UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

(EP/FEA/IEE/IF)

Milton Zanotti Júnior

**CONTRIBUIÇÃO À METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS PÁRA-
RAIOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

São Paulo

2009

MILTON ZANOTTI JÚNIOR

**Contribuição à metodologia de avaliação dos pára-raios do sistema de
transmissão de energia elétrica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física) para obtenção do título de Mestre em Energia.

Orientação: Prof. Dr. Arnaldo G. Kanashiro

São Paulo

2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Zanotti Junior, Milton.

Contribuição à metodologia de avaliação dos pára-raios do sistema de transmissão de energia elétrica / Milton Zanotti Junior; orientador Arnaldo Gakiya Kanashiro – São Paulo, 2009.

188 p.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado – Programa Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1. Subestações elétricas 2. Pára-raios 3. Corrente de fuga
4. Sistemas elétricos de potência - proteção I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA INTERUNIDADES DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA
EP – FEA – IEE - IF

MILTON ZANOTTI JÚNIOR

“Contribuição à metodologia de avaliação dos pára-raios do sistema de transmissão de energia elétrica”

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 24/03/2009 pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Arnaldo Gakiya Kanashiro - PIPGE
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim – EESC/USP

Prof. Dr. Alexandre Piantini - PIPGE

*Aos meus pais Milton e Maria Zanotti, pelo
constante apoio nas mais diversas etapas de minha vida.*

*À minha esposa Flávia e
aos meus filhos Bruno, Felipe e Giovana,
razões deste trabalho.*

*Aqueles que sempre tem dúvidas
são pessoas progressistas,
e seu futuro é brilhante*

Mokiti Okada

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus a permissão de estar vivo, e poder fazer este trabalho. Agradeço também aos meus antepassados, que acredito estarem sempre comigo.

À ISA-CTEEP, na pessoa do Eng. Wilson Roberto Bacega, que propiciou a realização das investigações de laboratório e de campo nos pára-raios da concessionária.

Ao meu amigo e orientador, Prof. Dr. Arnaldo G. Kanashiro, pelas incontáveis horas gastas comigo e com este trabalho, pela paciência e orientações valiosas. Não posso de deixar agradecer também os Profs. Drs. Alexandre Piantini e Hédio Tatizawa, que apesar de não serem meus orientadores, sempre encorajaram-me e aconselharam em momentos importantes.

Aos meus amigos do PIPGE, turma de 2006, e aos meus amigos do IEE, em especial ao Dr. Kleiber Tadeu Soletto, Eng. Francisco Antonio Marino Salotti e ao técnico Guido Rodrigues da Silva, por terem auxiliado na montagem de alguns experimentos e empréstimos de equipamentos, sem os quais este trabalho não teria sido possível, bem como agradecer ao pessoal da Seção de Editoração Eletrônica, Sergio Antonio de Oliveira, Éger Bergamini Mastrandrea e Regina Célia Barboza.

Aos meus amigos do CENDAT/USP que participaram de uma forma ou de outra no desenvolvimento deste trabalho.

Às bibliotecárias Maria de Fátima Mochizuki, Maria da Penha da Silva Oliveira e Maria de Lourdes Montrezol, pela ajuda na obtenção das referências bibliográficas.

Ao amigo Eruchim Waldemar Citron, pelas conversas e experiências compartilhadas comigo.

O meu especial agradecimento ao Dr. Welson Bassi, que permitiu que ingressasse no Programa, a Cleber Rogério Fiori, Johny Ricardo Pessoa, Paulo Marcos Furtado, Clovis Yoshio Kodaira, Celso Pereira Braz, Paulo Futoshi Obase e Francisco Hirakazu Kameyama, pela troca de experiências, apoio e ajuda, que além de companheiros de trabalho, são meus amigos e ajudaram-me a concluir este trabalho, de uma forma ou de outra.

Não poderia deixar de agradecer à minha família pela compreensão e apoio que me deram, abrindo mão da presença do pai e esposo.

Ao IEE/PIPGE pela oportunidade.

RESUMO

Zanotti Jr, M. Contribuição à metodologia de avaliação dos pára-raios do sistema de transmissão de energia elétrica, 2009, 188p. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

Os sistemas elétricos de potência estão sujeitos a diversos tipos de sobretensões que podem causar desligamentos ou avarias nos equipamentos elétricos que o compõe, comprometendo a continuidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores e impactando negativamente nos índices de qualidade. Um dos dispositivos mais importantes utilizados na proteção destes equipamentos são os pára-raios, os quais podem ser classificados, no sistema elétrico brasileiro, em função de sua tecnologia: a primeira, mais antiga, utiliza carboneto de silício (SiC), a segunda e mais atual utiliza óxido de zinco (ZnO) em seus elementos internos. Os primeiros estão instalados há muitos anos, até mesmo acima de sua vida útil, sendo assim, podem apresentar falhas em campo durante a sua operação. Os pára-raios de SiC estão sendo gradativamente substituídos pelos de ZnO, pois seria economicamente inviável a sua substituição imediata. Por conseguinte, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias para avaliação do seu estado de degradação, a fim de evitar-se que estes equipamentos falhem no campo. A medição da corrente de fuga, analisando-se a sua componente de terceira harmônica, mostrou que podem obtidas informações importantes a respeito dos pára-raios de SiC, fornecendo subsídios para a elaboração de um programa de manutenção que priorize a retirada daqueles mais degradados.

Palavras-chave: pára-raios, carboneto de silício, corrente de fuga, degradação, diagnóstico, terceira harmônica.

ABSTRACT

Zanotti Jr., M. Contribution to the surge arresters' evaluation methodology of electrical transmission system, 2009, 188p. Master Dissertation. Postgraduation Program in Energy. University of São Paulo.

Power systems are subject to many types of overvoltages that may provoke interruptions or damage in electrical equipments, compromising the continuity of electrical energy supply to consumers and impacting negatively the power quality indices. One of the most important device used to protect the electric equipments are the surge arresters, which may be classified, in Brazilian power system, by its technology: the first, more antiquated, using gapped silicon-carbide (SiC) surge arrester, and secondly and newer, zinc-oxide (ZnO) surge arrester. The devices of the first type are installed for many years, even above their lifetime, presenting, in such cases, failures in site while operating. The gapped silicon-carbide surge arresters have been substituted gradually by zinc-oxide surge arresters, because it would be economically impracticable to replace them immediately. Therefore, the development of methodologies to evaluate their degradation's condition is necessary, in order to avoid the failure of these equipments in site. Measurements of leakage current with third order harmonic analysis showed that important information regarding gapped silicon carbide surge arresters may be obtained, providing subsidies to elaborate a program of maintenance that prioritize the replacement of the most degraded ones.

Keywords: gapped silicon carbide surge arrester, leakage current, degradation, diagnostics, third harmonic.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1: Exemplos de montagem de módulos de centelhadores. Fontes: (a) Adaptado do catálogo da ASEA [7]; Adaptado de Brown Boveri Review [8].....33
- Figura 2.2: Capacitâncias existentes no pára-raios. Fonte: Verdolin [9].....35
- Figura 2.3: Distribuição de tensão em um pára-raios. V_N : tensão sobre o terminal do pára-raios; $V_1, V_2, \dots, V_n$: quedas de tensão sobre as capacitâncias dos centelhadores; C_C : capacitância dos centelhadores, $C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pn}$: capacitâncias parasitas para a terra, $I_1, I_2, \dots, I_n$: correntes que fluem pelas capacitâncias dos centelhadores, $I_{cp1}, I_{cp2}, \dots, I_{cpn}$: correntes que fluem pelas capacitâncias parasitas. Fonte: Adaptado de Verdolin [9].....36
- Figura 2.4: Distribuição de tensão no pára-raios com centelhador parcialmente ativo. V_N : tensão sobre o terminal do pára-raios; R : resistor não linear (equalizador); V_R : queda de tensão sobre o resistor não linear, C_C : capacitância dos centelhadores, $C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pn}$: capacitâncias parasitas para a terra; $I_{c1}, I_{c2}, \dots, I_{cn}$: correntes que fluem pelas capacitâncias dos centelhadores, I_R : corrente que flui pelos resistores não lineares, $I_{cp1}, I_{cp2}, \dots, I_{cpn}$: correntes que fluem pelas capacitâncias parasitas. Fonte: Adaptado de Verdolin [9].....38
- Figura 2.5: Anel metálico para o controle da distribuição de potencial em um pára-raios. Fonte: Verdolin [9].....39
- Figura 2.6: Sequência de eventos que ocorre quando um impulso de corrente é aplicado no pára-raios com centelhador ativo. O intervalo de tempo entre os diagramas é da ordem de 2,5 ms. N_p : Nível de proteção dos equipamentos, u_p : tensão residual, u_L : queda de tensão sobre a resistência de arco dos centelhadores, u_R : queda de tensão sobre os blocos de SiC, u : tensão do sistema, i_s : corrente que passa pelo pára-raios, u_a : tensão que faz o pára-raios atuar, u_s : impulso de tensão, M : campo magnético gerado pela passagem da corrente subsequente. Fonte: Adaptado de Brown Boveri Review [8].....43
- Figura 2.7: Curva tensão versus corrente do bloco de SiC. u_R é a tensão residual expressa em porcentagem da tensão residual à corrente de descarga nominal, indicada como i_{An} . Fonte: The Brown Boveri Review [8].....44

Figura 2.8: Arranjo de montagem do LCM (Leakage Current Monitor). Fonte: Adaptado de Lundquist et al [17].	50
Figura 2.9: Princípio de funcionamento dos sensores passivos de temperatura, onde NCO é controlador numérico do oscilador, DSP é o processador digital de sinais e PC é o microcomputador. Fonte: Hinrichsen et al [25].....	58
Figura 2.10: Comparação das curvas $V \times I$ de um bloco de ZnO novo com as curvas de um bloco degradado por correntes elevadas e por redução de oxigênio, onde U indica a tensão aplicada ao bloco e U_c é a tensão de operação contínua. Fonte: Heinrich e Hinrichsen [28].	65
Figura 3.1: Exemplos dos pára-raios investigados. (a) sinais de corrosão. (b) sinais de descarga externa.	71
Figura 3.2: Forma de onda de impulso atmosférico. Fonte: NBR 6936/1992 [35].....	73
Figura 3.3: Desenho esquemático do circuito para o ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico. C_{GER} é o capacitor do gerador, R_f é o resistor de controle do tempo de frente T_1 , R_c é o resistor de controle do tempo de cauda T_2 , G é o centelhador do gerador, C_{div} é a capacitância do divisor de tensão, C_b é o capacitor de baixa tensão do divisor, OSC é o osciloscópio para registro e medição da forma de onda e C_{pr} é a capacitância do pára-raios.	74
Figura 3.4: Circuito esquemático para o ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial a seco. F: Fonte de ensaio, R_a : resistor de amortecimento, C_{div} : divisor de tensão capacitivo, P.R.: pára-raios sob ensaio, C_A : capacitor de acoplamento.	76
Figura 3.5: Circuito básico de transformadores ligados em cascata. (1) Enrolamento primário, (2) Enrolamento de alta tensão secundário, (3) Enrolamento terciário de excitação. Fonte: Adaptado de Kuffel, Zaengl e Kuffel [33].	78
Figura 3.6: Componentes de alta tensão do circuito elétrico para o ensaio de medição da tensão de radiointerferência. T: fonte de tensão senoidal, F: filtro, C_A : capacitor de acoplamento, PR: pára-raios sob ensaio, R_m : resistor de medição, DIV: divisor capacitivo. Fonte: NBR 7876 [37].....	81

Figura 3.7: Componentes do circuito de baixa tensão do ensaio de medição da tensão de radiointerferência. L: indutância para filtro da tensão à frequência industrial, R_1 : resistor de terminação de valor 50 Ω , C_C : cabo coaxial com impedância característica de 50 Ω , Z_e : impedância de entrada do instrumento de medição, R_2 : resistor série de complemento. Fonte: NBR 7876 [37].	81
Figura 3.8: Circuito para o ensaio de medição da corrente de fuga. F: Fonte de tensão senoidal, DIV: divisor capacitivo, PR: pára-raios sob ensaio, R_S : resistor de medição da corrente de fuga, C_A : capacitor de acoplamento, que pode ser inserido ao circuito ou não.	85
Figura 3.9: Circuito equivalente para um bloco de ZnO. Fonte: Shirakawa et al [39].	87
Figura 3.10: Representação qualitativa do circuito equivalente para um pára-raios de SiC em regime permanente.	87
Figura 3.11: Circuito equivalente para medição da componente resistiva da corrente de fuga de pára-raios em laboratório. F: fonte de tensão, Div: divisor de tensão, C_A : capacitor de acoplamento, P.R.: pára-raios, R_V : resistor variável, R_S : resistor para medição da corrente de fuga do pára-raios, Osc.: osciloscópio.	89
Figura 3.12: Corrente resistiva obtida através do método de referência virtual. Fonte: Adaptado de Heinrich e Hinrichsen [28].	90
Figura 3.13: Distorção de corrente causada por um resistor não linear. Fonte: Dugan et al [40].	91
Figura 3.14: Corrente de fuga típica de um resistor não linear de óxido metálico em laboratório. Fonte: IEC 60099-5 [4].	92
Figura 3.15: Taxas de mudança da componente resistiva da corrente de fuga e harmônicas da corrente de fuga total à tensão de 4,8 kV em função da temperatura. Fonte: Lee et al [41].	93
Figura 3.16: Características tensão-corrente típicas para um resistor não linear de óxido metálico, onde U é a tensão aplicada e U_r é a tensão nominal. Fonte: IEC 60099-5 [4].	93

Figura 3.17: Formas de onda da tensão aplicada e a corrente de fuga em resistor de ZnO. V_s é a tensão aplicada, I_T é a corrente de fuga total, I_R é a componente resistiva e I_3 a componente de terceira harmônica, base de tempo dos oscilogramas é 0,5 ms. Fonte: Lee et al [41].....	94
Figura 3.18: Circuito do instrumento DIAG para medição da corrente de fuga. Legenda: V: Amplificador, N_p : enrolamento do primário (conexão ao terra), N_i : enrolamento do alicate, E_{ji} : tensão induzida no enrolamento do alicate, U_v : Tensão de saída do amplificador, U_m : tensão proporcional à corrente do primário, Φ : fluxo magnético no núcleo toroidal, I_p : corrente primária (corrente de fuga), I_s : corrente de compensação. Fonte: Manual do DIAG [43].....	98
Figura 4.1: Gráficos dos resultados obtidos no ensaio de medição da corrente de fuga no pára-raios A1. (a) Formas de onda da tensão aplicada e a corrente de fuga; (b) Resultados obtidos do cálculo das componentes harmônicas da tensão aplicada e da corrente de fuga total.	108
Figura 4.2: Gráficos dos resultados obtidos no ensaio de medição da corrente de fuga no pára-raios A3. (a) Formas de onda da tensão aplicada e a corrente de fuga; (b) Resultados obtidos do cálculo das componentes harmônicas da tensão aplicada e da corrente de fuga total.	109
Figura 4.3: (a) Exemplo de termograma adquirido no Laboratório de Alta Tensão. (b) Gráfico das medições de temperatura, onde aparecem as temperaturas máxima e mínima do pára-raios. O termograma mostrado refere-se ao pára-raios B6.....	112
Figura 4.4: Componentes internos dos pára-raios. (a) Fabricante A; (b) Fabricante B.....	113
Figura 4.5: Vista em corte do pára-raios do fabricante A [44].....	114
Figura 4.6: Detalhe do conjunto de centelhadores, com bobina em uma das extremidades e o resistor equalizador.....	114
Figura 4.7: Vista em corte e detalhamento do conjunto de centelhadores dos pára-raios do fabricante B [45].....	115
Figura 4.8: Marcas de bolor e descargas nos blocos do pára-raios A2.	117
Figura 4.9: Marcas não identificáveis dos ímãs do pára-raios A2.....	117

Figura 4.10: Marcas de descarga nos centelhadores do pára-raios A4.....	117
Figura 4.11: Marcas de descarga nos blocos do pára-raios A4.	118
Figura 4.12: Marcas de umidade nos blocos do pára-raios A4.	118
Figura 4.13: Marcas de descarga nos centelhadores do pára-raios A6.....	118
Figura 4.14: Marcas de descarga nos blocos do pára-raios A6.	119
Figura 4.15: Marcas de bolor nos blocos do pára-raios B3.	119
Figura 4.16: Marcas de oxidação nos componentes metálicos internos do pára-raios B3	119
Figura 4.17: Conjunto de centelhadores com suporte do resistor de equalização quebrado do pára-raios B3.....	120
Figura 4.18 (a) e (b): Fotos de conjuntos de centelhadores quebrados do pára-raios B5.....	120
Figura 4.19: Circuito utilizado para medição da característica $V_x I$ dos resistores equalizadores dos pára-raios. F: Fonte de tensão contínua de amplitude variável; DIV: divisor resistivo, R_S : resistor “shunt”; OSC: osciloscópio.	121
Figura 4.20: Arranjo utilizado para medição da característica $V_x I$ dos resistores equalizadores dos pára-raios.....	121
Figura 4.21: Resultado do levantamento da característica $V_x I$ dos resistores equalizadores do pára-raios A3.	122
Figura 4.22: Resultado do levantamento da característica $V_x I$ dos resistores equalizadores do pára-raios B5.....	122
Figura 4.23: Arranjo utilizado na medição da tensão de radiointerferência nos conjuntos de centelhadores do pára-raios B5.	124
Figura 4.24 (a) e (b): Detalhes da ligação do conjunto de centelhadores no circuito utilizado na medição da tensão de radiointerferência.....	124

Figura 4.25: Circuito elétrico utilizado para a medição da corrente de fuga nos resistores equalizadores dos pára-raios fabricante B, onde: F: fonte variável que permite o ajuste das componentes harmônicas da tensão; TP: transformador de potencial; P.P.: ponta de prova de alta tensão; R _S : resistor “shunt”; OSC: osciloscópio...	128
Figura 4.26: Arranjo utilizado para as medições nos componentes internos.	128
Figura 4.27: Gráfico das componentes de terceiro harmônico em função da tensão aplicada aos conjuntos de centelhadores 1, 3, 4 e 5 (pára-raios B5). A tensão aplicada foi senoidal pura (sem componentes harmônicas).	129
Figura 4.28: Gráfico da 3 ^a H da corrente de fuga em função da 3 ^a H da tensão para o conjunto de centelhadores 1.	131
Figura 4.29: Gráfico da 3 ^a H da corrente de fuga em função da 3 ^a H da tensão para o conjunto de centelhadores 5.	131
Figura 4.30: Gráfico da 3 ^a H da corrente de fuga em função do ângulo de fase da 3 ^a H da tensão (0,5% de amplitude). Tensão aplicada: 8 kV, conjunto de centelhadores 1.	132
Figura 4.31: Gráfico da 3 ^a H da corrente de fuga em função do ângulo de fase da 3 ^a H da tensão (0,5% de amplitude). Tensão aplicada: 8 kV, conjunto de centelhadores 5.	133
Figura 4.32: Gráfico da 3 ^a H da corrente em função da 3 ^a H da tensão, para os ângulos de fase zero e 150 graus. Pára-raios A1.....	135
Figura 4.33: Sensor de campo.	136
Figura 4.34: Esquema de montagem do sensor para comparação com o T.P.	137
Figura 4.35: Resultado da comparação entre a tensão medida no T.P e no sensor.	137
Figura 4.36: Detalhe da instalação dos pára-raios (ZnO) da subestação de Paraibuna. Os pontos 1 e 2 indicam onde foram feitas as medições de corrente na base do pára-raios.	139
Figura 4.37: Detalhe da instalação dos pára-raios de ZnO da subestação de Paraibuna, onde são mostrados os pontos de medição 1 e 2.	141

Figura 4.38: Detalhe da base dos pára-raios de SiC da subestação de Paraibuna, onde são mostrados os pontos de medição 1 e 2.	141
Figura 4.39: Gráfico das correntes de fuga medidas no pára-raios da fase B, circuito CAU-02, nas posições 1 (antes do contador de descargas) e 2 (depois o contador de descargas).	143
Figura 4.40: Formas de onda das correntes de fuga do pára-raios da fase A, circuito JAG-01, antes (posição 1) e após (posição 2) o contador de descargas.....	144
Figura 4.41: Estrutura montada em alumínio no IEE-USP.	145
Figura 4.42: Arranjo de ensaio para a determinação da influência do campo magnético no aparelho DIAG e na estrutura metálica.	145
Figura 4.43: Arranjo de ensaio para comparação entre o instrumento DIAG e o resistor “shunt”.	146
Figura 4.44: Verificação da influência do campo elétrico da Subestação com o transformador de corrente sobre a base de concreto do pára-raios.	148
Figura 4.45: Local de instalação do transformador de corrente para verificação da influência do campo eletromagnético da Subestação de Paraibuna.	148
Figura 4.46: Indicação do instrumento de medição com o transformador de corrente montado conforme Figura 4.45.	149
Figura 4.47: Montagem da treliça do IEE na Subestação de Paraibuna.....	150
Figura 4.48: Leitura do indicador digital do instrumento de medição com o transformador de corrente montado conforme Figura 4.47.	150
Figura 4.49: Formas de onda de tensão e da corrente na fase A do circuito CAU-02. (a) antes do medidor de corrente de fuga com contador de descargas; (b) após o medidor.	151
Figura 4.50: Formas de onda de tensão e da corrente na fase B do circuito CAU-02. (a) antes do medidor de corrente de fuga com contador de descargas; (b) após o medidor.	151

Figura 4.51: Formas de onda de tensão e da corrente na fase C do circuito CAU-02. (a) antes do medidor de corrente de fuga com contador de descargas; (b) após o medidor.	152
Figura 4.52: Formas de onda de tensão e da corrente na fase A do circuito CAU-01. (a) antes do contador de descargas; (b) após o contador.....	153
Figura 4.53: Formas de onda de tensão e da corrente na fase B do circuito CAU-01. (a) antes do contador de descargas; (b) após o contador.....	153
Figura 4.54: Formas de onda de tensão e da corrente na fase C do circuito CAU-01. (a) antes do contador de descargas; (b) após o contador.....	154
Figura 5.1: Defasagem da corrente em relação à tensão do pára-raios A1	161
Figura 5.2: Defasagem da corrente em relação à tensão do pára-raios A5	162
Figura 5.3: Gráfico da 3ª H da corrente em função da 3ª H na tensão, para os ângulos de fase 0 e 150 graus. Pára-raios A1.....	170
Figura 5.4: Gráfico da amplitude da corrente de 3ª H contida na corrente de fuga em função da 3ª H na tensão de operação. O gráfico foi obtido através de medições. A reta e a curva têm origem no mesmo ponto (30 μ A), que foi obtido com 3ª H na tensão igual a zero. φ é o ângulo de fase entre a 3ª H e a componente fundamental. Fonte: Heinrich e Hinrichsen [28]......	171
Figura 5.5: Montagem dos componentes internos dos pára-raios.	173
Figura 5.6: Resultado do levantamento da característica $V \times I$ dos resistores equalizadores do pára-raios B5.....	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Número de pára-raios considerados defeituosos por Shaw e Holgreen.	47
Tabela 2.2: Sumário dos métodos de diagnóstico de acordo com o WG 10, TC 37 da IEC....	62
Tabela 2.3: Propriedades dos métodos da medição da corrente de fuga no campo, de acordo com o WG 10, TC 37 da IEC.	63
Tabela 4.1: Dados dos pára-raios.	101
Tabela 4.2: Valores de tensão disruptiva dos pára-raios do fabricante A.	103
Tabela 4.3: Valores de tensão disruptiva dos pára-raios do fabricante B.....	103
Tabela 4.4: Valores da tensão de radiointerferência nos pára-raios do fabricante A (tensão nominal 85 kV).	105
Tabela 4.5: Resultados da medição da tensão de radiointerferência e nível de ionização interna nos pára-raios do fabricante B (tensão nominal 132 kV).	105
Tabela 4.6: Resultados da medição da corrente de fuga.....	106
Tabela 4.7: Resultados da medição da resistência de isolamento.	110
Tabela 4.8: Resultados obtidos no ensaio de medição de temperatura através do termovisor.	111
Tabela 4.9: Resultados da inspeção visual	116
Tabela 4.10: Tensão de radiointerferência do conjunto de centelhadores 1.....	125
Tabela 4.11: Tensão de radiointerferência do conjunto de centelhadores 3.....	126
Tabela 4.12: Tensão de radiointerferência do conjunto de centelhadores 4.....	126
Tabela 4.13: Tensão de radiointerferência do conjunto de centelhadores 6.....	127
Tabela 4.14: Valores da componente de terceira harmônica da corrente dos resistores dos conjuntos de centelhadores.....	130

Tabela 4.15: Medição da corrente de fuga e cálculo de 3 ^a H, variando-se a amplitude e o ângulo de fase da 3 ^a H da tensão, em 51 kV, para a amostra A1.	134
Tabela 4.16: Resultado das medições na base do pára-raios.	140
Tabela 4.17: Medição da corrente de fuga e da 3 ^a H da fase B do circuito CAU-02 (valores eficazes).	142
Tabela 4.18: Medições das correntes induzidas na estrutura de alumínio.	146
Tabela 4.19: Resultado da comparação entre o instrumento DIAG e o resistor “shunt” (valores eficazes).	147
Tabela 4.20: Resultados das medições do circuito CAU-02 (ZnO) (valores eficazes).	152
Tabela 4.21: Resultados das medições da corrente de fuga dos pára-raios do circuito CAU-01 (SiC) (valores eficazes).	154
Tabela 4.22: Resultados das medições da corrente de fuga dos pára-raios do circuito JAG-01 (SiC) (valores eficazes).	155
Tabela 4.23: Resultados das medições da corrente de fuga dos pára-raios do circuito JAG-01 (SiC) (valores eficazes).	155
Tabela 5.1: Valores de tensão disruptiva à frequência industrial e de impulso atmosférico..	157
Tabela 5.2: Comparação dos valores de tensão disruptiva à frequência industrial com os valores da resistência de isolamento.	159
Tabela 5.3: Medição da corrente de fuga.	160
Tabela 5.4: Critérios de avaliação na medição de termovisão.	163
Tabela 5.5: Valores da tensão de radiointerferência e termovisão dos pára-raios (fabricantes A e B).	164
Tabela 5.6: Comparação dos resultados.	166
Tabela 5.7: Resultados da medição da corrente de fuga e cálculo de sua componente de terceiro harmônico, com tensão aplicada de 51 kV (pára-raios A1).	169

Tabela 5.8: Valores da 3ª H da corrente e a tensão de radiointerferência para resistores equalizadores do pára-raios B5.	176
---	-----

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AS	Australian Standard
CIGRÉ	Council International dês Gran Réseaux Électriques
CISPR	Comitê International Spécial dês Pertubations Radioélectriques
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LCM	Leakage Current Monitor
NBR	Norma Brasileira Registrada

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	graus celsius
pC	picocoloumbs
Hz	hertz
kV	quilovolts
μA	microampère
MHz	megahertz
Torr	Torricelli
mmHg	milímetros de mercúrio
dB	decibel
kA	quiloampère
T ₁	tempo de frente
T ₂	tempo de cauda
Ω	ohm
pF	picofarad
kHz	quilohertz
μV	microvolt
kVA	quilovoltampère
mA	miliampère
MΩ	megaohm
V	volt
SiC	Carboneto de silício
ZnO	Óxido de zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	26
1.1 Objetivo	28
1.2 Estrutura do trabalho	28
 2. ESTADO DA ARTE.....	30
2.1 Considerações gerais	30
2.2 Pára-raios de SiC: Aspectos Construtivos e de Funcionamento	32
2.2.1 Tipos construtivos de centelhadores.....	34
2.2.2 Características do bloco de carboneto de silício (SiC).....	40
2.2.3 Invólucro.....	41
2.2.4 Princípio de funcionamento do pára-raios de SiC.....	42
2.3 Técnicas de diagnóstico utilizados em pára-raios	Erro! Indicador não definido.
2.4 Análise dos métodos empregados para o monitoramento de pára-raios.	68
 3. METODOLOGIA.....	70
3.1 Considerações gerais	70
3.2 Tensão disruptiva de impulso atmosférico	73
3.3 Tensão disruptiva à frequência industrial a seco	76
3.4 Medição da tensão de radiointerferência	79
3.5 Medição da corrente de fuga total	85
3.6 Medição da resistência de isolamento	95
3.7 Medição da temperatura com a termovisão.....	96
3.8 Medições em campo	97
3.8.1 Considerações gerais	97
3.8.2 Primeira medição na subestação de Paraibuna.....	99
3.8.3 Segunda medição na subestação de Paraibuna.....	99

4. INVESTIGAÇÕES REALIZADAS NO LABORATÓRIO E NO CAMPO	101
4.1 Identificação dos pára-raios.....	101
4.2 Tensão disruptiva de impulso atmosférico e à frequência industrial	102
4.3 Medição da tensão de radiointerferência	104
4.4 Medição da corrente de fuga total	106
4.5 Medição da resistência de isolamento	110
4.6 Medição de temperatura com termovisor	110
4.7 Desmontagem dos pára-raios.....	113
4.8 Componentes internos	120
4.8.1 Levantamento da curva $V \times I$ dos resistores equalizadores dos pára-raios	121
4.8.2 Medição da tensão de radiointerferência nos centelhadores	124
4.8.3 Estudo da influência da 3ª H da tensão na medição da 3ª H da corrente de fuga	127
4.9 Medições da corrente de fuga em campo	135
4.9.1 Primeira medição na Subestação de Paraibuna	135
4.9.2 Investigações em laboratório	145
4.9.3 Segunda medição na subestação de Paraibuna	147
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	157
5.1 Tensão disruptiva dos pára-raios	157
5.2 Medição da resistência de isolamento	158
5.3 Medição da corrente de fuga total	160
5.4 Tensão de radiointerferência e termovisão	163
5.5 Comparação entre as técnicas de diagnóstico na avaliação dos pára-raios	166
5.6 Influência da 3ª H da tensão na 3ª H da corrente.....	168
5.7 Análise dos resultados da desmontagem dos pára-raios.....	172
5.8 Análise dos resultados dos levantamentos das curvas características e do expoente de não linearidade.....	174

5.9	Relação entre a componente de terceira harmônica na corrente de fuga e a tensão de radiointerferência.....	175
5.10	Principais observações.....	176
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....		179
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		183

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência estão sujeitos a sobretensões, que podem ser causadas por agentes internos ao sistema, como por exemplo, no fechamento de circuitos, ou externos, como descargas atmosféricas. Diferentemente do primeiro tipo, as descargas atmosféricas são fontes de sobretensões que podem ultrapassar, em muito, os níveis básicos de isolamento dos equipamentos que compõe o sistema elétrico. Estas sobretensões podem ocasionar, assim, desligamentos não programados e eventuais danos aos equipamentos. Como consequência, as concessionárias de energia poderão arcar com custos consideráveis, sejam estes devidos a manutenção ou substituição dos equipamentos atingidos, o não faturamento da energia que deixou de ser entregue, entre outros. Os índices de qualidade de energia podem ser comprometidos, podendo ocasionar às concessionárias pesadas multas, além de possibilidade de indenização aos consumidores [1]. Estima-se que no Brasil o número de mortes por descargas atmosféricas seja de 200 pessoas e o prejuízo material de US\$ 500 milhões por ano [2].

Não é possível eliminar as fontes de sobretensões, mas o seu controle pode ser obtido através da blindagem dos circuitos de transmissão, disjuntores equipados com resistores de inserção para limitação das sobretensões de circuito aberto, centelhadores, pára-raios, entre outros.

Dentre os equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos de potência, os pára-raios são considerados estratégicos, pois contribuem decisivamente para a continuidade do fornecimento de energia elétrica [3]. No Brasil há basicamente dois tipos de pára-raios, de diferentes tecnologias, instalados no sistema elétrico: os pára-raios de carboneto de silício (SiC) e os pára-raios de óxido metálico, mais comumente de óxido de zinco (ZnO). Os primeiros são mais antigos e de tecnologia ultrapassada, o segundo tipo é a evolução do primeiro e apresenta uma série de vantagens.

Portanto, a substituição dos pára-raios de SiC pelos de ZnO é desejável. No entanto, a substituição imediata de todos os pára-raios requer muito investimento. Em um levantamento feito em 2004, dos cerca de 19.000 pára-raios que compunham os sistemas elétricos das classes de 34,5 a 750 kV, 64% eram de carboneto de silício, com tempo de fabricação médio superior a 21 anos [3]. Por conseguinte, o desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos pára-raios de SiC torna-se necessária por dois motivos:

- como o tempo de instalação destes equipamentos é muito longo, estes podem apresentar anomalias que podem levar a uma falha. Neste caso, há possibilidades de ocorrer explosões, pondo em risco a vida dos operadores das subestações e das equipes de manutenção, além de danos aos equipamentos instalados ao redor, em especial o transformador de força, que representa um custo muito alto nessas instalações;
- as avaliações feitas nestes equipamentos podem auxiliar as concessionárias na tomada de decisões e na elaboração de um programa de substituição dos pára-raios de SiC pelos de ZnO, priorizando aqueles que estiverem em pior estado.

Os métodos de diagnóstico dos pára-raios de ZnO foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos, entretanto, quanto aos pára-raios de SiC, não há um consenso a respeito do assunto, tanto que a norma IEC 60099-5 - Selection and application recommendations de 2000 [4] não fornece nenhuma recomendação a respeito de diagnóstico de pára-raios de SiC.

A IEC 60099-5 recomenda diversos métodos para a avaliação de pára-raios de ZnO, dentre estes, o método da medição da corrente de fuga com análise da sua componente de terceira harmônica. Este método é particularmente útil porque a corrente de fuga contém informações a respeito dos seus componentes internos e não é necessária a retirada dos pára-raios das instalações para execução das medições. Isto se torna interessante para as concessionárias de energia, pois não há a necessidade de desligamentos programados, diminuindo assim os custos destas avaliações.

Ressalta-se que a concessionária tem dificuldades na programação de desligamentos em função de recomendações muito rígidas da ANEEL [1]. Portanto, métodos de diagnóstico de pára-raios que não necessitem de desligamentos são extremamente desejáveis. Por este motivo, a medição da corrente de fuga com a análise da sua componente de terceira

harmônica, preferencialmente através de uma metodologia simples, pode ser uma ferramenta útil na avaliação dos pára-raios de SiC instalados no campo.

1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo é o de contribuir para o aprimoramento da metodologia de avaliação dos pára-raios de SiC através da aplicação da medição da corrente de fuga, analisando-se a componente de terceira harmônica desta corrente. Neste trabalho são considerados pára-raios de 88 e 138 kV, os quais foram submetidos às técnicas de diagnóstico normalmente utilizadas pelas concessionárias de energia.

1.2 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 contém uma apresentação sobre a importância dos pára-raios nos sistemas elétricos de potência e um breve histórico da evolução desses equipamentos. É apresentada também uma breve descrição dos aspectos construtivos e do princípio de funcionamento dos pára-raios de SiC. Na sequência são apresentados alguns trabalhos a respeito do diagnóstico e monitoramento destes equipamentos em campo.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada neste trabalho. São descritos os pára-raios estudados, os procedimentos utilizados nas investigações de laboratório, os seus requisitos e critérios, bem como os estudos conduzidos nos componentes internos desses equipamentos. Na sequência, é apresentada uma breve descrição dos aspectos teóricos da corrente de fuga dos pára-raios e dos métodos de aquisição e tratamento destes sinais. Por fim, é apresentada a metodologia empregada na medição da corrente de fuga total de pára-raios instalados em uma subestação.

O Capítulo 4 contém os resultados obtidos nas investigações conduzidas nos pára-raios completos e nos seus componentes internos. São apresentados também os resultados obtidos na medição da corrente de fuga no campo.

No Capítulo 5 são apresentadas as análises dos resultados obtidos, considerando-se as diversas técnicas de diagnóstico utilizadas no laboratório.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

Este capítulo contém os aspectos construtivos e de funcionamento dos pára-raios a carboneto de silício (SiC). Na sequência, serão apresentados os principais meios de avaliação dos pára-raios em campo.

2.1 Considerações gerais

Os sistemas elétricos de potência estão sujeitos a vários tipos de sobretensões, que impõe severas solicitações às isolações dos equipamentos das linhas e subestações resultando em desligamentos não programados e eventuais danos nos equipamentos elétricos. Em consequência, os índices de qualidade referentes ao fornecimento de energia elétrica são comprometidos e podem envolver custos consideráveis para as concessionárias, tanto do ponto de vista da energia não fornecida quanto dos custos de manutenção, reparo ou reposição do equipamento danificado, além da possibilidade de indenizações aos consumidores.

Um dos dispositivos utilizados na proteção contra surtos devido a descargas atmosféricas ou manobras são os pára-raios, sendo conectados entre a linha e o potencial de terra, próximos ao equipamento protegido. Um pára-raios a carboneto de silício deve ter o seguinte comportamento:

a) atuar como um isolador, conduzindo uma corrente de no máximo alguns miliampères na tensão de serviço;

- b) mudar o seu comportamento rapidamente e atuar como um condutor com capacidade de conduzir correntes da ordem de milhares de ampères – apresentando uma tensão resultante menor do que a tensão suportável do equipamento protegido;
- c) extinguir a corrente do sistema de potência (corrente subsequente) após a eliminação do surto atmosférico ou de manobra;
- d) ter o valor de tensão disruptiva de impulso atmosférico menor possível, para garantir o máximo de proteção e;
- e) ter o valor de tensão disruptiva à frequência industrial maior possível, para evitar interrupções indevidas por ocasião de pequenas sobretensões operacionais.

A partir da década de 70 [5], uma nova tecnologia de construção de pára-raios foi utilizada no mercado. Esta nova tecnologia substituiu os blocos de carboneto de silício (SiC) pelos blocos de óxido de zinco (ZnO). Esta nova tecnologia apresenta como vantagens [5]:

- Construção mais simples que os pára-raios de SiC, visto que não há necessidade da utilização de centelhadores entre a linha e os blocos de ZnO, uma vez que estes são capazes de suportar a tensão fase-terra do sistema;
- Tempo de fabricação menor que os pára-raios de SiC, uma vez que nestes últimos a construção dos centelhadores era de uma forma artesanal, implicando também em variação de sua tensão disruptiva;
- Como não necessitam de centelhadores são mais estáveis que os pára-raios de SiC.

Atualmente as concessionárias de energia possuem em seus sistemas pára-raios de ambas as tecnologias, sendo que é esperado o aumento no número de pára-raios de ZnO, haja vista que não são mais produzidos pára-raios de SiC para sistemas de transmissão de energia e também por estes estarem no final de sua vida útil ou até mesmo acima desta. No entanto, realizar a substituição imediata de todos os pára-raios de SiC pelos de ZnO é inviável economicamente. Assim sendo, torna-se necessário o estabelecimento de um critério para esta substituição, priorizando-se aqueles mais críticos, de modo a garantir o fornecimento de energia aos consumidores com índices de qualidade aceitáveis.

O monitoramento destes equipamentos é desejável, uma vez que estes podem falhar tanto na ocorrência de um surto, como durante a sua operação normal na tensão do sistema. No caso de falha do pára-raios, as consequências podem ser muito sérias, considerando-se os riscos aos operadores nas subestações e às equipes de manutenção, interrupções no sistema elétrico, além de danos aos equipamentos instalados nas suas proximidades. Isto é particularmente importante no caso dos pára-raios de SiC, pois, como explicado anteriormente, estes encontram-se em operação por um período muito longo, até mesmo acima da sua vida útil.

2.2 Pára-raios de SiC: Aspectos Construtivos e de Funcionamento

Os pára-raios de carboneto de silício basicamente são compostos por centelhadores ligados em série com blocos de material inerte dopados com carboneto de silício.

O centelhador tem duas funções:

- Isolar a linha na qual os blocos de SiC estão conectados, uma vez que estes não são capazes de suportar a tensão do sistema;
- Atuar como uma chave quando há ocorrência de um surto na linha, colocando os blocos de SiC em contato com o surto, a fim de escoá-lo para a terra, protegendo assim o sistema;
- Auxiliar na extinção do arco após a passagem do surto.

Os pára-raios deste tipo normalmente não usam apenas um centelhador. Os equipamentos são constituídos de vários centelhadores em série, que aqui chamaremos de conjunto de centelhadores. Segundo Lat, Carr e Kortschinski [6], os centelhadores que compõe o conjunto são constituídos por discos de metal, que podem ser feitos de latão, cobre ou aço inoxidável, separados por espaçadores de cerâmica. Deste modo, os centelhadores são formados pelos discos separados pelos espaçadores, que podem ser tratados como módulos. Alguns exemplos de montagem dos centelhadores podem ser verificados na Figura 2.1. A tensão disruptiva de cada módulo, segundo os autores, varia entre 1 e 1,5 kV. As características de ruptura do conjunto de centelhadores determinam o nível de proteção do pára-raios.

Figura 2.1: Exemplos de montagem de módulos de centelhadores. Fontes: (a) Adaptado do catálogo da ASEA [7]; Adaptado de Brown Boveri Review [8].

Na Figura 2.1 (a) são mostrados os resistores de equalização, que são montados tendo ao lado espaçadores de porcelana, cuja função é auxiliar a manter a estrutura que contém os centelhadores estável. A Figura 2.1 (b) mostra a montagem dos centelhadores adotada por outro fabricante de pára-raios. Este fabricante montou os centelhadores em peças cerâmicas e estas peças foram sobrepostas e envolvidas por uma bandagem, formando um conjunto de centelhadores. Este conjunto possui em paralelo um resistor de equalização. A mesma figura mostra o posicionamento das bobinas que auxiliam a interrupção da corrente subsequente do sistema. Este conjunto de centelhadores possui uma câmara para a formação do arco no instante do escoamento do surto para a terra.

Segundo Lat, Carr e Kortschinski [6], o uso de vários módulos de centelhadores em série para a montagem do conjunto de centelhadores apresenta as seguintes vantagens:

- Diferentes pára-raios para diferentes classes de tensão podem ser montados variando-se o número de módulos de centelhadores, facilitando-se as montagens;
- Aumento da capacidade de interrupção da corrente subsequente (corrente fornecida pelo sistema após a passagem do surto), pois pequenos centelhadores contendo

grandes eletrodos de resfriamento perto da coluna do arco voltaico facilitam a de-
ionização do centelhador;

- Eletrodos múltiplos aumentam a queda de tensão do arco, aumentando assim a capacidade de interrupção da corrente subsequente;
- A conexão em série de vários centelhadores melhora o tempo de resposta com relação a surtos;
- A resposta do pára-raios para diferentes formas de onda pode ser modificada pelo controle da distribuição de tensão entre os módulos de centelhadores.

Os pára-raios de distribuição possuem centelhadores denominados passivos, sendo a distribuição de tensão entre os módulos de centelhadores desses pára-raios adequada, garantindo o bom funcionamento do equipamento. Para classes de tensão maiores, a distribuição de tensão entre os módulos de centelhadores não é uniforme, conseqüentemente, é necessário fazer o controle desta distribuição, o que será tratado logo a seguir.

Os blocos de carboneto de silício têm propriedades de resistores não lineares, ou seja, o valor de sua resistência varia com a tensão. Na tensão do sistema, eles possuem valor de resistência de alguns milhares de ohms. Como não são capazes de dissipar energia, eles necessitam ficar isolados da tensão do sistema com a utilização dos conjuntos de centelhadores. Maiores detalhes da construção dos blocos serão dadas na seção 2.2.2.

2.2.1 Tipos construtivos de centelhadores

Basicamente, temos três tipos de centelhadores:

- Passivos;
- Parcialmente ativos;
- Ativos.

Os módulos de centelhadores que compõe o conjunto de centelhadores podem ser representados eletricamente por um capacitor. Segundo Verdolin [9], além das capacitâncias entre os módulos de centelhadores existem outras capacitâncias presentes, chamadas de

capacitâncias parasitas, que estão presentes em vários pontos do pára-raios. Um exemplo de capacitâncias parasitas pode ser visto na Figura 2.2. As capacitâncias C_2 , C_3 , C_4 e C_5 são capacitâncias parasitas. As capacitâncias C_2 e C_4 se formam entre os pontos 1 e 2, respectivamente, para o potencial de terra, enquanto que as capacitâncias parasitas C_3 e C_5 se formam entre dois pontos do próprio equipamento.

Figura 2.2: Capacitâncias existentes no pára-raios. Fonte: Verdolin [9].

A amplitude de corrente em cada capacitor é função da variação da tensão e do valor de cada capacitor, conforme a equação:

$$i = C \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

Onde: i : corrente;

C : capacitância

dV/dt : taxa de variação da tensão em relação ao tempo.

Quando ocorre um surto, este possui altas taxas de variação de tensão, fazendo com que a corrente capacitiva no primeiro módulo de centelhador aumente, causando a interrupção neste centelhador e nos módulos seguintes por efeito cascata.

Nos pára-raios de distribuição, as capacitâncias parasitas para o potencial de terra e entre dois pontos do próprio equipamento causam pouca influência na distribuição da tensão entre os módulos de centelhadores, visto que a quantidade de módulos não é muito grande. Assim, não há necessidade de se controlar a distribuição de potencial entre os módulos de centelhadores.

Conforme a tensão do sistema aumenta, há a necessidade de se aumentar o número de módulos de centelhadores, bem como o número de blocos de SiC. Em função de dificuldades de fabricação, transporte, armazenagem, entre outros, os pára-raios são normalmente divididos em módulos. Cada módulo é um pára-raios completo, e a montagem destes módulos, um sobre os outros, pode formar vários pára-raios para diferentes níveis de tensão do sistema. Isto ocasiona aumento na altura do equipamento e, conseqüentemente, há o aumento do número de capacitâncias parasitas, bem como o aumento do valor destas. Na Figura 2.3 é mostrado um esquema elétrico da distribuição de tensão no pára-raios. Nesta figura foram desprezadas as capacitâncias formadas entre dois pontos do pára-raios.

Figura 2.3: Distribuição de tensão em um pára-raios. V_N : tensão sobre o terminal do pára-raios; $V_1, V_2, \dots, V_n$: quedas de tensão sobre as capacitâncias dos centelhadores; C_c : capacitância dos centelhadores, $C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pn}$: capacitâncias parasitas para a terra, $I_1, I_2, \dots, I_n$: correntes que fluem pelas capacitâncias dos centelhadores, $I_{cp1}, I_{cp2}, \dots, I_{cpn}$: correntes que fluem pelas capacitâncias parasitas. Fonte: Adaptado de Verdolin [9].

Analisando-se o diagrama da Figura 2.3, tem-se pela 1ª Lei de Kirchhoff (nó 1):

$$I_n = I_{n-1} + I_{cp_{n-1}} \quad (2.2)$$

$$I_n = j\omega C_c V_n \quad (2.3)$$

$$I_{n-1} = j\omega C_c V_{n-1} \quad (2.4)$$

$$I_{cp_{n-1}} = j\omega C_{p_{n-1}} (V_N - V_n) \quad (2.5)$$

$$j\omega C_c V_n = j\omega C_c V_{n-1} + j\omega C_{p_{n-1}} (V_N - V_n) \quad (2.6)$$

$$C_c V_n = C_c V_{n-1} + C_{p_{n-1}} (V_N - V_n) \quad (2.7)$$

$$V_n = V_{n-1} + \frac{C_{p_{n-1}}}{C_c} (V_N - V_n) \quad (2.8)$$

Assim, se a corrente I_n for muito grande, a diferença de potencial sobre o primeiro módulo de centelhador será maior que a tensão disruptiva deste, ocasionando disrupção neste módulo, o que ocasiona a disrupção em cascata dos outros módulos. Portanto, há a necessidade de se fazer o controle desta diferença de potencial.

A distribuição de tensão entre os módulos de centelhadores deve ser igual. Isto é conseguido

se o coeficiente $\frac{C_{p_{n-1}}}{C_c}$ da Equação (2.8) for igual a zero, ou seja, as capacitâncias parasitas

$C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pn}$ devem ser iguais a zero. Na prática isto é impossível, assim torna-se necessário outro artifício para o controle da distribuição de potencial entre os módulos.

Este artifício é a adição de um resistor entre os eletrodos dos módulos de centelhador. Este resistor, segundo Verdolin [9], é um resistor não linear que obedece a Equação (2.9)

$$i = k \times v^n \quad (2.9)$$

Onde k = constante,

n : expoente de não-linearidade

Para $n = 1$, o resistor é linear puro. Segundo Verdolin [9], alguns fabricantes adotam n com valor entre 1,1 e 1,3.

Podemos verificar o efeito da adição do resistor equalizador através da Figura 2.4. Com a adição deste resistor, os módulos de centelhadores tornam-se do tipo parcialmente ativo.

Figura 2.4: Distribuição de tensão no pára-raios com centelhador parcialmente ativo. V_N : tensão sobre o terminal do pára-raios ; R : resistor não linear (equalizador); V_R : queda de tensão sobre o resistor não linear, C_C : capacitância dos centelhadores, $C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pn}$: capacitâncias parasitas para a terra; $I_{c1}, I_{c2}, \dots, I_{cn}$: correntes que fluem pelas capacitâncias dos centelhadores, I_R : corrente que flui pelos resistores não lineares, $I_{cp1}, I_{cp2}, \dots, I_{cpn}$: correntes que fluem pelas capacitâncias parasitas. Fonte: Adaptado de Verdolin [9].

Com a adição deste resistor, a distribuição de potencial é dada pela queda de tensão sobre o resistor equalizador. Segundo Verdolin, os resistores espaçadores podem entrar no lugar das hastes de porcelana, assim eles também têm a função de manter o espaçamento entre os eletrodos dos módulos de centelhadores, recebendo assim o nome de resistores equalizadores espaçadores. Estes resistores não exercem nenhuma função na hora da passagem de um surto, visto que, pela Equação (2.1), a corrente capacitiva irá aumentar muito por causa da alta taxa de crescimento da tensão do surto, fazendo os módulos de centelhadores atuarem.

Com o aumento da tensão do sistema, os potenciais dos módulos dos centelhadores podem ficar muito desbalanceados, mesmo com a adição do resistor para equalização de potencial.

Isto acontece quando o pára-raios é composto por vários módulos, de modo que as capacitâncias parasitas dos módulos superiores são muito maiores que as capacitâncias dos módulos inferiores. Para a equalização do potencial neste caso, acrescenta-se um anel na parte superior do pára-raios, de modo a inserir capacitâncias parasitas entre a linha e os módulos de centelhadores. A Figura 2.5 mostra a adição de um anel metálico em um pára-raios com a indicação das capacitâncias parasitas.

Figura 2.5: Anel metálico para o controle da distribuição de potencial em um pára-raios.

Fonte: Verdolin [9].

Portanto, as capacitâncias parasitas do eletrodo para a linha e para a terra funcionam como um derivador de corrente capacitiva sobre os primeiros módulos de centelhadores, fazendo com que a corrente capacitiva sobre estes elementos seja menor, portanto, a distribuição de potencial possa ser controlada a fim de que não haja descarga disruptiva sobre estes módulos na tensão nominal do sistema.

Por fim, os centelhadores ativos recebem este nome por atuarem na passagem de um surto da linha para a terra de modo a facilitar a extinção da corrente subsequente. Isto é conseguido pela adição de bobinas nas extremidades do conjunto de centelhadores e também de um centelhador auxiliar, chamado de centelhador de passagem ou de “by-pass”. A função das

bobinas é de criar um campo magnético com a passagem da corrente subsequente do sistema. Este campo magnético interagirá com o campo magnético desta mesma corrente nos centelhadores, fazendo com que o arco formado nos centelhadores seja deslocado para uma região mais fria deste, aumentando a sua capacidade de deionização e, conseqüentemente, facilitando a extinção do arco. Alguns fabricantes adotaram a utilização de imãs entre os centelhadores no lugar das bobinas para a obtenção do mesmo efeito. Na seção 2.2.4 será mostrado o funcionamento do pára-raios, detalhando melhor a atuação das bobinas e do centelhador de passagem.

2.2.2 Características do bloco de carboneto de silício (SiC)

Segundo Verdolin [9], a função dos blocos de resistores não lineares é inserir uma resistência em série com os centelhadores, entre a linha e a terra, que é somada à resistência do arco no centelhador, limitando a corrente subsequente a um valor determinado que possa ser interrompida pelos centelhadores.

Conforme Lat, Carr e Kortschinski [6] descrevem, os blocos são constituídos de grãos de tamanho uniforme de carboneto de silício dopado, montado em cerâmica inerte de forma cilíndrica e ligado a esta cerâmica com pressão e calor. As características de tensão e corrente requeridas são obtidas através da seleção entre o tamanho do bloco, forma, dopagem, tamanho do cristal de carboneto de silício e a proporção de cristais no bloco de cerâmica. Os cristais de carboneto de silício mais novos foram montados através do processo de sinterização em fornos que chegam a 1000°C.

Lat, Carr e Kortschinski [6] descrevem também que as características tensão-corrente do bloco são ditadas pelos pontos de conexão entre os grãos de SiC com o bloco. Quando uma corrente alta passa através dele, há o aquecimento nos pontos de contato entre os grãos devido à reduzida área de contato. A temperatura do ponto de contato é determinada pela circulação de calor no volume do cristal de SiC, o qual está a uma temperatura relativamente baixa. Conseqüentemente, há uma clara relação entre a magnitude da corrente, forma de onda e temperatura no ponto de contato. O cristal de SiC tem um coeficiente de resistência negativo em função da temperatura, ou seja, sua resistência diminui com o aumento de temperatura.

Conseqüentemente, a resistência total do bloco diminui com o aumento da corrente, resultando em um resistor não linear único.

Estas características são cuidadosamente dimensionadas, a fim de prover a limitação de tensão para as formas de onda das descargas de corrente normalizadas, enquanto que a corrente à frequência industrial é mantida em valores suficientemente baixos, permitindo a interrupção de corrente através dos centelhadores.

Lat, Carr e Kortschinski listam alguns problemas que podem ocorrer com os blocos de SiC:

- Correntes provenientes de surtos atmosféricos muito longos;
- Surtos de manobra de magnitude muito alta.

Estes podem causar aquecimento excessivo dos blocos, fazendo com que a o valor da sua resistência fiquem em valores muito baixos, conseqüentemente, a corrente assume valores muito altos temporariamente. Se isto ocorrer várias vezes, concentrações de corrente podem ocorrer em um canal muito pequeno em alguma não-uniformidade na composição do bloco. Estas não-uniformidades, segundo os autores, criam pontos de aquecimento localizado que diminuirão a resistência do bloco e facilitará futuras concentrações de corrente. Os autores nomearam este fenômeno de “tunelamento” através de queimaduras nos blocos. Segundo ainda os mesmos autores, mesmo que o aquecimento seja uniforme, o aquecimento anormal dos blocos pode causar problemas por causa do decaimento da resistência total do bloco. Se a resistência do bloco cair muito, o conjunto de centelhadores pode não ser capaz de interromper a corrente à frequência industrial e o pára-raios pode falhar. Em suma, os blocos de SiC podem ser destruídos se forem sujeitos a valores elevados de energia além daqueles para os quais eles foram especificados, mesmo possuindo uma pequena margem de sobrecarga inerente.

2.2.3 Invólucro

Os centelhadores e blocos de resistores não lineares são encapsulados em invólucros de porcelana, que propiciam proteção mecânica e agem como um bom isolante sujeito às diversas condições climáticas em campo, assim como qualquer outro equipamento. Em

relação à proteção mecânica, a principal dificuldade encontrada é a estanqueidade. Quando a umidade aumenta no interior da estrutura dos centelhadores ocorre a corrosão dos eletrodos que podem ser curto-circuitados, redistribuindo a tensão pelos outros centelhadores. Isto diminui a capacidade de interrupção da corrente subsequente, podendo ocorrer descarga disruptiva dos centelhadores caso essa redistribuição da tensão não seja uniforme. Na função de isoladores, o invólucro está sujeito a contaminação que, na presença de umidade, pode apresentar uma corrente de fuga elevada pela superfície da isolação levando, em alguns casos, a uma disrupção externa ou a atuação indevida do pára-raios.

2.2.4 Princípio de funcionamento do pára-raios de SiC

A sequência de eventos que ocorre quando um impulso de corrente é aplicado no pára-raios com centelhador ativo é a seguinte:

- 1) A tensão de 60 Hz é aplicada continuamente fazendo percorrer uma corrente resistiva através do resistor espaçador e outra capacitiva entre os eletrodos. Essas correntes promovem uma distribuição uniforme da tensão no centelhador (Figura 2.6a);
- 2) Um impulso de corrente é aplicado na linha e uma onda de tensão com elevada taxa de crescimento trafega até atingir o pára-raios;
- 3) A alta taxa de crescimento da onda de tensão causa descargas disruptivas em cascata nos centelhadores. Devido à indutância das bobinas, o surto passa pelos centelhadores de passagem ou “by-pass” (Figura 2.6b);
- 4) O impulso de corrente começa a fluir pelos centelhadores e pelos blocos (Figura 2.6b);
- 5) Quando o impulso se aproxima do zero, a corrente subsequente começa a fluir pelo pára-raios. A taxa de crescimento desta corrente é muito menor que a da corrente do surto, portanto a corrente subsequente começa a circular pelas bobinas (o arco no centelhadores de passagem ou de “by-pass” se extingue), formando um campo magnético. Este campo magnético interage com a corrente subsequente do sistema, e essa interação causa o alongamento do arco nos centelhadores facilitando a sua extinção (Figura 2.6c).
- 6) Após a extinção da corrente subsequente, o pára-raios está pronto para uma nova operação (Figura 2.6d).

Figura 2.6: Sequência de eventos que ocorre quando um impulso de corrente é aplicado no pára-raios com centelhador ativo. O intervalo de tempo entre os diagramas é da ordem de 2,5 ms. N_p : Nível de proteção dos equipamentos, u_p : tensão residual, u_L : queda de tensão sobre a resistência de arco dos centelhadores, u_R : queda de tensão sobre os blocos de SiC, u : tensão do sistema, i_s : corrente que passa pelo pára-raios, u_a : tensão que faz o pára-raios atuar, u_s : impulso de tensão, M : campo magnético gerado pela passagem da corrente subsequente.

Fonte: Adaptado de Brown Boveri Review [8].

Como descrito no item 2.3.1, a tensão do sistema distribui-se pelos módulos de centelhadores em paralelo com os resistores. Os blocos ficam sujeitos a valores de tensão muito baixos em suas extremidades. Segundo Verdolin [9], o valor dos resistores equalizadores na tensão do sistema varia entre 1 a 2 M Ω e o valor da resistência dos blocos de SiC da ordem de alguns milhares de ohms.

Após a disrupção dos módulos de centelhadores, os valores se invertem: desta vez são os blocos de SiC que apresentam maior resistência em comparação com a resistência de arco dos módulos de centelhadores.

O escoamento da corrente do surto pelos blocos de SiC faz aparecer entre os terminais do pára-raios a sua tensão residual. Esta tensão residual é determinada em laboratório e é uma característica importante para a escolha destes. A Figura 2.7 mostra um exemplo de curva característica tensão versus corrente desses blocos.

A resistência de arco dos módulos de centelhadores e a resistência dos blocos de SiC são importantes para a passagem da corrente subsequente do sistema e sua extinção. Se aumentarmos a resistência de arco dos centelhadores (que pode ser conseguido através da adição de bobinas nas extremidades do conjunto de centelhadores, por exemplo), a resistência dos blocos de SiC vai aumentar, com isto a corrente subsequente extingue-se mais facilmente.

Figura 2.7: Curva tensão versus corrente do bloco de SiC. u_R é a tensão residual expressa em porcentagem da tensão residual à corrente de descarga nominal, indicada como i_{An} . Fonte:

The Brown Boveri Review [8].

2.3 Técnicas de diagnóstico utilizadas em pára-raios

Muitas concessionárias de energia relatam problemas em pára-raios de SiC e, devido aos elevados custos na substituição imediata pelos de ZnO, elas investem em adequação ou adaptação de metodologias de manutenção preventiva dos pára-raios. Salvo situações em que a relação custo benefício é vantajosa para a empresa, essa substituição não é realizada rapidamente. A seguir, são apresentados alguns estudos obtidos na literatura.

Um dos primeiros trabalhos a tratar do assunto, “Distribution Arrester Research”, de 1981 de Lat e Kortschinski [14] teve como motivação o número elevado de falhas de pára-raios de SiC na rede de distribuição de energia em 25 kV e 27,6 kV, no final da década de 70, no Canadá. Os autores mostram como foram conduzidas as inspeções no campo e investigação através de testes em laboratório.

As inspeções em campo tinham como objetivo fazer um levantamento dos pára-raios de SiC instalados no sistema de distribuição de uma concessionária de energia elétrica. Foram selecionados cerca de 250 pára-raios de várias classes de tensão que foram encaminhados ao laboratório a fim de se investigar as possíveis causas das falhas no campo. Os resultados desta investigação foram que a penetração de umidade foi a maior responsável pelos pára-raios defeituosos, com 85,6% das causas de falhas. Os surtos de correntes elevadas foram responsáveis por uma parcela muito pequena dos defeitos (5,9%), seguido pela contaminação da porcelana por poluição (4,5%) que os autores destacam que aconteceram em áreas bem específicas. Vale ressaltar que em apenas 1,5% das amostras analisadas não foi possível descobrir a causa do defeito. Os autores destacam que os pára-raios daquela época não eram bem selados, haja vista o grande número de pára-raios defeituosos por causa da penetração de umidade.

Os ensaios em laboratório consistiram na análise dos pára-raios retirados do campo, procedendo-se ao ensaio de corrente elevada e ciclo de serviço.

Os autores finalizam o seu trabalho com as seguintes conclusões:

- Atenção especial deveria ser dada com relação à instalação dos pára-raios nas redes de distribuição de energia com tensões de serviço 25 kV e superiores;

- Deveriam ser tomadas providências com relação à penetração de umidade nos pára-raios a fim de se evitar explosões destes equipamentos instalados no campo;
- Acima de tudo, os critérios adotados nas normas vigentes na época deveriam ser revistos, tendo em vista a realização de ensaios mais representativos das condições encontradas no campo.

Em 1985, Shaw e Holmgren [15] realizaram estudos com o objetivo de desenvolver uma metodologia para detecção de pára-raios defeituosos em campo. Com base nos resultados do estudo de Lat e Kortschinski [14], relatado anteriormente, os autores realizaram investigações com vários pára-raios fornecidos por companhias de distribuição de energia elétrica, perfazendo uma amostra representativa dos pára-raios instalados no campo. O objetivo era identificar quais os parâmetros mensuráveis para identificação de pára-raios defeituosos. Na amostra considerada havia pára-raios de SiC e ZnO, que na época da publicação do trabalho, eram recém-chegados ao mercado.

Os autores realizaram esta investigação com base nas seguintes técnicas: radiointerferência conforme a norma NEMA LA-1-1976¹, descargas parciais: medição realizada de maneira convencional² e também através de um sistema de ultrassom; emissão de radiação eletromagnética em banda larga; corrente de fuga; tensão disruptiva à frequência industrial e tensão residual com corrente de 5 kA.

Os critérios adotados pelos autores para identificação de pára-raios defeituosos foram:

- Radiointerferência: 250 μ V a 75% da tensão nominal do pára-raios;
- Descargas parciais: procedimento realizado de maneira convencional 250 pC, medido através do contador em ultrassom ≥ 1.000 contagens;
- Emissão de radiação eletromagnética em banda larga: se havia emissão na faixa de 5 a 200 MHz;

¹ NEMA LA-1-1976 – Test Standard Surge Arresters.

² Maiores detalhes sobre o ensaio de medição de descargas parciais podem ser obtidas consultando-se ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Medição de descargas parciais – Procedimento, Rio de Janeiro, 1981 (NBR 6940).

- Corrente de fuga: pára-raios de SiC corrente de fuga $\geq 600 \mu\text{A}$, pára-raios de ZnO $> 1000 \mu\text{A}$, ambas correntes capacitivas;
- Tensão disruptiva à frequência industrial: deve ser maior que 1,5 vezes a tensão nominal do pára-raios.

Os resultados obtidos por Shaw e Holmgren [15] mostraram que apenas três dos 220 pára-raios ensaiados foram considerados com defeito. Nenhum pára-raios foi considerado reprovado no ensaio de tensão residual com a aplicação de corrente de 5 kA.

Como apenas três dos 220 pára-raios ensaiados foram considerados com defeito, os autores concluíram que este número não era suficiente para a validação da metodologia de detecção de pára-raios defeituosos, sendo assim, provocaram defeitos em outros 65 pára-raios novos, fornecidos por fabricantes e usuários. Os defeitos foram provocados através da adição de umidade dentro dos corpos de prova, injetando-se 3 gramas de água e deixando-os energizados durante um mês ao tempo. Os mesmos testes foram realizados, a menos da tensão residual com 5 kA, uma vez que, no primeiro lote ensaiado, nenhum pára-raios foi considerado defeituoso neste teste.

Os resultados obtidos estão na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Número de pára-raios considerados defeituosos por Shaw e Holmgren.

	Radiointer-ferência (μV)**	Descargas Parciais (pC)*	Corrente de fuga capacitiva $\geq 600\mu\text{A}$*	Disruptiva Freq. Ind. < 1,5 x Tensão Nom.	Cont. de Descargas Parciais ≥ 1.000*	Emissão de Radiação Eletromag. entre 5 a 200 MHz
(1)	0	1	0	0	0	7
(2)	42	51	59	33	33	64
(3)	65	78	91	51	51	98

Notas: (1): refere-se à quantidade de pára-raios com problemas em cada técnica antes da injeção de água e envelhecimento; (2): refere-se à quantidade de pára-raios com problemas em cada técnica após a injeção de água e envelhecimento; (3): refere-se à porcentagem sobre o total das amostras após injeção de água e envelhecimento; * tensão nominal, ** 75% da tensão nominal. Fonte: Adaptado de Shaw e Holmgren [15].

Com base nestes resultados, Shaw e Holmgren [15] concluíram que:

- A técnica de medição da emissão de radiação eletromagnética foi considerada a mais promissora como indicação de pára-raios defeituosos, visto que em 98% dos corpos de prova preparados foi constatada a ocorrência de alguma anomalia. Os autores afirmaram que a medição da emissão de radiação eletromagnética na frequência de 40 MHz provou ser uma técnica eficiente para detecção e localização de pára-raios defeituosos;
- A segunda técnica mais promissora foi a da corrente de fuga, pois foi detectada anomalia em 91% das amostras preparadas. Entretanto, os autores a consideraram menos aconselhável, pois assinalaram que era necessário o “contato” (do original em inglês “contact”) com o cabo de aterramento do equipamento, sem explicitar o que isto significava. Além disso, havia a dificuldade de se comprovar se os valores adotados de corrente capacitiva (600 μA nos pára-raios de SiC e 1000 μA nos pára-raios de ZnO) eram critérios válidos para esta avaliação.

Os autores não deixaram claro qual foi o critério utilizado para o estabelecimento da corrente de fuga capacitiva $\geq 600 \mu\text{A}$, nos pára-raios de SiC, e $> 1000 \mu\text{A}$ capacitiva nos pára-raios de ZnO, como sendo um indicativo de defeito dos pára-raios.

No Brasil, as concessionárias de energia também relatavam problemas com os pára-raios de SiC. No final da década de 1980, Martinez et al [16] publicaram os resultados de uma investigação para uma concessionária de energia.

A metodologia utilizada pelos autores consistiu na seleção de 105 pára-raios que foram enviados para laboratório. Esta seleção utilizou como parâmetros o número de pára-raios instalados por fabricante e local de instalação. As técnicas utilizadas em laboratório foram: tensão disruptiva à frequência industrial, medição da corrente de fuga, tensão disruptiva de impulso atmosférico com forma de onda normalizada, ensaio de tensão residual, ensaios estes realizadas conforme as recomendações das normas NBR 5287 [10] e NBR 5309 [11]. Além destas técnicas, os autores, juntamente com o pessoal da concessionária realizaram em laboratório medições das perdas e resistência de isolamento e termovisão.

Pelos resultados encontrados os autores concluíram que havia uma equivalência entre os resultados dos ensaios de medição da resistência de isolamento, medição das perdas do

dielétrico, medição da corrente de fuga e tensão disruptiva à frequência industrial, sendo que os autores indicaram que estes dois últimos são os mais confiáveis. Eles ressaltam que, em caso de dúvidas com relação aos resultados destes ensaios, deveria ser feito o ensaio de tensão residual.

Os autores recomendaram o acompanhamento de pára-raios instalados em campo através da medição da corrente de fuga. Este acompanhamento não deve se basear em um único valor de corrente, mas sim em uma faixa de valores e o acompanhamento da evolução desta ao longo do tempo.

O trabalho de Martinez et al traz ainda como principais conclusões:

- A decisão da substituição dos pára-raios deve ser tomada com base em valores limites a serem definidos;
- Nem sempre os valores determinados nos ensaios de medição da resistência de isolamento, perdas do dielétrico e da temperatura medida através de termografia significam que o pára-raios está em boas condições;
- As técnicas utilizadas em laboratório revelaram pára-raios com problemas, mas ensaios de campo indicaram condições normais.

O estudo conduziu a uma redução substancial das ocorrências envolvendo pára-raios no sistema da concessionária.

A determinação de parâmetros que deveriam ser levados em consideração para o diagnóstico dos pára-raios de SiC, começou também a ser uma preocupação com relação aos pára-raios de ZnO. No início da década de 1990, os primeiros pára-raios de ZnO estavam completando dez anos em serviço e alguns estudos para avaliação destes equipamentos em campo começaram a ser publicados. Alguns autores desenvolveram métodos para o acompanhamento destes equipamentos no campo com base na medição da corrente de fuga.

Lundquist et al [17] propuseram, em novembro de 1990, um método para a medição da corrente de fuga de pára-raios de ZnO com compensação da componente de terceira harmônica (3^a H) proveniente da tensão do sistema. Esta compensação visa diminuir o erro do cálculo da 3^a H na corrente de fuga, a qual foi proposta como parâmetro para avaliação do

estado dos pára-raios de ZnO. Este método foi batizado pelos autores LCM (Leakage Current Monitor) e consiste de um contador de descargas com transformador de corrente para medição da corrente de fuga, de um sensor de campo para adquirir a forma de onda da tensão do sistema, com os seus componentes harmônicos, e do instrumento onde os cálculos são realizados, considerando-se a compensação da 3^a H do sistema.

O arranjo de montagem do LCM pode ser visto na Figura 2.8.

Figura 2.8: Arranjo de montagem do LCM (Leakage Current Monitor). Fonte: Adaptado de Lundquist et al [17].

Os autores apontam que o método apresenta uma faixa de erro de 20 a 25%. As medições feitas sem o método de compensação podem apresentar erros da ordem de 100%, dependendo da relação de fase entre a 3^a H da tensão e a 3^a H da corrente de fuga do pára-raios. O método proposto foi desenvolvido no âmbito de um fabricante de pára-raios e os resultados tomam por base a corrente resistiva esperada para aquele equipamento, o que evidentemente é válido para os pára-raios dos quais se dispõe desta informação.

Junqueira Filho et al [18] apresentaram um estudo avaliando o desempenho de pára-raios de carboneto de silício em sistemas de transmissão, listando técnicas preventivas utilizadas nas concessionárias e propondo novas metodologias para identificação de defeitos em pára-raios

instalados. O trabalho apresentou alguns fatores de degradação e mecanismos que acarretam na falha dos pára-raios que são:

- perda de estanqueidade e penetração de umidade – causam corrosão nas partes metálicas internas dos pára-raios e a absorção de umidade pelos resistores de equalização de potencial provoca disrupção não uniforme em alguns centelhadores. Nos blocos não lineares a umidade compromete a capacidade de interrupção de corrente;
- contaminação externa da porcelana – causam elevação da corrente de fuga através da superfície do invólucro, acarretando em uma distribuição não uniforme da tensão ao longo do pára-raios e provocando aquecimento danificando os resistores de equalização. Além disso, a formação de bandas secas na superfície da porcelana propicia disrupção de alguns centelhadores, o que pode acarretar em atuações indevidas dos pára-raios;
- degradação do circuito de equalização – como já dito anteriormente, a degradação pode provocar operação indevida dos centelhadores;
- descargas internas (corona) – provocam liberação de gases que alteram a superfície dos blocos dos resistores, propiciando um caminho alternativo para a corrente e com isso dificultando a extinção das correntes de 60 Hz e
- descargas de longa duração ou de alta intensidade – o chaveamento de grandes cargas capacitivas solicita severamente os pára-raios mal dimensionados provocando queima nos blocos dos resistores não lineares.

No estudo, foi verificado pelos autores que apenas uma técnica de diagnóstico não é suficiente, por isso algumas técnicas foram propostas, de modo a complementar a avaliação do pára-raios. As técnicas propostas foram:

- técnicas “off-line”. As técnicas “off-line” são definidas como aquelas em que é necessária a retirada do equipamento instalado para realização dos ensaios. As técnicas “off-line” propostas foram: medição de perdas do dielétrico, medição da resistência de isolamento e tensão disruptiva à frequência industrial. Nos dois primeiros ensaios, para uma determinada tensão, são realizadas comparações das perdas e do valor da resistência do isolamento com os resultados obtidos nos ensaios de aceitação. Para o ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial, os autores

recomendam o uso de uma fonte portátil para a realização deste ensaio no campo, utilizando-se o critério de aprovação da NBR 5287 [10];

- técnicas “on-line”. As técnicas definidas como “on-line” são aquelas em que não há necessidade de se retirar o equipamento para a realização das medições. As técnicas “on-line” propostas foram:
 - a) Medições termográficas: a termografia estava se firmando como uma técnica eficiente na inspeção de outros equipamentos elétricos. Sendo assim, começou-se a usar a termografia para inspeção dos pára-raios, tendo como vantagens a praticidade de uso e a não exigência de desligamento dos equipamentos sob inspeção. Como desvantagens desta técnica, são apontadas no trabalho a falta de critérios na inspeção dos equipamentos e a necessidade de cuidados adicionais nas leituras, uma vez que pequenas diferenças de temperatura poderiam ser indicativos de defeitos nos pára-raios;
 - b) Medição de radiointerferência: os autores apontam a dificuldade em se realizar estas medições no campo em função de interferências e outros ruídos;
 - c) Medição da corrente de fuga: os autores destacam que, na época, era a única medição realizável no campo capaz de trazer informação do estado dos resistores de equalização e dos blocos. Com base na medição da corrente de fuga, começou-se também a avaliar a componente de terceira harmônica para diagnóstico de pára-raios de ZnO.

Como conclusão, os autores destacam que mais estudos deveriam ser feitos para determinar critérios de análise dos equipamentos instalados no campo, dando maior ênfase à termografia e às investigações em laboratório, para posterior aplicação em campo de técnicas de análise da corrente de fuga, inclusive para pára-raios de ZnO.

Araripe Junior; Bacega [19] apresentaram estudos em pára-raios de SiC de uma concessionária de energia em 1995, com tensões de operação de 88 kV e 138 kV. Foram realizadas análises para identificar as causas das ocorrências de falhas nesses equipamentos, além da verificação de possíveis procedimentos de ensaios que permitissem detectar o estado dos pára-raios antes da sua falha. Para esse fim, vários pára-raios foram retirados das subestações para serem submetidos a ensaios de tensão disruptiva de impulso atmosférico e de tensão disruptiva à frequência industrial. Os pára-raios reprovados nesses ensaios foram abertos, sendo observada a perda de estanqueidade.

Como conclusão, os autores recomendaram que o resultado obtido no ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial, realizado em campo, fosse utilizado como único parâmetro para avaliação dos pára-raios, tendo-se como referência os valores fornecidos pelos fabricantes. Estes critérios de inspeção foram considerados mais adequados, pois a concessionária de energia possuía uma fonte de tensão móvel.

O trabalho publicado em 1996 por Darveniza, Mercer e Watson [20] traz os resultados de uma investigação envolvendo oito concessionárias de energia na Austrália, onde foram considerados 365 pára-raios de SiC de distribuição, na tensão de 9 a 24 kV, sendo 80% de 5 kA e o restante de 10 kA. Considerando a data de fabricação desses pára-raios, a idade dessas unidades variava de 1 a 28 anos.

As técnicas utilizadas na avaliação foram:

- Medição da resistência de isolamento;
- Tensão disruptiva à frequência industrial;
- Tensão disruptiva de impulso atmosférico;
- Teste de vedação: este teste foi feito colocando-se os pára-raios dentro de uma câmara selada conectada a uma bomba de vácuo, onde foram ajustadas as pressões de 10, 5, 2, 1,5 e 1 Torr (1 Torr $\equiv$ 1 mmHg);
- Inspeção visual: dos 365 pára-raios ensaiados, 160 foram abertos para inspeção visual. Foram investigadas possíveis evidências de penetração de umidade e degradação dos blocos devido a descargas de alta intensidade.

As principais conclusões foram:

- Uma parcela significativa dos pára-raios de SiC apresentou deterioração dos componentes internos;
- Nos pára-raios com mais de 10 anos de instalação, foi observado um aumento significativo de pára-raios reprovados no ensaio de medição da resistência do isolamento;
- Nos pára-raios com mais de 13 anos de instalação, foi observado um aumento significativo de pára-raios apresentando valores reduzidos de tensão disruptiva à frequência industrial;

- Apenas uma técnica de ensaio é insuficiente para a avaliação do estado dos pára-raios;

Os autores ainda recomendaram que os pára-raios de distribuição de SiC, com mais de 13 anos de serviço deveriam ser gradativamente substituídos pelos pára-raios de ZnO.

Em 1997, em Belém (PA), Calazans, Ximenes e Rezende [21] apresentaram resultados da inspeção periódica de pára-raios de ZnO no campo de uma empresa transmissora de energia. As técnicas utilizadas pelos autores foram termovisão e corrente de fuga, com o seguinte critério:

Segundo os autores, os pára-raios que foram retirados de operação apresentaram valores muito acima dos dados históricos. Todos os pára-raios retirados de operação foram desmontados e a causa apontada pelos autores para o aquecimento anormal destes equipamentos foi a perda da estanqueidade e penetração de umidade. Como conclusão, os autores apontam que:

- A termovisão é um método prático e eficiente, sendo o valor adotado de 5°C, para a máxima diferença de temperatura entre o pára-raios e o ambiente externo, um critério consistente e dentro de uma margem de segurança adequada;
- A medição da corrente de fuga foi caracterizada como uma boa técnica de diagnóstico. Os autores apontam que o valor da 3ª H da corrente de fuga, a partir do qual o pára-raios deve ser considerado defeituoso, deve ser baseado em dados históricos de ensaios realizados em campo em pára-raios de mesma família;
- A aplicação das duas técnicas apresenta resultados satisfatórios, sendo que, neste caso, permitiu a retirada de equipamentos antes que apresentassem falhas.

Em [22], Liu realizou uma investigação em seis pára-raios de SiC: três da classe de tensão 36 kV e outros três de classe 121 kV. Os seis pára-raios foram retirados de campo com a suspeita de terem problemas. As técnicas utilizadas pelo autor foram: tensão disruptiva à frequência industrial, disruptiva de impulso atmosférico com forma de onda normalizada e tensão residual. Como resultado, o autor obteve que os pára-raios de classe de tensão de 36 kV foram aprovados nas técnicas de tensão disruptiva à frequência industrial e impulso atmosférico com forma de onda normalizada e tensão residual, enquanto que os pára-raios de

classe 121 kV apresentaram resultados considerados não satisfatórios para os valores de tensão disruptiva à frequência industrial e impulso atmosférico. O autor recomenda que testes adicionais deveriam ser feitos nos pára-raios da classe de 121 kV.

Ressalta-se que, neste trabalho, os pára-raios foram retirados do campo por suspeitas de estarem com problemas, mas as técnicas utilizadas não detectaram anomalias nos pára-raios da classe de 36 kV.

No ano de 1999 foram publicados três trabalhos a respeito deste assunto. O primeiro a ser analisado, de Grzybowski e Gao [23], mostra um estudo envolvendo 16 pára-raios de SiC de várias classes de tensão. O conjunto dos corpos de prova era constituído por quatro pára-raios de 15 kV, cinco de 144 kV, três de 192 kV e um pára-raios de 420 kV, todos com 25 anos de serviço. Os autores utilizaram como técnicas de investigação: tensão disruptiva à frequência industrial, disruptiva de impulso atmosférico com forma de onda normalizada e tensão disruptiva na frente do impulso conforme as normas IEEE Std. C62.1-1984 [13] e IEEE C62.11-1989³.

Os resultados apresentados neste estudo foram:

- Sete pára-raios não atenderam os requisitos das normas para os valores de tensão disruptiva à frequência industrial: dois pára-raios de 15 kV, dois de 144 kV e os três pára-raios de 192 kV;
- O pára-raios de classe de tensão 420 kV não foi aprovado no ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico com forma de onda normalizada, tanto na polaridade positiva como na polaridade negativa;
- Todos os pára-raios foram reprovados no ensaio de tensão disruptiva na frente do impulso na polaridade positiva, e na polaridade negativa do mesmo ensaio apenas dois pára-raios foram aprovados, um de classe de 144 kV e um de 192 kV.

Como conclusão os autores apontam que:

³ IEEE Standard for Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for A.C. Power Circuits, IEEE C62.11-1989, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, 1989.

- O tempo que um pára-raios pode ficar em serviço depende muito das propriedades do elemento de SiC, da vedação do invólucro do pára-raios e as condições de serviço (como magnitude e frequência de ocorrência dos surtos);
- Os pára-raios da faixa de tensão de 15 a 192 kV atenderam os requisitos das Normas IEEE Std. C62.1-1984 e IEEE C62.11-1989 para o ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico, com forma de onda normalizada, mesmo após 25 anos de serviço,
- Os pára-raios após 25 anos de serviço apresentaram variações maiores nos ensaios de tensão disruptiva na frente de impulso e tensão disruptiva à frequência industrial do que no ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico com forma de onda normalizada. Segundo os autores, isto leva a necessidade de se avaliar as características de proteção dos pára-raios depois de alguns anos em serviço;
- A razão de os pára-raios terem falhado nos testes foi que estes experimentaram surtos severos durante o seu tempo de operação, consequentemente, as superfícies dos centelhadores apresentavam pequenos danos pela dissipação da energia, dos arcos provocados por estas descargas. Além disso, os blocos de SiC podem ter sofrido mudanças em suas propriedades devido à passagem de correntes elevadas durante os surtos das linhas e também à penetração de umidade, mudanças estas que podem alterar o coeficiente de não linearidade dos blocos de SiC, que os autores indicam entre 2 a 6.

Em [24], McDonald realizou uma investigação em seis pára-raios completos, tensões nominais de 36 e 121 kV, classe 10 kA, e mais cinco módulos de pára-raios de classe de tensão 132 kV do mesmo fabricante, retirados do campo, com base em ensaios especificados pela norma AS 1307.1-1986⁴. Estes ensaios foram:

- Tensão disruptiva de impulso atmosférico com forma de onda normalizada;
- Tensão disruptiva e suportável à frequência industrial;
- Tensão residual;
- Medições da resistência de isolamento;

⁴ Australian Standard AS 1307.1-1986, Surge Arresters (Diverters) Part 1 – Silicon Carbide Type for A.C. Systems, Standards Association of Australia, North Sydney, NSW.

- Medições de corrente de fuga à frequência industrial;
- Descargas parciais e medição da tensão de radiointerferência;
- Inspeção visual;
- Descargas Parciais.

As conclusões apontadas pelo autor foram:

- Todos os pára-raios apresentaram comportamento satisfatório nos ensaios de tensão disruptiva e suportável à frequência industrial, tensão disruptiva de impulso atmosférico e ensaio de tensão residual;
- Degradação interna limitada, apesar de 20 anos de operação, verificada na inspeção visual após a desmontagem dos pára-raios ensaiados;
- O ensaio de medição da tensão de radiointerferência e medição do nível de descargas parciais mostraram que são técnicas mais sensíveis que as outras para detecção de unidades com maiores degradações internas. O autor aponta também que possa haver uma correlação entre os ensaios de tensão de radiointerferência e medição da corrente de fuga;
- Nada se pode afirmar sobre o ensaio de medição da resistência de isolamento.

O autor recomendou que investigações posteriores fossem realizadas para confirmar o bom desempenho das técnicas de descargas parciais e radiointerferência.

Outro trabalho, publicado por Hinrichsen et al [25], no ano de 1999, é a respeito do monitoramento da temperatura de pára-raios de ZnO através de sensores de temperatura passivos. Esta tecnologia é de propriedade de uma fabricante de equipamentos elétricos.

A Figura 2.9 mostra o princípio de funcionamento do sistema de medição de temperatura por sensores passivos: uma onda eletromagnética de alta frequência é emitida por um radar à antena do sensor, o transdutor interdigital, que transforma este sinal em ondas acústicas na superfície. Esta onda se propaga no cristal piezelétrico, onde é parcialmente refletida pelos refletores integrados. As ondas refletidas são novamente convertidas em ondas eletromagnéticas pelo transdutor interdigital e enviado ao radar. A informação sobre a identidade dos transdutores e a temperatura está contida em informação digital dos pulsos

refletidos e sua relação em fase. Esta informação é analisada pelo processador digital de sinais e armazenada no computador.

Este processo é possível, pois os sensores passivos podem funcionar como sensores de temperatura por causa de efeitos físicos como alongação do substrato do bloco ou mudanças na velocidade de propagação das ondas de superfície por forças mecânicas ou por temperatura.

Figura 2.9: Princípio de funcionamento dos sensores passivos de temperatura, onde NCO é controlador numérico do oscilador, DSP é o processador digital de sinais e PC é o microcomputador. Fonte: Hinrichsen et al [25].

Este método possui os inconvenientes de ser um método novo, ou seja, não pode ser usado para o diagnóstico de pára-raios mais antigos e também ser propriedade de uma única empresa.

Os autores finalizam seu trabalho apontando que a medição da temperatura dos blocos de ZnO é o parâmetro ideal para o monitoramento destes equipamentos. O método desenvolvido é capaz de fornecer informações confiáveis rapidamente, sem a necessidade de retirada dos pára-raios de operação.

Um estudo foi realizado por Oliveira et al [26] com o objetivo de avaliar o grau de confiabilidade dos pára-raios de SiC, classe 138 kV, com tempo de instalação superior a 15 anos. O conjunto da amostra consistia de 340 pára-raios de oito fabricantes. Os ensaios foram

realizados estando os pára-raios instalados no sistema de uma concessionária e as técnicas de diagnóstico utilizadas foram:

- Termografia: Os autores adotaram como critério o registro de termogramas a 13 metros de distância dos pára-raios. A diferença de temperatura foi obtida sobre o mesmo corpo de prova, correspondendo à variação de temperatura entre o maior e o menor valor.
- Medição da corrente de fuga: Consistiu na medição da corrente de fuga que fluía pelo pára-raios estando este energizado na tensão do sistema. A corrente de fuga foi medida através de um miliamperímetro tipo alicate com resolução de $100\ \mu\text{A}$, sendo o sinal de corrente aquisitado através de um osciloscópio digital. Através de um programa computacional foram obtidos os valores de pico, eficaz e a 3^{a} H do sinal da corrente de fuga. Posteriormente, foi calculada a relação entre o valor de pico e o valor eficaz da corrente.
- Medição da tensão de rádio interferência: consistiu na medição de sinais de alta frequência oriundos dos pára-raios. A medição foi feita através do cabo de aterramento dos pára-raios e de um transformador de corrente, tipo janela, adequado para aquisição de sinais na frequência de 1 MHz. O ruído de fundo obtido nestas medições foi de – 20 dB.

Durante as medições de corrente de fuga e radiointerferência ocorreram problemas de interferência de campos eletromagnéticos que não puderam ser considerados no estudo. Os pára-raios instalados apresentavam diversas configurações de montagem, e em três configurações as medições apresentaram comportamento que os autores consideraram satisfatório.

Os autores fizeram um tratamento estatístico dos resultados apresentados pelas três técnicas e estabeleceram uma distribuição gaussiana normal. Utilizando esta ferramenta, procuraram estabelecer pontos da curva que se mostravam mais adequados para qualificar a condição operativa dos pára-raios inspecionados. Os pára-raios, de acordo com esta distribuição normal, foram classificados como defeituosos, suspeitos, normais e em condições mais amenas. Os equipamentos considerados defeituosos apresentaram, em pelo um dos parâmetros avaliados, resultados superiores ao valor médio acrescido de duas vezes o desvio padrão. Através deste trabalho, os autores recomendaram a retirada de 53 pára-raios classificados como defeituosos e a adoção de uma política de padronização de montagem dos

pára-raios, com o objetivo de viabilizar a implementação de rotinas de inspeção por corrente de fuga e radiointerferência, cujos resultados os autores consideraram mais abrangentes.

O estudo traz como principais conclusões:

- As técnicas de medição da corrente de fuga, termovisão e radiointerferência mostraram-se sensíveis para a identificação das alterações na condição de operação dos pára-raios;
- Devem ser adotados valores distintos para cada técnica, fabricante e modelo de pára-raios, pois a adoção de valores genéricos pode incorrer em erros de avaliação;
- Cuidados especiais devem ser tomados durante a realização das medições e o tratamento dos dados para evitarem-se erros.

No ano 2000, Schei [27], em nome do SC 33 do CIGRÉ, apresentou um trabalho no qual apresenta uma visão geral sobre os métodos de diagnóstico de pára-raios de ZnO. Os métodos abordados pelo autor foram:

- **Indicadores de falha:** dão uma indicação clara de pára-raios com avarias, sem a necessidade de retirá-los do circuito. O princípio de funcionamento destes dispositivos é baseado usualmente na amplitude e duração da corrente do pára-raios, ou na temperatura dos blocos de resistores não lineares.
- **Desconectores:** geralmente usados em pára-raios de média tensão, dão uma indicação visual de pára-raios com falha através da desconexão deste com a linha. O princípio de funcionamento é de um explosivo que tem a sua ignição provocada pela corrente de falta da linha. A vantagem deste tipo de dispositivo é que ele retira o pára-raios de serviço, sem o ocorrer desligamento da linha. Entretanto, a linha fica desprotegida contra surtos, o que se apresenta como desvantagem.
- **Contadores de descarga:** operam com correntes impulsivas acima de um determinado valor ou com combinações de amplitude e duração de surtos. Se o intervalo entre descargas for muito curto (menor que 50 ms), os contadores de surtos podem não contar estes impulsos de corrente. Dependendo do princípio de funcionamento e da sensibilidade do contador, podem dar indicações sobre as sobretensões que aparecem no sistema, ou fornecer o número de descargas

correspondendo a um estresse do pára-raios, mas não guarda informações sobre os surtos, bem como não desconectam os pára-raios dos circuitos;

- **Medição de temperatura:** As medições podem ser feitas através de imagens térmicas. As medições são o único indicativo com relação ao estado do pára-raios, desde que a diferença de temperatura entre os blocos e a superfície externa do pára-raios seja substancial. Medições da temperatura de objetos adjacentes também são úteis. Medição direta da temperatura dos blocos de ZnO fornece uma indicação muito precisa da condição do pára-raios (conforme proposto por HEINRICH et al [25]), mas requer que o pára-raios seja equipado com transdutores especiais durante a sua fabricação, por isso, este método é utilizado apenas em pára-raios de aplicações especiais.

Schei [27], neste trabalho, deu especial atenção aos métodos que usam a corrente de fuga como método de diagnóstico. Em linhas gerais, o autor descreve que os métodos de medição da corrente de fuga, com análise da 3ª H, fornecem uma boa estimativa da corrente de fuga resistiva do pára-raios, a qual é a responsável pelo aquecimento do equipamento, o que pode levá-lo à falha. A medição da corrente de fuga, com análise da 3ª H, sofre a influência da 3ª H presente na tensão do sistema. Estes e outros aspectos serão discutidos com mais detalhes no Capítulo 3.

As Tabelas 2.3 e 2.4 foram extraídas do trabalho de Schei, as quais mostram, na Tabela 2.2, o sumário dos métodos de diagnóstico de pára-raios, e na Tabela 2.3 as propriedades dos métodos de medição da corrente de fuga em campo, de acordo com o WG 10, do TC 37 da IEC [27].

Tabela 2.2: Sumário dos métodos de diagnóstico de acordo com o WG 10, TC 37 da IEC.

Método de Diagnóstico	Condição de serviço		Experiência em Serviço
	“Off-line”	“On-line”	
Indicadores de falha		X	Limitada
Desconectores		X	Extensa ^a
Contadores de surto		X	Extensa
Centelhadores	X	X	Extensa ^b
Medição de temperatura		X	Limitada
Medição da corrente de fuga:			
- com o uso de fonte de tensão externa	X		Ver Tabela 2.3
- usando a tensão do sistema		X	Ver Tabela 2.3
^a com pára-raios de média tensão			
^b em alguns países			

Fonte: Adaptado de Schei [27].

Tabela 2.3: Propriedades dos métodos da medição da corrente de fuga no campo, de acordo com o WG 10, TC 37 da IEC.

Método de medição da corrente de fuga		Sensibilidade à			Eficiência do diagnóstico		Experiência em serviço
		Harmônicas na tensão	Medição da defasagem da corrente ou tensão	Correntes na superfície	Qualidade da informação	Complexidade	
Fonte CC em separado		N.A.	N.A	Alta	Alta	Alta	Limitada
Tensão de serviço ou fonte CA em separado							
Medição da corrente de fuga total		Baixa	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Extensa
Medição da corrente de fuga resistiva	Usando tensão de referência	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
	Usando compensação capacitiva	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
Análise da 3ª H da corrente	Usando 3ª H	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Extensa
	Usando 3ª H com compensação	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Extensa
Medição das perdas watt		Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	S.I.D

Notas: N.A.: não aplicável; S.I.D.: sem informação disponível. Fonte: Adaptado de Schei [27].

No final do trabalho, Schei [27] apresenta as recomendações do SC 33 para o monitoramento de pára-raios de ZnO:

- A componente resistiva da corrente de fuga deve ser medida após um curto espaço de tempo depois da energização do pára-raios no campo, pois esta é a melhor referência para comparação com futuras medições;
- As medições devem ser feitas regularmente, especialmente em locais onde os pára-raios estão expostos à poluição atmosférica. Realizar medições depois de períodos de tempo ruim ou descargas da linha causadas por sal ou poluição industrial são importantes. A decisão sobre as medições deve ser tomada pelo pessoal responsável pela área;
- Medições devem ser feitas depois de situações de falta na rede em função de sobretensões temporárias de alta intensidade e/ou longa duração;
- Na maioria dos casos, o envelhecimento causa um aumento gradual da corrente de fuga ao longo do tempo. Entretanto, se medições da corrente de fuga são feitas regularmente, é possível detectar pára-raios envelhecidos e retirá-los de serviço antes da falha;
- Um equipamento de diagnóstico confiável, que pode ser facilmente usado sem causar distúrbios na operação do sistema, traz grandes benefícios aos usuários e deve ser parte de um programa de manutenção regular.

Outro trabalho que procurou fazer comparações entre os métodos que são utilizados para avaliação de pára-raios de ZnO, foi publicado em 2001 por Heinrich e Hinrichsen [28]. Segundo os autores, as principais causas das falhas dos pára-raios são:

- Degradação pela influência da tensão de operação;
- Degradação causada por impulsos de corrente;
- Degradação por reações químicas (redução de oxigênio).

Heinrich e Hinrichsen mostram em seu trabalho que as mudanças da característica $V \times I$ causadas por reações químicas (redução do oxigênio nas bordas dos blocos de ZnO, por exemplo) são diferentes daquelas originadas por correntes de alta intensidade. A Figura 2.10 mostra uma comparação entre as mudanças da curva $V \times I$ por ambos os fatores.

Figura 2.10: Comparação das curvas $V \times I$ de um bloco de ZnO novo com as curvas de um bloco degradado por correntes elevadas e por redução de oxigênio, onde U indica a tensão aplicada ao bloco e U_c é a tensão de operação contínua. Fonte: Heinrich e Hinrichsen [28].

O trabalho traz como conclusões:

- A tensão de referência não pode ser usada como indicador de degradação;
- A característica $V \times I$ e as perdas dão uma imagem realista do comportamento elétrico e das alterações causadas por qualquer tipo de degradação, entretanto, tais medições requerem equipamentos normalmente não disponíveis nas instalações, de modo que na prática dificilmente podem ser usadas para monitoramento “on-line”;
- A medição da parcela resistiva da corrente de fuga na tensão de operação é um indicador muito bom do comportamento do pára-raios;
- A medição da 3^a H da corrente de fuga pode ser usada apenas para detecção e não revela aumentos da corrente resistiva causados por diminuição linear da resistividade (por exemplo, por reações químicas ou penetração de umidade). A alta sensibilidade a 3^a H da tensão do sistema ocasiona incertezas grandes na medição;
- A temperatura do bloco é o parâmetro de operação decisivo de um pára-raios e é afetada por qualquer tipo de degradação. Ela fornece informações precisas sobre o envelhecimento elétrico e a energia absorvida durante solicitações impulsivas ou sobretensões temporárias e pode indicar diretamente uma eventual avalanche térmica, dando oportunidade de desenergizar o pára-raios a tempo. Os novos sistemas de medição de temperatura possibilitam a medição “on-line” da temperatura do pára-raios e o acompanhamento da temperatura tende a se tornar o método padrão de monitoramento de pára-raios.

O trabalho publicado em 2002 por McDermid [29] descreve a experiência da de uma concessionária de energia no acompanhamento de pára-raios, primeiro nos de SiC e depois nos de ZnO. Nos de SiC as técnicas utilizadas foram perdas do dielétrico e ensaios de impulso. A partir de 1980, com a chegada dos pára-raios de ZnO, foi feito o acompanhamento destes equipamentos com medição das perdas do dielétrico e referência (tensão à frequência industrial necessária para passagem de 1 mA de corrente de fuga resistiva pelo pára-raios). O autor também descreve que técnicas “on-line” estavam gradativamente sendo utilizadas pela concessionária, como termovisão e medição de descargas parciais pelo cabo de aterramento do pára-raios, mas esta medição ainda estava em estudo, pois na época da sua publicação o autor cita que vários sensores de corrente para este fim estavam sendo avaliados.

O autor discute em seu trabalho que os pára-raios em iminência de falha poderiam ser detectados com termovisão e, especialmente, por medições das perdas do dielétrico em 60 Hz destes equipamentos, sendo que, para unidades de pára-raios conectados em série, a unidade que apresenta aquecimento na termovisão é a unidade “boa”, enquanto que a outra unidade está em curto circuito. Altas perdas do dielétrico à frequência industrial são, usualmente, indicativo de ingresso de umidade e / ou centelhadores em curto-circuito, enquanto que baixas perdas do dielétrico à frequência industrial é um indicador incomum de resistores de equalização quebrados em pára-raios de SiC.

McDermid descreve que os pára-raios de ZnO que falharam no campo ou nos quais foram encontrados defeitos nos testes foi devido a entrada de umidade. O autor descreve ainda que nos pára-raios de ZnO, o ensaio de descargas parciais indicou danos nas paredes laterais dos blocos causados pela distribuição não uniforme de tensão na superfície externa do equipamento em tempo chuvoso ou devido à presença de neve. McDermid indica também o ensaio de descargas parciais como um indicador mais sensível de falha do que o ensaio de medição das perdas do dielétrico em 60 Hz.

Como principais conclusões, o autor aponta que:

- A substituição dos pára-raios de SiC que apresentaram valores elevados de tensão disruptiva de impulso aumentou a proteção dos transformadores;
- A penetração de umidade é a causa primária de falha em pára-raios, tanto de SiC como ZnO.

Em outro trabalho, publicado em 2005 por Kannus e Lahti [30], é apresentada uma investigação realizada na Finlândia, considerando-se oito 8 fabricantes e 410 pára-raios, sendo 246 de SiC (idade variando de 14 a 38 anos) e 146 de ZnO (idade de 4 a 15 anos). Os pára-raios de SiC, corrente 5 kA, são para utilização em sistema de 24 kV.

As técnicas utilizadas pelos autores nos pára-raios de SiC foram:

- Inspeção visual;
- Medição da resistência de isolamento;
- Medição da tensão disruptiva DC;
- Medição da corrente DC (tensão 20 kV);
- Tensão disruptiva de impulso;
- Descargas parciais;
- Tensão suportável AC;
- Ensaio de tensão disruptiva;
- Medição do impulso de corrente e da tensão residual;

Dentre as conclusões apresentadas no trabalho, podem ser destacadas as seguintes:

- Não foi encontrada uma forte correlação entre os valores de resistência de isolamento (tensão DC 1000V) e a tensão suportável AC;
- As medições de descargas parciais (na tensão de 85% da tensão do pára-raios) não mostraram correlação com o estado do pára-raios;
- Em função dos resultados, foi recomendada a substituição de 7 tipos (de um total de 10) de pára-raios de SiC pelos de ZnO.

Em 2007, em um trabalho publicado por Larsen e Lien [31], foram apresentados resultados do acompanhamento de 42 pára-raios de ZnO instalados no campo, através da medição da 3ª H da corrente de fuga. Os autores definem que esta medição, logo após a instalação do pára-raios, é um importante parâmetro para o acompanhamento deste ao longo do tempo. Os autores também citam que a 3ª H da corrente é fortemente afetada pela 3ª H da tensão, e que o melhor método para medição é o da compensação dos harmônicos da tensão do sistema, método proposto por Lundquist et al [17] e reforçado por Schei [27].

Os autores concluem no seu trabalho que a medição da corrente de fuga, baseada na compensação da 3ª H da tensão é um método seguro e eficiente para avaliar a condição dos pára-raios de ZnO no campo, e que, pela adoção de uma estratégia de testes nos pára-raios em campo, é possível efetuar a substituição de pára-raios degradados antes da falha.

2.4 Análise dos métodos empregados para o monitoramento de pára-raios.

Após a análise da literatura, é possível verificar que os trabalhos mais recentes referem-se aos pára-raios de ZnO, que é a tecnologia utilizada hoje em dia. Muitos fabricantes de pára-raios desenvolveram os seus próprios métodos de monitoramento: medição da corrente de fuga total com a decomposição do sinal e análise do terceiro harmônico e a medição da temperatura dos blocos de ZnO através de sensores passivos instalados nos blocos. Ambas têm a sua validade e eficiência comprovada pela prática e resultados relatados nos trabalhos analisados, mas com a desvantagem de serem aplicadas apenas nos pára-raios dos fabricantes que desenvolveram os respectivos métodos.

Ressalta-se também que várias hipóteses de falhas em pára-raios, tanto de ZnO quanto de SiC, foram levantadas nos trabalhos e a causa mais citada foi a perda de estanqueidade.

Quanto aos pára-raios de SiC, inicialmente as investigações se limitavam a identificar pára-raios com problemas com base em parâmetros conhecidos através de ensaios normalizados. Isto traz como desvantagem a necessidade de desenergizar o equipamento e levá-lo ao laboratório para realização de novos ensaios e a comparação dos resultados.

Com o desenvolvimento tecnológico, foi possível adquirir sinais destes equipamentos sem a necessidade de desenergizá-los. Isto foi feito com base na experiência adquirida com os pára-raios de ZnO e no desenvolvimento da imagem térmica por infravermelho, conhecida como termovisão, que foi sendo largamente utilizada no setor elétrico para o acompanhamento de vários equipamentos.

As técnicas mais recentes para o monitoramento de pára-raios de SiC listadas neste trabalho foram:

- Radiointerferência, medida através do cabo de aterramento;
- Medição da corrente de fuga com a decomposição do sinal e análise da 3^a H;
- Medição de temperatura através de imagens térmicas por infravermelho (termovisão);

É importante enfatizar que, pelo estudo da literatura consultada, apenas uma técnica de diagnóstico não é suficiente para a detecção dos pára-raios com problemas no campo, sendo necessária a utilização de mais de uma técnica para melhor avaliação dos pára-raios, principalmente nos pára-raios de SiC.

A análise da 3^a H da corrente de fuga é uma técnica consistente nos pára-raios de ZnO, e que poderia ser aplicada aos pára-raios de SiC, visto que possuem centelhadores parcialmente ativos e ativos conectados em série com os blocos de resistência não linear, por onde passa a corrente de fuga. A análise da 3^a H pode ser relacionada com a componente resistiva da corrente de fuga total. O aumento da componente resistiva da corrente de fuga causa o aumento de dissipação de energia nos blocos e resistores de equalização, o que pode levar a degradação do pára-raios e a sua falha, daí a sua importância para o monitoramento destes equipamentos.

Por estas razões, este trabalho procurará focar a análise da componente de terceira harmônica da corrente de fuga total como uma ferramenta muito útil no monitoramento dos pára-raios de SiC.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia adotada neste trabalho, sendo abordadas as técnicas de diagnóstico consideradas na pesquisa e os pára-raios investigados em laboratório. Serão apresentados também os aspectos teóricos envolvidos na medição de corrente de fuga, bem como o procedimento utilizado em campo para essa medição, em pára-raios de SiC e ZnO instalados em uma subestação.

3.1 Considerações gerais

Os pára-raios possuem uma função muito importante na proteção de um sistema elétrico de potência e uma falha desses equipamentos podem resultar em grandes prejuízos. Portanto, é essencial que os pára-raios sejam avaliados periodicamente no campo. Essa avaliação, entretanto, encontra algumas dificuldades, pois as características construtivas desse equipamento não permitem o acesso aos seus componentes internos. As técnicas de diagnóstico que são normalmente utilizadas nos pára-raios fornecem alguns subsídios, mas nem sempre as informações obtidas com essas técnicas levam ao conhecimento do estado atual desses equipamentos.

Considerando-se que os pára-raios de SiC estão sendo substituídos pelos de ZnO, seria extremamente importante que aqueles mais degradados fossem priorizados e retirados de serviço antes de sua falha.

Dentro deste contexto, foram investigadas técnicas de diagnóstico utilizando-se pára-raios de SiC, os quais estiveram em serviço vários anos. Portanto, este trabalho pretende dar uma

contribuição no sentido de se obter um melhor diagnóstico quanto ao estado de degradação destes equipamentos.

Os pára-raios considerados neste estudo foram levados ao Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP, para um projeto de pesquisa, por uma concessionária de energia. Este lote consistia de aproximadamente 200 pára-raios de vários fabricantes e tensões nominais, que foram retirados do campo em função de falhas, reformas na subestação ou como parte da programação de substituição gradativa destes equipamentos. Foram selecionadas 35 amostras, representando todos os fabricantes, que foram submetidas a vários ensaios no laboratório. Neste trabalho será mostrado o resultado de doze pára-raios, de tensões nominais 85 e 132 kV, de dois fabricantes diferentes, que representam de maneira adequada os resultados apresentados pelas 35 amostras. De modo geral, eram visíveis sinais de corrosão nas partes metálicas e, em alguns pára-raios, era possível constatar marcas de descargas, indicando ocorrência de falhas no campo, como mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1: Exemplos dos pára-raios investigados. (a) sinais de corrosão. (b) sinais de descarga externa.

Não havia um histórico de medições que pudesse indicar o envelhecimento desses pára-raios ao longo do tempo. Portanto, as únicas referências que poderiam ser utilizadas eram os valores de normas e/ou catálogos. Esses dados, porém, nem sempre estavam disponíveis.

Inicialmente, os pára-raios foram analisados visualmente, procurando-se identificar aqueles com evidências de entrada de umidade e com marcas externas de descargas.

Após esta fase e com base na literatura, mostrada no Capítulo 2, o comportamento dos pára-raios foi analisado considerando-se os seguintes ensaios:

- Tensão disruptiva de impulso atmosférico com forma de onda normalizada;
- Tensão disruptiva à frequência industrial a seco;
- Medição de radiointerferência e ionização interna;
- Medição da resistência do isolamento.

Em seguida, foi realizada a medição da corrente de fuga em todos os pára-raios, sendo que em alguns deles, foi obtida a imagem térmica através da termovisão.

Terminada esta fase, alguns pára-raios foram desmontados para verificação de uma possível correlação entre os resultados obtidos nos ensaios e o estado dos elementos internos do equipamento. Foi investigada a existência de marcas de acúmulo de umidade e/ou de descargas internas.

Os elementos internos dos pára-raios foram analisados em bancada, sendo realizadas medições com o objetivo de se relacionar esses resultados com aqueles obtidos nos ensaios realizados com o pára-raios completo.

A medição da corrente de fuga em pára-raios de SiC resultou em informações muito importantes a respeito do estado do pára-raios, o que motivou a realização dessa medição em campo. Foram realizadas medições em pára-raios instalados em uma usina da concessionária em duas oportunidades. Esta usina foi escolhida em função de possuir uma subestação transformadora elevadora com pára-raios de SiC, instalados isolados das bases metálicas. Na primeira medição foram levantadas algumas dúvidas com relação aos resultados obtidos, havendo a necessidade de se realizar alguns testes em laboratório para o posterior retorno à mesma subestação para confirmação dos resultados.

A seguir serão descritos os procedimentos adotados no laboratório, tendo em vista a análise do comportamento dos pára-raios. Esses procedimentos são baseados em ensaios normalizados, os quais foram seguidos tendo em vista uma possível comparação dos resultados obtidos com valores que pudessem estar disponíveis em outras publicações. Na medição de radiointerferência, os valores foram medidos estando os pára-raios energizados na tensão de operação.

3.2 Tensão disruptiva de impulso atmosférico

Como citado no Capítulo 2, este ensaio testa o desempenho dos centelhadores dos pára-raios. Neste ensaio, o impulso atmosférico é definido, segundo as normas internacionais [12, 13], com tempo de frente de até 20 μ s. No impulso de manobra o tempo de frente possui maior valor. A norma NBR 6936 de 1992 [32] segue essas recomendações. Os tempos de cauda também definem o impulso sendo que, pela mesma norma, o impulso de manobra possui tempo de cauda maior do que o impulso atmosférico. As formas de onda são unidirecionais e de ambas as polaridades. A forma de onda dos impulsos é definida pelo seu valor de crista, seu tempo de frente (T_1) e pelo tempo em que a onda chega à metade do seu valor de crista, chamado de tempo de cauda ou tempo até o meio valor (T_2). A Figura 3.2 mostra uma forma de onda típica do ensaio de impulso atmosférico.

Figura 3.2: Forma de onda de impulso atmosférico. Fonte: NBR 6936/1992 [35].

O impulso atmosférico normalizado, segundo a norma NBR 6936, possui tempo de frente de $1,2 \mu\text{s}$ e tempo até o meio valor de $50 \mu\text{s}$, denominado como impulso 1,2/50. Na Figura 3.2 são mostrados os parâmetros para medição da onda de impulso atmosférico. O ponto O é a origem real da onda de impulso, cujo valor é de difícil determinação. Segundo Kuffel, Zaengl e Kuffel [33], o início da subida da onda dificilmente acontece de forma suave e contínua, por causa das capacitâncias parasitas e indutâncias do circuito de ensaio, assim, define-se a origem virtual O_1 , através da reta traçada pelos pontos A em 30% do valor de crista e B em 90% deste valor. O tempo virtual de frente T_1 é o tempo T entre os pontos A e B multiplicado por 1,67, fator este que sai da semelhança de triângulos ATB e O_1T_1B da Figura 3.2. O tempo T_2 é o tempo entre a origem virtual O_1 até a metade do valor de crista na cauda. O tempo T_2 é chamado de tempo virtual até o meio valor.

A Figura 3.3 mostra um diagrama esquemático do circuito de ensaio.

Figura 3.3: Desenho esquemático do circuito para o ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico. C_{GER} é o capacitor do gerador, R_f é o resistor de controle do tempo de frente T_1 , R_c é o resistor de controle do tempo de cauda T_2 , G é o centelhador do gerador, C_{div} é a capacitância do divisor de tensão, C_b é o capacitor de baixa tensão do divisor, OSC é o osciloscópio para registro e medição da forma de onda e C_{pr} é a capacitância do pára-raios.

Basicamente, existem dois circuitos para geradores de impulsos, chamados tipo a e tipo b. O que os diferencia é a posição do resistor para ajuste do tempo de frente da onda, consequentemente, o rendimento entre ambos os tipos muda. O gerador de impulsos mostrado na Figura 3.3 é o do tipo b, que é o utilizado no IEE/USP, que possui um rendimento maior que o do tipo a. No gerador tipo a o resistor R_f fica posicionado antes do resistor R_c . O capacitor C_{GER} é carregado com uma tensão contínua até o centelhador G romper. Este centelhador funciona como uma chave de fechamento muito rápido, fazendo com que a tensão

com a qual o capacitor C_{GER} foi carregado passe a ser aplicada sobre o restante do circuito. O resistor R_f amortece o circuito, controlando o tempo T_1 da forma de onda do impulso, enquanto o resistor R_c descarrega os capacitores C_{div} e C_{pr} , controlando assim o tempo de cauda T_2 . O tempo virtual de frente T_1 é afetado pelo valor do capacitor C_{GER} e o resistor R_f . Em geral, o capacitor C_{GER} possui um valor maior que os capacitores C_{div} e C_{pr} . O tempo virtual de cauda da onda ou T_2 é afetado pelos valores dos capacitores C_{div} e C_{pr} . Em termos práticos, o capacitor C_{div} é muito maior que C_{pr} , para qualquer pára-raios que seja colocado no circuito.

Pela norma NBR 6936/1992 [32], os valores de crista, tempo virtual de frente e o tempo virtual até o meio valor possuem as seguintes tolerâncias:

- Valor de crista: $\pm 3\%$
- Tempo virtual de frente: $\pm 30\%$
- Tempo virtual até o meio valor: $\pm 20\%$

Para maiores informações a respeito de geradores de impulsos, pode ser consultado o livro de Kuffel, Zaengl e Kuffel [33].

Os ensaios foram feitos seguindo-se as recomendações das normas NBR 5287 – Pára-raios de resistor não linear a carboneto de silício (SiC) para circuitos de potência de corrente alternada – Especificação [10] e NBR 5309 – Pára-raios de resistor não linear a carboneto de silício (SiC) para circuitos de potência de corrente alternada – Método de ensaio [11]. A NBR 5309 fornece as linhas gerais para a realização dos ensaios, enquanto que a NBR 5287 especifica quais os valores que devem ser aplicados aos pára-raios.

O ensaio de impulso atmosférico, conforme a norma NBR 5309, deve ser feito da seguinte maneira: devem ser aplicados nos pára-raios cinco impulsos com o valor de crista especificado, nas polaridades positiva e negativa, com forma de onda de 1,2/50. Estes devem cortar todos os impulsos aplicados, não importando o tempo de corte. Se o pára-raios deixar de cortar um impulso em qualquer uma das séries, uma nova série de dez impulsos deve ser aplicada ao pára-raios, devendo o pára-raios cortar todos. Se nesta nova série o pára-raios deixar de cortar outro impulso, o pára-raios é considerado reprovado neste ensaio.

O ajuste da forma de onda foi feito com o pára-raios no circuito. O valor de crista foi ajustado com o gerador em vazio, pois a carga do pára-raios para o circuito era desprezível, visto que a capacitância do divisor de tensão, C_{div} , era muito maior que a capacitância do pára-raios, C_{pr} .

Os impulsos foram medidos através de um divisor de tensão capacitivo. O aparelho de medição de tensão utilizado nos ensaios foi um sistema de medição digital com resolução vertical real de 12 bits. Este sistema de medição atende às recomendações da norma IEC 61083-1⁵ e NBR 6937/1981 [34].

3.3 Tensão disruptiva à frequência industrial a seco

De maneira similar ao ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico, o ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial a seco testa o comportamento dos centelhadores. O ensaio de impulso atmosférico verifica o comportamento dos centelhadores frente à sobretensões impulsivas, enquanto que o ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial verifica o comportamento dos centelhadores frente à sobretensões temporárias do sistema. O circuito esquemático para este ensaio é mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Circuito esquemático para o ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial a seco. F: Fonte de ensaio, R_a : resistor de amortecimento, C_{div} : divisor de tensão capacitivo, P.R.: pára-raios sob ensaio, C_A : capacitor de acoplamento.

⁵ IEC 61083/2001 Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests - Part 1: Requirements for instruments, International Electrotechnical Commission.

Na Figura 3.4, F é a fonte de tensão, R_a é um resistor de amortecimento, utilizado para proteção da fonte de tensão, no instante da disrupção dos centelhadores dos pára-raios. Segundo Kuffel, Zaengl e Kuffel [33], quando há uma descarga disruptiva no corpo de prova, esta pode provocar solicitações nas bobinas dos enrolamentos do transformador devido à distribuição de potencial irregular entre as espiras, o que pode levar a falha da isolação da fonte. O capacitor de acoplamento C_A aparece pontilhado na Figura 3.4, pois ele pode ou não ser utilizado. Quando houve a necessidade de utilização do capacitor de acoplamento foi para corrigir a distorção na tensão de ensaio.

A fonte F na Figura 3.4 é formada por um conjunto de transformadores ligados em cascata. O circuito básico da ligação em cascata pode ser observado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Circuito básico de transformadores ligados em cascata. (1) Enrolamento primário, (2) Enrolamento de alta tensão secundário, (3) Enrolamento terciário de excitação. Fonte: Adaptado de Kuffel, Zaengl e Kuffel [33].

O conjunto de transformadores utilizados no IEE/USP é composto por quatro estágios. O conjunto é alimentado pela rede da concessionária, através de um regulador indutivo, controlado de modo que permite a variação contínua da tensão. A alimentação do regulador é feita através de um transformador ligado à rede trifásica da concessionária, em 13,8 kV. A ligação dos enrolamentos deste transformador é conhecida como “ligação Scotch”, que propicia a saída de duas fases isoladas do potencial de terra, em 3.800 V. Estas duas fases são ligadas a um regulador indutivo, que permite a saída de tensão num intervalo de 0 a 7.600 V, que alimenta o enrolamento primário do transformador 1. O enrolamento secundário do transformador é excitado então entre 0 e 250 kV e o enrolamento terciário é excitado entre 0 e 3.800 V, que alimenta o transformador 2, e assim sucessivamente. Pela análise da Figura 3.5 vemos que o tanque do transformador 1 é ligado à terra, os tanques dos outros transformadores estão isolados deste potencial; assim, se excitarmos o secundário do transformador 1 em V , na saída do transformador 2 para o potencial de terra teremos uma tensão de $2V$, e assim sucessivamente, até o transformador 4, onde teremos, para o potencial de terra, um potencial de $4V$. O máximo valor de tensão que pode ser obtido no caso do laboratório do IEE/USP é de 1.000 kV. O último estágio não possui enrolamento terciário. Se na saída do último transformador temos a tensão V com relação ao tanque deste transformador, teremos a corrente I circulando deste transformador para o restante do circuito. Teremos assim a potência do último transformador dada por:

$$P = VI \quad (3.1)$$

Onde: I : corrente do circuito;

V : tensão entre o terminal de saída do transformador 4 para o tanque deste;

P : potência do último transformador.

Para a obtenção da potência P no último transformador, teremos que ter a potência $4P$ no enrolamento primário do primeiro transformador, o enrolamento secundário vai consumir a potência P , enquanto que o enrolamento terciário do primeiro transformador ficará com a potência $3P$, e assim sucessivamente.

Este tipo de circuito traz como desvantagem a necessidade do enrolamento primário do primeiro transformador ter que ser dimensionado para suportar a corrente para fornecer a

potência $4P$ ao circuito, bem como os enrolamentos terciários terem que suportar a corrente para fornecer as potências necessárias aos transformadores subseqüentes. Como vantagem este tipo de circuito traz a flexibilidade de se utilizar o conjunto completo ou parcialmente. Maiores detalhes sobre transformadores ligados em cascata podem ser obtidos consultando-se Kuffel, Zaengl e Kuffel [33].

O sistema de medição é um divisor de tensão capacitivo, composto por dois estágios, cada estágio foi projetado para suportar até 600 kV, assim, para ensaios abaixo deste valor usa-se apenas um estágio do divisor, sendo o estágio superior curto-circuitado através de uma vareta metálica. O circuito de baixa tensão deste divisor possui quatro escalas, o que faz este equipamento muito versátil. Este sistema de medição atende os requisitos da norma NBR 6937 [34].

Segundo as especificações da norma NBR 5309/1991 [11], o ensaio consiste em elevar-se a tensão uniformemente, até a ruptura do pára-raios. Este procedimento deve ser repetido dez vezes, sendo que o valor da tensão disruptiva é a média dos valores obtidos. No caso dos ensaios realizados, a corrente foi limitada pelo resistor R_a de amortecimento, e o intervalo de tempo entre aplicações foi de um minuto. Os demais requisitos da norma foram atendidos.

3.4 Medição da tensão de radiointerferência

Segundo Ryan [35], radiointerferência é essencialmente um sinal de rádio randômico, proveniente de alguma fonte, que, dependendo do sinal de rádio irradiado de alguma emissora, pode variar de uma leve interferência até o bloqueio total do sinal da rádio em questão. Esta interferência randômica pode acarretar em interferência em serviços essenciais como a comunicação para navios e aviões, e a equipamentos do sistema elétrico. Esse ruído randômico é proveniente de descargas corona, no caso de linhas de transmissão, formado nos condutores, ferragens e isoladores. As descargas corona formam-se quando a intensidade do campo elétrico em um determinado ponto supera a rigidez dielétrica do gás que o envolve, ocasionando a ionização deste gás. No caso de tensões em frequência industrial, Ryan descreve que as descargas corona provocadas no semi-ciclo positivo são maiores que as descargas que ocorrem no semi-ciclo negativo.

ocasionando a ionização deste gás. No caso de tensões em frequência industrial, Ryan descreve que as descargas corona provocadas no semi-ciclo positivo são maiores que as descargas que ocorrem no semi-ciclo negativo.

As normas NBR 5287 [10] e NBR 5309 [11] especificam dois ensaios que medem a interferência gerada nos pára-raios: ensaio de medição da tensão de radiointerferência e o ensaio de nível de ionização interna.

A definição de nível de ionização interna é dada pela norma NBR 5287 [10] (ABNT, NBR 5287/1988, p.3): “tensão de alta frequência gerada pela corrente de ionização interna, quando é aplicada uma tensão de frequência nominal entre os terminais do pára-raios”. A corrente de ionização é definida como (ABNT, NBR 5287/1988, p.3): “corrente elétrica resultante do movimento de cargas elétricas em um meio ionizado, sob a influência de um campo elétrico aplicado”. Por estas definições, as normas [10] e [11] fazem distinção da radiointerferência gerada no interior do pára-raios e a que é gerada na parte externa. A norma NBR 5309 [11] prevê, para o ensaio do nível de ionização interna, a colocação de blindagens adicionais, para se garantir que o ruído radioelétrico medido neste ensaio seja proveniente somente da parte interna do pára-raios.

No caso do ensaio realizado neste trabalho, não se fez a adição de blindagens adicionais para medição do ruído radioelétrico do interior do pára-raios, pois a norma NBR 5309 permite que o ensaio seja feito de maneira combinada, medindo-se a radiointerferência proveniente tanto da parte externa quanto da parte interna.

Segundo as normas NBR 5287 e NBR 5309, o ensaio deve ser feito seguindo-se as recomendações das normas NBR 7875/1983 “Instrumentos de medição de radiointerferência na faixa de 0,15 a 30 MHz (Padrão CISPR) – Padronização” [36] e NBR 7876/1983 “Linhas e equipamentos de alta tensão – medição de radiointerferência na faixa de 0,15 a 30 MHz – Método de ensaio” [37].

Os componentes de alta tensão do circuito utilizado para este ensaio pode ser observado na Figura 3.6.

Figura 3.6: Componentes de alta tensão do circuito elétrico para o ensaio de medição da tensão de radiointerferência. T: fonte de tensão senoidal, F: filtro, C_A : capacitor de acoplamento, PR: pára-raios sob ensaio, R_m : resistor de medição, DIV: divisor capacitivo.

Fonte: NBR 7876 [37].

O método de ensaio consiste em medir a corrente de alta frequência gerada no corpo de prova e conduzida até o sistema de medição destas correntes. No circuito da Figura 3.6, T representa a fonte de tensão, a mesma descrita no item 3.3. O filtro F é inserido entre a fonte e o capacitor de acoplamento C_A , e sua função é impedir a circulação da corrente de alta frequência entre o pára-raios e a fonte de tensão. O filtro utilizado pelo IEE/USP possui impedância de $20\text{ k}\Omega$ à frequência de medição do ensaio, especificada pela norma NBR 7876 [40] como sendo de $500 \pm 50\text{ kHz}$. O capacitor de acoplamento C_A exerce a função de impedância de medição, em série com o resistor de medição R_m .

Os componentes do circuito de baixa tensão estão representados na Figura 3.7.

Figura 3.7: Componentes do circuito de baixa tensão do ensaio de medição da tensão de radiointerferência. L: indutância para filtro da tensão à frequência industrial, R_1 : resistor de terminação de valor $50\text{ }\Omega$, C_c : cabo coaxial com impedância característica de $50\text{ }\Omega$, Z_e : impedância de entrada do instrumento de medição, R_2 : resistor série de complemento. Fonte:

NBR 7876 [37].

O sistema de medição da tensão de radiointerferência é composto pelo capacitor de acoplamento C_A e pelo circuito da Figura 3.7. O resistor de medição R_m mostrado na Figura 3.6 está inserido no circuito da Figura 3.7. Se o capacitor de acoplamento fosse, em condições ideais, uma impedância infinita a 60 Hz e zero para a frequência de medição, nos terminais dos componentes de baixa tensão apareceria a tensão de radiointerferência gerada, se a impedância de medição fosse igual à impedância da linha. O valor do resistor equivalente R_m da Figura 3.6, pela norma NBR 7876 deve ser de 300 Ω .

O cabo coaxial C_C da Figura 3.7 deve ser terminado em ambas as pontas com um resistor de mesmo valor ôhmico que sua impedância característica, a fim de se evitarem reflexões nos sinais medidos. A impedância de entrada do instrumento de medição Z_e exerce esta função de um dos lados, assim, os valores do resistor R_2 , da impedância Z_e e da impedância do cabo são iguais a 50 Ω . O valor do resistor R_1 deve é igual a 275 Ω , resultando em um resistor equivalente de 300 Ω . O indutor L tem a função de filtro para o sinal da frequência industrial.

A rede formada por R_1 , R_2 e Z_e forma um divisor de tensão. A norma NBR 7876 mostra o método de cálculo da relação do divisor, que é dada pela Equação (3.2). Este fator é chamado de fator de rede. Este fator deve ser adicionado ao valor lido, em dB, pelo aparelho de medição.

$$FR = \frac{\frac{R_1 Z_e}{R_1 + Z_e} + R_2}{\frac{R_1 Z_e}{R_1 + Z_e}} \quad (3.2)$$

Onde: FR: fator de rede;

R_1 , R_2 são os valores dos resistores, em [Ω];

Z_e : impedância de entrada do aparelho, em [Ω].

Atenção especial foi dada ao aparelho de medição nas normas da ABNT que dizem respeito ao ensaio de medição da tensão de radiointerferência. O aparelho utilizado é um voltímetro, com escala em dB acima de um valor de referência, que mede o valor quase-pico de uma onda. Este instrumento possui características especiais, dadas pela norma NBR 7875 [36]. O voltímetro que mede o valor quase-pico, segundo a norma CISPR Publicação 1 de 1972 [38],

fornece os melhores resultados para estas interferências, uma vez que são formadas por pulsos repetidos. Voltímetros que medem valores eficazes podem fornecer valores mais precisos, mas as razões seguintes reforçam a utilização dos instrumentos quase-pico:

- 1) A variação da indicação com a frequência de repetição dos pulsos concorda razoavelmente bem com a indicação de instrumentos que medem valores eficazes para pulsos cuja frequência de repetição esteja na faixa de audiofrequências;
- 2) A grande experiência na utilização de instrumentos deste tipo de instrumento;
- 3) O grande número de aparelhos deste tipo existentes.

Além disso, os voltímetros quase-pico fornecem resposta parecida com o ouvido humano. Para pulsos repetidos, como sinais senoidais, o voltímetro de quase-pico fornece um valor bem próximo do valor eficaz da onda, e se aproxima mais desse valor conforme a frequência da onda aumenta.

Como dito anteriormente, a tensão de radiointerferência é medida em dB acima de um valor de referência, através da Equação (3.3).

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (3.3)$$

Onde: dB: valor em decibel da interferência;

V_2 : valor da tensão de radiointerferência em μV ;

V_1 : valor da tensão de referência, em μV .

Além do fator de rede (FR) calculado pela Equação (3.2), deve ser medido o valor do fator de atenuação do circuito, chamado de Fator RIV. Este fator é o resultado da atenuação do circuito e a norma sugere que deve ser medido em dB e acrescido ao valor lido no instrumento. No caso do IEE/USP este fator é expresso de forma que o valor da radiointerferência dado pela Equação (3.3) deve ser dividido por este fator para se chegar ao resultado final. Portanto, o cálculo da tensão de radiointerferência é calculado pela Equação (3.4), já com todos os fatores indicados anteriormente.

$$V_2 = \frac{10^{\frac{dB+FR}{20}}}{P} \quad (3.4)$$

Onde: V_2 : tensão de radiointerferência irradiada do corpo de prova;

dB: valor em dB lido no aparelho;

FR: fator de rede, no caso, 12;

P: fator RIV medido.

O método de ensaio proposto pela norma NBR 7876 [37] é o seguinte: eleva-se a tensão ao valor de 10% acima do valor da tensão de ensaio, a qual deve ser mantida durante cinco minutos. Após este tempo, faz-se a medição do valor da tensão de radiointerferência gerada no corpo de prova. Em seguida, a tensão deve ser diminuída em degraus de 10% da tensão de ensaio, até o valor de 30% desta tensão, e em cada degrau deve ser medida a tensão de radiointerferência. Depois, retorna-se a tensão ao valor inicial, nos mesmos degraus de tensão anteriores, onde são registrados os níveis de radiointerferência, e por último, a tensão é novamente abaixada como no início e feitos as medições das tensões de radiointerferência. A norma NBR 5309/1991 [11] prescreve que a tensão de ensaio deve ser 80% da tensão nominal do pára-raios.

Neste trabalho foi utilizado um método diferente do proposto pelas normas NBR 5309/1991 e NBR 7876. As medições foram realizadas em dois níveis de tensão:

- a) com a fonte ligada e o regulador indutivo no mínimo, para registro da tensão de radiointerferência do ambiente;
- b) na tensão de operação do equipamento; a fim de se determinar quais eram os pára-raios que emitiam tensão de radiointerferência.

3.5 Medição da corrente de fuga total

Os valores obtidos de tensão disruptiva de impulso atmosférico e de tensão disruptiva em frequência industrial permitiram a avaliação dos centelhadores dos pára-raios. A existência de descargas corona foi verificada através da medição de radiointerferência. Em seguida, foi realizada a medição da corrente de fuga total para a obtenção do valor de pico e da distorção harmônica, de modo a investigar a correlação entre esses valores e a existência de degradação no pára-raios.

A medição da corrente de fuga foi realizada na tensão de operação dos pára-raios, sendo feitos os registros da corrente de fuga através da queda de tensão sobre um resistor colocado entre o pára-raios e o ponto de aterramento. Com um osciloscópio, foram armazenadas as formas de onda da tensão aplicada e da corrente de fuga do pára-raios.

O circuito para medição da corrente de fuga é mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8: Circuito para o ensaio de medição da corrente de fuga. F: Fonte de tensão senoidal, DIV: divisor capacitivo, PR: pára-raios sob ensaio, R_S : resistor de medição da corrente de fuga, C_A : capacitor de acoplamento, que pode ser inserido ao circuito ou não.

Os pára-raios submetidos à medição encontravam-se em vários estágios de conservação. Alguns não apresentavam qualquer sinal externo de degradação enquanto que outros possuíam até marcas de descargas, como foi mostrado na Figura 3.1 (b). Assim, foi necessária a medição em vários pára-raios para se determinar a influência do estado dos equipamentos nas medições de corrente de fuga. Um dos cuidados tomados foi com a influência da poluição na porcelana dos pára-raios na corrente de fuga, para isso foram feitas medições com e sem uma cinta metálica colocada ao redor da porcelana, nas proximidades da base do pára-raios. A

cinta foi aterrada durante as medições. Foi verificado que a influência da porcelana na corrente de fuga total do pára-raios não era relevante.

A importância da medição da corrente de fuga reside no fato que esta corrente contém a informação de como estão os elementos internos dos pára-raios, como veremos no próximo item.

Apesar da descrição do ensaio na norma NBR 5309 [11] ter sido feita de maneira simples, a análise do resultado deste ensaio é um pouco mais complexa. À época da publicação das normas NBR 5287 [10] e NBR 5309 [11] os métodos de diagnóstico ainda estavam em desenvolvimento. Atualmente, com o avanço da eletrônica e da computação, a análise do resultado deste ensaio pode ser feita de forma mais elaborada, colhendo informações que antes não eram previstas, como a amplitude das harmônicas na forma de onda de corrente.

Aspectos teóricos da corrente de fuga em pára-raios

Como visto no Capítulo 2, a maior causa de falhas, tanto em pára-raios de ZnO, quanto de SiC, é a perda de estanqueidade. Isto provoca nos pára-raios de ZnO alterações nos blocos e nos pára-raios de SiC, alterações nos blocos, nos resistores equalizadores e centelhadores. Os resistores equalizadores são de vital importância, pois são eles os responsáveis por suportarem a tensão do sistema.

Salvo quando da ocorrência de um surto na linha, em que o pára-raios se comporta como um elemento condutor de baixa impedância da linha para a terra, espera-se que estes equipamentos se comportem como isoladores, conduzindo uma corrente muito pequena para a terra. Neste trabalho, será chamada de regime permanente a condição de operação sem surtos, e de regime transitório quando um pára-raios conduz um surto para a terra. Em regime permanente, os circuitos equivalentes de um pára-raios de ZnO e de SiC são diferentes. Na Figura 3.9 é mostrado o circuito equivalente de um bloco de ZnO, e na Figura 3.10 é mostrada uma representação qualitativa de um pára-raios de SiC.

Figura 3.9: Circuito equivalente para um bloco de ZnO. Fonte: Shirakawa et al [39]

Figura 3.10: Representação qualitativa do circuito equivalente para um pára-raios de SiC em regime permanente.

O circuito equivalente do pára-raios de ZnO em regime permanente representado na Figura 3.9 é utilizado por vários autores. Esta representação é a mais aceita para o modelamento destes pára-raios. Nesta figura, r representa o resistor de baixo valor do bloco de ZnO, para a simulação da dissipação de energia deste quando está aplicado sobre ele a tensão do sistema, R é a representação matemática do resistor variável dependente da tensão aplicada ao bloco e C é a representação matemática da capacitância do bloco, em paralelo com o resistor variável R . Pela análise do circuito da Figura 3.9 vemos que a corrente de fuga de um pára-raios de ZnO possui componentes resistiva e capacitiva, sendo que a componente capacitiva é predominante. Conforme Lundquist et al [17] anotaram, o valor da capacitância C da Figura 3.9 depende do diâmetro do bloco, sendo que o valor típico para a capacitância do bloco é de 75 pF.kV/cm^2 , originando valores de correntes capacitivas da ordem de 0,5 a 3 mA (pico), enquanto que a ordem para a corrente resistiva varia entre 50 e 250 μA (pico).

No caso do pára-raios de SiC a situação é semelhante. A Figura 3.10 é uma representação qualitativa do conjunto formado pelo resistor de equalização e pelo bloco de SiC, usando o

circuito equivalente do bloco de ZnO como base. Quando em regime permanente, a tensão entre a linha e a terra é dividida entre os resistores equalizadores dos centelhadores e os blocos. R_c e C_c representam o resistor variável e o capacitor do resistor de equalização. O bloco de SiC pode ser representado por um resistor de baixo valor r_b , um resistor variável R_b em paralelo com um capacitor C_b . Assim como nos pára-raios de ZnO, a componente capacitiva da corrente de fuga é predominante sobre a componente resistiva.

Conforme mencionado no Capítulo 2, a medição da corrente de fuga em pára-raios de ZnO, como método de avaliação destes equipamentos em campo, foi proposta por vários autores, visto que é a corrente de fuga que traz a informação de como estão os seus elementos internos. O primeiro trabalho citado no início daquele capítulo foi de Shaw e Holmgren [17] que propuseram o valor limite de 1000 μA para a corrente de fuga total como parâmetro. Este critério não evoluiu, visto que em muitos pára-raios de ZnO fabricados atualmente, a corrente de referência está em uma faixa de 2 a 20 mA. A corrente de referência é o valor adotado de corrente de fuga total que será usado para medir a tensão de referência do pára-raios. Tanto este método quanto outros para avaliação dos pára-raios de ZnO são indicados na IEC 60099-5 [4].

No caso dos pára-raios de SiC, a única indicação do monitoramento destes equipamentos é através da corrente de fuga total, indicada na norma NBR 5309 [11], que diz que o valor da corrente de fuga total deve ser anotado e também o registro da forma de onda deve ser feito para comparações futuras. Como vimos anteriormente no Capítulo 2, este método não é o mais preciso, haja vista que a degradação do pára-raios é dada pela componente resistiva da corrente de fuga, e a corrente total é principalmente capacitiva. A corrente de fuga resistiva é a que efetivamente provoca aquecimento dos elementos dos pára-raios, aquecimento este que pode provocar o efeito denominado avalanche térmica⁶. Tanto os elementos de SiC como ZnO possuem coeficientes de resistividade decrescente com o aumento da temperatura. Isto significa que a resistência é inversamente proporcional à temperatura do elemento, ao contrário dos resistores lineares em que a resistência é diretamente proporcional, assim, se a componente resistiva dos elementos dos pára-raios aumenta, diminui a sua resistência à passagem de corrente, provocando aumento da corrente de fuga resistiva, e assim

⁶ Do inglês “thermal runaway”.

sucessivamente, até chegar a um ponto no qual o pára-raios não consegue dissipar esta energia, entrando em colapso, que pode se caracterizar até mesmo por uma explosão.

Portanto, a medição da componente resistiva da corrente de fuga total é desejável, mas é de difícil execução em campo. Para se conseguir medir esta componente, dois métodos são propostos na literatura. O primeiro método é através da inclusão de um capacitor de acoplamento diretamente no condutor de alta tensão, por isso este método só pode ser utilizado em laboratório, ou seja, em medições “off-line”. O circuito para esta medição é mostrado na Figura 3.11, onde F representa a fonte de tensão senoidal, C_A é o capacitor de acoplamento, R_V é o resistor variável, P.R. representa o pára-raios sob ensaio e R_S é o resistor para medição da corrente de fuga. Um primeiro ajuste é feito em tensão baixa, assim a corrente que passará pelo pára-raios será praticamente capacitiva, a componente resistiva pode ser adotada como sendo zero. Se X_{CA} for muito maior que R_V a corrente que irá passar por este ramo do circuito será predominantemente capacitiva. Podemos então ajustar o valor de R_V de modo que as amplitudes dos sinais da tensão sobre o resistor variável R_V e o resistor R_S sejam iguais. Sendo ambas as corrente capacitivas, a defasagem entre elas será nula. Em seguida, a tensão é elevada ao valor em que se deseja medir a corrente de fuga resistiva. As tensões sobre R_V e R_S estarão com o mesmo valor de pico, porém, conforme se aumenta a tensão, a componente resistiva da corrente de fuga do pára-raios será mais pronunciada. Para a obtenção do valor desta componente, ambos os sinais podem ser medidos em um osciloscópio, onde pode ser feita a subtração dos sinais. O sinal resultante será a tensão devido à componente resistiva da corrente de fuga.

Figura 3.11: Circuito equivalente para medição da componente resistiva da corrente de fuga de pára-raios em laboratório. F: fonte de tensão, Div: divisor de tensão, C_A : capacitor de acoplamento, P.R.: pára-raios, R_V : resistor variável, R_S : resistor para medição da corrente de fuga do pára-raios, Osc.: osciloscópio.

O outro método para medição da componente resistiva da corrente de fuga total pode ser através de um sinal de corrente capacitiva gerada por um algoritmo de computador. Segundo

Heinrich e Hinrichsen [28], o sinal gerado é usado como referência ao invés do sinal real medido. Este sinal é gerado do sinal coletado no pára-raios e sinteticamente defasado através de um processador digital. Como o sinal da corrente de fuga resistiva está defasado em 90° da componente capacitiva da corrente de fuga total, o sinal gerado é assumido como sendo a corrente de fuga capacitiva, e então os sinais da corrente de fuga total e este sinal de referência são subtraídos e a resultante é a componente resistiva da corrente de fuga total. Como os autores assinalam em seu trabalho, a defasagem da corrente de fuga total e a tensão do sistema não estão perfeitamente defasados em 90° , mas compreendida entre 77° e 87° , para diferentes tipos de blocos de ZnO. Esta defasagem, conforme Heinrich e Hinrichsen [28] assinalam em seu trabalho, não mudam ao longo do tempo, sendo que este método pode ser utilizado como método de diagnóstico de pára-raios. Além disto, não sofrem influência das harmônicas do sistema. Um exemplo de medição da componente resistiva da corrente de fuga total pode ser visto na Figura 3.12.

Figura 3.12: Corrente resistiva obtida através do método de referência virtual. Fonte: Adaptado de Heinrich e Hinrichsen [28].

No entanto, Heinrich e Hinrichsen assinalam que este método fornece bons resultados apenas nos casos em que a corrente de fuga resistiva possui valores elevados, não sendo muito preciso quando as amplitudes dos semi-ciclos positivo e negativo não são iguais.

Uma alternativa para a análise da corrente de fuga foi proposta por Lundquist et al [17]. O método proposto pelos autores foi o de adquirir o sinal da corrente de fuga e fazer-se uma análise da componente de terceira harmônica (3^a H) como parâmetro para avaliação de pára-raios de ZnO, método reforçado por Calazans, Ximenes e Rezende [21], Schei [27] e por

Larsen e Lien [31]. Este método é baseado na característica não linear dos blocos de ZnO, sendo assim, a corrente de fuga total que atravessa o pára-raios apresenta uma grande distorção, e a componente resistiva desta corrente pode ser relacionada com a 3ª H da corrente de fuga total.

Como mostrado nas Figura 3.9 e Figura 3.10, os pára-raios de ZnO e SiC em regime permanente possuem elementos não lineares conectados entre a linha e a terra. Estes elementos não lineares, quando têm entre seus terminais uma tensão senoidal aplicada, a corrente resultante é distorcida, conforme anotaram Dugan et al [40]. Segundo os autores, isto ocorre por causa da interação da tensão senoidal com um resistor cuja característica é uma exponencial, conforme mostra a Figura 3.13.

Figura 3.13: Distorção de corrente causada por um resistor não linear. Fonte: Dugan et al [40].

A interação entre a senóide da tensão e a exponencial do resistor não linear, ponto a ponto, origina a forma de onda distorcida da corrente da Figura 3.13. Assim, tanto os pára-raios de ZnO quanto os de SiC têm correntes de fuga distorcidas.

Qualquer forma de onda periódica distorcida pode ser expressa como a soma de várias senóides puras de frequências com múltiplos inteiros da frequência fundamental da forma de onda original, conforme anotam Dugan et al [40]. As senóides puras são chamadas de harmônicas. A decomposição da forma de onda distorcida em várias senóides é chamada de Série de Fourier, em homenagem ao matemático que descobriu o conceito.

Pelo exposto, a aquisição do sinal da corrente de fuga total do pára-raios de ZnO permite a decomposição deste sinal. O método indicado para isto é o da FFT (Fast Fourier Transform, sigla em inglês para Transformada Rápida de Fourier), método computacional mais eficiente e rápido para a obtenção do sinal do domínio do tempo em domínio da frequência.

Segundo Lundquist et al [17], Shirakawa et al [39] e Lee et al [41], a 3ª H da corrente de fuga total, quando o bloco de ZnO está sujeito a um sinal de tensão puramente senoidal (sem distorções harmônicas), é devido à componente resistiva da corrente de fuga total, e 3ª H irá aumentar com o aumento da componente resistiva. Analisando-se o circuito da Figura 3.9 e a Figura 3.13, vemos que o resistor variável R é o responsável pelo sinal da corrente de fuga total ser distorcido.

A norma IEC 60099-5 [4] indica a medição da corrente de fuga como método de diagnóstico de pára-raios de ZnO. Segundo esta norma, a medição da corrente de fuga total não é um parâmetro de avaliação, pois a corrente de fuga total é principalmente capacitiva, e não há nenhuma indicação que a variação desta corrente seja indicação de anormalidade, bem como se alguma anormalidade ocorrer, esta ocasione variação na corrente de fuga total. Por outro lado, a IEC 60099-5 indica que a componente resistiva da corrente de fuga total é um bom parâmetro de avaliação de pára-raios de ZnO. Segundo a IEC 60099-5, a componente resistiva da corrente de fuga total é definida como o nível de corrente no instante que a tensão atinge o seu máximo ($\frac{dV}{dt} = 0$), como indicado na Figura 3.14. Como indicado nesta norma, o valor da componente resistiva é da ordem de 5 a 20% da corrente de fuga capacitiva em condições normais, correspondendo a valores cerca de 10 a 600 μA .

Figura 3.14: Corrente de fuga típica de um resistor não linear de óxido metálico em laboratório. Fonte: IEC 60099-5 [4].

A norma IEC 60099-5 [4] e Lee et al [41] indicam que, tanto a corrente resistiva quanto a 3ª H são dependentes da temperatura do elemento de ZnO, conforme mostra a Figura 3.15.

Figura 3.15: Taxas de mudança da componente resistiva da corrente de fuga e harmônicas da corrente de fuga total à tensão de 4,8 kV em função da temperatura. Fonte: Lee et al [41].

A Figura 3.16 mostra a dependência da corrente de fuga com relação à temperatura. Pela análise desta figura, vemos que a corrente resistiva em corrente alternada é mais sensível às mudanças de temperatura do que a corrente de fuga em corrente contínua. Para termos de comparação, a mesma figura mostra a corrente de fuga capacitiva.

Figura 3.16: Características tensão-corrente típicas para um resistor não linear de óxido metálico, onde U é a tensão aplicada e Ur é a tensão nominal. Fonte: IEC 60099-5 [4].

O conceito da componente de terceira harmônica (3^a H) pode ser melhor entendido analisando-se a Figura 3.17.

(a) V_S : 3,2 kV_p, I_T : 300 μ A_p, I_R : 120 μ A_p e I_3 : 30 μ A_p

(b) V_S : 4,8 kV_p, I_T : 300 μ A_p, I_R : 300 μ A_p e I_3 : 60 μ A_p

(c) V_S : 5,2 kV_p, I_T : 1000 μ A_p, I_R : 1000 μ A_p e I_3 : 300 μ A_p

Figura 3.17: Formas de onda da tensão aplicada e a corrente de fuga em resistor de ZnO. V_S é a tensão aplicada, I_T é a corrente de fuga total, I_R é a componente resistiva e I_3 a componente de terceira harmônica, base de tempo dos oscilogramas é 0,5 ms. Fonte: Lee et al [41].

Na Figura 3.17 verificamos que, conforme aumentamos a tensão aplicada ao bloco, o valor da corrente resistiva aumenta, aumentando também a 3ª H da corrente total. Assim, por causa da sensibilidade da 3ª H com relação ao aumento da componente resistiva da corrente de fuga e ao aumento da temperatura, a 3ª H é um bom indicativo de alteração da condição dos blocos de ZnO. Conforme assinala Schei [27], a amplitude da 3ª H na corrente de fuga total varia de acordo com o coeficiente de não linearidade dos blocos de ZnO. Valores típicos da 3ª H variam entre 10 e 40% da corrente resistiva dos blocos de ZnO, assim, é possível monitorar a componente resistiva da corrente de fuga total através da medição da 3ª H da corrente de fuga total.

O problema da medição da 3ª H da corrente de fuga reside no fato de que esta medição sofre influência da distorção harmônica da tensão do sistema. Schei [27], Heinrich e Hinrichsen [28] e a norma IEC 60099-5 [4] apontam que a 3ª H da tensão do sistema produz uma corrente capacitiva de 3ª H com amplitude comparável a 3ª H da corrente produzida pela resistência não linear do pára-raios de ZnO. Pela análise do circuito da Figura 3.9, vemos que a capacitância C do bloco de ZnO ficará sujeita a esta distorção, produzindo esta corrente com frequência três vezes maior que a frequência fundamental da corrente que a atravessa. O método de análise de harmônicas não consegue distinguir entre a 3ª H da corrente resistiva da corrente capacitiva, então erros consideráveis podem ocorrer.

3.6 Medição da resistência de isolamento

Os pára-raios do fabricante A foram submetidos ao ensaio de medição da resistência de isolamento antes da desmontagem, tendo-se por objetivo a obtenção de maiores informações a respeito destes equipamentos. O ensaio consistiu na medição da resistência do isolamento através do instrumento “Megger” no pára-raios completo e nas unidades que o constituíam isoladamente.

3.7 Medição da temperatura com a termovisão

A termografia é uma técnica de visualização de pontos aquecidos em uma determinada superfície por aparelhos, através do espectro infravermelho. O infravermelho é uma frequência eletromagnética naturalmente emitida por qualquer corpo, com temperatura acima do zero absoluto, com intensidade proporcional a sua temperatura. Considerando que uma anomalia em um determinado equipamento deriva da produção de calor pelo efeito Joule e que todo objeto irradia energia infravermelha proporcional à sua temperatura, a inspeção termográfica é a técnica de inspeção não destrutiva realizada com utilização de sistemas infravermelhos, para a medição de temperatura ou observação de padrões diferenciais de distribuição de calor, com o objetivo de propiciar informações relativas à condição operacional do equipamento.

O termovisor é uma câmera que capta a luz na faixa do infravermelho (calor) e a converte em sinal eletrônico, produzindo imagens em padrão TV/vídeo, que permitem a visualização de diferenças de temperatura. Assim, através do termovisor, fica extremamente fácil a localização de regiões quentes ou frias, através da interpretação dos termogramas que fornecem uma imagem. As câmeras são dotadas de recursos que permitem abranger uma faixa de temperatura que vai de -20°C a 1500°C , com opção de filtros especiais, fornecendo uma imagem de qualidade, independente da presença do sol ou outra fonte de calor intensa. Atualmente, os termovisores são leves e portáteis, permitindo sua utilização em locais de difícil acesso. A imagem produzida por eles pode ser gravada, para posterior estudo através de processamento. Esse processo permite uma maior segurança (pois não existe contato físico com as instalações), não interfere na operação (a verificação de equipamentos em pleno funcionamento), e possui alto rendimento (a inspeção de grandes superfícies em pouco tempo).

O projeto de norma 03:037.04-001 - Guia de Aplicação de Pára-Raios de Resistor Não Linear em Sistemas de Potência de Corrente Alternada - Procedimento [42], prevê o monitoramento de pára-raios através da termovisão. Segundo citado no projeto de norma, em relação aos pára-raios, essa técnica baseia-se na comparação de possíveis variações de temperatura no invólucro de um mesmo pára-raios, geradas pela circulação interna de corrente. Essa corrente é devida à existência de centelhadores parcialmente danificados e ou à degradação dos

resistores não lineares de equalização ou principais. Essas variações de temperatura são indicativas da evolução de um processo de degradação que pode resultar em falha intempestiva.

3.8 Medições em campo

3.8.1 Considerações gerais

Foram realizadas medições da corrente de fuga em pára-raios instalados na subestação da Usina de Paraibuna, onde os pára-raios estão montados sobre bases isolantes. A subestação possui pára-raios de SiC e ZnO. Estes últimos foram instalados com medidores de corrente de fuga, possibilitando a comparação entre estes instrumentos e o aparelho DIAG.

O aparelho DIAG consiste de um amperímetro tipo alicate. Segundo o Manual de Utilização do aparelho [43], o amperímetro é constituído de um transformador de corrente com compensação de fluxo e uma unidade de processamento de sinais com indicador digital. Este instrumento possui duas escalas: uma até 2 mA e outra até 20 mA, podendo medir correntes em três faixas de frequências, menor que 500 Hz, maior que 5 kHz, e em 180 Hz, esta para medição da 3ª H.O. O instrumento DIAG possui também duas saídas com bornes tipo “BNC”, uma sem filtro e outra com filtro, que possibilita a aquisição de sinal por um osciloscópio. A saída sem filtro possibilita a aquisição do sinal total, e a saída com filtro possibilita a aquisição do sinal de 180 Hz. O circuito do instrumento é mostrado na Figura 3.18.

Figura 3.18: Circuito do instrumento DIAG para medição da corrente de fuga. Legenda: V: Amplificador, N_p : enrolamento do primário (conexão ao terra), N_i : enrolamento do alicate, E_{ji} : tensão induzida no enrolamento do alicate, U_v : Tensão de saída do amplificador, U_m : tensão proporcional à corrente do primário, Φ : fluxo magnético no núcleo toroidal, I_p : corrente primária (corrente de fuga), I_s : corrente de compensação. Fonte: Manual do DIAG [43].

O intuito da aquisição do DIAG foi o de possibilitar a medição de corrente de fuga em pára-raios no campo. Para isto, foi feita uma comparação entre o instrumento e o resistor para medição de corrente no Laboratório de Alta Tensão, a fim de se determinar se as medições do instrumento eram confiáveis. O resultado desta comparação poderá ser verificado no Capítulo 4.

A subestação da Usina de Paraibuna possui oito circuitos com tensão de 88 kV. Nem todos os circuitos foram monitorados com corrente de fuga. Os circuitos que foram medidos são identificados pela companhia transmissora como CAU-01, CAU-02, JAG-01 e JAG 02. O circuito CAU-02 é o único equipado com pára-raios de ZnO. Cada fase é identificada pela concessionária como sendo Vermelha (A), Branca (B) e Azul (C), sendo a fase Branca a fase central.

3.8.2 Primeira medição na subestação de Paraibuna

Na primeira ocasião o objetivo foi adquirir conhecimentos a respeito da sensibilidade das medições, bem como das possíveis interferências e dificuldades que poderiam ocorrer. Também foi feita uma comparação entre a medição do transformador de potencial instalado na fase central de um dos circuitos com um sensor de campo, que foi colocado no chão da subestação, logo abaixo da mesma fase. Esta medição visava comparar o sinal obtido com o sensor e aquele obtido através do TP. Em seguida seria feita a análise dos harmônicos na tensão do sistema. Se as distorções medidas pelo TP fossem próximas às distorções verificadas no sensor, este poderia ser utilizado para medições futuras, conforme Lundquist et al [17] indicam em seu trabalho.

Foram feitas medidas da corrente de fuga dos pára-raios nas seguintes situações:

- Com o cabo de aterramento conectado e desconectado da base de treliça metálica: esta medição tinha como objetivo verificar se entre o cabo de aterramento e a treliça metálica da base formavam um laço que poderia sofrer influência dos campos elétrico e magnético da subestação, induzindo correntes que poderiam ocasionar erros consideráveis;
- Medições antes e depois dos medidores de corrente e contadores de descarga, a fim de se determinar se estes equipamentos produziam interferências na medição da corrente de fuga.

Os arranjos de medição em cada posição poderão ser vistas no Capítulo 4.

3.8.3 Segunda medição na subestação de Paraibuna

Na primeira medição na subestação de Paraibuna foram levantadas algumas dúvidas a respeito da medição, sendo necessária a realização de uma nova medição após ensaios preliminares realizados no IEE-USP. Estes ensaios preliminares visaram à investigação do desempenho do aparelho DIAG e de possíveis correntes induzidas no cabo de aterramento do pára-raios. A descrição destes ensaios e os resultados são mostrados no Capítulo 4.

As medições na subestação foram realizadas com o mesmo procedimento citado no item 3.8.1. A corrente de fuga foi medida antes e após o contador de descargas, mantendo-se o cabo de aterramento do pára-raios conectado à treliça metálica.

CAPÍTULO 4

INVESTIGAÇÕES REALIZADAS NO LABORATÓRIO E NO CAMPO

Neste capítulo serão mostrados os resultados das investigações realizadas no laboratório, considerando-se o pára-raios completo e os componentes internos de algumas unidades desmontadas. Serão apresentados também os resultados obtidos nas medições realizadas na subestação de Paraibuna.

4.1 Identificação dos pára-raios

Como citado anteriormente no Capítulo 3, os pára-raios cedidos pela concessionária de energia são de dois fabricantes, sendo identificados como fabricante A e fabricante B, cujos dados são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dados dos pára-raios.

Fabricante	Corrente de descarga nominal (kA)	Tensão Nominal (kV)	Número de módulos	Quantidade
A	10	85	2	6
B	10	132	2	6

Os pára-raios do fabricante A são de serviço pesado e compostos por módulos de mesmas características, estando bastante deteriorados. Os pára-raios do fabricante B também eram de

serviço pesado estavam em melhor estado de conservação, sendo compostos por dois módulos de características distintas.

4.2 Tensão disruptiva de impulso atmosférico e à frequência industrial

Os ensaios de tensão disruptiva à frequência industrial e de impulso atmosférico testam o comportamento dos centelhadores dos pára-raios frente à sobretensões temporárias e impulsivas do sistema. O comportamento desejável do pára-raios frente a estes ensaios é, conforme anotado no Capítulo 2, ter o valor de tensão disruptiva de impulso atmosférico menor possível, para garantir o máximo de proteção, e ter o valor de tensão disruptiva à frequência industrial maior possível, para evitar interrupções indevidas por ocasião de sobretensões operacionais.

A metodologia utilizada no laboratório foi descrita no Capítulo 3. No ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial foram feitas dez aplicações de tensão, elevando-se a tensão uniformemente desde zero até a disrupção dos centelhadores dos pára-raios, sendo posteriormente determinado o valor de tensão disruptiva.

No ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico, a forma de onda foi ajustada com o pára-raios no circuito, tendo-se como referência o valor normalizado de $1,2/50 \mu s$. Em seguida, o pára-raios foi retirado do circuito para o ajuste do valor de crista especificado para as amostras dos fabricantes A e B. Para as amostras do fabricante A foi ajustado o valor de crista da tensão em 210 kV, com base em informações do fabricante [45]. As informações referentes às amostras do fabricante B não estavam disponíveis, sendo ajustado o valor de crista de 440 kV, conforme especificado na norma NBR 5287 [10].

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 são mostrados os resultados obtidos de tensão disruptiva de impulso atmosférico e de frequência industrial.

Tabela 4.2: Valores de tensão disruptiva dos pára-raios do fabricante A.

Pára-raios	Tensão disruptiva à frequência industrial (kV)	Tensão disruptiva de impulso atmosférico	
		Pol. Positiva (kV)	Pol. Negativa (kV)
A1	134	182	181
A2	105	171	168
A3	85	178	178
A4	102	172	167
A5	*	173	172
A6	*	173	188

Nota: * não foi possível determinar a tensão disruptiva à frequência industrial.

Nos pára-raios A5 e A6 não foi possível determinar os valores de tensão disruptiva à frequência industrial, pois as mesmas apresentaram comportamento instável a partir de 80 kV. Este comportamento instável era provocado pelo aumento excessivo da corrente circulando pelos resistores de equalização dos pára-raios e, portanto, não estava caracterizada a disrupção dos centelhadores. O valor mínimo de tensão disruptiva à frequência industrial, segundo informações do fabricante A [44], é de 160 kV. Portanto, A1, A2, A3 e A4 também foram reprovados. No ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico, todos os pára-raios do fabricante A cortaram os impulsos aplicados, para ambas as polaridades, sendo então aprovados.

Tabela 4.3: Valores de tensão disruptiva dos pára-raios do fabricante B.

Pára-raios	Tensão disruptiva à frequência industrial (kV)	Tensão disruptiva de impulso atmosférico	
		Pol. Positiva (kV)	Pol. Negativa (kV)
B1	226	382	354
B2	219	374	363
B3	224	364	359
B4	218	340	322
B5	188	349	344
B6	233	355	344

Segundo o fabricante B [45], o valor mínimo de tensão disruptiva à frequência industrial é de 211 kV. Por este critério, somente a amostra B5 é reprovada. No ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico todos os pára-raios do fabricante B cortaram os impulsos aplicados, sendo aprovados no ensaio.

4.3 Medição da tensão de radiointerferência

A tensão de radiointerferência foi medida com o pára-raios energizado na tensão de operação. Este procedimento é diferente do adotado na norma NBR 7876 [37], que prevê a medição no valor especificado pela norma do equipamento. A norma NBR 5309 [11] especifica que a tensão de ensaio deve ser 80% da tensão nominal do pára-raios. Esta tensão, conforme a NBR 7876, deve ser mantida por 5 minutos, em seguida deve ser diminuída em degraus de 10% do valor da tensão de ensaio até 30% deste valor. Em seguida, novamente elevada nos mesmos degraus até a tensão de ensaio e novamente diminuída nos mesmos degraus. Em cada degrau deve ser feita a medição da tensão de radiointerferência.

A tensão de operação do pára-raios, fabricante A, é de 51 kV e a do fabricante B é de 80 kV. Esses valores são correspondentes às tensões fase-terra do sistema trifásico de 88 kV e de 138 kV, respectivamente. Segundo as normas NBR 5309 e NBR 7876, a tensão de ensaio deveria ser 68 kV no pára-raios do fabricante A e 106 kV nos pára-raios do fabricante B. Entretanto, o objetivo da medição foi a verificação dos níveis de radiointerferência na tensão de operação dos pára-raios. Os resultados das medições são mostrados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4: Valores da tensão de radiointerferência nos pára-raios do fabricante A (tensão nominal 85 kV).

Pára-raios	Tensão aplicada (kV)	Tensão de radiointerferência e ionização interna (μV)
A1	51	*
A2		**
A3		11
A4		29
A5		143
A6		8033

Notas: * tensão de radiointerferência menor que a proveniente do ambiente;

** medição não realizada.

Tabela 4.5: Resultados da medição da tensão de radiointerferência e nível de ionização interna nos pára-raios do fabricante B (tensão nominal 132 kV).

Pára-raios	Tensão aplicada (kV)	Tensão de radiointerferência e ionização interna (μV)
B1	80	23
B2		80
B3		*
B4		*
B5		4518
B6		6381

Nota: * tensão de radiointerferência menor que a proveniente do ambiente.

O nível máximo de radiointerferência prescrito na norma NBR 5287 [10] é de $1000 \mu\text{V}$ em pára-raios com tensão nominal maior que 39 kV. Os pára-raios A6, B5 e B6 apresentaram valores superiores ao especificado. Ressalta-se que esses resultados foram obtidos, considerando-se na medição, valores de tensão menores do que aqueles especificados nas normas (68 kV, fabricante A, e 106 kV, fabricante B).

4.4 Medição da corrente de fuga total

As medições da corrente de fuga nos pára-raios dos fabricantes A e B foram realizadas conforme descrito no Capítulo 3. Os resultados das medições são mostrados na Tabela 4.6. Os valores foram medidos na tensão de operação dos pára-raios.

Tabela 4.6: Resultados da medição da corrente de fuga.

Pára-raios	Tensão aplicada (kV)	Corrente de fuga (mA)			I_p/I_{rms}	3 ^a H (%)	Defasagem (°)
		I_{p-p}	I_{rms}	I_p			
A1	51	0,325	0,131	0,190	1,450	6,7	89
A2		0,445	0,147	0,192	1,304	10,1	65
A3		0,735	0,291	-0,456	1,567	24,9	54
A4		1,500	0,448	0,766	1,710	32,9	47
A5		0,669	0,234	-0,357	1,526	5,7	39
A6		0,706	0,248	0,348	1,403	5	67
B1	80	0,727	0,293	-0,396	1,352	5,6	73
B2		0,964	0,352	0,501	1,423	5,8	75
B3		0,691	0,250	0,346	1,382	6,8	79
B4		0,684	0,260	-0,362	1,392	6,9	68
B5		0,698	0,300	0,430	1,433	7,5	83
B6		1,620	0,628	0,823	1,311	18	51

Notas: I_{p-p} : valor pico a pico da corrente de fuga; I_{rms} : valor rms da corrente de fuga; I_p : valor de pico da corrente de fuga. Os valores com sinal negativo indicam que o maior valor de pico foi medido no semi-ciclo negativo, enquanto que os valores sem sinal indicam que o maior valor de crista encontrava-se ou no semi-ciclo positivo ou os semi-ciclos eram iguais; I_p/I_{rms} refere-se à relação entre o valor de pico e o valor rms da corrente de fuga; Defasagem: diferença angular, em graus, entre a tensão aplicada e a corrente de fuga do pára-raios, medida através de osciloscópio.

Os valores pico a pico (I_{p-p}) foram medidos no osciloscópio. As formas de onda da corrente de fuga foram registradas em planilha eletrônica para posterior tratamento e análise com o

programa PSpice [46]. Com esta ferramenta computacional foi possível obter os valores eficazes (I_{rms}) e a corrente de pico (I_p). O valor da componente de terceiro harmônico (3º H) da Tabela 4.6 são dados em porcentagem da componente de frequência fundamental.

O campo **Defasagem** (º) da Tabela 4.6 refere-se à defasagem, em graus, entre a tensão aplicada e a corrente de fuga do pára-raios, medida através do osciloscópio. Este parâmetro foi registrado com o objetivo de se verificar uma possível relação a defasagem e o estado de degradação do pára-raios.

Os pára-raios A3, A5, B1 e B4 apresentaram maior valor de pico (I_p) no semi-ciclo negativo. As demais amostras apresentaram maior valor de pico (I_p) no semi-ciclo positivo ou os semi-ciclos apresentaram amplitudes iguais. O fato mostra que as formas de onda das correntes de fuga dos pára-raios podem apresentar componentes harmônicas pares.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram os resultados obtidos das formas de onda da tensão aplicada e a corrente de fuga dos pára-raios A1 e A3, respectivamente, bem como o resultado dos cálculos das suas componentes harmônicas obtidos no programa PSpice [46].

Figura 4.1: Gráficos dos resultados obtidos no ensaio de medição da corrente de fuga no pára-raios A1. (a) Formas de onda da tensão aplicada e a corrente de fuga; (b) Resultados obtidos do cálculo das componentes harmônicas da tensão aplicada e da corrente de fuga total.

**GRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE CORRENTE DE FUGA
PR - A3 - TENSÃO DE ENSAIO - 51 kV**

(a)

**FFT das formas de onda obtidas no ensaio de corrente de fuga
PR A3**

(b)

Figura 4.2: Gráficos dos resultados obtidos no ensaio de medição da corrente de fuga no pára-raios A3. (a) Formas de onda da tensão aplicada e a corrente de fuga; (b) Resultados obtidos do cálculo das componentes harmônicas da tensão aplicada e da corrente de fuga total.

4.5 Medição da resistência de isolamento

A medição da resistência de isolamento consistiu na utilização do instrumento Megger. Este instrumento permitiu a aplicação de 5 kV aos terminais do pára-raios, possuindo duas escalas para a leitura da resistência do isolamento. A medição foi feita apenas em três pára-raios do fabricante A, sendo que estes foram medidos completos e em cada módulo. Os resultados deste ensaio podem ser verificados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Resultados da medição da resistência de isolamento.

Amostra	Medição da resistência de isolamento (MΩ)		
	Módulo Superior	Módulo Inferior	P.R. Completo
A2	> 50.000	< 0,1	> 50.000
A4	> 50.000	30	> 50.000
A6	8.000	30	7.000

Pode ser observado na Tabela 4.7 que as amostras apresentaram valores muito diferentes entre si e também entre os módulos. Pela análise dos resultados obtidos nos pára-raios completos, constata-se que A6 apresentou menor valor. A4 e A6 apresentaram valores menores no módulo superior em comparação com o pára-raios A2, entretanto, apresentaram valores maiores no módulo inferior.

4.6 Medição de temperatura com termovisor

A medição de temperatura com termovisor foi realizada no Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP, por um técnico da concessionária. Foram selecionados alguns pára-raios para essa medição. Cada pára-raios foi dividido em 4 faces. Em cada face foi feito um termograma. Em cada termograma a câmera marca uma linha, chamada LI01, onde são medidas as temperaturas.

Inicialmente, procurou-se fazer os registros de temperatura com pouco tempo de energização, cerca de 30 minutos. Este procedimento revelou-se inadequado, pois nenhum dos pára-raios

apresentou aquecimento. Fez-se então uma nova tentativa, agora com 6 horas de energização. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Resultados obtidos no ensaio de medição de temperatura através do termovisor.

Pára-raios	Tensão aplicada (kV)	Temp. Máx (°C)	ΔT Máx (°C)	Temp. amb. (°C)	ΔT P.R. Tamb (°C)
A1	51	20,8	2,0	19,2	1,6
A2		21,6	2,0		2,4
A5		24,2	5,1		5,0
B3	80	20,8	2,9	17,2	3,6
B5		20,0	2,9		2,8
B6		33,7	16,8		16,5

Os campos **Temp. Máx (°C)**, **ΔT Máx (°C)**, **Temp. amb. (°C)** e **ΔT P.R. Tamb (°C)** referem-se à maior temperatura encontrada no pára-raios sob a linha LI01, à máxima diferença de temperatura sobre a linha LI01, à temperatura ambiente no momento da aquisição dos termogramas e a diferença entre a maior temperatura encontrada no pára-raios em relação à temperatura ambiente, respectivamente.

Os resultados mostrados na Tabela 4.8 foram obtidos através das leituras sobre a linha LI01. Foram feitos registros das temperaturas máximas e mínimas de cada face. A Figura 4.3 mostra um termograma de uma das faces do pára-raios B5, bem como o gráfico das leituras de temperatura sobre a linha LI01.

(a)

(b)

Figura 4.3: (a) Exemplo de termograma adquirido no Laboratório de Alta Tensão. (b) Gráfico das medições de temperatura, onde aparecem as temperaturas máxima e mínima do pára-raios. O termograma mostrado refere-se ao pára-raios B6.

Com relação aos resultados obtidos, pode-se observar que dois pára-raios apresentaram aquecimento acima de 3°C (A5 e B6). Os valores de ΔT Máx e ΔT P.R. Tamb ficaram bem próximos, o que era esperado, pois os pára-raios encontravam-se em local abrigado e bem estável termicamente, fazendo com que os pára-raios estivessem em equilíbrio térmico com o ambiente no início da energização. As diferenças de temperatura sob a linha LI01 podem ser explicadas por diferenças da distribuição de potencial dos pára-raios e por possíveis defeitos internos.

4.7 Desmontagem dos pára-raios

Alguns pára-raios foram desmontados para inspeção visual, tendo-se por objetivo verificar alguma anomalia nos elementos internos. Os pára-raios selecionados foram A2, A4 e A6, fabricante A, e B1, B3 e B5, fabricante B.

Os pára-raios do fabricante A possuíam ímãs entre os centelhadores. A função destes ímãs era auxiliar na extinção da corrente subsequente do sistema, conforme descrito no Capítulo 2. A Figura 4.4 (a) mostra uma foto dos componentes internos de um dos pára-raios do fabricante A. Este fabricante adotou como filosofia de montagem a sobreposição de centelhadores, com discos de material metálico. Entre os eletrodos dos centelhadores, o fabricante A colocou um resistor de equalização, conforme pode ser verificado na Figura 4.5. Nesta mesma figura, é mostrada a posição dos ímãs.

Figura 4.4: Componentes internos dos pára-raios. (a) Fabricante A; (b) Fabricante B.

Figura 4.5: Vista em corte do pára-raios do fabricante A [44].

Os pára-raios do fabricante B possuíam bobinas nas extremidades dos centelhadores, com o mesmo propósito dos ímãs nos pára-raios do fabricante A. A Figura 4.4 (b) mostra uma foto tirada no momento da desmontagem destes pára-raios, mostrando em detalhes a disposição dos componentes internos dentro do invólucro. Nos pára-raios do fabricante B, os centelhadores são sobrepostos e envolvidos com uma espécie de bandagem, formando assim um conjunto de centelhadores.

Em paralelo com este conjunto, é montado o resistor de equalização, o qual propicia uma equalização do potencial de vários centelhadores ao mesmo tempo. A Figura 4.7 é uma vista em corte do conjunto de centelhadores dos pára-raios deste fabricante. Nesta figura também é possível ver em detalhe o conjunto de centelhadores mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Detalhe do conjunto de centelhadores, com bobina em uma das extremidades e o resistor equalizador.

Figura 4.7: Vista em corte e detalhamento do conjunto de centelhadores dos pára-raios do fabricante B [45].

O resultado da abertura dos pára-raios e da inspeção visual foi que, de maneira geral, havia a presença de bolor em alguns componentes internos dos pára-raios do fabricante A, denunciando a presença de umidade em seu interior. De maneira geral, os componentes internos dos pára-raios deste fabricante estavam em pior estado do que os componentes dos pára-raios do fabricante B. Alguns apresentaram forte odor após a abertura, indicando que houve a entrada de umidade no pára-raios. A Tabela 4.9 mostra os resultados da inspeção visual.

Tabela 4.9: Resultados da inspeção visual

Pára-raios	Anomalia detectada	Figura ilustrativa	Observações
A2	Presença de umidade		Forte odor no módulo superior
	Marcas de descarga nos blocos	4.8	
	Marcas nos ímãs	4.9	Não foi possível identificar a fonte das marcas
A4	Marca de descarga nos centelhadores	4.10	
	Marcas de descargas nos blocos	4.11	
	Marcas de umidade	4.12	Bolor
A6	Marcas de descarga nos centelhadores	4.13	
	Marcas de descarga nos blocos	4.14	
B1	Nenhuma		Aparentemente componentes internos em bom estado
B3	Marcas de bolor nos blocos	4.15	
	Oxidação	4.16	
	Conjunto de centelhadores com um suporte quebrado	4.17	
B5	Vários conjuntos de centelhadores quebrados	4.18 (a) e (b)	Aparentemente, a amostra sofreu alguma queda.

Figura 4.8: Marcas de bolor e descargas nos blocos do pára-raios A2.

Figura 4.9: Marcas não identificáveis dos ímãs do pára-raios A2.

Figura 4.10: Marcas de descarga nos centelhadores do pára-raios A4.

Figura 4.11: Marcas de descarga nos blocos do pára-raios A4.

Figura 4.12: Marcas de umidade nos blocos do pára-raios A4.

Figura 4.13: Marcas de descarga nos centelhadores do pára-raios A6.

Figura 4.14: Marcas de descarga nos blocos do pára-raios A6.

Figura 4.15: Marcas de bolor nos blocos do pára-raios B3.

Figura 4.16: Marcas de oxidação nos componentes metálicos internos do pára-raios B3

Figura 4.17: Conjunto de centelhadores com suporte do resistor de equalização quebrado do pára-raios B3.

(a)

(b)

Figura 4.18 (a) e (b): Fotos de conjuntos de centelhadores quebrados do pára-raios B5.

Portanto, somente a amostra B1 estava sem marcas aparentes. Todos os outros pára-raios mostravam algum sinal visível de degradação.

4.8 Componentes internos

Os testes nos componentes internos tinham como objetivo verificar alguma relação com os resultados obtidos nos pára-raios completos. Também foi estudada a influência da 3ª H da tensão na componente de 3ª H da corrente de fuga, sendo levantada a curva $V \times I$ dos resistores equalizadores dos pára-raios.

4.8.1 Levantamento da curva $V \times I$ dos resistores equalizadores dos pára-raios

O levantamento da curva $V \times I$ dos resistores equalizadores foi realizado usando-se uma fonte de corrente contínua que permitia a variação contínua da tensão. Para medição da tensão foi utilizado um divisor de tensão resistivo e, para a medição da corrente, um resistor “shunt”, conforme mostra a Figura 4.19.

Figura 4.19: Circuito utilizado para medição da característica $V \times I$ dos resistores equalizadores dos pára-raios. F: Fonte de tensão contínua de amplitude variável; DIV: divisor resistivo, R_s : resistor “shunt”; OSC: osciloscópio.

Figura 4.20: Arranjo utilizado para medição da característica $V \times I$ dos resistores equalizadores dos pára-raios.

Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 4.22 e 4.23.

Figura 4.21: Resultado do levantamento da característica $V \times I$ dos resistores equalizadores do pára-raios A3.

Figura 4.22: Resultado do levantamento da característica $V \times I$ dos resistores equalizadores do pára-raios B5.

Os resistores equalizadores dos pára-raios A3 mostraram um desempenho muito similar. A Figura 4.21 mostra o resultado para apenas um dos resistores, pois todos os outros resistores medidos apresentaram a mesma característica. A representação da característica $V \times I$ escolhida foi a equação:

$$V = ki^n \quad (4.1)$$

onde: V = tensão

k = constante

i = corrente

n = expoente que expressa o grau de não linearidade dos resistores equalizadores.

Na Figura 4.21 podemos ver também o ajuste calculado da curva obtida, bem como a sua equação. O valor calculado da constante k da Equação 4.1 foi igual a 1,04, enquanto que o expoente n para mesma equação foi 0,178. Deve ser observado que esses resultados referem-se à medição de quatro resistores equalizadores dos pára-raios A3.

O mesmo não foi observado nos resistores equalizadores dos pára-raios B5. A Figura 4.22 mostra o resultado de três resistores. Os resistores identificados como 1 e 6 mostram uma característica muito diferente do resistor identificado como 5. Nos dois primeiros, o valor calculado do expoente n da Equação 4.1 foi aproximadamente 0,33. Para o resistor 5, foi determinado o valor de 0,45. Admitindo-se como valor de referência 0,33, a diferença é de 36,4%. Em resumo, foram medidos nove resistores equalizadores e em oito deles foram obtidas curvas que se aproximaram daquelas obtidas para os resistores 1 e 6. O resistor 5 apresentou uma característica bem diferente.

Em suma, tomando-se por base os resultados obtidos nos resistores testados, foi verificado que os resistores equalizadores dos pára-raios do fabricante A apresentaram um grau de não linearidade maior do que os resistores equalizadores do fabricante B, e que especificamente para este fabricante foi constatado que um resistor equalizador sofreu alguma mudança em suas características ao longo do tempo.

4.8.2 Medição da tensão de radiointerferência nos centelhadores

Foi realizada a medição da tensão de radiointerferência nos conjuntos de centelhadores de B5 com o objetivo de se identificar o conjunto responsável pela radiointerferência medida com o pára-raios completo (4518 μV). A medição foi realizada conforme procedimento descrito no Capítulo 3. O arranjo utilizado na medição e os detalhes da ligação do conjunto de centelhadores no circuito podem ser vistos nas Figuras 4.24 e 4.25, respectivamente.

Figura 4.23: Arranjo utilizado na medição da tensão de radiointerferência nos conjuntos de centelhadores do pára-raios B5.

Figura 4.24 (a) e (b): Detalhes da ligação do conjunto de centelhadores no circuito utilizado na medição da tensão de radiointerferência.

A tensão a ser aplicada ao conjunto de centelhadores foi determinada considerando-se uma distribuição linear de tensão ao longo dos pára-raios. Os pára-raios do fabricante B possuíam nove conjuntos de centelhadores. Dividindo-se a tensão de operação do pára-raios (80 kV) pelo número de conjuntos, obtem-se o valor 8,9 kV. Por não se conseguir uma montagem isenta de corona e também por segurança, foi adotado o valor de 8 kV como a tensão máxima a ser aplicada ao conjunto. O critério para a realização deste ensaio foi o mesmo adotado para as amostras completas, ou seja, a tensão foi elevada até o nível máximo de tensão (8 kV), em degraus de 1 kV até atingir o valor de 5 kV. Após este nível de tensão, esta passou a ser elevada em degraus de 0,5 kV, até a tensão de 8 kV. Em seguida, a tensão foi decrescida nos mesmos patamares do ciclo de subida, e novamente elevada até a tensão máxima nos mesmos degraus. Por fim, a tensão foi novamente decrescida nos mesmos patamares até a tensão zero. Em todos os degraus de tensão, foi medida a tensão de radiointerferência. A medição foi realizada em todos os conjuntos de centelhadores de B5. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.10 a 4.13. Os valores são apresentados em dB (valor de referência 0,32 μ V) e em μ V.

Tabela 4.10: Tensão de radiointerferência do conjunto de centelhadores 1.

kV	SUBIDA		DESCIDA		SUBIDA		DESCIDA	
	dB	μ V	dB	μ V	dB	μ V	dB	μ V
8.0	26	25	26	25	27	28	27	28
7.5	22	16	22	16	21	14	22	16
7.0	21	14	16	8	17	9	19	11
6.5	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)
6.0	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)
5.5	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)
5.0	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)
4.0	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)
3.0	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)
2.0	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)
1.0	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)
0.0	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)	12	5 (*)

Nota: (*) refere-se ao nível de radiointerferência proveniente do ambiente.

Tabela 4.11: Tensão de radiointerferência do conjunto de centelhadores 3.

kV	SUBIDA		DESCIDA		SUBIDA		DESCIDA	
	dB	μV	dB	μV	dB	μV	dB	μV
8.0	77	8849	77	8849	66	2494	66	2494
7.5	77	8849	72	4976	51	444	47	280
7.0	77	8849	65	2223	51	444	12	5(*)
6.5	77	8849	60	1250	51	444	12	5(*)
6.0	75	7029	56	789	12	5	12	5(*)
5.5	73	5584	36	79	12	5	12	5(*)
5.0	73	5584	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
4.0	57	885	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
3.0	30	40	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
2.0	30	40	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
1.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
0.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)

Nota: (*) refere-se ao nível de radiointerferência proveniente do ambiente.

Tabela 4.12: Tensão de radiointerferência do conjunto de centelhadores 4.

kV	SUBIDA		DESCIDA		SUBIDA		DESCIDA	
	dB	μV	dB	μV	dB	μV	dB	μV
8.0	24	20	24	20	24	20	24	20
7.5	22	16	22	16	22	16	22	16
7.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
6.5	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
6.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
5.5	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
5.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
4.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
3.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
2.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
1.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
0.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)

Nota: (*) refere-se ao nível de radiointerferência proveniente do ambiente.

Tabela 4.13: Tensão de radiointerferência do conjunto de centelhadores 6.

kV	SUBIDA		DESCIDA		SUBIDA		DESCIDA	
	dB	μ V	dB	μ V	dB	μ V	dB	μ V
8.0	35	70	35	70	34	63	34	63
7.5	34	63	33	56	29	35	32	50
7.0	31	44	29	35	28	31	30	40
6.5	29	35	26	25	26	25	26	25
6.0	29	35	25	22	26	25	26	25
5.5	29	35	25	22	25	22	26	25
5.0	26	25	24	20	23	18	24	20
4.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
3.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
2.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
1.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)
0.0	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)	12	5(*)

Nota: (*) refere-se ao nível de radiointerferência proveniente do ambiente.

Os demais conjuntos de centelhadores (2, 5, 7, 8 e 9) não apresentaram tensão de radiointerferência acima do ambiente. O conjunto de centelhadores 3 foi o que apresentou o pior desempenho dentre os nove conjuntos, indicando a presença de descargas internas. Essas descargas justificam os níveis de radiointerferência encontrados no pára-raios completo.

4.8.3 Estudo da influência da 3^a H da tensão na medição da 3^a H da corrente de fuga

Após a desmontagem dos pára-raios e estando de posse dos componentes internos, foi investigada a influência da componente de terceira harmônica (3^a H) da tensão nas medições da 3^a H da corrente de fuga. Como visto no Capítulo 2, a 3^a H da tensão causa erros na medição da 3^a H da corrente de fuga dos pára-raios de ZnO [19, 29, 31]. Quanto aos pára-raios de SiC, não foi encontrada nenhuma referência a este fenômeno. Os trabalhos encontrados na literatura citam as medições da corrente de fuga e da sua 3^a H, mas não fazem referência a uma possível influência da 3^a H da tensão. Como os pára-raios de SiC possuem

elementos não lineares conectados entre a linha e a terra, é possível que a 3ª H da tensão cause os mesmos erros na 3ª H da corrente de fuga.

O estudo da influência da 3ª H na corrente de fuga foi realizado com os componentes internos do pára-raios, pois não era necessária a utilização de grandes áreas para as medições. Outra vantagem, quanto à utilização dos componentes internos, é que poderiam ser aplicados valores reduzidos de tensão, tornando viável a utilização de uma fonte de tensão onde era possível obter diferentes valores das componentes harmônicas e do seu ângulo de fase.

O circuito utilizado para a medição das correntes de fuga e da 3ª H pode ser verificado na Figura 4.25. A Figura 4.26 mostra o arranjo montado na bancada para este fim.

Figura 4.25: Circuito elétrico utilizado para a medição da corrente de fuga nos resistores equalizadores dos pára-raios fabricante B, onde: F: fonte variável que permite o ajuste das componentes harmônicas da tensão; TP: transformador de potencial; P.P.: ponta de prova de alta tensão; R_S : resistor “shunt”; OSC: osciloscópio.

(a)

(b)

Figura 4.26: Arranjo utilizado para as medições nos componentes internos.

O primeiro teste consistiu na medição das correntes de fuga dos resistores equalizadores de alguns conjuntos de centelhadores que formavam o pára-raios B5. Foram feitas medições entre 0,5 e 8 kV, aplicando-se tensão senoidal sem componentes harmônicos (senoidal pura). Foi utilizado resistor “shunt”, conforme mostrado no circuito da Figura 4.25. As formas de onda das correntes foram arquivadas em planilha eletrônica para posterior análise, que consistiu no cálculo da 3ª H em função da componente fundamental. A fonte variável que permite o ajuste da forma de onda, como a amplitude da 3ª H e seu ângulo de fase, foi ligada aos terminais de baixa tensão de um transformador de potencial. A fonte possui saída variável entre 0 e 300 V, e o transformador de potencial foi usado para elevar-se a tensão até os valores desejados. A resposta do transformador de potencial às amplitudes da 3ª H foi satisfatória, ou seja, o transformador de potencial apresentava em seus terminais de alta tensão a mesma 3ª H ajustada na fonte variável. O resultado deste primeiro teste é mostrado na Figura 4.27.

Figura 4.27: Gráfico das componentes de terceiro harmônico em função da tensão aplicada aos conjuntos de centelhadores 1, 3, 4 e 5 (pára-raios B5). A tensão aplicada foi senoidal pura (sem componentes harmônicas).

Pela análise da Figura 4.27, nota-se que a resposta dos resistores foi não linear, como esperado. O resistor do conjunto de centelhadores 3 foi o que apresentou maior 3ª H dentre os

resistores testados. Os valores das componentes de terceira harmônica em porcentagem da componente de frequência fundamental, com tensão aplicada 8 kV, para cada conjunto de centelhadores, podem ser verificados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Valores da componente de terceira harmônica da corrente dos resistores dos conjuntos de centelhadores.

Conjunto de centelhadores	Tensão aplicada (kV)	3 ^a H da corrente (%)
1	8	5,54
3		15,40
4		10,53
5		11,50

Pela análise da tabela nota-se que a 3^a H do resistor 3 foi quase três vezes maior que a do resistor 1.

A segunda parte dos testes consistiu em se ajustar a 3^a H da tensão em 0,5% da componente fundamental e variar o ângulo de fase. Estes ângulos foram ajustados em 0, 45, 90 e 150 graus em relação à componente fundamental da tensão. Apenas dois resistores foram testados nesta configuração. Os resultados das medições são mostrados nas Figuras 4.29 e 4.30.

Figura 4.28: Gráfico da 3ª H da corrente de fuga em função da 3ª H da tensão para o conjunto de centelhadores 1.

Figura 4.29: Gráfico da 3ª H da corrente de fuga em função da 3ª H da tensão para o conjunto de centelhadores 5.

As Figuras 4.29 e 4.30 mostram os resultados para a 3ª H da tensão para dois conjuntos de centelhadores: 1 (Figura 4.28) e 5 (Figura 4.29). Os resultados para estes dois conjuntos foram comparados com a 3ª H da corrente de fuga obtida quando a tensão estava com 0% de 3ª H.

Pela análise destas duas figuras pode-se notar que o comportamento da 3ª H da corrente de fuga para estes conjuntos não foram iguais.

Estes gráficos indicam que a componente de terceira harmônica da corrente de fuga sofre influência da componente de terceira harmônica da tensão, como ocorre nos pára-raios de ZnO. Isto pode ser observado nas Figuras 4.31 e 4.32.

Figura 4.30: Gráfico da 3ª H da corrente de fuga em função do ângulo de fase da 3ª H da tensão (0,5% de amplitude). Tensão aplicada: 8 kV, conjunto de centelhadores 1.

Figura 4.31: Gráfico da 3ª H da corrente de fuga em função do ângulo de fase da 3ª H da tensão (0,5% de amplitude). Tensão aplicada: 8 kV, conjunto de centelhadores 5.

Nestes gráficos pode ser verificado que, em relação ao valor de referência (em vermelho nestas figuras), com tensão aplicada (8 kV), variando-se o ângulo de fase da componente de terceira harmônica na tensão, a diferença da componente de terceira harmônica da corrente de fuga aumenta (no caso do resistor 5), como também varia de um valor mais baixo para um mais alto (no caso do resistor 1).

Com base nestes valores, foi feita medição no pára-raios A1, usando-se a fonte de tensão variável que possibilita a variação das componentes harmônicas da tensão e seu ângulo de fase. O circuito de medição foi o mesmo mostrado na Figura 3.8. O transformador elevador utilizado neste caso possuía relação 220/120 kV, potência de 8 kVA. A medição foi realizada na tensão de operação do pára-raios (51 kV). Os valores da 3ª H da tensão foram ajustados em 0,5 e 1% da componente fundamental e os ângulos de fase ajustados para estas componentes foram 0, 45, 90 e 150 graus. Os resultados das medições podem ser vistos na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Medição da corrente de fuga e cálculo de 3^a H, variando-se a amplitude e o ângulo de fase da 3^a H da tensão, em 51 kV, para a amostra A1.

Tensão		Corrente	
3 ^a H (%)	Ângulo de fase (graus)	3 ^a H calculada (μA)	Diferença em relação ao valor de referência (%)
0	0	10,22 (*)	0
0,5	0	5,94	-41,8
	45	10,57	3,5
	90	14,12	38,2
	150	15,70	53,6
1	0	6,18	-39,5
	45	12,37	21,0
	90	17,18	68,1
	150	20,54	101

Nota: (*) valor de referência.

Os valores da 3^a H da corrente de fuga estão expressos em microampères. Estes valores foram obtidos através de cálculo no programa LabView [47]. As formas de onda das correntes de fuga total foram armazenadas em arquivo eletrônico para este tratamento. Como pode ser observado na tabela, as diferenças para o valor de referência (que é o valor com a tensão sem 3^a H) variaram de 3,5 a 101%, indicando a influência da 3^a H da tensão na 3^a H da corrente de fuga. Isto pode ser melhor observado através da Figura 4.32, onde estão tabulados apenas os valores de ângulos de fase 0 e 150 graus.

Figura 4.32: Gráfico da 3^a H da corrente em função da 3^a H da tensão, para os ângulos de fase zero e 150 graus. Pára-raios A1.

O valor de referência mostrado no gráfico acima foi o calculado com a tensão sem 3^a H. Neste gráfico pode ser visto que os valores divergem mais conforme aumenta-se a componente de terceira harmônica da tensão, para o mesmo ângulo de fase.

4.9 Medições da corrente de fuga em campo

4.9.1 Primeira medição na Subestação de Paraibuna

Como descrito no Capítulo 3, as medições feitas nesta etapa tiveram por objetivo analisar a viabilidade de medição da corrente de fuga na subestação, bem como a utilização do aparelho DIAG, de fabricação TRIDELTA. Foram avaliadas também a possibilidade de se medir as componentes harmônicas da tensão do sistema, através de um sensor de campo, e as dificuldades da realização destas medições.

4.9.1.1 Comparação dos valores obtidos com o sensor de campo e com o transformador de potencial da subestação

Este sensor foi fabricado utilizando-se uma placa de material isolante, com duas superfícies condutoras, conforme mostra a Figura 4.33. O sensor foi montado sobre uma base isolante e em um de seus lados possui um adaptador para cabo BNC, com um casador de impedância de $50\ \Omega$ [52].

Figura 4.33: Sensor de campo.

Foram feitas algumas tentativas, a fim de se determinar qual a melhor posição do sensor em relação à fase na qual se encontrava o transformador de potencial (T.P) da subestação. A posição do sensor foi mudada até que se conseguisse a sobreposição dos sinais do TP e do sensor. Esta condição foi satisfeita na posição mostrada na Figura 4.34.

Figura 4.34: Esquema de montagem do sensor para comparação com o T.P.

Como mostra a Figura 4.34, a posição do sensor em que houve defasagem zero entre o seu sinal e o sinal do TP foi abaixo da fase B do circuito. O resultado desta comparação pode ser observado na Figura 4.35.

Figura 4.35: Resultado da comparação entre a tensão medida no T.P. e no sensor.

O valor do eixo y está em p.u., pois os valores obtidos de ambos os sistemas foram de amplitudes diferentes e, neste caso, foi feita a normalização de um sinal em relação ao outro.

Com esse procedimento, ficou comprovado que seria possível analisar o conteúdo das componentes harmônicas da tensão do sistema, utilizando-se o sensor, sem ficar na dependência do sinal do TP da subestação.

4.9.1.2 Medição de corrente nas bases dos pára-raios

A subestação de Paraibuna possui oito circuitos de 88 kV, sendo um circuito com pára-raios de ZnO e os outros com pára-raios de SiC. Todos os pára-raios estavam instalados com bases isolantes sobre treliças metálicas, conforme mostra a Figura 4.36.

A fim de verificar se o aparelho DIAG estava sujeito a interferências do campo eletromagnético da subestação, medidas preliminares foram executadas em uma instalação com pára-raios de ZnO. Um dos procedimentos adotados foi a medição da corrente de fuga no cabo de aterramento e na base dos pára-raios (pontos marcados como 1 e 2) na Figura 4.36. Essa medição foi motivada pelo fato de que o cabo de aterramento do pára-raios era conectado na base metálica com grampos, também metálicos, e havia a suspeita da existência de correntes induzidas circulando no cabo e na base.

Figura 4.36: Detalhe da instalação dos pára-raios (ZnO) da subestação de Paraibuna. Os pontos 1 e 2 indicam onde foram feitas as medições de corrente na base do pára-raios.

As medições foram feitas em duas condições: a primeira com o cabo de aterramento desconectado da base, a segunda com o cabo de aterramento instalado em sua condição normal, ou seja, em contato com a base através dos grampos. Os resultados das medições são mostrados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Resultado das medições na base do pára-raios.

Cabo de aterramento	Corrente (mA)	
	Ponto 1	Ponto 2
Desconectado	1,7	Não foi feita medição
Conectado	1,7	1,79

Para fins de comparação, a corrente de fuga total do pára-raios de ZnO, em ambos os casos, foi de 0,63 mA, indicado pelo medidor existente instalado no cabo de aterramento. Esse valor também foi indicado pelo aparelho DIAG, em ambos os casos, desde que ele fosse posicionado no cabo de aterramento, entre o pára-raios e o medidor existente. Com o aparelho DIAG posicionado no cabo de aterramento, após o medidor existente, havia a indicação de valores elevados quando o cabo estava conectado na base.

Em função destes resultados, foram realizados testes no Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP de modo a investigar a indução nas bases dos pára-raios.

4.9.1.3 Medições de corrente de fuga dos pára-raios

Como última etapa do trabalho na subestação de Paraibuna, procedeu-se a medição da corrente de fuga dos pára-raios dos circuitos identificados pela concessionária como CAU-02 e JAG-01. Destes, o circuito CAU-02 possuía pára-raios de ZnO, já o circuito JAG-01 era protegido com pára-raios de SiC. O circuito CAU-02 possuía medidores de corrente de fuga com contadores de descarga, o circuito JAG-01 possuía contadores de descarga. Os detalhes das instalações podem ser verificados nas Figuras 4.8 e 4.9. Estas figuras mostram também os pontos de medição, denominados de 1 e 2, onde foi colocado o aparelho DIAG.

Figura 4.37: Detalhe da instalação dos pára-raios de ZnO da subestação de Paraibuna, onde são mostrados os pontos de medição 1 e 2.

Figura 4.38: Detalhe da base dos pára-raios de SiC da subestação de Paraibuna, onde são mostrados os pontos de medição 1 e 2.

No circuito JAG-01 não foram feitas medições no mostrador digital do instrumento DIAG, apenas foram armazenadas em arquivo eletrônico as formas de onda deste circuito nos pontos mostrados na Figura 4.38 para posterior análise.

O circuito CAU-02 teve somente a fase B medida, com o mostrador digital do aparelho DIAG e foi feito também o registro da forma de onda. As formas de onda registradas foram tratadas no programa PSpice [50] para o cálculo do valor da distorção harmônica devido à terceira harmônica. Os resultados são mostrados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Medição da corrente de fuga e da 3ª H da fase B do circuito CAU-02 (valores eficazes).

Posição	DIAG		PSPICE		Erro (%) $\left(\frac{(5)-(4)}{(5)} * 100 \right)$
	I _{fugatotal} (mA)	3ª H (mA)	Distorção (%) [(2)/(3)*100]	FFT 3ª H (%)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0,63	0,17	26,98	*	*
2	0,63	0,15	23,8	25,7	7,4

* não calculado

O campo **Distorção (%)** refere-se à porcentagem da componente de terceira harmônica em relação à medição da corrente de fuga total do instrumento DIAG. O campo **FFT 3ª H** a amplitude da 3ª H em porcentagem da componente de frequência fundamental. Os valores foram calculados no programa PSpice [50].

Pela análise desta tabela, o aparelho DIAG mostrou uma indicação muito próxima da 3ª H calculada. Entretanto, deve-se ressaltar que não foram feitas medições nas outras fases para comparações. Pode ser observado também que a 3ª H foi um pouco maior na posição 1 (antes do medidor de corrente de fuga) do que na posição 2 (depois do medidor de corrente de fuga).

A Figura 4.39 mostra os registros das formas de onda da fase B do circuito CAU-02.

Figura 4.39: Gráfico das correntes de fuga medidas no pára-raios da fase B, circuito CAU-02, nas posições 1 (antes do contador de descargas) e 2 (depois o contador de descargas).

Pode-se notar ainda que as formas de onda antes e após o medidor de corrente de fuga com contador de descargas são diferentes.

No circuito JAG-01 foram feitos os registros das formas de onda da corrente de fuga, antes e após o contador de descargas. A Figura 4.40 mostra as formas de onda registradas antes e após o contador de descargas para a fase A.

Figura 4.40: Formas de onda das correntes de fuga do pára-raios da fase A, circuito JAG-01, antes (posição 1) e após (posição 2) o contador de descargas.

Como se pode notar, a corrente de fuga desta fase apresentou formas de onda diferentes antes e após o contador de descargas, diferenças estas que foram muito maiores do que as apresentadas no circuito CAU-02.

Como resultado destas medições, as seguintes dúvidas foram levantadas:

1. As correntes medidas nas treliças da base eram devidas ao campo eletromagnético da subestação?
2. O aparelho DIAG sofre interferência do campo eletromagnético da subestação?
3. As correntes medidas nos cabos de aterramento dos pára-raios eram as correntes de fuga dos pára-raios ou correntes induzidas, devido às dúvidas 1 e 2?
4. Qual a influência dos contadores de descarga na corrente de fuga?
5. Por que a corrente de fuga antes e após do contador de descargas apresentavam formas de onda tão diferentes entre si?

A fim de dirimir todas estas dúvidas, alguns testes foram executados Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP.

4.9.2 Investigações em laboratório

Face aos resultados encontrados na subestação de Paraibuna, alguns experimentos foram feitos a fim de se determinar a influência do campo eletromagnético no aparelho DIAG (transformador de corrente e instrumento de medição) no Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP. Para isso foi montada a estrutura em alumínio mostrada na Figura 4.41.

Figura 4.41: Estrutura montada em alumínio no IEE-USP.

Para determinação da influência do campo magnético no aparelho DIAG e na estrutura metálica, foi montado o arranjo de ensaio mostrado na Figura 4.42. Uma fonte de corrente com fechamento em “Y” foi usada para este fim.

Figura 4.42: Arranjo de ensaio para a determinação da influência do campo magnético no aparelho DIAG e na estrutura metálica.

Com o aparelho DIAG desconectado da treliça, foi verificado que, quando circula uma corrente de 600 A na fonte, a indicação do mostrador digital do instrumento é zero (mesmo quando o aparelho DIAG é colocado muito próximo à fonte). Estes resultados indicaram que o aparelho DIAG, nas condições acima, não sofreu influência do campo magnético gerado pela fonte.

O transformador de corrente do aparelho DIAG foi conectado à treliça, nas posições 1, 2 e 3 (conforme mostra a Figura 4.41). As leituras do aparelho são dadas na Tabela 4.18

Tabela 4.18: Medições das correntes induzidas na estrutura de alumínio.

POSIÇÃO	INDICAÇÃO (mA)
1	2,0
2	0
3	11,4

As indicações do instrumento confirmam a existência de correntes induzidas na treliça, indicando que o mesmo fenômeno poderia ocorrer na subestação.

Foi realizado um ensaio no Laboratório de Alta Tensão de medição da corrente de fuga total de um pára-raios, a fim de se determinar possíveis diferenças entre o método de medição através de resistor “shunt” e o aparelho DIAG. O arranjo de ensaio é mostrado na Figura 4.43 e o resultado é mostrado na Tabela 4.19.

Figura 4.43: Arranjo de ensaio para comparação entre o instrumento DIAG e o resistor “shunt”.

Tabela 4.19: Resultado da comparação entre o instrumento DIAG e o resistor “shunt” (valores eficazes).

Tensão (kV)	Instrumento (mA)	R_{shunt} (mA)	Dif. (%)
51	0,162	0,155	4,5

OBS.: A diferença foi calculada em relação ao resistor “shunt”.

A diferença observada de 4,5% entre o aparelho DIAG e o resistor “shunt” foi considerada satisfatória.

Com os resultados apresentados nas investigações, pode-se concluir que:

1. As correntes medidas em Paraibuna nas treliças das bases dos pára-raios são devidas ao campo eletromagnético da subestação;
2. O aparelho DIAG não sofreu influência do campo eletromagnético no laboratório;
3. As correntes medidas nos cabos de aterramento eram realmente as correntes de fuga dos pára-raios;

4.9.3 Segunda medição na subestação de Paraibuna

4.9.3.1 Verificação da influência do campo eletromagnético

Na segunda medição na subestação de Paraibuna foram executados testes para confirmação dos resultados em laboratório. As montagens executadas são mostradas nas Figuras 4.45 a 4.49.

A Figura 4.44 mostra o primeiro arranjo. O transformador de corrente foi colocado sobre a base de concreto do pára-raios e o indicador digital apoiado na última travessa da mesma base. A mesma figura mostra o valor indicado no mostrador digital.

Em seguida, as posições do transformador de corrente e o indicador digital foram mudadas, conforme mostra a Figura 4.45. A indicação do mostrador digital é mostrada na Figura 4.46.

Figura 4.44: Verificação da influência do campo elétrico da Subestação com o transformador de corrente sobre a base de concreto do pára-raios.

Figura 4.45: Local de instalação do transformador de corrente para verificação da influência do campo eletromagnético da Subestação de Paraibuna.

Figura 4.46: Indicação do instrumento de medição com o transformador de corrente montado conforme Figura 4.45.

Conforme mostrado na Figura 4.46, a indicação do instrumento foi zero, levando-se a conclusão que, na subestação de Paraibuna, não há influência do campo eletromagnético sobre o transformador de corrente e sobre o indicador digital.

Considerando-se que o aparelho DIAG apresentou comportamento satisfatório na subestação, passou-se a investigar a origem das correntes nas treliças da base do pára-raios. O objetivo era comprovar que essas correntes eram resultantes da indução do campo eletromagnético, conforme conclusão obtida no laboratório. A treliça montada no IEE/USP foi colocada no pátio da subestação, próximo à base do pára-raios, e ligada ao aterramento da subestação. O transformador de corrente foi conectado em uma das travessas da treliça, conforme mostra a Figura 4.47.

A Figura 4.48 mostra o instrumento de medição. O indicador digital mostrou o valor de 1,437 mA. Este fato comprova a existência de correntes circulando na treliça do IEE-USP devido ao efeito do campo eletromagnético. Esta afirmação pode também ser aplicada às correntes verificadas na treliça da base do pára-raios (1,7 mA), sendo, portanto, correntes induzidas.

Figura 4.47: Montagem da treliça do IEE na Subestação de Paraibuna.

Figura 4.48: Leitura do indicador digital do instrumento de medição com o transformador de corrente montado conforme Figura 4.47.

Como exposto, vimos que a influência do campo eletromagnético é determinante para a circulação de corrente nos diversos “loops” formados pela treliça da base do pára-raios e pelos condutores do cabo de descida. Portanto, precauções devem ser tomadas de modo a evitar que o transformador de corrente seja colocado em pontos onde possa haver circulação de correntes induzidas.

4.9.3.2 Medição das correntes de fuga dos pára-raios

Na segunda medição das correntes de fuga dos pára-raios da subestação de Paraibuna, ocorreu uma falha em um dos equipamentos, não permitindo a aquisição da forma de onda **no** osciloscópio e o armazenamento em arquivo eletrônico para futuros tratamentos. Assim, foram feitos registros em foto das medições em campo. As medições foram feitas através do aparelho DIAG da TRIDELTA.

As medições foram realizadas nos mesmos pontos da primeira visita, conforme mostram as Figuras 4.38 e 4.39.

4.9.3.2.1 Resultados do circuito CAU-02

Os resultados das medições do circuito CAU-02, o qual é protegido por pára-raios de ZnO, são mostrados nas Figuras 4.50 a 4.52. Nestas figuras podemos verificar as formas de onda das correntes em cada fase, antes e após o medidor de corrente de fuga com contador de descargas. São mostradas também as formas de onda da tensão obtidas com o sensor de campo. Nas fases B e C as amplitudes são maiores do que da fase A em função da mudança de posição do sensor.

(a)

(b)

Figura 4.49: Formas de onda de tensão e da corrente na fase A do circuito CAU-02. (a) antes do medidor de corrente de fuga com contador de descargas; (b) após o medidor.

(a)

(b)

Figura 4.50: Formas de onda de tensão e da corrente na fase B do circuito CAU-02. (a) antes do medidor de corrente de fuga com contador de descargas; (b) após o medidor.

Figura 4.51: Formas de onda de tensão e da corrente na fase C do circuito CAU-02. (a) antes do medidor de corrente de fuga com contador de descargas; (b) após o medidor.

A Tabela 4.20 mostra os valores obtidos com o aparelho DIAG das correntes de fuga total e da 3ª H, ambos os valores eficazes, das três fases do circuito CAU-02, protegido por pára-raios de ZnO.

Tabela 4.20: Resultados das medições do circuito CAU-02 (ZnO) (valores eficazes).

FASE	Corrente de fuga total (mA)		3ª H (mA)	
	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2
A	0,62	0,76	0,025	0,121
B	0,63	0,62	0,023	0,130
C	0,61	0,69	0,024	0,113

Como mostra a Tabela 4.20, os valores (eficazes) das correntes, tanto na posição 1 (antes do contador), como na posição 2 (após o contador), foram muito próximos, porém, quando são comparados os valores (eficazes) da 3ª H constata-se que há uma discrepância entre os valores medidos nas posições 1 e 2. Isto pode ser verificado observando-se as Figuras 4.50 a 4.52, em que as formas de onda registradas antes do medidor de corrente de fuga com contador de descargas apresentam menor amplitude e distorção do que aquelas adquiridas após o medidor.

4.9.3.2.2 Resultados do circuito CAU-01

Os resultados das medições do circuito CAU-01, que é protegido por pára-raios de SiC, são mostrados nas Figuras 4.53 a 4.55. Nestas figuras podemos verificar as formas de onda das correntes em cada fase, antes e após o contador de descargas. Foram utilizadas diferentes atenuações no osciloscópio no registro da corrente de fuga e, portanto, as fotos mostram diferentes amplitudes.

Figura 4.52: Formas de onda de tensão e da corrente na fase A do circuito CAU-01. (a) antes do contador de descargas; (b) após o contador.

Figura 4.53: Formas de onda de tensão e da corrente na fase B do circuito CAU-01. (a) antes do contador de descargas; (b) após o contador.

Figura 4.54: Formas de onda de tensão e da corrente na fase C do circuito CAU-01. (a) antes do contador de descargas; (b) após o contador.

Na Tabela 4.21 são mostrados os resultados das medições do circuito CAU-01.

Tabela 4.21: Resultados das medições da corrente de fuga dos pára-raios do circuito CAU-01 (SiC) (valores eficazes).

FASE	Corrente de fuga total (mA)		3 ^a H (mA)	
	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2
A	0,132	0,181	0,005	0,112
B	0,128	0,207	0,004	0,098
C	0,112	0,162	0,004	0,089

Na posição 1 (antes do contador), os valores (rms) das correntes foram menores do que aqueles da posição 2 (depois do contador). Este mesmo comportamento foi observado na medição da 3^a H, sendo menores na posição 1 em relação à posição 2. Estas medições estão coerentes com os resultados mostrados nas Figuras 4.53 a 4.55, onde pode ser observado que, em todas as fases, a forma de onda registrada na posição 1 apresenta menor distorção do que aquelas registradas na posição 2.

4.9.3.2.3 Resultados do circuito JAG-01 (SiC)

Na Tabela 4.22 são mostrados os resultados das medições do circuito JAG-01, que possui pára-raios de SiC. Não foram feitos registros das formas de onda.

Tabela 4.22: Resultados das medições da corrente de fuga dos pára-raios do circuito JAG-01 (SiC) (valores eficazes).

FASE	Corrente de fuga total (mA)		3ª H (mA)	
	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2
A	0,170	0,214	0,004	0,124
B	0,078	0,123	0,002	0,084
C	0,163	0,115	0,005	0,048

O comportamento observado no circuito CAU-01 foi também observado neste circuito. O valor da corrente de fuga e a distorção são menores na posição 1 (antes do contador) em relação à posição 2 (depois do contador).

4.9.3.2.4 Resultados do circuito JAG-02 (SiC)

Na Tabela 4.23 são mostrados os resultados das medições do circuito JAG-02, onde estão instalados pára-raios de SiC. Não foram feitos registros das formas de onda.

Tabela 4.23: Resultados das medições da corrente de fuga dos pára-raios do circuito JAG-01 (SiC) (valores eficazes).

FASE	Corrente de fuga total (mA)		3ª H (mA)	
	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2
A	0,122	0,172	0,003	0,081
B	0,088	0,115	0,002	0,078
C	0,070	0,176	0,002	0,059

O circuito JAG-02 apresentou um comportamento similar ao circuito JAG-01, ou seja, um aumento significativo dos valores (eficazes) das correntes e das componentes de terceiro harmônico na posição 2 em relação à posição 1.

Os resultados apresentados referentes aos pára-raios dos circuitos CAU-01, CAU-02, JAG-01 e JAG-02 mostram que, dependendo da posição do transformador de corrente do DIAG (posição 1 ou 2), as medições podem levar a diferenças significativas entre os valores da corrente de fuga e da 3^a H. Observa-se que a corrente de fuga registrada com o transformador de corrente na posição 2 apresenta valores de 3^a H muito elevados e incoerentes, tomando-se por base os resultados obtidos no laboratório dos pára-raios dos fabricantes A e B. Há indicações de que o circuito do contador de descargas interfere na medição da corrente de fuga e da distorção harmônica, devendo-se, portanto, evitar medições após os contadores de descarga.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados obtidos, considerando-se as técnicas de diagnóstico aplicadas aos pára-raios, as observações realizadas durante a desmontagem e os testes em bancada dos resistores e centelhadores.

5.1 Tensão disruptiva dos pára-raios

Os valores de tensão disruptiva à frequência industrial e de impulso atmosférico dos pára-raios, fabricantes A e B, são apresentados resumidamente na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores de tensão disruptiva à frequência industrial e de impulso atmosférico.

Pára-raios (fabricantes A e B)	Tensão disruptiva à frequência industrial (kV)	Tensão disruptiva de impulso atmosférico	
		Pol. Pos. (kV)	Pol. Neg. (kV)
A1	134 (R)	182	181
A2	105 (R)	171	168
A3	85 (R)	178	178
A4	102 (R)	172	167
A5	* (R)	173	172
A6	* (R)	173	188
B1	226	382	354
B2	219	374	363
B3	224	364	359
B4	218	340	322
B5	188 (R)	349	344
B6	233	355	344

Notas: * não foi possível determinar os valores de tensão disruptiva à frequência industrial.

(R) amostras reprovadas no ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial.

Conforme pode ser observado na Tabela 5.1, sete pára-raios foram reprovados, sendo:

- todos os pára-raios do fabricante A (em A5 e A6 não foi possível determinar a tensão disruptiva à frequência industrial, pois, acima de 80 kV, ambos apresentaram comportamento instável);
- um pára-raios do fabricante B (B5), com base no valor especificado pela norma NBR 5287 [10]).

Apesar de todos os pára-raios do fabricante A terem sido reprovados no ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial, segundo os valores recomendados pelo fabricante em seu catálogo [45], os resultados obtidos permitem classificar, preliminarmente, aqueles mais degradados (A5 e A6) e os pára-raios que apresentaram os menores valores de tensão disruptiva.

Pode-se notar ainda que todas as amostras foram aprovadas no ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico. O critério de aprovação dado pelas normas pertinentes [10 e 11] é que o pára-raios deve cortar todos os impulsos aplicados, independentemente do tempo entre o zero virtual até o instante de corte ou o valor de tensão em que este se processa.

Portanto, considerando-se os resultados, foi verificado que o ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial identificou os pára-raios que apresentaram desvios em relação às suas características originais, indicando que há degradação nos centelhadores desses pára-raios. Este fato que não foi verificado com relação ao ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico.

5.2 Medição da resistência de isolamento

A Tabela 5.2 apresenta os resultados da medição da resistência de isolamento, realizada nos pára-raios A2, A4 e A6, e a comparação com os resultados do ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial. A indicação “ > 50.000 M Ω ” significa que os valores da resistência do isolamento estão acima do que o instrumento permite medir.

Tabela 5.2: Comparação dos valores de tensão disruptiva à frequência industrial com os valores da resistência de isolamento.

Pára-raios	Tensão disruptiva à frequência industrial (kV)	Resistência de isolamento (MΩ)		
		Módulo Superior	Módulo Inferior	P.R. Completo
A2	105	> 50.000	< 0,1	> 50.000
A4	102	> 50.000	30	> 50.000
A6	*	8.000	30	7.000

Nota: * não foi possível determinar a tensão disruptiva à frequência industrial.

Pela comparação dos valores de resistência do isolamento, pode se verificar que o pára-raios A6 apresentou valores menores no módulo superior e com o pára-raios completo, em relação à A2 e A4. É importante salientar que não foi possível determinar a tensão disruptiva à frequência industrial na amostra A6.

Os pára-raios A2 e A4 obtiveram valores muito próximos da tensão disruptiva à frequência industrial e os valores das resistências do isolamento, para os módulos superiores, foram maiores que 50.000 MΩ. Os módulos inferiores apresentaram valores bem diferentes entre si (< 0,1 MΩ para amostra A2, 30 MΩ para a amostra A4). Nestes, a medição com o pára-raios completo, os valores medidos foram superiores a 50.000 MΩ.

Apesar do número reduzido de pára-raios testados, a medição da resistência do isolamento indicou aquele com maior degradação. Entretanto, trata-se de um pára-raios em uma condição extrema e que teria sofrido alguma ocorrência no campo. O desafio nessa medição seria a identificação dos pára-raios que estariam em um processo gradativo de envelhecimento. Em função das características dos pára-raios, os quais apresentam normalmente valores muito elevados de resistência do isolamento, qualquer variação nesses valores não seria detectada pelos instrumentos que são tradicionalmente utilizados nessa medição.

5.3 Medição da corrente de fuga total

Alguns autores propuseram o método da corrente de fuga para avaliação dos pára-raios de SiC instalados no campo [16, 18, 26]. As medições da corrente de fuga total realizadas nesse trabalho tiveram como objetivo a análise da sensibilidade desta técnica. Posteriormente, foi verificado que o conteúdo das componentes harmônicas da corrente de fuga total resultou em informações muito importantes a respeito do estado do pára-raios, sendo então investigado com mais detalhes.

Para fins de análise, os resultados da medição da corrente de fuga nos pára-raios dos fabricantes A e B são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Medição da corrente de fuga.

Pára-raios	Tensão aplicada (kV)	Corrente de fuga (mA)					Defasagem (graus)
		I_{p-p}	I_{rms}	I_p	I_p/I_{rms}	3 ^a H (%)	
A1	51	0,325	0,131	0,172	1,450	6,7	89
A2		0,445	0,147	0,213	1,449	10,1	65
A3		0,735	0,291	0,456	1,567	24,9	54
A4		1,500	0,448	0,766	1,710	32,9	47
A5		0,669	0,234	0,357	1,526	5,7	39
A6		0,706	0,248	0,348	1,403	5	67
B1	80	0,727	0,293	0,396	1,352	5,6	73
B2		0,964	0,352	0,501	1,423	5,8	75
B3		0,691	0,250	0,346	1,382	6,8	79
B4		0,684	0,260	0,362	1,392	6,9	68
B5		0,698	0,300	0,430	1,433	7,5	83
B6		1,620	0,628	0,823	1,311	18	51

Notas: I_{p-p} : valor pico a pico da corrente de fuga; I_{rms} : valor eficaz da corrente de fuga; I_p : valor de pico da corrente de fuga; I_p/I_{rms} : relação entre o valor de pico e o valor eficaz da corrente de fuga.

Os resultados mostrados na Tabela 5.3 foram organizados, para cada fabricante, em ordem crescente da componente de terceira harmônica (3^a H) da corrente de fuga total, com exceção dos pára-raios A5 e A6 em que não foi possível se obter o valor de tensão disruptiva à frequência industrial. Esses pára-raios apresentaram 3^a H menores (5,7 % e 5,0 %) do que A1 (6,7 %), contudo, as correntes de fuga total apresentaram-se com defasagens de 39° (A5) e 67° (A6), em comparação com a defasagem de 89° de A1, indicando um comportamento mais resistivo das correntes de A5 e A6. Para melhor visualização das defasagens, a Figura 5.2 mostra as formas de onda de tensão e corrente, com a defasagem medida, do pára-raios A1, e a Figura 5.3 mostra as formas de onda de tensão e corrente, com a defasagem medida, do pára-raios A5.

Figura 5.1: Defasagem da corrente em relação à tensão do pára-raios A1

Figura 5.2: Defasagem da corrente em relação à tensão do pára-raios A5

Com relação às correntes de fuga totais de A1, A2, A3 e A4 (fabricante A), pode ser observado que os valores I_{p-p} , I_{rms} e I_p aumentaram à medida que a distorção harmônica aumentou. O mesmo comportamento foi obtido para a relação I_p/I_{rms} . A defasagem apresentou comportamento inverso, ou seja, houve diminuição desses valores.

O pára-raios A4 teve o maior valor de corrente, a maior 3ª H (32,9 %) e a menor defasagem (47°), indicando uma característica mais resistiva em relação às correntes de fuga de A1, A2 e A3. Esses resultados sugerem que há uma relação direta entre valores mais elevados da corrente e da relação I_p/I_{rms} , com valores elevados da 3ª H e menores valores de defasagem. Essa tendência pode indicar um maior estado de degradação do pára-raios.

Com relação ao fabricante B, inicialmente são analisados os resultados de B1 a B5. Em B5, o único reprovado no ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial, foi obtido um valor I_{p-p} menor do que em B1 e B2. Os valores I_{rms} e I_p de B5 foram maiores do que em B1, B3 e B4, e apresentaram-se menores do que aqueles obtidos em B2. Em B5, os valores da relação I_p/I_{rms} (1,433) e da 3ª H (7,5 %) foram maiores do que aqueles registrados em B1, B2, B3 e B4. Por outro lado, a defasagem obtida em B5 foi a maior registrada (83°), mostrando que quando há

uma pequena variação nos valores da 3ª H, de 5,6% a 7,5% (B1 a B5), nem sempre fica caracterizada a diminuição da defasagem.

Em B6, assim como no pára-raios A4 do fabricante A, destaca-se das demais do fabricante B, pois apresentou os maiores valores da corrente de fuga total e da 3ª H (18 %), sendo obtida a menor defasagem (51°). O pára-raios B6 foi aprovado no ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial, entretanto, apresentou resultados insatisfatórios quando submetido às outras técnicas de diagnóstico, cuja análise será apresentada nos próximos itens deste capítulo.

5.4 Tensão de radiointerferência e termovisão

A termovisão é uma técnica muito utilizada nas concessionárias de energia para inspeção dos seus equipamentos em campo, não apenas em pára-raios. Os critérios adotados pelos usuários desta técnica diferem bastante entre si. Como exemplo, pode ser citado na Tabela 5.4, o critério adotado por uma concessionária de energia.

Tabela 5.4: Critérios de avaliação na medição de termovisão.

Elevação de temperatura verificada (1)	Situação
$\Delta T < 2^{\circ}\text{C}$	Pára-raios bom
$2^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 10^{\circ}\text{C}$	Pára-raios suspeito (2)
$\Delta T > 10^{\circ}\text{C}$	Pára-raios ruim (3)

Notas: (1) - ΔT , em relação ao objeto adjacente;

(2) - pára-raios suspeitos: devem ser realizadas medições mais frequentes (periodicidade trimestral);

(3) - pára-raios ruim: deve ser retirado de serviço e submetido ao ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial.

Fonte: Seminário Interno de Manutenção de Subestações [50].

Pela análise da tabela, uma diferença de temperatura de até 2°C em relação ao objeto que está adjacente não é significativa. Uma diferença de temperatura que esteja na faixa de $\geq 2^{\circ}\text{C}$ e $\leq 10^{\circ}\text{C}$ coloca o pára-raios em suspeição, enquanto que uma diferença de temperatura maior do que 10°C classifica o pára-raios como ruim, devendo ser retirado de serviço para determinação dos valores de tensão disruptiva à frequência industrial.

Os valores de tensão de radiointerferência e de termovisão dos pára-raios submetidos a essas medições são mostrados na Tabela 5.5

Tabela 5.5: Valores da tensão de radiointerferência e termovisão dos pára-raios (fabricantes A e B).

Pára-raios	Tensão de radiointerferência (μV)	Termovisão ($^{\circ}\text{C}$)			
		Tmáx ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT máximo na amostra ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. amb. ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{T P.R. T}_{\text{amb}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
A1	*	20,8	2,0	19,2	1,6
A2	**	21,6	2,0	19,2	2,4
A3	11	**	**	**	**
A4	29	**	**	**	**
A5	143	24,2	5,1	19,2	5,0
A6	8033	**	**	**	**
B1	23	**	**	**	**
B2	80	**	**	**	**
B3	*	20,8	2,9	17,2	3,6
B4	*	**	**	**	**
B5	4518	20,0	2,7	17,2	2,8
B6	6381	33,7	17,6	17,2	16,5

Notas: (*) não houve tensão de radiointerferência maior que a do ambiente.

(**) a medição não foi realizada.

Na Tabela, são mostrados os seguintes parâmetros:

- **Temp. Máx (°C):** maior temperatura encontrada no pára-raios;
- **ΔT Máx (°C):** máxima diferença de temperatura ao longo do pára-raios;
- **Temp. amb. (°C):** temperatura ambiente no momento da aquisição dos termogramas;
- **ΔT P.R. Tamb (°C):** diferença entre a maior temperatura encontrada no pára-raios em relação à temperatura ambiente.

Para análise das temperaturas obtidas com termovisor é importante o registro da temperatura do ambiente no momento das medições, principalmente quando estas são realizadas no campo. Em dias muito ensolarados os equipamentos podem aquecer rapidamente através da insolação, o que pode provocar erros de medição e de avaliação. Há também a possibilidade da radiação solar, incidindo sobre os pára-raios, provocar erros no aparelho (termovisor). No caso das medições realizadas neste trabalho, não houve esse problema, pois os pára-raios estavam abrigados e em um ambiente estável termicamente.

A diferença de temperatura ao longo da mesma amostra é função do tipo e do fabricante do pára-raios. Não existe uma diferença de temperatura padrão capaz de estabelecer um limite definitivo para o limiar de degradação destes equipamentos. Pelos resultados das medições, uma diferença de temperatura ao longo da mesma amostra, na faixa de 4 a 10°C, pode indicar a necessidade de substituição dos pára-raios [49]. Neste caso, os pára-raios A5 e B6 seriam classificados como suspeito e ruim, respectivamente.

Quanto aos níveis de radiointerferência, as amostras A6, B5 e B6 apresentaram valores elevados, indicando a presença de descargas internas. Esses níveis ultrapassam aqueles estabelecidos em normas [10, 11], as quais especificam o valor máximo de 1000 μV . As amostras A3, A4, A5, B1 e B2 apresentaram níveis de radiointerferência maiores que aquele proveniente do ambiente. Os níveis de radiointerferência das amostras A5 e B2 podem indicar o início de alguma deterioração interna, mas mensurar o grau desta deterioração não é uma tarefa trivial.

5.5 Comparação entre as técnicas de diagnóstico na avaliação dos pára-raios

Será feita uma comparação das técnicas de diagnóstico com base nos valores obtidos de tensão disruptiva à frequência industrial, corrente de fuga, radiointerferência e termovisão. Com relação às medições da corrente de fuga, os parâmetros a serem mostrados são os valores de pico (I_p), a componente de terceira harmônica (3^a H) e a defasagem entre a tensão aplicada e a corrente de fuga. Os resultados da termovisão referem-se à maior temperatura encontrada na amostra ($T_{máx}$) e a máxima diferença de temperatura ao longo da amostra ($\Delta T_{Máx}$). Os resultados obtidos são comparados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Comparação dos resultados.

Pára-raios	Tensão disruptiva à frequência industrial (kV)	Corrente de fuga (mA)			Tensão de radiointerferência (μV)	Termovisão ($^{\circ}C$)	
		I_p	3^a Harm (%)	Defasagem (graus)		$T_{máx}$ ($^{\circ}C$)	$\Delta T_{Máx}$ ($^{\circ}C$)
A1	134	0,172	6,7	89	**	20,8	2,0
A2	105	0,213	10,1	65	***	21,6	2,0
A3	85	0,456	24,9	54	11	***	***
A4	102	0,791	32,9	47	29	***	***
A5	*	0,357	5,7	39	143	24,2	5,1
A6	*	0,348	5	67	8033	***	***
B1	226	0,396	5,6	73	23	***	***
B2	219	0,501	5,8	75	80	***	***
B3	224	0,346	6,8	79	**	20,8	2,9
B4	218	0,362	6,9	68	**	***	***
B5	188	0,430	7,5	83	4518	20,0	2,7
B6	233	0,823	18	51	6381	33,7	17,6

Notas:* Não foi possível determinar a tensão disruptiva à frequência industrial;

** Tensão de radiointerferência proveniente do ambiente;

*** Medição não realizada.

Os valores na Tabela 5.6 foram tabulados em ordem crescente 3^a H da corrente de fuga, salvo no caso dos pára-raios A5 e A6.

As seguintes observações são feitas:

- Para os pára-raios do fabricante A:

- A1 apresentou o maior valor de tensão disruptiva à frequência industrial e o menor valor da corrente de fuga, dentre os pára-raios desse fabricante. Não apresentou níveis de radiointerferência e aquecimento acentuado na termovisão;
- Nos pára-raios que apresentaram comportamento estável na determinação da tensão disruptiva à frequência industrial (A1, A2, A3 e A4), foi observado que o aumento da amplitude e da 3^a H da corrente de fuga, não resulta necessariamente na diminuição, na mesma proporção, dos valores de tensão disruptiva à frequência industrial;
- A defasagem entre tensão e corrente de A1 foi de 89°, podendo ser notado que todos os outros pára-raios apresentaram defasagens bem menores;
- A5 e A6, que apresentaram problemas na determinação da tensão disruptiva à frequência industrial, apresentaram níveis mais elevados de radiointerferência, em especial o pára-raios A6;
- Dentre os pára-raios submetidos à termovisão, A5 apresentou aquecimento maior do que A1 e A2. Observa-se também que a corrente de fuga total de A5 foi superior às de A1 e A2.

- Pára-raios do fabricante B:

- B5, reprovado no ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial, apresentou 3^a H (7,5 %) ligeiramente maior do que em B1 a B4 (5,6 a 6,9 %). Nesse pára-raios foi observado um valor de tensão de radiointerferência muito elevado (4518 μ V). Não foi detectado aquecimento acentuado e o valor de temperatura máxima, determinado pelo termovisor, ficou muito próximo daquele apresentado pelo pára-raios B3;
- B6 foi aprovado no ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial, indicando o funcionamento correto dos centelhadores, entretanto, apresentou valores muito

elevados de corrente de fuga e da 3ª H. Apresentou também um nível muito elevado de tensão de radiointerferência e aquecimento acentuado;

- Quanto aos outros pára-raios (B1 a B4), os valores da corrente de fuga e da 3ª H ficaram muito próximos. B1 e B2 apresentaram menores valores de tensão de radiointerferência.

5.6 Influência da 3ª H da tensão na 3ª H da corrente

Conforme os estudos de alguns autores [17, 28, 29], a componente de terceira harmônica (3ª H) da tensão pode resultar em erros significativos no valor medido da 3ª H da corrente de fuga em pára-raios de ZnO. Em nenhum dos estudos relatados no Capítulo 2 deste trabalho fez-se menção a este efeito nos pára-raios de SiC.

Com a intenção de estudar a influência da 3ª H da tensão 3ª H da corrente de fuga dos pára-raios de SiC, alguns experimentos foram conduzidos. Estes experimentos foram descritos no Capítulo 4, bem como os seus resultados, que agora serão analisados.

A influência da 3ª H da tensão foi estudada variando-se o seu valor na tensão aplicada ao pára-raios (fabricante A). Foram feitas medições com 0,5 e 1% de 3ª H na tensão, com ângulos de fase 0, 45, 90 e 150 graus. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Resultados da medição da corrente de fuga e cálculo de sua componente de terceiro harmônico, com tensão aplicada de 51 kV (pára-raios A1).

Tensão		Corrente	
3 ^a H (%)	Ângulo de fase (graus)	3 ^a H calculada (μA)	Diferença em relação ao valor de referência (%)
0	0	10,22 (*)	0
0,5	0	5,94	-41,8
	45	10,57	3,5
	90	14,12	38,2
	150	15,70	53,6
1,0	0	6,18	-39,5
	45	12,37	21,0
	90	17,18	68,1
	150	20,54	101

Nota: (*) indica o valor de referência.

Os valores da 3^a H da corrente de fuga estão expressos em microampères e foram obtidos através de cálculo no programa LabView [47]. Como podem ser observadas na Tabela 5.7, as diferenças para o valor de referência (que é o valor com a tensão senoidal pura) variaram de 3,5 a 101%, indicando a influência da 3^a H da tensão na 3^a H da corrente de fuga. Isto pode ser melhor visualizado através da Figura 5.3, onde estão colocados apenas os valores referentes aos ângulos de fase 0 e 150 graus, os quais apresentaram as maiores diferenças. As duas curvas partem do valor de referência (10,22 μA).

Figura 5.3: Gráfico da 3^a H da corrente em função da 3^a H na tensão, para os ângulos de fase 0 e 150 graus. Pára-raios A1.

Nota-se que a 3^a H da corrente variou conforme a amplitude da 3^a H da tensão e também com o seu ângulo de fase. Pela análise da Tabela 5.7 nota-se também que, para a mesma 3^a H na tensão, variando-se o seu ângulo de fase, aumenta-se a 3^a H da corrente em relação ao ângulo de fase zero.

Heinrich e Hinrichsen [28] analisaram a influência da 3^a H na tensão na componente de terceira harmônica da corrente de fuga de um bloco de ZnO. Para um mesmo valor de tensão aplicada, foram ajustados a amplitude e os ângulos entre a 3^a H e a componente fundamental. A Figura 5.4 mostra o resultado destas medições.

Figura 5.4: Gráfico da amplitude da corrente de 3^a H contida na corrente de fuga em função da 3^a H na tensão de operação. O gráfico foi obtido através de medições. A reta e a curva têm origem no mesmo ponto ($30 \mu\text{A}$), que foi obtido com 3^a H na tensão igual a zero. φ é o ângulo de fase entre a 3^a H e a componente fundamental. Fonte: Heinrich e Hinrichsen [28].

Na Figura 5.4 é mostrado o gráfico obtido por Heinrich e Hinrichsen através de suas medições. O ponto referente a $30 \mu\text{A}$ é o valor da 3^a H da corrente de fuga obtido com zero por cento de 3^a H na tensão. Este valor é o de referência para comparação com as outras medições. No exemplo mostrado, para 1% de componente de 3^a H na tensão, a corrente variou entre 5 e $70 \mu\text{A}$, para ângulos de fase 330 e 150 graus, respectivamente. Com este exemplo, os autores mostram como erros de medição podem acontecer de acordo com a amplitude da 3^a H na tensão e os ângulo de fase, nas medições com os blocos de ZnO.

Pelos resultados obtidos neste trabalho e comparando-os com os de Heinrich e Hinrichsen, podemos afirmar que a 3^a H na tensão (amplitude e ângulo de fase) influencia a amplitude da 3^a H da corrente de fuga dos pára-raios de SiC.

5.7 Análise dos resultados da desmontagem dos pára-raios

Foram desmontados três pára-raios de cada fabricante: A2, A4 e A6 (fabricante A) e B1, B3 e B5 (fabricante B).

De modo geral, foi verificado que os pára-raios perderam a estanqueidade e que sofreram severos esforços elétricos e mecânicos desde a sua fabricação. Pelo estado dos pára-raios, é difícil determinar se as marcas de descargas de alta energia foram ocasionadas pela perda de estanqueidade.

McDermid [30] cita que, através da medição da resistência de isolamento, é possível determinar se os resistores equalizadores dos pára-raios estão quebrados, caso o valor da resistência de isolamento seja muito alto. Nos pára-raios em que foi feita esta medição (A2, A4 e A6) não foi encontrado nenhum resistor de equalização quebrado, sendo que A2 e A4 apresentaram valores de resistência do isolamento maiores do que aqueles que o instrumento permitia medir.

A desmontagem mostrou que o pára-raios A6 estava em pior estado do que A2 e A4. Isto pode explicar o seu comportamento instável na determinação da tensão disruptiva à frequência industrial. Este pára-raios apresentava marca de descarga externa em sua porcelana.

Com relação aos pára-raios do fabricante B, na desmontagem foi verificado que B1 encontrava-se em melhor estado que os outros (B3 e B5). O pára-raios B1 apresentou a menor 3^a H e o segundo maior valor de tensão disruptiva à frequência industrial. Foi medido também o menor valor de tensão de radiointerferência. Em B3 foi verificada a existência de um conjunto de centelhadores quebrado, porém este fato não refletiu nos resultados das medições realizadas.

O pára-raios B5 foi o que estava em pior estado. Na desmontagem foi verificada a existência de vários resistores equalizadores soltos dos seus conjuntos de centelhadores, como também vários conjuntos de centelhadores quebrados, indicando que este pára-raios pode ter sofrido um impacto mecânico grande. O valor de tensão de radiointerferência medido ($4518 \mu V$) pode

ser explicado pela condição dos conjuntos de centelhadores. O valor da tensão disruptiva à frequência industrial de 188 kV, o menor entre os pára-raios do fabricante B, também pode ser explicado pela situação encontrada dos resistores equalizadores. Como vários destes resistores encontravam-se com a sua conexão com o conjunto de centelhadores comprometida, isto pode ter influenciado no resultado da tensão disruptiva à frequência industrial.

Uma observação importante deve ser feita a respeito dos resultados e da desmontagem dos pára-raios. Devido à filosofia de construção destes equipamentos, informações podem ter sido perdidas na desmontagem, visto que os seus componentes internos são empilhados uns sobre os outros e, no momento da sua retirada, pode-se alterar o seu posicionamento. Isto é particularmente importante no caso dos pára-raios do fabricante A. Para os componentes internos do pára-raio do fabricante B, os centelhadores são presos através de uma espécie de bandagem e os resistores são conectados a estes conjuntos através de suportes. A figura do Capítulo 4, que mostra o esquema de montagem destes pára-raios, é reproduzida na Figura 5.5, a fim de fornecer um melhor entendimento.

Figura 5.5: Montagem dos componentes internos dos pára-raios.

(a) Fabricante A; (b) Fabricante B

Por este motivo, não foi possível a medição da tensão de radiointerferência nos componentes internos do pára-raios do fabricante A, nem o estudo da influência da 3ª H da tensão na 3ª H da corrente, pois provavelmente a condição de instalação destes componentes internos, no invólucro do pára-raios, não seria simulada adequadamente.

5.8 Análise dos resultados dos levantamentos das curvas características e do expoente de não linearidade

O levantamento da curva característica dos resistores equalizadores dos pára-raios dos fabricantes A e B tiveram como objetivo determinar o expoente n , que expressa o grau de não linearidade dos resistores equalizadores. O comportamento dos resistores equalizadores dos pára-raios do fabricante A mostrou-se mais parecido uns com os outros, sendo assim possível determinar-se o coeficiente de não linearidade de 0,178 para estes resistores. Deve-se levar em consideração que este valor foi determinado em apenas um pára-raios (A3), com muito tempo em operação e degradadas. Através desta medição, não foi possível fazer uma diferenciação entre os resistores equalizadores.

Entretanto, em um dos pára-raios do fabricante B (B5), a determinação de um único coeficiente de não linearidade não foi possível, pois os resistores apresentaram comportamentos diferentes, conforme pode ser visto na Figura 5.6. Os coeficientes dos resistores 1 e 6 ficaram em torno de 0,33, enquanto que o coeficiente para o resistor 5 foi 0,45, diferença entre eles de 36,4%, conforme pode ser visto na Figura 5.6.

Figura 5.6: Resultado do levantamento da característica VxI dos resistores equalizadores do pára-raios B5.

Pode ser verificado na Figura 5.6 que o resistor 5 apresentou comportamento muito diferente em relação aos resistores 1 e 6. Isto pode indicar que o resistor foi mais degradado do que os outros.

5.9 Relação entre a componente de terceira harmônica na corrente de fuga e a tensão de radiointerferência

É apresentada uma comparação entre a amplitude da componente de terceira harmônica (3^{a} H) da corrente de fuga total e a tensão de radiointerferência, conforme mostrado na Tabela 5.8, para os elementos internos de B5.

Tabela 5.8: Valores da 3ª H da corrente e a tensão de radiointerferência para resistores equalizadores do pára-raios B5.

Resistor do conjunto de centelhadores	3ª H da corrente (%)	Tensão de radiointerferência (μV)
1	5,54	28
3	15,40	2494
4	10,53	20
5	11,50	5

Nesta tabela, os valores da 3ª H da corrente de fuga total e a tensão de radiointerferência foram medidos na tensão de 8 kV. Pode ser observado que o resistor do conjunto de centelhadores 3 apresentou a maior 3ª H na corrente de fuga e também o maior valor da tensão de radiointerferência (o pára-raios B5 apresentou nível elevado nessa medição: 4518 μV).

McDonald [24] relata uma possível relação entre a corrente de fuga com o nível de radiointerferência. Os resultados do resistor 3, dados na Tabela 5.8, sugerem que o valor da 3ª H pode ter relação com a tensão de radiointerferência. Mais estudos são necessários para que esta relação se confirme, pois com apenas uma observação não se pode comprovar este fato.

5.10 Principais observações

Neste capítulo foram apresentadas as análises dos resultados das investigações realizadas nos pára-raios de SiC. As principais observações podem ser citadas:

- o ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial forneceu resultados importantes a respeito do funcionamento dos centelhadores, entretanto, a aprovação do pára-raios nesse quesito, não significa que o mesmo esteja em bom estado (vide pára-raios B6). Essa técnica é de difícil execução no campo, pois implica em desligamentos programados;

- o ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico considerou todos os pára-raios aprovados. Esse resultado é aplicável somente ao comportamento do centelhador quando submetido às ondas impulsivas, não sendo possível avaliar o estado geral do pára-raios. A aplicação desta técnica no campo apresenta também restrições em função da necessidade de desligamentos;
- a medição da resistência de isolamento indicou o pára-raios em condição mais degradada, entretanto, há pouca sensibilidade para uma avaliação mais precisa e, no campo, as medições têm de ser realizadas com o pára-raios desligado;
- a medição da corrente de fuga, através do valor de pico e da 3ª H, forneceu informações valiosas a respeito do estado do pára-raios, especialmente quando são registrados valores mais elevados da corrente de fuga e da 3ª H. Esses resultados estão relacionados com a degradação do pára-raios. Entretanto, no caso dos pára-raios A5 e A6, os valores de corrente de fuga e de 3ª H foram menores do que nos outros pára-raios, de mesmo fabricante, porém apresentaram valores menores de defasagem. A medição da corrente de fuga apresenta a vantagem de ser realizada no campo com o pára-raios energizado, entretanto, deve-se ter o cuidado quanto a possíveis interferências do campo eletromagnético nas medições e quanto à presença de harmônicas na tensão do sistema;
- a medição da radiointerferência indicou pára-raios com descargas internas (pára-raios A6, B5 e B6). Particularmente, no caso do pára-raios B5, a sua degradação seria identificada somente através dessa técnica. Essa técnica pode ser realizada com o pára-raios energizado, porém apresenta dificuldades em função das várias interferências no campo na frequência de medição utilizada;
- a termovisão acusou aquecimento acentuado em A5 e principalmente em B6. Entretanto, não foi acusado aquecimento em B5, o qual apresentou valores elevados de radiointerferência (descargas internas). A termovisão tem sido utilizada como uma das técnicas de diagnóstico no campo, mas requer cuidados na execução e na análise dos resultados.

A realização das medições da corrente de fuga, radiointerferência e termovisão, resulta em informações mais adequadas a respeito do estado do pára-raios. Entretanto, a medição da corrente de fuga pode indicar maiores detalhes quanto a diferentes estados de degradação, quando são comparados os resultados de pára-raios de mesmo fabricante e família. A desmontagem e os testes realizados em componentes internos forneceram importantes

subsídios para o entendimento do comportamento dos pára-raios quando da aplicação das técnicas de diagnóstico no laboratório. A metodologia utilizada na medição da corrente de fuga na subestação de Paraibuna mostrou resultados importantes e interferências que podem ser encontradas nas medições de campo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os pára-raios são equipamentos importantes na proteção dos sistemas elétricos de potência. Pelas suas características peculiares, os pára-raios ora atuam como isoladores (regime permanente), ora como condutores (regime transitório), desviando os surtos para a terra e restabelecendo as suas características, a fim de interromper a corrente subsequente e garantir a integridade dos equipamentos protegidos.

No Brasil, temos instalados pára-raios de duas tecnologias: uma com carboneto de silício (SiC) e a outra com óxido de zinco (ZnO). Muitos dos pára-raios que usam SiC em seus elementos internos possuem períodos de instalação superiores ao da sua vida útil. Sendo assim, estes equipamentos podem apresentar anomalias, resultando em falhas, tanto em regime permanente como em regime transitório. Esses pára-raios estão sendo substituídos pelos de ZnO, entretanto, em função dos custos, é inviável que essa substituição ocorra em curto período de tempo.

Portanto, o desenvolvimento de metodologias para avaliação dos pára-raios de SiC no campo torna-se aconselhável, pois pode evitar falhas e também auxiliar os usuários (concessionárias de energia elétrica) na tomada de decisão quanto a uma substituição que priorize aqueles mais deteriorados.

O objetivo deste trabalho foi o de apresentar uma contribuição para a metodologia de avaliação dos pára-raios de SiC, utilizando-se o método da medição da corrente de fuga com a análise da componente de terceira harmônica. As análises foram feitas utilizando-se pára-raios de SiC de dois fabricantes, sendo realizados ensaios de tensão disruptiva de impulso atmosférico e à frequência industrial, medição da resistência do isolamento, corrente de fuga

total, com a análise da componente de terceira harmônica, radiointerferência e medição da temperatura através de termovisor.

Os resultados obtidos através destas técnicas foram comparados entre si. Alguns pára-raios foram desmontados para análise dos seus componentes internos através de inspeção visual, medições de radiointerferência e corrente de fuga, principalmente nos resistores equalizadores, com o objetivo de comparar estes resultados com aqueles obtidos nos pára-raios completos. Medições de corrente de fuga também foram efetuadas em uma subestação, com o objetivo de se determinar a sensibilidade desta técnica, como também averiguar as possíveis interferências e dificuldades que poderiam ser encontradas em campo.

Com relação à comparação entre as várias técnicas utilizadas, as principais conclusões foram:

- o ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial forneceu resultados importantes a respeito do funcionamento dos centelhadores, enquanto que o ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico considerou todos os pára-raios aprovados, pois esta última técnica testa o comportamento dos centelhadores frente às ondas impulsivas, não sendo possível avaliar o estado geral do pára-raios. Entretanto, a aprovação do pára-raios no ensaio de tensão disruptiva à frequência industrial não significa que o mesmo esteja em bom estado. Além disso, as duas técnicas são de difícil execução no campo;
- a medição da resistência de isolamento indicou os pára-raios em condição mais degradada, entretanto, há pouca sensibilidade para uma avaliação mais precisa. No campo, esta técnica apresenta as mesmas restrições que as duas técnicas anteriores;
- a medição da corrente de fuga, através do valor de pico e da componente de terceira harmônica, forneceu informações valiosas a respeito do estado do pára-raios, especialmente quando são registrados valores mais elevados, conseguindo-se relacionar estes resultados com a degradação do pára-raios. Entretanto, em alguns pára-raios, os valores de corrente de fuga e da componente de terceira harmônica foram menores do que em outros, de mesmo fabricante, porém apresentaram valores menores de defasagem entre tensão e corrente. Assim sendo, a medição da defasagem entre tensão e corrente pode adicionar informações importantes a respeito do estado dos pára-raios, melhorando o diagnóstico destes equipamentos;

- a medição da radiointerferência indicou pára-raios com descargas internas, sendo que algumas amostras degradadas seriam identificadas apenas por esta técnica. Pode ser feita a medição da radiointerferência com o pára-raios energizado, devendo-se tomar o cuidado com as várias interferências no campo na frequência de medição utilizada;
- a termovisão tem sido utilizada como uma das técnicas preferidas de diagnóstico no campo, mas requer cuidados na execução e na análise dos resultados. Esta técnica acusou aquecimento acentuado em algumas amostras, entretanto, não foi capaz de identificar todas as amostras degradadas que apresentaram valores elevados de radiointerferência e da componente de terceira harmônica da corrente;
- a combinação das técnicas de termovisão, radiointerferência e medição da corrente de fuga total com a análise de sua componente de terceira harmônica mostrou-se ser eficiente na identificação de todos os pára-raios com problemas, especialmente se a medição da corrente de fuga for combinada com a medição de sua defasagem em relação à tensão aplicada. Entretanto, a medição da corrente de fuga pode indicar maiores detalhes quanto a diferentes estados de degradação, quando são comparados os resultados de pára-raios de mesmo fabricante e família.

Com relação à desmontagem e os testes realizados nos componentes internos dos pára-raios, a principal conclusão foi que este procedimento forneceu importantes subsídios para o entendimento do comportamento dos pára-raios quando da aplicação das técnicas de diagnóstico no laboratório em pára-raios completos.

Com relação às medições de corrente de fuga em uma subestação, a principal conclusão foi que a metodologia utilizada é viável, sendo possível identificar as principais dificuldades que podem ser encontradas no campo (influência do campo eletromagnético e presença das harmônicas na tensão do sistema).

Pelos resultados e conclusões obtidos, propõe-se para trabalhos futuros o seguinte:

- investigar o procedimento de medição da radiointerferência em pára-raios de SiC visando a sua aplicação no campo, pois a combinação desta técnica com a medição da

corrente de fuga e termovisão aumenta a eficiência do diagnóstico destes equipamentos;

- pesquisar a possível relação entre a componente de terceira harmônica da corrente de fuga e radiointerferência, pois os resultados deste trabalho e de outros autores sugerem uma possível relação entre ambas;
- analisar a influência do contador de descargas dos pára-raios instalados no campo nas medições da corrente de fuga, pois resultados deste trabalho mostraram diferenças entre as correntes medidas antes e após estes dispositivos;
- investigar a utilização do sensor de campo na subestação para a medição da defasagem entre o sinal de tensão e a corrente de fuga do pára-raios, pois os resultados deste trabalho mostraram que essa informação pode auxiliar no seu diagnóstico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução nº 24 de 27 janeiro de 2000. Diário Oficial da União. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000024.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2007.
2. PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.
3. CARNEIRO, J.C. Policy for renewal of power system substations silicon carbide (SiC) surge arresters: a new technical economical vision. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9, 2007. Foz do Iguaçu. **Proceedings. SIPDA**. São Paulo: IEE-USP, 2007. p. 294-299.
4. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60099-5**: Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations, 2000.
5. SAKSHAUG, E. C. A Brief History of AC Surge Arresters. **IEEE Power Engineering Review**, v.11, n.8, p. 11-13, Aug. 1991.
6. LAT, M. V; CARR, J.; KORTSCHINSKI, J. **Application Guide for surge arresters on distribution systems**. Toronto: Ontário Hydro Research Division, 1988. 364p.
7. LIGHTNING arresters: general information. 2.ed. [S.l.]: ASEA, 1966. (Catalogue, LB80 E).
8. CHRISTENER, H.; MORF, A. New lightning arresters for voltages from 4.5 to 750 kV. **BROWN BOVERI REVIEW**, v.51, n.6, p. 346-357, Jun. 1964.
9. VERDOLIN, R. T. **Avaliação do desempenho de pára-raios de SIC e ZNO por meio de ensaios de laboratório**. 1998. 320p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5287**: pára-raios de resistor não linear a carboneto de silício (SiC) para circuitos de potência de corrente alternada - Especificação. Rio de Janeiro, 1988 .

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5309**: pára-raios de resistor não linear a carboneto de silício (SiC) para circuitos de potência de corrente alternada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

12. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60099-1**: lightning arresters – Part 1: Non-linear resistor type arresters for a.c. systems, 1991.

13. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE C 62.1**: standard for gapped silicon-carbide surge arrester for AC power circuits, 1989.

14. LAT, M.V.; KORTSCHINSKI, J. Distribution arrester research. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, n.7, p. 3496-3505, 1981.

15. SHAW, J. H.; HOLMGREN, N. V. Characteristics which can be used to detected defective distribution surge arrester. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-104, n.1, p 137-141, 1985.

16. MARTINEZ, M. L. B., et al. Medição de corrente de fuga uma alternativa para a manutenção preventiva de pára-raios. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 10. Curitiba, 1989. **Proceedings. SNPTTE**. Curitiba, 1989, p.Grupo XIII / 1–7.

17. LUNDQUIST, J.; 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.

18. JUNQUEIRA F^o, A. et al. Avaliação do desempenho de pára-raios convencionais (SiC) em sistemas de transmissão: Técnicas preditivas atuais e novas propostas para a identificação de unidades defeituosas em serviço. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 12., 1993. Recife. **Anais. SNPTEE**. Recife: CHESF, 1993 p. Grupo 13 /.1–6.

19. ARARIPE JR., J.; BACEGA, W. R. Ensaio de tensão disruptiva à 60 Hz em pára-raios de carboneto de silício (sic) em campo. In: ENCONTRO REGIONAL LATINO-AMERICANO DA CIGRE, 1995, Foz do Iguaçu. **Proceedings. VI ERLAC.**, Curitiba: COPEL, 1995. p. 1-6.

20. DARVENIZA, M.; MERCER, R.; WATSON, R. M. An assessment of the reliability of in-service gapped silicon-carbide distribution surge arresters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.11, n. 4, p 745-750, Oct. 1996.

21. CALAZANS, A.; XIMENES, R.; REZENDE, Z. Diagnóstico de pára-raios de óxido de zinco através de técnicas preditivas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 1997. Belém. **Anais. SNPTEE**. Belém: ELETRONORTE / CIGRÉ, 1997.

22. LIU, M. J. **Diagnostic of transmission line surge arresters**. 1998. 48p. Thesis. (Bachelor of Engineering)- University of Queensland, Queensland, 1998.

23. GRZYBOWSKI, S., GAO, G. Evaluation of 15-420 kV substation lightning arresters after 25 years of service. In: SOUTHEASTCON. **Proceedings**. New Jersey: IEEE, p. 333 – 336, 1999.

24. McDONALD, J. **The diagnostic testing of high voltage silicon carbide surge arresters**. 1999, 350p. Thesis (Bachelor of Engineering)- University of Queensland, Australia, 1999.

25. HEINRICH, C. et al. On line monitoring of high-voltage metal-oxide arresters by wireless passive surface acoustic wave (SAW) temperature sensors. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 11, 1999. London. **Proceedings. ISH**. New Jersey: IEEE, 1999. p. v.2/238-241.

26. OLIVEIRA ET AL. **Diagnóstico de pára-raios de SiC utilizados em sistemas de 138 kV**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2000

27. SCHEL, A. Diagnostics techniques for surge arresters with main reference to on-line measurement of resistive leakage current of metal-oxide arresters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS, 2000, Paris. **Proceedings. CIGRÉ 2000**. Paris: CIGRE, 2000. p. 1-10.

28. HEINRICH, C; HINRICHSEN, V. Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks – comparison of existing and newly developed procedures. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, v. 16, n.1, Jan. 2001, p.138-143.

29. McDERMID, W. Reliability of Station Class Surge Arresters. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, 2002, Boston. **Proceedings**. New Jersey: IEEE, 2002. p. 320-322.

30. KANNUS, K.; LAHTI, K. Evaluation of the operational condition and reliability of surge arresters used on medium voltage networks. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p 745-750, 2005.

31. LARSEN, V.; LIEN, K. In-service testing and diagnosis of gapless metal oxide surge arresters. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9, 2007. Foz do Iguaçu. **Proceedings. SIPDA**. São Paulo: IEE-USP, 2007. p. 262-267.

32. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6936**: técnicas de ensaios elétricos de alta tensão. Rio de Janeiro, 1992.

33. KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S. **High voltage engineers**: fundamentals. Oxford: Pergamon Press, 1984.

34. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6937**: técnicas de ensaios elétricos de alta tensão : dispositivos de medição. Rio de Janeiro, 1981.

35. RYAN, H.M. High voltage engineering and testing. London: IEE, 2001.
36. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7875**: instrumentos de medição de radiointerferência na faixa de 0,15 a 30 MHz (Padrão CISPR) – Padronização. Rio de Janeiro, 1983.
37. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7876**: linhas e equipamentos de alta tensão – medição de radiointerferência na faixa de 0,15 a 30 MHz – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.
38. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **CISPR-1**: Specification for CISPR radio interference measuring apparatus for the frequency range 0.15 MHz to 30 MHz, International Electrotechnical Commission, Genebra, 1972.
39. SHIRAKAWA, S. et al. Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.3, n.3, p.998-1003, Jul. 1988.
40. DUGAN, R. C.; et al. **Electrical power systems quality**. 2. ed., 2004, McGraw-Hill.
41. LEE, B.; et al., A monitoring device of leakage currents flowing through ZnO surge Arresters, Japan. *Journal of Applied Physics*, v. 42, n. 4, apr. 2003.
42. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de norma 03:037.04-001**: Guia de aplicação de pára-raios de resistor não linear em sistemas de potência de corrente alternada – procedimento.
43. MANUAL do Equipamento de diagnóstico para a avaliação do estado operacional de pára-raios óxido-metálico. 3. ed. [S.l.]: Tridelta., 2005.
44. 10.000 Amp. Lightning arresters Type CM Station Class. [S.l.]: EMP, 1966.

45. LIGHTNING arrester type HMP 132 Z. [S.l.]: BBC, 1980. (HAMM, 490 628).
46. CADENCE DESIGN SYSTEMS. Pspice Schematic. Version 9.1. Disponível em: <<http://www.cadence.com/>>. Acesso em: 12 dez. 2008.
47. NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW Professional Development System. Version 8.2. [S.l.]: National Instruments Corporation, 2006. 3 CD-ROMS.
48. CUNHA, L. A. C, PIANTINI, A, ASSIS, L. D. **Sensor de campo elétrico para avaliação da linearidade de sistemas de medição de alta tensão**. São Paulo: IEE-USP, 1995. 26p. (Nota Técnica PAT.06.RT.03).
49. SEMINÁRIO INTERNO DE MANUTENÇÃO DE SUBESTAÇÕES DA CTEEP E EPTE 2000. Disponível em: <<http://www.cteep.com.br/docs/setor/estante/congressos/Seminario-Interno-de-Manuntencao-de-Subestacoes-da-CTEEP-e-EPTE-2000/Seminario.htm>>. Acesso em: 29 out. 2007.