resistiva ou perda de potência

Essa técnica tem relativa confiabilidade e eficácia, porém é de difícil aplicação, considerando a complexidade de utilização e a necessidade de treinamento especializado. A experiência das empresas brasileiras é pequena na utilização dessa técnica, apesar da norma IEC 60099-5 [11] apresentar a técnica como uma alternativa eficaz e viável para o diagnóstico.

Ainda no ano 2000, TASKIN [29] propôs um sistema que aferia a corrente de fuga de pararraios utilizando um link óptico. Ainda que seus testes tenham se limitado ao laboratório pode-se atestar as vantagens de se utilizar fibras ópticas, como a sua imunidade a campos elétricos e magnéticos. TASKIN [29] transmitia o sinal de corrente de fuga de forma analógica através da fibra e em sua análise se preocupou com a parcela resistiva da corrente.

A componente resistiva da corrente de fuga ou a perda de potência podem ser determinadas por diferentes métodos.

a) Medida direta da corrente de fuga resistiva.

i. Usando um sinal de tensão como referência

Este método de baseia no uso de um sinal de tensão de referência para representar a tensão sobre o pararraios. O sinal de referência pode ser usado para leitura direta da componente resistiva da corrente de fuga no instante em que a tensão atinge seu pico ( $dV/dt = 0$ ), como mostrado na figura 3.8. A tensão e corrente podem ser aferidas utilizando-se um osciloscópio ou equipamento similar. Este método é comumente utilizado em laboratório para uma precisa determinação da corrente de fuga resistiva, uma vez que o sinal de referência é facilmente acessível através de um divisor de tensão.

Na prática, a precisão é limitada principalmente pelo deslocamento de fase do sinal de referência e pelos desvios de magnitude e fase da tensão sobre o resistor não-linear da base aterrada do pararraios, como discutido na seção 3.5.1 - b. A presença de harmônicos no sinal de tensão pode também reduzir a precisão do método [16].

Uma restrição do método, quanto sua utilização em pararraios em serviço, é a necessidade de um sinal de referência. Conexões temporárias ao secundário de um transformador de potencial ou ao tap capacitivo de bucha são necessárias e podem ser complicadas de se obter. A corrente capacitiva induzida na conexão de terra do pararraios por fases adjacentes pode reduzir a precisão do método durante medidas realizadas em campo [15].

LIRA *et al.* [30] propôs em seu trabalho um sistema para aferição e armazenamento dos sinais de corrente de fuga e tensão sobre o pararraios. Para aquisição dos dados utilizou um microcontrolador, e a transferência dos dados para estação de processamento era realizada utilizando RS232 ou link de rádio. Durante o processamento, separa a componente resistiva da corrente de fuga total. Um diagrama de seu sistema é mostrado na figura 3.15.

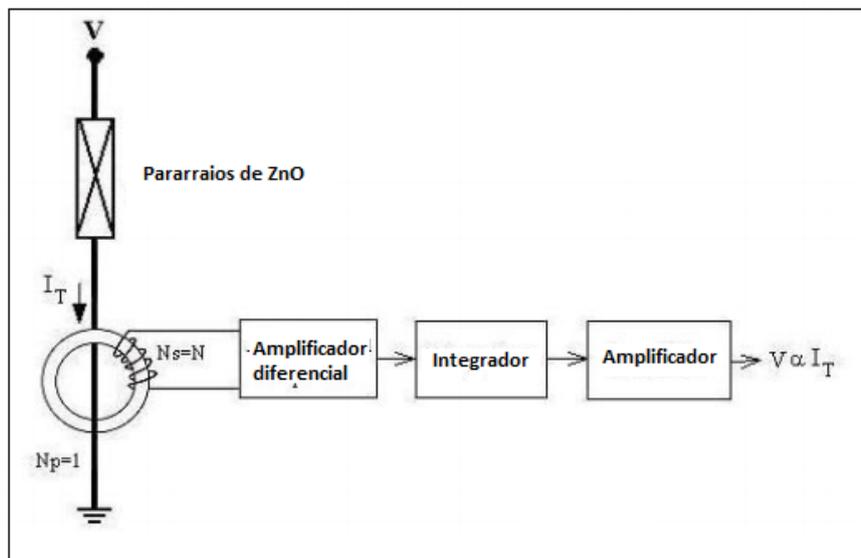


Figura 3.15: Estrutura do sistema proposto por LIRA [30], para aquisição da corrente de fuga e a tensão sobre o pararraios.

- ii. Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga usando um sinal de tensão

A sensibilidade na medição da componente resistiva da corrente de fuga pode ser aumentada se a componente capacitiva for compensada por um sinal de tensão. O princípio básico do método é a utilização de um ponte de alta tensão onde o ramo capacitivo-resistivo é ajustado para balancear a componente capacitiva da corrente de fuga de modo que apenas a parte resistiva não-linear contribua para a tensão de saída, que pode ser aferida com o uso de um osciloscópio [15].

A ponte é balanceada quando o valor de tensão está próximo de zero e a corrente capacitiva está em seu valor de pico. Uma vez que a capacitância diferencial do pararraios é dependente da tensão (a capacitância aumenta com a tensão), enquanto a capacitância da ponte é constante, a corrente remanescente após a compensação não é só constituída pela componente resistiva, contém também uma componente capacitiva. O resultado deste método está ilustrado na figura 3.16. O valor real da componente resistiva é encontrado no instante que a tensão chega em seu valor de pico.

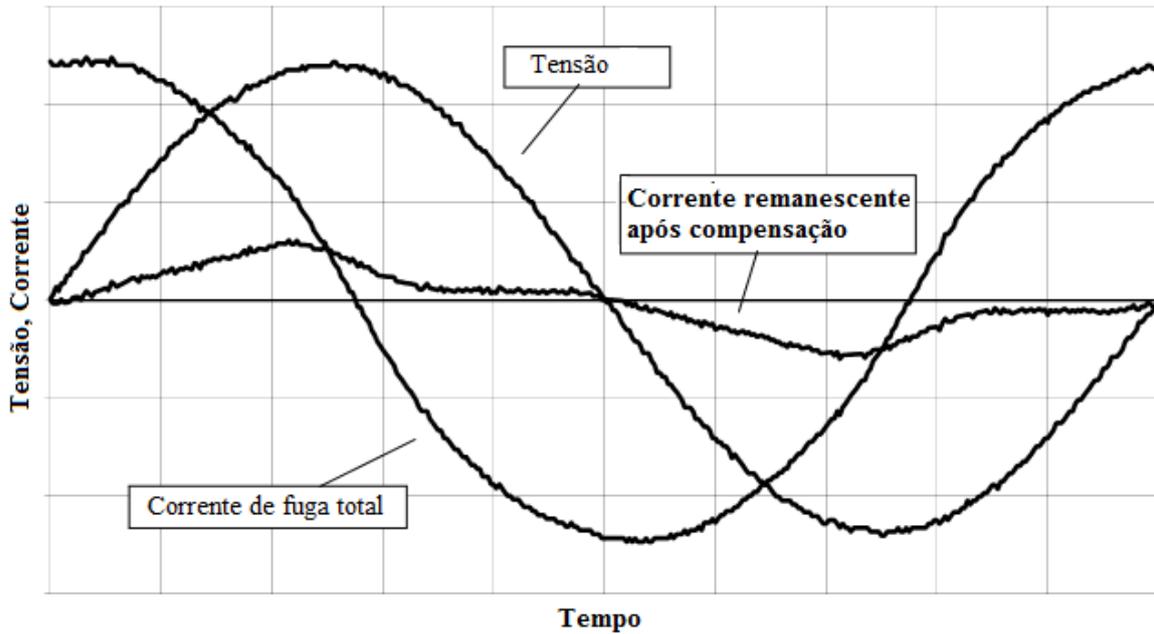


Figura 3.16: Corrente remanescente depois da compensação da componente capacitiva (adaptado de [16]).

A necessidade de um sinal de tensão de referência, que pode ser de difícil acesso em campo, restringe a utilização do método. A precisão das medidas pode ser influenciada por deslocamentos de fase na tensão e corrente devido à influências de fases adjacentes.

- iii. Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga sem um sinal de tensão

Neste método de compensação a necessidade de um sinal de tensão de referência é eliminada. O princípio básico é que um sinal de referência da frequência fundamental é criado sinteticamente através de informações derivadas da corrente de fuga. Com o ajuste adequado da amplitude e ângulo de fase, que pode ser feito automaticamente ou utilizando um osciloscópio, um sinal de referência pode ser construído para compensar a componente capacitiva da corrente de fuga. O método pode ser implementado com diferentes graus de sofisticação [15].

O método pode ser prontamente utilizado para medidas em serviço. Um potencial problema é a presença de harmônicos na tensão, que geram correntes harmônicas capacitivas que podem interferir na componente resistiva. Além disso, o sinal de compensação representa corrente em uma capacitância linear, o que implica problemas

de precisão na medida. A precisão das medidas podem também pode ser influenciada por deslocamentos de fase na tensão e corrente devido à influências de fases adjacentes.

- iv. Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga usando uma combinação de corrente de três fases.

Este método se baseia na premissa de que as correntes capacitivas são canceladas se as correntes de fuga dos pararraios em três fases são somadas. A corrente resultante é composta dos harmônicos das correntes resistivas dos três pararraios, uma vez que as componentes fundamentais também são canceladas já que possuem a mesma amplitude. Se existir um aumento na corrente resistiva de algum pararraios, a corrente capacitiva permanece constante, então o aumento aparecerá na corrente somada [16].

Para medidas em campo a maior desvantagem do método reside no fato que a corrente de fuga capacitiva das três fases nem sempre são iguais. Outra desvantagem diz respeito a influência de harmônicos do sistema de tensão, que causam harmônicos na corrente somada.

b) Determinação indireta da componente resistiva da corrente de fuga por meio da análise harmônica da corrente de fuga.

- i. Análise do harmônico de terceira ordem da corrente de fuga

O método se baseia no fato de que harmônicos serão criados na corrente de fuga pelas características tensão-corrente não-lineares do pararraios. Não há necessidade de um sinal de tensão de referência uma vez que é assumido que todos os harmônicos surgem da corrente resistiva não-linear. O conteúdo harmônico depende da magnitude da corrente resistiva e do grau de não-linearidade das características tensão-corrente das pastilhas. O conteúdo harmônico também varia com a tensão e a temperatura do pararraios, como indicado pelo harmônico de terceira ordem na figura 3.11 e figura 3.12.

O terceiro harmônico é o maior componente harmônico da corrente resistiva, sendo o mais comumente usado para medidas diagnósticas. A conversão da amplitude do harmônico para nível de corrente de fuga, se requerida, baseia-se em informações cedidas pelo fabricante do pararraios ou obtidas em testes em laboratório [31].

O método pode ser usado em pararraios em serviço, o principal problema é a sensibilidade a harmônicos do sistema de tensão. Os harmônicos na tensão podem criar correntes harmônicas capacitivas que são comparáveis em magnitude as correntes harmônicas geradas pela resistência não-linear do pararraios. Como resultado o erro na corrente harmônica medida pode ser considerável se o conteúdo harmônico na tensão for alto [32].

FERNANDO [33] mostrou essa influência em sua pesquisa, constatando que harmônicos na tensão induzem harmônicos na corrente de fuga. ZHU *et al.* [34, 35] e KIL *et al.*[36] mostraram ainda que a corrente de fuga harmônica do pararraios, não depende só dos harmônicos da tensão, mas também da fase desses harmônicos.

O erro na corrente harmônica medida em função do conteúdo harmônico da tensão pode ser evidenciado na figura 3.17, onde o erro na avaliação do terceiro harmônico na corrente de fuga é dado como uma função do conteúdo do terceiro harmônico do sistema de tensão. A figura 3.17 inclui os efeitos de diferentes características tensão-corrente e capacitâncias, assim como a influência do ângulo de fase do terceiro harmônico na tensão.

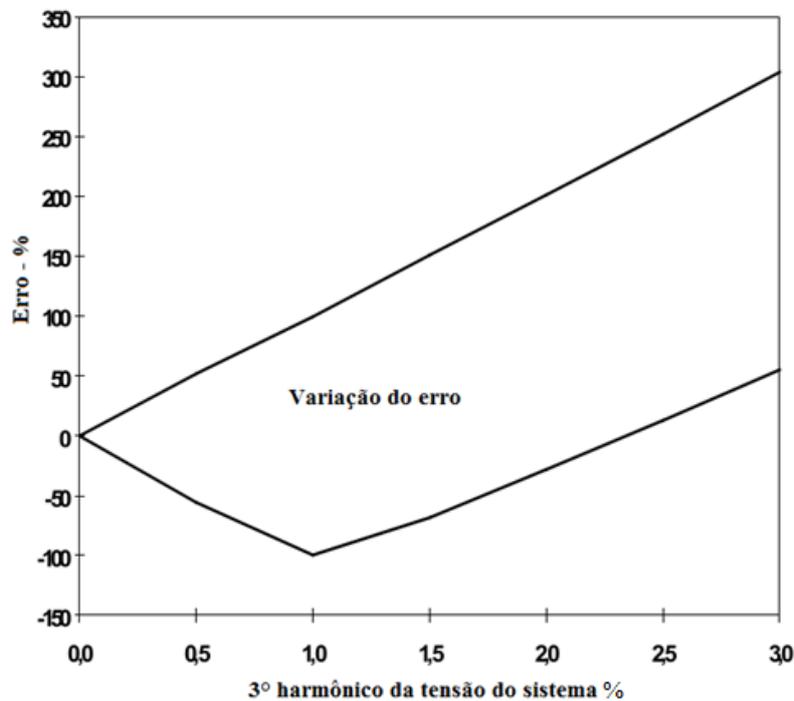


Figura 3.17: Erro na avaliação do 3º harmônico da corrente de fuga para diferentes ângulos de fase do 3º harmônico do sistema de tensão, considerando variáveis capacitâncias e características tensão-corrente dos resistores não-lineares [15].

VIDEIRA [1], em seu trabalho investigou a influência da temperatura, dos harmônicos no sistema de tensão e da presença de campos elétricos e magnéticos na aferição da corrente de fuga total e resistiva do pararraios. Para isso utilizou simulações elaboradas no software LABVIEW, e uma de suas conclusões indica que a existência de harmônicos na forma de onda da tensão da rede causa um aumento relativamente pequeno na corrente resistiva medida, sendo necessária uma alta taxa de distorção harmônica para a variação significativa de seu valor. Por outro lado, há um aumento significativo na componente de terceira harmônica da corrente de fuga total, podendo teoricamente inviabilizar o método de avaliação através da medição desta componente caso não seja realizada a compensação dos harmônicos da rede.

Consciente das desvantagens deste método, LIRA *et al.*[37] propôs em seu trabalho a análise conjunta do 3°, 5°, 7° e 9° harmônicos extraídos da corrente de fuga total do dispositivo, utilizando um tipo especial de rede neural. A técnica exposta pode ser utilizada em sistemas já instalados e não necessita da medição da tensão no dispositivo. Os resultados foram positivos durante os testes de laboratório, entretanto a técnica possui a desvantagem da complexidade envolvida na utilização de Redes Neurais com muito nós, principalmente, quando são considerados sistemas que serão instalados em campo.

Também há esforços no sentido de desenvolver materiais para uma melhor aferição da corrente de fuga, para posterior análise dos harmônicos, como fez MACEDO *et al.* [38] em seu trabalho, quando desenvolveu e testou um toróide com núcleo baseado em liga nanocristalina (FeSiBNbCu). O toróide foi testado com sucesso em pararraios em campo.

- ii. Análise do harmônico de terceira ordem da corrente de fuga com compensação para os harmônicos do sistema de tensão

Este método é baseado no mesmo princípio do método (i), mas a sensibilidade aos harmônicos da tensão é consideravelmente reduzida pela introdução de um sinal de corrente compensatório para a corrente de terceiro harmônico capacitiva no pararraios.

O sinal de corrente compensatório é derivado de uma ponta de prova posicionada na base do pararraios. A corrente harmônica induzida na ponta de prova pelo campo elétrico é subtraída da corrente harmônica total. O resultado é a corrente

harmônica gerada pela corrente resistiva não-linear do pararraios. Este método é adequado para utilização em pararraios em serviço.

LARSEN *et al.* [23] realizou um estudo de caso utilizando pararraios em serviço, avaliando o terceiro harmônico da corrente de fuga compensando os harmônicos do sistema de tensão. Comparou os valores obtidos com os dados dos fabricantes, entre pararraios irmãos e pararraios do mesmo tipo. Os resultados comprovaram a confiabilidade e eficiência deste método na avaliação dos dispositivos.

YONGQIANG *et al.* [39] testou em seu trabalho um método de compensação baseado em um processamento matemático dos valores dos componentes da transformada de Fourier do sinal de tensão sobre o pararraios e da corrente de fuga total. Também realizou simulações onde estimou a influência do terceiro harmônico da tensão no terceiro harmônico da corrente resistiva. Essa simulação é mostrada na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Influência do 3º harmônico da tensão no 3º da corrente resistiva [39].

Valor do 3º harmônico da tensão	Fase do 3º harmônico da tensão	Valor da corrente resistiva do componente	Valor do 3º harmônico da corrente resistiva do componente
0% do valor da fundamental	N/A	80,04 $\mu\text{A}$	12,59 $\mu\text{A}$
3% do valor da fundamental	0°	75,58 $\mu\text{A}$	10,54 $\mu\text{A}$
	90°	80,26 $\mu\text{A}$	16,33 $\mu\text{A}$
	180°	81,40 $\mu\text{A}$	21,74 $\mu\text{A}$
5% do valor da fundamental	0°	74,82 $\mu\text{A}$	7,53 $\mu\text{A}$
	90°	80,90 $\mu\text{A}$	17,64 $\mu\text{A}$
	180°	87,35 $\mu\text{A}$	25,14 $\mu\text{A}$

### iii. Análise do harmônico de primeira ordem da corrente de fuga

A componente fundamental da corrente resistiva é obtida pela filtragem e integração da corrente de fuga, dando origem a um sinal proporcional a componente resistiva. A influência dos harmônicos do sistema de tensão durante medidas em serviço é praticamente eliminada pelo uso apenas das componentes fundamentais da tensão e

corrente. A principal restrição sobre este método é a necessidade de um sinal de tensão de referência. A precisão depende dos deslocamentos de fase na tensão e corrente [16].

c) Determinação direta das perdas de potência.

A perda de potência é a integral do produto dos valores instantâneos da tensão e da corrente de fuga dividido pelo tempo. A perda de potência pode se expressa em termos do produto do valor r.m.s. da componente resistiva da corrente de fuga e o valor r.m.s. da tensão sobre o pararraios. A influência dos harmônicos na tensão é consideravelmente reduzida pelo processo de multiplicação e integração. A maior desvantagem é a necessidade de um sinal de tensão de referência, e a precisão durante medidas em serviço pode ser limitada pelo deslocamento de fase na tensão e corrente, causado pelas fases adjacentes.

A medida da perda de potência funciona independentemente da forma de onda da tensão de operação e, portanto, pode ser usada para diagnóstico de pararraios utilizados em sistemas com tensão não senoidais, como as linhas de HVDC - sistemas de corrente contínua em alta tensão [17].

### **3.5.4 Informações sobre a corrente de fuga fornecidas pelo fabricante do pararraios**

Os dados de corrente de fuga medidos podem ser comparados com informações fornecidas pelo fabricante do pararraios. Para utilizar estas informações é importante que a tensão de operação e a temperatura ambiente sejam conhecidas no momento da medida. O fabricante pode fornecer dados sobre corrente resistiva, corrente de terceiro harmônico e perda de potência para cada tipo de pararraios como função da tensão e da temperatura.

Para uso prático, a dependência da tensão pode ser expressa como uma função da tensão de serviço dividida por  $U_r$ . A informação deve preferencialmente cobrir tensões de operação de 0.40 a 0.90 de  $U_r$ . A corrente resistiva e de terceiro harmônico deveriam ser fornecidas como valores de pico, enquanto perda de potência é indicada ser expressa como um valor específico baseado na tensão nominal.

A dependência da temperatura deveria ser expressa como uma função da temperatura ambiente, de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$ , assumindo um certo sobreaquecimento dos

resistores, uma vez que não existe a possibilidade de se obter a real temperatura dos resistores durante medidas em serviço.

Dois diferentes tipos de informações do fabricante de pararraios são de particular interesse na avaliação dos resultados. Primeiro, informação para comparação dos resultados obtidos sob diferentes condições de operações em termos da tensão de serviço e temperatura ambiente. Pela conversão dos resultados medidos para um conjunto de condições de operação padrão, por exemplo, uma tensão de serviço de 0,70 de  $U_r$  e uma temperatura ambiente de  $+20^\circ\text{C}$ , é possível comparar os resultados de medições realizadas em diferentes ocasiões. As informações do fabricante podem ser dadas como fatores de correção, como mostrado na figura 3.18 e figura 3.19.

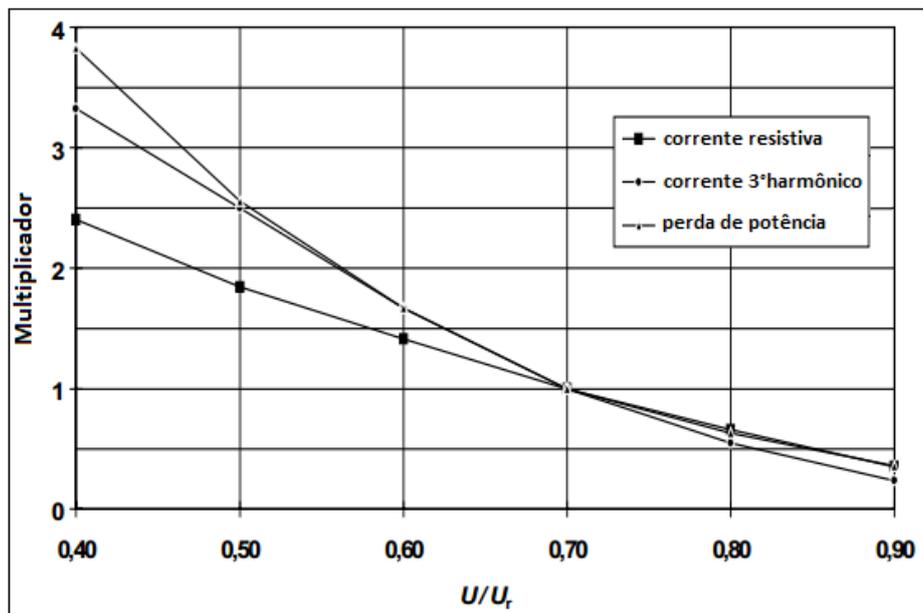


Figura 3.18: Informação para conversão para condições de tensão de operação padrão [16].

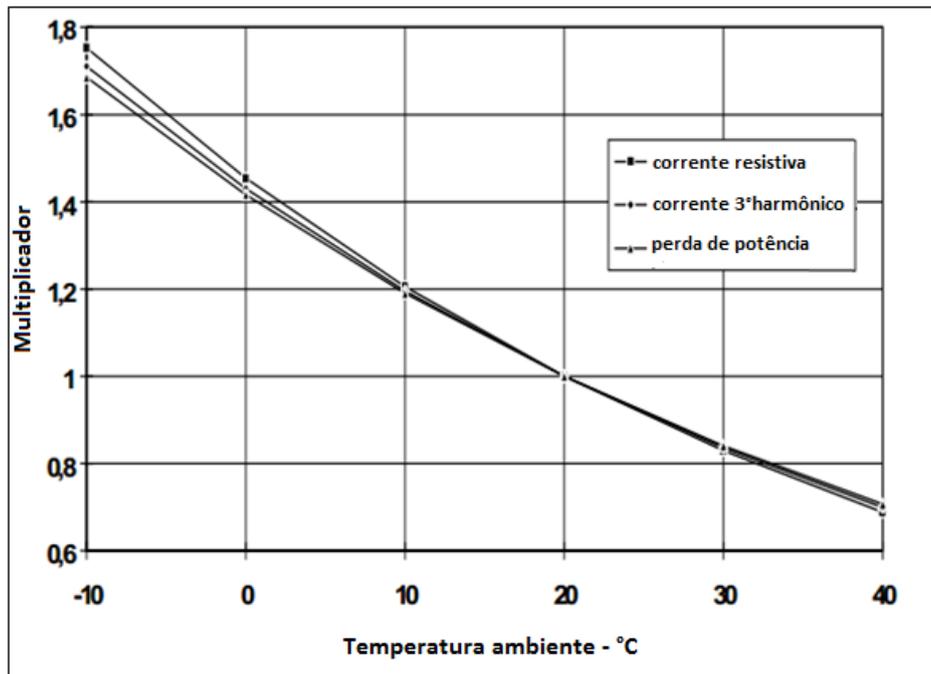


Figura 3.19: Informação para conversão para condições de temperatura ambiente padrão [16].

Segundo, o fabricante do pararraios pode fornecer limites para as quantidades medidas depois da conversão para as condições de operação padrão. Se os limites são excedidos, o fabricante deve ser consultado para orientações adicionais. Os limites podem ser dados como valores absolutos e/ou mudanças relativas com tempo.

### 3.6 Medição da resistência de isolamento

A medição da resistência de isolamento é uma técnica utilizada há muito tempo, embora não exista um consenso quanto a sua validade como meio para diagnóstico. Através da utilização de megaôhmetros, o estado do pararraios é avaliado pela comparação do resultado com o de ensaios de aceitação, valores típicos de pararraios similares ou comparação com valores de outras unidades. Uma desvantagem desta técnica é o fato de ser *off-line*, ou seja, há a necessidade da retirada do pararraios para a inspeção [1].

### 3.7 Medição de perdas dielétricas

Para a execução desta técnica é utilizado um equipamento que realiza a medição do fator de potência (as perdas dielétricas). Assim, a avaliação é realizada através de comparações com dados já existentes de pararraios novos e de mesmas características elétricas. Da mesma forma que a medição da resistência de isolamento, este método não é um consenso devido à forma com que os resultados são avaliados [1].

### 3.8 Avaliação pelo monitoramento de descargas parciais

Os trabalhos que utilizam o monitoramento das Descargas Parciais como método para avaliação de pararraios foram motivados pela ineficácia das técnicas preditivas (termografia e medição da 3<sup>o</sup> harmônica da corrente de fuga) em diagnosticar defeitos incipientes.

A medição de descargas parciais em pararraios é possível porque, geralmente, o pararraio é montado em bases isolantes e aterrado em um único ponto. A medição é feita no cabo de aterramento, através de um TC para alta frequência (1 a 10 MHz) [11]. São aspectos positivos dessa técnica: realização do ensaio com o pararraio energizado, a rapidez na realização dos ensaios (até 80 pararraios/dia) e baixo custo.

AMORIM JÚNIOR *et al.*[3] demonstrou em seu trabalho a possibilidade da detecção de descargas parciais em pararraios instalados no campo, utilizando Transformadores de Corrente de Alta Frequência (High Frequency Current Transformers – HFCT). Em seu estudo analisou pararraios de 138, 230, 345 e 550 kV em operação instalados nas subestações de Furnas. Para a detecção das descargas parciais o HFCT era conectado ao pararraio ao redor do condutor que interliga o dispositivo e a malha de terra.

Durante a avaliação dos pararraios por esta técnica pretende-se detectar e registrar pulsos de corrente de alta frequência produzidos pelas descargas parciais. São então considerados suspeitos de estarem degradados pararraios cuja a amplitude dos pulsos sejam superiores a limites pré-estabelecidos.

Trata-se de um estudo experimental, e ainda há carências de relatos e constatações reais [3]. Deve-se considerar a necessidade da criação de um banco de dados dos casos de sucesso, principalmente correlacionando os resultados com outras técnicas de diagnóstico e com a inspeção de pararraios após a retirada [11].

TATIZAWA *et al.* [40] utilizou uma técnica da medição da emissão espectral do campo eletromagnético conduzido, produzido por descargas parciais, em medições em campo, na avaliação de pararraios do tipo ZnO, classe 345kV. A opção pela adoção dessa técnica deveu-se ao histórico de falhas ocorridas verificadas na subestação. Após a ocorrência da queima sucessiva de 03 pararraios de ZnO de 345 kV, foi constatado que as causas dessas falhas, a exemplo de outras ocorrências já verificadas no passado na mesma família de pararraios, eram devidas ao revestimento utilizado na lateral do bloco de ZnO, o qual sob efeito dos gradientes elétricos em serviço sofre um processo de carbonização causado por descargas parciais internas, criando caminhos de condução de corrente, por fora dos blocos, curto-circuitando e levando à queima do pararraios em operação normal.

Nessas medições, os pulsos de corrente de alta frequência, produzidos pelas descargas, foram medidos com um osciloscópio no domínio do tempo, utilizando-se como transdutor, um transformador de corrente para alta frequência instalado no condutor de aterramento dos pararraios sob ensaio, considerando-se frequências superiores a 9 kHz. Os oscilogramas foram analisados por comparação com assinaturas de descargas de outros dispositivos, as quais foram obtidas e caracterizadas previamente em outros ensaios laboratoriais e em campo. A figura 3.20 ilustra a montagem em campo do sistema.

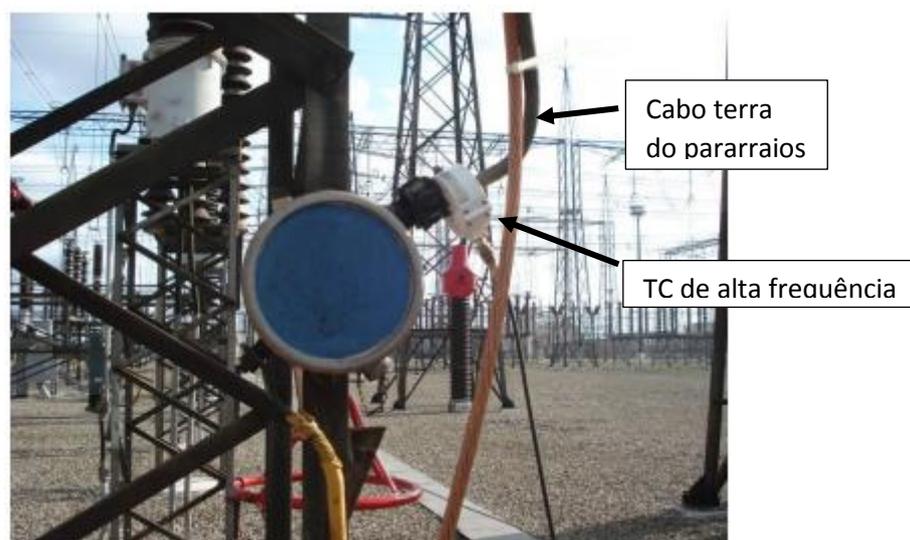


Figura 3.20: Ilustração de um TC de alta frequência instalado no cabo de aterramento do pararraios utilizado por TATIZAWA *et al.*[40].

### 3.9 Sumário dos métodos de diagnósticos

As experiências com os diferentes métodos de diagnóstico são resumidos na tabela 3.2. A sensibilidade, eficiência do diagnóstico e experiência em serviço com os vários métodos de medida da corrente de fuga estão indicadas na tabela 3.3.

Tabela 3.2: Resumo da experiência com os métodos de diagnóstico (adaptado de [16]).

<b>Método de Diagnóstico</b>	<b>Aplicação do método</b>		<b>Experiência em serviço</b>
	<b>Off-line</b>	<b>Online</b>	
Indicador de falha		x	Limitada
Desconectores		x	Extensa <sup>a)</sup>
Contador de descargas		x	Extensa
Termografia		x	Limitada
Medida da corrente de fuga			
-utilizando uma fonte de tensão independente	x		Consultar Tabela 3.3
-utilizando a tensão de serviço		x	Consultar Tabela 3.3
a) Em pararraios de média tensão			

Tabela 3.3: Características dos métodos de medida da corrente de fuga (adaptado de [16]).

Método de medida da corrente de fuga	Sensibilidade a...			Eficiência do diagnóstico		Experiência em serviço
	harmônicos na tensão	deslocamentos de fase na medida da tensão ou corrente.	corrente de fuga superficial	Qualidade da informação	Complexidade da análise	
Monitoramento da corrente de fuga total	B	B	M	B	B	Extensa
Monitoramento da corrente de fuga resistiva						
- com sinal de tensão de referência	M	A	A	M	A	Limitada
-com capacitor de compensação	M	A	A	M	A	Limitada
-utilizando compensação sintética	M	A	A	M	B	--
-com o cancelamento da corrente capacitiva	A	A	A	B	B	Limitada
Análise harmônica da corrente de fuga						
-usando o terceiro harmônico	A	B	B	M	B	Extensa
-usando o terceiro harmônico com compensação	B	B	B	A	M	Extensa
-usando a fundamental	B	A	A	M	A	Limitada
Monitoramento da perda de potência	B	A	A	M	A	--
-- - sem informações disponíveis						
B – baixa    M – média    A – alta						

ALVES [41] em seu trabalho elencou as principais desvantagens dos métodos atuais para monitoramento e diagnósticos dos pararraios de ZnO, mostradas na tabela 3.4. Decorrente dessas desvantagens e da falta de consenso entre o método atual mais adequado para usar, propôs uma nova técnica que se baseia na medição e análise da resistência e capacitância equivalentes do pararraios, cujo os comportamentos esperados frente a defeitos típicos do pararraios é mostrado na figura 3.21.

Tabela 3.4. Técnicas atuais de diagnósticos de pararraios de ZnO e suas desvantagens (adaptado de [41]).

<b>Técnicas de diagnóstico</b>	<b>Desvantagens</b>
Descargas Parciais	Elevadas interferências eletromagnéticas em subestações que dificultam as medições e o diagnóstico
Levantamento da curva tensão-corrente	Técnica aplicável apenas com o equipamento fora de serviço.
Termografia	- Monitoração não contínua. -Alta demanda de mão-de-obra. -Sujeito a influências do operador na medição. -Dificuldade de interpretação dos resultados.
Medição da corrente resistiva utilizando um sinal de tensão de referência.	Necessita do sinal de tensão aplicado ao pararraios. (TP ou similar)
Medição da corrente resistiva compensando a componente capacitiva usando o sinal de tensão de referência.	Necessita de um capacitor de referência conectado a alta tensão.
Medição da corrente resistiva compensando a componente capacitiva sem o sinal de tensão de referência.	Necessita dados de cada modelo, fabricante e lote de blocos não-lineares.
Medição da corrente resistiva compensando a componente capacitiva pela combinação das três fases	-Necessita correntes capacitivas equilibradas nas 3 fases. -Sujeito a erros devido a harmônicos de

	tensão. -Insensível a defeitos que não alterem a curva tensão-corrente dos resistores não – lineares, como ingresso de umidade.
Medição do 3° harmônico da corrente de fuga.	-Sujeito a erros devido a harmônicos de tensão. -Insensível a defeitos que não alterem a curva tensão-corrente dos resistores não – lineares, como ingresso de umidade.
Medição do 3° harmônico da corrente de fuga com compensação dos harmônicos na tensão.	-Insensível a defeitos que não alterem a curva tensão-corrente dos resistores não – lineares, como ingresso de umidade.
Medição do 1° harmônico da corrente de fuga.	Necessita do sinal de tensão aplicado ao pararraios. (TP ou similar)
Determinação da Perda de potência	Necessita do sinal de tensão aplicado ao pararraios. (TP ou similar)

Tipo de defeito	Parâmetro afetado	
	Capacitância	Resistência
Perda de estanqueidade e entrada de umidade		•↓
Componentes desconectados	•↓	
Alteração nos blocos de ZnO por I de descarga		•↓
Alteração nos blocos de ZnO por redução de O <sub>2</sub>		•↓

Figura 3.21: Tipo de defeitos no pararraios de ZnO detectáveis pela técnica proposta por ALVES [41].

### 3.10 Experiência das empresas brasileiras quanto a aplicação dos métodos de diagnóstico de pararraios.

Pesquisadores brasileiros têm desenvolvidos sistemas complexos para diagnósticos de pararraios, como o trabalho apresentado por MARTINS *et al.* [42] no

qual técnica de redes neurais são utilizadas para analisar de uma só vez dados de termografia e dados sobre a corrente de fuga do dispositivo. Entretanto, entre as concessionárias de energia elétrica brasileiras, também parece não existir consenso com relação aos diversos aspectos relacionados à aplicação de técnicas de manutenção preditiva em pararraios, tendo cada uma suas vantagens e desvantagens. Não são poucos os questionamentos com relação à melhor técnica, à interpretação dos dados proporcionados por cada método e, adicionalmente, com relação à identificação do dispositivo degradado e o momento ideal para sua troca [4]. Sendo assim trabalhos foram publicados avaliando as técnicas, equipamentos e métodos de sua época [4, 11], em um esforço para convergir a um método que seja amplamente aceito.

GOMES [11] apresenta uma avaliação atual da aplicação das técnicas preditivas de diagnóstico em pararraios de subestações de transmissão nas rotinas de manutenção das empresas integrantes da Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica – ABRATE. Nesse estudo foi realizada uma consulta técnica sobre as práticas de manutenção preditiva das empresas integrantes da ABRATE e o resultado é apresentado na figura 3.22.

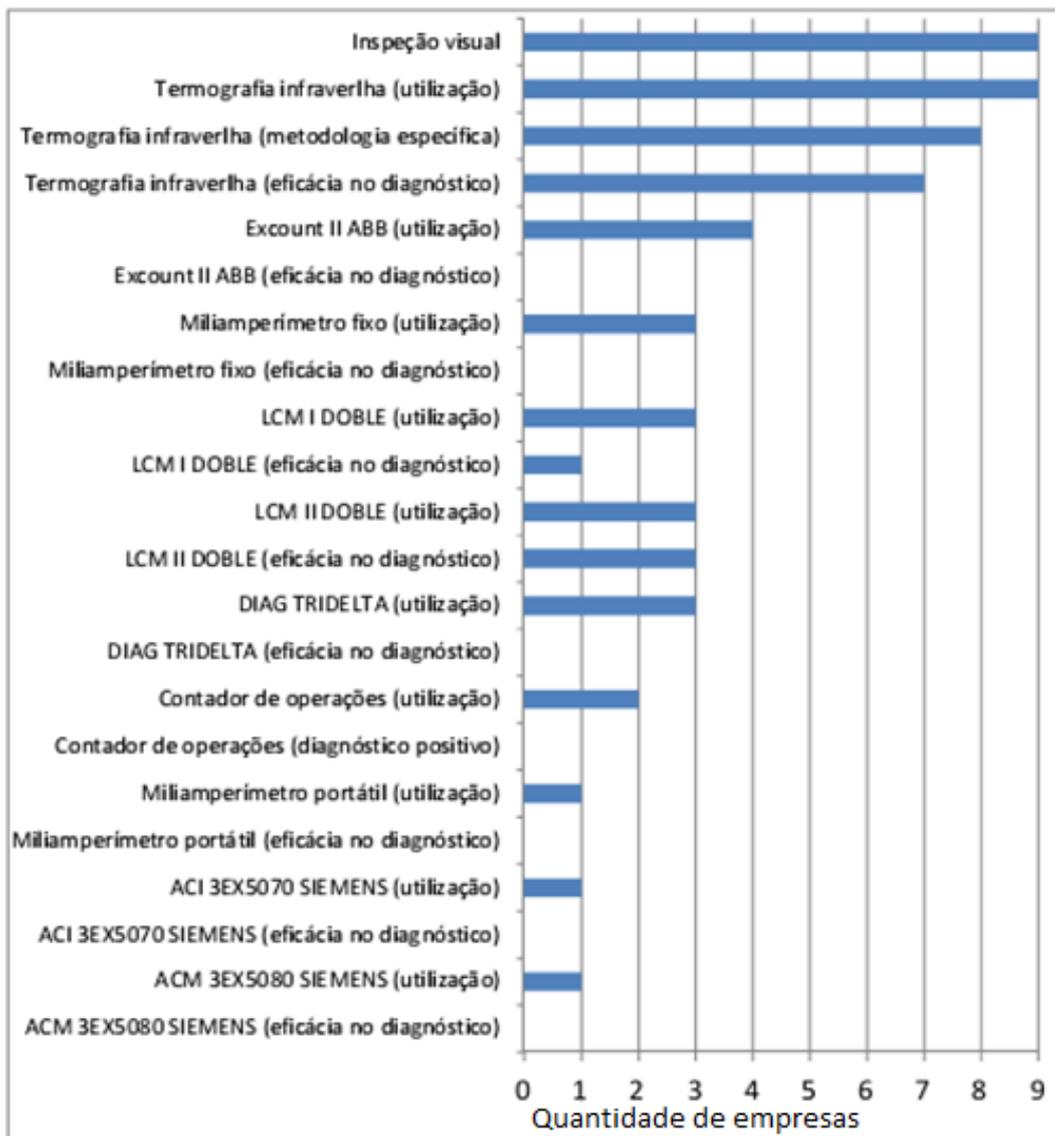


Figura 3.22: Técnicas preditivas de diagnóstico de parraios utilizadas pelas empresas integrantes da ABRATE [11].

A figura 3.22 mostra que a termografia é a técnica de manutenção preditiva mais utilizada entre as empresas da ABRATE para diagnóstico de parraios. Destaca-se também a necessidade de utilização de metodologias específicas de inspeção e análise para o sucesso da técnica, conforme discutido na seção 3.4.

As experiências das empresas brasileiras com os diferentes métodos de diagnóstico são resumidos na tabela 3.5. A sensibilidade, eficiência do diagnóstico e experiência em serviço com os vários métodos de medida da corrente de fuga estão indicadas na tabela 3.6.

Tabela 3.5: Resumo da experiência das empresas da ABRATE com os métodos de diagnóstico (adaptado de [11]).

Método de Diagnóstico	Aplicação do método		Experiência em serviço
	Off-line	Online	
Indicador de falha		x	Ineficaz
Desconectores		x	n.a.
Contador de descargas		x	Ineficaz
Termografia		x	Extensa
Medida da corrente de fuga			
-utilizando uma fonte de tensão independente	x		Consultar Tabela 3.6
-utilizando a tensão de serviço		x	Consultar Tabela 3.6
n.a.= não aplicável a subestações de transmissão			

Tabela 3.6: Características dos métodos de medida da corrente de fuga, conforme experiência das empresas da ABRATE (adaptado de [11]).

Método de medida da corrente de fuga	Sensibilidade a...			Eficiência do diagnóstico		Experiência em serviço
	harmônicos na tensão	deslocamentos de fase na medida da tensão ou corrente.	corrente de fuga superficial	Qualidade da informação	Complexidade da análise	
Monitoramento da corrente de fuga total	B	B	M	B	B	Extensa

Monitoramento da corrente de fuga resistiva						
- com sinal de tensão de referência	M	A	A	M	A	n.ut.
-com capacitor de compensação	M	A	A	M	A	n.ut.
-utilizando compensação sintética	M	A	A	M	B	--
-com o cancelamento da corrente capacitiva	A	A	A	B	B	n.ut.
Análise harmônica da corrente de fuga						
-usando o terceiro harmônico	A	B	B	A	B	Limitada
-usando o terceiro harmônico com compensação	B	B	B	A	B	Limitada
-usando a fundamental	B	A	A	M	A	n.ut.
Monitoramento da perda de potência	B	A	A	M	A	Não aplicável
n.ut. – não utilizado -- - sem informações disponíveis B – baixa M – média A – alta						

A tabela 3.7 elenca os equipamentos utilizados pelas empresas da ABRATE para monitoramento da corrente de fuga dos pararraios de ZnO, e as características dos equipamentos.

Tabela 3.7: Características dos instrumentos de medição de corrente de fuga de pararraios de ZnO [11].

CARACTERÍSTICA DOS INSTRUMENTOS	LCM-500 DOBLE	EXCOUNT-II ABB	ACM SIEMENS	DIAG TRIDELTA
<b>PARÂMETROS DE MONITORAMENTO</b>				
Corrente de fuga total (pico)	X	X	X	X
Corrente de fuga total (eficaz)				X
Corrente de fuga capacitiva	X			
Componente resistiva da corrente de fuga total (IEC/B2)	X	X	X	
3º harmônica da corrente de fuga total (IEC/ B1)				X
Nº de impulsos		X	X	
Amplitude dos impulsos		X	X	
Energia dos impulsos			X	
Medição prolongada	X			
Medição remota	X	X	X	
<b>INFORMAÇÕES OPERACIONAIS E DE APLICAÇÃO</b>				
Portátil para utilização abrangente	X			X
Fixo para utilização específica em um para-raios		X	X	
Aplicável a qualquer para-raios (fabricante)	X	X		X

A tabela 3.8 apresenta uma análise comparativa das técnicas preditivas de diagnóstico de pararraios de acordo com experiência das empresas brasileiras.

Tabela 3.8: Análise comparativa das técnicas preditivas de diagnóstico de pararraios de acordo com a experiência das empresas brasileiras [11].

Método de Diagnóstico	Aplicação		Eficácia no diagnóstico (condição)								Complex. Execução / Diagnóstico	Risco na execução <sup>*1</sup>	Sensib. variáveis externas	Experiência na aplicação	Custo do Instrum.	Custo / benefício utiliz. <sup>*2</sup>
	Fora de serviço	Em serviço	SIC	ZnO	SIC início	ZnO início	SIC risco	ZnO risco	SIC falha	ZnO falha						
			insipiente	insipiente	degradação	degradação	degradação	degradação	degradação	degradação						
Termografia		X	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Alto	Baixo						
Comp. Resistiva da corrente de fuga		X	Nenhuma	Baixa	Nenhuma	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Média	Alto	Alto
3 <sup>o</sup> harmônica da corrente de fuga		X	Nenhuma	Baixa	Nenhuma	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Média	Alta	Média	Médio	Médio
Corrente de fuga total com milivoltímetro		X	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média	Alta	Baixo	Alto
Contador de operações		X	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixo	Alto
Inspeção visual		X	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Baixa	Baixa	Alta	Baixo	Médio
Descargas Parciais		X	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Nenhuma	Médio	Alto
Perdas dielétricas	X		Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Alta	Alto	Alto
Resistência isolamento	X		Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Alta	Médio	Alto

\*1 Refere-se à análise comparativa dos riscos na execução das técnicas avaliadas.

\*2 O custo/benefício foi definido como razão entre o custo de aplicação da técnica, incluindo a aquisição, e o seu benefício na gestão do desempenho dos pararraios.

### 3.11 Considerações Gerais

Não há na literatura proposta de análise semelhante a proposta neste trabalho, isto é, não existem pesquisas documentadas onde o parâmetro de estudo para diagnóstico do nível de degradação que se encontra o pararraios seja a distorção harmônica total (THD) da sua corrente de fuga, ainda que o grau de distorção harmônica já tenha sido identificado como um forte indicador do nível de degradação do dispositivo [2].

Ainda no ano 2000, TASKIN [29] propôs um sistema similar ao desenvolvido nessa dissertação. Em seu trabalho desenvolveu um sistema que aferia a corrente de fuga de pararraios utilizando um link óptico. Ainda que seus testes tenham se limitado ao laboratório pode atestar as vantagens de se utilizar fibras ópticas, como a sua imunidade a campos elétricos e magnéticos. O presente trabalho apesar de obter a corrente de fuga por meio de um link óptico, difere de [29] uma vez que realiza a análise do valor de THD do sinal enquanto TASKIN [29] se preocupou com a parcela resistiva da corrente. Outras diferenças residem no fato de que TASKIN [29] utilizou o link óptico para transmissão de dados analógicos, enquanto neste trabalho toda aquisição de dados é realizada antes da transmissão, e no tipo de fibra utilizado neste trabalho. Neste desenvolvimento é usada fibra óptica plástica enquanto TASKIN [29] empregou fibra de sílica.

Outro trabalho que se assemelha ao objeto desta dissertação foi apresentado por LIRA *et al.* [37] que propôs em seu trabalho a análise conjunta do 3°, 5°, 7° e 9° harmônicos extraídos da corrente de fuga total do dispositivo, utilizando um tipo especial de rede neurais. A técnica exposta pode ser utilizada em sistemas já instalados e não necessita da medição da tensão no dispositivo. Os resultados foram positivos durante os testes de laboratório, entretanto a técnica possui a desvantagem da complexidade envolvida na utilização de Redes Neurais com muito nós, principalmente quando são considerados sistemas que serão instalados em campo.

LIRA *et al.*[30] chegou a utilizar um microcontrolador para aquisição da corrente de fuga e do sinal de tensão do pararraios, dessa vez para analisar a componente resistiva da corrente de fuga. O envio de dados para a estação de processamento era realizado através de RS232 ou por um link de rádio. Apesar de ter obtido bons resultados em laboratório não elimina a necessidade de um sinal de tensão como referência para sua análise.

Pode-se assim concluir que os conceitos investigados por estes pesquisadores indicam que a metodologia de análise e arquitetura de hardware propostas neste trabalho possuem bases importantes, que serão utilizadas como ponto de partida para a pesquisa. Devido a falta de consenso atual sobre qual metodologia é a mais adequada para se utilizar e as desvantagens dos métodos atuais, acredita-se que a proposta de metodologia deste trabalho poderá contribuir para um convergência sobre o método ou conjunto de métodos de diagnóstico mais adequado para o monitoramento dos pararraios.

## Capítulo IV. Metodologia

O objetivo principal da pesquisa foi a busca de subsídios que indicassem o valor de THD da corrente de fuga total do pararraios, como um parâmetro indicativo do seu nível de degradação. A avaliação de um método que propõe acompanhar a vida útil de um pararraios, e identificar o início de sua degradação, é complexo, pois a vida operacional deste dispositivo pode ultrapassar duas décadas [11]. Devido ao tempo demasiadamente longo, constantemente opta-se pelo envelhecimento acelerado de um exemplar, ou mesmo o estudo de diversos exemplares previamente diagnosticados em níveis de degradação diferentes [2].

Neste trabalho, um procedimento singular foi utilizado para a avaliação do método proposto. Ao analisar termografias de pararraios de ZnO degradados, constata-se áreas com temperaturas superiores às esperadas para um dispositivo em bom estado. Todavia, são áreas que englobam um grupo de pastilhas de ZnO específicos, enquanto as demais mantiveram a temperatura em patamar inferior. Assim, da mesma forma que acontece com um pararraios, pode-se inferir que as pastilhas mais quentes estariam mais degradadas. A figura 4.1 apresenta a termografia do pararraios utilizado neste trabalho, diagnosticado como degradado, pela Eletronorte.

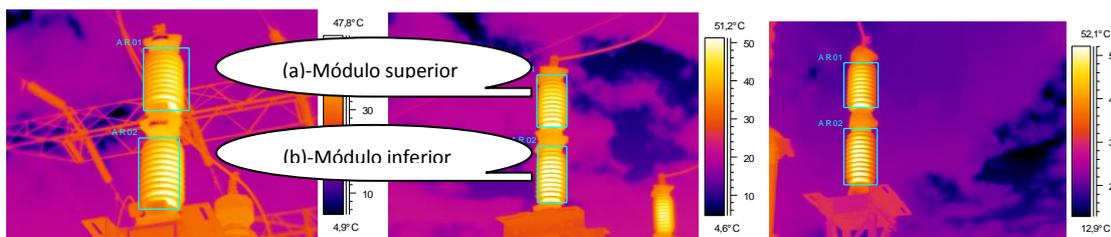


Figura 4.1: Termografia do pararraios fornecida pela concessionária elétrica proprietária do dispositivo. Dados fornecidos:  $\Delta T$  máximo em relação a temperatura ambiente relacionado a: (a) 23,2°C; (b) 26,5°C.

Foi pressuposto que a análise das pastilhas de ZnO, resistores não lineares formadores de um pararraios previamente diagnosticado com defeito, indicaria pastilhas em diferentes níveis de degradação. Nesse contexto, cada pastilha poderia representar um pararraios em escala menor, com  $U_c$  proporcionalmente menor. Consequentemente,

a partir de uma unidade de pararraios considerada degradada, seriam obtidos tantos pararraios, de menor  $U_c$ , quantas fossem as pastilhas utilizadas em sua construção, em diferentes níveis de degradação.

Neste capítulo será apresentada a metodologia que norteou a execução do projeto no qual se baseia esta dissertação. A organização dos tópicos revela o encadeamento de ações tomadas ao longo do desenvolvimento, expondo detalhadamente o planejamento adotado. São descritas, na ordem cronológica de seus acontecimentos as etapas: testes preliminares; ensaio dos resistores não-lineares; tratamentos dos dados do ensaio; difratometria dos resistores não-lineares; ensaio de temperatura do varistor; projeto e desenvolvimento do protótipo para diagnóstico de pararraios; e teste em bancada do protótipo.

#### **4.1 Testes preliminares**

O principal objetivo deste trabalho é gerar subsídios para que o valor de THD da corrente de fuga total do pararraios possa ser utilizado como parâmetro indicativo de seu grau de degradação. Portanto, é importante garantir que a estrutura e equipamentos utilizados nos ensaios e testes não injetem componentes harmônicas no sistema, tampouco atenuem componentes harmônicas originadas devido ao comportamento não-linear do objeto ensaiado.

Também é necessário garantir que a razão entre o valor de pico e o valor rms da alimentação esteja dentro da margem de  $\sqrt{2}$  com tolerância de  $\pm 5\%$ , conforme sugerido na norma da IEEE para testes utilizando tensão alternada [43], desta forma não haveria influência de harmônicos provenientes da alimentação nos resultados dos experimentos.

Para garantir que não haveriam influências externas significativas nos valores de THD aferidos ao longo dos ensaios, foram executados 3 testes preliminares. O primeiro teste realizado serviria como referência para o segundo teste preliminar, tendo como resultado as características do sinal obtido a partir do gerador. O objetivo consistiu em avaliar o THD da onda de referência gerada por um gerador de sinais. A figura 4.2 apresenta a configuração do teste.

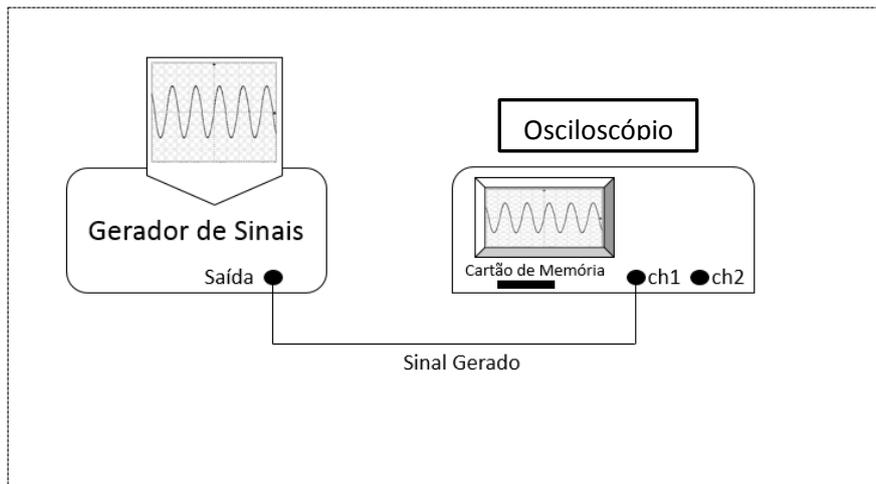


Figura 4.2: Estrutura do primeiro teste preliminar.

O gerador de sinais foi ajustado para fornecer um onda senoidal de frequência igual a 60 Hz com valor eficaz de 2 Volts. A saída do gerador de sinais foi conectada diretamente a um osciloscópio, e o sinal medido é armazenado em um cartão de memória. O sinal armazenado foi amostrado a uma taxa 100 kHz, taxa suficiente para identificar harmônicos de até 50kHz sem perda de informação de acordo com o teorema de Nyquist [44]. Posteriormente, o sinal amostrado foi analisado e seu valor de THD calculado manualmente utilizando-se o software ORIGIN [45] para execução da transformada de Fourier do sinal, com posterior apoio do Excel no cálculo do valor de THD, cujo método será discutido na seção 4.3.

Nos ensaios principais, onde serão utilizadas as pastilhas de ZnO, o sinal da corrente de fuga e da tensão aplicada sobre a pastilha serão aferidos através de cabos coaxiais de comprimento igual a 10 metros. A eventual influência dos cabos nos sinais aferidos foi avaliada no segundo teste preliminar. Foi inserido entre o gerador de sinais e o osciloscópio os cabos coaxiais que seriam utilizados durante os ensaios das pastilhas, a figura 4.3 ilustra a nova configuração de teste.

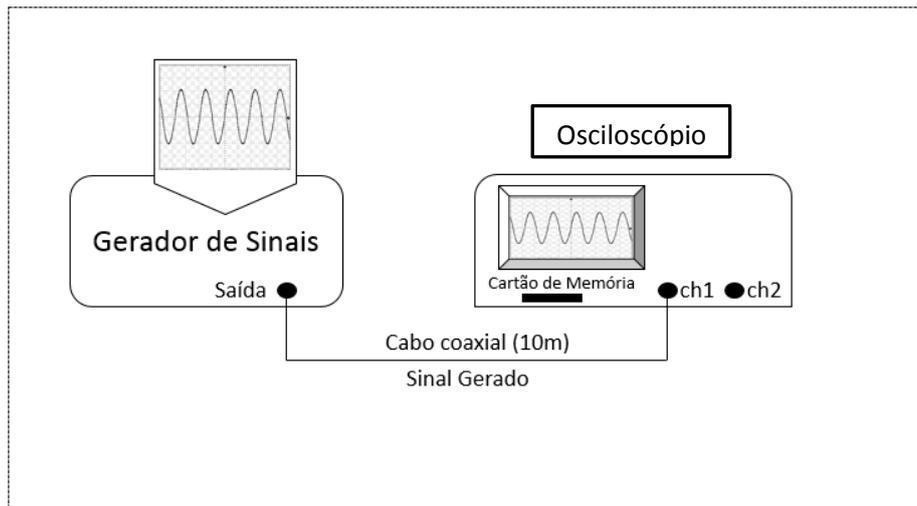


Figura 4.3: Estrutura do segundo teste preliminar.

A estrutura da figura 4.3 foi utilizada tanto para testar a influência do cabo coaxial que seria utilizado para aferição do sinal de tensão quanto para o teste do cabo coaxial que seria utilizado para aferição do sinal de corrente de fuga. Da mesma forma que no primeiro teste, o gerador de sinais foi ajustado para fornecer um onda senoidal de frequência igual a 60 Hz com valor eficaz de 2 volts.

Os sinais obtidos pelo osciloscópio foram armazenados em cartão de memória, para posterior análise dos valores de seus respectivos valores de THD. Os valores calculados serão comparados com o valor de THD obtido no primeiro teste preliminar, afim de determinar a influência isolada dos cabos coaxiais.

O terceiro e último teste preliminar garante que a fonte de alimentação utilizada nos ensaios dos resistores não-lineares atenderia a norma da IEEE para testes utilizando tensão alternada [43], e ainda identifica a distorção harmônica inerente à rede local e ao transformador de alta tensão que seria utilizado, permitindo a identificação da possível influência nos valores de THD medidos para as correntes de fuga das pastilhas de ZnO durante os ensaios. A figura 4.4 apresenta o diagrama em bloco do terceiro teste preliminar.

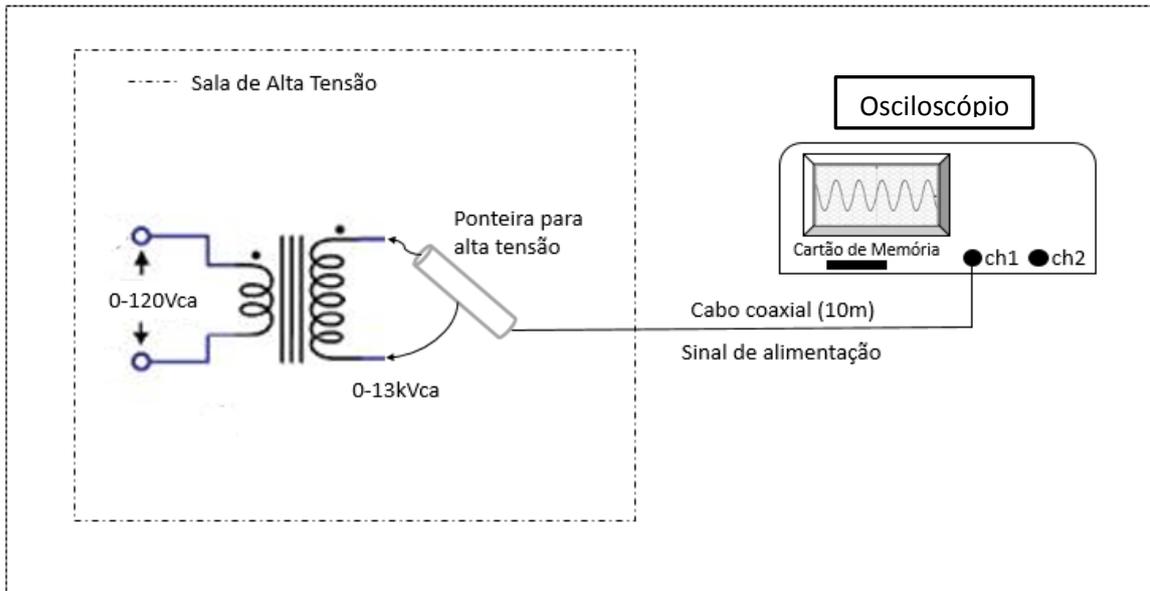


Figura 4.4: Estrutura do terceiro teste preliminar destinado a avaliar o sinal de alimentação.

A alimentação do primário do transformador foi ajustada afim de que o equipamento fornecesse 2,5kV no secundário, tensão que será utilizada no ensaio das pastilhas. Para aferição do sinal disponível no secundário do transformador, foi utilizado uma ponteira de alta tensão ligada ao osciloscópio através do cabo coaxial de 10 metros. As pontas para alta tensão possuem um impedância de 1000 M $\Omega$  e garantem uma relação de 1000 V : 1 V quando utilizados equipamentos de medição com impedância de entrada de 10 M $\Omega$  e 2000 V : 1 V quando utilizados equipamentos de medição com impedância de entrada de 1 M $\Omega$  [46]. O osciloscópio utilizado possui 1 M $\Omega$  como impedância de entrada, assim espera-se uma relação de 2000 V : 1 V no osciloscópio [47].

Assim como no ensaios predecessores, a forma de onda do sinal obtido pelo osciloscópio foi armazenado para posterior análise do respectivo valor de THD. O método de análise será discutido na seção 4.3.

## 4.2 Ensaio das pastilhas de ZnO

Os ensaios das pastilhas de ZnO foram realizados na sala de alta tensão do LIF. A primeira atividade relacionada diretamente aos ensaios dos varistores foi o desmembramento do exemplar de parraios enviado ao laboratório. As pastilhas

individuais de ZnO, desmontadas e identificadas, foram então ensaiadas. Essas duas etapas estão descritas nas seções 4.2.1 e 4.2.2, respectivamente.

#### 4.2.1 Desmembramento do Pararraios

O dispositivo utilizado é um pararraios de ZnO da ALSTOM com  $U_r$  de 120 kV, e  $U_c$  de 98 kV. O pararraios foi previamente diagnosticado como degradado pela concessionária parceira no desenvolvimento do projeto no qual esta dissertação se insere. É composto por dois módulos, cada um formado por dezenove pastilhas de ZnO dispostas em série. O pararraios foi cuidadosamente desmontado, suas partes estão ilustradas na figura 4.5. Para fins de localização espacial das pastilhas durante as análises, foram numeradas sequencialmente do ponto de contato com a alta tensão para o terra, do módulo superior para o módulo inferior.

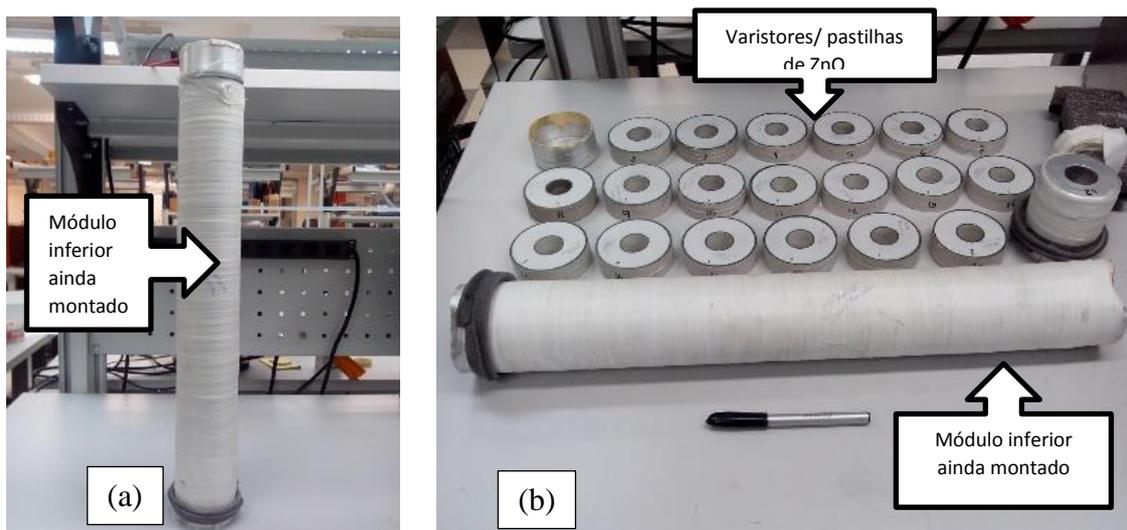


Figura 4.5: (a) Módulo inferior do pararraios; (b) Módulo desmontado.

#### 4.2.2 Procedimento de ensaio dos varistores

O pararraios foi desmembrado, e resultou em 38 pastilhas de ZnO. Cada pastilha foi ensaiada individualmente. AMORIM JUNIOR *et al.* [3] ensaiou módulos de pararraios separados, utilizando  $U_c$  proporcionalmente menor, a fim de serem utilizados como instrumentos para validação de método para diagnóstico.

Para a realização do ensaio foi calculada  $U_c$  proporcional ( $V_{\text{ensaio}}$ ) de cada pastilha, conforme a fórmula da equação 4.1.

$$V_{ensaio} = \frac{U_c \text{ total do pararraios}}{\text{número de pastilhas}} \quad (4.1)$$

onde,  $U_c$  total do pararraios é um parâmetro do fabricante e no dispositivo ensaiado é igual a 98 kV e número de pastilhas é igual a 38. Assim,  $V_{ensaio}$  foi calculado e vale aproximadamente 2,58 kV.

Cada pastilha de ZnO foi ensaiada individualmente, sendo submetida a  $V_{ensaio}$  por um período de 24h. Ao final do período do ensaio, os sinais de corrente de fuga e da tensão aplicada a pastilha eram amostrados a uma taxa de 10 kHz pelo osciloscópio, e armazenados em cartão de memória. Em seguida, sua temperatura era aferida. Uma pastilha, denominada pastilha de controle, era mantida dentro da sala de alta tensão, cuja temperatura foi considerada como a temperatura ambiente da sala. A figura 4.6 apresenta um diagrama ilustrativo do ensaio.

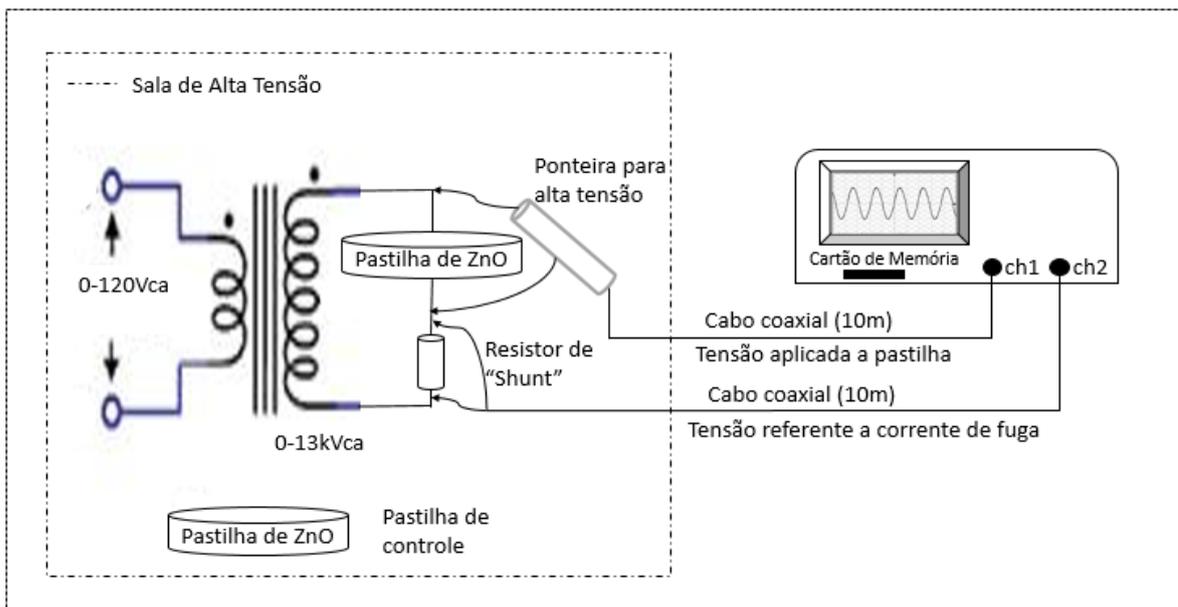


Figura 4.6: Diagrama do ensaio dos resistores não-lineares.

Tanto a temperatura da pastilha em ensaio quanto da pastilha de controle eram medidas utilizando termômetro digital infravermelho. Eram tomados pontos laterais, distantes  $180^\circ$  um do outro e executadas 3 medidas para cada ponto, alternadamente. A tabela 4.1 exemplifica como eram realizadas as aferições de temperatura das pastilhas.

Ao fim da realização das 3 medidas de cada lado das duas pastilhas, é calculada a média entre as três medidas de cada lado, identificada na tabela 4.1 como “Média”. Para cada pastilha, foi calculada uma média entre as médias laterais, identificada na tabela 4.1 como “Média 2”. A coluna Diff corresponde à diferença entre a temperatura da pastilha ensaiada (Média 2) ao final do ensaio e a temperatura da pastilha de controle, considerada como sendo a temperatura ambiente (Média 2).

Tabela 4.1: Tabela utilizada para registro das medidas de temperatura durante o ensaio.

Temperatura						
Pastilha 8						
Posição	Temperatura (°C)			Média	Média 2	
	Medida 1	Medida 2	Medida 3			
0°	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	
180°	29,1	29,0	28,8	29,0		Diff
Pastilha controle						
Temperatura (°C)						
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2	
0°	24,7	24,6	24,6	24,6	24,5	
180°	24,3	24,3	24,3	24,3		

Finalmente, foi levantada a curva “tensão-corrente” das pastilhas e também aferido o valor r.m.s. de sua corrente de fuga, quando submetida a  $V_{ensaio}$ . Em série com o resistor não-linear submetido ao ensaio, foi inserido um resistor de “shunt”, uma maneira prática para se aferir o sinal de corrente de fuga da pastilha. Para traçar a curva tensão corrente de cada pastilha, a tensão do primário do transformador foi manipulada de forma que a tensão no secundário variasse de 1,0 kV até 3,0 kV em degraus de 200 V. Em cada degrau era aferido o valor r.m.s. da corrente de fuga da pastilha, e cada medida foi realizada três vezes. A tabela 4.2 exemplifica o resultado do procedimento de medição para o traçado da curva “tensão- corrente” das pastilhas.

As medidas 1 e 3, na tabela 4.2, foram obtidas enquanto a tensão do secundário do transformador excursionava de 1kV para 3kV, enquanto os valores da medida 2 foram aferidos enquanto a tensão do secundário excursionava de 3kV para 1kV. Ao final é calculada a média das 3 medidas.

Tabela 4.2: Exemplo da tabela para levantamento da curva tensão-corrente das pastilhas.

Corrente de Fuga				
Tensão (kV)	Corrente (mA)			
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média
1	2,4	2,4	2,4	2,4
1,2	2,8	2,8	2,8	2,8
1,4	3,3	3,2	3,3	3,3
1,6	3,8	3,8	3,7	3,8
1,8	4,2	4,1	4,2	4,2
2	4,7	4,7	4,6	4,7
2,2	5,2	5,0	5,2	5,1
2,4	5,6	5,6	5,6	5,6
2,6	6,2	6,2	6,2	6,2
2,8	6,9	6,9	6,9	6,9
3	7,7	7,7	7,7	7,7

Os valores r.m.s. da corrente de fuga enquanto a pastilha estava submetida ao  $V_{\text{ensaio}}$  e as características de sua curva tensão-corrente foram utilizados como parâmetros adicionais durante a análise do nível de degradação de cada resistor não-linear.

### 4.3 Tratamento dos dados obtidos

As formas de onda obtidas durante os testes preliminares e as formas de onda de correntes de fuga, provenientes das pastilhas submetidas ao ensaio, primeiramente foram processadas manualmente utilizando-se o software ORIGIN [45] para execução da transformada de Fourier do sinal, e posteriormente o Excel como apoio no cálculo do valor de THD.

Devido as etapas do processamento nesta fase não serem complexas, optou-se nesse primeiro momento executá-las manualmente e assim poder dominá-las completamente para posterior construção de algoritmo e desenvolvimento de software

que fizessem esse papel. O fluxograma das atividades para cálculo do valor de THD é mostrado na figura 4.7.

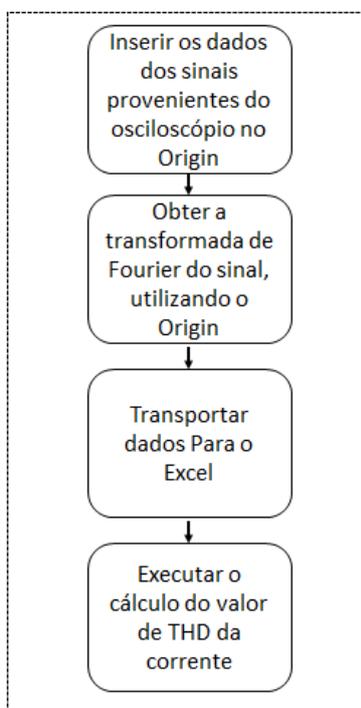


Figura 4.7: Fluxograma do processamento manual de dados para cálculo do valor de THD.

O valor de THD da corrente ainda não havia sido relacionado com os níveis de degradação de um pararraios. Sendo assim este trabalho propõe a análise do valor de THD com base em alguns métodos já difundidos na literatura para diagnóstico do dispositivo. O valores de THD obtidos serão analisados com base na temperatura final do teste [4, 16, 26], com o valor do terceiro harmônico da corrente de fuga total [2, 15, 31], com o valor r.m.s. da corrente de fuga total [15, 16].

A metodologia adotada sustenta-se no fato já explorado pela literatura que indica o aumento da componente de 3º harmônico da corrente de fuga total concomitantemente à elevação do nível de degradação do pararraios [1]. Estendendo esse conceito, o método analisará com o valor de THD o comportamento conjunto dos harmônicos da corrente de fuga total. O propósito do estudo foi identificar indicadores mais precisos sobre o estado do dispositivo, de uma maneira relativamente simples, com baixa complexidade computacional e matemática, que é o cálculo do valor de THD.

As componentes resistiva e capacitiva da corrente de fuga total também serão investigadas. Esse processamento foi realizado utilizando o software matemático MATLAB [48], a partir dos dados obtidos pelo osciloscópio. O fluxograma do algoritmo desenvolvido durante o trabalho e base para o software utilizado para o processamento dos dados é apresentado na figura 4.8.

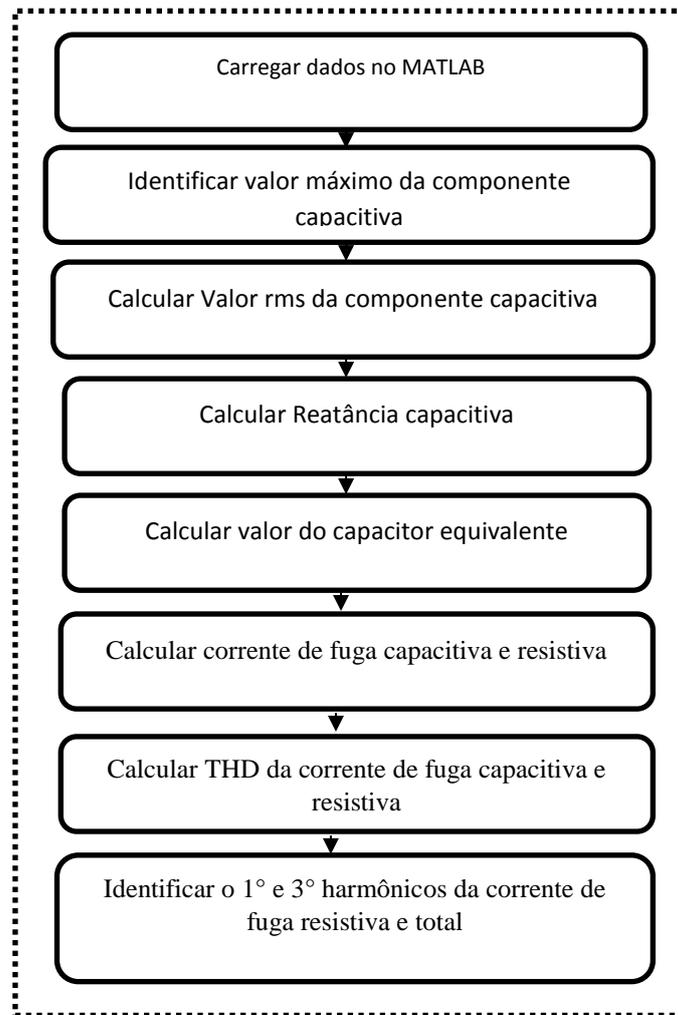


Figura.4.8: Algoritmo para separação das componentes capacitiva e resistiva da corrente de fuga.

O formato no qual as formas de onda são armazenadas pelo osciloscópio é o *comma-separated value* (CSV). O software está apto para interpretar esse tipo de arquivo, entretanto atualmente é necessário um pré-processamento manual dos dados, uma vez que dentro do arquivo o osciloscópio armazena alguns dados de controle que não são interpretados pelo algoritmo. A forma de execução mais prática é a transposição da coluna de dados do arquivo CSV, para uma variável no MATLAB.

### 4.3.1 Cálculo do valor de THD

O cálculo do THD foi efetuado segundo a fórmula da equação 4.2 [49].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^M I_n^2}}{I_1} \quad (4.2)$$

$I_n$  – Amplitude do Harmônico de ordem  $n$ ;

$I_1$  – Amplitude da fundamental;

$M$  – Ordem do harmônico de maior ordem disponível.

Costumeiramente o THD é expresso utilizando porcentagem, de acordo com a equação 4.3.

$$THD(\%) = 100 \times THD \quad (4.3)$$

As amplitudes dos harmônicos foram calculadas utilizando a ferramenta de análise do software ORIGIN, através da qual é possível realizar a transformada de Fourier do sinal. Como resultado da operação o ORIGIN devolve uma tabela da qual duas colunas são aproveitadas: frequência e amplitude, que nada mais é que a amplitude do harmônico da frequência relacionada.

As duas colunas devolvidas pelo ORIGIN são capturadas e transportas para o EXCEL, onde o cálculo do THD é efetuado. Qualquer outra ferramenta matemática poderia ter sido utilizada para o cálculo, a escolha do ORIGIN e do EXCEL é uma opção do pesquisador.

Para as formas de onda originadas nos testes preliminares, a análise dos valores de THD servirá apenas para identificar possíveis interferências nos valores obtidos durante os ensaios das pastilhas de ZnO. Entretanto, a análise dos valores de THD das formas de onda da corrente de fuga de cada pastilha é de suma importância para o trabalho.

Os valores de THD de cada pastilha são correlacionados com outros parâmetros destas, como por exemplo a amplitude do terceiro harmônico da corrente de fuga total, e também todos os valores de THD obtidos são correlacionados entre si. A comparação e

correlação é importante para se determinar algum padrão de variação do valor de THD de acordo com o nível de degradação da pastilha.

### 4.3.2 Separação das correntes resistiva e capacitiva

A decomposição da corrente de fuga total em suas componentes capacitivas ( $I_c$ ) e resistivas ( $I_r$ ) se baseia no método descrito por BRITO *et al.* [50], denominado método da filtragem digital, que consiste em obter o valor de  $I_c$  quando o valor da tensão de alimentação aplicada é zero. O valor de  $I_c$  é máximo quando a derivada da tensão de alimentação é máxima e isso ocorre no ponto de cruzamento da tensão com zero. O software desenvolvido rastreia o ponto de máxima derivada da tensão de alimentação para determinar o valor de  $I_{c_{max}}$ . Uma vez identificado o valor máximo da componente capacitiva ( $I_{c_{max}}$ ), pode-se determinar seu valor rms ( $I_{c_{rms}}$ ), pela equação 4.4.

$$I_{c_{rms}} = \frac{I_{c_{max}}}{\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

De posse do valor de  $I_{c_{rms}}$ , é possível calcular o valor da reatância capacitiva ( $X_c$ ) associada a componente capacitiva da corrente de fuga utilizando a equação 4.5.

$$X_c = \frac{V_{rms}}{I_{c_{rms}}} \quad (4.5)$$

Onde  $V_{rms}$  é a o valor rms da tensão do ensaio. O próximo passo é o cálculo da capacitância equivalente ( $C_{eq}$ ) da pastilha que está sendo ensaiada, que pode ser efetuado pela equação 4.6.

$$C_{eq} = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (4.6)$$

Onde  $f$  é frequência da tensão de alimentação utilizada no ensaio e é igual a 60 Hz. A partir de  $C_{eq}$  pode-se chegar ao valor de  $I_c(t)$ , utilizando a equação 4.7 [51]

$$I_c(t) = C_{eq} \frac{dV(t)}{dt} \quad (4.7)$$

Onde  $V(t)$  é a tensão de alimentação do ensaio. A componente resistiva da corrente de fuga,  $I_r(t)$ , é obtida pela equação 4.8.

$$I_r(t) = I_t(t) - I_c(t) \quad (4.8)$$

Onde  $I_t(t)$  representa o valor da corrente de fuga total da pastilha em ensaio. Determinados os valores de  $I_c$  e  $I_r$ , o software executa a transformada de Fourier de cada sinal. Diferente do que acontecia nos primeiros cálculos de THD utilizados para a corrente de fuga total, o cálculo do valor de THD da componente capacitiva e resistiva da corrente de fuga foram incorporados ao algoritmo no MATLAB, calculado pela equação 4.3. Os valores absolutos do primeiro e terceiro harmônico da componente resistiva são armazenados para análises.

As informações obtidas por essa etapa do processamento de dados servem como respaldo para a classificação das pastilhas, quanto ao seu nível de degradação. A classificação das pastilhas individualmente e em conjunto são importantes para a identificação de algum padrão de comportamento dos valores de seus respectivos valores de THD.

#### **4.4 Difractometria de raios X das pastilhas de ZnO**

Uma das etapas do projeto, consistiu em analisar a estrutura cristalina das pastilhas de ZnO afim de determinar se houve mudanças nas estruturas dos resistores não-linear com o aumento do nível de sua degradação.

A realização do ensaio de difratometria de raios X não foi realizada pelo LIF. O ensaio foi realizado por uma equipe parceira do laboratório oriunda da Universidade Federal do Espírito Santo. Sendo assim o estruturação da metodologia de ensaio não entrou no escopo desta dissertação.

#### **4.5 Ensaio de temperatura do varistor**

Complementarmente ao ensaio das pastilhas de ZnO, no qual são submetidas a  $U_c$  ao longo de 24 h e posteriormente são obtidas as informações de corrente de fuga e temperatura referente a ela, foi executado neste trabalho um ensaio para a avaliação do

comportamento da corrente de fuga de uma pastilha mediante variação de sua temperatura.

O ensaio de temperatura deve necessariamente ser realizado após a conclusão do ensaio de tensão. A justificativa da ordenação dos ensaios reside no método proposto pela equipe envolvida neste projeto, uma vez que a pastilha escolhida para o ensaio de temperatura deverá ser umas das quais obteve menor variação de temperatura no ensaio de tensão.

Para o ensaio de temperatura a pastilha selecionada foi acomodada dentro de uma estufa, e submetida a  $U_c$ . A figura 4.9 apresenta o a estrutura do ensaio.

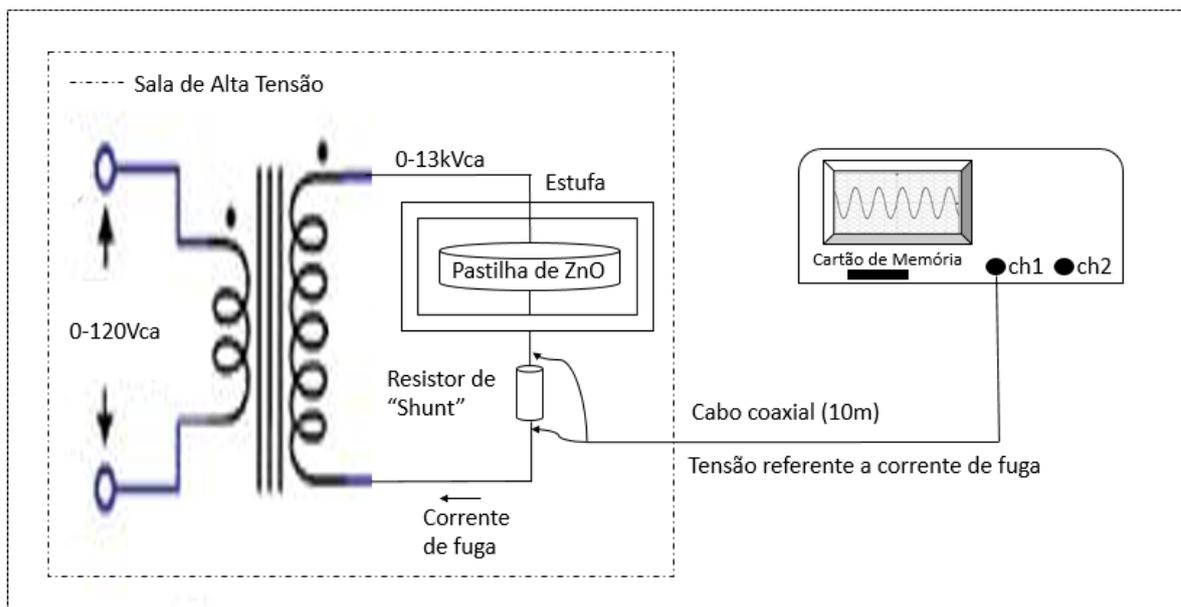


Figura 4.9: Ensaio de temperatura das pastilhas de ZnO.

A temperatura da estufa variou de  $26,4^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente) a  $60^{\circ}\text{C}$ , em degraus de  $5^{\circ}\text{C}$ . A cada degrau de temperatura, o sistema passava por um tempo de estabilização mínimo de 3 h, e então seu sinal de corrente de fuga total era amostrado pelo osciloscópio, para posterior análise. O objetivo deste teste é observar a dependência da corrente de fuga com a temperatura, já mostrado em [16].

#### 4.6 Projeto e desenvolvimento do protótipo para diagnóstico de pararraios

Como objetivo secundário deste trabalho, um protótipo para obtenção da corrente de fuga de pararraios em operação foi desenvolvido e testado em bancada. Para obtenção do sinal da corrente de fuga, foi utilizada uma bobina toroidal com relação de

bobinas 200:5. Um diagrama em blocos do conceito geral do sistema que norteará o desenvolvimento do protótipo é mostrado na figura 4.10.

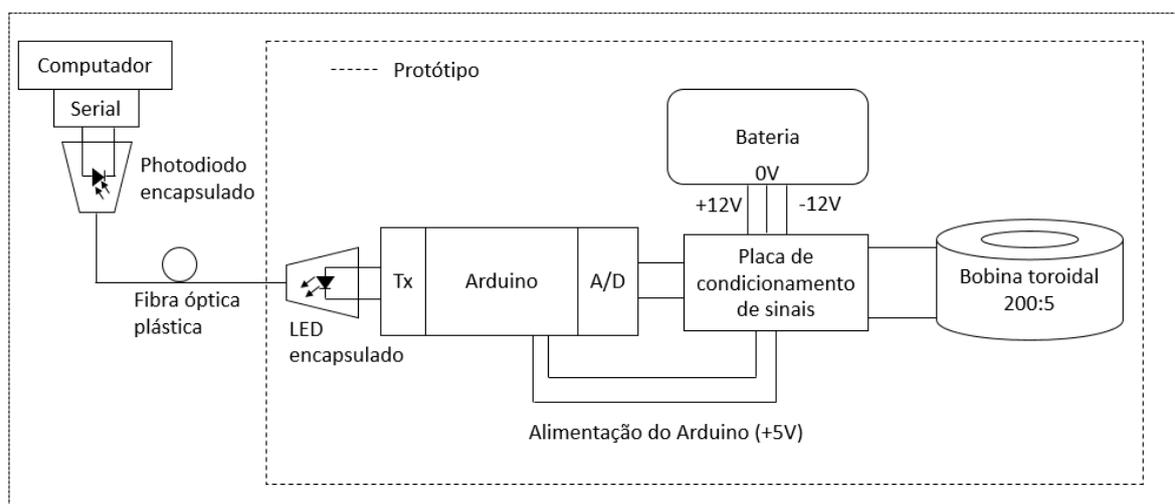


Figura 4.10: Diagrama em blocos do sistema para obtenção da corrente de fuga de pararraios.

O primário da bobina, que passa pelo seu centro, induz uma corrente no secundário proporcional a sua própria corrente. Observando a figura 4.10 nota-se que o secundário da bobina está conectado a uma placa de condicionamento de sinais. A placa de condicionamento de sinais captura o sinal de corrente proveniente do secundário da bobina, amplifica e insere um nível DC e entrega o sinal condicionado à placa microprocessada.

A inserção de um nível DC no sinal é necessária uma vez a placa microprocessada não é preparada para receber valores negativos na entrada de seus conversores analógicos-digitais. A placa condicionadora de sinais também converte os níveis de alimentação fornecidos pela bateria, para os níveis necessários para seu próprio funcionamento e também da placa microprocessada.

A placa microprocessada utilizada no protótipo é o Arduino [52], uma plataforma microprocessada de código aberto e baixo custo. O Arduino realizará a amostragem do sinal entregue pela placa de condicionamento de sinais e posterior envio do sinal para estação de monitoramento, que no laboratório será um computador.

O meio físico utilizado para envio do sinal será fibra óptica plástica (POF). A Fibra de Plástico é uma Fibra multimodo com núcleo grande, com diâmetro típico de 1 mm. Eram utilizadas inicialmente para iluminação e curtos *links* de comunicação em

baixa velocidade. Seu grande tamanho torna fácil acoplar muita luz da fonte e faz com que os conectores não necessitem de alta precisão. Como resultado, os conectores custam apenas 10 a 20% do valor dos conectores de fibras de vidro, e a terminação é mais simples, sendo também robusta e fácil de instalar sem maiores riscos de danos [53]. Na fase do projeto na qual está inserida esta dissertação todo o processamento e análise dos dados será realizado pelo computador, com o método descrito na seção 1.3.

#### 4.7 Testes em laboratório com o protótipo

O protótipo desenvolvido passará por testes no laboratório, onde foram utilizados dados simulados a partir dos dados obtidos no ensaio cuja metodologia foi apresentada na seção 4.2. O teste em bancada com sinais simulados tem o objetivo de avaliar o erro introduzido pelo protótipo nos valores de THD aferidos e qual o impacto desse erro na análise geral das pastilhas. O diagrama geral do teste é apresentado na figura 4.11.

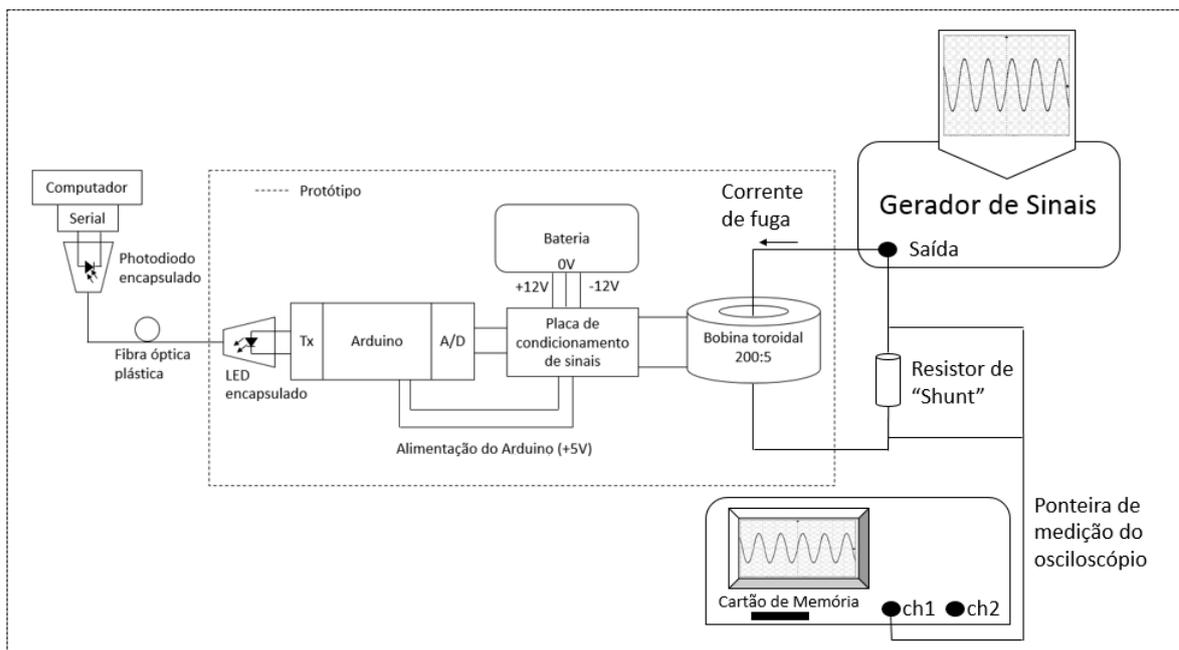


Figura 4.11: Diagrama em bloco do teste em bancada do protótipo.

O gerador de sinais utilizado no teste em bancada permite que sejam importados para sua memória interna arquivos contendo sinais próprios do usuário. Essa funcionalidade permitiu que o desempenho do protótipo fosse avaliado ainda em bancada com sinais reais, sem a necessidade da repetição dos ensaios em alta tensão.

Os sinais de corrente de fuga obtidos nos ensaios cujo método foi descrito na seção 4.2, foram importados um a um para a memória do gerador de sinais. A saída do gerador era conectada a um resistor de “shunt” de valor 1 k $\Omega$  conectado a um fio que passava por dentro da bobina toroidal, constituindo-se em seu primário.

Todos os sinais de corrente de fuga obtidos nos ensaios das pastilhas de ZnO foram utilizados. Na figura 4.11, o sinal capturado e armazenado pelo o osciloscópio serve como referência para o valor de THD do sinal de entrada, tanto para comparação com o sinal amostrado pelo Arduino e processado pelo computador quanto para comparação com o sinal original, obtido nos ensaios dos varistores.

Os valores de THD dos sinais obtidos a partir do protótipo foram comparados com os valores de THD dos sinais de entrada obtidos utilizando-se o osciloscópio. Foram analisados os erros introduzidos pelo protótipo, um método para compensá-los e a influência dos erros compensados na avaliação geral do nível de degradação das pastilhas de ZnO.

# Capítulo V. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados, assim como, a análise os dados provenientes dos testes e ensaios cujas metodologias foram descritas no capítulo IV. A sequência de apresentação dos itens, para um melhor entendimento, seguirá a ordem da metodologia apresentada.

## 5.1 Testes preliminares

O primeiro teste teve como objetivo avaliar o nível do valor de THD da onda senoidal gerado pelo gerador de funções do LIF, pois esse valor serviria como referência para os demais testes realizados. O sinal programado no gerador é apresentado na figura 5.1, com valor eficaz de 2 V e frequência igual a 60Hz.

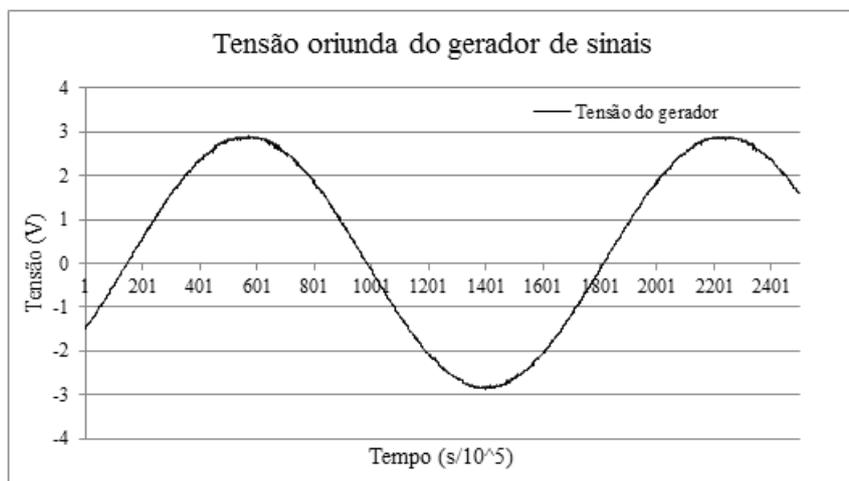


Figura 5.1: Tensão fornecida pelo gerador de sinais.

A DFT do sinal é mostrada na figura. 5.2.

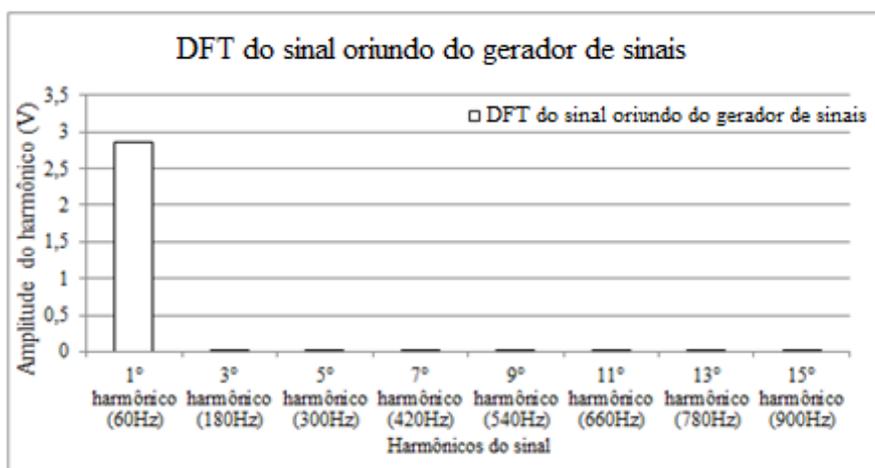


Figura 5.2: DFT do sinal programado no gerador de sinais.

Os valores calculados para o THD e amplitudes do primeiro e terceiro harmônico são mostrados na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características do sinal do gerador de função.

Amplitude do sinal (valor de pico)	2,92V
Amplitude do 1° harmônico	2,86V
Amplitude do 3° harmônico	6mV
Percentual de conteúdo de terceiro harmônico	0,2%
THD	1,0%

O segundo teste preliminar previa avaliar a inserção de possíveis harmônicos, ou atenuações, devido ao uso de cabos coaxiais nos ensaios dos resistores não-lineares. Foram utilizados dois cabos de 10 metros denominados cabo-a e cabo-b. A figura 5.3 apresenta o sinal aferido pelo cabo-a e a figura 5.4 ilustra o resultado de sua DFT.

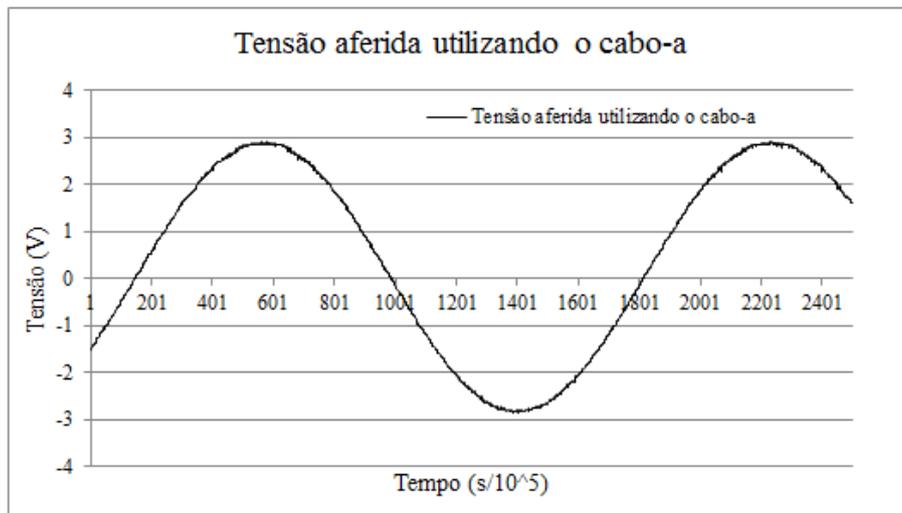


Figura 5.3: Tensão aferida utilizando o cabo-a.

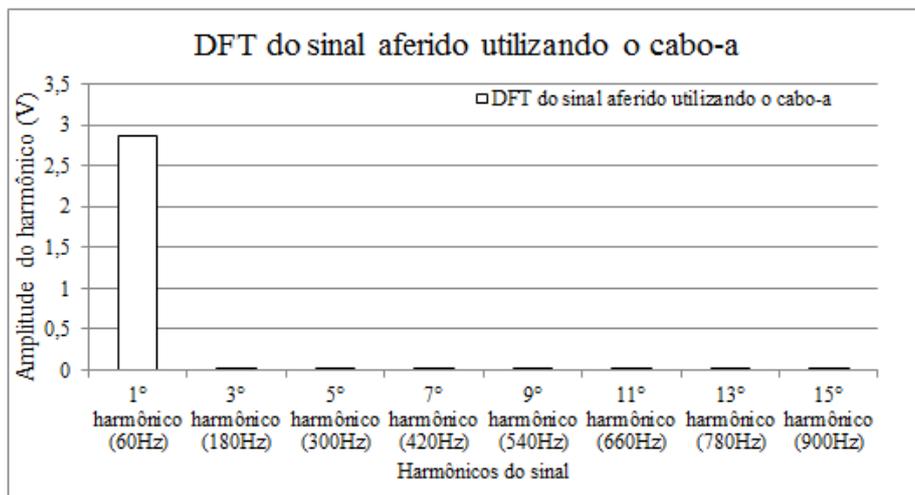


Figura 5.4: DFT do sinal aferido utilizando o cabo-a.

Os valores calculados para o THD e amplitudes do primeiro e terceiro harmônico do sinal obtido utilizando o cabo-a são mostrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Características do sinal obtido utilizando o cabo-a.

Amplitude do sinal (valor de pico)	2,92V
Amplitude do 1° harmônico	2,86V
Amplitude do 3° harmônico	4mV
Percentual de conteúdo de terceiro harmônico	0,1%
THD	1,0%

A figura 5.5 apresenta o sinal aferido pelo cabo-b e a figura 5.6 ilustra o resultado de sua DFT.

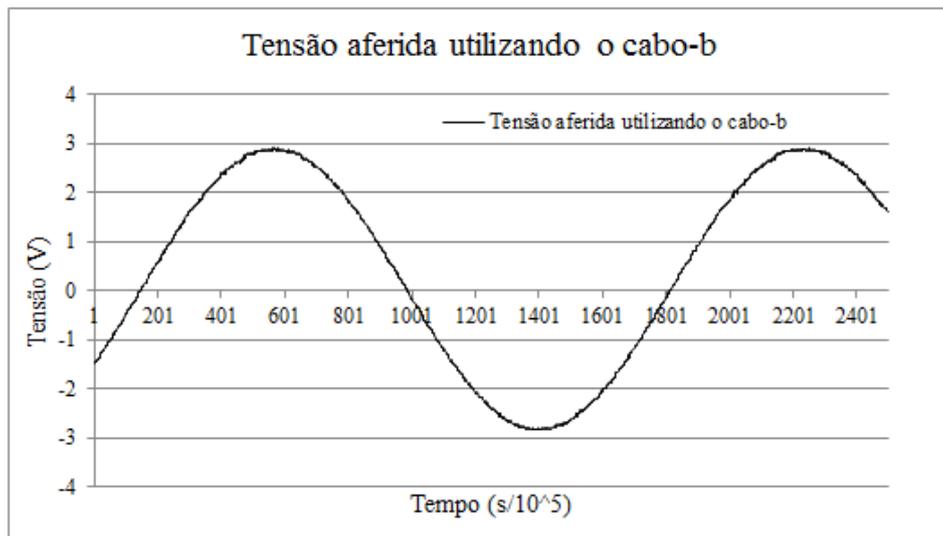


Figura 5.5: Tensão aferida utilizando o cabo-a.

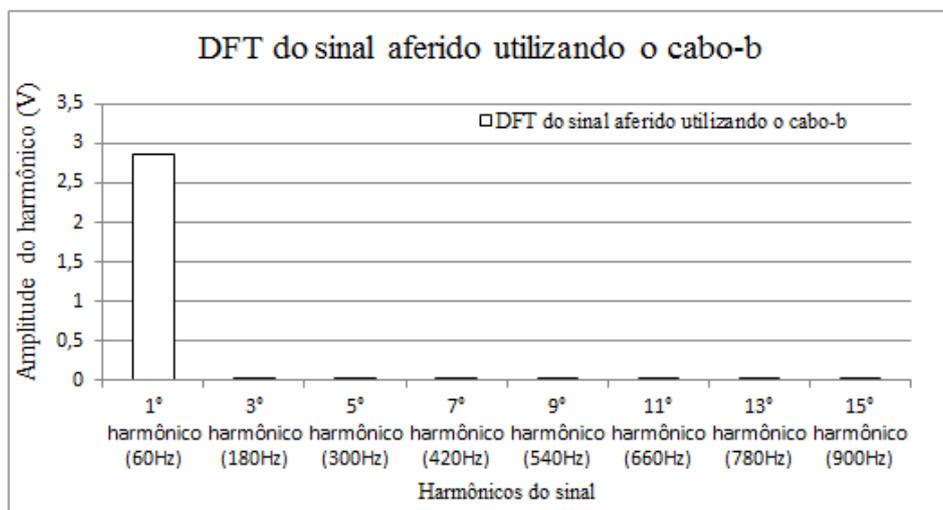


Figura 5.6: DFT do sinal aferido utilizando o cabo-b.

Os valores calculados para o THD e amplitudes do primeiro e terceiro harmônico do sinal obtido utilizando o cabo-b são mostrados na tabela 5.3.

Tabela 5.3: características do sinal obtido utilizando o cabo-b.

Amplitude do sinal (valor de pico)	2,92V
Amplitude do 1° harmônico	2,86V
Amplitude do 3° harmônico	5mV
Percentual de conteúdo de terceiro harmônico	0,2%
THD	1,0%

A tabela 5.4 apresenta um comparativo entre os três sinais.

Tabela 5.4: Comparativo entre os sinais.

	Amplitude do sinal (valor de pico) (V)	Amplitude do 1° harmônico (V)	Amplitude do 3° harmônico (mV)	Percentual de componente de terceiro harmônico (%)	THD (%)
Origem do sinal					
Gerador	2,92	2,86	6	0,2	1,0
Cabo-a	2,92	2,86	4	0,1	1,0
Cabo-b	2,92	2,86	5	0,2	1,0

Pode-se constatar pela tabela 5.4 que não há influências no sinal aferido, tanto no que diz respeito a inserção de harmônicos quanto atenuações, com a utilização dos cabos coaxiais. Sendo assim, foi realizado um terceiro teste preliminar com o intuito de avaliar a fonte de alimentação utilizada nos ensaios resistores não-lineares. A figura 5.7 mostra o sinal de tensão fornecido pela fonte, quando sua entrada está ajustada de forma que a saída forneça 2,5kV. O resultado da DFT do sinal pode ser analisado na figura 5.8.

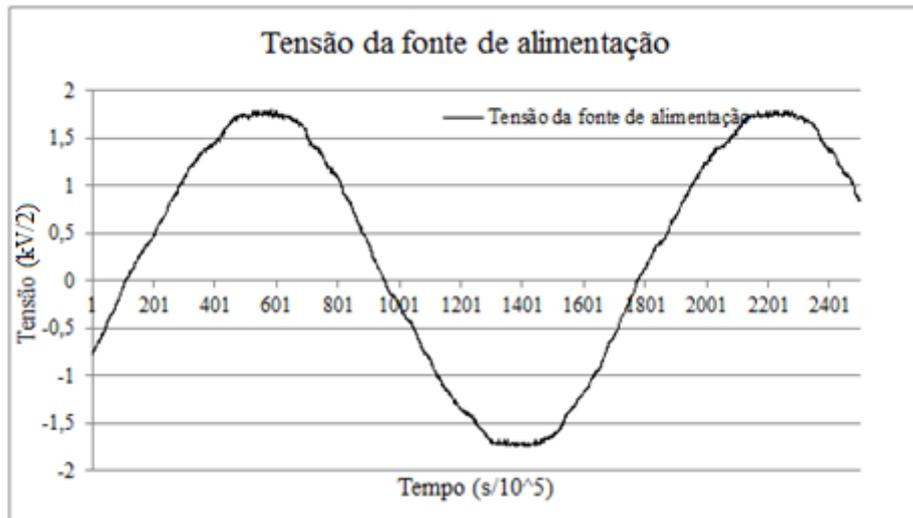


Figura 5.7: Tensão da fonte de alimentação.

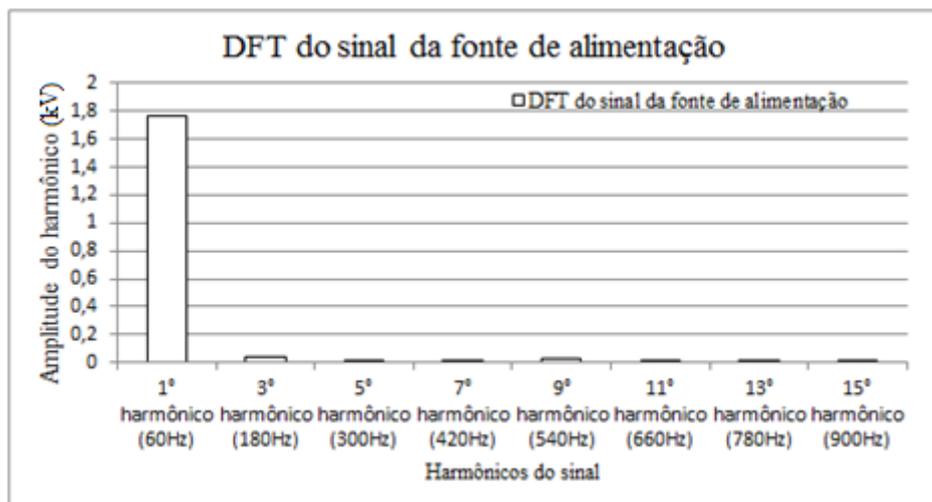


Figura 5.8: DFT do sinal da fonte de alimentação.

A tabela 5.5 apresenta as características do sinal de alimentação.

Tabela 5.5: Características do sinal de alimentação.

Amplitude do sinal (valor de pico)	3,6 kV
Valor r.m.s. do sinal	2,6 kV
Amplitude do 1º harmônico	3,5 kV
Amplitude do 3º harmônico	85 V
Percentual de conteúdo de terceiro harmônico	2,4%
THD	3,4%

A norma da IEEE para testes em alta-tensão [43] diz que é necessário garantir que a razão entre o valor de pico e o valor r.m.s. da alimentação esteja dentro da margem de  $\sqrt{2}$  com tolerância de  $\pm 5\%$ . Desta forma, não há influências de harmônicos provenientes da alimentação nos resultados dos experimentos. A razão entre o valor de pico e r.m.s. do sinal de alimentação é  $\sqrt{2} - 5\% < 1,39 < \sqrt{2} + 5\%$ . Portanto, a fonte adequada para os ensaios dos resistores não-lineares. Ainda que haja alguma influência do terceiro harmônico da tensão nos ensaios dos varistores em laboratório, não comprometerá a análise dos dados, uma vez que a análise é relativa. Ou seja, a classificação dos resistores não-lineares ensaiados é feita por comparação, e todos serão ensaiados com a mesma fonte de alimentação.

## **5.2 Ensaios das pastilhas de ZnO do pararraios**

O pararraios foi desmontado, e resultou em 38 pastilhas de ZnO. As pastilhas foram então numeradas sequencialmente, de 1 a 38, começando com a primeira pastilha do módulo superior (a pastilha que fica mais próxima da alta-tensão), e terminando na última pastilha do módulo inferior (que fica próxima da base aterrada do pararraios). Durante os ensaios três pastilhas foram danificadas, e seus dados não estão presentes nas análises, são elas as pastilhas 7, 17 e 37.

Cada pastilha de ZnO foi ensaiada individualmente, sendo submetida a  $V_{\text{ensaio}}$  (aproximadamente 2,6 kV) por um período de 24h. Ao final do período do ensaio, os sinais de corrente de fuga e da tensão aplicados a pastilha foram amostrados a uma taxa de 10 kHz pelo osciloscópio, e armazenados em cartão de memória. A figura 5.9 mostra, como exemplo, o sinal de corrente de fuga amostrado da pastilha 4. As formas de onda referentes à corrente de fuga das demais pastilhas podem ser consultadas no apêndice A.

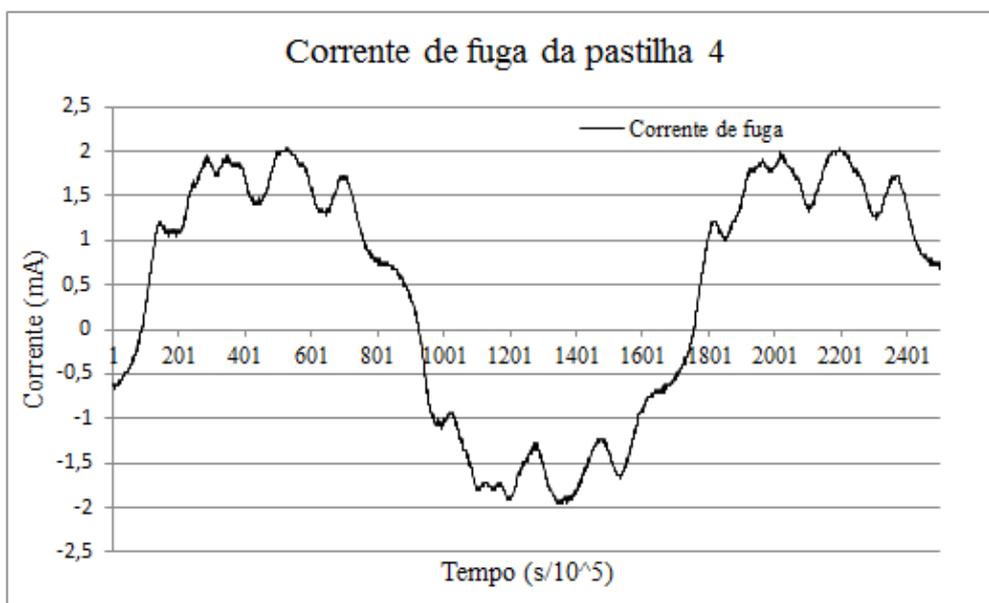


Figura 5.9: Corrente de fuga da pastilha 4.

Ao final do ensaio a temperatura da pastilha era aferida. Uma pastilha, denominada pastilha de controle, era mantida dentro da sala de alta tensão, cuja temperatura foi considerada como a temperatura ambiente da sala. A tabela 5.6 mostra o resultado da aferição da temperatura da pastilha 4. Os resultados térmicos referentes as demais pastilhas podem ser consultados no apêndice B.

Tabela 5.6: Resultado térmico da pastilha 4.

Temperatura						
Pastilha 4						
Posição	Temperatura (°C)					
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2	
0°	32,3	32,4	32,4	32,4	32,4	
180°	32,4	32,4	32,3	32,4		Diff
Pastilha controle	Temperatura (°C)					6,8
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2	
0°	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	
180°	25,6	25,6	25,6	25,6		

A curva “tensão-corrente r.m.s.” da pastilha 4 é mostrada na figura 5.10. As curvas das demais pastilhas podem ser consultadas no apêndice C.

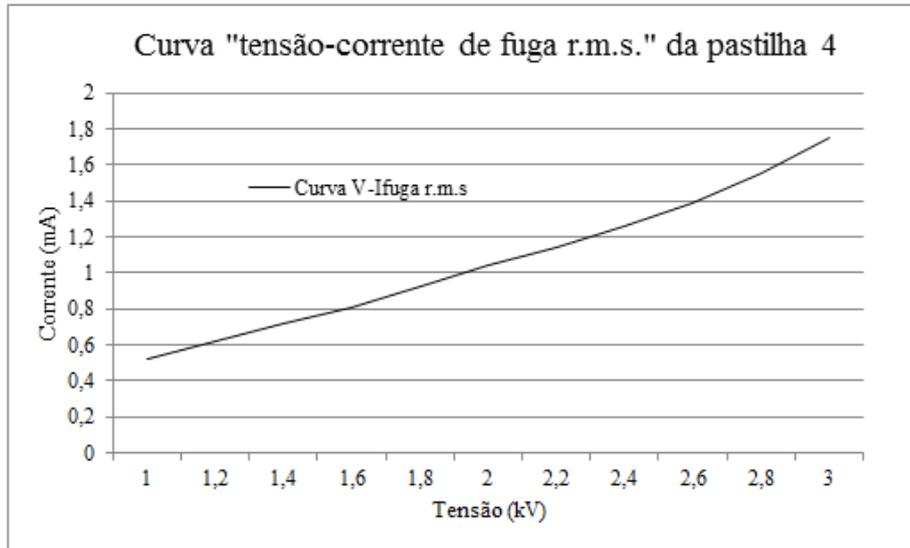


Figura 5.10: Curva característica “tensão x corrente r.m.s.” da pastilha 4.

### 5.3 Análise dos dados provenientes dos ensaios das pastilhas de ZnO

As formas de onda obtidas durante os testes preliminares e as formas de onda de correntes de fuga, provenientes das pastilhas submetidas ao ensaio, primeiramente foram processadas manualmente utilizando-se o software ORIGIN, para execução da transformada de Fourier do sinal. A figura 5.11 apresenta o gráfico de amplitude do conteúdo harmônico da corrente de fuga da pastilha 4, resultante da transformada de Fourier. O conteúdo harmônico das demais pastilhas pode ser consultado no apêndice D.

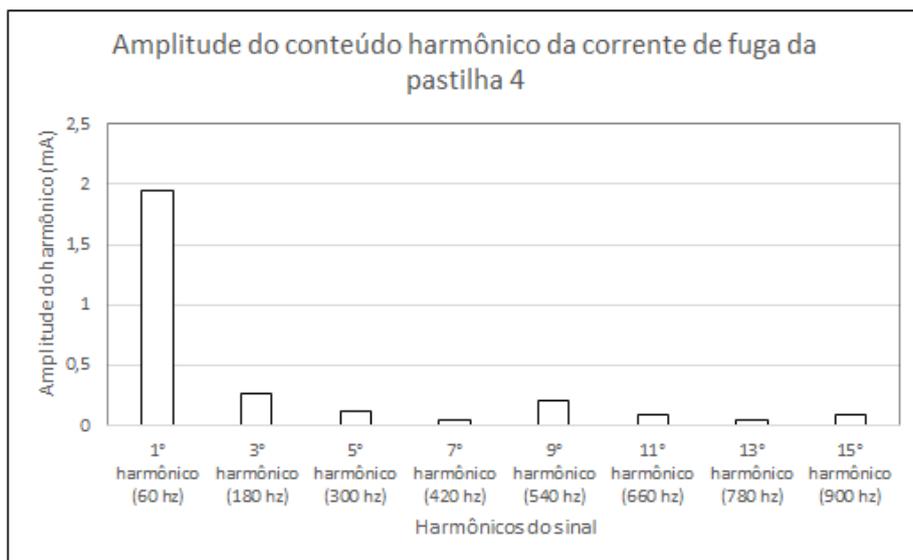


Figura 5.11: Amplitude do conteúdo harmônico da corrente de fuga da pastilha 4.

Posteriormente, com o apoio do software Excel os valores de THD de cada pastilha foram calculados. A tabela 5.7 apresenta os valores de THD de cada pastilha.

Tabela 5.7: Valores de THD (%) calculados para as pastilhas de ZnO.

Pastilha	THD	Pastilha	THD	Pastilha	THD	Pastilha	THD
Pastilha 1	18,3	Pastilha 11	21,0	Pastilha 21	18,2	Pastilha 30	21,4
Pastilha 2	23,9	Pastilha 12	22,4	Pastilha 22	18,3	Pastilha 31	9,3
Pastilha 3	20,0	Pastilha 13	20,9	Pastilha 23	19,8	Pastilha 32	8,9
Pastilha 4	20,1	Pastilha 14	23,7	Pastilha 24	21,2	Pastilha 33	7,9
Pastilha 5	21,4	Pastilha 15	16,4	Pastilha 25	21,5	Pastilha 34	8,9
Pastilha 6	21,1	Pastilha 16	21,9	Pastilha 26	21,2	Pastilha 35	13,8
Pastilha 8	17,9	Pastilha 18	19,1	Pastilha 27	20,5	Pastilha 36	13,6
Pastilha 9	19,8	Pastilha 19	17,0	Pastilha 28	13,0	Pastilha 38	21,2
Pastilha 10	21,4	Pastilha 20	20,6	Pastilha 29	22,5		

Afim de correlacionar os valores de THD de cada pastilha com seu nível de degradação foram usados três critérios já adotados na literatura para classificação das pastilhas, são eles: corrente de fuga total, amplitude do terceiro harmônico da corrente de fuga e temperatura final de ensaio. É importante ressaltar que não está no escopo deste trabalho determinar se as pastilhas estão operacionais ou não, portanto não se busca um valor absoluto de THD, corrente de fuga total, amplitude do terceiro harmônico da corrente de fuga ou temperatura final de ensaio que absolutamente indique o estado operacional de uma pastilha.

É sabido que, quanto maior o valor encontrado para os parâmetros dos três critérios que serão adotados, maior o nível de degradação do pararraios. Portanto, o que essa dissertação propõe é elencar as pastilhas do menor nível de degradação, para o maior e assim correlacioná-las com seus respectivos valores de THD. Com isso, espera-se determinar um padrão de comportamento nos valores do THD que possa servir de subsídios para que este parâmetro possa ser usado como parâmetro de diagnóstico de pararraios posteriormente.

O fato de não se buscar um valor absoluto para indicação se um pastilha (ou pararraios) não está mais operacional é proposital. Existem diversas metodologias de

análise dos parâmetros dos critérios adotados, e diferentes empresas e/ou diferentes fabricantes adotam diferentes limites para condenar um determinado dispositivo. Sendo assim, apenas a experiência de uso, no campo e em testes laboratoriais, poderá determinar o valor absoluto de THD a partir do qual um pararraios deva ser tirado de operação.

A partir deste conceito, foram realizadas as correlações. A primeira classificação das pastilhas foi realizada através do valor de sua corrente de fuga total, quanto maior o valor da corrente de fuga r.m.s. total quando o pararraios está submetido a MCOV, maior o nível de degradação da pastilha. A tabela 5.8 apresenta o resultado, os valores das correntes de fuga r.m.s. na tensão de MCOV podem ser consultados no apêndice C.

Tabela 5.8: Pastilhas de ZnO ordenadas do menor para o maior valor de corrente de fuga total.

Pastilha 8	↓	Pastilha 5	↓	Pastilha 23	↓	Pastilha 15
Pastilha 21		Pastilha 20		Pastilha 10		Pastilha 28
Pastilha 22		Pastilha 24		Pastilha 11		Pastilha 33
Pastilha 4		Pastilha 26		Pastilha 29		Pastilha 32
Pastilha 9		Pastilha 12		Pastilha 18		Pastilha 31
Pastilha 1		Pastilha 2		Pastilha 13		Pastilha 34
Pastilha 27		Pastilha 14		Pastilha 30		Pastilha 35
Pastilha 6		Pastilha 25		Pastilha 38		Pastilha 36
Pastilha 3		Pastilha 16		Pastilha 19		

A segunda classificação das pastilhas foi realizada através do valor da amplitude de sua componente de terceiro harmônico da corrente de fuga total, quanto maior o valor da amplitude de sua componente de terceiro harmônico quando o pararraios está submetido a MCOV, maior o nível de degradação da pastilha. A tabela 5.9 apresenta o resultado, os valores podem ser consultados no apêndice D.

Tabela 5.9: Pastilhas de ZnO ordenadas do menor para o maior valor da componente de 3° harmônico da corrente de fuga total.

Pastilha 8	↓	Pastilha 20	↓	Pastilha 23	↓	Pastilha 15
Pastilha 21		Pastilha 5		Pastilha 10		Pastilha 28
Pastilha 22		Pastilha 26		Pastilha 11		Pastilha 34
Pastilha 4		Pastilha 24		Pastilha 18		Pastilha 33
Pastilha 9		Pastilha 12		Pastilha 13		Pastilha 31
Pastilha 1		Pastilha 25		Pastilha 30		Pastilha 32
Pastilha 27		Pastilha 2		Pastilha 29		Pastilha 36
Pastilha 6		Pastilha 14		Pastilha 38		Pastilha 35
Pastilha 3		Pastilha 16		Pastilha 19		

A terceira classificação das pastilhas foi realizada através do valor da temperatura da pastilha parametrizada em relação a temperatura ambiente da sala de ensaio, quanto maior a diferença entre o valor da temperatura da pastilha e da temperatura ambiente da sala, maior o nível de degradação da pastilha. A tabela 5.10 apresenta o resultado, os valores podem ser consultados no apêndice B.

Tabela 5.10 Pastilhas de ZnO ordenadas do menor para o maior valor de temperatura.

Pastilha 21	↓	Pastilha 5	↓	Pastilha 11	↓	Pastilha 15
Pastilha 8		Pastilha 20		Pastilha 10		Pastilha 28
Pastilha 22		Pastilha 24		Pastilha 23		Pastilha 31
Pastilha 4		Pastilha 26		Pastilha 13		Pastilha 33
Pastilha 1		Pastilha 12		Pastilha 29		Pastilha 32
Pastilha 6		Pastilha 14		Pastilha 18		Pastilha 34
Pastilha 9		Pastilha 2		Pastilha 38		Pastilha 36
Pastilha 3		Pastilha 25		Pastilha 30		Pastilha 35
Pastilha 27		Pastilha 16		Pastilha 19		

Os valores de temperatura das pastilhas de ZnO aferidos durante o ensaio são superiores dos comumente encontrado em inspeções termográficas realizada em pararraios em serviço [27]. Contudo esse comportamento era previsto [16] consequente do fato de que o invólucro de porcelana possuir uma inércia térmica [54] e ainda estar separado das resistências não-lineares por uma camada de ar [26], inclusive tal construção pode até levar a explosão do dispositivo quando sua falha [4].

A tabela 5.11 apresenta os resultados de cada um dos critérios, para um melhor avaliação.

Tabela 5.11: Comparação entre os critérios de avaliação, em ordem crescente do nível de degradação.

Corrente de fuga total	3° harmônico da corrente de fuga	Temperatura
Pastilha 8	Pastilha 8	Pastilha 21
Pastilha 21	Pastilha 21	Pastilha 8
Pastilha 22	Pastilha 22	Pastilha 22
Pastilha 4	Pastilha 4	Pastilha 4
Pastilha 9	Pastilha 9	Pastilha 1
Pastilha 1	Pastilha 1	Pastilha 6
Pastilha 27	Pastilha 27	Pastilha 9
Pastilha 6	Pastilha 6	Pastilha 3
Pastilha 3	Pastilha 3	Pastilha 27
Pastilha 5	Pastilha 20	Pastilha 5
Pastilha 20	Pastilha 5	Pastilha 20
Pastilha 24	Pastilha 26	Pastilha 24
Pastilha 26	Pastilha 24	Pastilha 26
Pastilha 12	Pastilha 12	Pastilha 12
Pastilha 2	Pastilha 25	Pastilha 14
Pastilha 14	Pastilha 2	Pastilha 2
Pastilha 25	Pastilha 14	Pastilha 25
Pastilha 16	Pastilha 16	Pastilha 16
Pastilha 23	Pastilha 23	Pastilha 11
Pastilha 10	Pastilha 10	Pastilha 10
Pastilha 11	Pastilha 11	Pastilha 23
Pastilha 29	Pastilha 18	Pastilha 13
Pastilha 18	Pastilha 13	Pastilha 29
Pastilha 13	Pastilha 30	Pastilha 18
Pastilha 30	Pastilha 29	Pastilha 38
Pastilha 38	Pastilha 38	Pastilha 30
Pastilha 19	Pastilha 19	Pastilha 19
Pastilha 15	Pastilha 15	Pastilha 15
Pastilha 28	Pastilha 28	Pastilha 28
Pastilha 33	Pastilha 34	Pastilha 31

Pastilha 32	Pastilha 33	Pastilha 33
Pastilha 31	Pastilha 31	Pastilha 32
Pastilha 34	Pastilha 32	Pastilha 34
Pastilha 35	Pastilha 36	Pastilha 36
Pastilha 36	Pastilha 35	Pastilha 35

Diferente do esperado, obteve-se diferentes classificações de níveis de degradação para os diferentes critérios utilizados. Esse comportamento não é novidade, SOARES JUNIOR *et al.*[4] já havia identificado essa falta de correlação entre os critérios em um estudo de caso que executou.

Entretanto, se a tabela 5.11 for analisada em função da corrente de fuga total, por exemplo, percebe-se que as diferenças nas classificações não são discrepantes. As mudanças de posição ficam confinadas a grupos que não alterariam o panorama geral de classificação das pastilhas. Pode-se separar as pastilhas em 5 grupos; pastilhas com correntes de fuga com valores entre 1mA e 2mA (tabela 5.12), pastilhas com correntes de fuga com valores entre 2mA e 3mA (tabela 5.13), pastilhas com correntes de fuga com valores entre 3mA e 4mA (tabela 5.14), pastilhas com correntes de fuga com valores entre 4mA e 8mA (tabela 5.15) e pastilhas com correntes de fuga com valores acima de 10mA (tabela 5.16).

Tabela 5.12. Pastilhas com corrente de fuga entre 1mA e 2mA.

Corrente de fuga total	3° harmônico da corrente de fuga	Temperatura
Pastilha 8	Pastilha 8	Pastilha 21
Pastilha 21	Pastilha 21	Pastilha 8
Pastilha 22	Pastilha 22	Pastilha 22
Pastilha 4	Pastilha 4	Pastilha 4
Pastilha 9	Pastilha 9	Pastilha 1
Pastilha 1	Pastilha 1	Pastilha 6
Pastilha 27	Pastilha 27	Pastilha 9
Pastilha 6	Pastilha 6	Pastilha 3
Pastilha 3	Pastilha 3	Pastilha 27
Pastilha 5	Pastilha 20	Pastilha 5

Tabela 5.13. Pastilhas com corrente de fuga entre 2mA e 3mA.

Corrente de fuga total	3° harmônico da corrente de fuga	Temperatura
Pastilha 20	Pastilha 5	Pastilha 20
Pastilha 24	Pastilha 26	Pastilha 24
Pastilha 26	Pastilha 24	Pastilha 26
Pastilha 12	Pastilha 12	Pastilha 12
Pastilha 2	Pastilha 25	Pastilha 14
Pastilha 14	Pastilha 2	Pastilha 2
Pastilha 25	Pastilha 14	Pastilha 25
Pastilha 16	Pastilha 16	Pastilha 16

Tabela 5.14. Pastilhas com corrente de fuga entre 3mA e 4mA.

Corrente de fuga total	3° harmônico da corrente de fuga	Temperatura
Pastilha 23	Pastilha 23	Pastilha 11
Pastilha 10	Pastilha 10	Pastilha 10
Pastilha 11	Pastilha 11	Pastilha 23
Pastilha 29	Pastilha 18	Pastilha 13
Pastilha 18	Pastilha 13	Pastilha 29

Tabela 5.15. Pastilhas com corrente de fuga entre 4mA e 8mA.

Corrente de fuga total	3° harmônico da corrente de fuga	Temperatura
Pastilha 13	Pastilha 30	Pastilha 18
Pastilha 30	Pastilha 29	Pastilha 38
Pastilha 38	Pastilha 38	Pastilha 30
Pastilha 19	Pastilha 19	Pastilha 19
Pastilha 15	Pastilha 15	Pastilha 15

Tabela 5.16. Pastilhas com corrente de fuga acima de 10mA.

Corrente de fuga total	3° harmônico da corrente de fuga	Temperatura
Pastilha 28	Pastilha 28	Pastilha 28
Pastilha 33	Pastilha 34	Pastilha 31
Pastilha 32	Pastilha 33	Pastilha 33

Pastilha 31	Pastilha 31	Pastilha 32
Pastilha 34	Pastilha 32	Pastilha 34
Pastilha 35	Pastilha 36	Pastilha 36
Pastilha 36	Pastilha 35	Pastilha 35

Analisando os grupos de pastilhas formados, constata-se que a variação entre a classificação dos níveis de degradação das pastilhas ficam restritas aos grupos criados, que são na verdade conjuntos de pastilhas com níveis de degradação com alto grau de semelhança. Logo, essas variações não alteram de forma significativa a classificação dos níveis de degradação das pastilhas. Essa afirmação fica mais clara quando são analisadas a figura 5.12, figura 5.13 e figura 5.14.

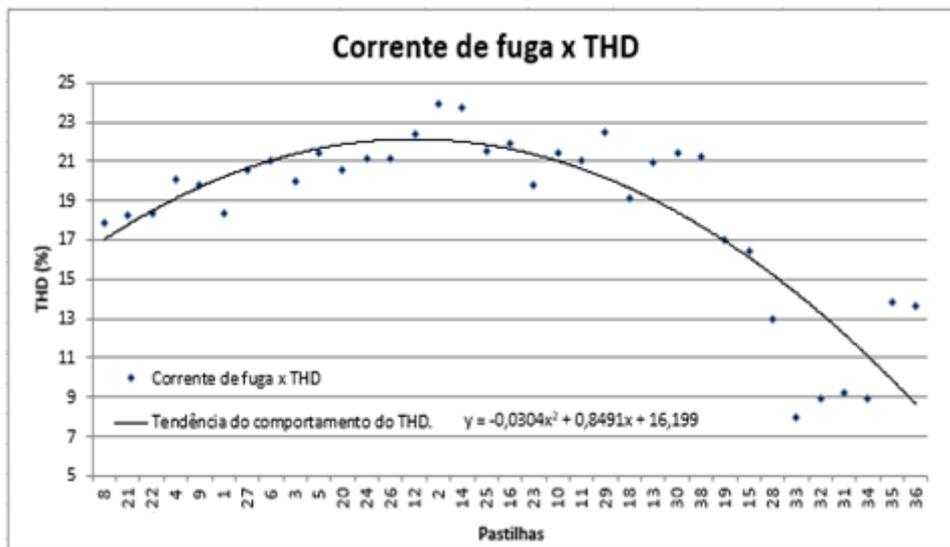


Figura. 5.12: Gráfico dos valores do THD das pastilhas após serem organizadas em função do valor de sua corrente de fuga total r.m.s..

Na figura 5.12 é apresentado o comportamento dos valores de THD das pastilhas em função da sua classificação em relação a seu nível de degradação, quando utilizado o critério do valor de sua corrente de fuga total r.m.s.. No gráfico, da esquerda para direita, estão elencadas as pastilhas de menor valor de corrente de fuga para o maior.

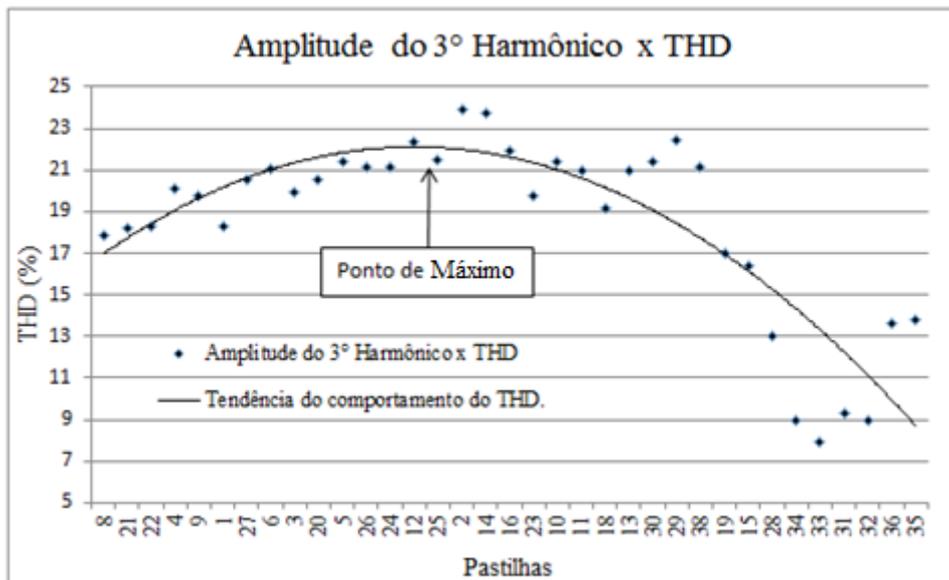


Figura. 5.13: Gráfico dos valores do THD das pastilhas após serem organizadas em função do valor do 3º harmônico de sua corrente de fuga total.

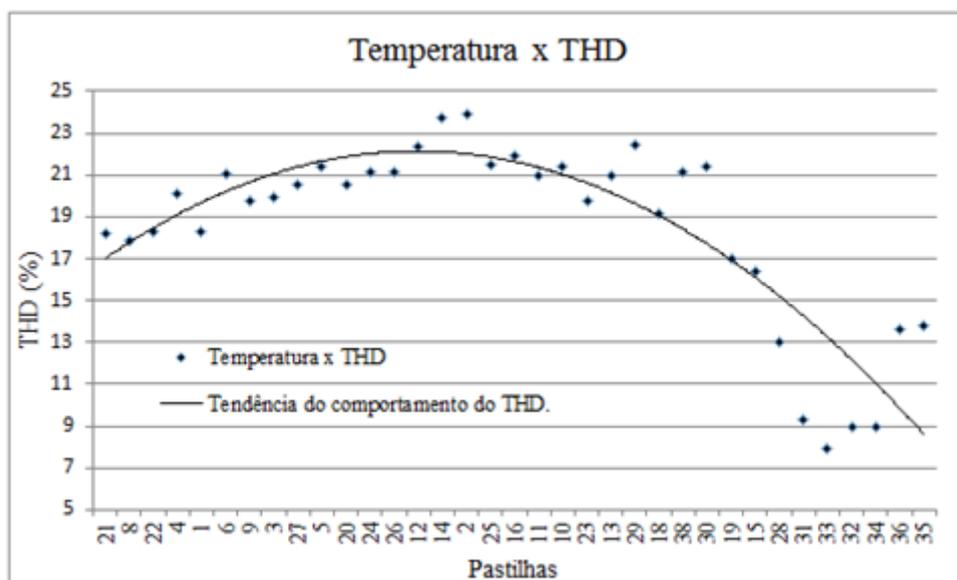


Figura 5.14: Gráfico dos valores do THD das pastilhas após serem organizadas em função do valor de temperatura.

Na figura 5.13 é apresentado o comportamento dos valores de THD das pastilhas em função da sua classificação em relação a seu nível de degradação, quando utilizado o critério do valor de amplitude da componente de 3º harmônico de sua corrente de fuga total. No gráfico, da esquerda para direita, estão elencadas as pastilhas de menor valor da componente de 3º harmônico de sua corrente de fuga para o maior. Finalmente, na

figura 5.14 é apresentado o comportamento dos valores de THD das pastilhas em função da sua classificação em relação a seu nível de degradação, quando utilizado o critério da termografia. No gráfico, da esquerda para direita, estão elencadas as pastilhas de menor valor de temperatura para o maior.

Observa-se na figura 5.12, figura 5.13 e figura 5.14 um comportamento parabólico dos valores do THD. O valor do THD inicialmente tem um tendência crescente, passa por um ponto de “Máximo” e tende a ser decrescente. Como o comportamento do THD das pastilhas foi o mesmo para os três critérios de classificação utilizados, a análise seguirá tratando os resultados como único.

Com o aumento do nível de degradação dos pararraios, sua corrente resistiva aumenta, e sendo seus componentes não-lineares a amplitude do seu conteúdo harmônico também aumenta [1]. A investigação dos valores do THD tem como objetivo identificar diferenças nos padrões de aumento do conteúdo harmônico e da componente fundamental da corrente resistiva. Para analisar essa correlação foi necessário separar as componentes capacitivas e resistivas da corrente de fuga total, era preciso garantir que a corrente capacitiva não influenciaria significativamente na análise. A metodologia utilizada para separação está descrita no capítulo IV seção 1.3, e o código utilizado pode ser consultado no apêndice E. A figura 5.15 apresenta os valores r.m.s. da componente capacitiva da corrente fuga ( $I_{c\text{ r.m.s.}}$ ), seguindo a classificação das pastilhas obtidas pelo critério de avaliação da amplitude da componente de terceiro harmônico da corrente de fuga, método bem difundido para diagnóstico de pararraios [11].

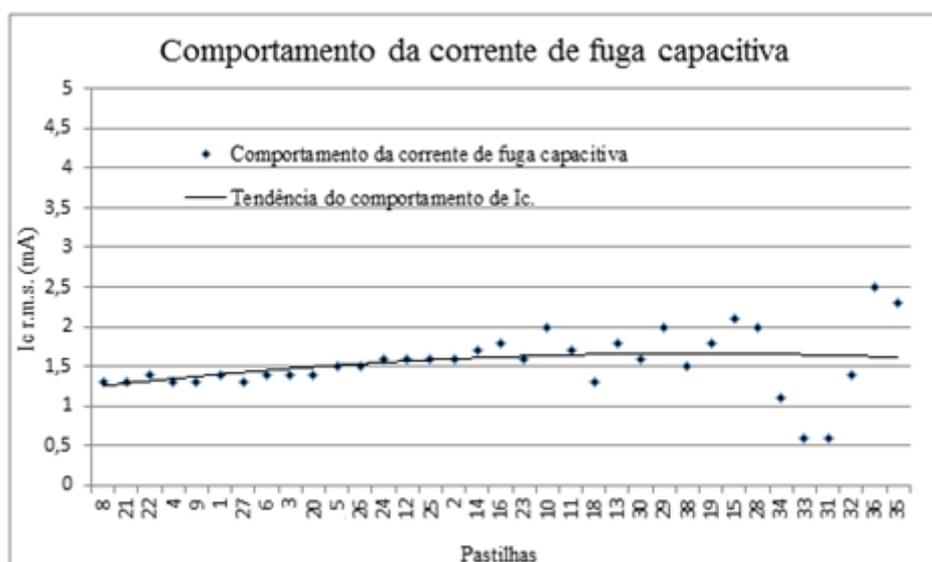


Figura 5.15: Variação da componente capacitiva das pastilhas.

Analisando a figura 5.15, correlacionando-a com a figura 5.13, percebe-se que na fase crescente dos valores de THD o valor da corrente de fuga capacitiva permaneceu estável, com isso não interferia no cálculo do valor de THD. O que indica, que o valor do conteúdo harmônico da corrente de fuga tinha uma taxa de crescimento superior à componente fundamental da corrente resistiva.

A partir do ponto de “Máximo”, a corrente capacitiva sofreu variações e seus valores chegaram a variar  $\pm 1\text{mA}$  em relação a média. Contudo, comparando novamente a figura 5.15 e a figura 5.13 nota-se que quando a corrente capacitiva era menor o THD também era menor. Como o valor da corrente capacitiva é inversamente proporcional ao valor de THD da corrente de fuga, essa característica indica que nessa fase a taxa de aumento da componente fundamental da corrente resistiva foi maior que a taxa de aumento do conteúdo harmônico, chegando a compensar a diminuição da corrente capacitiva.

Para uma melhor comparação a figura 5.16 apresenta os valores r.m.s. da componente resistiva da corrente fuga ( $I_{r,rms}$ ), seguindo a classificação das pastilhas obtidas pelo critério de avaliação da amplitude da componente de terceiro harmônico da corrente de fuga.

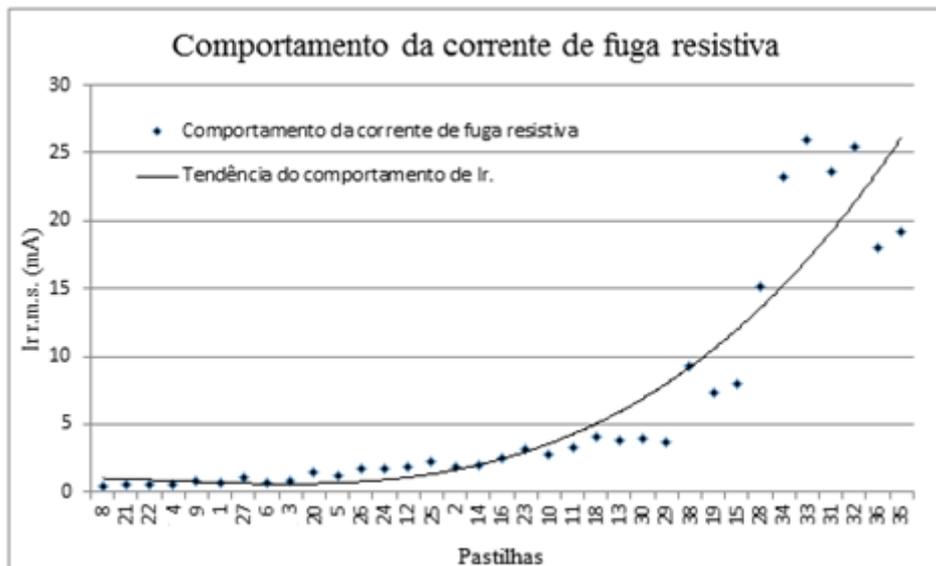


Figura 5.16: Variação da componente resistiva das pastilhas.

Observando o comportamento da corrente resistiva na Fig. 5.16, que sofre um aumento exponencial, percebe-se que a partir do ponto onde a corrente capacitiva

começa a ter maior taxa de variação (figura 5.15), o valor da corrente resistiva chega a ser 25 vezes superior à variação, o que indica que a componente capacitiva não influencia significativamente no valor calculado do THD.

A figura 5.17 e a figura 5.18 apresentam os valores de amplitude do 1° e 3° harmônicos, respectivamente, da componente resistiva da corrente fuga ( $I_r$ ), seguindo a classificação das pastilhas obtidas pelo critério de avaliação da amplitude da componente de terceiro harmônico da corrente de fuga. Comparando as duas figuras, percebe-se que entre as pastilhas com menor nível de degradação, uma taxa de aumento maior no conteúdo harmônico quando comparado com a taxa de aumento da fundamental. A partir do ponto de inflexão (figura 5.13), a taxa de aumento da fundamental começa aumentar vertiginosamente, tornando-se superior a taxa de aumento do conteúdo harmônico.

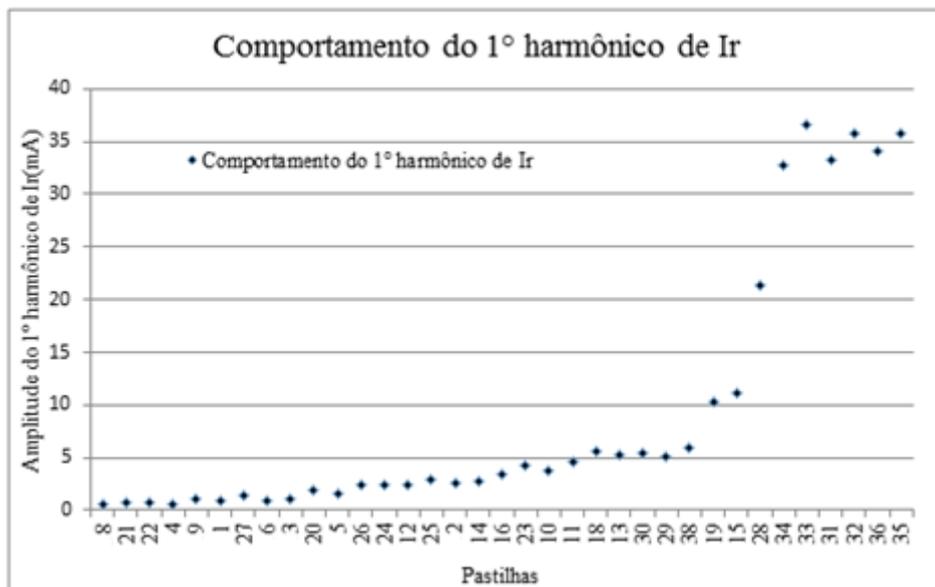


Figura 5.17: Variação do conteúdo do 1° harmônico da componente resistiva das pastilhas.

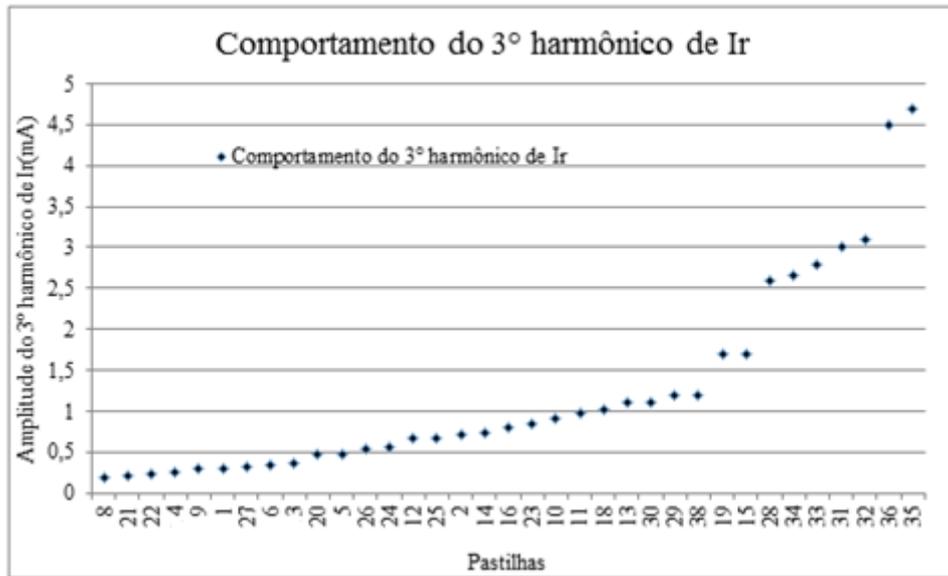


Figura 5.18. Variação do conteúdo do 3º harmônico da componente resistiva das pastilhas

Extrapolando o comportamento das pastilhas para unidades de pararraios operacionais, chega-se a uma importante conclusão dessa análise. Se os valores de THD da corrente de fuga total do pararraios forem monitorados e analisados, pode-se indiretamente calcular o valor da corrente de fuga total resistiva, um importante parâmetro de diagnóstico do pararraios [16].

A dificuldade do cálculo direto da corrente de fuga resistiva reside na necessidade de um sinal de tensão de referência, parâmetro não necessário para o cálculo do THD. Provado neste trabalho que a componente de fuga capacitiva não exerce influência significativa sobre o valor de THD, este parâmetro pode tornar-se um indicador da corrente de fuga resistiva total.

Por outro lado, a própria análise do THD pode ser um indicativo do diagnóstico do pararraios. Sendo necessário a determinação de uma metodologia de análise, para determinação do ponto de intervenção, como por exemplo, analisar a derivada da curva obtida durante um determinado período de monitoramento. O valor do THD pode ser obtido de forma simples, sem a necessidade um sinal de tensão de referência.

Com base dos dados analisados e dos comportamentos encontrados pode-se concluir que o valor de THD da corrente de fuga possui grande potencial para ser usado como indicativo do nível de degradação do pararraios. O seu padrão de comportamento é bem definido e uma análise temporal dos valores pode indicar a degradação do dispositivo. Neste trabalho, devido suas similaridades, as pastilhas em diferentes níveis

de degradação, podem ser consideradas um mesmo pararraios em diferentes estágios de sua vida operacional, isto é, em diferentes estágios de degradação.

#### 5.4 Difractometria de raios X

Para a realização da difratometria de raios X foram selecionadas 4 pastilhas com diferentes níveis de degradação classificadas de acordo com o critério da amplitude do 3º harmônico da corrente de fuga. A figura 5.19 mostra as pastilhas escolhidas.

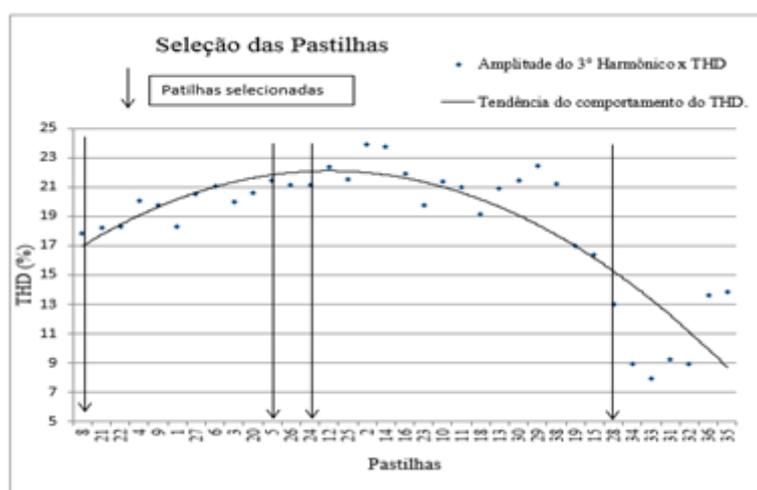


Figura 5.19: Escolha das pastilhas para ensaio.

Durante a difratometria constatou-se que nas extremidades das pastilhas de ZnO há um filme para melhorar o contato entre elas, quando estão em série dentro do invólucro do pararraios, formado por  $Al_{0.5}Ni_{0.5}$ , com espessura de 150  $\mu m$ . A pastilha de ZnO, abaixo do filme tem em sua composição, In e  $Al_2O_3$  na proporção de 10% e ZnO 90%. A geometria da célula cristalina básica do ZnO (constituente principal dos elementos resistivos, ou pastilhas, que estão dentro do pararraios) possui simetria hexagonal com base ("a" x "b") e altura "c". Os valores padrões dos parâmetros da rede cristalina do elemento resistivo são:

$$a = b = 0.32504(2) \text{ nm}$$

$$c = 0.52057(3) \text{ nm}$$

O objetivo dos ensaios foi identificar e comparar esses três parâmetros nas quatro pastilhas, afim de identificar algum padrão de variação que possa ser associado ao seu nível de degradação. O resultado é mostrado na tabela 5.17.

Tabela. 5.17: Parâmetros das pastilhas ensaiadas (nm).

	a	b	c
ZnO - Padrão	0,32504	0,32504	0,52057
Pastilha 9	0,32504	0,32504	0,52054
Pastilha 6	0,32506	0,32506	0,52056
Pastilha 27	0,32504	0,32504	0,52050
Pastilha 31	0,32502	0,32502	0,52044

Nota-se pela tabela 5.17 que os parâmetros a e b praticamente não variam, entretanto o parâmetro c variou um total de 0,00013nm, diminuindo conforme aumentava o nível de degradação da pastilha analisada. A figura 5.20 representa graficamente a variação do parâmetro c.

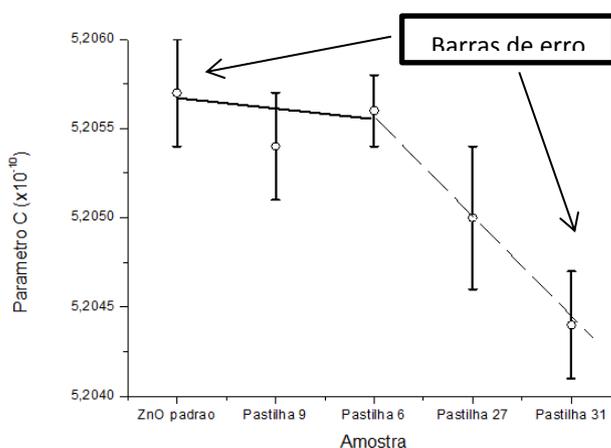


Figura 5.20. Variação do parâmetro “c”.

O resultado do ensaio, deve-se ao fato que o componente resistivo não é exatamente ZnO, existem pequenas dopagens de In (Índio) e Al (alumínio) na pastilha de ZnO. A aplicação de um forte campo elétrico, devido à tensão de operação do pararraios, durante logo tempo, e eventuais sobretensões, modificou a posição dessas impurezas causando a redução do parâmetro "c". A diminuição do parâmetro “c”,

justamente a altura da estrutura cristalina, indica que os átomos estão tornando-se mais próximos, e devido a este comportamento a resistividade do material diminui.

Conclui-se que a redução do parâmetro “c” pode estar ligada ao aumento do nível de degradação dos pararraios, pois indica a diminuição de sua resistividade. O objetivo do ensaio foi atingido, ou seja, identificar nos ensaios de difratometria parâmetro na estrutura cristalina das pastilhas de ZnO que pudessem se correlacionados com seu o nível de degradação. Contudo testes adicionais devem ser realizados para verificar se existem outros fatores que influenciam no parâmetro “c”.

### 5.5 Ensaio de temperatura

Um ensaio de temperatura foi realizado para avaliar o comportamento da corrente de fuga do pararraios em função da variação de sua temperatura. O resultado do ensaio de temperatura realizado com a pastilha 4, seguindo a metodologia descrita no capítulo 4, seção 4.5 é apresentada na figura. 5.21.

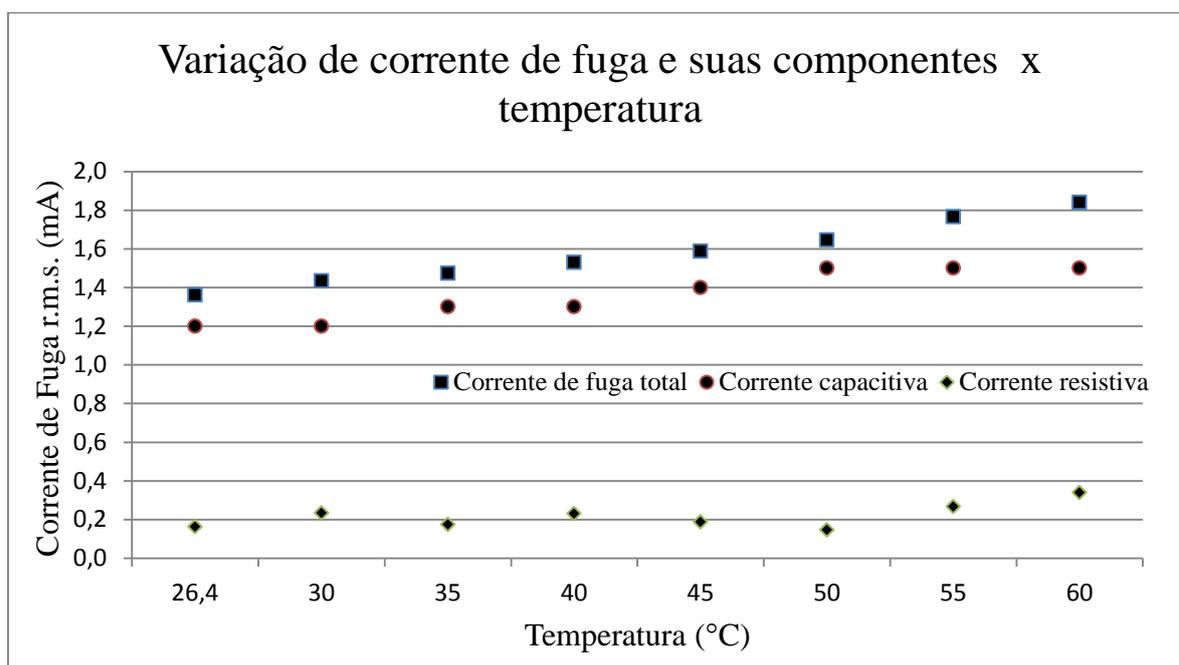


Figura 5.21. Variação da corrente de fuga da pastilha 4, quando submetida ao ensaio de temperatura.

Constatou-se que tanto a componente capacitiva quanto resistiva da corrente de fuga sofrem influência da temperatura. A variação era prevista [16], e os valores são

coerentes quanto a figura 3.12. Não há registros que indiquem o padrão de variação da componente capacitiva com a temperatura, porém um possível motivo da variação encontrada é a variação dos valores das capacitâncias parasitas associadas ao sistema com o aumento da temperatura.

A corrente de fuga total sofreu um acréscimo de 26%, a componente capacitiva experimentou um aumento de 25% enquanto a corrente resistiva aumentou em 110%. É importante lembrar que conforme indica a figura 3.13 um grande aumento na corrente resistiva, não significa um aumento de mesma magnitude na corrente de fuga total.

## 5.6 Projeto e desenvolvimento do protótipo para diagnóstico de pararraios

Coletados indícios suficientes de que o valor de THD do pararraios pode indicar seu nível de degradação, foi desenvolvido um protótipo para que a corrente de fuga do pararraios em serviço pudesse ser amostrada e transmitida para uma CPU de processamento, onde seu valor de THD seria calculado. O diagrama em blocos do protótipo é mostrado na figura 5.22.

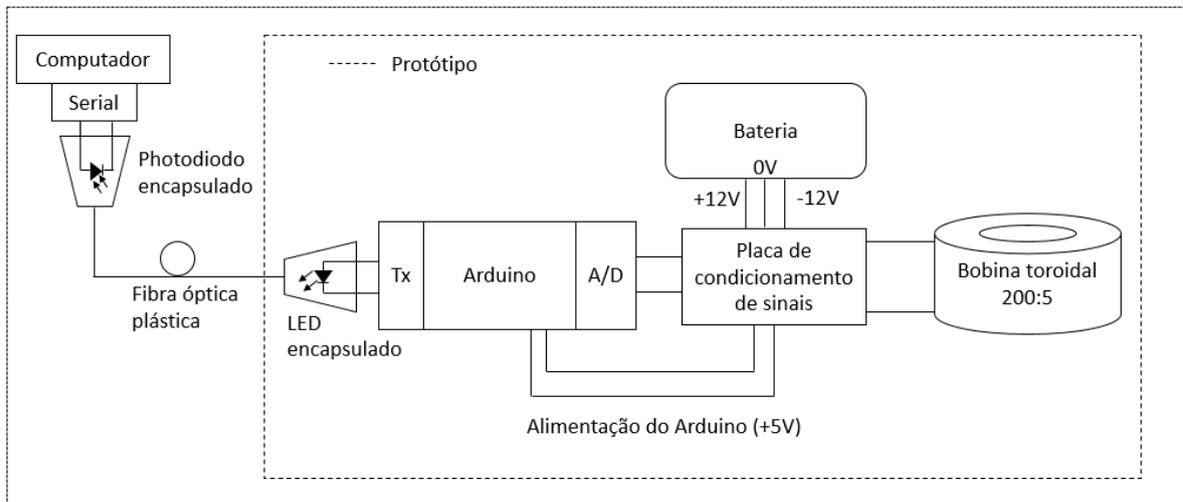


Figura 5.22: Diagrama em blocos do protótipo.

Para aferição da corrente de fuga no cabo de aterramento do pararraios foi usado um transformador de corrente (TC) de núcleo toroidal, com classe de isolamento de 600V e relação entre a corrente do primário e secundário de 200:5, para maiores detalhes consultar o modelo TC1101 da Instrumenti [55]. Sendo assim, para correntes de fuga típicas entre 0,2 mA e 3 mA, espera-se um corrente no secundário do TC na ordem de 5  $\mu$ A a 75  $\mu$ A.

A placa de condicionamento de sinais pode ser segmentada em duas partes, uma comercial e uma projetada especificamente para este trabalho. Decorrente do fato da saída da bobina ser uma tensão proporcional à derivada da corrente que passa no enrolamento primário, foi utilizado um amplificador da marca Rocoil que, além de amplificar, também integra o sinal. Desse modo, na sua saída encontra-se uma tensão proporcional à corrente primária e não à sua derivada. O integrador da ROCOIL, utilizado geralmente para Bobinas de Rogowski, teve uma boa adaptabilidade ao circuito.

A segunda parte da placa de condicionamento de sinais consiste de um circuito somador de ganho unitário, que fornecerá ao sinal de saída do integrador o nível DC necessário para que este possua a máxima excursão possível de sinal referente aos limites da entrada A/D do Arduino. O Arduino aceita entradas analógicas de 0-5V, por isso o circuito adiciona ao sinal AC da saída do integrador um nível DC referente a 2,5V. A figura 5.23 mostra o circuito utilizado.

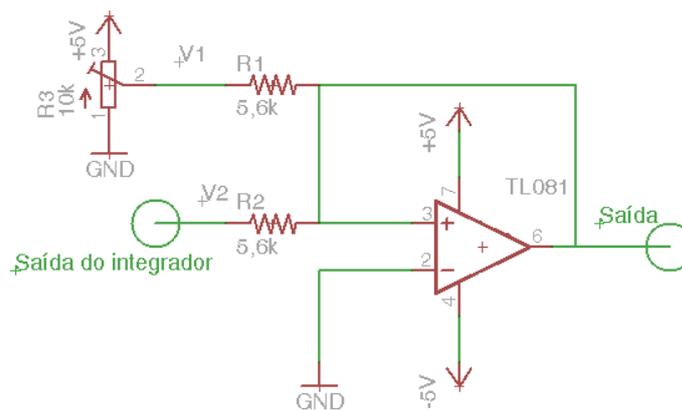


Figura 5.23: circuito somador.

A amostragem do sinal é executada pelo Arduino Mega. A conversão A/D utiliza 10bits e uma taxa de amostragem de 50 khz, suficientes para o objetivo do projeto, para mais informações sobre o modelo utilizado consultar [52]. O envio dos dados é realizado por fibra óptica plástica, utilizando-se um LED cujo o drive é o terminal Tx do Arduino. O Firmware utilizado no Arduino está descrito no Apêndice F, e basicamente é um *loop* de aquisição e envio de dados.

O padrão escolhido para envio de dados para o computador foi o RS232. Esse padrão utiliza lógica invertida, ou seja, quando o dado binário transmitido for “1” o valor transmitido é “-V” e quando é 0, o valor transmitido é “+V”. Sendo assim o

acionamento do LED também foi planejado para acontecer com lógica invertida, quando o dado a ser transmitido for “1” o LED estará apagado e quando for “0” o LED estará aceso. Segue na figura 5.24 o circuito de acionamento do LED.



Figura 5.24: Circuito de acionamento do LED.

O meio físico escolhido para a transferência dos dados foi a fibra óptica plástica e a escolha do LED na cor verde é justificada devido as janelas de transmissão da fibra, mostradas na figura 5.25.

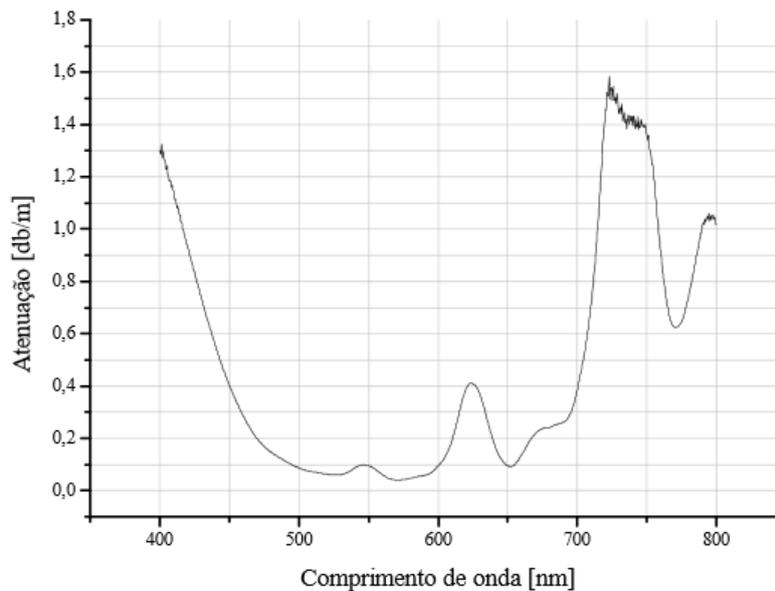


Figura 5.25: Janela de transmissão da POF [56].

O LED verde utilizado possui o pico do comprimento de onda da luz emitida em 565nm, próximo a região de menor atenuação da POF. A possibilidade de atingir maiores distâncias de transmissão norteou a escolha da cor do LED. Para interpretação dos dados, na outra extremidade da fibra foi incorporado um circuito de interface para realizar a conversão de fibra óptica para RS232. O circuito utilizado é mostrado na figura 5.26.

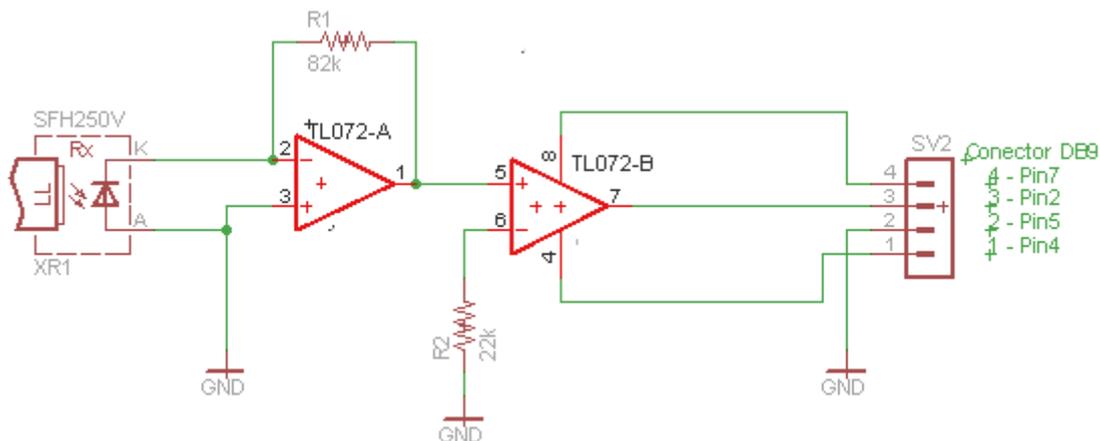


Figura 5.26: Circuito de conversão fibra óptica – Serial.

A conversão de luz em sinal elétrico é realizada pelo amplificador de transresistência. Ao ser iluminado, o fotodiodo (SFH250V) quando polarizado conforme a figura 5.26, permite que circule entre seus terminais uma corrente proporcional a potência óptica recebida [57]. O amplificador fornecerá em sua saída uma tensão igual o produto entre a corrente que circulará no fotodiodo e o valor da resistência de realimentação.

O segundo estágio serve para compatibilizar os níveis de tensão, afim de que os dados possam ser compreendidos pelo computador. O circuito é alimentado pela própria entrada serial do computador, utilizando os pinos 7 e 4.

O pino 7 – RTS (*request to send*) e o pino 4 - DTR (*Data Terminal Ready*) são originariamente pinos de controle que não se aplicam à configuração utilizada. Os sinais utilizados na comunicação serial variam de 3 a 15 volts positivos ou negativos, valores próximos de zero não são sinais válidos. Comumente os valores do RTS e DTR são negativos, então é necessário inverter um deles para alimentar o circuito, comando que é executado pelo software de captura dos dados do Arduino e será apresentado no código.

Quando o LED está apagado, bit a ser transmitido com valor lógico “1”, a corrente que circula no fotodiodo e a saída de tensão do primeiro estágio é próxima de zero, levando a saída do segundo estágio para “-V” (a magnitude de V depende do valor de RTS e DTR).

Quando o LED está aceso, bit a ser transmitido com valor lógico “0”, o fotodiodo permite que circule uma corrente em seus terminais e a tensão de saída do

primeiro estágio torna-se maior que zero (função da distância da POF utilizada), levando a saída do segundo estágio para “+V” (a magnitude de V depende do valor de RTS e DTR).

Para visualização dos dados foi desenvolvido um software na plataforma Visual Basic, cujo o código se encontra no apêndice G. A tela do programa pode ser vista na figura 5.27.

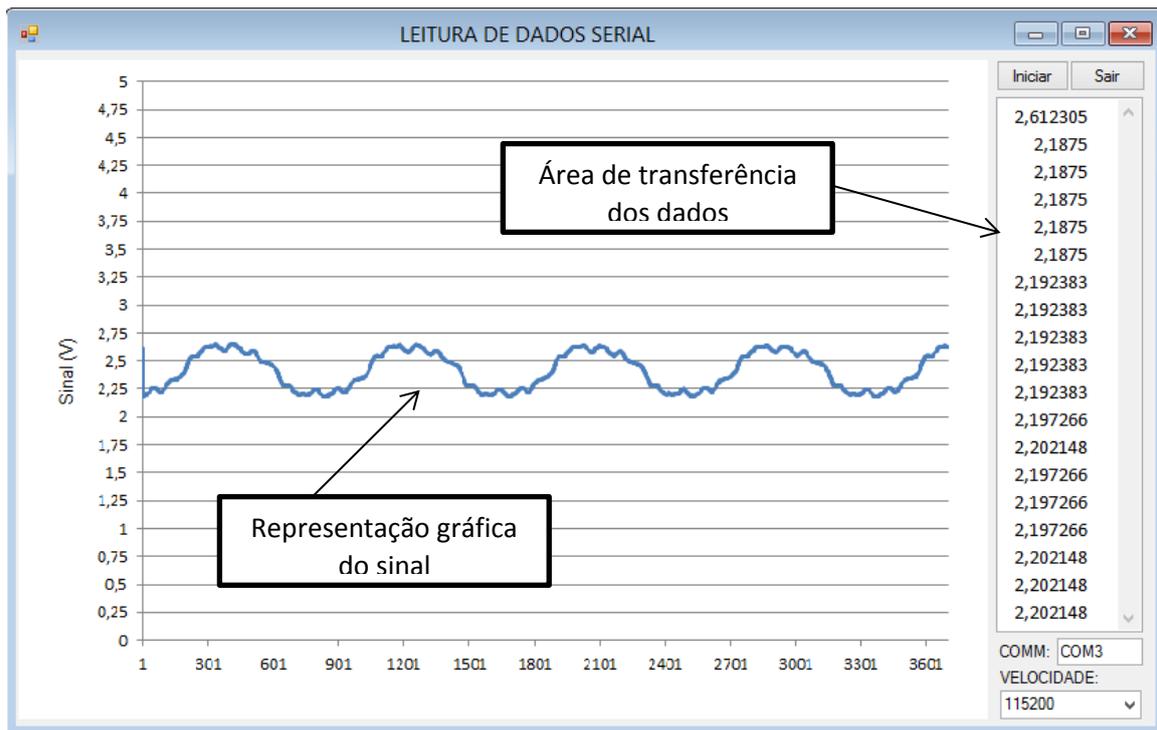


Figura 5.27: Tela do software de aquisição de dados com sinal da pastilha 4 representado.

Após a configuração da porta de comunicação utilizada e a velocidade de transmissão, clica-se no botão iniciar para começar a aquisição. Devido à limitação de memória do Arduino, o software recebe 3700 (aproximadamente três ciclos e meio) pontos por vez, que ficam disponíveis na área de transferência de dados por 30 segundos para o usuário copiá-los. Os dados são então copiados para o EXCEL para posterior análise.

## 5.7 Resultados dos testes em laboratório com o protótipo

A primeira avaliação efetuada com o protótipo foi a determinação da banda passante do sistema completo, tomando como referência a tensão de saída quando a entrada está em 60Hz. Entenda por sistema o conjunto protótipo mais software utilizado no computador para recebimento dos dados do Arduino.

A entrada do sistema, corrente no primário da bobina toroidal, foi ajustada para permanecer no valor de 1,5mA. A tensão de saída é o valor r.m.s. da tensão do sinal recebida do Arduino. A figura 5.28 mostra o resultado obtido.

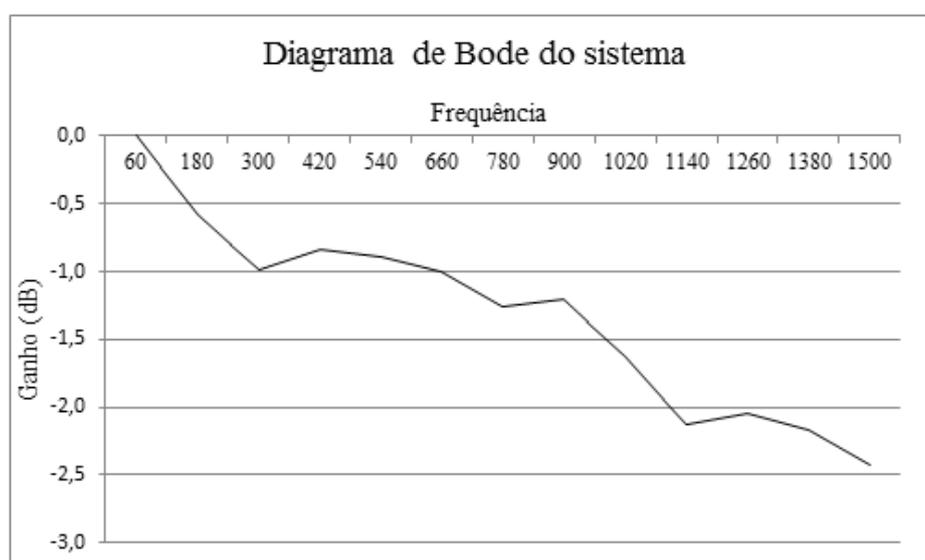


Figura 5.28: Diagrama de Bode do sistema.

Devido à característica não linear do diagrama de Bode do sistema, optou-se por utilizar no cálculo do valor de THD das correntes de fuga testadas no sistema, apenas as componentes que não possuem atenuações superiores a 1,5dB. Isto significa que o cálculo deve ser efetuado utilizando os harmônicos até a 15ª ordem (900Hz).

Na prática essa opção não influenciará no cálculo do THD, uma vez que as amplitudes dos harmônicos acima da 15ª ordem são muito pequenas, podendo ser desprezadas. Contudo a atenuação sofrida pelos harmônicos ímpares da 3ª à 15ª ordem podem influenciar significativamente no cálculo, refletindo em um erro entre os valores de THD dos sinais de entrada e saída do sistema, que será avaliado.

O gerador de sinais utilizado nos testes do sistema foi programado para gerar os sinais de corrente de fuga obtidos nos ensaios dos resistores não-lineares do pararraios.

A figura 5.29 exemplifica o tipo de arquivo que deve ser utilizado para programar o sinal no gerador.

```
File Edit Format View Help
Rigol Technologies, Inc. Save analog waveform to text files.
1667 // número de pontos totais
1667 // número de pontos totais
20 // tempo total do sinal
1,666666666666667E-02 // tempo total do sinal
12
1666
1
0
0
1 // sinal amostrado
0,000000000000000
2
-0,200000000000000
3
-0,400000000000000
4
-0,400000000000000
5
-0,600000000000000
6
-0,600000000000000
7
-0,800000000000000
8
-0,800000000000000
9
-0,800000000000000
10
```

Figura 5.29. Arquivo de entrada para configuração do gerador de sinais.

Todos os sinais obtidos nos ensaios dos resistores não-lineares foram utilizados para teste do sistema, individualmente. A título de exemplificação a figura 5.30 mostra a saída do sistema quando o gerador de sinais fornece a forma de onda referente a pastilha 4, podendo ser comparada com a figura 5.9.

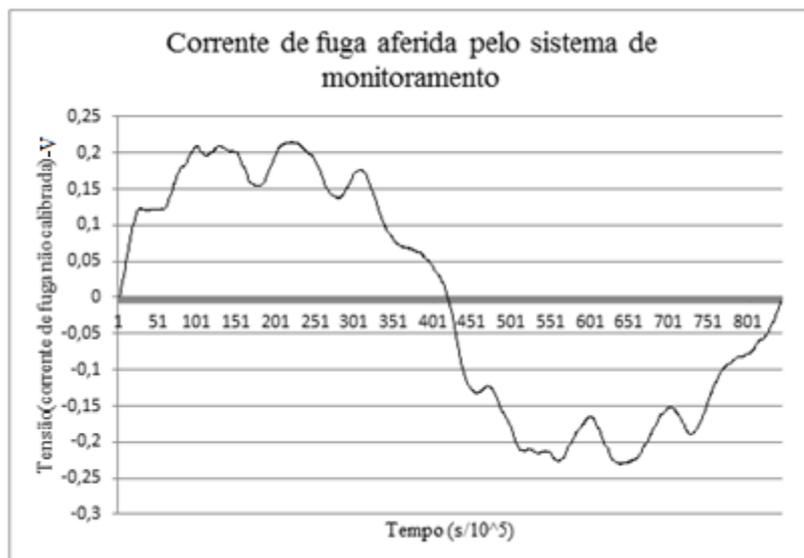


Figura 5.30: Corrente de fuga da pastilha 4 aferida pelo sistema de monitoramento.

O sinal de entrada fornecido pelo gerador de sinais, através de um resistor de *shunt*, foi amostrado e armazenado utilizando um osciloscópio (figura 4.11). Após a aferição do sinal de saída pelo o sistema de monitoramento, os valores de THD de

ambos os sinais eram calculados e erro do sinal de saída em relação ao sinal de entrada era calculado. Os cálculos dos valores de THD dos sinais de saídas foram executados utilizando as plataformas ORIGIN e EXCEL. Para uma melhor visualização, os valores dos erros serão mostrados em gráfico na figura 5.31.

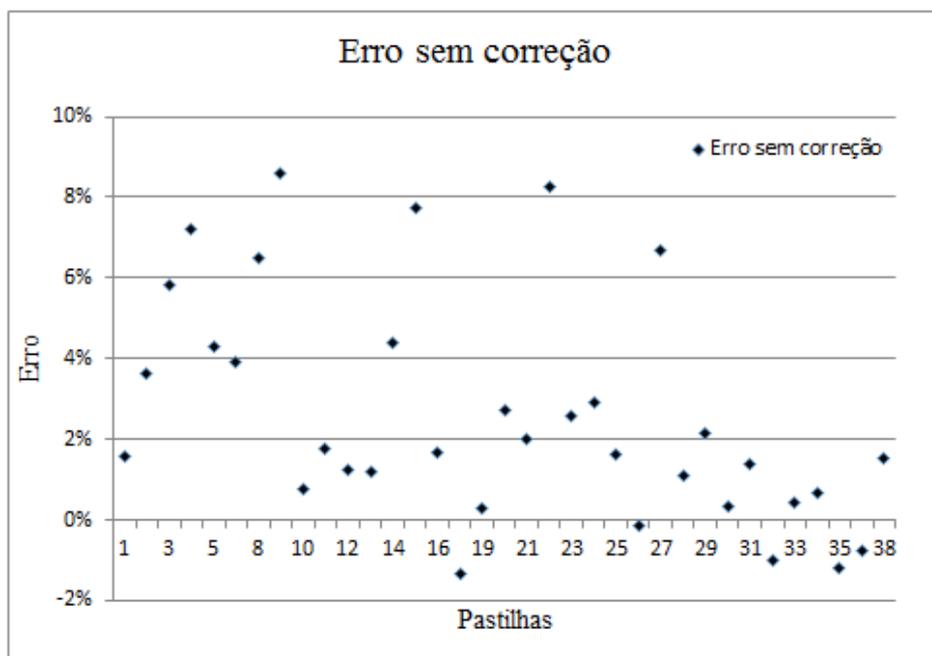


Figura 5.31: Erro dos valores de THD calculados em relação a entrada do sistema.

Os erros foram calculados em função do valor de THD do sinal de entrada, utilizando o sinal obtido através do sistema de monitoramento. Devido à grande dispersão dos valores de erro, com picos acima de 8% foi utilizado um método de calibração para o sistema.

Foram escolhidas aleatoriamente 18 pastilhas de ZnO entre as ensaiadas, cerca de 50% do total do número de pastilhas. A partir da DFT do sinal de entrada referente a cada uma das pastilhas e seu sinal de saída respectivo, foi calculado um fator de correção para cada harmônico ímpar até a 15ª ordem. O objetivo da aplicação desse fator é compensar as diferentes atenuações sofridas por cada harmônico devido à banda passante não-linear do sistema. A fórmula geral para o cálculo do fator de correção para cada harmônico está expressa na equação 5.1.

$$F_n = \frac{\sum_{k=1}^{18} \frac{Hin_n^k}{Hout_n^k}}{18} \quad \begin{matrix} 1 \leq k \leq 18 \\ n = 1, 3, \dots, 15 \end{matrix} \quad (5.1)$$

Onde,

$n$  é a ordem do harmônico ímpar no qual o fator será aplicado;

$k$  é o índice da pastilha selecionada;

$Hin_n^k$  é o harmônico de ordem  $n$  do sinal de entrada da pastilha  $k$ ;

$Hout_n^k$  é o harmônico de ordem  $n$  do sinal de saída do sistema referente a pastilha  $k$ ;

Os fatores calculados foram aplicados ao conteúdo harmônico dos sinais de saída fornecidos pelo sistema, de todas as demais pastilhas de ZnO ensaiadas. O gráfico da figura 5.32 apresenta o gráfico dos valores de erro calculados entre o valor de THD do sinal de saída do sistema corrigido e o valor de THD do sinal de entrada.

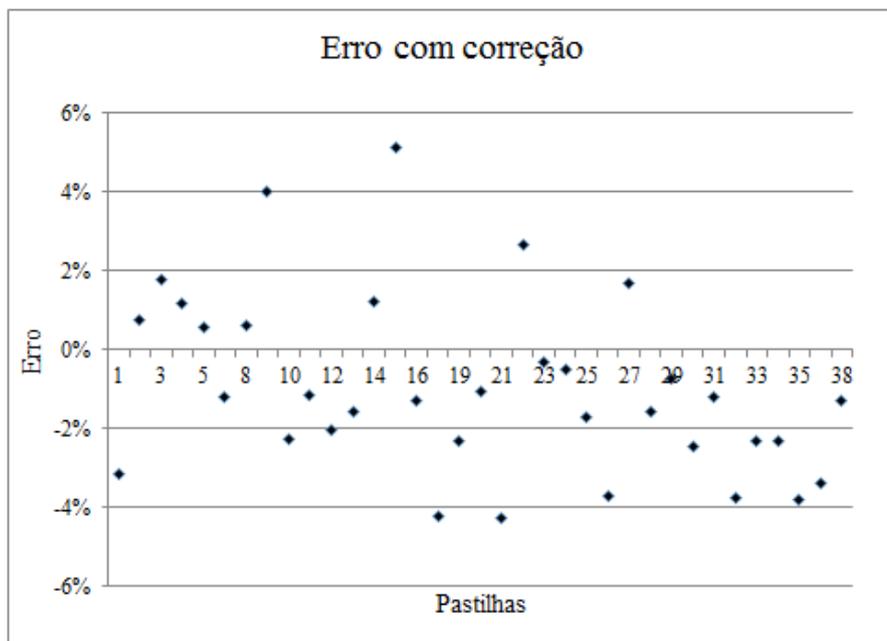


Figura 5.32: Erro dos valores de THD corrigidos calculados em relação a entrada do sistema.

Percebe-se que a dispersão do erro melhorou consideravelmente, com 97% dos valores concentrados dentro da margem de 5% de erro. A única exceção é o valor de erro associado a pastilha 15 cujo valor é 5,1%. A figura 5.33 auxilia na avaliação do impacto dos erros calculados na análise das pastilhas, os valores de THD corrigidos do sinal de saída e os valores de THD do sinal de entrada foram plotados em função da

classificação das pastilhas de ZnO seguindo o critério de amplitude do conteúdo de terceiro harmônico da corrente de fuga.

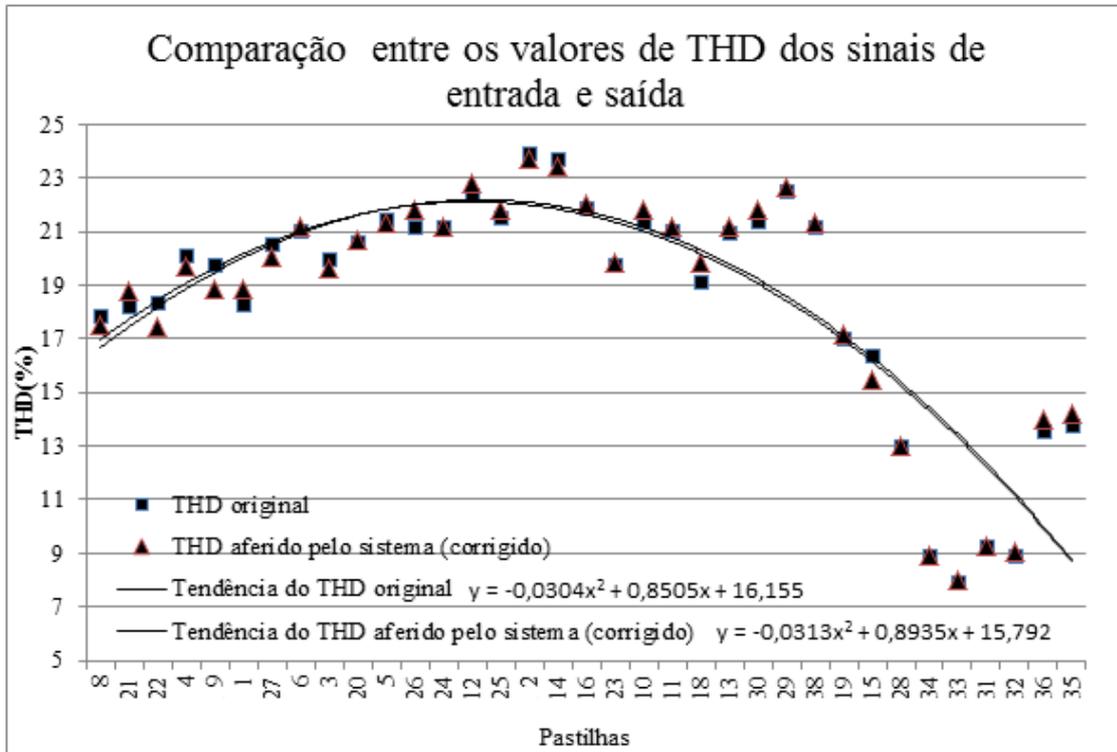


Figura 5.33: Comparação entre os valores de THD da saída corrigidos e os valores de THD da entrada.

Analisando a Fig. 5.33 é possível constatar que o padrão de comportamento dos valores de THD é muito semelhante, e a curva de tendência do comportamento dos valores de THD nos dois casos é praticamente a mesma. Conclui-se que o nível de erro associado aos valores de THD calculados a partir da saída do sistema (corrigidos) não interferem na classificação geral das pastilhas quanto a seu nível de degradação.

## Capítulo VI. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi a busca de subsídios que indicassem que a avaliação dos valores de THD da corrente de fuga total do pararraios possa ser utilizada como metodologia para monitoramento e diagnóstico do dispositivo. Esse trabalho é fruto de uma parceria entre o LIF e a Eletronorte, que buscou o laboratório devido a falta de consenso atual sobre a melhor técnica e metodologia a ser utilizado no monitoramento de pararraios.

AMORIM JUNIOR *et al.* [3] afirmou em seu trabalho que considerando o valor de um pararraios e o custo associado a uma falha, não é imperioso saber qual o tipo de falha acomete os pararraios. O simples fato de diagnosticar o defeito já se torna uma informação valiosa para a engenharia de manutenção. LIRA *et al.* [2] indicou que o grau de distorção harmônica e a magnitude da corrente de fuga no pararraios, em especial a componente resistiva da corrente, constituem fortes indicadores de seu nível de degradação.

Esse trabalho possui objetivo semelhante ao de AMORIM JUNIOR *et al.* [3] e concorda que o mais importante no diagnóstico do pararraios é diagnosticar um defeito, sendo secundário a identificação de qual é o defeito enquanto o pararraios estiver em serviço. A abordagem proposta nesta dissertação difere das comumente empregadas na literatura, isto é, abordagens baseadas na decomposição das componentes capacitivas e resistivas da corrente de fuga total. Neste trabalho, propõe-se que as características para efeitos de classificação de defeitos sejam extraídas do sinal de corrente de fuga total e não de suas componentes, parecido com o conceito seguido LIRA *et al.*[2] em sua pesquisa. Dessa maneira, evita-se uma série de restrições de ordens prática e técnica.

O trabalho usou uma metodologia inovadora nos ensaios, que consiste em utilizar as pastilhas de ZnO de um pararraios degradado como se fossem pararraios individuais de menor MCOV. Isso permite que com apenas um exemplar de pararraios consiga-se uma boa massa de dados para podermos embasar as análises. Além da facilidade de ensaiá-los por possuírem um MCOV menor.

Nos testes preliminares realizados foi constatado que não há influências no sinal aferido, tanto no que diz respeito a inserção de harmônicos quanto atenuações, na utilização dos cabos coaxiais que foram utilizados nos ensaios das pastilhas de ZnO. E o

teste realizado com a fonte de alimentação indica que está apta para ser usada nos ensaio dos resistores não-lineares, pois atende os requisitos da norma IEEE para testes em alta-tensão.

Como mencionado antes, com o aumento do nível de degradação dos pararraios, sua corrente resistiva aumenta, e sendo seus componentes não-lineares a amplitude do seu conteúdo harmônico também aumenta [1]. A investigação dos valores do THD tem como objetivo identificar diferenças nos padrões de aumento do conteúdo harmônico e da componente fundamental da corrente resistiva, levando em consideração não só o conteúdo do 3º harmônico.

Percebeu-se que na fase crescente dos valores de THD o valor da corrente de fuga capacitiva permaneceu estável, com isso não interferia no cálculo do valor de THD. O que indica, que o valor do conteúdo harmônico da corrente de fuga tinha uma taxa de crescimento superior a componente fundamental da corrente resistiva.

Os resultados mostraram também que no momento que a componente capacitiva começa a variar, o pararraios já apresenta um nível de degradação que correspondia a uma componente resistiva muito maior que a componente capacitiva, anulando qualquer influência desta.

Outro fato importante é que entre as pastilhas com menor nível de degradação, é vista uma taxa de aumento maior no conteúdo harmônico, quando comparado com a taxa de aumento da fundamental. A partir do ponto de “Máximo” (figura 5.13), a taxa de aumento da fundamental começa aumentar vertiginosamente, tornando-se superior a taxa de aumento do conteúdo harmônico.

Com base nos dados analisados e dos comportamentos encontrados pode-se concluir que o valor de THD da corrente de fuga possui grande potencial para ser usado como indicativo do nível de degradação do pararraios. O seu padrão de comportamento é bem definido e uma análise temporal dos valores pode indicar a degradação do dispositivo.

A dificuldade do cálculo direto da corrente de fuga resistiva reside na necessidade de um sinal de tensão de referência, parâmetro não necessário para o cálculo do THD. O trabalho possibilita a conclusão de que o THD diminui por causa do aumento do primeiro harmônico da corrente de fuga resistiva, já que não há influência da componente capacitiva em seu valor. Uma vez que a corrente resistiva é basicamente formada pelo conteúdo fundamental e seu 3º harmônico a análise temporal da variação

do THD pode ser usada para o cálculo indireto da corrente resistiva, sem a necessidade de um sinal de tensão de referência.

Algumas pastilhas, com diferentes níveis de degradação, foram selecionadas para serem submetidas a um ensaio de difratometria de raios X. O objetivo do ensaio era correlacionar o nível de degradação de cada resistor não-linear selecionado com variações de parâmetros em sua estrutura cristalina.

Analisando os resultados da difratometria das pastilhas de ZnO foi constatado um menor valor do parâmetro “c”, que caracteriza a “altura” da estrutura cristalina, quanto maior o nível de degradação do elemento. O parâmetro “c” pode estar ligado a resistividade do material, e sua diminuição justificaria o aumento da corrente de fuga resistiva. O ensaio de difratometria de raios X respalda os resultados obtidos com os critérios utilizados para classificação dos resistores não-lineares.

Um ensaio adicional foi realizado para verificar a influência da temperatura do pararraios na variação da corrente de fuga total do dispositivo [16]. Conforme previsto, foi identificado um variação significativa na corrente de fuga resistiva do pararraios. Esse aumento da corrente de resistiva em função da temperatura do corpo do dispositivo pode levá-lo a instabilidade térmica, uma vez que níveis maiores de corrente de fuga resistiva aquecem ainda mais o dispositivo.

Coletados indícios suficientes de que o valor de THD da corrente de fuga do pararraios pode ser um indicativo de seu nível de degradação, foi desenvolvido um protótipo para obtenção do sinal de corrente do dispositivo. Para a amostragem do sinal foi utilizado o Arduino, plataforma microprocessada de baixo custo e código aberto, e como meio físico utilizado para a transmissão do sinal foi empregada a fibra óptica plástica.

O sinal deverá ser aferido no cabo terra do dispositivo, com o uso de uma bobina com núcleo toroidal. O protótipo de bancada utilizou um integrador comercial para transdução do sinal obtido a partir da bobina, e um circuito confeccionado no LIF para interfaceamento do integrador com o Arduino. Também foi desenvolvido um circuito conversor fibra óptica-RS232.

Durante os testes de bancada o protótipo funcionou dentro do previsto, o erro introduzido no cálculo do valor de THD da corrente de fuga devido a banda passante não linear do sistema não interferiu na avaliação geral das pastilhas.

Este trabalho atingiu os objetivos propostos e confirmou o presuposto de que o valor da distorção harmônica total da corrente de fuga de pararraios pode ser usado

como um indicativo do seu nível de degradação. Uma indicação para utilização do método é a realização da medida do valor de THD pararraios em seu comissionamento, ou pouco tempo depois, com intuito desse valor servir para comparações futuras.

Dado a relevância e a inovação desta pesquisa desenvolvida, este trabalho foi aceito para publicação no XVI Encontro Regional Iberoamericano de Cigré (XVI ERIAC) que será realizado em Puerto Iguazú na Argentina no período de 17 a 21 de Maio de 2015.

## **6.1 Desenvolvimentos futuros**

Pesquisas futuras devem ser focadas na obtenção de massa de dados, a partir de ensaios de campo ou em laboratório, para identificação de qual as características da evolução dos valores de THD do pararraios devem ser usados para indicar o melhor momento de substituição do dispositivo e confirmação do método.

A análise dos parâmetros da estrutura cristalina das demais pastilhas de ZnO pode fornecer um importante indicativo acerca de qual valor de THD da corrente de fuga dos resistores não-lineares inicia o processo de alteração da estrutura.

O protótipo de bancada desenvolvido precisa sofrer uma reavaliação para introdução de conceitos de engenharia de produto em sua construção, para que assim possa ser utilizado em campo. Deve-se tomar especial cuidado quanto a proteção contra as interferências eletromagnéticas a quais o protótipo estará submetido em campo.

Trabalhos futuros podem se ocupar de desenvolver um circuito transdutor para a bobina toroidal com banda passante mais linear, diminuindo conseqüentemente o erro associado ao sistema de medição

Outro avaliação possível é a real necessidade de distância que a transmissão de dados deve atender, isto é, quão distante devem ficar o ponto de monitoramento e a estação de processamento de dados. Assim será possível avaliar efetivamente a possibilidade de utilização da fibra óptica plástica como meio físico de transmissão de dados.

Um estudo adicional pode ser realizado para determinar qual a influência do terceiro harmônico presente no sistema de tensão na medida do valor de THD da corrente de fuga e o quanto isso realmente influencia na avaliação geral do pararraios. Por fim, para uma maior praticidade de instalação deve-se desenvolver ou buscar no

mercado um sensor bipartido que possibilite a instalação do sistema sem a desenergização do pararraios.

# Referências Bibliográficas

- [1] VIDEIRA, A. G., 2011, *Desenvolvimento de Subsídios para Aplicação em Testes de Avaliação de Para-Raios de ZnO*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- [2] LIRA, G. R. S., COSTA, E.G., BRITO, V. S., “Diagnóstico de Para-raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total”, **IV SBSE**, 96884, Goiânia, Goiás, BR, 15-18 de Maio 2012.
- [3] AMORIM JUNIOR, H. P., CARVALHO, A. T., RODRIGUES, T. B., *et al.*, “Avaliação de Pára-Raios no Campo Através de Detecção de Descargas Parciais e Validação no Laboratório”, **XXII SNPTEE**, BR/GSE/11, Brasília, Distrito Federal, BR, 13-16 de Outubro de 2013.
- [4] SOARES JUNIOR, A., VISACRO, S., RODRIGUES, L. I. T., *et al.*, “Monitoramento de Pára-Raios de Óxido de Zinco – Abordagem Geral Sobre o Tema e Descrição de um Caso Estudo”, **XVIII SNPTEE**, GSE-30, Curitiba, Paraná, BR, 16-21 de Outubro de 2005.
- [5] NBR 6939. *Coordenação do Isolamento - Procedimentos*, Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1999.
- [6] ELETROSUL, Treinamento em equipamentos de Pátio de Subestações – Módulo: Pararraios. 2001.
- [7] BRITTO, T. M., *Metodologia Da Manutenção Centrada Em Confiabilidade Aplicada A Pára-Raios De Alta Tensão*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- [8] FRONTIN, S. O., **Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. 1 ed., Brasília, Goya Editora LTDA, 2013.

- [9] MARDIRA, K. P., DARVENIZA, M., SAHA, T. K., Search for New Diagnostics for Metal Oxide Surge Arrester. In: **Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, 21-26 June 2000.
- [10] MODRUSAN, M., "Tests on High-Voltage Metal Oxide Surge Arresters with Impulse Currents". **Fourth International Symposium On High Voltage Engineering.**, Athens, Greece, 5 – 9 Sept 1983.
- [11] GOMES, A. T., "Técnicas Preditivas de Diagnóstico de Pararraios", **XXII SNPTEE**, BR/GSE/10, Brasília, Distrito Federal, BR, 13-16 de Outubro de 2013.
- [12] HSU, H. P., **Sinais e sistemas**, 2 ed, Porto Alegre, Bookman, 2012.
- [13] *Difração de Raios X*. Disponível em: <<http://www.ciul.ul.pt/~luisa/PLDTR/DIFRACCAO.pdf>> Acesso em: 08/01/2015, 09:30:00.
- [14] BLEICHER, L., SASAKI, J. M., "Introdução à Difração de Raios-X em Cristais", Universidade Federal do Ceará, Setembro de 2010.
- [15] SCHEI, A., "Diagnostic Techniques for Surge Arresters with Main Reference to On-Line Measurement of Resistive Leakage Current of Metal-Oxide Arresters", **CIGRE Session 2000**, P1-05, Paris, FR, 27 Aug - 1 Sept 2000.
- [16] IEC, "IEC 60099-5 – Surge arresters – Selection and application recommendations", 2000.
- [17] HEINRICH, C., HINRICHSEN, V., "Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arrester in High-Voltage Networks – Comparison of Existing and Newly Developed Procedures", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 1, pp. 138-143, Jan 2001.

- [18] BARGIGIA, A., NIGRIS, M., PIGINI, A., *et al.*, “Comparison of Different Test Methods to Assess the Thermal Stresses of Metal Oxide Surge Arresters Under Pollution Conditions”, *IEEE IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 1, pp. 146-155, Jan 1993.
- [19] NIGOL, O., “Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arresters”, *IEEE IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 3, pp. 1256-1264, July 1992.
- [20] LUNDQUIST, J., STENSTROM, L., SCHEI, A., *et al.* “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, 1990.
- [21] *Horstmann Fault Indicators*. : Catálogo de produtos online. Disponível em: <[http://www.mvtechnology.com.au/catalogues/MVT\\_FCI%20-%2006.2013.PDF](http://www.mvtechnology.com.au/catalogues/MVT_FCI%20-%2006.2013.PDF)> Acesso em: 30 dez. 2014, 23:02:00.
- [22] *Arrester Accessories TLB Disconnecter*. : Disponível em: <<http://www.tanhoelectric.com/arrester-accessories/729.htm>> Acesso em: 31 dez. 2014, 00:15:00.
- [23] LARSEN, V., LIEN, K., “In-Service Testing and Diagnosis of Gapless Metal Oxide Surge Arresters”. **IX International Symposium on Lightning Protection.**, Foz do Iguaçu, Brasil, 26-30 Nov 2007.
- [24] KLEIN, T., KOHLER, W., FESER, K., *et al.*, “A New Monitoring System for Metal Oxide Surge Arresters”, In: **Conference Publication of the High Voltage Engineering Symposium**, n 467, 22-27 Aug 1999.
- [25] *Overview of On-Line Condition Monitoring & Field Testing of Surge Arresters*: Disponível em: <<http://www.inmr.com/2014/10/overview-on-line-condition-monitoring-field-testing-surge-arresters/>> Acesso em: 03 jan. 2015, 13:11:00.

- [26] ÁLVARES, R. C., 2008, *Diagnóstico de Falhas em Pára-Raios utilizando Termografia*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- [27] DA SILVA, F. T., PEREIRA, O. P., SANTOS, Y. G., *et al.*, “Aplicação da Termografia Infravermelha no Sistema Elétrico de Potência”, *Revista Engenharia Elétrica*, IESAM, n. 2, 2014.
- [28] *A Report on Condition Monitoring of Lightning Arresters*. Disponível em: <[http://elocos.railnet.gov.in/MSG\\_ESC/Lightning\\_Arrestor.pdf](http://elocos.railnet.gov.in/MSG_ESC/Lightning_Arrestor.pdf)> Acesso em: 05 Jan 2015, 09:06:00.
- [29] TASKIN, T., “Introduction of a measurement system to monitor the condition of ZnO surge arresters”. *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, pp. 1553 - 1557 vol.3, Singapura, SG, 23-27 Jan 2000.
- [30] LIRA, J. G. A., MACEDO, E. C. T., COSTA, E. G., *et al.*, “ZnO Surge Arrester Diagnosis Using Microcontroller”. **IMTC 2007 Instrumentation and Measurement Technology Conference**, Warsaw, Poland, May 1-3, 2007.
- [31] HILRICHSEN, V., “Monitoring of High Voltage Metal Oxide Surge Arrester”. **VI Jornadas Internacionales de Aislamiento Eléctrico.**, Bilbao, Espanha, 22 – 23 Out 1997.
- [32] JAROSZEWSKI, M., KOSTYLA, P., WIECZOREK, K., “Effect of Voltage Harmonics Content on Arrester Diagnostic Result”. **2004 International Conference on Solid Dielectrics**, Toulouse, France, 5-9 July 2004.
- [33] FERNANDO, S. N.; RAGHUVVEER, M. R. Technique to examine the influence of voltage harmonics on leakage current based MOSA diagnostic indicator. In: **Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000 Annual Report Conference on**. IEEE, 2000. p. 596-599.

- [34] ZHU, H., RAGHUVVEER, M. R., Influence Of Harmonics In System Voltage On Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics. In: **Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999 Annual Report Conference on.** IEEE, 1999. p. 542-545.
- [35] ZHU, H., RAGHUVVEER, M. R., “Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics”. *IEEE IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 4, pp. 599-603, Oct 2001.
- [36] KIL, G.S., HAN, J.S., LEE, J.H., *et al.*, “Influence of the Third Harmonic Component in Power System Voltage on Arresters Diagnostics”. **XIII International Symposium on High Voltage Engineering.**, Totterdam, Netherlands, 2003.
- [37] LIRA, G.R.S., COSTA, E.G., FERREIRA, T.V, 2014, “Metal-oxide Surger Arreter Monitoring and Diagnosis by Self-organizing Maps”, *Journal Electric Power Systems Research*, v. 108, March, pp. 315-321.
- [38] MACEDO, E. C. T, LIRA, J. G. A., COSTA, E. G., *et al.*,”Inductive Current Sensor Based On Nanocrystalline Alloys”. **XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology**, Lisbon, Portugal, 6-11 Sept 2009.
- [39] YONGQIANG, W., FANGCHENG, L., HEMING, L., Improved Compensation Method to Online Monitor Resistive Leakage Current of MOA and its application. In: **Proceedings of the XIV International Symposium on High Voltage Engineering**, Tsinghua University, Beijing, China, 25-29 Aug 2005.
- [40] TATIZAWA, H., BACEGA, W. R., KANASHIRO, A. G., “Avaliação Em Campo Do Estado De Degradação De Pára-Raios De Zno, Da Classe De Tensão 345kv”, **XIII ERIAC**, XIII/PI-A3-03, Puerto Iguazú, Argentina, AR, 24 - 29 Mayo 2000.
- [41] ALVES, M. E. G., 2013, *Método para Diagnóstico em tempos real de Para-Raios em sistemas de distribuição e transmissão de Energia Elétrica*, Tese de D. Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

[42] MARTINS, H. J. A., TORRES, R. J., LAURENTYS, C. A., Intelligent Detection and Diagnosis of Surge Arresters Faults Using Neural Network Techniques. In: **Proceedings of the XIV International Symposium on High Voltage Engineering**, Tsinghua University, Beijing, China, 25-29 Aug 2005.

[43] IEEE, “IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing”, IEEE Standard 4, 1978.

[44] DINIZ, P. S. R., SILVA, E. A. B., NETTO, S. L., **Processamento Digital de Sinais: Projeto e Análise de Sistemas**, Porto Alegre, Bookman, 2004.

[45] *OriginPro*. Disponível em: <http://www.originlab.com/index.aspx?go=Products/OriginPro> Acesso em: 07 jan. 2015, 15:25:00.

[46] *Manual de Instruções da Ponta para Alta Tensão KV-40*. Disponível em: <http://icel-manaus.com.br/imagens/produtos/KV-40%20Manual.pdf> Acesso em: 08 jan 2015, 16:29:00

[47] *Digital Storage Oscilloscopes*. Disponível em: [http://www2.tek.com/cmsreplive/psrep/13304/3MM-17750-4\\_2011.02.10.07.45.10\\_13304\\_ES-MX.pdf](http://www2.tek.com/cmsreplive/psrep/13304/3MM-17750-4_2011.02.10.07.45.10_13304_ES-MX.pdf) Acesso em: 07 jan 2015 17:34:00.

[48] HANSELMAN, D., LITTLEFIELD, B., **MATLAB 6 – Curso Completo**, 2d, São Paulo, Prentice Hall, 2007.

[49] WHITAKER, J. C., **The Electronics Handbook, 2d**, Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2005.

[50] BRITO, V. S, LIRA, G. R. S., COSTA, E.G., *et al.*, “Estudo Comparativo de Métodos de Decomposição da Corrente de Fuga Total em Para-Raios ZnO”, **IV SBSE**, 96877, Goiânia, Goiás, BR, 15-18 de Maio 2012.

[51] ALEXANDER, C. K., SADIKU, M. N. O., **Fundamentos de Circuitos Elétricos**, 2d, São Paulo, Bookman, 2006.

[52] *Arduino*. Disponível em: < <http://www.arduino.cc/>> Acesso em: 08 jan 2015, 19:35

[53] *Sistemas de Transmissão e Meios Ópticos*. Disponível em: <<http://www.eeec.ufg.br/~lguedes/moodle/txdados/fo.pdf>> Acesso em: 13 jan 2015, 15:16:00.

[54] Werneck, M. M, Santos, D. M., Neto, J. L., *et al.*, “Detection and Monitoring of Leakage Currents in Distribution Line Insulators”, **I2MTC -IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference**, Montevideo, May 2014.

[55] *Transformadores de corrente*. Disponível em: <<http://www.maxcontroll.com.br/CatalogosDeParceiros/Instrumenti/cat2.pdf>> Acesso em: 08 jan 2015, 20:01:00

[56] DE OLIVEIRA, I. A. S., 2004, *Estudo E Caracterização De Fibras Ópticasplásticas Para Aplicação Em Telecomunicações*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

[57] *Plastic Fiber Optic Photodiode Detector*. Disponível em: <[http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/infineon/1-SFH250\\_040319-1426.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/infineon/1-SFH250_040319-1426.pdf)> Acesso em: 16 jan 2015, 09:20:00.

# Apêndice. A

Neste apêndice são apresentadas, da Fig. A.1 a Fig. A.35, as formas de onda da corrente de fuga das pastilhas de ZnO ensaiadas.

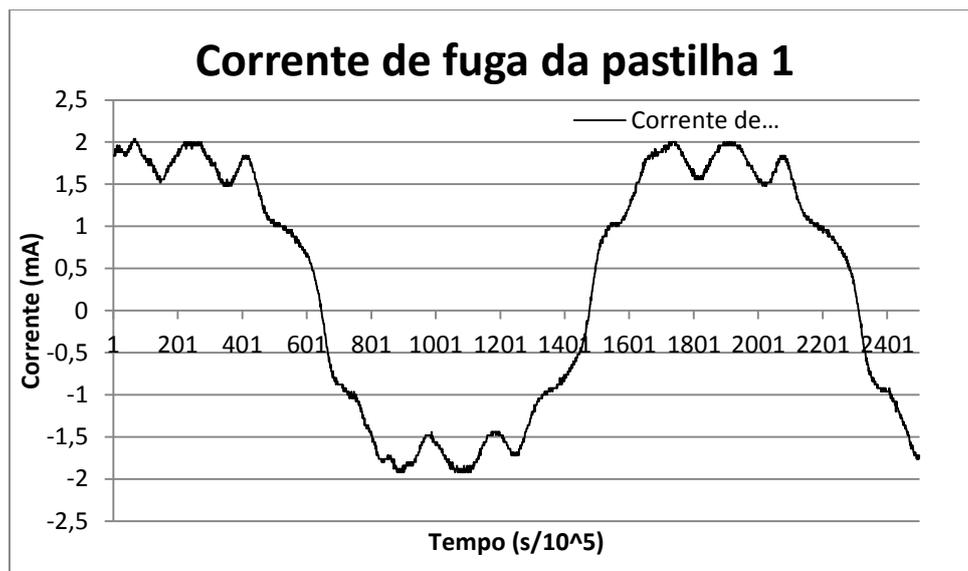


Figura A.1. Corrente de fuga da pastilha 1.

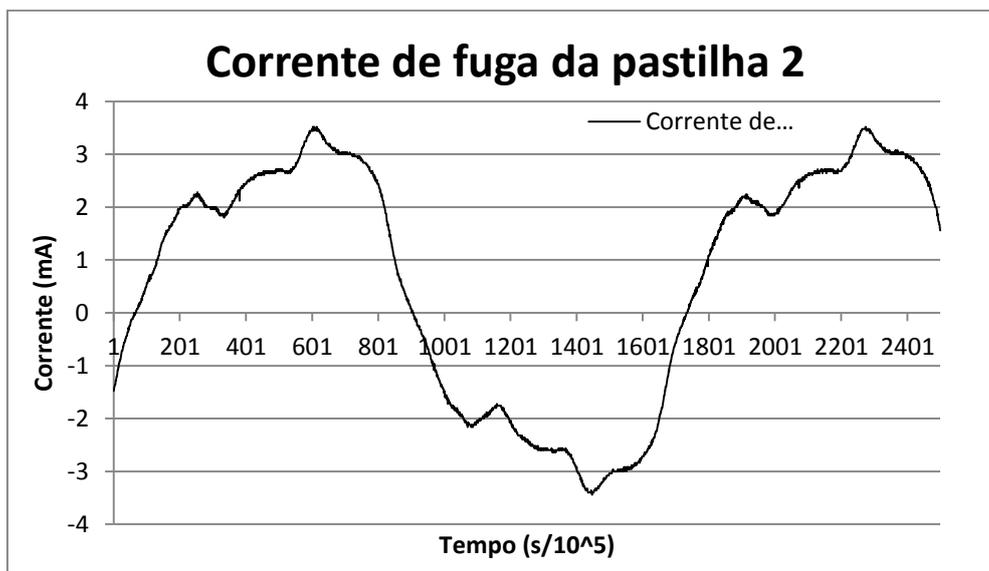


Figura. A.2. Corrente de fuga da pastilha 2.

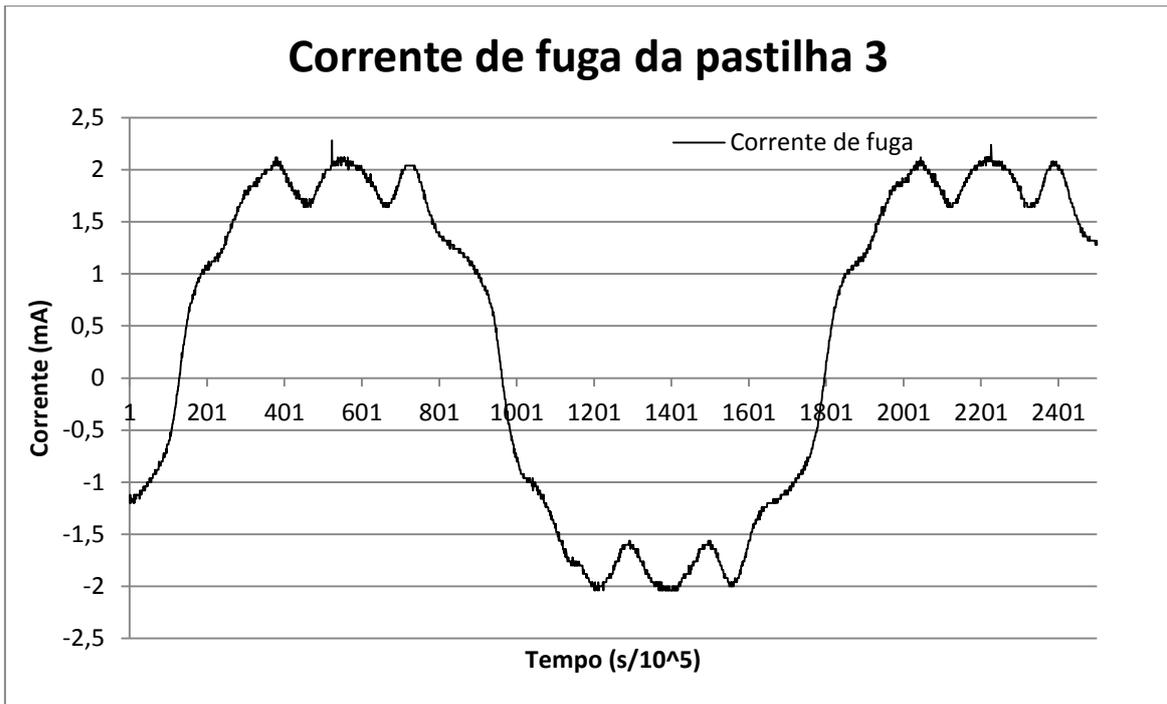


Figura. A.3. Corrente de fuga da pastilha 3.

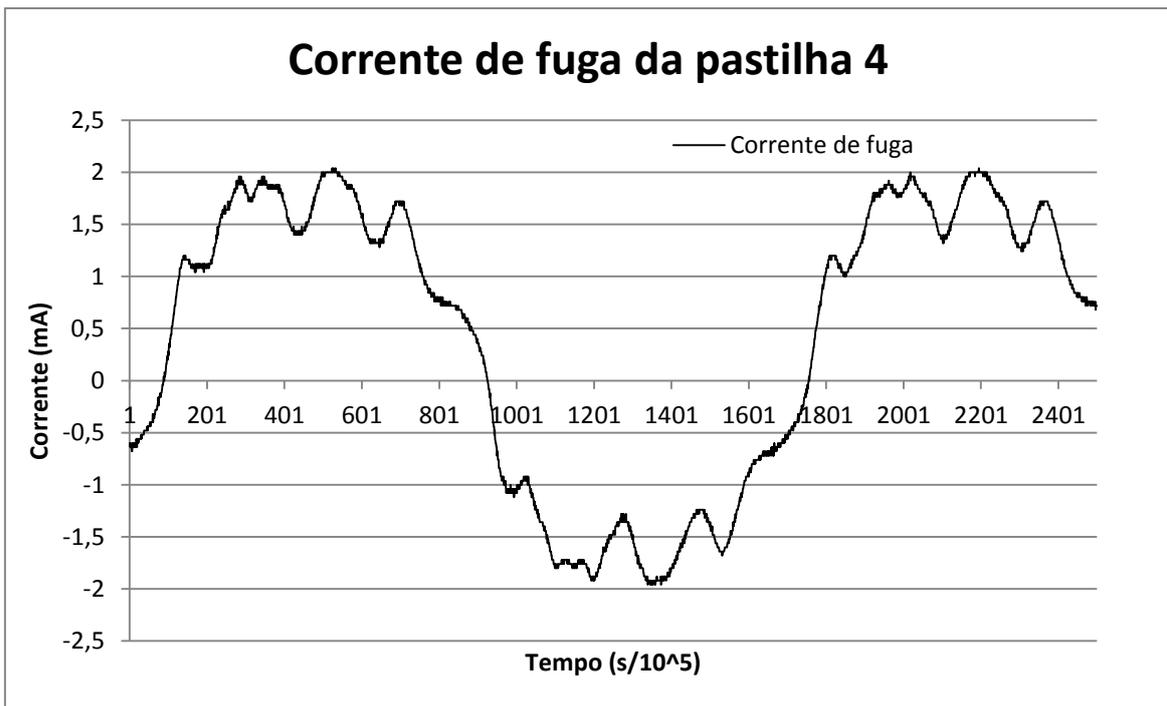


Figura. A.4. Corrente de fuga da pastilha 4.

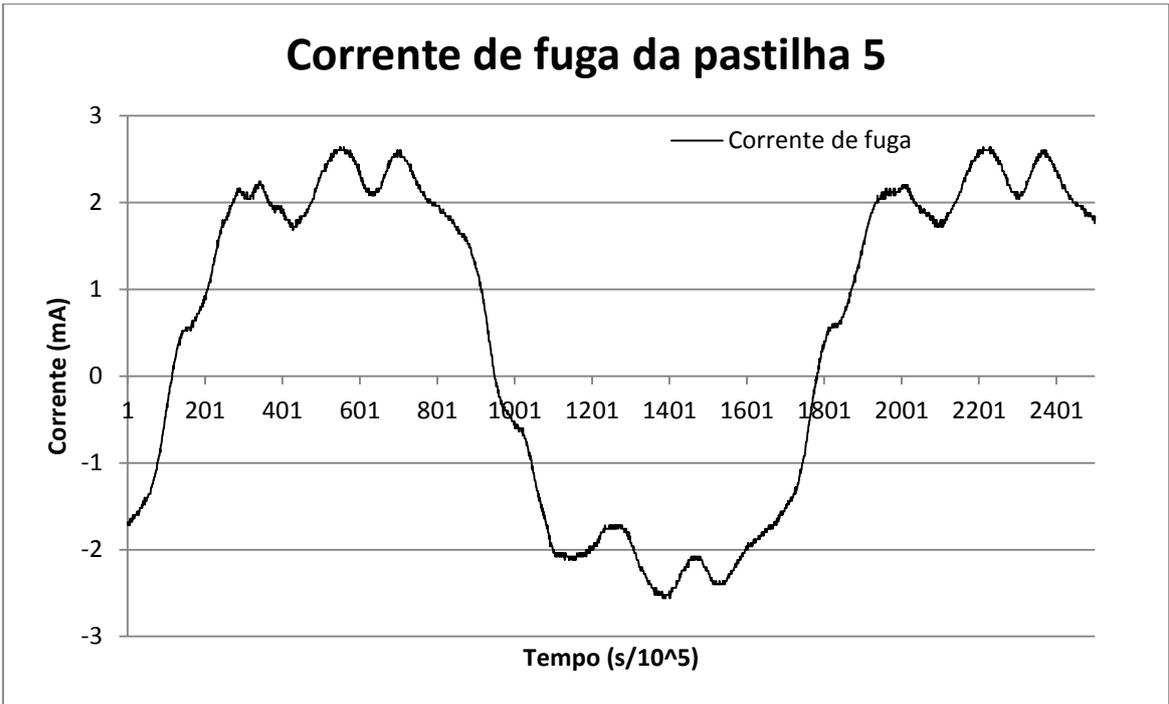


Figura. A.5. Corrente de fuga da pastilha 5.

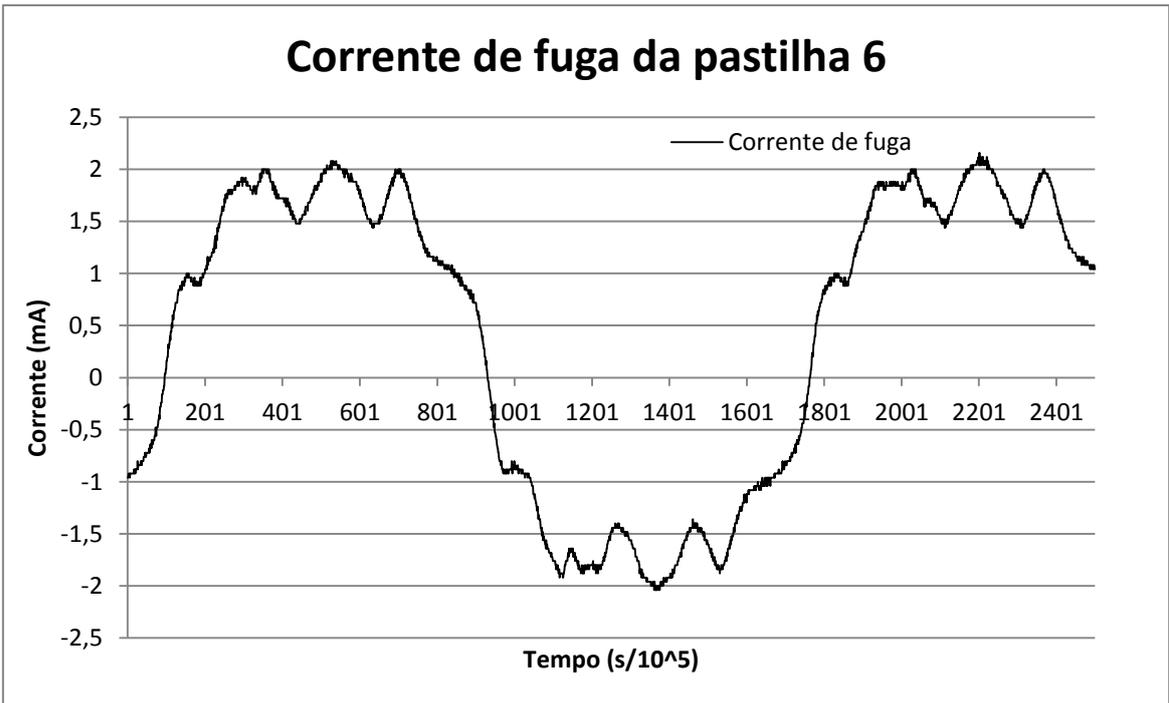


Figura. A.6. Corrente de fuga da pastilha 6

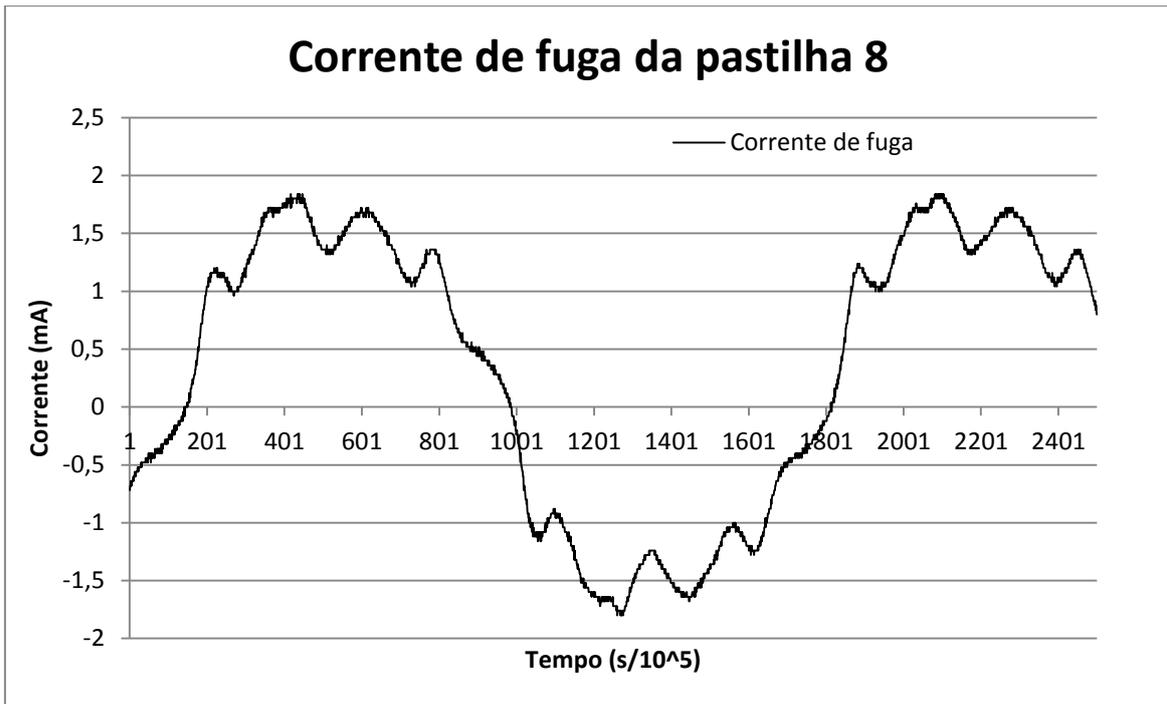


Figura. A.7. Corrente de fuga da pastilha 8.

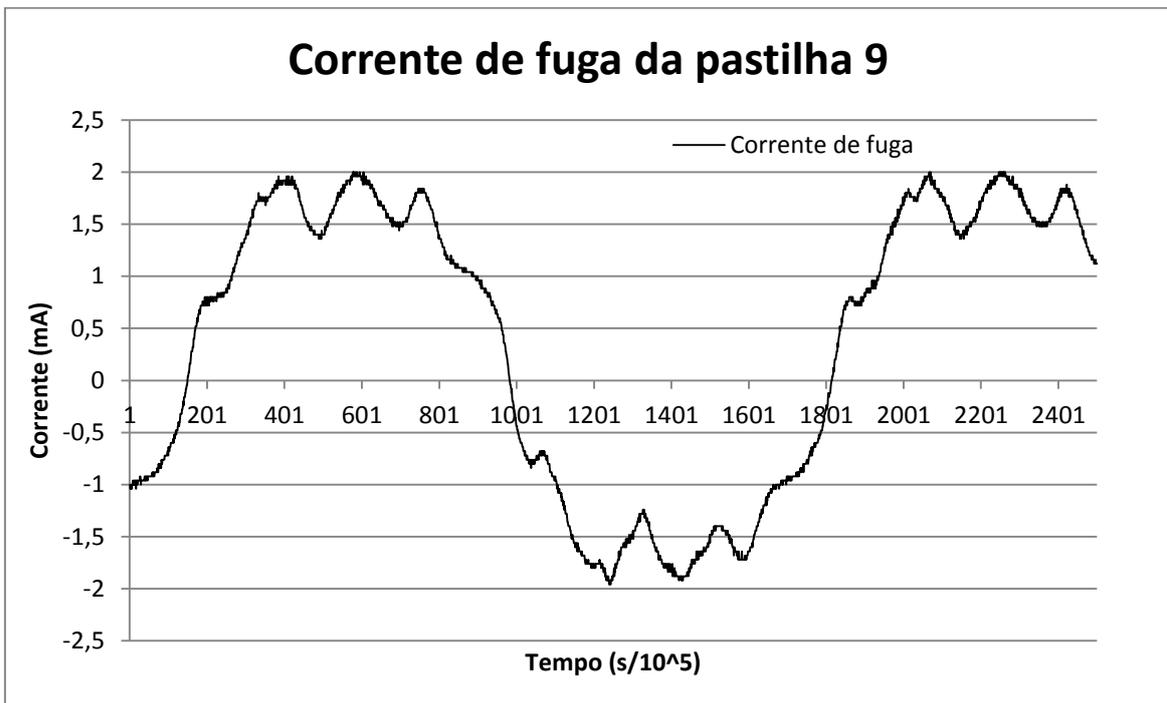


Figura. A.8. Corrente de fuga da pastilha 9.

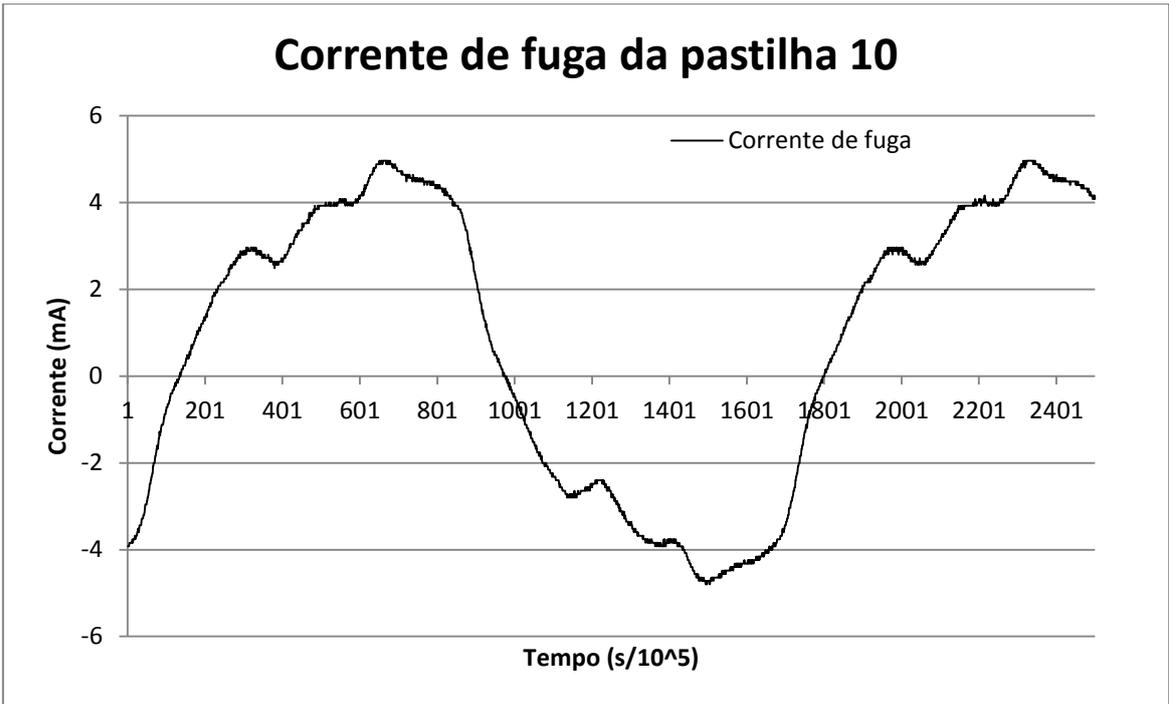


Figura. A.9. Corrente de fuga da pastilha 10.

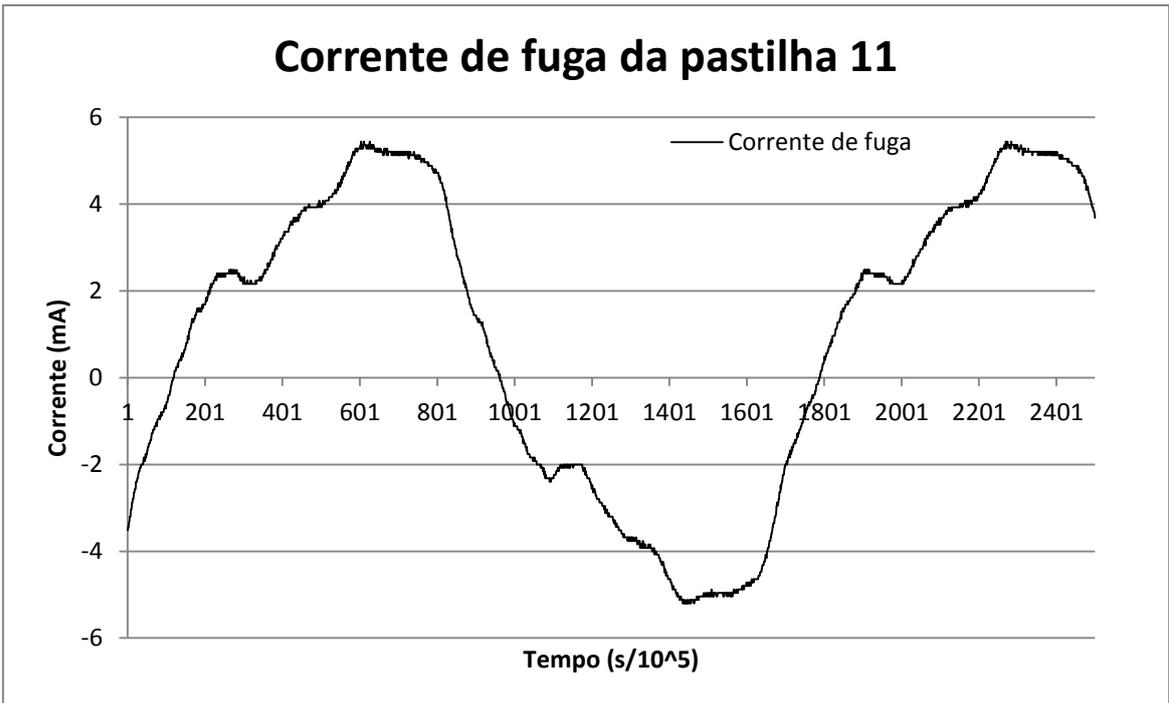


Figura. A.10. Corrente de fuga da pastilha 11.

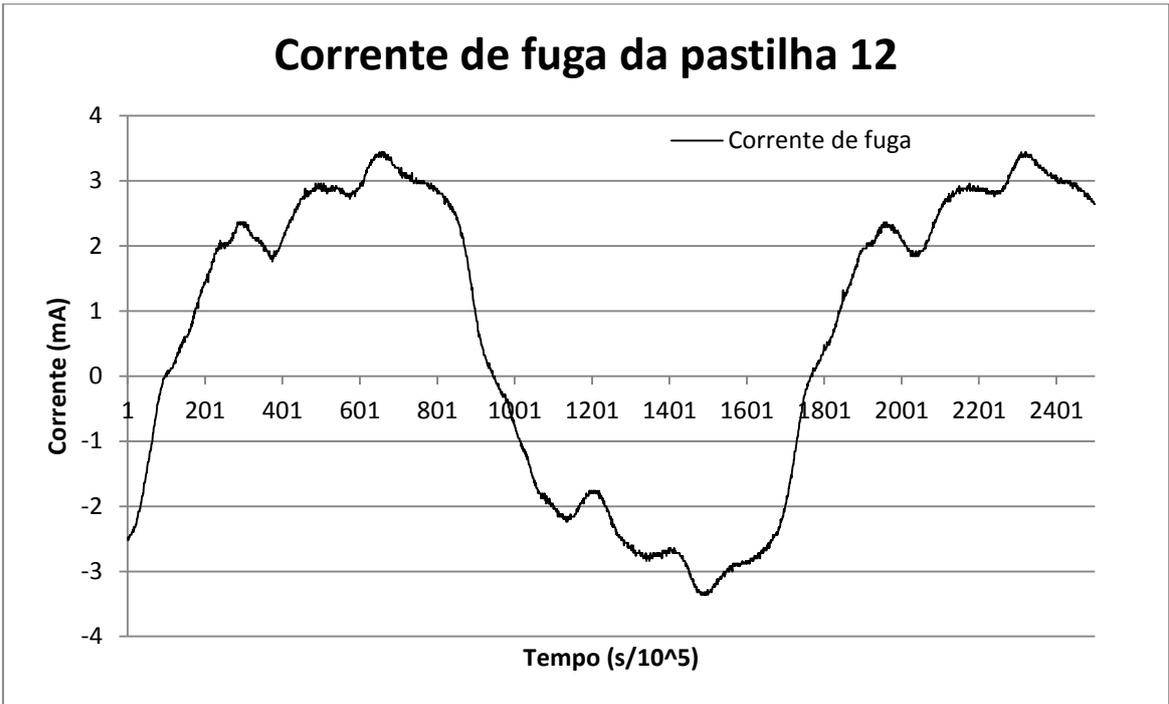


Figura. A.11. Corrente de fuga da pastilha 12.

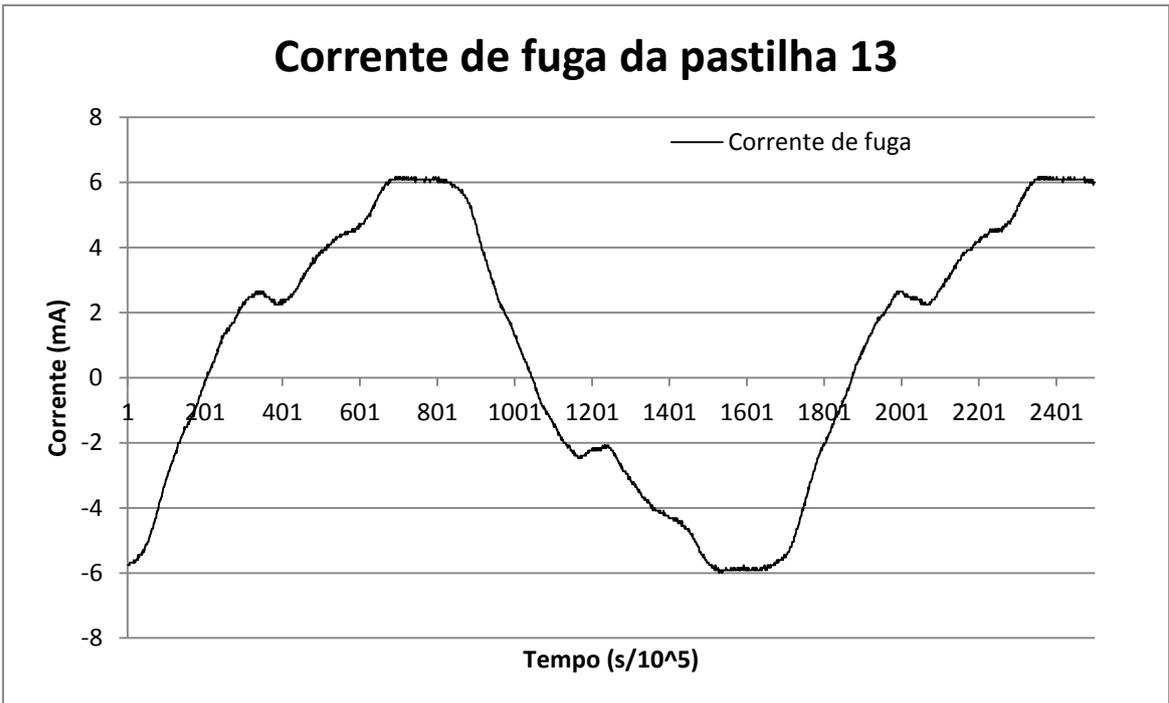


Figura. A.12. Corrente de fuga da pastilha 13.

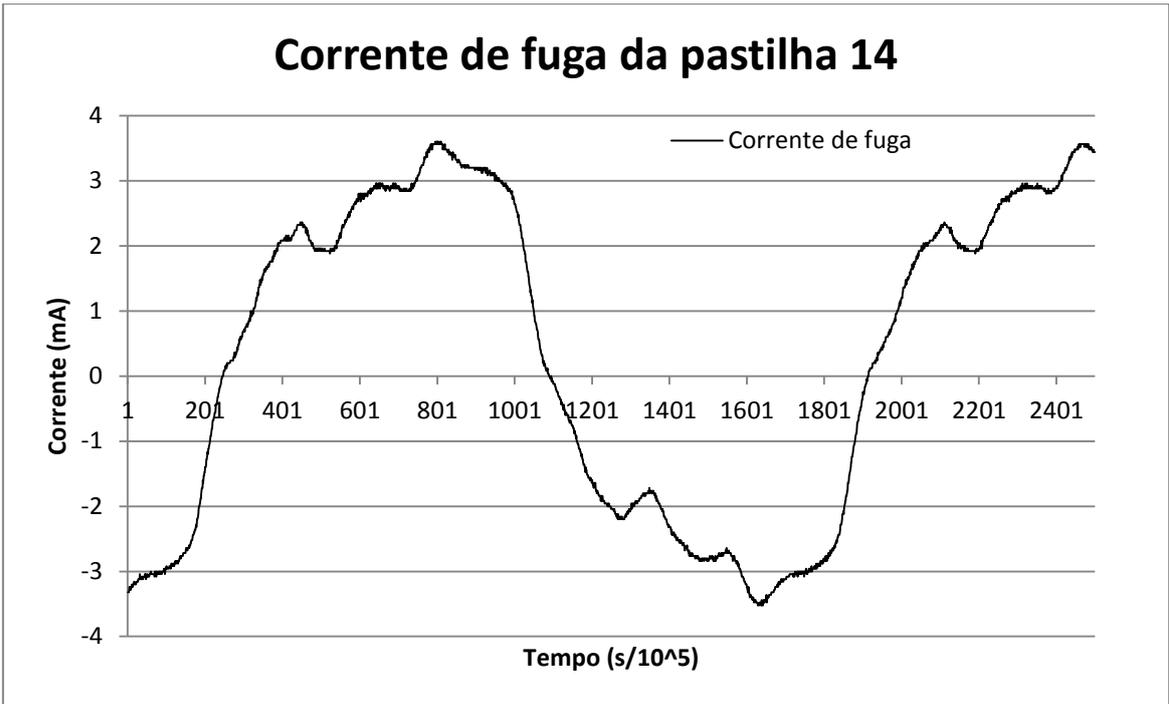


Figura. A.13. Corrente de fuga da pastilha 14.

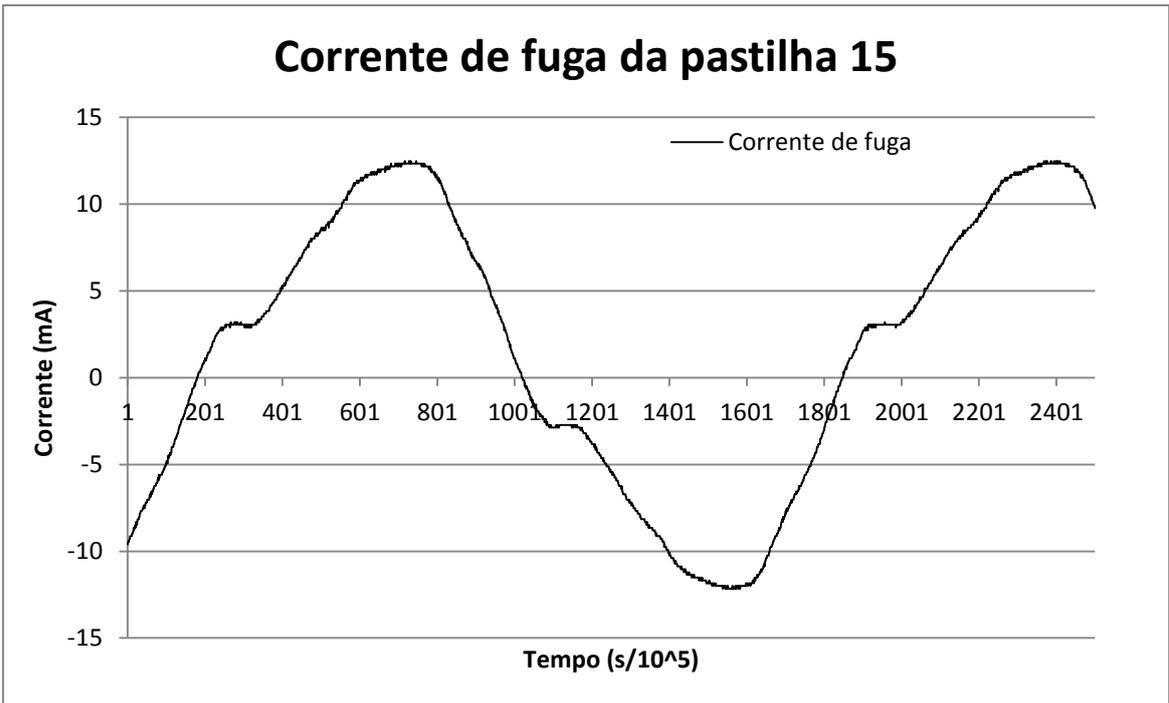


Figura. A.14. Corrente de fuga da pastilha 15.

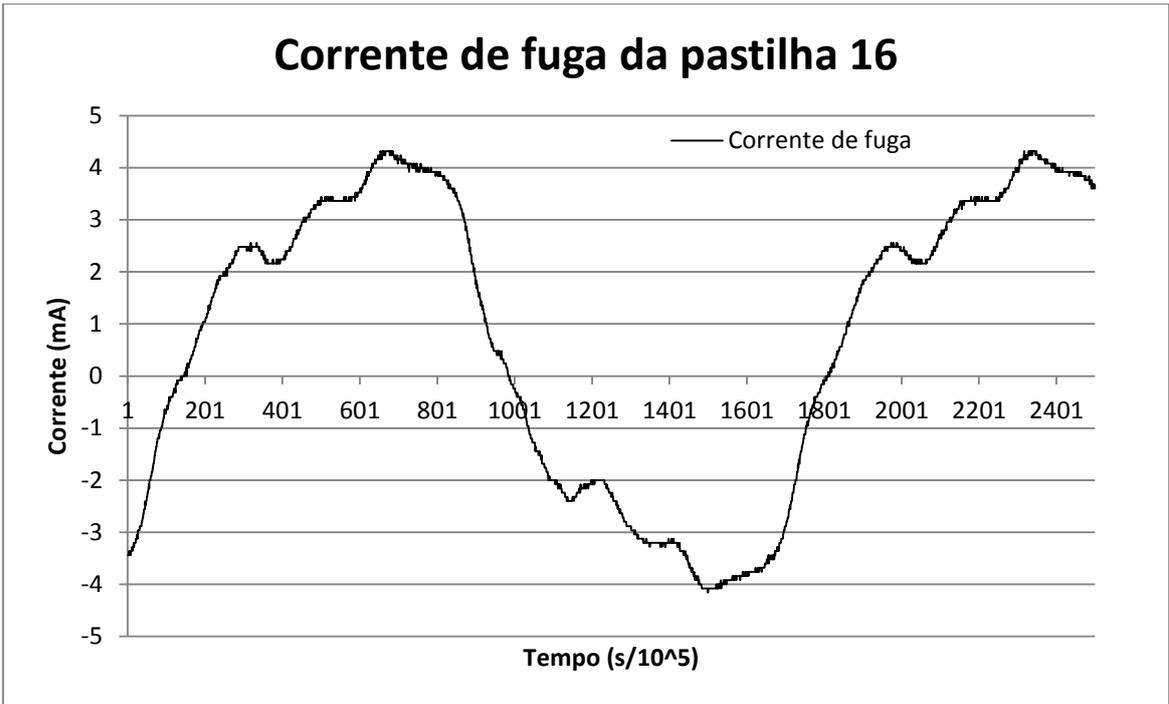


Figura. A.15. Corrente de fuga da pastilha 16.

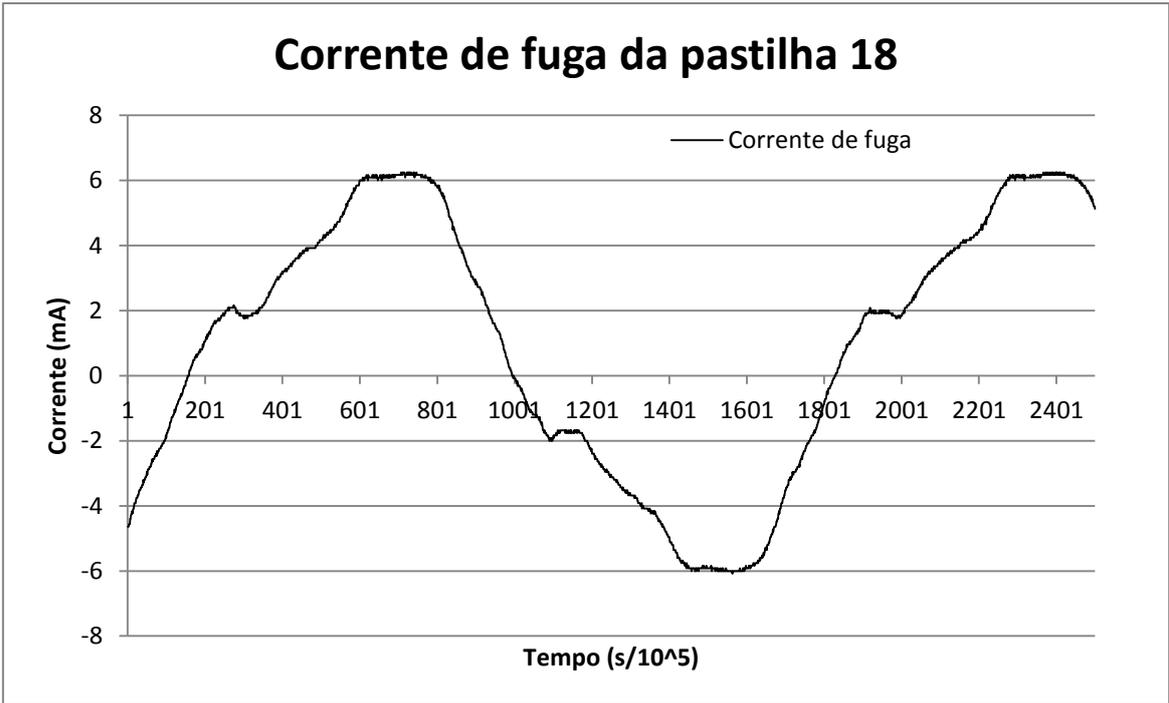


Figura. A.16. Corrente de fuga da pastilha 18.

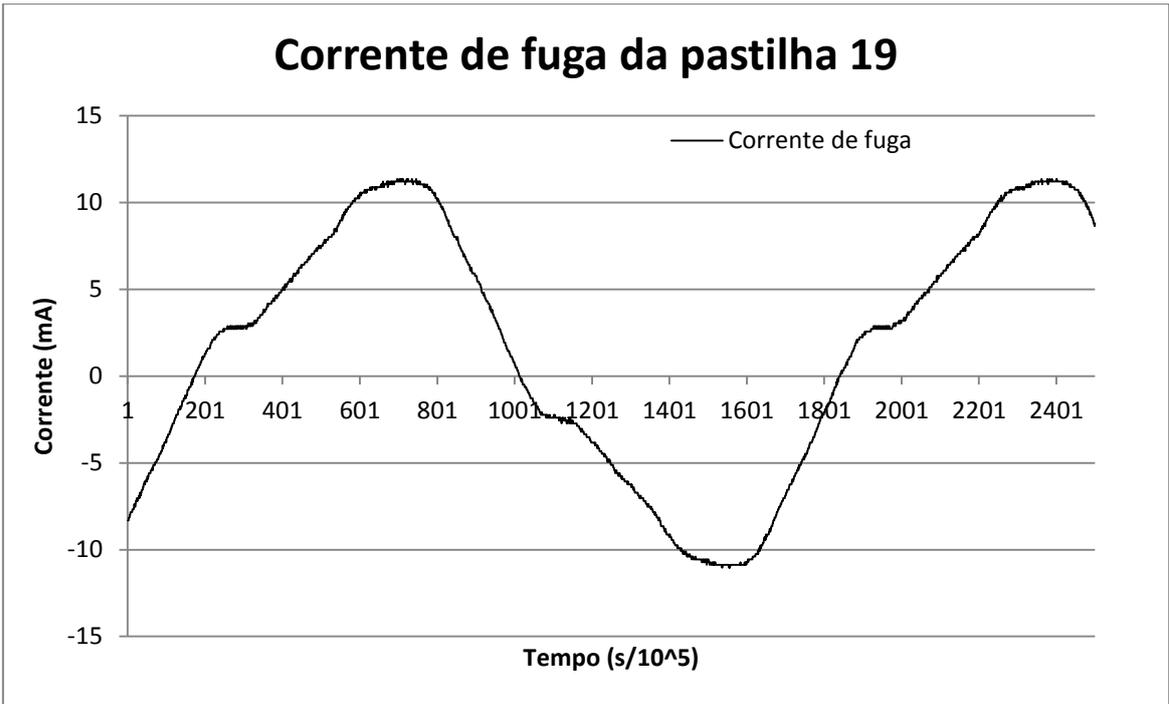


Figura. A.17. Corrente de fuga da pastilha 19.

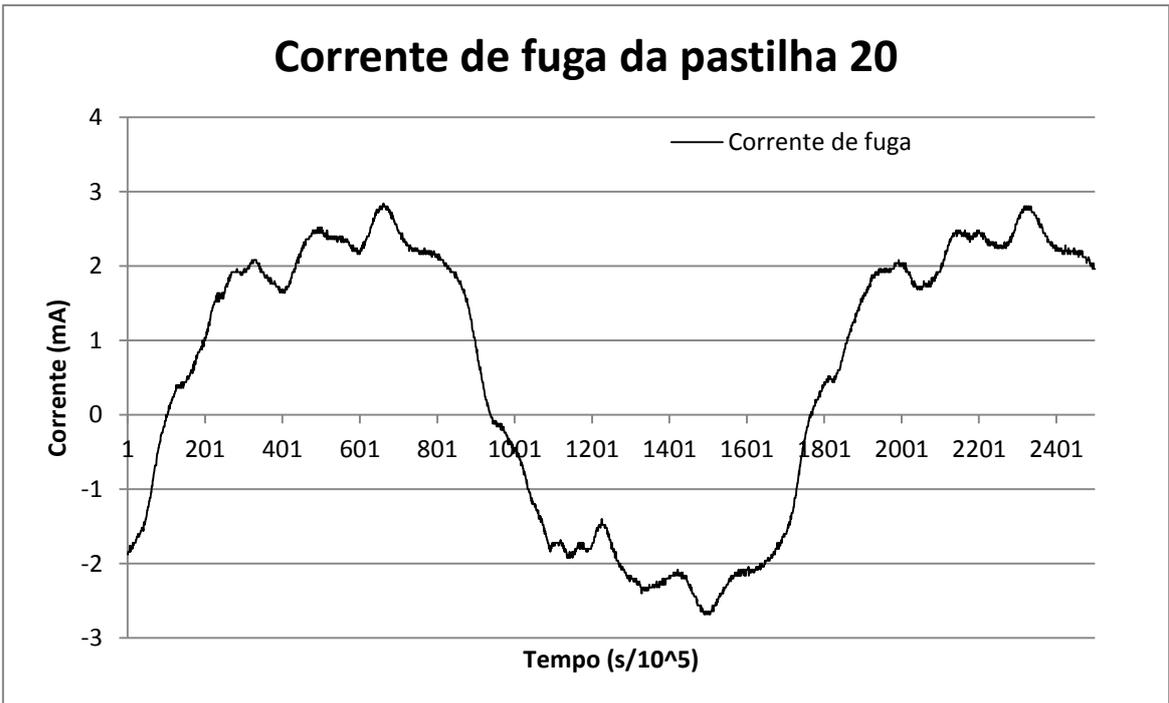


Figura. A.18. Corrente de fuga da pastilha 20.

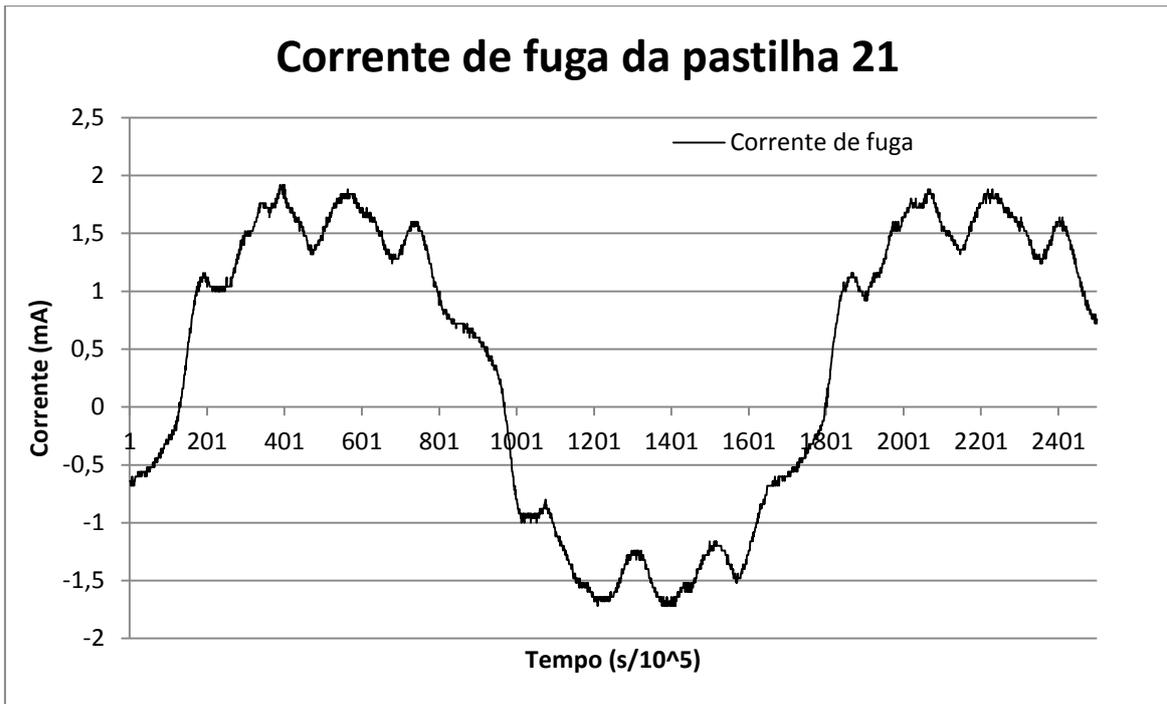


Figura. A.19. Corrente de fuga da pastilha 21.

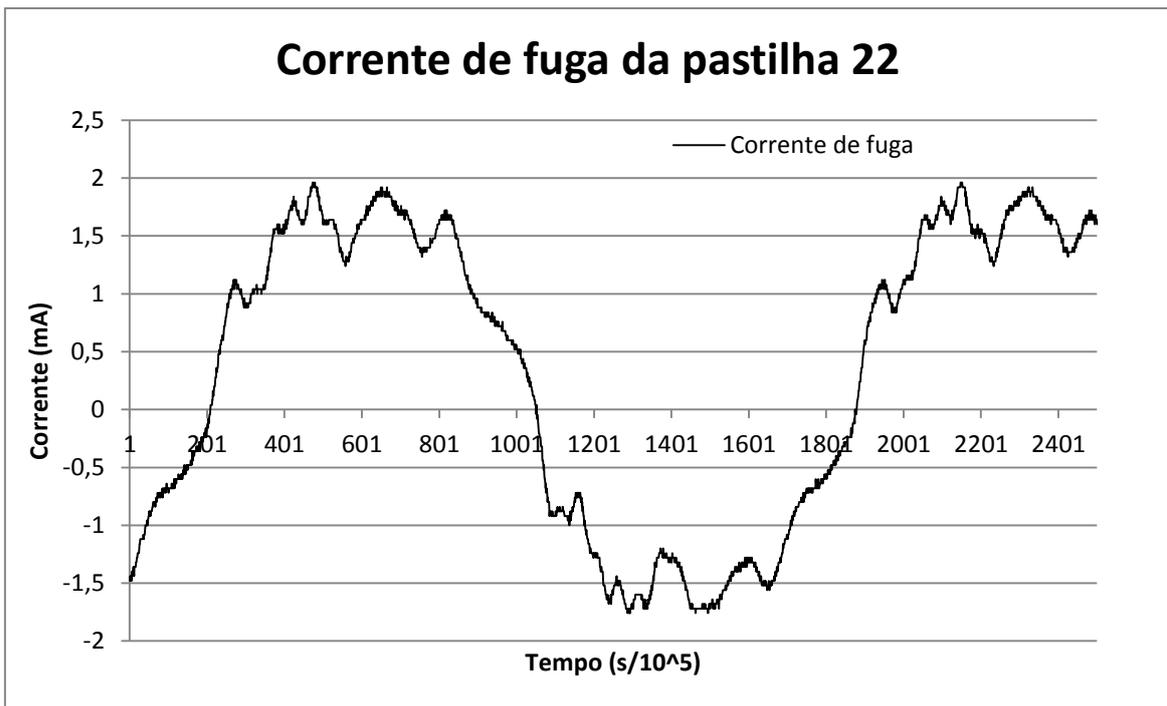


Figura. A.20. Corrente de fuga da pastilha 22.

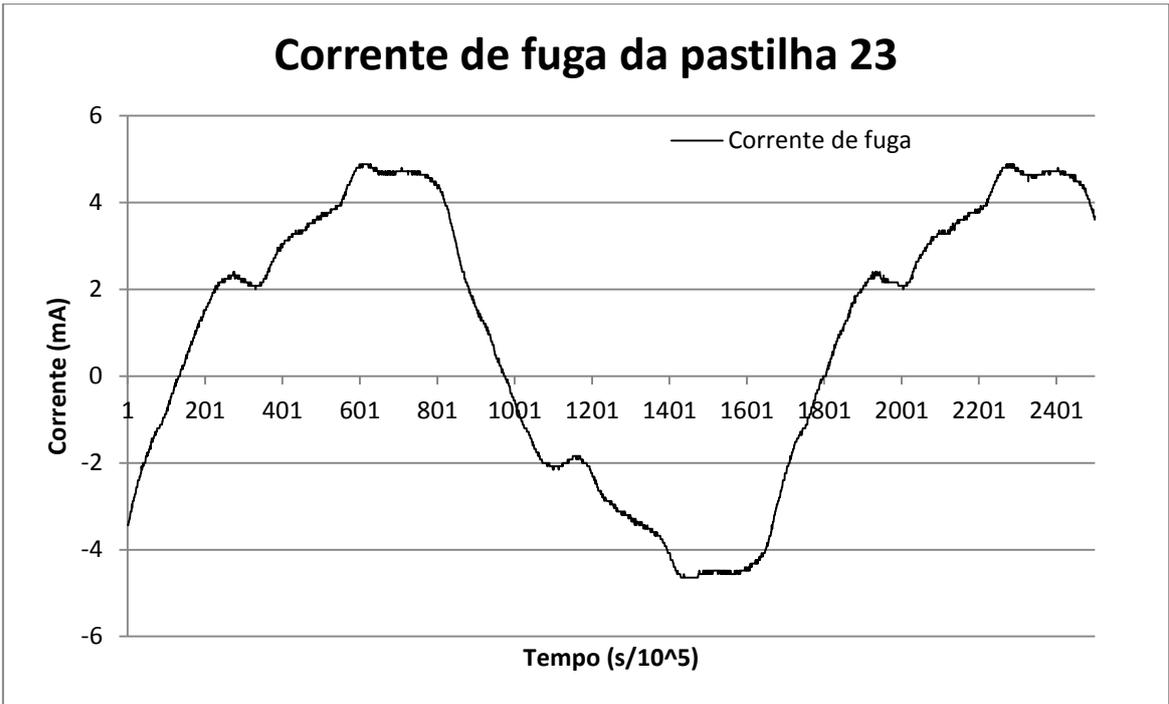


Figura. A.21. Corrente de fuga da pastilha 23.

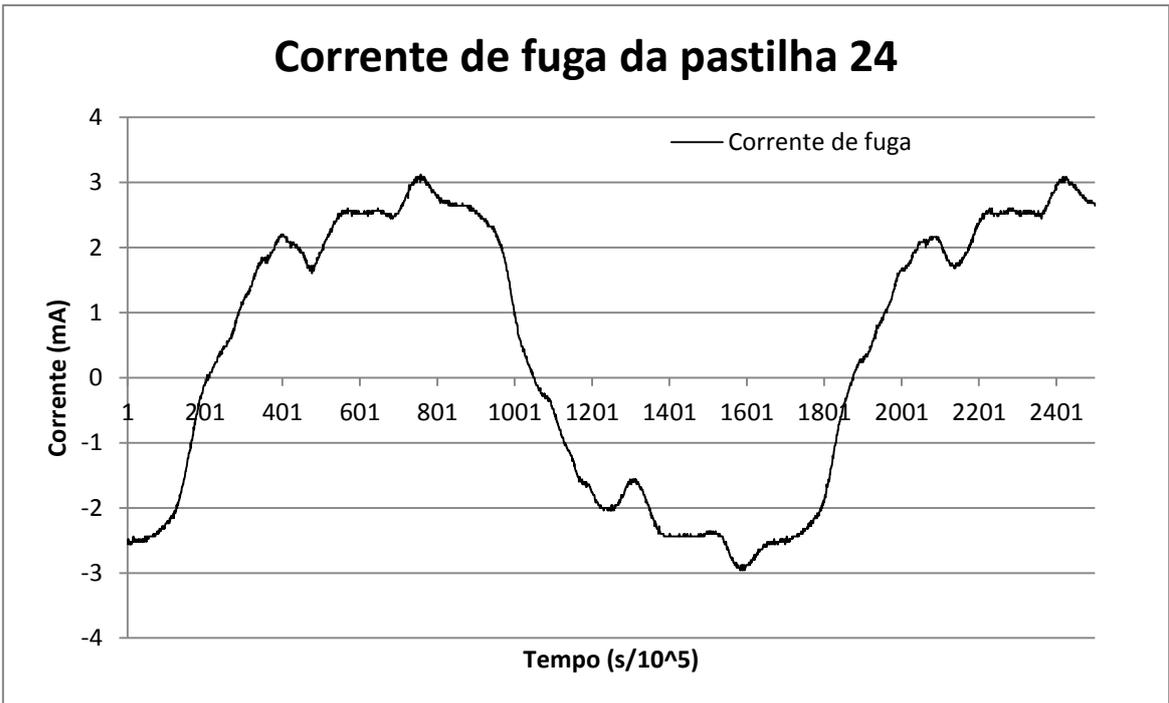


Figura. A.22. Corrente de fuga da pastilha 24.

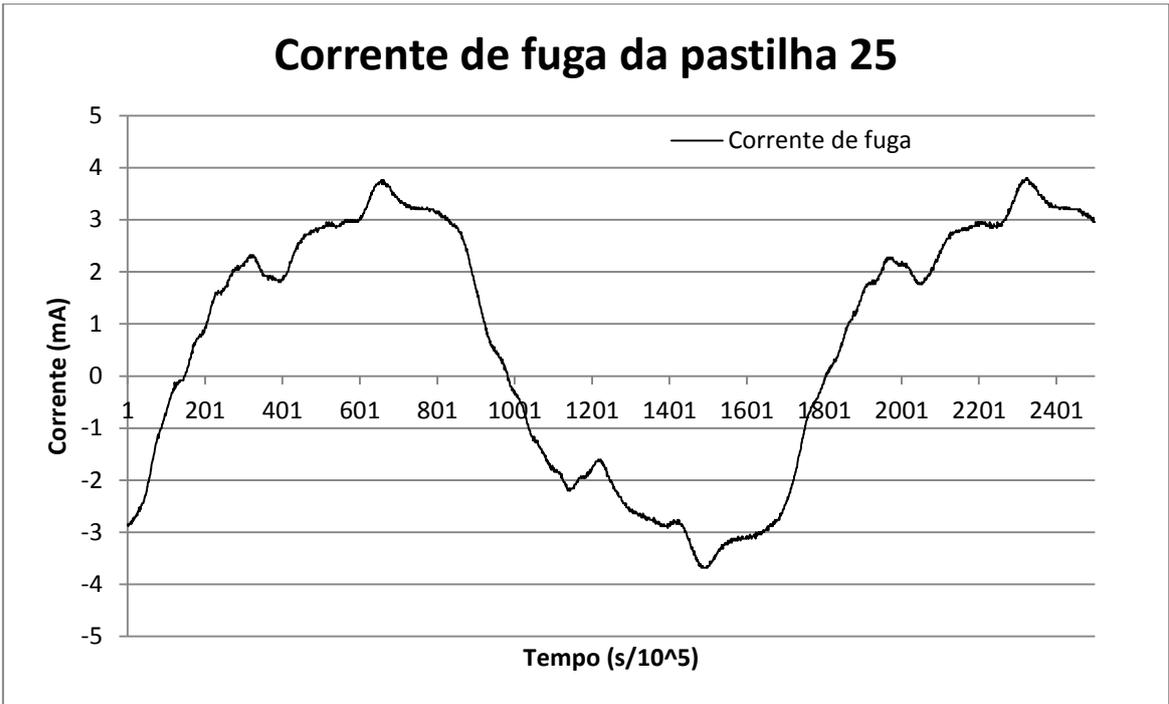


Figura. A.23. Corrente de fuga da pastilha 25.

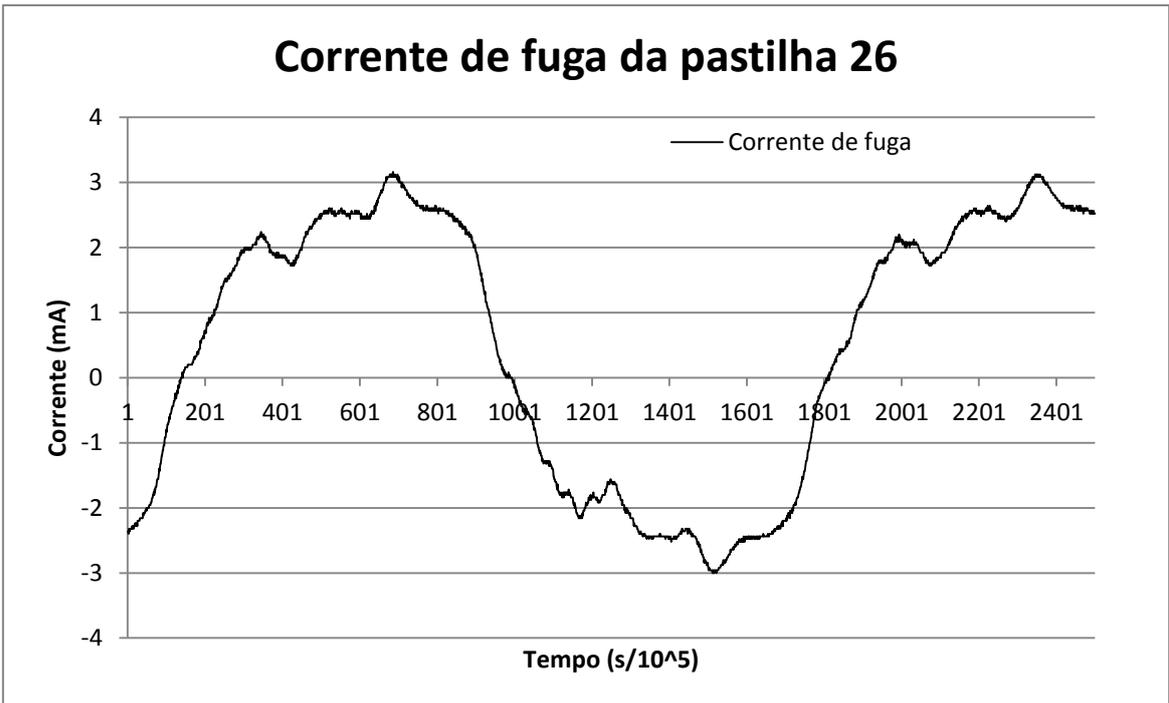


Figura. A.24. Corrente de fuga da pastilha 26.

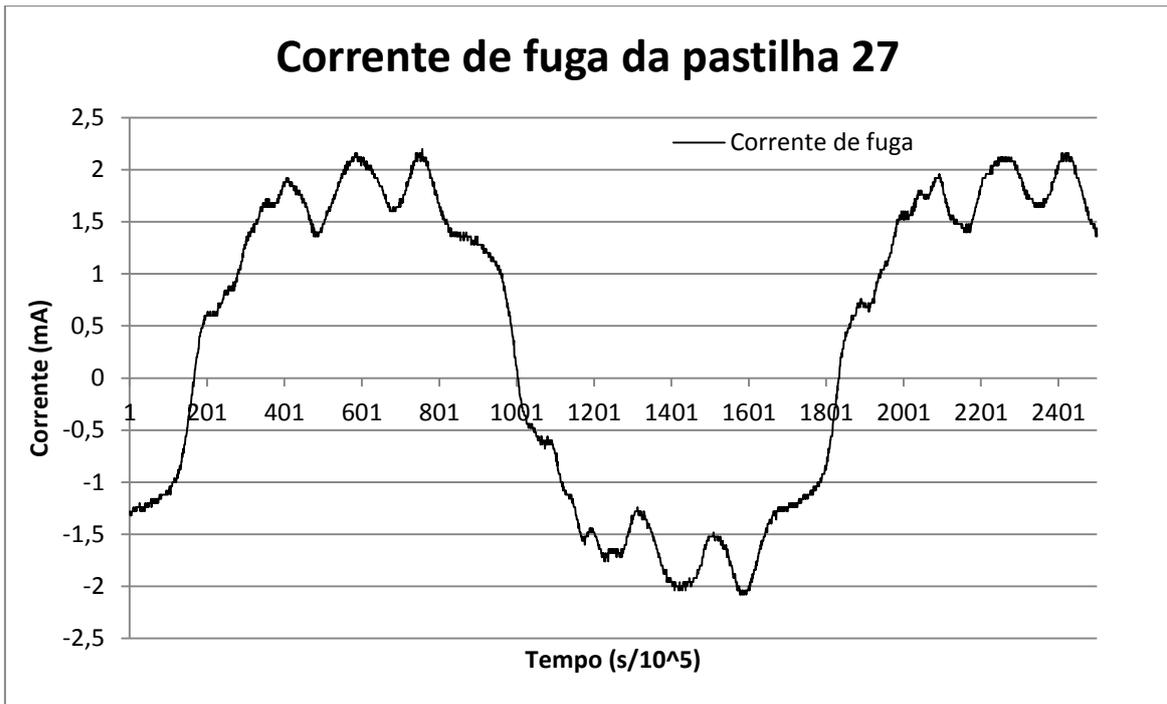


Figura. A.25. Corrente de fuga da pastilha 27.

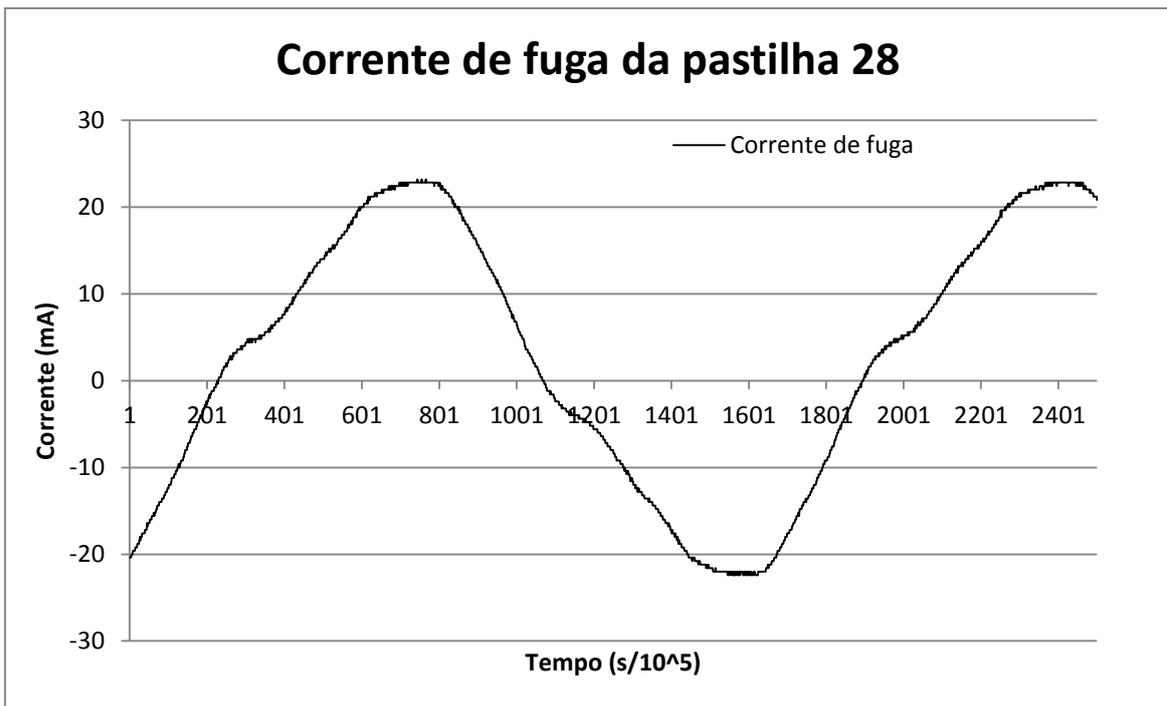


Figura. A.26. Corrente de fuga da pastilha 28.

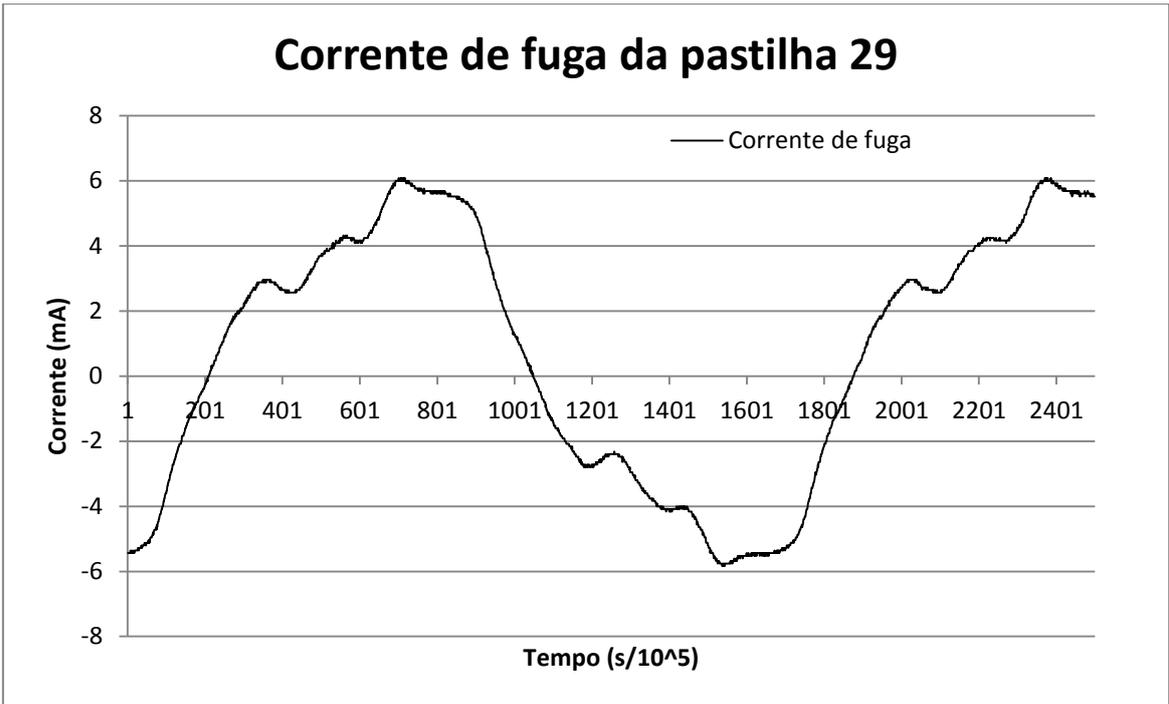


Figura. A.27. Corrente de fuga da pastilha 29.

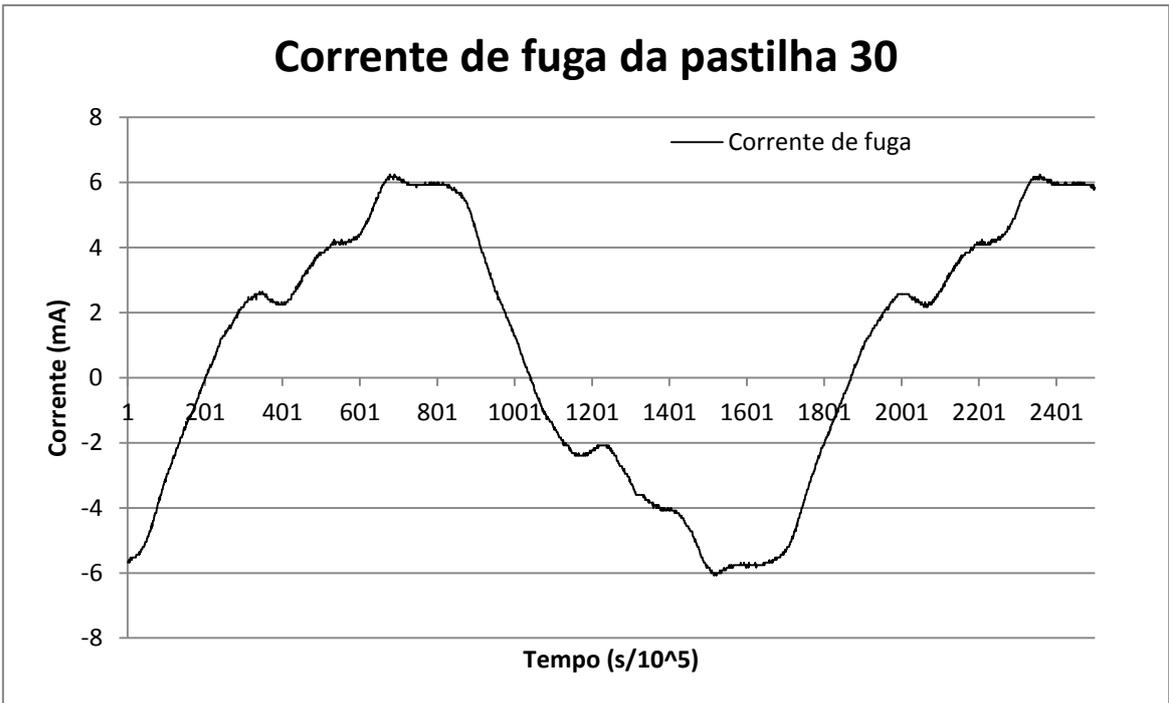


Figura. A.28. Corrente de fuga da pastilha 30.

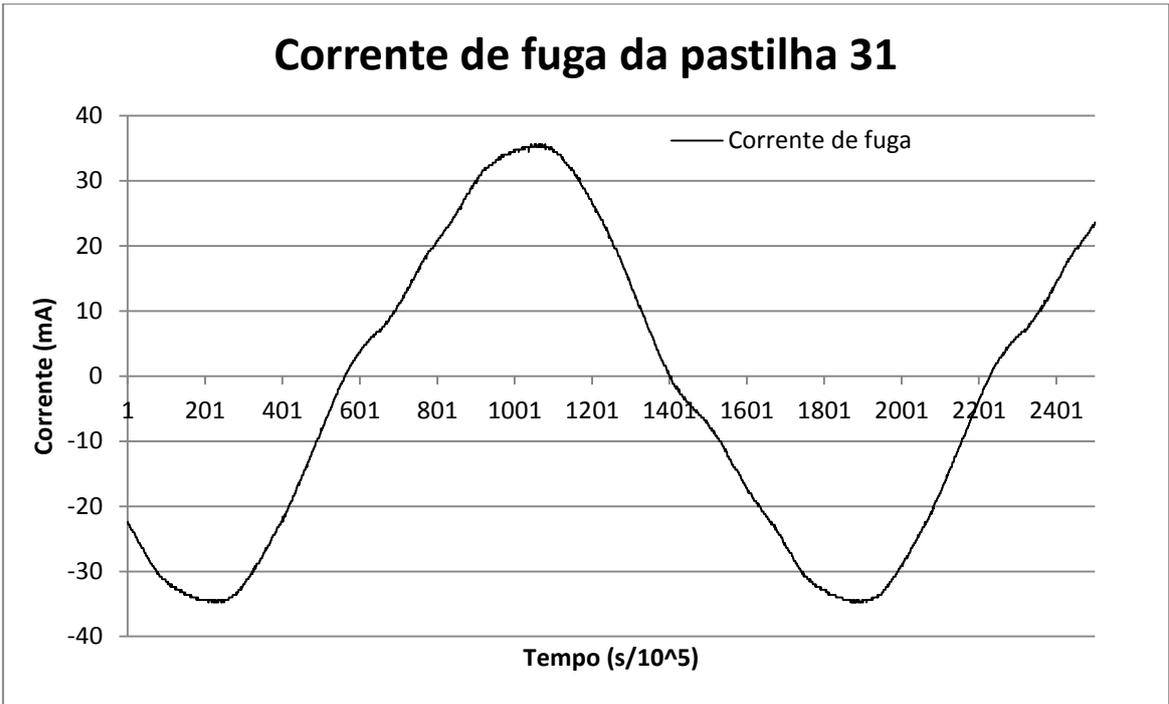


Figura. A.29. Corrente de fuga da pastilha 31.

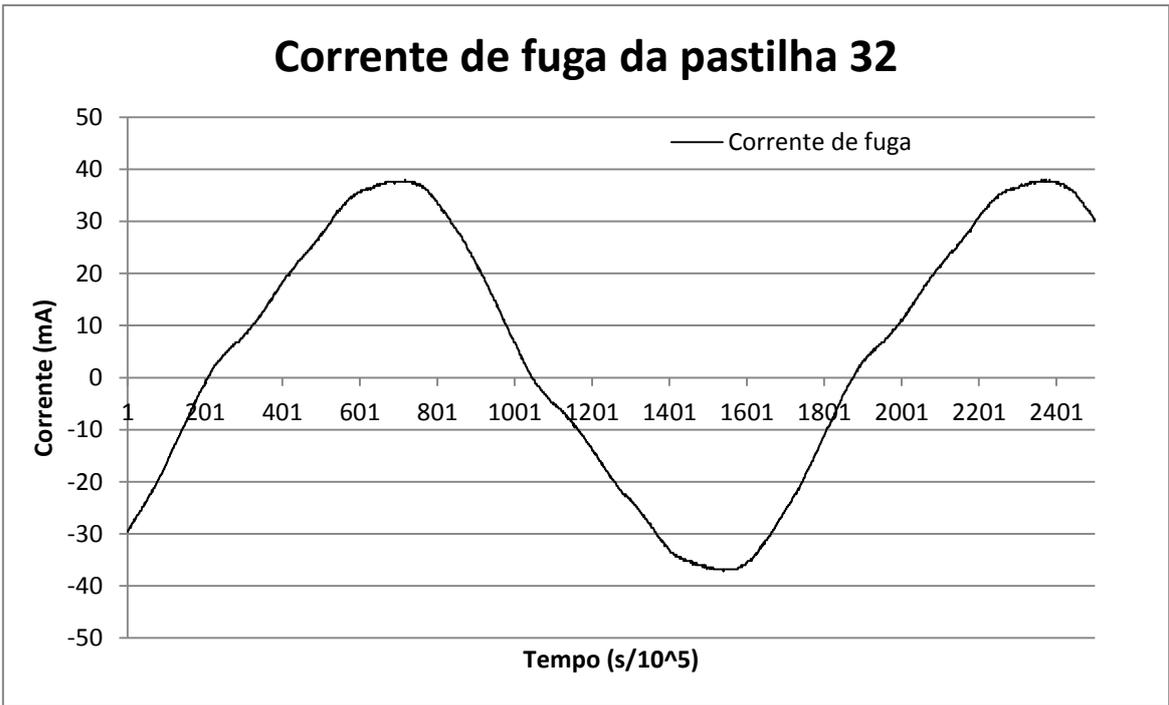


Figura. A.30. Corrente de fuga da pastilha 32.

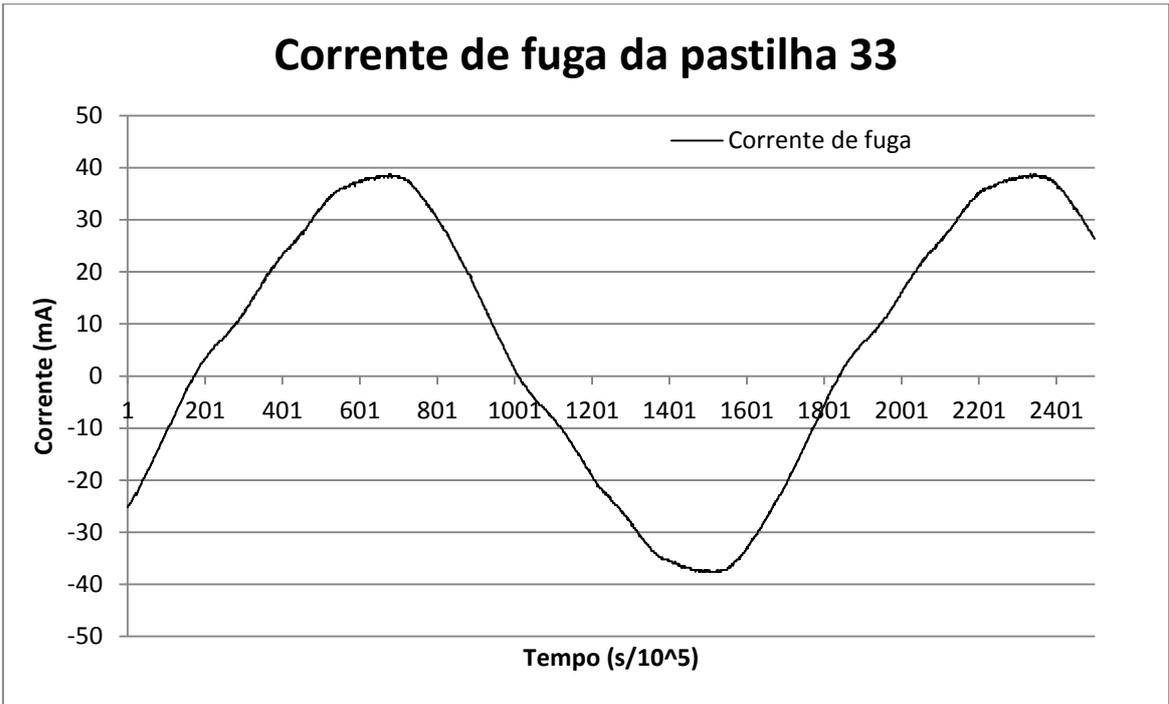


Figura. A.31. Corrente de fuga da pastilha 33.

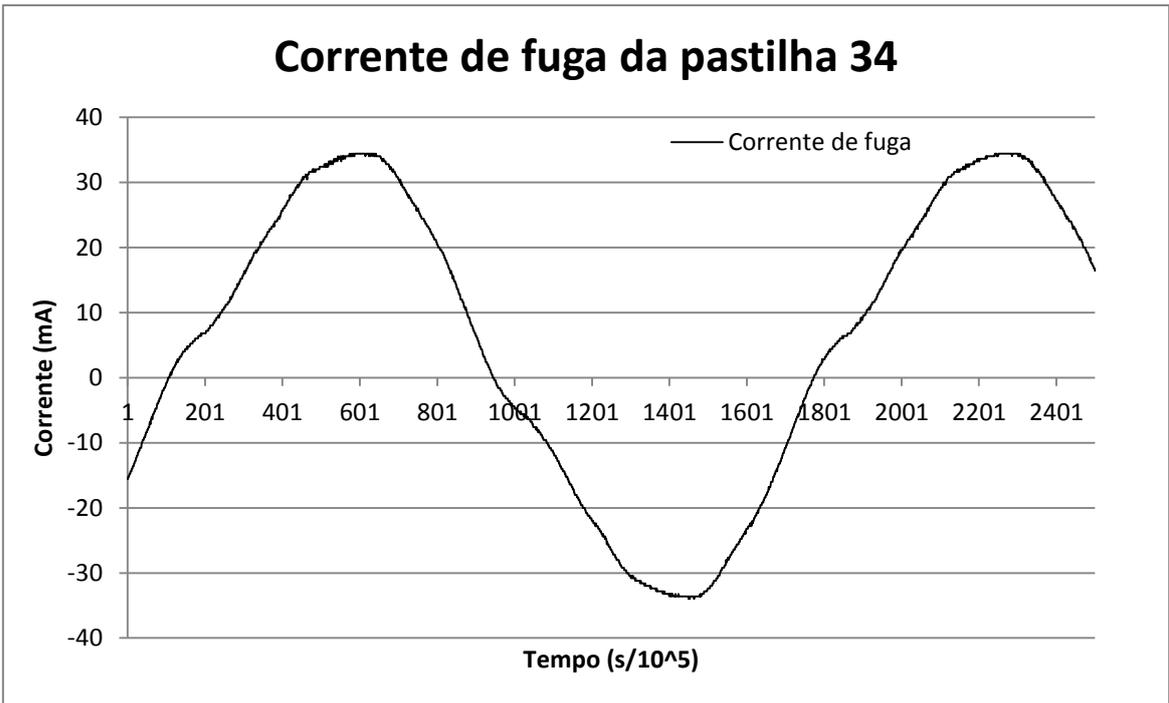


Figura. A.32. Corrente de fuga da pastilha 34.

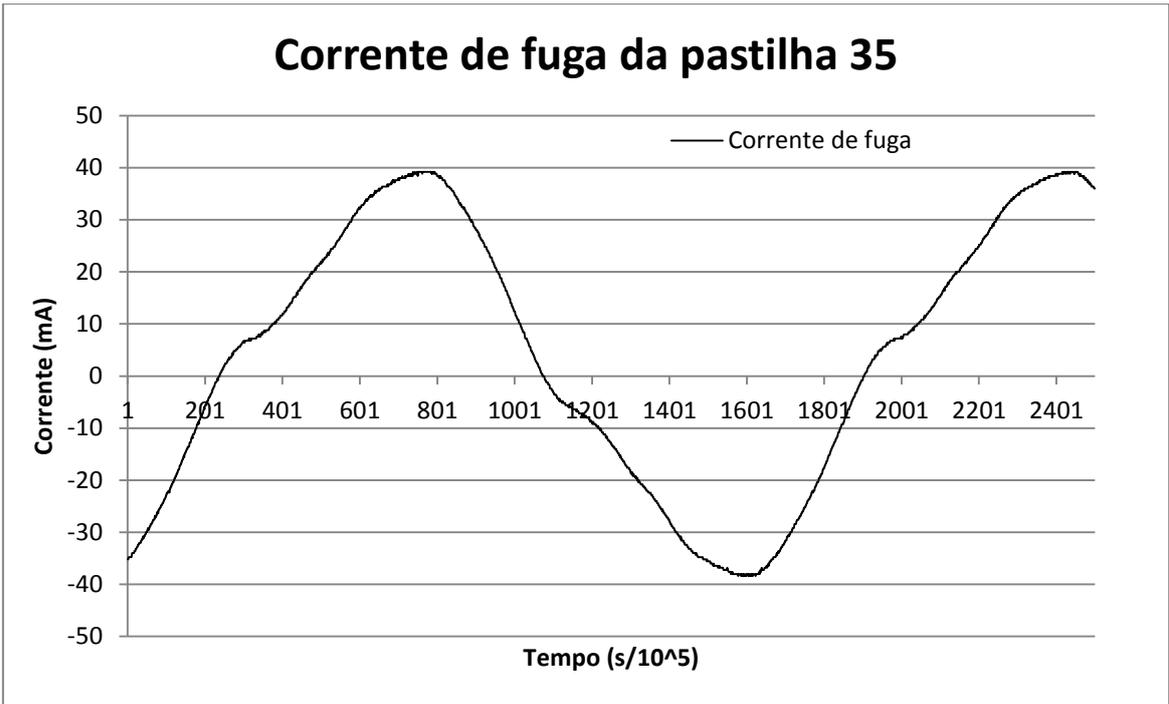


Figura. A.33. Corrente de fuga da pastilha 35.

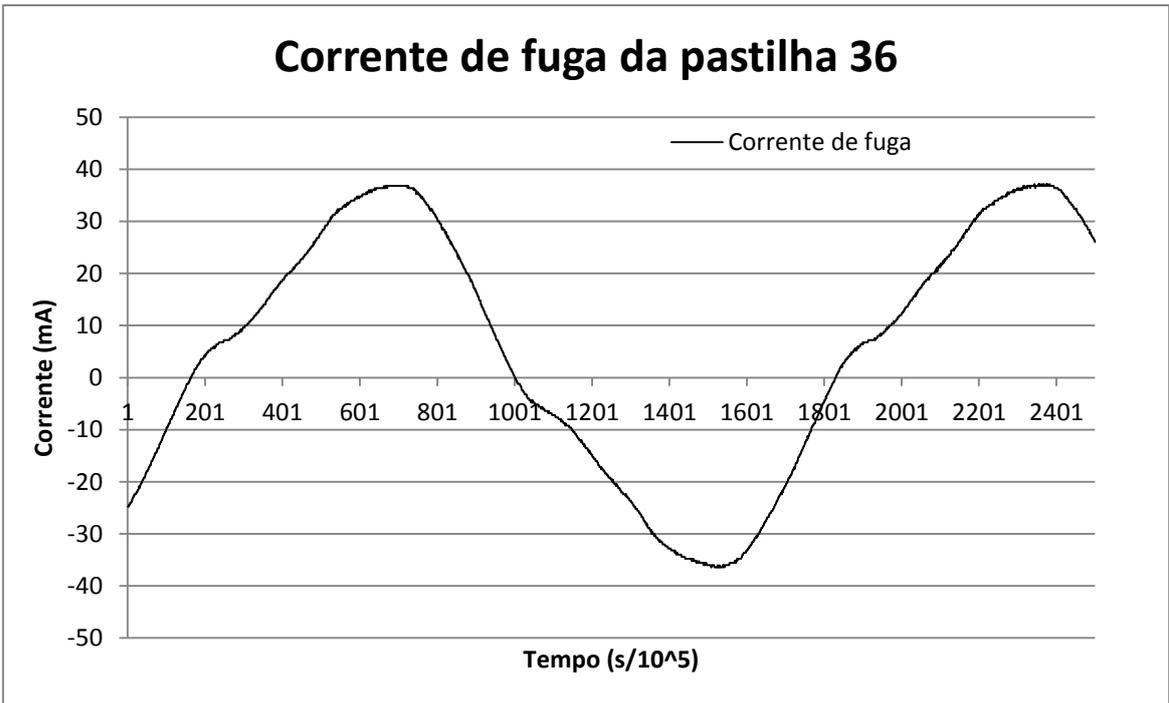


Figura. A.34. Corrente de fuga da pastilha 36.

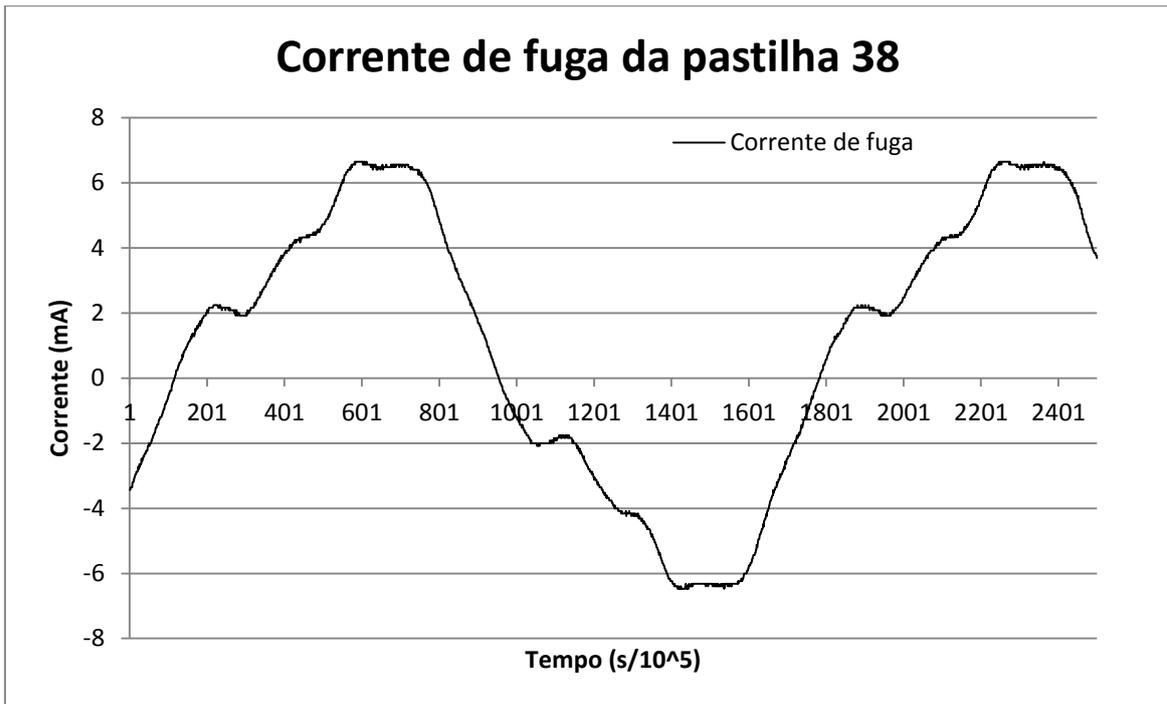


Figura. A.35. Corrente de fuga da pastilha 38.

## Apêndice. B

Neste apêndice são mostrados, da tabela B.1 a tabela B.35, os resultados térmicos das pastilhas de ZnO ensaiadas.

Tabela B.1. Resultado térmico da pastilha 1.

Temperatura								
Pastilha 1								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	32,6	32,6	32,5	32,6	32,6			
180°	32,7	32,6	32,4	32,6		Diff		
Pastilha controle	Temperatura (°C)					7,8		
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,3	24,8	24,8	25,0	24,8			
180°	24,7	24,7	24,6	24,7				

Tabela B.2. Resultado térmico da pastilha 2.

Temperatura								
Pastilha 2								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	43,1	42,9	42,7	42,9	42,7			
180°	42,7	42,4	42,4	42,5			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							17,6
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,0	25,2	25,1	25,1	25,1			
180°	25,0	25,0	25,1	25,0				

Tabela B.3. Resultado térmico da pastilha 3.

Temperatura								
Pastilha 3								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0			
180°	35,1	35,0	35,0	35,0			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							9,3
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,8	25,8	25,7	25,8	25,7			
180°	25,8	25,7	25,6	25,7				

Tabela B.4. Resultado térmico da pastilha 4.

Temperatura								
Pastilha 4								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	32,3	32,4	32,4	32,4	32,4			
180°	32,4	32,4	32,3	32,4			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							6,8
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6			
180°	25,6	25,6	25,6	25,6				

Tabela B.5. Resultado térmico da pastilha 5.

Temperatura								
Pastilha 5								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	37,9	37,9	37,9	37,9	37,9			
180°	37,9	37,8	37,8	37,8			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							12,3
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6			
180°	25,6	25,5	25,6	25,6				

Tabela B.6. Resultado térmico da pastilha 6.

Temperatura								
Pastilha 6								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2			
180°	34,2	34,2	34,2	34,2			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							8,4
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	26,0	26,0	26,0	26,0	25,8			
180°	25,7	25,6	25,6	25,6				

Tabela B.7. Resultado térmico da pastilha 8.

Temperatura								
Pastilha 8								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0			
180°	29,1	29,0	28,8	29,0			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							4,5
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	24,7	24,6	24,6	24,6	24,5			
180°	24,3	24,3	24,3	24,3				

Tabela B.8. Resultado térmico da pastilha 9.

Temperatura								
Pastilha 9								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	34,8	34,9	34,8	34,8	34,8			
180°	34,9	34,8	34,7	34,8			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							9,1
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,7	25,7	25,8	25,7	25,7			
180°	25,7	25,7	25,6	25,7				

Tabela B.9. Resultado térmico da pastilha 10.

Temperatura								
Pastilha 10								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	50,9	50,9	50,8	50,9	50,9			
180°	51,0	51,1	50,9	51,0			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							24,5
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	26,6	26,6	26,7	26,6	26,5			
180°	26,3	26,4	26,3	26,3				

Tabela B.10. Resultado térmico da pastilha 11.

Temperatura								
Pastilha 11								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	50,8	51,0	50,3	50,7	50,5			
180°	50,5	50,4	50,0	50,3			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							24,4
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	26,1	26,2	26,2	26,2	26,1			
180°	26,0	26,1	26,0	26,0				

Tabela B.11. Resultado térmico da pastilha 12.

Temperatura								
Pastilha 12								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	41,6	41,3	41,2	41,4	41,4			
180°	41,6	41,6	41,3	41,5			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							16,4
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,1	25,1	25,0	25,1	25,0			
180°	25,0	25,0	25,0	25,0				

Tabela B.12. Resultado térmico da pastilha 13.

Temperatura								
Pastilha 13								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	54,5	55,2	54,7	54,8	55,3			
180°	56,6	55,6	55,0	55,7			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							29,2
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	26,2	26,2	26,3	26,2	26,1			
180°	26,0	26,0	25,9	26,0				

Tabela B.13. Resultado térmico da pastilha 14.

Temperatura								
Pastilha 14								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	43,1	42,9	42,8	42,9	43,0			
180°	43,3	43,0	42,9	43,1			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							16,7
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	26,3	26,2	26,3	26,3	26,3			
180°	26,3	26,3	26,2	26,3				

Tabela B.14. Resultado térmico da pastilha 15.

Temperatura								
Pastilha 15								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	79,0	78,8	78,9	78,9	78,7			
180°	78,8	78,6	77,8	78,4			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							53,3
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,6	25,5	25,4	25,5	25,4			
180°	25,3	25,2	25,3	25,3				

Tabela B.15. Resultado térmico da pastilha 16.

Temperatura								
Pastilha 16								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	47,0	46,8	46,4	46,7	46,8			
180°	47,3	46,9	46,6	46,9			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							20,9
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	26,1	26,0	25,9	26,0	25,9			
180°	25,9	25,8	25,8	25,8				

Tabela B.16. Resultado térmico da pastilha 18.

Temperatura								
Pastilha 18								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	56,8	56,7	55,8	56,4	56,7			
180°	57,5	57,3	56,0	56,9			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							32,4
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3			
180°	24,4	24,4	24,3	24,4				

Tabela B.17. Resultado térmico da pastilha 19.

Temperatura								
Pastilha 19								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	76,6	76,3	76,1	76,3	75,5			
180°	74,7	74,8	74,7	74,7			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							50,1
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,8	25,8	25,7	25,8	25,5			
180°	25,2	25,2	25,1	25,2				

Tabela B.18. Resultado térmico da pastilha 20.

Temperatura								
Pastilha 20								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	39,4	39,6	39,7	39,6	39,6			
180°	39,7	39,7	39,7	39,7			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							12,7
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0			
180°	27,0	26,9	26,8	26,9				

Tabela B.19. Resultado térmico da pastilha 21.

Temperatura								
Pastilha 21								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	30,2	30,2	30,3	30,2	30,3			
180°	30,3	30,2	30,3	30,3			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							4,2
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1			
180°	26,0	26,1	26,0	26,0				

Tabela B.20. Resultado térmico da pastilha 22.

Temperatura								
Pastilha 22								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	31,2	31,3	31,4	31,3	31,3			
180°	31,3	31,3	31,3	31,3			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							4,9
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	26,5	26,5	26,5	26,5	26,4			
180°	26,4	26,4	26,3	26,4				

Tabela B.21. Resultado térmico da pastilha 23.

Temperatura								
Pastilha 23								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	50,8	50,9	50,8	50,8	50,5			
180°	50,1	50,2	50,1	50,1			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							25,2
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3			
180°	25,4	25,3	25,3	25,3				

Tabela B.22. Resultado térmico da pastilha 24.

Temperatura								
Pastilha 24								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	39,4	39,4	39,3	39,4	39,4			
180°	39,4	39,3	39,3	39,3			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							14,4
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,0	25,0	24,9	25,0	25,0			
180°	25,0	24,9	24,9	24,9				

Tabela B.23. Resultado térmico da pastilha 25.

Temperatura								
Pastilha 25								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	43,8	43,7	43,5	43,7	43,7			
180°	44,0	43,7	43,4	43,7			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							18,9
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8			
180°	24,8	24,9	24,8	24,8				

Tabela B.24. Resultado térmico da pastilha 26.

Pastilha 26								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	40,6	40,7	40,8	40,7	40,9			
180°	41,0	41,0	41,0	41,0			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							15,3
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6			
180°	25,6	25,6	25,6	25,6				

Tabela B.25. Resultado térmico da pastilha 27.

Temperatura								
Pastilha 27								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2			
180°	34,2	34,2	34,2	34,2			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							9,9
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3			
180°	24,3	24,3	24,3	24,3				

Tabela B.26. Resultado térmico da pastilha 28.

Temperatura								
Pastilha 28								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	130,0	128,6	125,8	128,1	127,0			
180°	127,9	125,7	124,2	125,9			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							102,6
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4			
180°	24,4	24,4	24,4	24,4				

Tabela B.27. Resultado térmico da pastilha 29.

Temperatura								
Pastilha 29								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	55,8	55,7	55,7	55,7	55,6			
180°	55,5	55,6	55,4	55,5			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							31,3
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	24,3	24,3	24,4	24,3	24,3			
180°	24,3	24,3	24,3	24,3				

Tabela B.28. Resultado térmico da pastilha 30.

Temperatura								
Pastilha 30								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	58,7	58,6	58,6	58,63333	59			
180°	59,3	59,4	59,4	59,36667			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							35,65
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	23,5	23,4	23,4	23,43333	23,35			
180°	23,3	23,3	23,2	23,26667				

Tabela B.29. Resultado térmico da pastilha 31.

Temperatura								
Pastilha 31								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	141,8	141,7	141,4	141,6	138,9			
180°	136,4	136,2	136,1	136,2			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							115,2
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	23,7	23,8	23,8	23,8	23,8			
180°	23,8	23,7	23,7	23,7				

Tabela B.30. Resultado térmico da pastilha 32.

Temperatura					
Pastilha 32					
Posição	Temperatura (°C)				
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2
0°	172,0	172,0	172,0	172,0	173,2
180°	174,4	174,4	174,4	174,4	Diff
Pastilha controle	Temperatura (°C)				
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2
0°	24,0	23,8	24,0	23,9	23,9
180°	23,8	23,9	23,7	23,8	

Tabela B.31. Resultado térmico da pastilha 33.

Temperatura					
Pastilha 32					
Posição	Temperatura (°C)				
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2
0°	156,5	156,6	156,6	156,6	157,5
180°	158,4	158,4	158,3	158,4	Diff
Pastilha controle	Temperatura (°C)				
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2
0°	25,3	25,3	25,1	25,2	25,2
180°	25,1	25,1	25,0	25,1	

Tabela B.32. Resultado térmico da pastilha 34.

Temperatura								
Pastilha 34								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	190,7	190,2	190,0	190,3	187,6			
180°	185,2	184,5	184,9	184,9		Diff		
Pastilha controle	Temperatura (°C)							162,9
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	24,8	24,8	24,7	24,8	24,7			
180°	24,7	24,6	24,6	24,6				

Tabela B.33. Resultado térmico da pastilha 35

Temperatura								
Pastilha 35								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	213,0	212,0	211,0	212,0	199,2			
180°	186,4	186,3	186,4	186,4		Diff		
Pastilha controle	Temperatura (°C)							174,7
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	24,5	24,6	24,6	24,6	24,5			
180°	24,5	24,3	24,3	24,4				

Tabela B.34. Resultado térmico da pastilha 36

Temperatura								
Pastilha 36								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	196,8	196,7	195,8	196,4	188,7			
180°	182,0	181,1	180,0	181,0			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							164,9
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	23,9	23,9	23,9	23,9	23,8			
180°	23,8	23,8	23,7	23,8				

Tabela B.35. Resultado térmico da pastilha 38.

Temperatura								
Pastilha 38								
Posição	Temperatura (°C)							
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média 2			
0°	56,5	56,4	56,4	56,4	57,4			
180°	58,9	58,2	58,2	58,4			Diff	
Pastilha controle	Temperatura (°C)							34,6
Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média2			
0°	22,9	22,8	22,8	22,8	22,8			
180°	22,8	22,8	22,8	22,8				

## Apêndice. C

Neste apêndice são mostrados, da Figura. C.1 a Figura. C.35, as curvas “tensão-corrente” das pastilhas de ZnO ensaiadas.

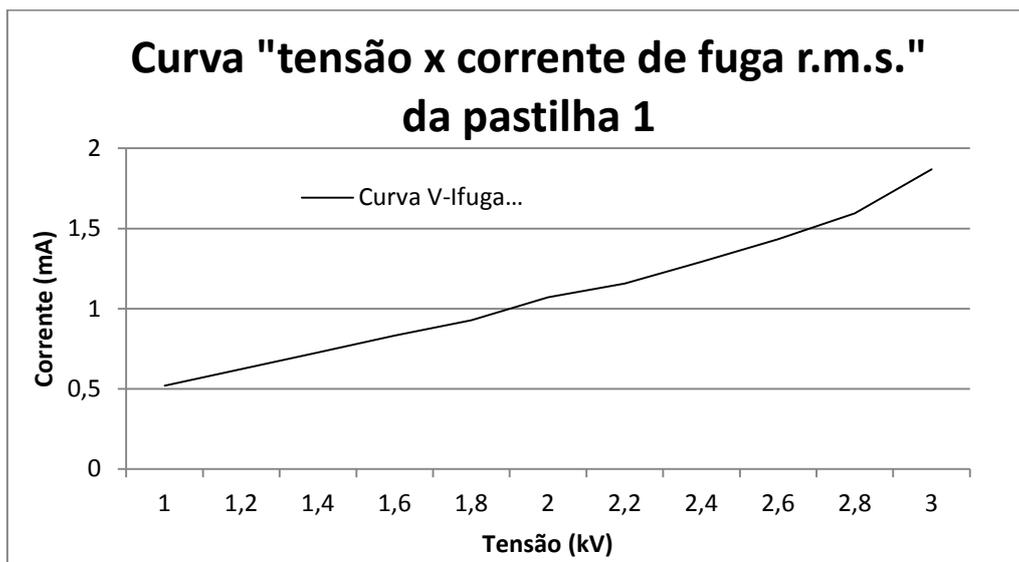


Figura. C.1. Curva “tensão-corrente” das pastilha 1.

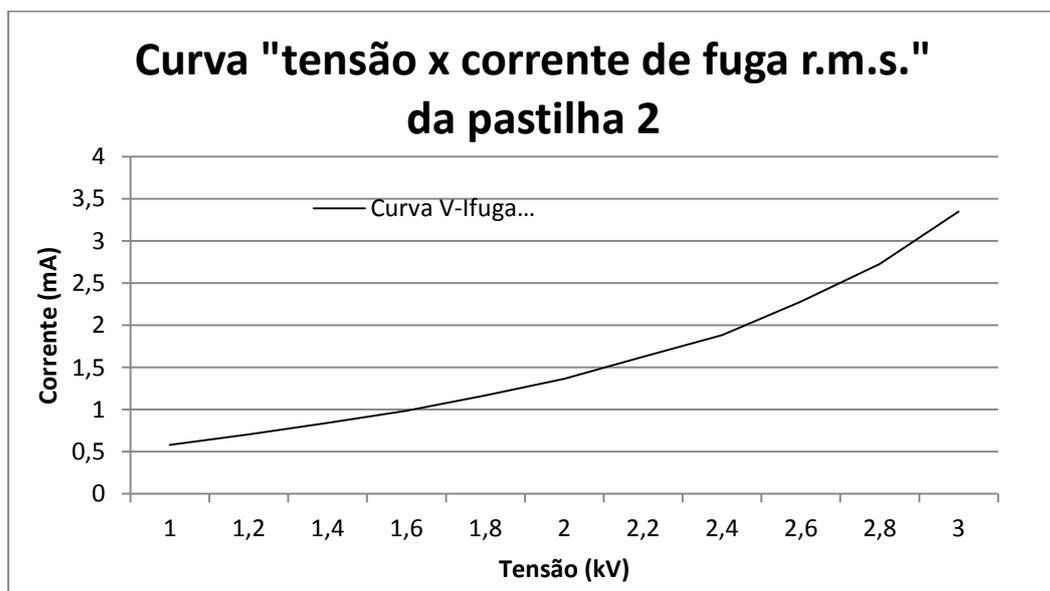


Figura. C.2. Curva “tensão-corrente” das pastilha 2.

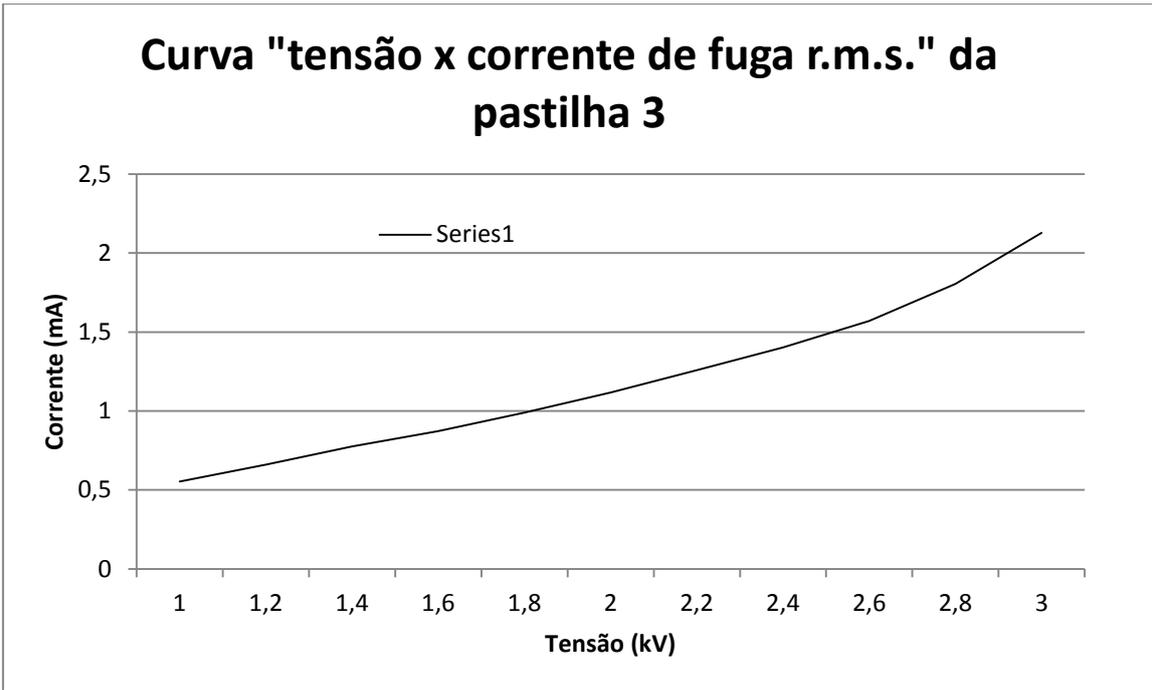


Figura. C.3. Curva “tensão-corrente” das pastilha 3.

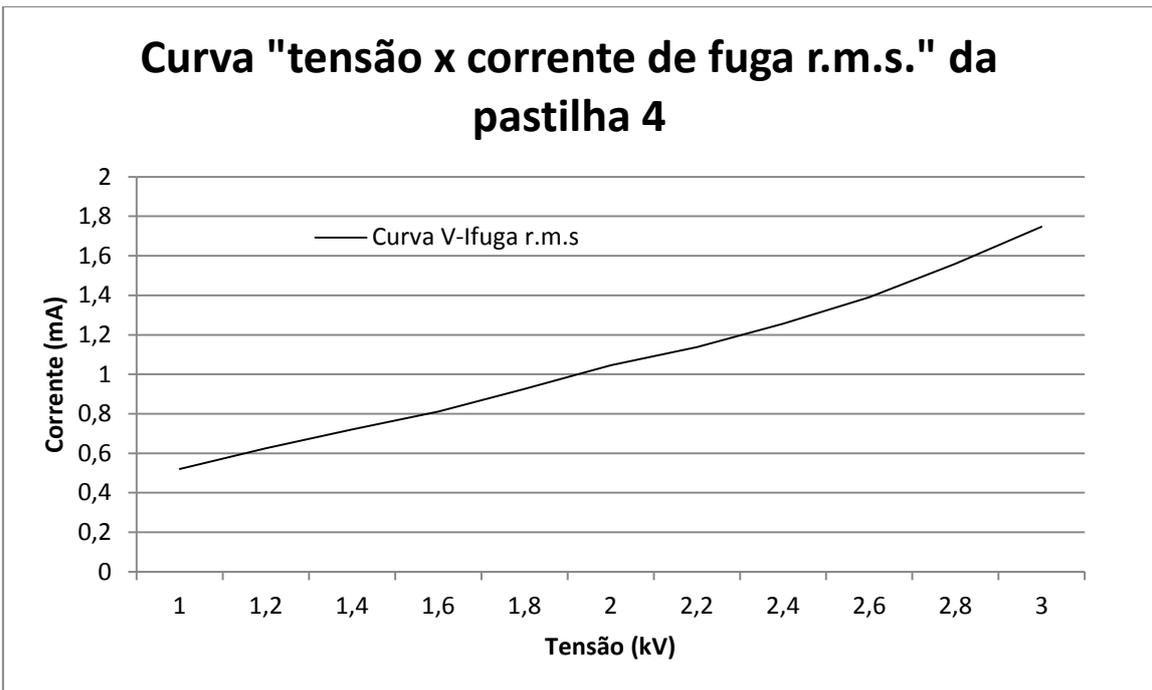


Figura. C.4. Curva “tensão-corrente” das pastilha 4.

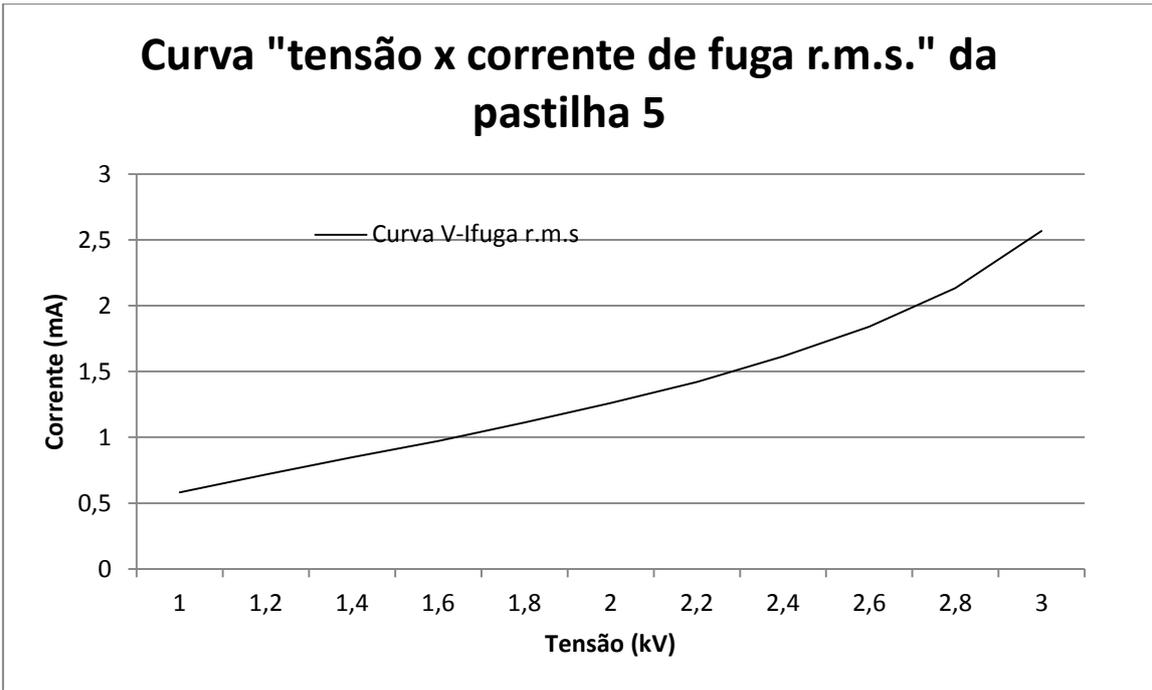


Figura. C.5. Curva "tensão-corrente" das pastilha 5.

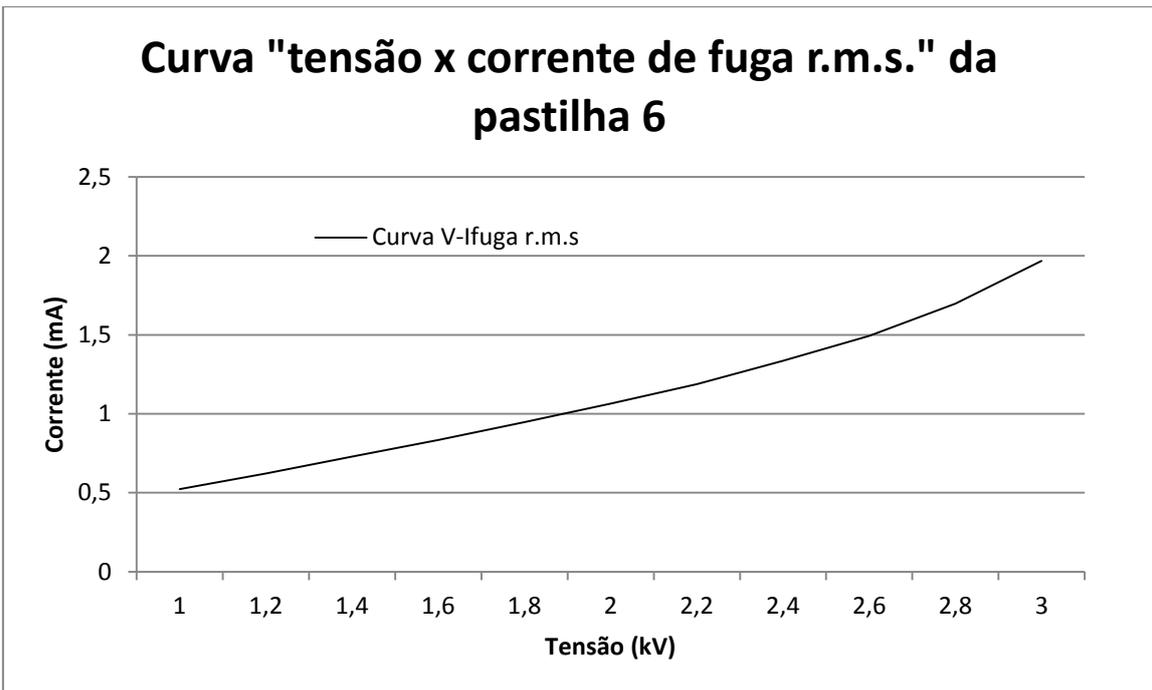


Figura. C.6. Curva "tensão-corrente" das pastilha 6.

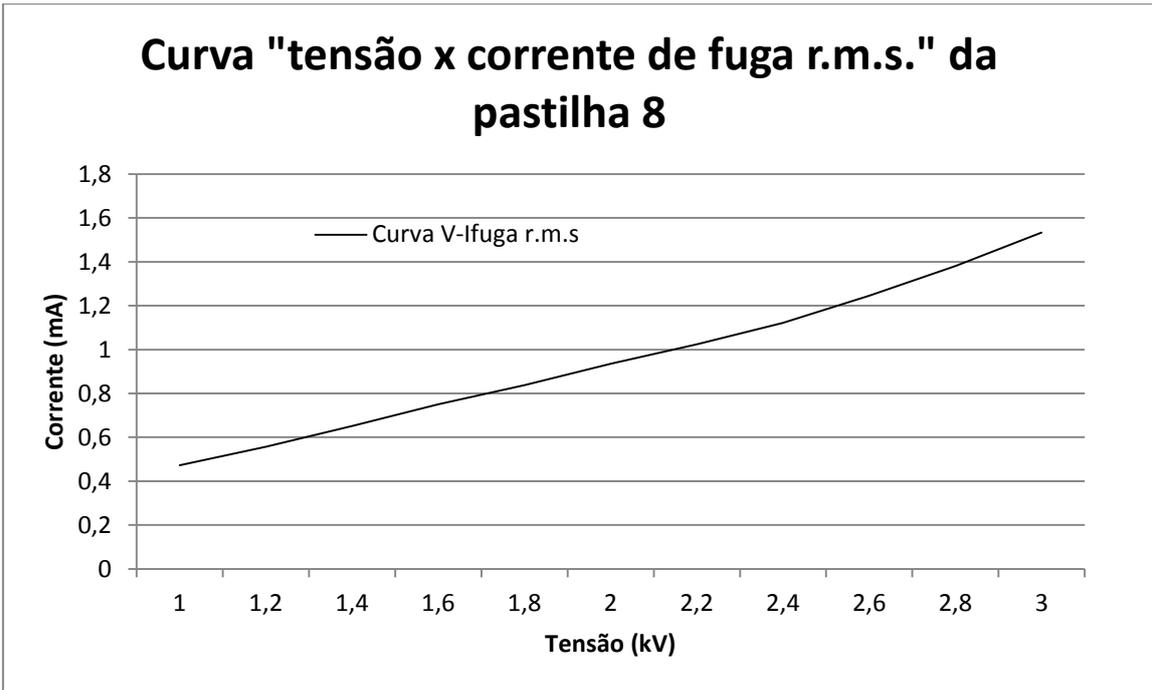


Figura. C.7. Curva “tensão-corrente” das pastilha 8.

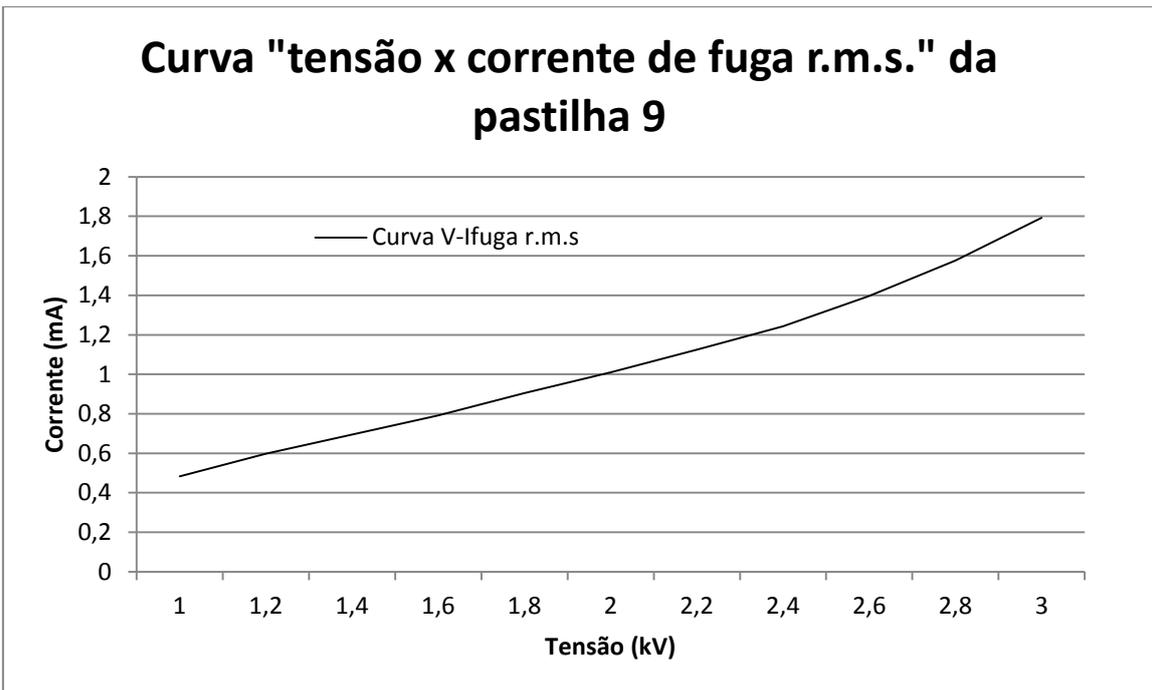


Figura. C.8. Curva “tensão-corrente” das pastilha 9.

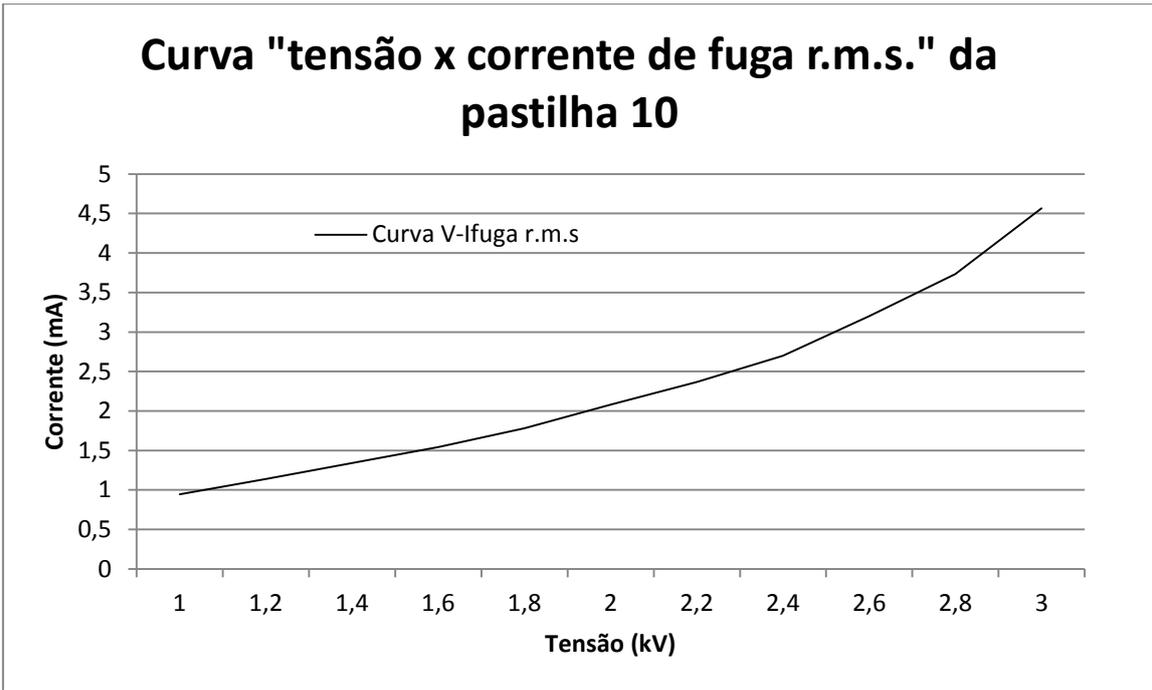


Figura. C.9. Curva “tensão-corrente” das pastilha 10.

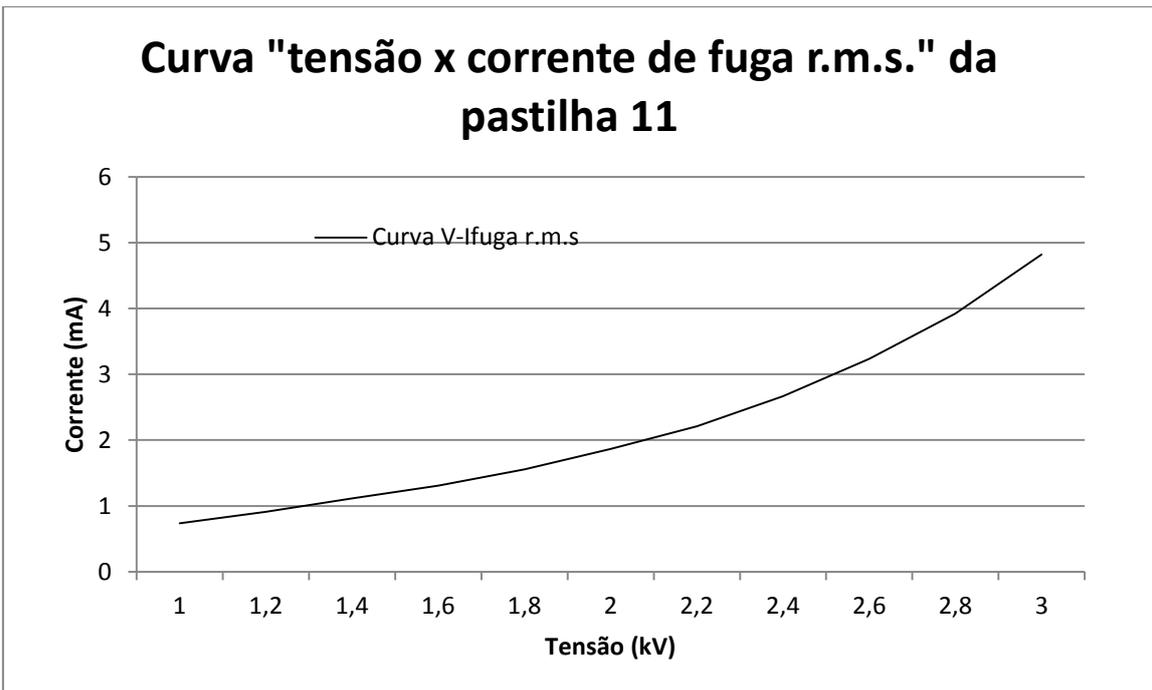


Figura. C.10. Curva “tensão-corrente” das pastilha 11.

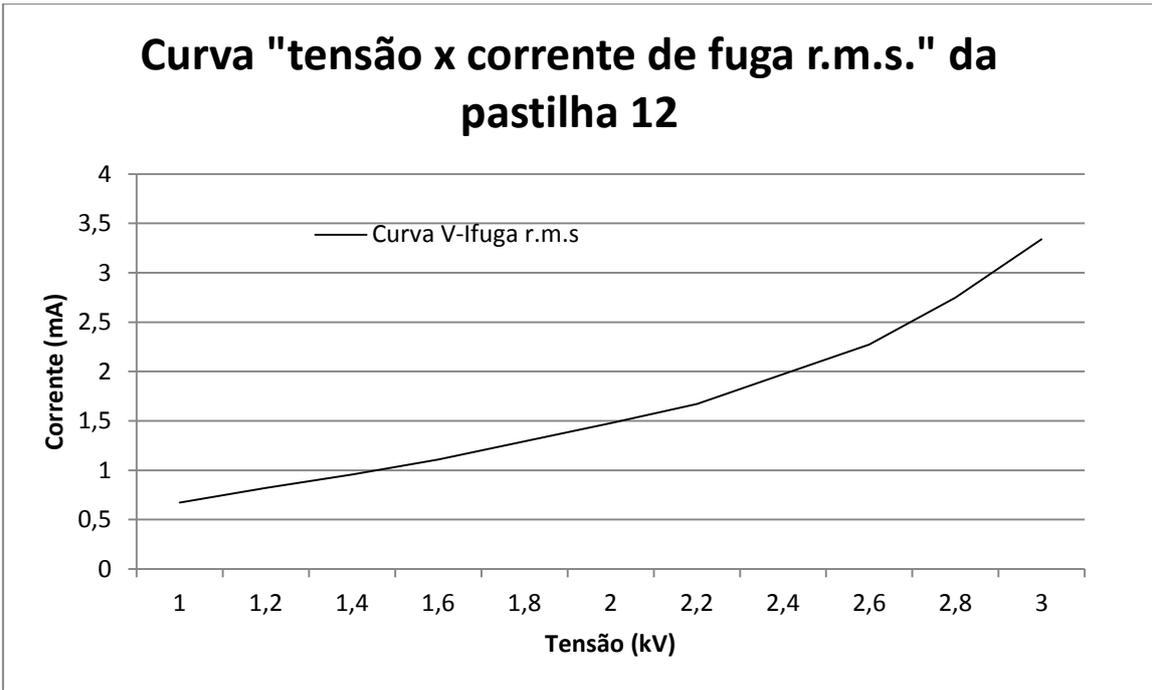


Figura. C.11. Curva "tensão-corrente" das pastilha 12.

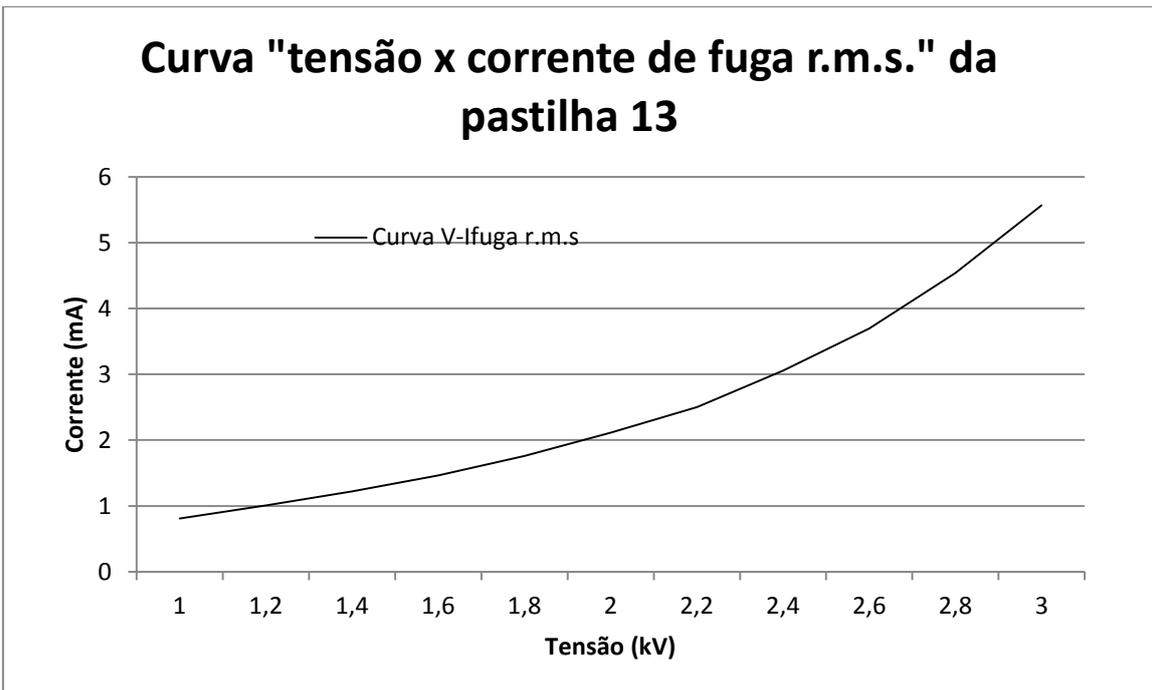


Figura. C.12. Curva "tensão-corrente" das pastilha 13.

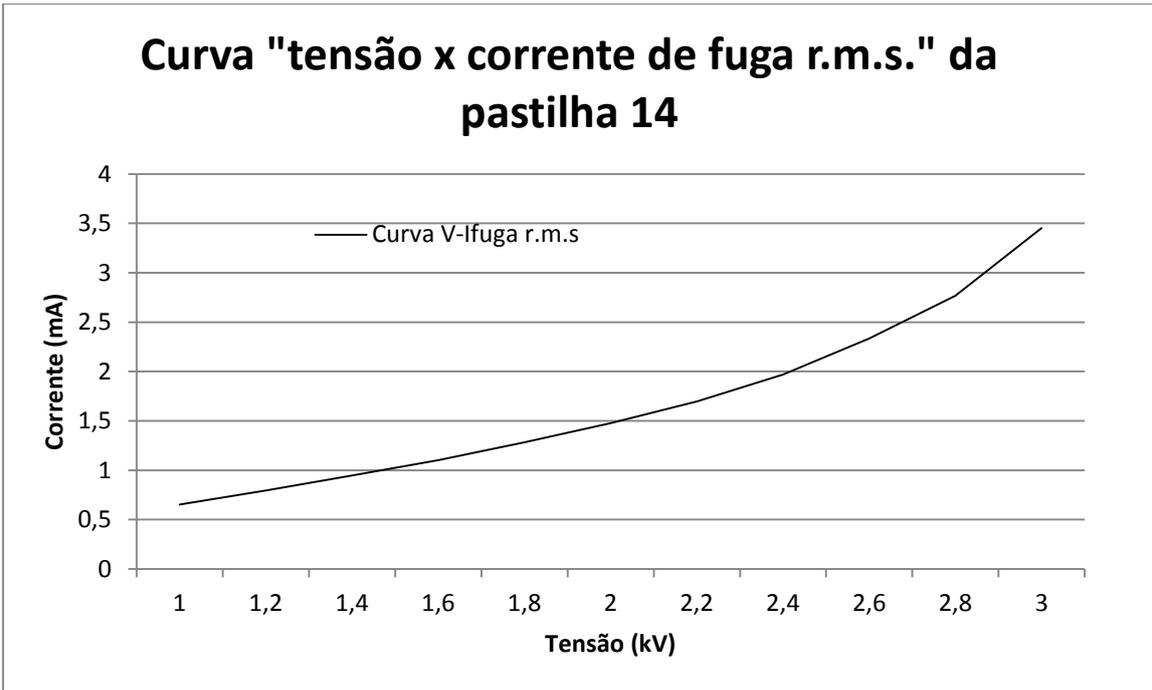


Figura. C.13. Curva “tensão-corrente” das pastilha 14.

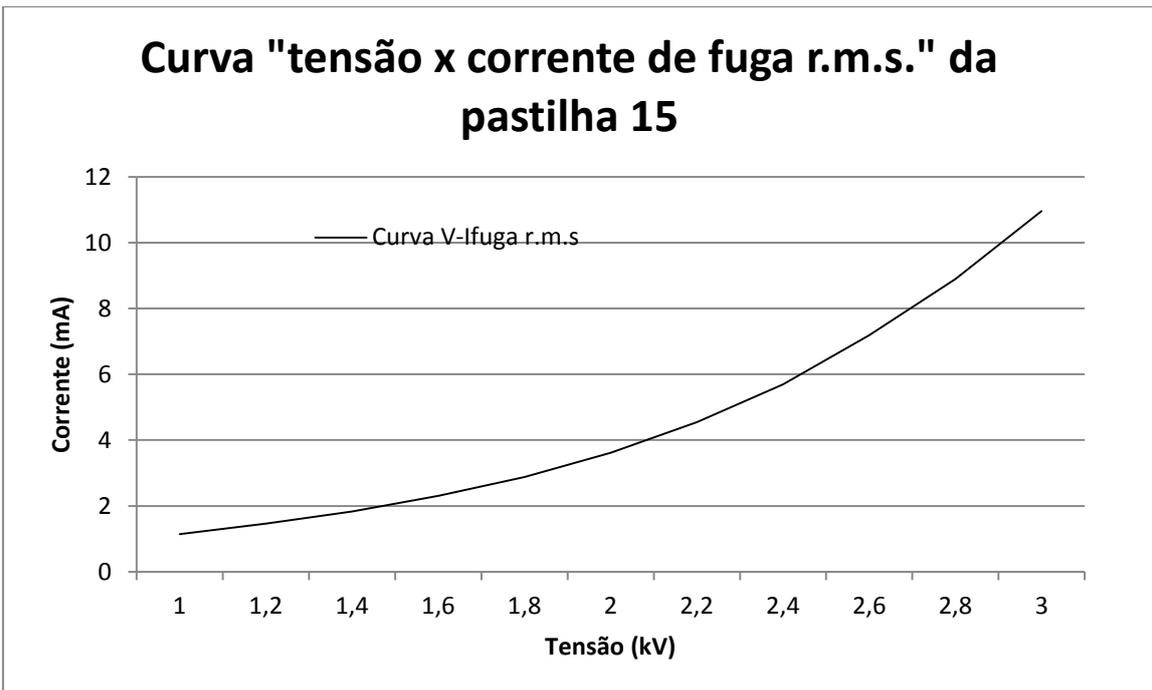


Figura. C.14. Curva “tensão-corrente” das pastilha 15.

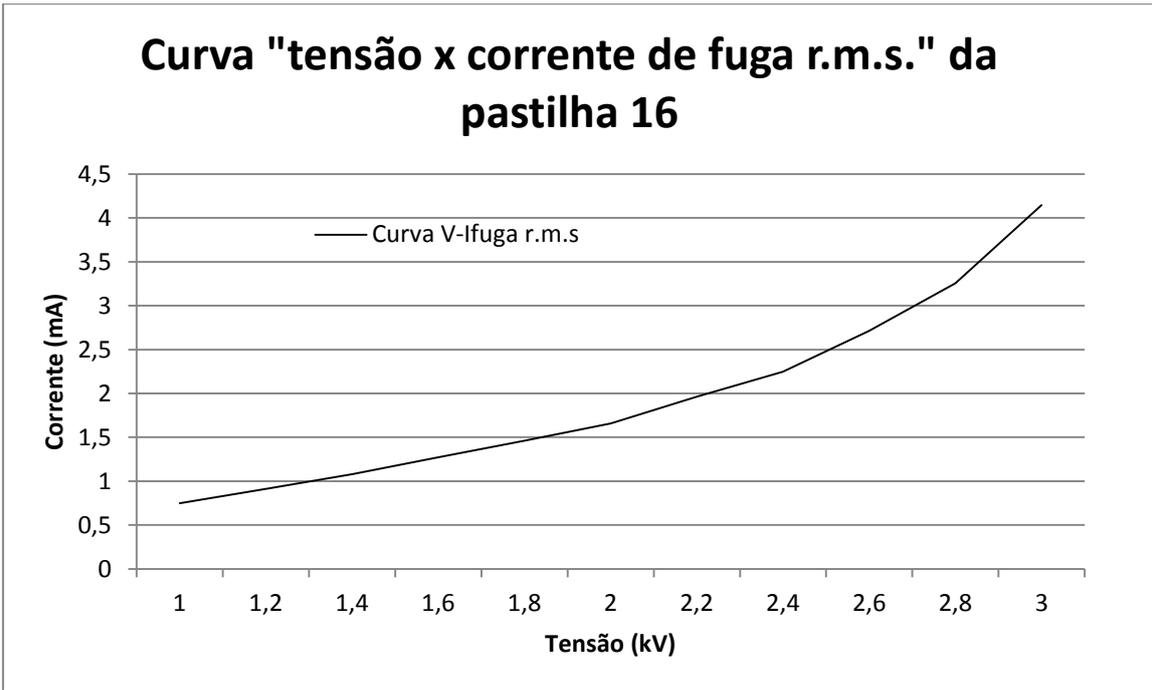


Figura. C.15. Curva "tensão-corrente" das pastilha 16.

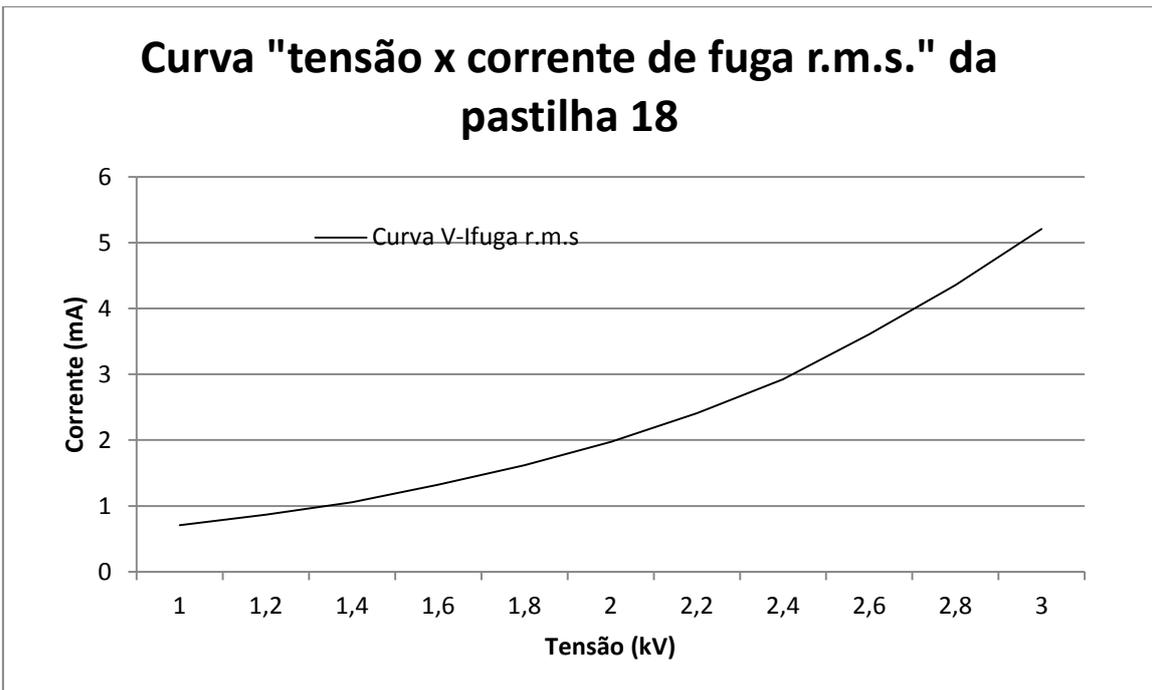


Figura. C.16. Curva "tensão-corrente" das pastilha 18.

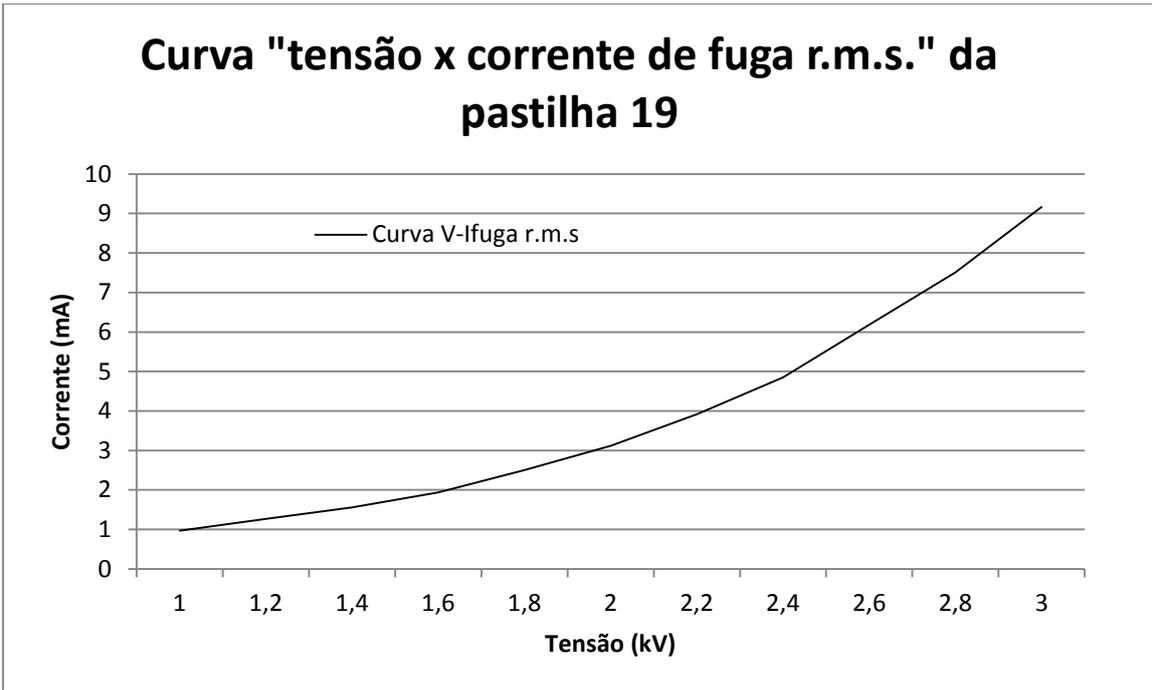


Figura. C.17. Curva “tensão-corrente” das pastilha 19.

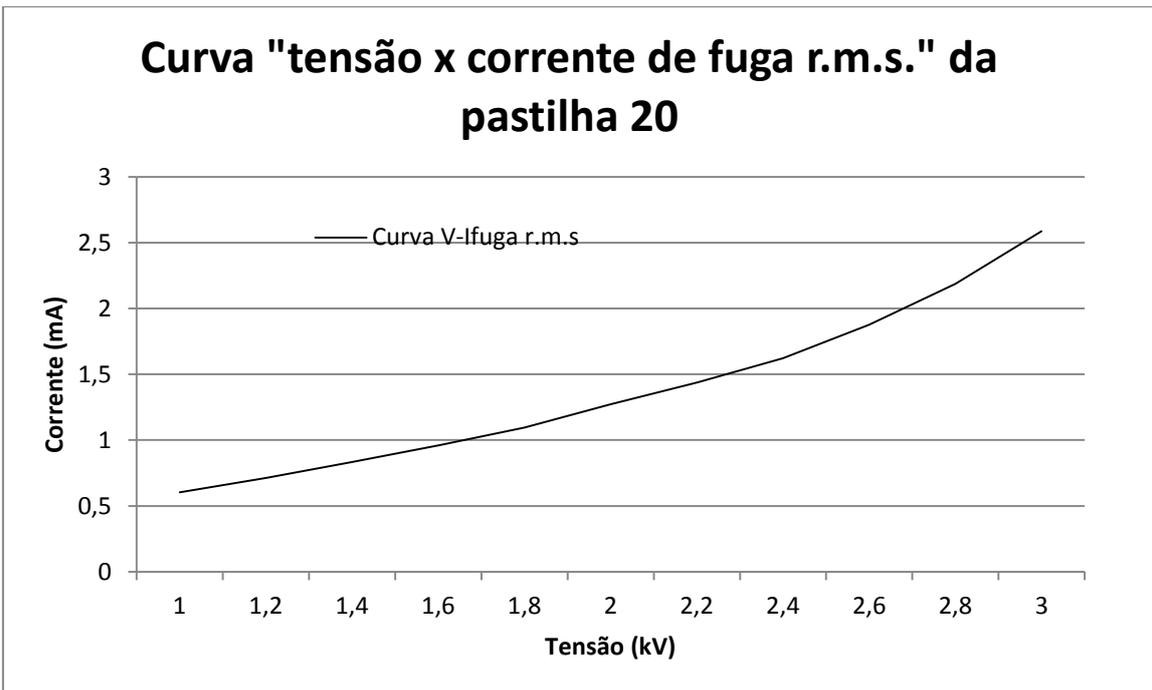


Figura. C.18. Curva “tensão-corrente” das pastilha 20.

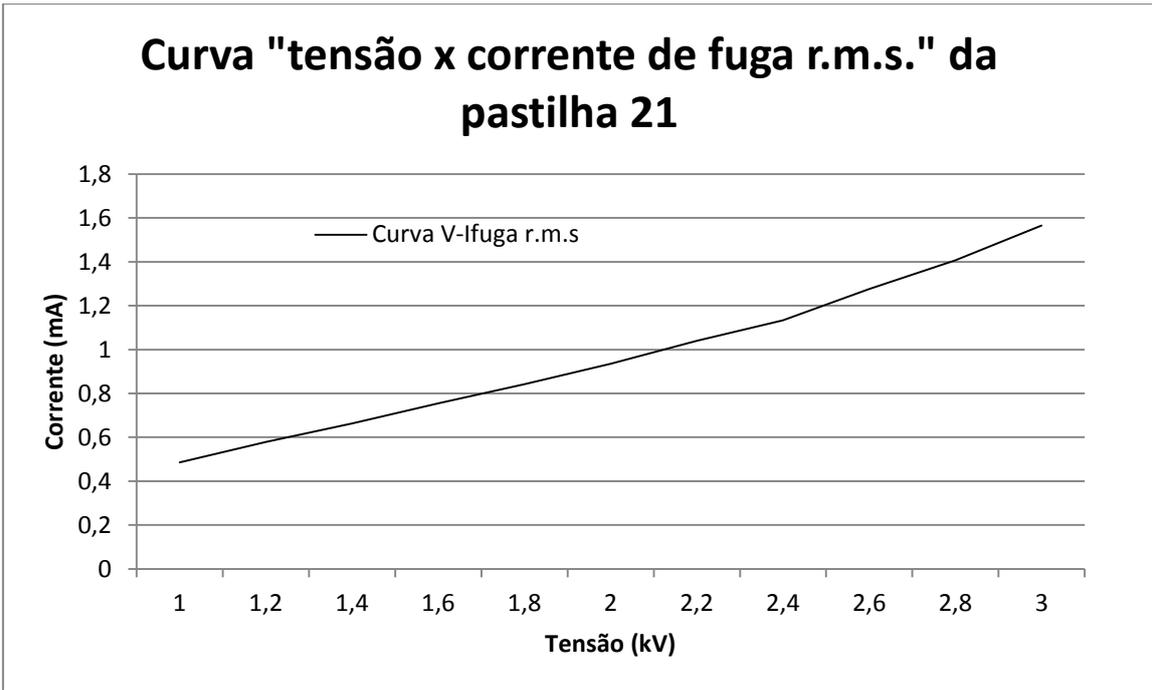


Figura. C.19. Curva “tensão-corrente” das pastilha 21.

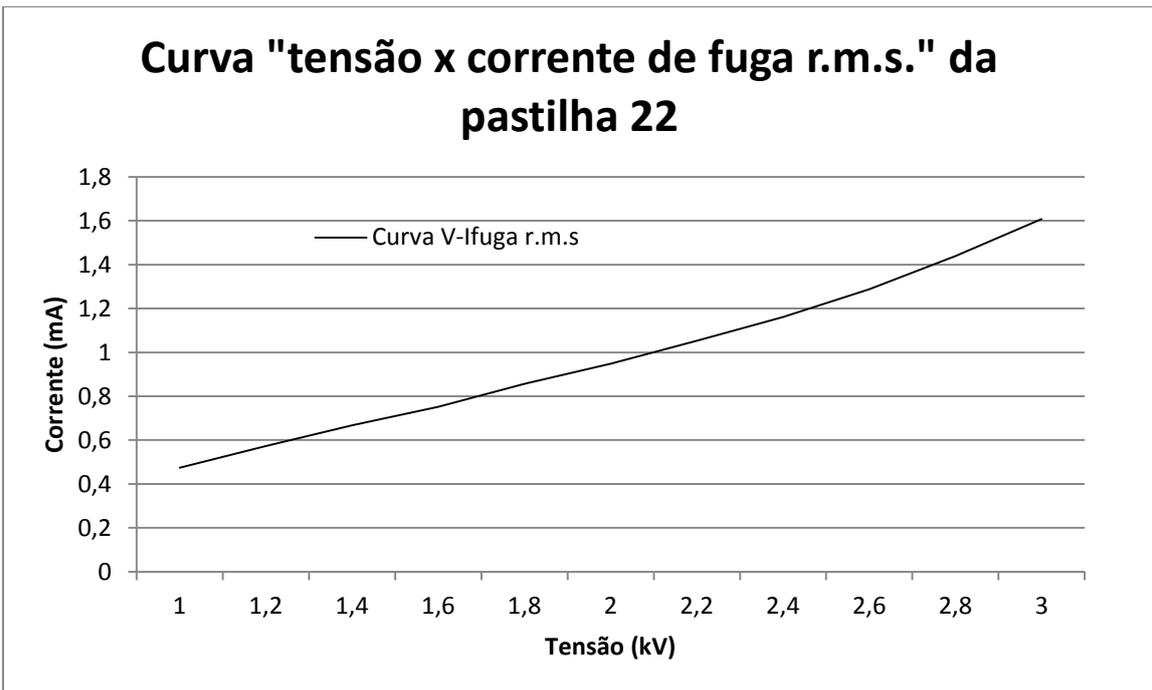


Figura. C.20. Curva “tensão-corrente” das pastilha 22.

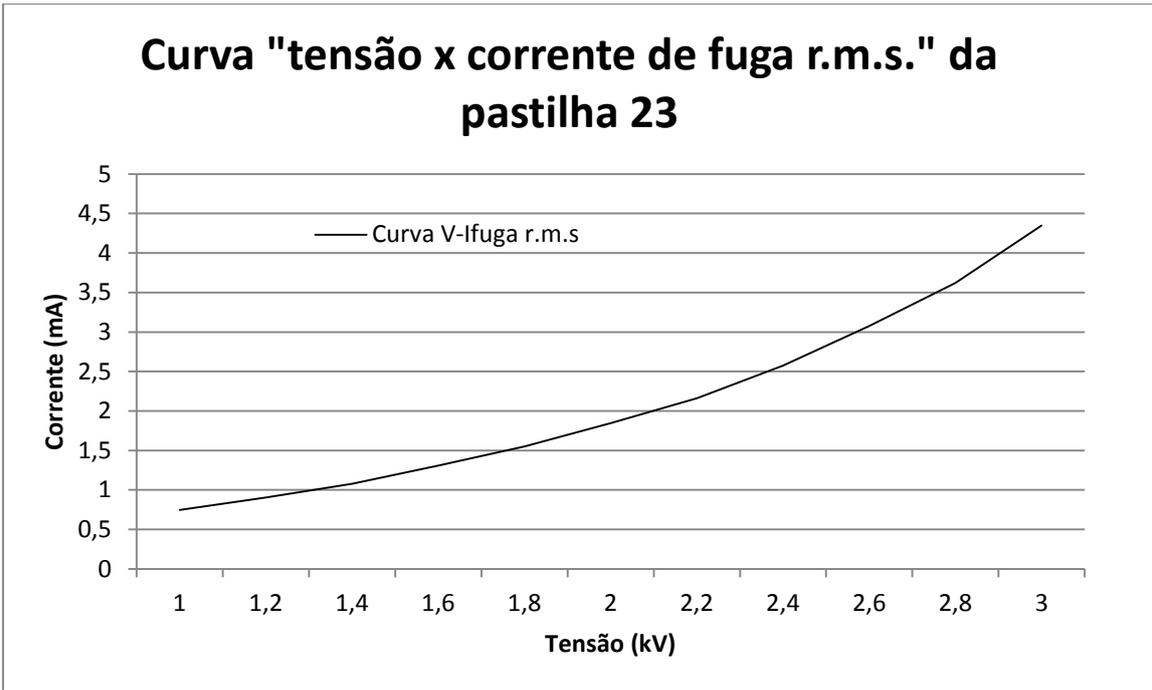


Figura. C.21. Curva "tensão-corrente" das pastilha 23.

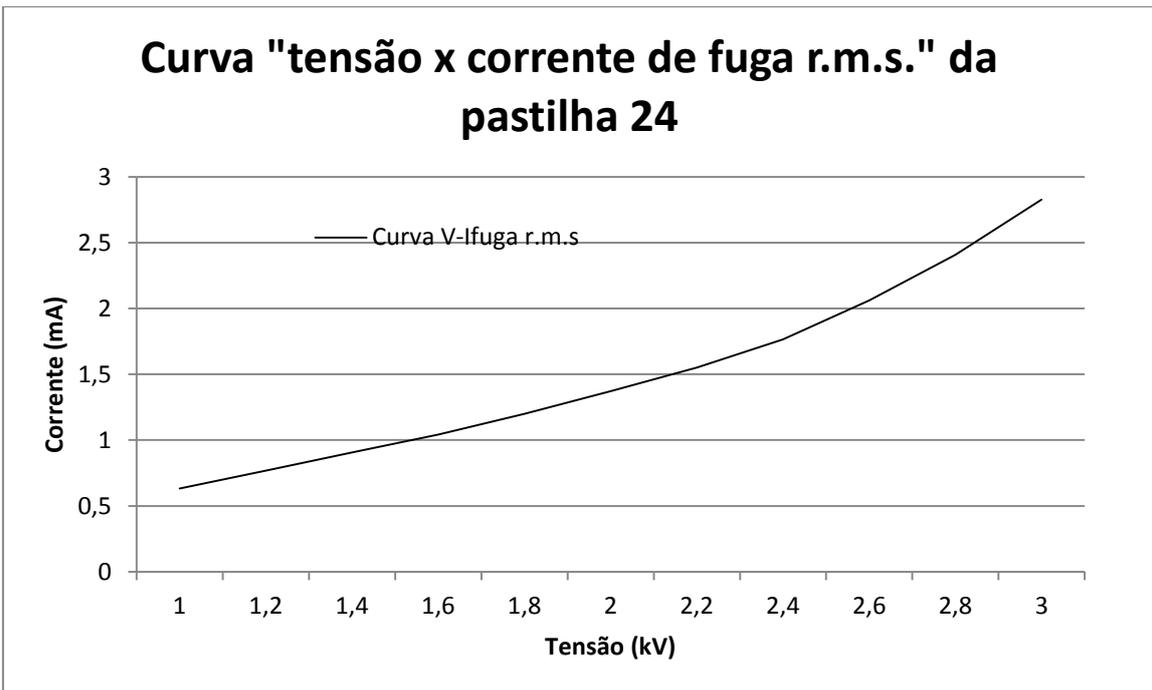


Figura. C.22. Curva "tensão-corrente" das pastilha 24.

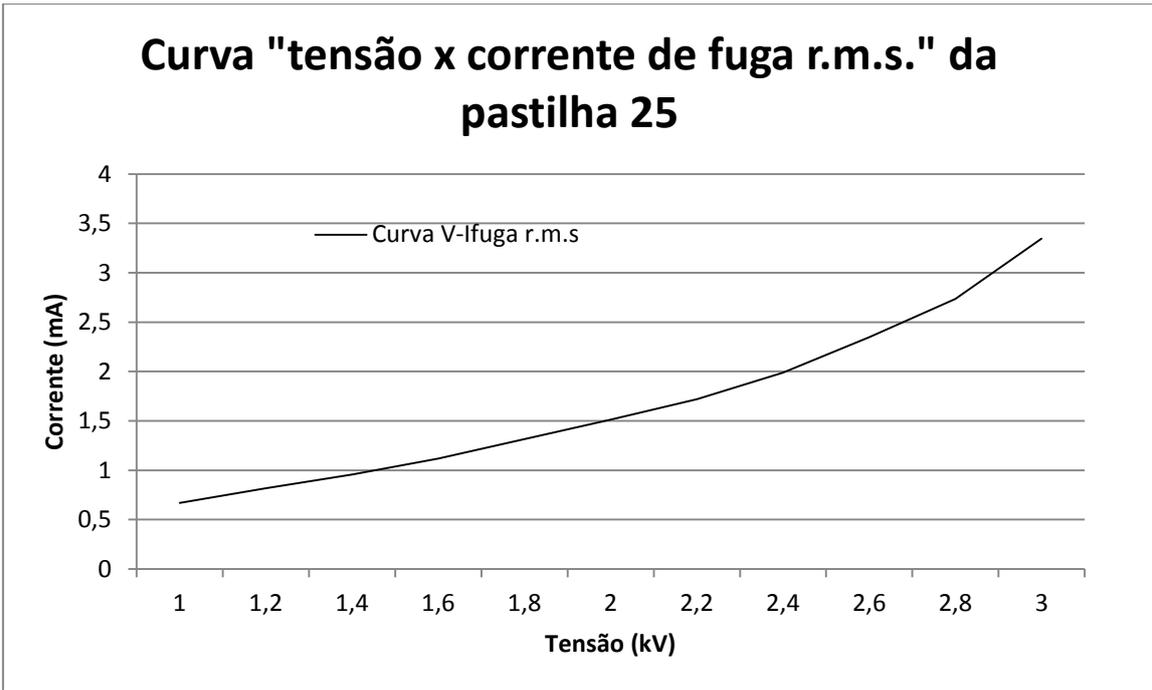


Figura. C.23. Curva “tensão-corrente” das pastilha 25.

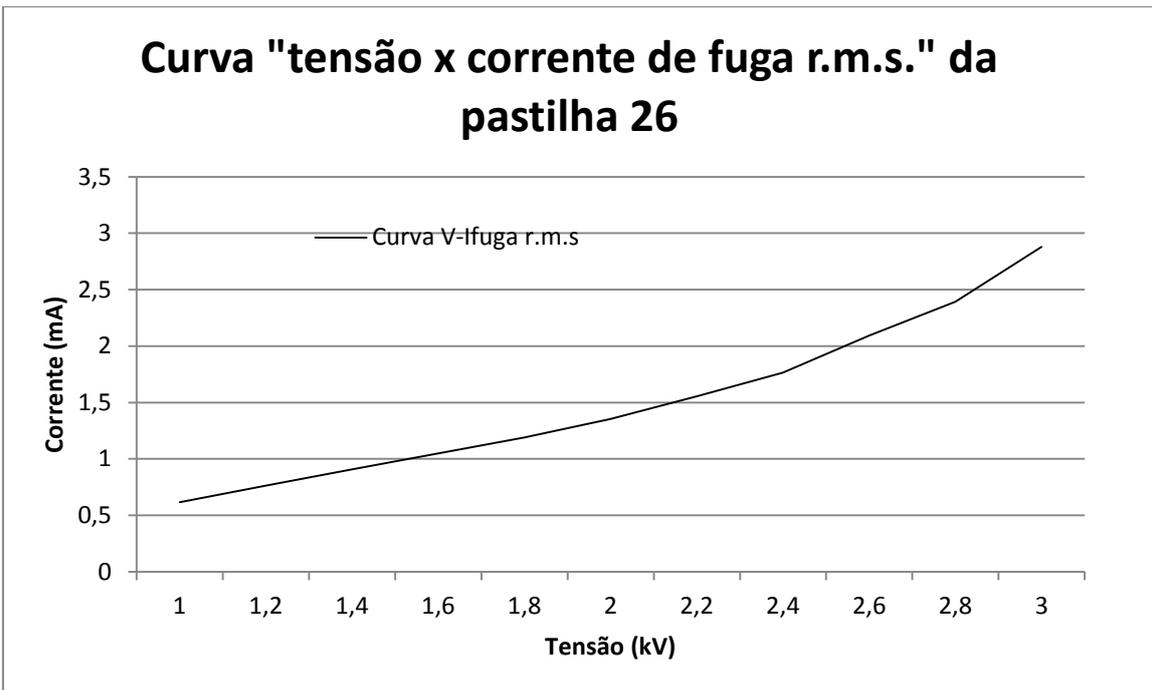


Figura. C.24. Curva “tensão-corrente” das pastilha 26.

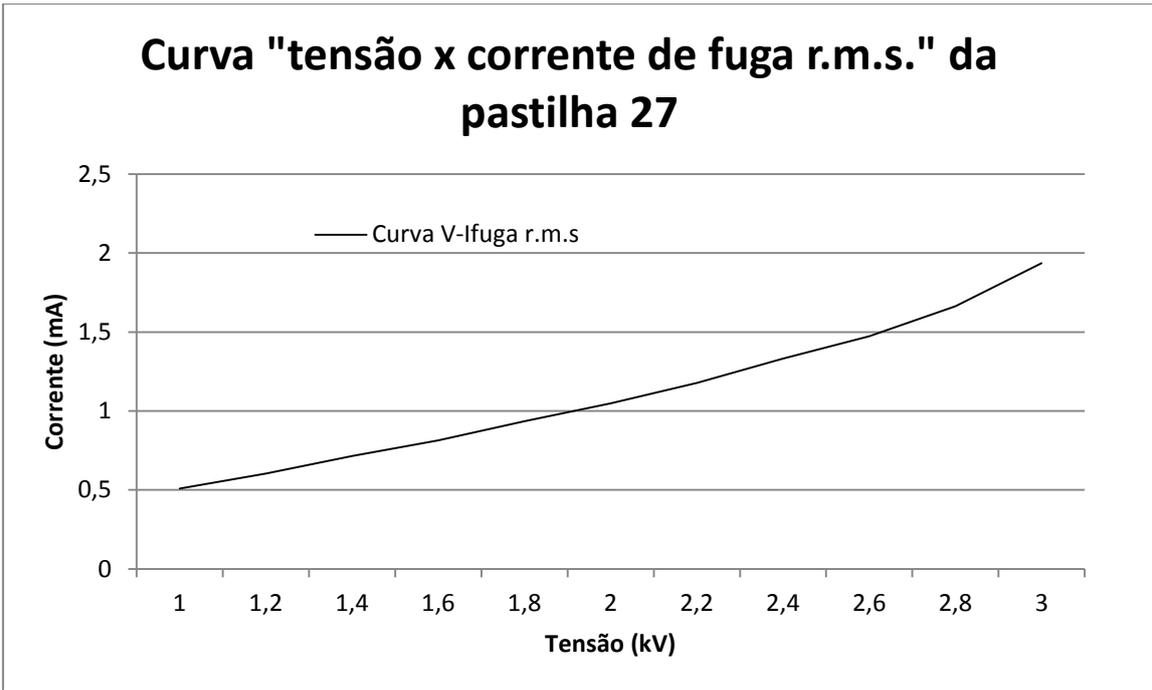


Figura. C.25. Curva “tensão-corrente” das pastilha 27.

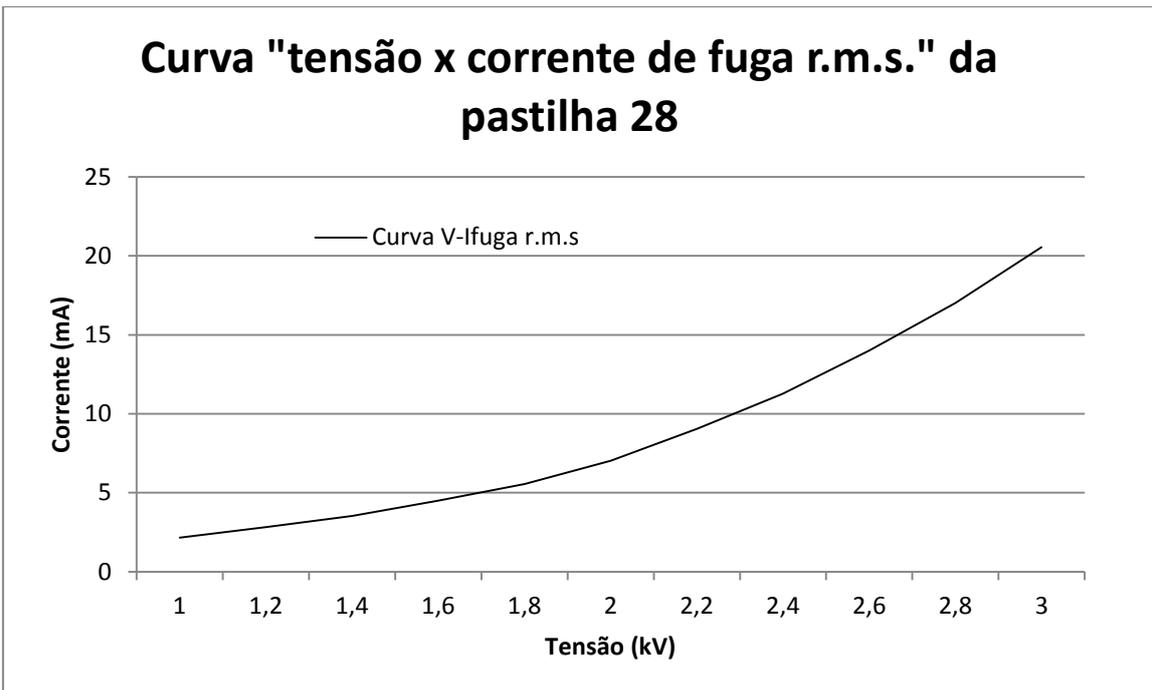


Figura. C.26. Curva “tensão-corrente” das pastilha 28.

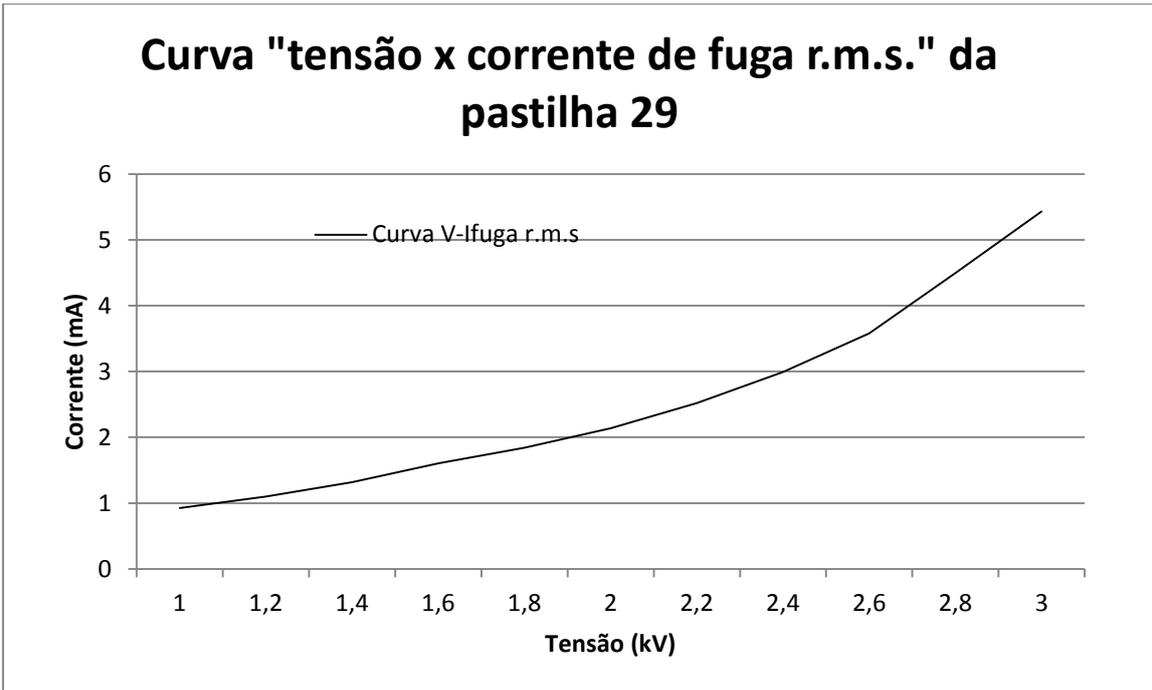


Figura. C.27. Curva “tensão-corrente” das pastilha 29.

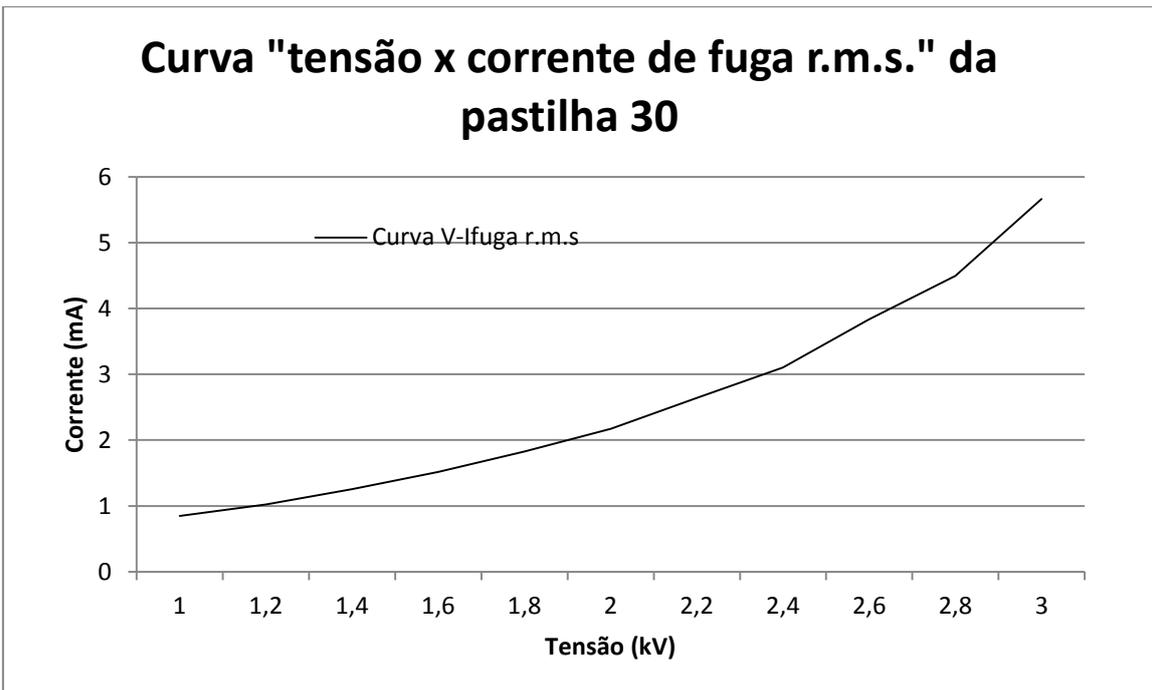


Figura. C.28. Curva “tensão-corrente” das pastilha 30.

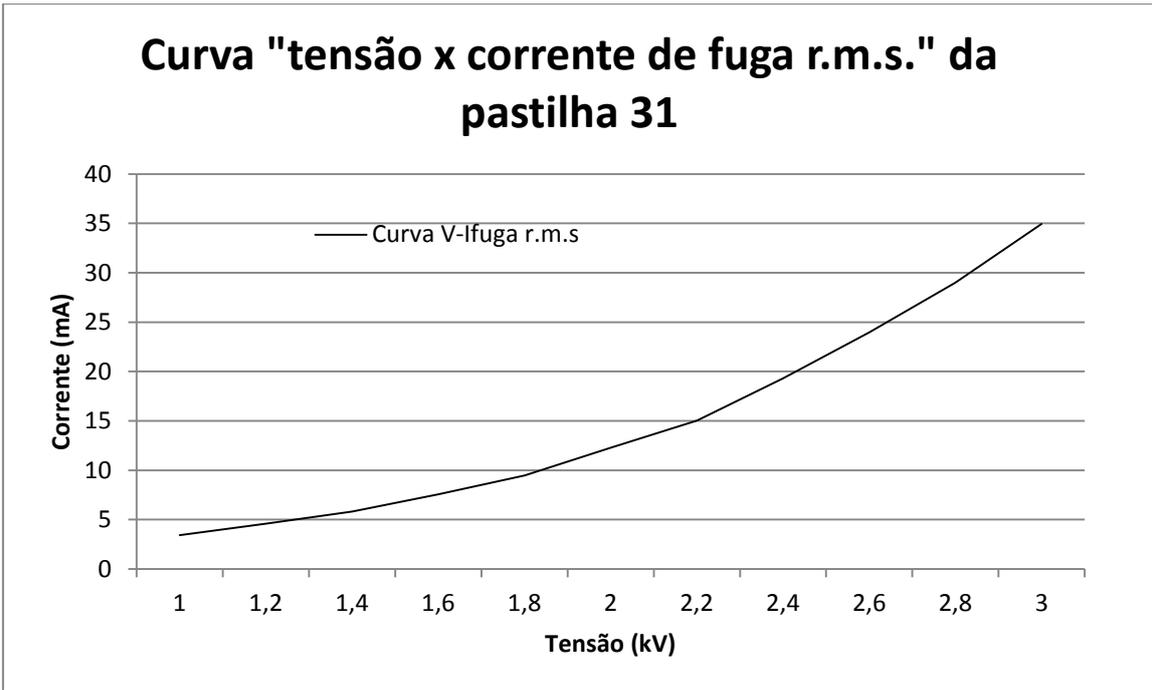


Figura. C.29. Curva “tensão-corrente” das pastilha 31.

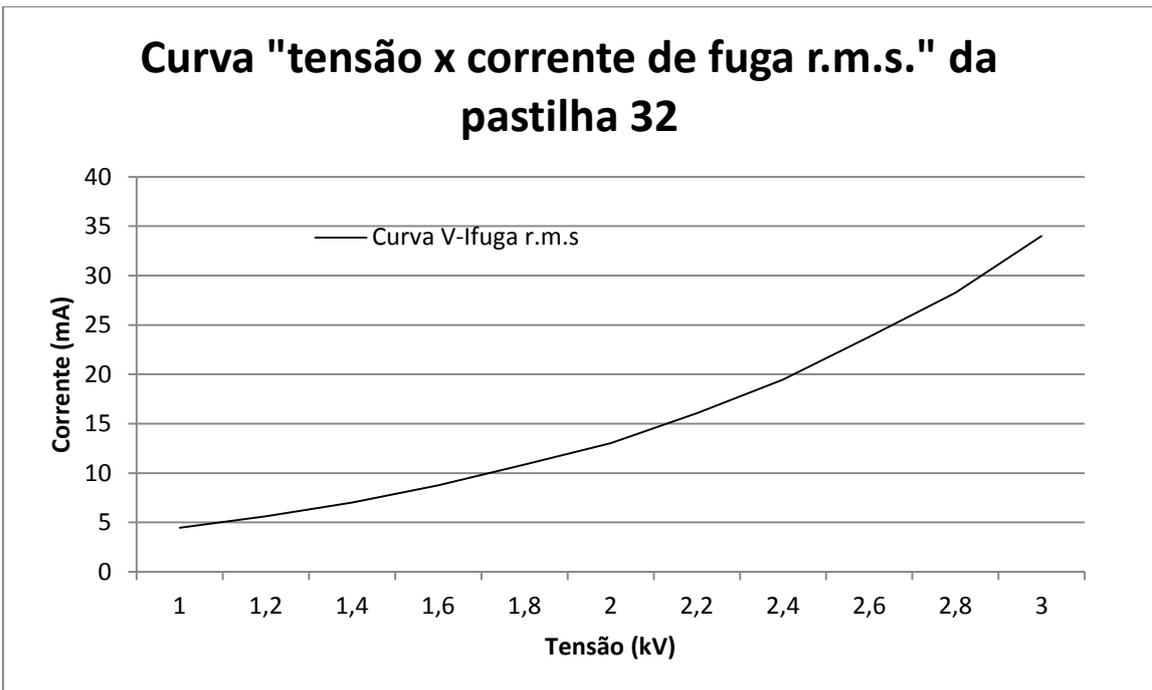


Figura. C.30. Curva “tensão-corrente” das pastilha 32.

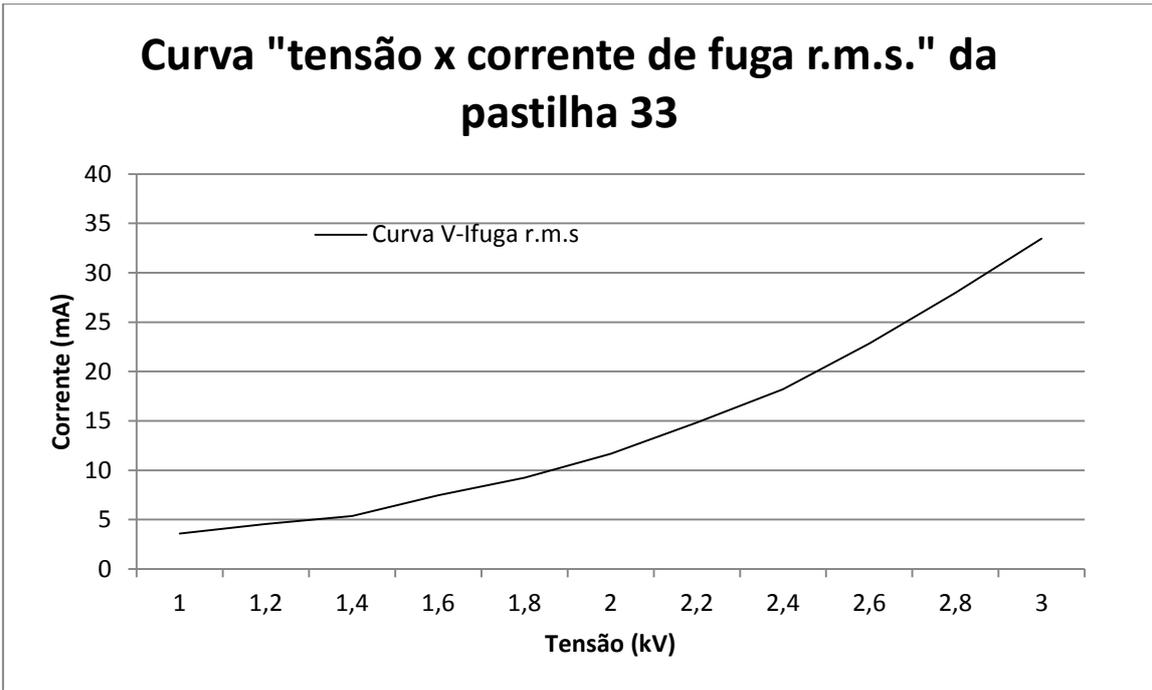


Figura. C.31. Curva “tensão-corrente” das pastilha 33.

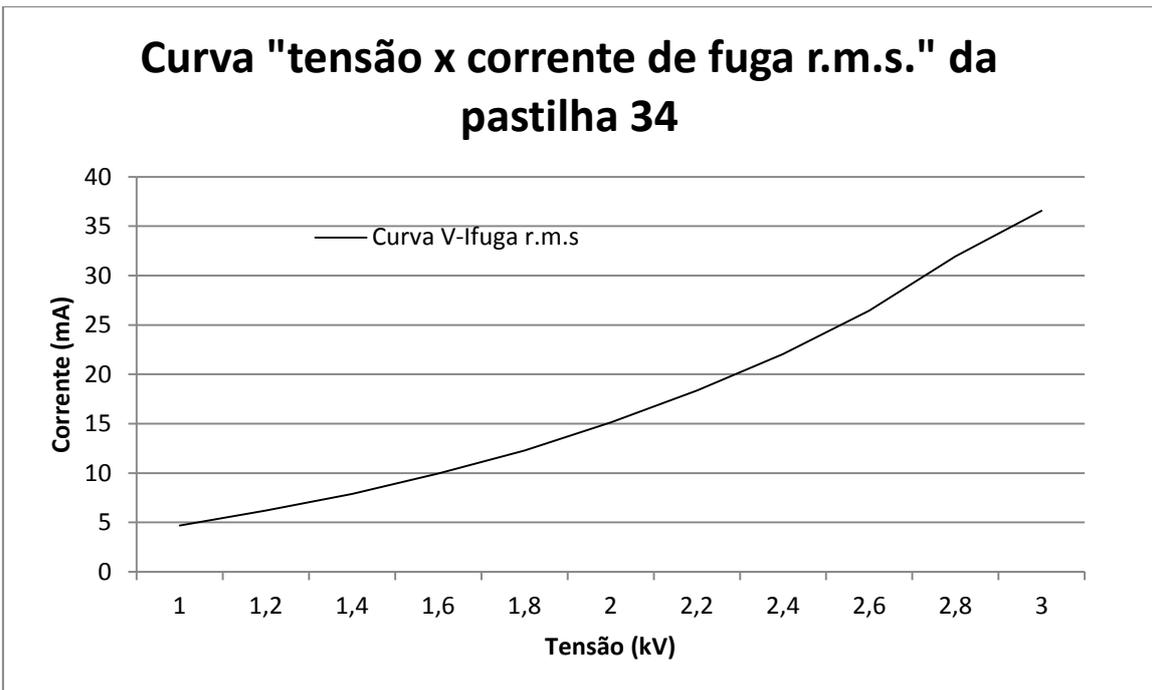


Figura. C.32. Curva “tensão-corrente” das pastilha 34.

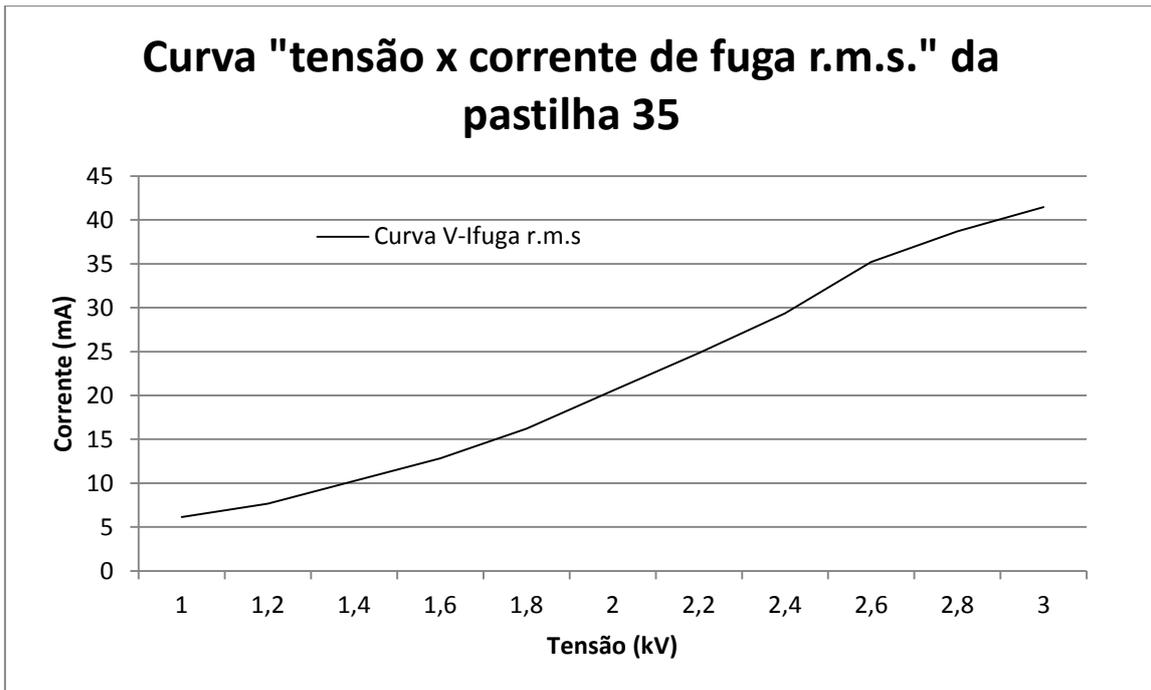


Figura. C.33. Curva “tensão-corrente” das pastilha 35.

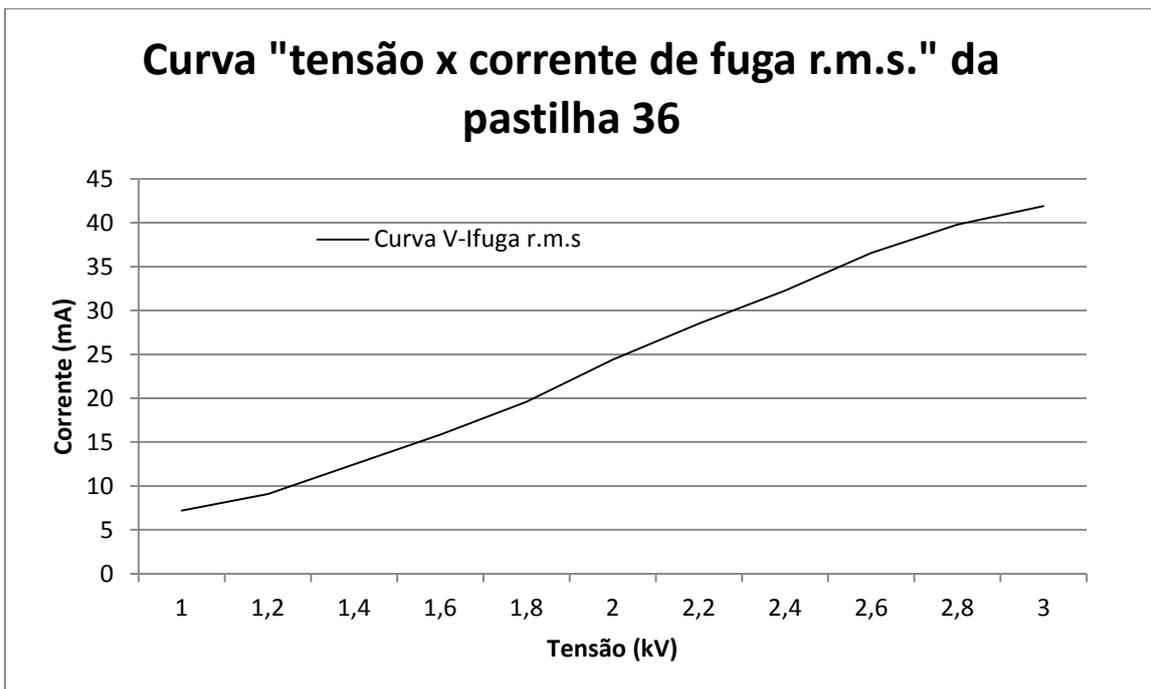


Figura. C.34. Curva “tensão-corrente” das pastilha 36.

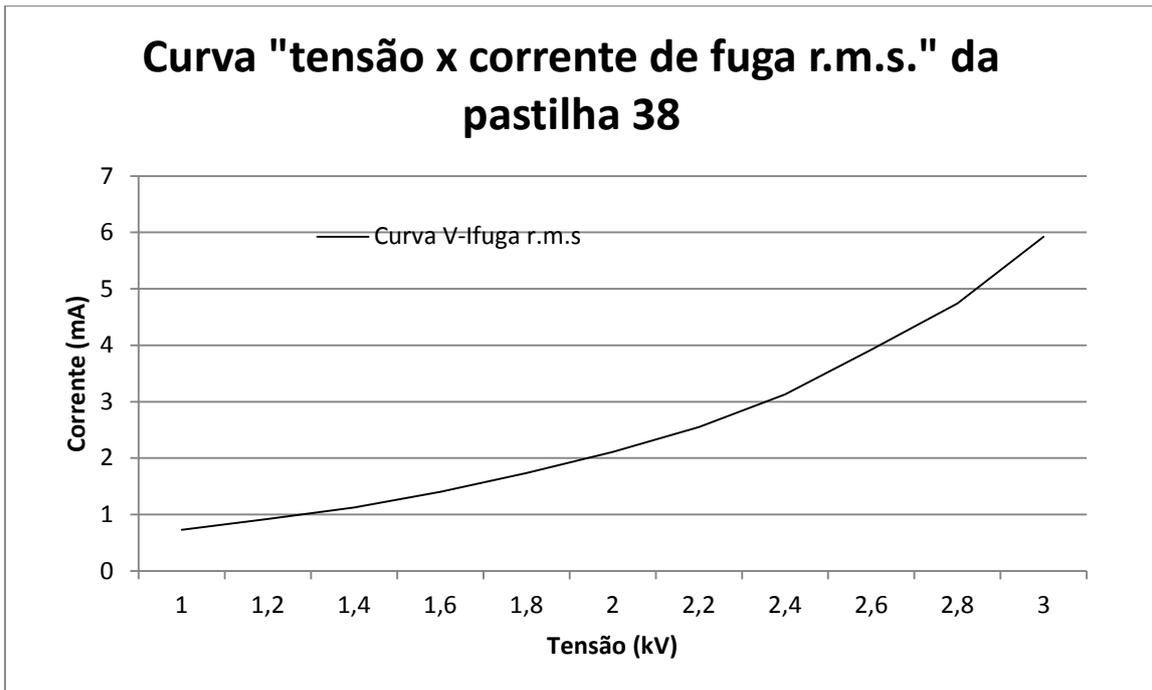


Figura. C.35. Curva "tensão-corrente" das pastilha 38.

# Apêndice. D

Neste apêndice são mostrados, na tabela D.1, os conteúdos harmônicos (até o harmônico de 15ª ordem) de todas as pastilhas de ZnO ensaiadas.

Tabela D.1. Conteúdo harmônico das pastilhas de ZnO ensaiadas.

Pastilha	Amplitudes dos Harmônicos (mA)							
	1°	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°
Pastilha 1	2,03	0,30	0,09	0,04	0,17	0,06	0,02	0,07
Pastilha 2	3,20	0,72	0,14	0,02	0,19	0,05	0,01	0,06
Pastilha 3	2,20	0,37	0,11	0,02	0,19	0,05	0,01	0,07
Pastilha 4	1,95	0,26	0,11	0,05	0,21	0,10	0,05	0,09
Pastilha 5	2,62	0,47	0,19	0,11	0,16	0,10	0,04	0,06
Pastilha 6	2,06	0,33	0,11	0,05	0,19	0,11	0,05	0,09
Pastilha 8	1,72	0,20	0,05	0,07	0,18	0,08	0,03	0,07
Pastilha 9	1,96	0,30	0,08	0,08	0,19	0,07	0,03	0,07
Pastilha 10	4,65	0,92	0,24	0,03	0,26	0,03	0,03	0,08
Pastilha 11	4,93	0,97	0,23	0,03	0,25	0,03	0,03	0,08
Pastilha 12	3,27	0,66	0,19	0,04	0,22	0,04	0,03	0,08
Pastilha 13	5,67	1,13	0,24	0,06	0,25	0,03	0,03	0,03
Pastilha 14	3,38	0,73	0,22	0,00	0,24	0,04	0,02	0,08
Pastilha 15	11,29	1,74	0,47	0,28	0,30	0,05	0,03	0,09
Pastilha 16	3,98	0,81	0,16	0,08	0,25	0,05	0,04	0,06
Pastilha 18	5,66	1,03	0,19	0,06	0,23	0,02	0,03	0,08
Pastilha 19	10,16	1,67	0,31	0,11	0,26	0,02	0,02	0,06
Pastilha 20	2,64	0,47	0,13	0,03	0,21	0,04	0,04	0,07
Pastilha 21	1,78	0,22	0,07	0,04	0,20	0,05	0,03	0,08
Pastilha 22	1,82	0,23	0,07	0,05	0,18	0,06	0,04	0,08
Pastilha 23	4,54	0,84	0,18	0,02	0,23	0,01	0,02	0,07
Pastilha 24	2,93	0,55	0,15	0,02	0,21	0,00	0,02	0,09

Pastilha 25	3,42	0,67	0,19	0,02	0,21	0,03	0,01	0,09
Pastilha 26	2,91	0,55	0,14	0,02	0,21	0,03	0,02	0,07
Pastilha 27	2,07	0,32	0,11	0,02	0,23	0,07	0,04	0,08
Pastilha 28	21,18	2,63	0,64	0,17	0,39	0,10	0,05	0,08
Pastilha 29	5,43	1,15	0,20	0,03	0,31	0,08	0,03	0,08
Pastilha 30	5,57	1,13	0,21	0,06	0,28	0,08	0,02	0,07
Pastilha 31	33,18	2,95	0,66	0,24	0,38	0,17	0,04	0,05
Pastilha 32	35,72	3,06	0,73	0,18	0,46	0,13	0,01	0,08
Pastilha 33	36,67	2,77	0,67	0,17	0,46	0,17	0,04	0,06
Pastilha 34	32,67	2,65	0,97	0,53	0,42	0,13	0,07	0,11
Pastilha 35	35,63	4,75	1,10	0,35	0,52	0,18	0,03	0,06
Pastilha 36	33,95	4,45	1,05	0,25	0,50	0,11	0,04	0,09
Pastilha 38	5,94	1,19	0,21	0,11	0,29	0,09	0,01	0,06

# Apêndice. E

Neste apêndice é apresentado o código utilizado para separação das componentes capacitivas e resistivas da corrente de fuga no MATLAB..

```
I=Iin/5000; % Variável com o sinal de corrente
V=Vin*2000; % Variável com o sinal de tensão
ifinal= length(V); % comprimento do Vetor de valores da tensão
i=1;
iaux=1;

% identificação de Icmáx

if V(i)<0
    while i<ifinal % laço de identificação de Icmáx em V=0 com V(1)<0
        if V(i)<=0 && V(i+1)>=0
            Icmáx=I(i+1)
            i=ifinal;
        else
            i=i+1;
        end
    end
else
    while iaux<20 % laço de identificação de Icmáx em V=0 com V(1)>0
        if V(i)<0 % laço de identificação se estou no semi-ciclo
negativo
            iaux=iaux+1;
            i=i+1;
        else
            i=i+1;
        end
    end
    while i<ifinal
        if V(i)<=0 && V(i+1)>=0
            Icmáx=I(i+1)
            i=ifinal;
        else
```

```

        i=i+1;
    end
end
end

% IC rms

ICrms=Icmax/sqrt(2)

% Cálculo da reatância capacitiva

Xc=(max(V)/sqrt(2))/ICrms

% Cálculo da capacitância equivalente

Cp=1/(2*pi*60*Xc)

% Cálculo de IC

periodo = 1/60;
dt=periodo/length(V);
dtaux=0;
Posicao=1;
sinal=0;Derivada=0;ICcalc=0;IRcalc=0;
Vlaux=V(1)+180; % "+parcela variável para melhorar R^2
while dtaux<periodo
    if Posicao<=length(V)
        sinal(Posicao)=max(V)*sin(2*pi*60*dtaux+(asin(Vlaux/max(V))));

Derivada(Posicao)=max(V)*2*pi*60*cos(2*pi*60*dtaux+(asin(Vlaux/max(V))));

ICcalc(Posicao)=Cp*max(V)*2*pi*60*cos(2*pi*60*dtaux+(asin(Vlaux/max(V))));

        IRcalc(Posicao)=I(Posicao)-ICcalc(Posicao);
    end
    dtaux=dtaux+dt;
    Posicao=Posicao+1;
end

```

```
sinal=sinal.';Derivada=Derivada.';ICcalc=ICcalc.';IRcalc=IRcalc.';
```

```
%Cálculo do coeficiente de Determinação
```

```
Ymean=mean(V);  
Posicao=1;  
SEfit=0;  
SEmean=0;  
while Posicao<length(V)  
    SEfit=SEfit+(V(Posicao)-sinal(Posicao))^2;  
    SEmean=SEmean+(V(Posicao)-Ymean)^2;  
    Posicao=Posicao+1;  
end  
CoefDet=(1-(SEfit/SEmean))*100
```

```
%Criando os gráficos
```

```
hold off; figure(1)  
plot(V);hold on;plot(sinal);title('Tensão');xlabel('Tempo  
(s/10^5)');ylabel('Tensão (V)')  
figure(2)  
plot(I);title('Corrente de Fuga total');xlabel('Tempo  
(s/10^5)');ylabel('Corrente (A)')  
figure(3)  
plot(ICcalc);title('IC');xlabel('Tempo (s/10^5)');ylabel('Corrente  
(A)')  
figure(4)  
plot(IRcalc);title('IR');xlabel('Tempo (s/10^5)');ylabel('Corrente  
(A)')
```

```
%FFT de V, I e de IR
```

```
FFTV=fft(V);  
FFTI=fft(I);  
FFTIR=fft(IRcalc);
```

```
%THD de V
```

```
Posicao=3;
```

```

Vfundamental=((2*sqrt(real(FFTV(2))^2+imag(FFTV(2))^2))/length(V))^2;
Vharmonicos=0;
while Posicao<=1+length(V)/2
    if imag(FFTV(Posicao))==0
        Vharmonicos=Vharmonicos+(real(FFTV(Posicao))/length(V))^2;
    else

Vharmonicos=Vharmonicos+((2*sqrt(real(FFTV(Posicao))^2+imag(FFTV(Posic
ao))^2))/length(V))^2;
    end
Posicao=Posicao+1;
end
THDV=100*sqrt(Vharmonicos/Vfundamental)

%THD de I

Posicao=3;
Ifundamental=((2*sqrt(real(FFTI(2))^2+imag(FFTI(2))^2))/length(I))^2;
Iharmonicos=0;
while Posicao<=1+length(I)/2
    if imag(FFTI(Posicao))==0
        Iharmonicos=Iharmonicos+(real(FFTI(Posicao))/length(I))^2;
    else

Iharmonicos=Iharmonicos+((2*sqrt(real(FFTI(Posicao))^2+imag(FFTI(Posic
ao))^2))/length(I))^2;
    end
Posicao=Posicao+1;
end
THDI=100*sqrt(Iharmonicos/Ifundamental)

%THD de IR

Posicao=3;
IRfundamental=((2*sqrt(real(FFTIR(2))^2+imag(FFTIR(2))^2))/length(IRca
lc))^2;
IRharmonicos=0;
while Posicao<=1+length(IRcalc)/2
    if imag(FFTIR(Posicao))==0

```

```

IRharmonicos=IRharmonicos+(real(FFTIR(Posicao))/length(IRcalc))^2;
    else

IRharmonicos=IRharmonicos+((2*sqrt(real(FFTIR(Posicao))^2+imag(FFTIR(P
osicao))^2))/length(IRcalc))^2;
    end
Posicao=Posicao+1;
end
THDIR=100*sqrt(IRharmonicos/IRfundamental)
harmonic1IR=(2*sqrt(real(FFTIR(2))^2+imag(FFTIR(2))^2))/length(IRcalc
)
harmonic3IR=(2*sqrt(real(FFTIR(4))^2+imag(FFTIR(4))^2))/length(IRcalc
)
harmonic1IT=(2*sqrt(real(FFTI(2))^2+imag(FFTI(2))^2))/length(I)
harmonic3IT=(2*sqrt(real(FFTI(4))^2+imag(FFTI(4))^2))/length(I)

```

# Apêndice. F

Neste apêndice é apresentado o firmware utilizado no Arduino.

```
/*
  AnalogReadSerial
  Reads an analog input on pin 0, prints the result to the serial monitor.
  Attach the center pin of a potentiometer to pin A0, and the outside pins to +5V and
  ground.

  This example code is in the public domain.
  */

// defines for setting and clearing register bits
#ifndef cbi
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
#endif
#ifndef sbi
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
#endif

int sinal[3700];
int i;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {

// set prescale to 16 (Aumenta a taxa de amostragem padrão)
sbi(ADCSRA,ADPS2) ;
cbi(ADCSRA,ADPS1) ;
cbi(ADCSRA,ADPS0) ;
```

```
// initialize serial communication at 9600 bits per second: (inicialização da serial)
Serial.begin(9600);
delay(1000);
Serial.println("iniciando aquisição");
}

// the loop routine runs over and over again forever: (Aquisição e envio dos dados)
void loop() {

  for(i=0;i<3700;i++){

    sinal[i]=analogRead(A1);
  }
  for(i=0;i<3700;i++){

    Serial.println(sinal[i]);
  }

  delay(60000);    // delay in between reads for stability
```

# Apêndice. G

Neste apêndice é apresentado o código do programa utilizado para obtenção dos dados do Arduino, desenvolvido no Visual Basic.

```
Public Class Form1
```

```
    Dim v, c As String
```

```
    Dim Snum As String
```

```
    Dim Numero As Single
```

```
    Dim x As Integer
```

```
    Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
Button1.Click
```

```
        On Error GoTo ErroPorta
```

```
        If Button1.Text = "Parar" Then
```

```
            If SerialPort1.IsOpen() Then SerialPort1.Close()
```

```
            Button1.Text = "Iniciar"
```

```
            SairCmd.Enabled = True
```

```
            Timer1.Enabled = False
```

```
            'End
```

```
        Else
```

```
            SerialPort1.PortName = ComTxt.Text
```

```
            SerialPort1.BaudRate = VelocCb.Text
```

```
            Button1.Text = "Parar"
```

```
            SerialPort1.Open()
```

```
            Timer1.Enabled = True
```

```
            SairCmd.Enabled = False
```

End If

Exit Sub

ErroPorta:

MsgBox("Porta " + ComTxt.Text + " não existente!")

Button1.Text = "Iniciar"

Resume Next

End Sub

Private Sub Timer1\_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles Timer1.Tick

On Error Resume Next

Dim i As Integer

v = SerialPort1.ReadExisting()

If Len(v) > 0 Then

    "TextBox1.Text = v

    For i = 1 To Len(v)

        If Mid(v, i, 1) = "k" Then

            x = -1

            Snum = ""

            c = ""

            TextBox2.Text = ""

            Chart1.Series("Sinal").Points.Clear()

        End If

        If Mid(v, i, 1) = ";" Then

            Numero = Trim(Snum) \* 5 / 1024

            "TextBox2.Text = TextBox2.Text + CStr(Numero) + vbCrLf

            c = c + CStr(Numero) + vbCrLf

            Snum = ""

            x = x + 1

            Chart1.Series("Sinal").Points.AddXY(x, Numero)

```
        Else
            Snum = Snum + Mid(v, i, 1)
        End If
    Next i
    TextBox2.Text = c
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub SairCmd_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
SairCmd.Click
    If SerialPort1.IsOpen() Then
        SerialPort1.Close()
        'Button1.Text = "Iniciar"
    End If
End
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
    VelocCb.Text = "115200"
End Sub
```

```
Private Sub VelocCb_SelectedIndexChanged(sender As Object, e As EventArgs)
Handles VelocCb.SelectedIndexChanged
    SerialPort1.BaudRate = VelocCb.Text
End Sub
```

```
Private Sub Button2_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
Button2.Click  
    MsgBox("Mensagem :" + TextBox1.Text)  
End Sub  
End Class
```