**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

FELIPPE BACEGA

**AVALIAÇÃO DO ESTADO DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE
TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE TÉCNICAS
DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM CAMPO**

**SÃO PAULO
2014**

FELIPPE BACEGA

AVALIAÇÃO DO ESTADO DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE TRANSPORTE
DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS
PARCIAIS EM CAMPO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Energia da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Orientador: Prof.º Drº Hédio Tatizawa

Versão Corrigida

(versão original disponível na Biblioteca da Unidade que aloja o Programa e na Biblioteca Digital de Teses e
Dissertações da USP)

SÃO PAULO
2014

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

Bacega, Felipe.

Avaliação do estado dos equipamentos do sistema de transporte de energia elétrica através de técnicas de medição de descargas parciais em campo./ Felipe Bacega; orientador: Hédio Tatizawa. – São Paulo, 2014.

f.: il.; 30 cm.

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

1. Descargas elétricas. 2. Monitoramento online de equipamentos. 3. Subestações elétricas. 4. Descargas parciais. 5. Manutenção preditiva . Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

FELIPPE BACEGA

“Avaliação do estado dos equipamentos do sistema de transporte de energia elétrica através de técnicas de medição de descargas parciais em campo”

Dissertação defendida e aprovada pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Hédio Tatizawa – PPGE/USP
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. Arnaldo Gakiya Kanashiro – PPGE/USP

Prof. Dr. Josemir Coelho Santos – EP/USP

*Dedico este trabalho a Deus e a
meus pais com todo carinho.*

AGRADECIMENTO

Seria impossível seguir adiante se não fosse a força daqueles que estão sempre comigo. Por isso, não poderia deixar de reconhecer os que foram fundamentais nessa conquista.

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade recebida de poder estar presente no programa de mestrado em Energia, e por ter me dado muita persistência, força, coragem e paciência nos momentos mais difíceis.

Ao professor Hédio um agradecimento especial pela confiança depositada no meu trabalho e pela oportunidade única em minha vida, sem mencionar todo o conhecimento transmitido e muita dedicação.

Ao Instituto de Energia e Ambiente – IEE, por disponibilizar seus laboratórios de Alta Tensão e Materiais e pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP, por disponibilizar os dados obtidos em medições em suas instalações.

À Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, através do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D – 0068 – 023/2011 – Sistema inteligente para gestão de ativos de transmissão de energia elétrica, através do monitoramento de descargas parciais.

À minha mãe Cristiane, ao meu pai Wilson, e ao meu irmão Leonardo, por acreditar em mim, mesmo nos momentos mais difíceis.

A todos os professores deste curso, pelo imenso conhecimento adquirido.

RESUMO

BACEGA, F. – “**Avaliação do Estado dos Equipamentos do Sistema de Transporte de Energia Elétrica através de Técnicas de Medição de Descargas Parciais em Campo**”. 2014. 133f. Dissertação submetida para obtenção do título de Mestre em Ciências do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo, USP, 2014.

Neste trabalho é apresentado um novo método de medição de descargas parciais, através de transformadores de corrente de alta frequência, instalados no condutor de aterramento dos equipamentos do sistema elétrico de potência e acoplados a um osciloscópio. Esse novo método de medição tem como grande ganho o fato dos equipamentos não precisarem ser retirados de operação para realização de medição. Pelo fato das transmissoras serem remuneradas pela disponibilidade das funções transmissão, o diagnóstico dos equipamentos em serviço faz com que os custos sejam reduzidos. Foi realizado um levantamento teórico onde foi definida a curva característica esperada como resposta do transformador de corrente a um sinal impulsivo. Foram levantadas curvas características, em laboratório, através de oscilogramas no domínio do tempo, das assinaturas de descargas parciais em equipamentos com isolamento a óleo e a gás SF₆, de modo a validar o sinal esperado na fundamentação teórica. Essas assinaturas foram utilizadas em medições em campo, que comprovaram a viabilidade da fundamentação teórica e das assinaturas obtidas em laboratório. Adicionalmente foram levantados fatores que podem influenciar nas medições e mostrados sinais que possuam características diferentes daquelas das descargas parciais, de modo a diferencia-los.

Palavras-Chave: Descarga parcial, transformador de corrente de alta frequência, medição em campo, oscilograma.

ABSTRACT

BACEGA, F. – **“Evaluation of the Electric Power System Transport Equipment State by Techniques of Partial Discharge Measurement in Field”**. 2014. 133p. Dissertation submitted to obtain the title of Master of Science at the Institute for Energy and Environment, University of São Paulo. São Paulo, USP, 2014.

This work presents a new method of measuring partial discharges, through high frequency current transformers, installed in the equipment grounding conductor of the electrical power system and coupled to an oscilloscope. This new measurement method has as great gain, the fact that the equipment doesn't need to be removed from service to perform measurement. Because of the transmission being remunerated by the availability of the transmission functions, diagnosis of equipment in service makes the costs been reduced. A theoretical survey where the characteristic curve expected response from the current transformer to an impulsive signal was set has been done. Characteristic curves were raised in the laboratory through oscillograms in the time domain, of signatures of partial discharges in equipment with SF₆ gas and oil isolation, in order to validate expected signal discharges in the theoretical foundation. These signatures were used in field measurements, which proved the feasibility of the theoretical foundation and signatures obtained in the laboratory. Further factors were raised that may influence the measurements and shown signs that have different characteristics from those of partial discharges in order to differentiate them.

Key - words: Partial Discharge, high frequency current transformer, field measurement, oscillograms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de dielétrico apresentando descarga parcial. (a) Dielétrico contendo uma cavidade(b) Circuito equivalente.	26
Figura 2.2 - Circuito para medição de DP.	27
Figura 2.3 – Relações entre amplitudes e frequência para um sistema de medições em banda larga, para minimizar os erros de integração	30
Figura 2.4 - Circuito de medição de descargas parciais - Método da IEC-60270.....	30
Figura 2.5 – Princípio de medição em banda larga (a) Circuito de medição equivalente simplificado (ver Figura 2.4) (b) Formas de onda de saída típicas, no tempo (T = período da tensão senoidal aplicada; τ tempo de resolução)	31
Figura 2.6 – Tela obtida na medição de descargas parciais – base de tempo linear.....	33
Figura 2.7 – Tela obtida na medição de descargas parciais – base de tempo elíptica.....	33
Figura 2.8 – Efeito da largura do pulso a) e conteúdo espectral associado b).....	34
Figura 2.9 – Composição espectral de pulso de corrente gerado por descarga parcial em cavidade, em placa isolante submetida à tensão de 30kV, na faixa de frequências de 20MHz a 50MHz.	35
Figura 2.10 – Algumas características da resposta ao impulso para amplificadores de banda estreita. a - Diagrama de blocos, mostrando a função de transferência (ou admitância $G(j\omega)$ em função da frequência). b- Tensão impulsiva de entrada $V_1(t)$. c - Espectro amplitude x frequência da tensão $V_1(t)$	36
Figura 3.1 – TC de alta frequência. a) – Ilustração da lei de Ampère. b) utilização do TC para medição de correntes	39
Figura 3.2 - Modelo simplificado de uma prova de corrente	39
Figura 3.3 – Curva típica da impedância de transferência para o TC.	42
Figura 3.4 – TC de alta frequência utilizado	42
Figura 4.1 – Placa de poliéster imersa em óleo isolante, contendo uma cavidade, posicionada entre dois eletrodos de latão.	44
Figura 4.2 – Placa isolante imersa em cuba de porcelana contendo óleo isolante	44
Figura 4.3 – Montagem utilizada no ensaio, mostrando a fonte, TC de alta frequência e analisador de espectro.....	45

Figura 4.4– Transformador de corrente de alta frequência tipo clamp utilizado nos ensaios, instalado no cabo de aterramento.	45
Figura 4.5– Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 25kV. Escalas 500mV/div - 200ns/div. Medição com osciloscópio Fluke Scopemeter 199C. Frequência aproximada 12,5MHz.....	46
Figura 4.6 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 12kV. Escala 20mV/div – 1µs/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A. Frequência aproximada 7MHz.	47
Figura 4.7 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas 2V/div - 500ns/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A. Frequência aproximada 26MHz.	47
Figura 4.8 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas: canal amarelo 5V/div – 10ms/div; canal lilás 800mV/div – 10ms/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.	48
Figura 4.9 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas: canal amarelo 5V/div – 2ms/div; canal lilás 800mV/div – 2ms/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.	48
Figura 4.10– Sensor de campo elétrico utilizado para fornecer referência de tensão elétrica proporcional, e em fase, com a tensão aplicada à amostra.	49
Figura 4.11 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 12kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 5mV/div – 10ms/div; canal vermelho (tensão aplicada) 2V/div – 10ms/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.	49
Figura 4.12– Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 30kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 10mV/div – 10ms/div; canal vermelho (tensão aplicada) 5V/div – 10ms/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.	50
Figura 4.13 – Corrente gerada por sequência de descargas parciais (canal vermelho), durante ensaio em amostra do tipo placa de fibra de vidro, com aplicação de 12kV. Canal azul – tensão aplicada à amostra. Escalas canal vermelho 100mV/div – 5ms/div canal azul 1V/div – 5ms/div. Medição com osciloscópio Fluke Scopemeter 199C.....	50
Figura 4.14 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 12kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 20mV/div – 1µs/div; porção inferior FFT: frequência central 100MHz, 20MHz/div, offset -50dBm, 20dBm/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.	51

Figura 4.15 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 20mV/div – 1µs/div; porção inferior FFT: frequência central 100MHz, 20MHz/div, offset -50dBm, 20dBm/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.	51
Figura 4.16 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 10mV/div – 200ns/div; porção inferior FFT: frequência central 100MHz, 20MHz/div, offset -55dBm, 20dBm/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.	52
Figura 4.17 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de poliéster, com aplicação de 20kV. Escalas 100mV/div - 500ns/div. Medição com osciloscópio Fluke Scopemeter 199C. Frequência aproximada 13,5MHz.....	52
Figura 4.18 – Célula de ensaios para testes de descargas parciais em SF ₆	53
Figura 4.19 – Célula de ensaios para testes de descargas parciais em SF ₆ , com eletrodos de alta tensão.	54
Figura 4.20 – Montagem experimental básica utilizada, com a célula de ensaio e o transformador de alta tensão.....	54
Figura 4.21 – Montagem experimental básica utilizada, com a célula de ensaio, o transformador de alta tensão e aparelhagem de medição.	55
Figura 4.22 – Eletrodo plano ao potencial de terra e eletrodo ponta sob alta tensão, em ambiente pressurizado com SF ₆ à pressão de 6 bar.	55
Figura 4.23 – Assinatura de descarga parcial obtida utilizando-se a configuração de eletrodos ponta plano (eletrodo plano aterrado), espaçamento entre eletrodos 2,5mm, SF ₆ à pressão de 6 bar. Escalas 200ns/div e 10mV/div.	56
Figura 4.24 – Eletrodo plano submetido à alta tensão, mantendo-se o eletrodo ponta aterrado em ambiente com gás SF ₆ à pressão de 6 bar.	56
Figura 4.25 – Assinatura de descarga parcial obtida utilizando-se a configuração de eletrodos ponta plano da Figura 4.24, submetendo o eletrodo plano a alta tensão e mantendo o eletrodo ponta ao potencial de terra, em ambiente com gás SF ₆ à pressão de 6 bar.....	57
Figura 4.26 – Eletrodo plano submetido à alta tensão, mantendo-se o eletrodo ponta sob alta tensão em ambiente com gás SF ₆ à pressão de 6 bar, e aplicando-se pequenas partículas isolantes de fibra de vidro entre os eletrodos.	57
Figura 4.27 – Assinatura de descarga parcial obtida utilizando-se configuração de eletrodos ponta plano (eletrodo plano aterrado) da Figura 4.26, espaçamento de 2,5 mm, gás SF ₆ à pressão de 2 bar, tensão de ensaio de 10 kV. Escalas 200ns/div e 10mV/div.....	58

Figura 4.28 – Eletrodo ponta sob alta tensão próximo a partículas metálicas sobre superfície isolante de silicone.	58
Figura 4.29 – Assinatura de descarga parcial utilizando-se eletrodo ponta ao potencial de 3,5kV próximo a partículas metálicas, conforme Figura 4.28, SF ₆ à pressão de 5 bar. Escalas 200ns/div e 20mV/div.	59
Figura 4.30 – Eletrodo ponta sob alta tensão próximo a particular metálicas colocadas sobre superfície metálica aterrada.	59
Figura 4.31 – Assinatura de descargas parciais obtidas utilizando-se eletrodo ponta ao potencial de 3,5kV, conforme Figura 4.30, e próximo a partículas metálicas sobre superfície metálica aterrada, SF ₆ à pressão de 6 bar. Escalas 100ns/div e 50mV/div.	60
Figura 4.32 – Ensaio de trilhamento elétrico conforme norma NBR 10296 em placa de fibra de vidro, eletrodo inferior submetido a tensão de ensaio 2kV, eletrodo superior aterrado. Observa-se próximo ao eletrodo inferior ocorrência de descarga elétrica (cintilação).	61
Figura 4.33 – Distribuição de potencial elétrico $\varphi(x)$ numa amostra plana com liquido contaminante, onde: Camada contaminante homogênea b) formação de bandas secas c) arcos elétricos parciais	62
Figura 4.34 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente descarga corona no ar). Escalas 50mV/div – 2 μ s/div. Frequência aproximada 2MHz.....	62
Figura 4.35 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2 μ s/div. Frequência aproximada 15MHz.	63
Figura 4.36 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2 μ s/div. Frequência aproximada 15MHz.	63
Figura 4.37 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2 μ s/div. Frequência aproximada 15MHz.	64
Figura 4.38 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2 μ s/div. Frequência aproximada 15MHz.	64
Figura 4.39 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2 μ s/div. Frequência aproximada 15MHz.	65

Figura 4.40 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.	65
Figura 4.41– Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.	66
Figura 4.42 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.	66
Figura 4.43 - Placa isolante imersa em cuba de porcelana contendo óleo isolante.....	67
Figura 4.44 – Aparelho calibrador de intensidade de descargas parciais, de fabricação Hipotronics.	68
Figura 4.45 – Montagem utilizada para a quantificação das descargas parciais.	68
Figura 4.46 – Tensão de saída do aparelho calibrador, ajustado para a carga de 50pC escalas 1V/Div 200μs/div	69
Figura 4.47 – Corrente associada à aplicação de pulsos de 50pC ao circuito de ensaio da Figura 4.45 (placa de fibra de vidro), escalas 10mV/Div - 200ns/div. Frequência aproximada 12MHz. Amplitude pico a pico de aproximadamente 50mV.....	69
Figura 4.48 – Corrente associada à aplicação de pulsos de 50pC ao circuito de ensaio da Figura 4.45 (placa de fibra de vidro), escalas 10mV/Div 5ms/div.....	70
Figura 4.49 – Eletrodo agulha-plano aterrado, imerso em recipiente contendo óleo isolante, com placa de papelão interposta entre os eletrodos.....	72
Figura 4.50 – Eletrodo agulha-plano aterrado, imerso em recipiente contendo óleo isolante, com placa de papelão interposta entre os eletrodos.....	72
Figura 4.51 - Evolução da concentração de hidrogênio, metano, etileno e acetileno, nas amostras submetidas a descargas de baixa intensidade.	74
Figura 4.52 - Evolução da concentração de hidrogênio, metano, etileno e acetileno, nas amostras submetidas a descargas de intensidade moderada.....	74
Figura 4.53 - Evolução da concentração de gases combustíveis, nas amostras submetidas a descargas de intensidade baixa e moderada.	75
Figura 5.1 - Medição da corrente de fuga dos para-raios.	77
Figura 5.2 – Instalação do TC de alta frequência no condutor de aterramento do para-raios..	78

Figura 5.3 – Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do para-raios da fase BR – LTA MO-NOD (escalas 200mV/div e 200ns/div).....	78
Figura 5.4. Estado interno do para-raios, onde aparece a corrosão branca nas partes metálicas	80
Figura 5.5. Estado dos capacitores internos prováveis fontes de descargas parciais	80
Figura 5.6 -Vista da Subestação – 230 kV, com o TC submetido ao ensaio mostrado em primeiro plano, à direita.....	81
Figura 5.7 – Medição das descargas parciais através do TC tipo alicate, conectado ao aterramento do transformador de corrente.....	82
Figura 5.8 – Medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC alicate instalado no condutor de aterramento.....	83
Figura 5.9 – Medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC alicate instalado no condutor de aterramento do transformador de corrente (Escala 200ns/div e 200mV/div).....	83
Figura 5.10– Identificação dos TCs submetidos a ensaio – TC alicate de alta frequência instalado no condutor de aterramento.....	84
Figura 5.11 – TCs submetidos à medição, na subestação Leste 345kV, identificação LES/STTP C-1.....	84
Figura 5.12 – TCs submetidos à medição, na subestação Leste 345kV, identificação LES/STTP C-2.....	85
Figura 5.13 – Identificação dos TCs submetidos a ensaio.	85
Figura 5.14 – TCs submetidos à medição, na subestação Leste 345kV, identificação TR-2 Primário.	86
Figura 5.15 – Exemplo de medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC clamp instalado no condutor de aterramento do transformador de corrente, na SE Leste 345kV. (Escala 1µs/div e 100mV/div). Padrão não característico de descargas parciais.	86
Figura 5.16 – Exemplo de medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC clamp instalado no condutor de aterramento do transformador de corrente, na SE Leste 345kV. (Escala 1µs/div e 200mV/div). Padrão não característico de descargas parciais.	87
Figura 5.17 – Exemplo de medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC clamp instalado no condutor de aterramento do	

transformador de corrente, na SE Leste 345kV. (Escala 1 μ s/div e 200mV/div). Padrão não característico de descargas parciais.	87
Figura 5.18 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do Paralelo das barras 3 A e 4 A.	88
Figura 5.19 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do Paralelo das barras 3 A e 4 A	89
Figura 5.20 – Identificação do disjuntor submetido ao ensaio	89
Figura 5.21 – Identificação do modelo do disjuntor submetido ao ensaio	90
Figura 5.22 – Instalação do TC de alta frequência no tubo de saída de gás SF ₆ , do pólo da fase VM.....	90
Figura 5.23 – Instalação do TC de alta frequência instalado no tubo do densímetro de gás SF ₆ , próximo ao pólo da fase BR.	91
Figura 5.24 – Disjuntor do Paralelo das Barras 3 A e 4 A 88kV SE Nordeste. Canal A (azul): Tubulação do densímetro de SF ₆ escala 20ns/div e 2mV/div. Canal B (vermelho): tubo de saída do gás SF ₆ do polo da fase VM escala 20ns/div e 2mV/div.	91
Figura 5.25 – Disjuntor do Paralelo das Barras 3 A e 4 A 88kV SE Nordeste. Canal A (azul): Condutor de aterramento da estrutura escala 1 μ s/div e 50mV/div. Canal B (vermelho): Condutor de aterramento da estrutura escala 1 μ s/div e 20mV/div.....	92
Figura 5.26 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do BC2	92
Figura 5.27 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do BC2.	93
Figura 5.28 – Identificação do disjuntor submetido ao ensaio	93
Figura 5.29 – Instalação do TC de alta frequência no condutor de aterramento da estrutura. .	94
Figura 5.30 – Disjuntor do BC2. Canal A (Azul): Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 2mV/div. Canal B (Vermelho): Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 10mV/div.....	94
Figura 5.31 – Disjuntor do BC2. Detalhe do oscilograma da Figura 5.30, utilizando-se o recurso de Zoom do osciloscópio. Canal A: Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 2mV/div. Canal B: Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 10mV/div.	95
Figura 5.32 – Disjuntor do BC2. Canal A: Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 5mV/div. Canal B: Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 5mV/div.	95

Figura 5.33 – Disjuntor do BC2. Canal A: Tubulação do densímetro de SF ₆ escala 500ns/div e 5mV/div. Canal B: tubo de saída do gás SF ₆ do pólo da fase VM escala 500ns/div e 10mV/div.....	96
Figura 5.34 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do Secundário do TR1	97
Figura 5.35 – Identificação do disjuntor submetido ao ensaio	97
Figura 5.36 – Instalação do TC de alta frequência no condutor de aterramento da estrutura. .	98
Figura 5.37 – Disjuntor do Secundário do TR1. Canal A (azul): Aterramento da estrutura fase azul escala 1 µs/div e 50mV/div. Canal B (vermelho): Aterramento da estrutura fase vermelha escala 1µs/div e 50mV/div.	98
Figura 5.38 – Disjuntor do Secundário do TR1. Canal A (azul): Aterramento da estrutura fase azul escala 500ns/div e 5mV/div. Canal B (vermelho): Aterramento da estrutura fase vermelha escala 500ns/div e 5mV/div.....	99
Figura 5.39 – Disjuntor do Secundário do TR1 88kV SE Nordeste. Canal A (azul): Tubulação do densímetro de SF ₆ escala 1 µs /div e 2mV/div. Canal B (vermelho): tubo de saída do gás SF ₆ do pólo da fase VM escala 1 µs /div e 2mV/div.....	99
Figura 5.40 – Detalhe do oscilograma da Figura 5.39, utilizando-se o recurso de Zoom do osciloscópio. Disjuntor do Secundário do TR1 88kV SE Nordeste. Canal A (azul): Tubulação do densímetro de SF ₆ escala 50ns/div e 2mV/div. Canal B (vermelho): tubo de saída do gás SF ₆ do pólo da fase VM escala 50ns/div e 2mV/div.....	100
Figura 5.41 – Vista da SE Bauru, mostrando os três pólos do disjuntor nº46, à direita, com Reator 3 à esquerda.....	101
Figura 5.42 – Disjuntor nº46 do Reator 3 da SE Bauru. Corrente medida no condutor de aterramento dos três pólos. Canal 1 fase AZ escala 100mV/div, canal 2 fase BR escala 100mV/div, canal 3 fase VM escala 100mV/div, varredura 100ns/div. Oscilograma da fase VM com características compatíveis com a presença de descargas parciais	101
Figura 5.43 – Disjuntor nº46 do Reator 3 da SE Bauru. Corrente medida no condutor de aterramento dos três pólos. Canal 1 fase AZ escala 100mV/div, canal 2 fase BR escala 100mV/div, canal 3 fase VM escala 100mV/div, varredura 100ns/div. Oscilograma da fase VM com características compatíveis com a presença de descargas parciais	102
Figura 5.44 – Disjuntor nº46 do Reator 3 da SE Bauru. Corrente medida no condutor de aterramento dos três pólos. Canal 1 fase AZ escala 100mV/div, canal 2 fase BR escala 100mV/div, canal 3 fase VM escala 100mV/div, varredura 100ns/div. Oscilograma da fase VM com características compatíveis com a presença de descargas parciais	102

Figura 5.45 – Disjuntor nº46 do Reator 3 da SE Bauru. Corrente medida no condutor de aterramento dos três polos. Canal 1 fase AZ escala 100mV/div, canal 2 fase BR escala 100mV/div, canal 3 fase VM escala 100mV/div, varredura 100ns/div. Oscilograma da fase VM com características compatíveis com a presença de descargas parciais	103
Figura 5.46 – Em primeiro plano, fase Azul do Disjuntor Magrini Galileo 245MHM15000 de 230kV, do primário do transformador TR7. Instalação do TC de alta frequência no aterramento do disjuntor da fase AZ para medição de descargas parciais.	104
Figura 5.47 – Medição de descargas parciais no Disjuntor Magrini Galileo 245MHM15000 de 230kV, do primário do transformador TR7, utilizando-se antena direcional, acoplada a osciloscópio.	105
Figura 5.48 – Medição de descargas parciais no Disjuntor Magrini Galileo 245MHM15000 de 230kV, do primário do transformador TR7. Canal 1 (amarelo): DP medida com TC de alta frequência instalado no aterramento do disjuntor, escala 200mV/div – 200ns/div. Canal 3 (roxo): DP medida com antena direcional apontada para a coluna de acionamento, escala 500mV/div – 200ns/div. Canal 2 (verde): Interferência (corona) medida com TC de alta frequência medida no aterramento da torre. escala 500mV/div – 200ns/div.	105
Figura 5.49 – Coluna de acionamento do disjuntor (seta).	106
Figura 5.50 – Procedimento de coleta de amostra de óleo isolante da coluna de acionamento, realizado no campo, para posterior análise cromatográfica.	106
Figura 5.51 – Análise cromatográfica dos gases dissolvidos na amostra de óleo isolante da coluna de acionamento, utilizando-se o aparelho Kelmamm Transport X.....	107
Figura 5.52 – Procedimento de retirada da haste de madeira da coluna de acionamento.	107
Figura 5.53 – Detalhe do interior da coluna de porcelana, apresentando depósito de resíduos de cor esbranquiçada, não identificados, em formato de trilhamento, no sentido longitudinal.	108
Figura 5.54 – Detalhe do interior da coluna de porcelana, apresentando depósito de resíduos de cor esbranquiçada, não identificados, em formato de trilhamento, no sentido longitudinal.	108
Figura 5.55 – Disjuntor 245MHM15000 - ch1 fase AZ escala 200mV/div, ch2 fase BR escala 100mV/div, ch3 fase VM escala 100mV/div, escala de tempo 200ns/div.....	113
Figura 5.56 – Reator suspeito da presença de descargas parciais, tensão 460kV, potência 66.7MVA.....	114
Figura 5.57 - Medições realizadas com TC de alta frequência instalado no condutor de aterramento do reator. Escalas 2 μ s/div e 200mV/div.....	115

Figura 5.58 - Medições realizadas com TC de alta frequência instalado no condutor de aterramento do reator. Escalas 2 ms/div e 200mV/div.....	116
Figura 5.59- Eficácia da blindagem de uma folha metálica (ferro) para campo elétrico e magnético para campo eletromagnético próximo à fonte.....	117
Figura 5.60 – Medição realizada com antena direcional.....	118
Figura 5.61 – Medições com antena, na faixa de 9kHz-20MHz Escalas: 100ns/div and 100mV/div.....	118
Figura 5.62 – Medições com antena, na faixa de 9kHz-20MHz . Escalas: 50ns/div and 100mV/div.....	119
Figura 5.63 - Indício de descargas observadas na janela de inspeção da bucha de alta tensão H1	119
Figura 5.64 - Indício de descargas observadas na janela de inspeção da bucha de alta tensão H1	120
Figura 6.1 – Interferência causada por distorções harmônicas. (Local: subestação blindada - SE Centro)	121
Figura 6.2 – Interferência causada por distorções harmônicas. (Local: subestação blindada - SE Centro)	122
Figura 6.3 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro).....	122
Figura 6.4 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro).....	123
Figura 6.5 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro).....	123
Figura 6.6 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro).....	124
Figura 6.7 – Interferências causadas por reatores eletrônicos do sistema de iluminação e por distorções harmônicas. (Local: subestação blindada - SE Centro).....	124
Figura 6.8 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro).....	125
Figura 6.9 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação.....	125

Figura 6.10 – Interferência com origem não identificada. Não suspeito. (Local: subestação blindada - SE Anhanguera)	126
Figura 6.11 – Verificação da indução do sinal gerado pelas descargas elétrica, em para-raios conectados entre si pela malha de terra.	127
Figura 6.12 – Oscilogramas da corrente medida no condutor de aterramento dos para-raios, conectados entre si através da malha de terra. Canal A (vermelho) corrente no para-raios defeituoso e apresentando descargas internas. Canal B (azul) corrente no para-raios isento de descargas internas. Escalas: Canal A 50mV/div e 100ns/div, Canal B 20mV/div e 100ns/div. Amplitude pico a pico do canal A 126,31mV. Amplitude pico a pico do canal B 68,49mV. Atraso entre os dois sinais (aproximado) 10ns.....	128
Figura 6.13 – Oscilogramas da corrente medida no condutor de aterramento dos para-raios, conectados entre si através da malha de terra. Canal A (vermelho) corrente no para-raios defeituoso e apresentado descargas internas. Canal B (azul) corrente no para-raios isento de descargas internas. Escalas: canal A 20mV/div e 100ns/div, canal B 10mV/div e 100ns/div. Amplitude pico a pico do canal A 121,8mV. Amplitude pico a pico do canal B 50,2,8mV. Atraso entre os dois sinais (aproximado) 10ns.....	128
Figura 6.14 – Oscilogramas da corrente medida no condutor de aterramento dos para-raios, conectados entre si através da malha de terra. Canal A (vermelho) corrente no para-raios defeituoso e apresentado descargas internas. Canal B (azul) corrente no para-raios isento de descargas internas. Escalas: canal A 20mV/div e 100ns/div, canal B 10mV/div e 100ns/div. Amplitude pico a pico do canal A 124,8mV. Amplitude pico a pico do canal B 50,4m. Atraso entre os dois sinais (aproximado) 10ns.....	129

LISTA DE SIGLAS

AZ	Azul
BC	Banco de capacitor
BR	Branca
C	Capacitância
CR	Controle de Reativo
CRE	Compensador Estático
CSE	Compensador Série
CSI	Compensador Síncrono
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
DGA	Dissolved Gas Analysis
DP	Descarga Parcial
FFT	Fast Fourier Transform
Ko	Fator multiplicador para Outros Desligamentos
Kp	Fator multiplicador para Desligamento Programado
MCOV	Maximum Continuous Operating Voltage
PR	Para-raio
PV	Parcela variável
PVI	Parcela variável por indisponibilidade
PVRO	Parcela variável por restrição operativa
REA	Reator
SE	Subestação
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
SiC	Carboneto de Silício
TC	Transformador de corrente
TR	Transformador
VM	Vermelha
ZnO	Óxido de Zinco

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA.....	2
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivo	24
1.2 Justificativa.....	24
1.3 Metodologia.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Medição	27
2.2 Medição convencional da carga aparente utilizando-se Detectores de DP em banda larga	29
2.3 A medição convencional da carga aparente utilizando-se detectores de DP em banda estreita.....	35
3 APLICAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA FREQUÊNCIA COMO SENSOR PARA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS...38	
4 OBTENÇÃO DE ASSINATURAS DE DESCARGAS PARCIAIS	43
4.1 Obtenção de assinaturas de descargas parciais em laboratório, em isolamento a óleo.....	43
4.2 Obtenção de assinaturas de descargas parciais em laboratório, em isolamento constituída por gás SF ₆ pressurizado	53
4.3 Descargas superficiais – trilhamento elétrico	60
4.4 Calibração aplicada às medições com o TC de alta frequência.....	66
4.5 Ensaios cromatográficos no óleo isolante	71
5 RESULTADOS DE ENSAIOS REALIZADOS EM CAMPO	77
5.1 Ensaios em campo em para-raios de 345 kV de Óxido de Zinco.....	77
5.2 Ensaios em campo em Transformador de Corrente.....	81
5.3 Ensaios em campo em Equipamentos com isolamento SF ₆	88
5.4 Medições usando Antena Direcional	104
5.5 Ensaios em campo em reator	114
6 EXEMPLOS DE INTERFERÊNCIAS OBTIDAS EM CAMPO	121
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	130
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

1 INTRODUÇÃO

Após a desverticalização do setor elétrico brasileiro, houve uma separação dos setores de geração, transmissão e distribuição, formando assim três tipos de serviços prestados pelas empresas de energia elétrica. Depois de algum tempo também surgiram as comercializadoras de energia elétrica, que tem a função de comercializar energia no ambiente do mercado livre.

No caso das empresas de transmissão de energia elétrica, a remuneração das empresas se baseia na disponibilidade das linhas de transmissão da empresa ou dos equipamentos que se enquadram na função transmissão. O pagamento mensal das funções transmissão das empresas é o pagamento base, que é a parcela equivalente ao duodécimo da Receita Anual Permitida (RAP) (ANEEL, 2007).

O pagamento base além de computar a parcela da RAP, também computa os descontos de parcela variável por indisponibilidade (PVI) e parcela variável por restrição operativa (PVRO). A PVI refere-se à parcela a ser deduzida do pagamento base por desligamentos programados ou outros desligamentos (não programados), decorrentes de eventos envolvendo os equipamentos da função transmissão, de responsabilidade da concessionária de transmissão. A PVRO é a parcela a ser deduzida do pagamento base por restrição operativa temporária existente na função transmissão, de responsabilidade da concessionária de transmissão, que resulte na redução da capacidade operativa (ANEEL, 2007).

Existe uma diferença muito grande entre as interrupções devido a intervenções programadas e os desligamentos não programados, ou seja, desligamentos ocorridos devido a falhas no sistema, ambos de responsabilidade da concessionária.

Os descontos no pagamento base variam de acordo com o equipamento também, existem equipamentos cujo desligamento é mais crítico, desse modo um desligamento não programado nesse equipamento pode ser muito prejudicial ao sistema elétrico.

Pode-se ver o valor que é descontado em função do tipo de equipamento e do tipo de desligamento, de acordo com a Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Padrão de duração de desligamento e Fatores Ko e Kp

Função Transmissão	Família de Equipamento	Padrão de Duração de Desligamento		Fator Ko	Fator Kp
		Programado (hora/ano)	Outros (hora/ano)		
Linha de Transmissão	$\leq 5\text{km}$	26	0,5	150	10
	$>5\text{km e } \leq 50\text{Km}$	26	1		
	$>50\text{km} - 230\text{kV}$	21	1,5		
	345kV	21	1,5		
	440kV	38	1,5		
	500kV	38	2		
	750kV	38	2,3		
Transformação	Cabo Isolado	54	0,5	50	2,5
	$\leq 345\text{kV}$	21	1	150	10
	$>345\text{kV}$	27	1		
CR – REA	$\leq 345\text{kV}$	58	2	150	10
	$>345\text{kV}$	26	1,5		
CR – CRE	Qualquer nível de Tensão	73	19,17	150	7,5
CR – CSI	Qualquer nível de Tensão	666	17	50	2,5
CR – BC	Qualquer nível de Tensão	46	3	100	5
CR – CSE	Qualquer nível de Tensão	20	5,6	150	7,5

Adaptado de (ANEEL 2007)

Onde:

CR- Controle de Reativo

REA- Reator

CRE- Compensador Estático

CSI- Compensador Síncrono

BC- Banco de Capacitor

CSE- Compensação Série

Ko- Fator multiplicador para Outros Desligamentos

Kp- Fator multiplicador para Desligamento Programado

Desse modo se mostra fundamental que os equipamentos tenham uma manutenção adequada, uma vez que o desligamento não programado gera uma parcela variável a ser descontada da concessionária, que é muito maior do que o valor pago a mesma pela disponibilidade do equipamento e pela indisponibilidade programada.

Aliado a esse fator normativo brasileiro, existe a preocupação das concessionárias em aumentar a vida útil dos equipamentos e aperfeiçoar o gerenciamento dos mesmos.

O sistema elétrico brasileiro caracteriza-se por apresentar um parque instalado, em parcela significativa, na época do milagre brasileiro da década de 1970. São exemplos de equipamentos instalados nessa época os para-raios de SiC – carboneto de silício, não mais fabricados e que têm sido substituídos pelos constituídos com ZnO – óxido de zinco,

introduzidos no mercado no início dos anos 1980. Portanto, mesmo os para raios de tecnologia mais recente, estão instalados em alguns casos há mais de 30 anos. Situação semelhante ocorre com os transformadores de potência e disjuntores, por exemplo. Esses equipamentos em geral não apresentam nenhum tipo de recurso para indicação do estado de funcionamento ou estágio de envelhecimento. Também são escassas as técnicas de avaliação do estado desses equipamentos, tornando-se difícil o planejamento da substituição devido ao envelhecimento. Outra dificuldade é o grande número desses equipamentos instalados no sistema, para cumprir as funções de proteção contra sobretensões, monitoramento da corrente e tensão para fins de operação, proteção e tarifação, e para a realização de manobras, pois existem em torno de 5000 instalados de cada um deles (caso dos para raios e transformadores de instrumentos), nas grandes empresas concessionárias do setor elétrico. A substituição em massa desses equipamentos também não é viável, devido à grande quantidade, por questões dos custos envolvidos de material, de mão de obra especializada, de disponibilidade no mercado, de compatibilidade de condições de instalação com o equipamento a ser substituído, e principalmente, pela dificuldade de causar uma indisponibilidade na instalação elétrica, ou uma interrupção de energia, devido à atual regulamentação do setor elétrico que impõe penalização ou multas nessas indisponibilidades ou interrupções.

Os equipamentos podem apresentar falhas devido a fatores externos e internos ao mesmo, sendo os externos não controlados pelo operador, e os internos, falhas que ocorrem no interior dos equipamentos.

As falhas internas estão ligadas à isolação de equipamentos, que pode ocasionar defeitos, além de decaimento das propriedades dos equipamentos, modificando sua operação e funcionalidades (CONTI, 2003).

Nesse contexto de redução de custos e aumento de confiabilidade e vida útil, vem se tornando cada vez mais importante a utilização de equipamentos para monitoramento do estado de isolação dos equipamentos.

Um fenômeno que está diretamente relacionado à vida útil dos equipamentos são as descargas parciais, que são descargas na isolação interna do equipamento (STONE, 2005).

1.1 Objetivo

Esse trabalho tem por objetivo avaliar a utilização de técnicas com sensores não convencionais, possíveis de serem utilizados na medição em campo de descargas parciais, a fim de estabelecer novos métodos de medição, de modo a permitir um acompanhamento contínuo da isolação dos equipamentos, privilegiando procedimentos que não exigem a retirada do equipamento de operação, gerando a possibilidade de avaliação no local de equipamentos críticos, e de uma maneira a diminuir os custos causados por indisponibilidades dos mesmos às concessionárias, o trabalho terá foco na transmissão, devido ao maior custo associado por indisponibilidade à mesma, embora as técnicas a serem apresentadas possam ser utilizadas também na distribuição.

1.2 Justificativa

Esta pesquisa leva em consideração a grande quantidade de falhas causadas pelas exigências dos sistemas elétricos, que cada dia se tornam mais robustos e necessitam de capacidade maior. Atualmente o método mais utilizado para detecção de descargas parciais é muito caro e há a necessidade de retirar o equipamento para realização de medição. Com o método proposto pelo trabalho não há necessidade de retirada do equipamento em funcionamento, nem o desligamento do mesmo, não havendo necessidade de pagamento de parcela variável.

1.3 Metodologia

O estudo foi realizado através de uma revisão bibliográfica sobre os métodos de medição de descargas parciais atuais, da revisão da modelagem dos circuitos utilizados na medição convencional, da análise das normas utilizadas, de estudos de sensores e aparelhos de medição não-convencionais, e de estudos de casos considerando a utilização laboratorial e em campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Descargas parciais são descargas elétricas localizadas dentro de um sistema de isolamento, restrito somente a uma parte do material dielétrico, portanto somente parcialmente curto-circuitando os eletrodos (FUHR, J. et al., 1993). A isolamento pode consistir de materiais sólidos, líquidos ou gasosos, ou de qualquer combinação destes. Essas descargas ocorrem em bolhas ou cavidades dentro dos dielétricos líquidos, sólidos ou gasosos.

Qualquer evento de descarga deteriora o material pela energia de impacto dos íons, causando vários tipos de reações químicas (IEEE, 2010).

Ainda não é possível estabelecer uma relação definida entre a quantidade de descargas parciais e o tempo de colapso, mas normalmente, o colapso ocorre quando há um crescimento acelerado do processo (KUFFEL et. al, 2000).

A detecção de descargas é baseada na troca de energias que ocorre durante a descarga. Essas trocas se manifestam como correntes elétricas de impulso, perdas dielétricas, radiação, som, aumento na pressão do gás e reações químicas (SUEHIRO et. al, 2004).

A energia liberada pela descarga parcial aumenta o fator de dissipação; uma medição da tangente δ com relação à tensão aplicada exibe um “joelho de ionização”, uma flexão na inclinação da curva. Esse joelho, no entanto, é turvo e não pronunciado, mesmo com uma intensidade considerável de descarga parcial, pois as perdas adicionais geradas em seções localizadas podem ser muito pequenas em comparação com o volume das perdas resultantes dos processos de polarização (KUFFEL et. al, 2000).

Métodos de detecção acústica modernos utilizando transdutores ultrassônicos podem ser usados com sucesso para detectar as descargas dentro do tanque de transformadores de potência (KUNDUR et. al, 2012).

Os métodos mais usados e com maior sucesso na detecção são os métodos elétricos. Esses métodos visam separar a corrente de impulso ligada às descargas parciais de qualquer outro fenômeno.

As descargas parciais tem que ser medidas nos terminais do aparelho em questão, uma vez que é impossível realizar uma medição no interior de uma isolamento sem danificar a mesma e suas propriedades.

Para tal, considera-se o modelo do equipamento ou material dielétrico, constituído por um arranjo de capacitores. Primeiramente a área hachurada da Figura 2.1 (a) mostra o dielétrico do material e a área em branco a cavidade, ponto fraco do material onde ocorre a descarga

parcial, representada pelo capacitor C_c . Ao lado a Figura 2.1(b) representa o circuito equivalente associado.

Figura 2.1 – Representação de dielétrico apresentando descarga parcial. (a) Dielétrico contendo uma cavidade(b) Circuito equivalente.

Fonte: (adaptado de KUFFEL, 2000)

A cavidade no dielétrico em questão pode originar uma descarga parcial com o aumento da tensão aplicada e do gradiente elétrico, que é afetado pelas diferenças entre as permissividades dos materiais e pelo formato da cavidade.

Considerando uma tensão alternada senoidal, a primeira descarga ocorrerá quando a forma de onda estiver na crescente, gerada pela capacitância C_c da cavidade. A corrente $i_c(t)$ é um pulso de corrente com duração muito curta, e que pode idealmente ser representada por uma função delta de Dirac. A função delta de Dirac é um ente matemático idealizado, que pode ser representado por um pulso com duração muito curta (duração tendendo a zero), e amplitude muito elevada (tendendo a infinito), e que é caracterizado por apresentar área unitária.

As capacitâncias C_b' e C_b'' estão associadas às linhas de campo que se iniciam ou terminam nas extremidades da cavidade.

As demais linhas de campo estão representadas pela capacitância $C_a = C_a' + C_a''$. Devido às dimensões envolvidas e considerando que $C_b = C_b' C_b'' / (C_b' + C_b'')$, o valor das capacitâncias envolvidas deverão obedecer à relação:

$$C_a \gg C_c \gg C_b \quad (1)$$

No circuito equivalente mostrado na Figura 2.1(b) a chave S é controlada pela tensão V_c através da capacitância da cavidade C_c , e é fechada durante um período muito curto, durante o qual ocorre a circulação da corrente $i_c(t)$, limitada pelo resistor R_c .

Considerando que a amostra foi carregada com a tensão V_a , mas os terminais A e B foram desconectados da fonte de tensão, fechando-se a chave S a corrente i_c libera uma carga $\delta q_c = C_c \cdot \delta V_c$, inicialmente armazenada na capacitância C_c , e correspondente à carga perdida pelo sistema. Comparando as cargas do sistema antes e após a descarga, a queda de tensão nos terminais δV_a resulta em:

$$\delta V_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \delta V_c \quad (2)$$

A queda de tensão δV_a pode ser medida, e constitui-se num degrau negativo de tensão com magnitude muito baixa, da mesma forma que δV_c , sendo, portanto, de difícil medição.

2.1 Medição

A medição elétrica tem esse nome, pois utiliza parâmetros elétricos para medição, tais como carga aparente ou tensão elétrica. A Figura 2.2 representa uma amostra C_t , submetida à medição análoga a amostra de material dielétrico representado na Figura 2.1.

Figura 2.2 - Circuito para medição de DP.
Fonte: (adaptado de KUFFEL, 2000)

O elemento Z deve possuir alta impedância de modo a desconectar o capacitor de acoplamento C_k e a amostra C_t da fonte V , somente durante o fenômeno de DP. Então C_k é um capacitor de armazenamento durante um curto período de tempo da descarga parcial, liberando uma corrente $i(t)$ para o capacitor C_t , que tenta cancelar a queda de tensão δV_a no

capacitor C_t ($C_t = C_a + C_b$, vide Figura 2.1). Se $C_k \gg C_t$, a queda de tensão δV_a é totalmente compensada e a carga transferida é expressa por:

$$q = \int i(t) dt = (C_a + C_b) \delta V_a \quad (3)$$

Aplicando (2):

$$q = C_b \delta V_c \quad (4)$$

Sendo q a carga aparente da descarga, uma vez que não é igual à carga total liberada no local da descarga da capacitância C_c , essa carga aparente é mais realista que a variação na queda de tensão δV_a , pois não é influenciada pela capacitância total da amostra. Na prática, usualmente a condição $C_k \gg C_a$ não é satisfeita. Assim a corrente $i(t)$ ou a carga q sofrerão uma redução devido à tensão no capacitor C_k sofrer um decréscimo durante a descarga. Considerando δV^* essa queda de tensão, pode-se estimá-la admitindo que a mesma carga $C_b \delta V_c$ deve ser transferida nos circuitos das Figuras 2.1 e 2.2. Assim:

$$\delta V_c (C_a + C_b) = \delta V^* (C_a + C_b + C_k) \quad (5)$$

Aplicando as equações 3 e 4:

$$\delta V^* = \frac{C_b}{C_a + C_b + C_k} \delta V_c = \frac{q}{C_a + C_b + C_k} \quad (6)$$

A carga transferida pela corrente $i(t)$ então é igual a $C_k \delta V^*$, relacionada com a carga aparente que pode ser medida na prática. Denominando-a q_m , temos:

$$q_m = C_k \delta V^* = \frac{C_k}{C_a + C_b + C_k} q \approx \frac{C_k}{C_a + C_k} q$$

ou

$$\frac{q_m}{q} \cong \frac{C_k}{C_a + C_k} \approx \frac{C_k}{C_t + C_k} \quad (7)$$

A relação q_m/q indica que em equipamentos de alta capacitância, a sensibilidade da medição pode ser prejudicada.

O método da carga aparente é o mais difundido para a medição de descargas parciais e apresenta a vantagem de permitir uma calibração das medições através da utilização de circuitos que geram valores conhecidos de carga elétrica, que servem de referência para as medições.

De acordo com a norma IEC 60270, são utilizados dois tipos de circuitos para a medição da carga aparente, a medição em banda estreita e a medição em banda larga, considerando as faixas de frequência utilizadas na detecção das descargas parciais (IEC, 2000).

2.2 Medição convencional da carga aparente utilizando-se Detectores de DP em banda larga

Até o ano de 1999 não existiam recomendações quanto às curvas características dos detectores de descargas parciais, no que se refere às faixas de frequência de trabalho e atenuação associada às frequências situadas abaixo ou acima das frequências limites inferior e superior, designadas por f_1 e f_2 , respectivamente. Atualmente são recomendados os seguintes valores para f_1 , f_2 e Δf :

$$\begin{aligned} 30\text{kHz} &\leq f_1 \leq 100\text{kHz} \\ f_2 &\leq 500\text{kHz} \\ 100\text{kHz} &\leq \Delta f \leq 400\text{kHz} \end{aligned}$$

onde Δf é a largura de banda definida como $\Delta f = f_2 - f_1$. Adicionalmente, define-se a frequência média da largura de banda f_m , pela expressão $f_m = (f_1 + f_2)/2$.

Figura 2.3 – Relações entre amplitudes e frequência para um sistema de medições em banda larga, para minimizar os erros de integração
Fonte: (IEC 61270, 2000)

Onde:

A – largura de faixa do sistema de medições;

B – espectro do pulso de descargas parciais;

C – espectro do pulso de calibração;

f_1 – frequência limítrofe inferior;

f_2 – frequência limítrofe superior.

Os detectores de banda larga são projetados para uma largura de faixa de 30kHz a 500kHz geralmente, para evitar interferências originadas por emissoras de rádio difusão, as quais normalmente operam acima de 600kHz.

A norma internacional IEC-60270, quanto à utilização de detectores de banda larga, sugere o circuito básico de medição representado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Circuito de medição de descargas parciais - Método da IEC-60270
Fonte: (KUFFEL et. al, 2000)

Onde:

Z – filtro da fonte de alimentação

C_t – Objeto sob ensaio

Z_m – Impedância de entrada do instrumento de medição

C_k – Capacitor de acoplamento

D – Instrumento de medição de descargas parciais

A resposta desse tipo de detector a pulsos de descargas parciais é em geral um sinal oscilatório amortecido conforme mostrado na Figura 2.5(b).

A Figura 2.4 (KUFFEL et. al, 2000) mostra o circuito equivalente de medição em banda larga, onde a impedância Z_m em geral é um filtro passivo passa alta, mas que funciona como filtro passa faixa na forma de um circuito ressonante R-L-C, com baixo fator de qualidade. Tanto a carga aparente q quanto a polaridade do pulso de corrente originado pela DP podem ser determinadas pela resposta desse circuito.

Figura 2.5 – Princípio de medição em banda larga (a) Circuito de medição equivalente simplificado (ver Figura 2.4) (b) Formas de onda de saída típicas, no tempo (T = período da tensão senoidal aplicada; τ tempo de resolução)

Fonte: (KUFFEL et. al, 2000)

O tempo de resolução τ é pequeno, tipicamente de 5 a 20 μs , e designa o intervalo de tempo mínimo, entre descargas sucessivas, que o instrumento é capaz de discriminar.

Este circuito, atuando como filtro passa faixa, elimina correntes de baixa e de alta frequência em torno da frequência de ressonância. Para um fator de qualidade $Q=1$, ou seja, amortecimento crítico, apresenta atenuação de 20dB por década, a qual pode ser melhorada com um incremento de Q . O circuito realiza também a integração da corrente i . Admitindo que a corrente $I(t)$ não é influenciada pela impedância Z_m e é expressa por uma função delta de Dirac, associada a uma carga q , a tensão de saída $V_o(t)$, de acordo com a Figura 2.5, resulta:

$$V_o(t) = \frac{q}{C} e^{-\alpha t} \left[\cos \beta t - \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta t \right] \quad (8)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{1}{2RC};$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \alpha^2 LC}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

para $Q = 1$:

$$\alpha = \omega_0 / 2$$

$$\tau \cong 3 / \alpha$$

Nesse circuito, a integração de $i(t)$ é realizada instantaneamente ($t = 0$) pela capacitância C .

Uma interpretação “qualitativa” da integração de $i(t)$ por esse circuito poderia ser descrita como se segue, considerando-se que no instante da ocorrência do pulso de corrente (em $t = 0+$), ocasionado por uma descarga parcial de carga q , a indutância L (vide Figura 2.5(a)) representa nesse instante um caminho de altíssima impedância, enquanto, por sua vez, a capacitância C representa um caminho de baixíssima impedância. Logo, nesse instante, a corrente flui somente pelo capacitor C , o qual carrega-se instantaneamente com a carga q associada à descarga parcial. Nessa situação, a tensão no capacitor C assume instantaneamente o valor $V_0 = q/C$ (vide o 1º termo do lado direito da equação 8). Nos instantes subsequentes, o capacitor C descarrega-se através do indutor L , e vice-versa,

resultando numa tensão oscilatória de frequência angular $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, com amortecimento exponencial (vide o 2º termo do lado direito da equação 8, $e^{-\alpha t}$ onde $\alpha = \frac{1}{2RC}$). Dessa forma, a tensão $V_0(t)$ assumiria a forma de uma tensão senoidal decrescente exponencialmente, de frequência ω_0 , descrita pela equação (8). A Figura 2.6 mostra um exemplo prático, de medição desse tipo de forma de onda.

Os pulsos de corrente, após serem integrados, podem ser apresentados numa tela de osciloscópio com base de tempo em forma elíptica ou linear. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram exemplos de saídas típicas obtidas nesse tipo de medição.

Figura 2.6 – Tela obtida na medição de descargas parciais – base de tempo linear

Figura 2.7 – Tela obtida na medição de descargas parciais – base de tempo elíptica

O correto funcionamento do circuito de detecção (circuito RLC paralelo), realizando a integração da corrente impulsiva $i(t)$, está condicionado aos fatores:

- a) - capacitor de acoplamento $C_k \gg C_a$ (capacitância do corpo de prova). A realização de uma calibração, através da comparação de leituras com a aplicação de uma carga elétrica conhecida pode corrigir possíveis erros;
- b) - alta relação sinal/ruído durante a medição, ou seja, baixo nível de interferências eletromagnéticas na medição;

c) - a forma de onda da corrente associada à descarga parcial deve aproximar-se o máximo possível do formato de um pulso (ou impulso), com tempo de subida muito curto e tempo de cauda também curto (da ordem de ns). Pode-se considerar que essa exigência é satisfeita na maioria dos casos práticos, principalmente no caso de DP originadas no interior de cavidades no dielétrico. Uma corrente impulsiva na entrada do circuito RLC garante a realização da integração da corrente $i(t)$ de forma instantânea pela capacitância C .

Adicionalmente, outra característica relevante refere-se ao conteúdo espectral das descargas parciais. O levantamento do conteúdo espectral de um impulso resulta em um espectro contínuo, e com amplitude constante e proporcional à integral (área) desse impulso. A Figura 2.8 ilustra esse resultado, onde observa-se amplitude constante até frequências da ordem de alguns GHz (JUDD et. al, 2005).

Figura 2.8 – Efeito da largura do pulso a) e conteúdo espectral associado b)

Fonte: (JUDD et.al, 2005)

A Figura 2.9 ilustra esse conceito, mostrando exemplo de medição no âmbito dessa pesquisa, utilizando-se analisador de espectro, de pulso de corrente gerado por descarga parcial em cavidade, em placa isolante submetida à tensão de 30kV.

Figura 2.9 – Composição espectral de pulso de corrente gerado por descarga parcial em cavidade, em placa isolante submetida à tensão de 30kV, na faixa de frequências de 20MHz a 50MHz.

Na Figura 2.9, observa-se amplitude aproximadamente constante na faixa de frequências de 20MHz a 50MHz, a menos da pequena elevação próximo a 24MHz causada pela presença de ruído de fundo. A amplitude aproximadamente constante deve-se ao fato do pulso de descarga parcial apresentar formato aproximadamente impulsivo.

2.3 A medição convencional da carga aparente utilizando-se detectores de DP em banda estreita

A medição em banda estreita é tratada na norma CISPR Publication 16-1 “*Specifications for radio disturbance and immunity measuring systems apparatus and methods*”. A norma IEC 60270 também prevê a utilização da medição em banda estreita para a medição da carga aparente. Os instrumentos operam em banda estreita Δf e em uma frequência média f_m que pode ser variada numa ampla faixa, na qual a amplitude observada é aproximadamente constante, conforme esperado considerando-se a natureza impulsiva da descarga parcial (vide Figuras 2.8 e 2.9). Os valores recomendados para largura de faixa Δf e frequência média f_m são (CISPR, 2008):

$$\begin{aligned} 9\text{kHz} &\leq \Delta f \leq 30\text{kHz} \\ 50\text{kHz} &\leq f_m \leq 1\text{MHz} \end{aligned}$$

Nesses instrumentos, o tempo de resolução é grande, tipicamente da ordem de $8\mu\text{s}$.

Em geral, esses instrumentos são utilizados em conjunto com impedâncias de acoplamento similares àquela impedância Z_m utilizada nos instrumentos de banda larga, as quais atuam como filtros passa alta, suprimindo correntes em frequência industrial e suas harmônicas, onde podemos assumir que às correntes geradas pelas DP podemos associar tensões geradas pelas DP, obtidas na saída dessa impedância Z_m , sendo essas tensões aplicadas na entrada do instrumento.

De forma análoga, essa impedância atua também como circuito quase integrador, o que pode ser demonstrado considerando-se um tensão de entrada $v_1(t) = V_0 \exp(-t/T)$, ou seja, uma tensão impulsiva que inicia subitamente com valor inicial V_0 e decai exponencialmente com uma constante de tempo T , conforme a Figura 2.10b.

Figura 2.10 – Algumas características da resposta ao impulso para amplificadores de banda estreita. a - Diagrama de blocos, mostrando a função de transferência (ou admitância $G(j\omega)$ em função da frequência). b - Tensão impulsiva de entrada $V_1(t)$. c - Espectro amplitude x frequência da tensão $V_1(t)$

Fonte: (Adaptado de KUFFEL, 2000).

A integral desse pulso $\int_0^\infty v_1(t)dt$ vale $V_0 T$, a qual é proporcional à carga aparente q do pulso de corrente da DP. O espectro complexo desse impulso é dado pela integral de Fourier (PAPOULIS, 1962):

$$V_1(j\omega) = \int_0^{\infty} v_1(t) \exp(-j\omega t) dt = \frac{V_0 T}{1 + j\omega T} = \frac{S_0}{1 + j\omega T} \quad (9)$$

O espectro amplitude frequência é dado por $|V_1(j\omega)|$, expresso por:

$$|V_1(j\omega)| = \frac{V_0 T}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} = \frac{S_0}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \quad (10)$$

Onde S_0 é proporcional à carga aparente q . A amplitude decai para -3dB, ou mais de 30%, para frequências superiores à frequência angular $\omega_c = 1/T$. Conforme este resultado, o espectro amplitude x frequência dado por $|V_1(j\omega)|$ apresenta amplitude constante para frequências angulares inferiores a $\omega_c = 1/T$. Ainda conforme a Figura 10c, a amplitude de $|V_1(j\omega)|$ nessa faixa é constante e de valor proporcional à carga aparente q . Este importante resultado fundamenta as medições em banda estreita, uma vez que a amplitude da tensão medida através de voltímetros seletivos (ou seja, sintonizados em determinada faixa de frequências) apresentaria a mesma leitura em qualquer frequência, desde que o instrumento esteja sintonizado na região plana do espectro, novamente ressaltando que essa amplitude medida é proporcional à carga aparente. Através de procedimentos de calibração é passível quantificação dessa carga aparente.

3 APLICAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA FREQUÊNCIA COMO SENSOR PARA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS.

O Transformador de Corrente, cujo enrolamento secundário é constituído por algumas espiras que envolvem o núcleo, funciona através do campo magnético variante no tempo que circula no núcleo e induz força eletromotriz proporcional ao mesmo no ramo secundário. Para uma carga linear e constante a tensão induzida no secundário é proporcional à corrente que passa através da janela do TC.

O TC de alta frequência utilizado nas medições em campo é caracterizado pelas frequências de corte f_1 e f_2 , frequência média f_m e largura de banda Δf , da seguinte forma:

$$f_1 = 9\text{kHz}$$

$$f_2 = 110\text{MHz}$$

$$9\text{kHz} \leq \Delta f \leq 110\text{MHz}$$

$$f_m = 50\text{MHz}$$

A norma IEC 60270 denomina instrumentos de banda larga aqueles que utilizam faixas de frequência de $100\text{kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{kHz}$. Instrumentos que operam em faixas superiores a esses valores, são denominados instrumentos de banda ultra larga (*ultra-wide band instruments*) pela norma.

Na prática o TC apresenta outros componentes, como filtros para estabelecimento de frequências de corte, além do esquema simplificado apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – TC de alta frequência. a) – Ilustração da lei de Ampère. b) utilização do TC para medição de correntes

Qualquer TC de medição de corrente pode ser modelado como um transformador como mostrado na Figura 3.2, sendo o enrolamento primário representado por uma indutância e o seu enrolamento secundário representado por uma indutância acrescentado da impedância da carga (Smith, D.).

Figura 3.2 - Modelo simplificado de uma prova de corrente
Fonte: (Smith, D.)

Todos os TCs de alta frequência tem uma determinada capacitância de alguns pF da ponta de prova para o circuito sob teste (Smith, D.). No caso do TC de alta frequência, o valor da capacitância é de apenas alguns pF (capacitância do corpo de prova) e admitindo que os valores de R e L sejam muito maiores do que C, é possível deduzir que esse circuito terá comportamento oscilatório, pois obedecem a condição $\omega_0 > \alpha$, sendo, $\alpha = R/2L$ e $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, como C possui um valor ínfimo, $\omega_0 \gg \alpha$.

Dessa maneira as medições com o TC de alta frequência estão fundamentadas em conceitos similares àqueles presentes nas medições de carga aparente em banda larga ou em banda estreita, pois o TC empregado comporta-se como um filtro passa faixa, podendo ser representado por um circuito equivalente RLC paralelo, o qual inerentemente atua também como circuito integrador para os pulsos de corrente originados por descargas parciais, idealmente representados por uma função delta de Dirac.

Em um circuito R, L, C paralelo, excitado por um impulso de corrente, a carga do capacitor aumenta, instantaneamente, de um valor igual à amplitude do impulso.

Considerando um circuito RLC paralelo, alimentado por um impulso de amplitude Q, e supondo que as condições iniciais em $t = 0$, $I_L = 0$ e $V = 0$, tem-se a equação:

$$C \frac{dv(t)}{dt} + G v(t) + \frac{1}{L} \int_0^t v(\lambda) d\lambda = Q \cdot \delta(t) \quad (11)$$

Para que esta equação possa ser satisfeita, a tensão v deve ter descontinuidade em degrau na origem. Integrando a equação (11):

$$C \int_{0-}^{0+} \frac{dv(t)}{dt} dt + G \int_{0-}^{0+} v(t) dt + \frac{1}{L} \int_{0-}^{0+} \int_0^t v(\lambda) d\lambda dt = Q \cdot \int_{0-}^{0+} \delta(t) dt \quad (12)$$

A primeira integral do primeiro membro reduz-se a $v(0+) - v(0-)$, as demais são nulas, em face da natureza da descontinuidade de $v(t)$. A integral do segundo membro é 1, pela definição da função impulsiva. Portanto:

$$C \cdot (v(0+) - v(0-)) = Q \quad (13)$$

Dessa maneira:

$$v(0+) = \frac{Q}{C} + v(0-) \quad (14)$$

Considerando que $v(0^-)=0$, tem-se:

$$Q/C = (v(0^+) - v(0^-)) \quad (15)$$

Para tempos maiores que $t = 0^+$ o circuito está efetivamente livre, de modo que o circuito exibirá o comportamento correspondente. Assim se o circuito for oscilatório, obtém-se:

$$V(t) = \frac{Q}{C} \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega d^2}} e^{-\alpha t} \cos(\omega d + \Psi) \quad (16)$$

A calibração do TC, para a medição de correntes em regime permanente, pode ser feita aplicando-se uma corrente de valor e frequência conhecidos, e medindo-se a tensão entre seus terminais. O resultado é uma curva de calibração que relaciona a tensão V com a corrente I :

$$Z_T = \frac{V}{I} \quad (17)$$

A quantidade Z_T é denominada impedância de transferência do TC. O fabricante do TC fornece geralmente uma curva de calibração, que mostra a impedância de transferência versus frequência, a qual é obtida fazendo passar pela janela do TC uma corrente de valor e frequência conhecidos e medindo-se a tensão entre seus terminais. Geralmente a curva é fornecida em dB (relativo a 1ohm), da forma:

$$|Z_T|_{dB\Omega} = |V|_{dB\mu V} - |I|_{dB\mu A} \quad (18)$$

A Figura 3.3 mostra um exemplo típico da curva de calibração de TC de alta frequência.

Figura 3.3 – Curva típica da impedância de transferência para o TC.

Na curva da Figura 3.3, a impedância de transferência é expressa em termos de “dB para 1 ohm”, da seguinte forma:

$$Z_{t,dB\Omega} = 20 \log_{10} (Z_T) = 20 \log_{10} (V) - 20 \log_{10} (I) \quad (19)$$

A Figura 3.4 mostra o Transformador de Corrente de alta frequência utilizado nos ensaios.

Figura 3.4 – TC de alta frequência utilizado

4 OBTENÇÃO DE ASSINATURAS DE DESCARGAS PARCIAIS

Buscando-se o estabelecimento de assinaturas ou padrões característicos das descargas parciais foram realizados ensaios em laboratório, de modo a interpretar e analisar os resultados obtidos.

Posteriormente os padrões obtidos foram utilizados para detecção em campo de descargas parciais, e também para separar outros tipos de ruído que possam vir a ser medidos, evitando assim possíveis erros de medição.

4.1 Obtenção de assinaturas de descargas parciais em laboratório, em isolamento a óleo

Nessa etapa da pesquisa foram priorizadas as atividades de interpretação e análise de ensaios em laboratório, em amostras representativas do meio isolante óleo, uma vez que esse é o meio de isolamento mais comum nos transformadores de potência, buscando o estabelecimento de assinaturas ou padrões característicos das descargas parciais nesse meio isolante.

Foram realizados testes em diferentes configurações de amostras, constituídas por placas de material isolante imersas em óleo mineral isolante. O procedimento utilizado para a medição de descargas parciais foi no domínio do tempo com a utilização de osciloscópio. A medição das descargas parciais foi realizada através da medição da intensidade dos pulsos de corrente gerados quando da ocorrência das descargas parciais, utilizando-se um transformador de corrente de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do circuito de ensaio.

Com o objetivo de se provocar a ocorrência de descargas parciais utilizaram-se placas de poliéster, ou fibra de vidro, imersas em óleo isolante, contendo em seu interior uma pequena cavidade. A placa sob ensaio foi posicionada entre dois eletrodos de latão, sendo aplicada alta tensão no eletrodo superior e aterrando-se o eletrodo inferior. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram o arranjo utilizado.

Figura 4.1 – Placa de poliéster imersa em óleo isolante, contendo uma cavidade, posicionada entre dois eletrodos de latão.

Figura 4.2 – Placa isolante imersa em cuba de porcelana contendo óleo isolante

A placa isolante contendo a cavidade foi posicionada entre dois eletrodos de latão, imersa em óleo isolante. Aplicou-se alta tensão entre os eletrodos e a tensão foi elevada até observar-se o início de ocorrência de descarga parcial. Os sinais de descarga parcial foram detectados através de um transformador de corrente de alta frequência instalado no cabo de aterramento, acoplado ao osciloscópio. A Figura 4.3 mostra a montagem utilizada.

Figura 4.3 – Montagem utilizada no ensaio, mostrando a fonte, TC de alta frequência e analisador de espectro.

A Figura 4.4 mostra o TC de alta frequência, tipo alicate, utilizado nas medições, instalado no cabo de aterramento.

Figura 4.4– Transformador de corrente de alta frequência tipo clamp utilizado nos ensaios, instalado no cabo de aterramento.

Nas medições foram utilizados o osciloscópio Agilent DSO8064A, 600MHz e o osciloscópio Fluke Scopemeter 199C, 200MHz.

Utilizou-se como dielétrico placa de fibra de vidro com aproximadamente 5 mm de espessura nessas medições. A placa de fibra de vidro foi posicionada entre dois eletrodos planos circulares com diâmetro de 2", superpostos entre si. Ao eletrodo superior aplicou-se alta tensão, aterrando-se o eletrodo inferior. O TC de alta frequência foi instalado no condutor de aterramento do eletrodo inferior, e acoplado ao osciloscópio.

As Figuras 4.5 a 4.7 mostram resultados das medições das descargas parciais ocorridas na cavidade artificialmente produzida na placa de fibra de vidro. As medições foram realizadas utilizando-se TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento, conectado a osciloscópio, obtendo-se dessa forma o oscilograma dos pulsos de corrente associados às descargas parciais, no domínio do tempo.

Por inspeção, observa-se que os oscilogramas da corrente obtidos mostram formas de onda de caráter subamortecido, aproximadamente senoidais com amortecimento exponencial, ao longo do tempo, como deduzido no capítulo 3.

As formas de onda oscilatórias obtidas apresentam frequências entre 7 e 26 MHz, aproximadamente.

Figura 4.5– Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 25kV. Escalas 500mV/div - 200ns/div. Medição com osciloscópio Fluke Scopemeter 199C. Frequência aproximada 12,5MHz

Figura 4.6 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 12kV. Escala 20mV/div – 1 μ s/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A. Frequência aproximada 7MHz.

Figura 4.7 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas 2V/div - 500ns/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A. Frequência aproximada 26MHz.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram corrente gerada por DP semelhante àquela apresentada na Figura 4.7, utilizando-se, porém, varredura mais lenta, de 20 ms/div. Para referência, apresenta-se também a forma de onda senoidal da tensão aplicada à amostra, obtida utilizando-se o sensor de campo elétrico mostrado na Figura 4.10.

Observa-se que as descargas ocorrem, nos semiciclos positivo e negativo, durante a porção crescente (em módulo) da senoide.

Figura 4.8 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas: canal amarelo 5V/div – 10ms/div; canal lilás 800mV/div – 10ms/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.

Figura 4.9 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas: canal amarelo 5V/div – 2ms/div; canal lilás 800mV/div – 2ms/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.

Figura 4.10– Sensor de campo elétrico utilizado para fornecer referência de tensão elétrica proporcional, e em fase, com a tensão aplicada à amostra.

As Figuras 4.11 a 4.13 mostram oscilogramas de descargas parciais em amostra de fibra de vidro submetido à tensão de 12kV, e da tensão aplicada à amostra.

Figura 4.11 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 12kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 5mV/div – 10ms/div; canal vermelho (tensão aplicada) 2V/div – 10ms/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.

Figura 4.12– Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 30kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 10mV/div – 10ms/div; canal vermelho (tensão aplicada) 5V/div – 10ms/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.

Figura 4.13 – Corrente gerada por sequência de descargas parciais (canal vermelho), durante ensaio em amostra do tipo placa de fibra de vidro, com aplicação de 12kV. Canal azul – tensão aplicada à amostra. Escalas canal vermelho 100mV/div – 5ms/div canal azul 1V/div – 5ms/div. Medição com osciloscópio Fluke Scopemeter 199C.

As Figuras 4.14 a 4.16 apresentam situação semelhante à da Figura 4.6 (placa de fibra de vidro submetida à tensão de 12 kV), utilizando-se varredura de 1 μ s/div, mostrando a corrente associada à descarga parcial (em lilás), e na porção inferior do oscilograma, a composição espectral desse pulso de corrente, obtida através do recurso FFT (*Fast Fourier Transform*) do osciloscópio Agilent DSO 8064 A.

Figura 4.14 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 12kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 20mV/div – 1μs/div; porção inferior FFT: frequência central 100MHz, 20MHz/div, offset -50dBm, 20dBm/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.

Figura 4.15 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 20mV/div – 1μs/div; porção inferior FFT: frequência central 100MHz, 20MHz/div, offset -50dBm, 20dBm/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.

Figura 4.16 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de fibra de vidro, com aplicação de 9kV. Escalas: canal lilás (D.P.) 10mV/div – 200ns/div; porção inferior FFT: frequência central 100MHz, 20MHz/div, offset -55dBm, 20dBm/div. Medição com osciloscópio Agilent DSO 8064A.

A Figura 4.17 mostra oscilograma da corrente associada à descarga parcial, em amostra tipo placa isolante de poliéster.

Figura 4.17 – Corrente gerada por descarga parcial em amostra do tipo placa isolante de poliéster, com aplicação de 20kV. Escalas 100mV/div - 500ns/div. Medição com osciloscópio Fluke Scopemeter 199C. Frequência aproximada 13,5MHz

Nota-se que o comportamento das ondas medidas pelo TC de alta frequência tem o comportamento de uma senoide de um circuito subamortecido, conforme esperado e deduzido no capítulo 3.

4.2 Obtenção de assinaturas de descargas parciais em laboratório, em isolamento constituída por gás SF₆ pressurizado

Com a finalidade de estabelecer assinaturas ou padrões de descargas parciais no meio dielétrico gás SF₆ pressurizado, foram realizados testes laboratoriais em célula de ensaio confeccionada para esse fim. A célula de ensaio é constituída por uma caixa de alumínio contendo internamente um eletrodo de alta tensão, na qual SF₆ pressurizado foi aplicado através de uma válvula de controle e manômetro. A alta tensão foi aplicada ao eletrodo através de um cabo isolado de alta tensão. Todas as aberturas foram seladas, utilizando-se uma tampa parafusada com o-ring, a fim de manter o gás SF₆ a uma pressão aproximada de até 10 bar.

A Figura 4.18 mostra a célula de ensaio contendo gás SF₆ pressurizado.

Figura 4.18 – Célula de ensaios para testes de descargas parciais em SF₆.

A Figura 4.19 mostra detalhes da célula de ensaio contendo os eletrodos de alta tensão.

Figura 4.19 – Célula de ensaios para testes de descargas parciais em SF_6 , com eletrodos de alta tensão.

As Figuras 4.20 e 4.21 mostram a montagem experimental básica utilizada.

Figura 4.20 – Montagem experimental básica utilizada, com a célula de ensaio e o transformador de alta tensão.

Figura 4.21 – Montagem experimental básica utilizada, com a célula de ensaio, o transformador de alta tensão e aparelhagem de medição.

Utilizando-se essa montagem experimental, diferentes configurações de eletrodos, sob gás SF_6 pressurizado, foram testadas.

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram testes realizados utilizando-se configuração de eletrodos tipo ponta-plano, onde foi aplicada alta tensão ao eletrodo ponta e mantendo-se o eletrodo plano aterrado.

Figura 4.22 – Eletrodo plano ao potencial de terra e eletrodo ponta sob alta tensão, em ambiente pressurizado com SF_6 à pressão de 6 bar.

A Figura 4.23 mostra a assinatura de descarga parcial obtida utilizando-se a configuração de eletrodos mostrada na Figura 4.22.

Figura 4.23 – Assinatura de descarga parcial obtida utilizando-se a configuração de eletrodos ponta plano (eletrodo plano aterrado), espaçamento entre eletrodos 2,5mm, SF₆ à pressão de 6 bar. Escalas 200ns/div e 10mV/div.

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram testes realizados utilizando-se a configuração de eletrodos ponta plano, aplicando-se alta tensão ao eletrodo plano e mantendo-se o eletrodo ponta aterrado.

Figura 4.24 – Eletrodo plano submetido à alta tensão, mantendo-se o eletrodo ponta aterrado em ambiente com gás SF₆ à pressão de 6 bar.

A Figura 4.25 mostra a assinatura de descarga parcial utilizando-se a configuração de eletrodos mostrada na Figura 4.24.

Figura 4.25 – Assinatura de descarga parcial obtida utilizando-se a configuração de eletrodos ponta plano da Figura 4.24, submetendo o eletrodo plano a alta tensão e mantendo o eletrodo ponta ao potencial de terra, em ambiente com gás SF₆ à pressão de 6 bar.

A fim de se simular uma situação passível de ocorrência em equipamentos contendo isolamento a SF₆, outra variante de configuração de eletrodo foi utilizada, aplicando-se pequenas partículas isolantes entre os eletrodos, conforme mostrado nas Figuras 4.26 e 4.27.

Figura 4.26 – Eletrodo plano submetido à alta tensão, mantendo-se o eletrodo ponta sob alta tensão em ambiente com gás SF₆ à pressão de 6 bar, e aplicando-se pequenas partículas isolantes de fibra de vidro entre os eletrodos.

Figura 4.27 – Assinatura de descarga parcial obtida utilizando-se configuração de eletrodos ponta plano (eletrodo plano aterrado) da Figura 4.26, espaçamento de 2,5 mm, gás SF_6 à pressão de 2 bar, tensão de ensaio de 10 kV. Escalas 200ns/div e 10mV/div.

Para simular outra possível situação real, as Figura 4.28 e 4.29 mostram o eletrodo ponta sob alta tensão e próximo a partículas metálicas depositadas sobre superfície isolante de silicone.

Figura 4.28 – Eletrodo ponta sob alta tensão próximo a partículas metálicas sobre superfície isolante de silicone.

Figura 4.29 – Assinatura de descarga parcial utilizando-se eletrodo ponta ao potencial de 3,5kV próximo a partículas metálicas, conforme Figura 4.28, SF₆ à pressão de 5 bar. Escalas 200ns/div e 20mV/div.

Outra possível situação presente em equipamentos reais é mostrada nas Figura 4.30 e 4.31, onde o eletrodo ponta sob alta tensão é posicionado próximo a partículas metálicas colocadas sobre superfície metálica aterrada.

Figura 4.30 – Eletrodo ponta sob alta tensão próximo a partículas metálicas colocadas sobre superfície metálica aterrada.

Figura 4.31 – Assinatura de descargas parciais obtidas utilizando-se eletrodo ponta ao potencial de 3,5kV, conforme Figura 4.30, e próximo a partículas metálicas sobre superfície metálica aterrada, SF₆ à pressão de 6 bar. Escalas 100ns/div e 50mV/div.

Outra possível situação presente em equipamentos reais é mostrada nas Figuras 4.30 e 4.31, onde o eletrodo ponta sob alta tensão é posicionado próximo a partículas metálicas colocadas sobre superfície metálica aterrada.

Portanto nos equipamentos com isolamento a gás SF₆ podemos observar o mesmo padrão de assinaturas obtido nos equipamentos com isolamento a óleo, obtidos através do Transformador de Corrente de Alta Frequência instalado no condutor de aterramento. Ambos apresentaram como resposta uma senoide subamortecida.

4.3 Descargas superficiais – trilhamento elétrico

Com o objetivo de se caracterizar descargas elétricas superficiais ao ar livre, para diferenciá-las das descargas parciais na isolamento dos equipamentos, que podem ocorrer em superfícies isolantes submetidas a potencial elétrico e a líquidos contaminantes (terminais, muflas e isoladores ao tempo, por exemplo), foram realizadas medições das correntes associadas a esse tipo de descarga.

Essas medições foram realizadas no laboratório de trilhamento elétrico do IEE-USP, onde são realizados ensaios em amostras isolantes do tipo placa, conforme a norma NBR 10296. Foram realizados ensaios em amostras de fibra de vidro, dispostas em plano inclinado e submetidas a solução contaminante na tensão de ensaio de 2kV.

A Figura 4.32 mostra a montagem utilizada.

Figura 4.32 – Ensaio de trilhamento elétrico conforme norma NBR 10296 em placa de fibra de vidro, eletrodo inferior submetido a tensão de ensaio 2kV, eletrodo superior aterrado. Observa-se próximo ao eletrodo inferior ocorrência de descarga elétrica (cintilação).

As Figuras 4.33 a 4.42 mostram a evolução das descargas ao longo do tempo, onde ocorre a sequência de molhamento da superfície isolante entre os eletrodos inferior e superior, condução através da solução contaminante, aquecimento e secagem da solução com a formação de bandas secas intercaladas por bandas úmidas, cintilação e ocorrência de arcos elétricos na superfície isolante, finalmente dando origem a carbonização, formação de trilhas condutoras e erosão do material, resultando no fenômeno chamado trilhamento elétrico. Essa sequência de eventos está representada esquematicamente de forma qualitativa, na Figura 4.33.

Figura 4.33 – Distribuição de potencial elétrico V_p numa amostra plana com líquido contaminante.
Adaptado de (OLIVEIRA et al., 1994)

Figura 4.34 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente descarga corona no ar). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 2MHz.

Figura 4.35 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.

Figura 4.36 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.

Figura 4.37 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.

Figura 4.38 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.

Figura 4.39 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.

Figura 4.40 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.

Figura 4.41– Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.

Figura 4.42 – Descarga na superfície da placa de fibra de vidro (possivelmente cintilação, ou seja, pequenas descargas elétricas visíveis). Escalas 50mV/div – 2μs/div. Frequência aproximada 15MHz.

Pode-se observar que as descargas superficiais possuem longa duração, possivelmente por ocorrer em várias descargas espalhadas pela superfície submetida ao campo elétrico.

4.4 Calibração aplicada às medições com o TC de alta frequência

Nos ensaios de tipo realizados em laboratório ou de rotina, nas medições convencionais de medição da carga aparente, devido ao desconhecimento do valor da capacitância é necessário

o procedimento de calibração, uma vez que essa capacitância afeta o valor da carga aparente medida (quanto maior a capacitância do equipamento comparada com a capacitância do capacitor de acoplamento, maior o erro). A calibração permite fazer um ajuste fino nos valores medidos, de forma a ser mais precisa a medição da carga aparente.

Na interpretação das medições realizadas em campo, adotou-se o valor de calibração obtido em laboratório. Em campo, as medições não são tão precisas quanto àquelas obtidas em laboratório, mas através delas é possível mensurar o nível de descargas parciais com boa precisão para fins de diagnóstico do estado da isolação do equipamento.

O capacitor de acoplamento utilizado em laboratório (tipicamente com valor de 1000 pF) não é rigorosamente necessário na medição da carga aparente em campo, considerando que a capacitância do sistema é alta, principalmente a capacitância dos enrolamentos do transformador ou dos barramentos de alta tensão (maior que 500 pF).

A corrente associada aos pulsos de calibração, com carga conhecida, gerados por aparelho calibrador, foram medidas com o TC de alta frequência, instalado no cabo de aterramento, da placa isolante contendo uma cavidade, conforme Figura 4.43, imersa no óleo isolante de forma a se quantificar a magnitude da carga aparente associada às descargas parciais.

Figura 4.43 - Placa isolante imersa em cuba de porcelana contendo óleo isolante

A Figura 4.44 mostra o aparelho calibrador utilizado, e a Figura 4.45 mostra a montagem utilizada.

Figura 4.44 – Aparelho calibrador de intensidade de descargas parciais, de fabricação Hipotronics.

Figura 4.45 – Montagem utilizada para a quantificação das descargas parciais.

A Figura 4.46 mostra a tensão de saída do aparelho calibrador, ajustado para a carga de 50pC.

Figura 4.46 – Tensão de saída do aparelho calibrador, ajustado para a carga de 50pC escalas 1V/Div 200 μ s/div

A Figura 4.47 mostra a corrente associada aos pulsos do aparelho calibrador, ajustado para a aplicação de pulsos de 50pC ao circuito de ensaio mostrado na Figura 4.45, na escala 200ns/div.

Figura 4.47 – Corrente associada à aplicação de pulsos de 50pC ao circuito de ensaio da Figura 4.45 (placa de fibra de vidro), escalas 10mV/Div - 200ns/div. Frequência aproximada 12MHz. Amplitude pico a pico de aproximadamente 50mV.

A Figura 4.48 mostra a corrente associada aos pulsos do aparelho calibrador, com intensidade de 50pC, aplicados ao circuito de ensaio da Figura 4.45, na escala de 5ms/div.

Figura 4.48 – Corrente associada à aplicação de pulsos de 50pC ao circuito de ensaio da Figura 4.45 (placa de fibra de vidro), escalas 10mV/Div 5ms/div

Portanto, considerando-se os resultados das medições, um pulso com carga de 50pC corresponde a um sinal de amplitude de aproximadamente 50mV pico a pico, utilizando-se o TC de alta frequência.

4.5 Ensaios cromatográficos no óleo isolante

Outro método de medição de defeitos na isolação, descargas parciais, são os ensaios cromatográficos em óleo isolante mineral.

Os óleos isolantes minerais são amplamente utilizados em conjunto com o papel em aparatos de alta tensão, formando isolações do tipo papel-óleo. Tais óleos são constituídos basicamente de cadeias de hidrocarbonetos, sendo os mais comuns os parafínicos e os naftênicos.

Um conhecido efeito da presença de descargas parciais nesses fluidos é a ocorrência de dissociação dos hidrocarbonetos constituintes do óleo isolante mineral, gerando subprodutos dissolvidos na forma gasosa, como por exemplo: hidrogênio (H_2), oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), etileno (C_2H_4), etano (C_2H_6), acetileno (C_2H_2). Os gases dissolvidos podem ser extraídos e identificados através do ensaio de cromatografia gasosa, comumente chamado de DGA (*dissolved gas analysis*). Pela determinação da natureza e quantificação desses compostos é possível inferir o tipo de defeito presente no equipamento, como por exemplo, a presença de sobreaquecimento, descargas elétricas, e assim por diante, através da utilização das várias técnicas disponíveis, como por exemplo, a de Rogers, do método dos gases chave, e outros (ASTM, 1988)

Visando à obtenção de sensibilidade, quanto aos níveis de concentração de gases gerados pelas descargas parciais no meio isolante papel-óleo, ao longo do tempo, e em função do nível de intensidade das descargas, amostras desse tipo de isolação foram submetidas à aplicação de alta tensão, utilizando-se as célula de ensaios das Figuras 4.49 e 4.50. Foram aplicados três níveis de intensidade de atividade de descarga: baixa intensidade (alguns pC), intensidade moderada (dezenas de pC) e alta intensidade (milhares de pC).

Amostras do óleo isolante foram colhidas por meio de uma seringa hipodérmica de 50 ml, para os tempo de exposição 0 horas, 03 horas e 06 horas. Essas amostras foram submetidas à análise cromatográfica, efetuada pelo laboratório do Centro de Manutenções Especiais - Ensaios Químicos Especiais, da CTEEP.

Figura 4.49 – Elettrodo agulha-plano aterrado, immerso em recipiente contendo óleo isolante, com placa de papelão interposta entre os eletrodos.

Figura 4.50 – Elettrodo agulha-plano aterrado, immerso em recipiente contendo óleo isolante, com placa de papelão interposta entre os eletrodos.

A Tabela 4.1 mostra a identificação das amostras.

Tabela 4.1– Identificação das amostras de isolamento papel/óleo isolante submetidas a descargas parciais

Amostra	Descrição
Amostra 1	óleo novo
Amostra 2	agulha papelão após 3 horas - descargas moderadas
Amostra 3	agulha papelão após 6 horas - descargas moderadas
Amostra 4	agulha papelão após 5 horas - descargas de alta intensidade
Amostra 5	óleo novo
Amostra 6	agulha papelão após 3 horas - descargas de baixa intensidade
Amostra 7	agulha papelão após 6 horas - descargas de baixa intensidade

A Tabela 4.2 mostra resultados das análises cromatográficas efetuadas.

Tabela 4.2 – Resultados das análises cromatográficas efetuadas nas amostras de isolamento papel/óleo isolante submetidos a descargas parciais

Amostra	Resultado (PPM)						
	1	2	3	4	5	6	7
hidrogênio (H ₂)	0	57	139	130	0	5	7
oxigênio (O ₂)	36.650	33.852	32.316	30.267	35.515	37.097	33.659
nitrogênio (N ₂)	85.830	79.458	74.375	69.094	79.982	84.585	77.132
metano (CH ₄)	2	10	17	26	1	2	1
monóxido de carbono (CO)	0	0	0	0	0	0	0
dióxido de carbono (CO ₂)	623	630	584	601	654	700	652
etileno (C ₂ H ₄)	0	17	27	65	0	1	1
etano (C ₂ H ₆)	0	1	2	2	0	0	0
acetileno (C ₂ H ₂)	0	83	155	711	0	12	14
total de gases	123.105	114.108	107.615	100.896	116.152	122.402	111.466
total de gases combustíveis	2	168	340	934	1	20	23

As Figuras 4.51, 4.52 e 4.53 mostram a evolução, ao longo do tempo, da concentração dos gases produzidos pela atividade de descargas parciais nas amostras.

Figura 4.51 - Evolução da concentração de hidrogênio, metano, etileno e acetileno, nas amostras submetidas a descargas de baixa intensidade.

Figura 4.52 - Evolução da concentração de hidrogênio, metano, etileno e acetileno, nas amostras submetidas a descargas de intensidade moderada.

Figura 4.53 - Evolução da concentração de gases combustíveis, nas amostras submetidas a descargas de intensidade baixa e moderada.

As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram os indicadores para análise do tipo de descargas, segundo critério da norma IEC 60599 (IEC, 1999).

Tabela 4.3– Indicadores para análise do tipo de descargas, segundo critério da norma IEC 599/78 para as descargas com intensidade moderada.

Amostra	Descargas moderadas						
	1	2	3	4	5	6	7
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	novo	4,88	5,74	10,94	novo	12	14
CH ₄ /H ₂	novo	0,18	0,12	0,20	novo	0,40	0,14
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	novo	17	13,5	32,5	novo	nd	Nd

Tabela 4.4 – Indicadores para análise do tipo de descargas, segundo critério da norma IEC 599/78 para as descargas com baixa intensidade.

Amostra	Descargas de baixa intensidade						
	1	2	3	4	5	6	7
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	Nd	2	2	2	nd	2	2
CH ₄ /H ₂	Nd	0	0	0	nd	0	0
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Nd	2	2	2	nd	nd 0?	nd 0?

A Tabela 4.5 mostra a interpretação do tipo de descarga, segundo critério da IEC 60599 (IEC, 1999).

Tabela 4.5 – Interpretação do tipo de descargas, segundo critério da norma IEC 60599 (IEC, 1999).

Amostra	Interpretação
Amostra 2	Descargas de média energia em má conexão ou potencial flutuante. Descarga no óleo entre materiais sólidos
Amostra 3	Descargas de média energia em má conexão ou potencial flutuante. Descarga no óleo entre materiais sólidos
Amostra 4	Descargas de alta energia em má conexão ou potencial flutuante. Descarga no óleo entre materiais sólidos
Amostra 6	Descargas de baixa energia em má conexão ou potencial flutuante. Descarga no óleo entre materiais sólidos
Amostra 7	Descargas de baixa energia em má conexão ou potencial flutuante. Descarga no óleo entre materiais sólidos

5 RESULTADOS DE ENSAIOS REALIZADOS EM CAMPO

Na sequência são apresentados resultados de ensaios realizados em campo, onde se observa a validade do conceito de calibração apresentado na seção 4.3 e da elaboração teórica apresentada na seção 3, para as medições efetuadas com o TC de alta frequência.

5.1 Ensaios em campo em para-raios de 345 kV de Óxido de Zinco

Os ensaios em campo constituíram-se em medições de descargas em para-raios de ZnO (Óxido de Zinco) da classe 345kV operantes e instalados em campo. As medições foram realizadas utilizando-se osciloscópio, com o TC de alta frequência instalado no condutor de aterramento dos para-raios e osciloscópio.

Nesse tipo de medição, a corrente de fuga é medida considerando-se a faixa de frequências de 9kHz a 100MHZ, tendo por objetivo a detecção de campo eletromagnético conduzido emitido por eventuais descargas elétricas presentes no equipamento sob ensaio, como por exemplo, aquelas originadas por descargas parciais ou descargas superficiais porventura existentes.

A Figura 5.1 mostra o esquema adotado nas medições e a Figura 5.2 a instalação adotada nas medições em campo.

Figura 5.1 - Medição da corrente de fuga dos para-raios.

Figura 5.2 – Instalação do TC de alta frequência no condutor de aterramento do para-raios

A Figura 5.3 mostra exemplo de oscilograma obtido nas medições.

Figura 5.3 – Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do para-raios da fase BR – LTA MO-NOD (escalas 200mV/div e 200ns/div).

Considerando-se o resultado da calibração apresentado na seção 4.3, a Figura 5.4 mostra uma amplitude de pico a pico (máxima) da descarga parcial de aproximadamente 1160 mV, indicando, portanto, uma descarga parcial de intensidade de 1160 pC aproximadamente.

Posteriormente, os para-raios instalados em campo foram substituídos, e submetidos a ensaios de laboratório para medição da carga aparente, utilizando-se o método convencional.

A Tabela 5.1 mostra um resumo dos resultados das medições, onde são comparados os resultados de campo, utilizando-se o TC de alta frequência, com os resultados de laboratório utilizando-se o método convencional de medição da carga aparente baseado na norma IEC 60270.

Tabela 5.1 – Valores obtidos em campo e no laboratório

Nº da Amostra	Valor p-p em mV obtidos em Campo	Valores em pC obtidos no Laboratório Tensão do Sistema	1,05 x MCOV
1	360	890	970
2	200	220	360
3	1160	1002	1510
4	260	350	900
5	1800	1650	2450
6	40 (*)	< 5	1500
7	90 (*)	< 5	2120
8	100 (*)	< 5	3600
9	360	620	980
10	20 (*)	< 5	700
11	82 (*)	Novo	Novo

Obs: - (*) As formas de onda obtidas em campo mostraram-se diferentes daquelas indicativas de descargas parciais.

O valor pico a pico considerado foi a soma do maior pico no ciclo positivo com o maior pico do ciclo negativo (ver Figura 5.3). Observa-se na Tabela 5.1, que os valores obtidos em campo e os valores obtidos em laboratório, na tensão do sistema, apresentaram valores muito próximos em algumas amostras, nas amostras em que a forma de onda era diferente da esperada em campo não foram detectadas descargas, portanto houve correlação entre os resultados obtidos em campo com o resultado da calibração apresentada na seção 4.3.

Após a realização das medições em campo e a confirmação em laboratório de descargas parciais nos para-raios, os mesmos foram inspecionados internamente para verificação de causas das descargas.

No início das pesquisas suspeitava-se que o revestimento utilizado na lateral do bloco de ZnO sob os efeitos dos campos eletromagnéticos estava sofrendo um processo de carbonização causado por descargas parciais internas, criando caminhos de condução de corrente, por fora

dos blocos, colocando-os em curto-circuito e levando à queima do para-raios em operação normal, problema este enfrentado no passado e que levou à substituição da parte interna de todos os para-raios pelo fabricante, porém após a abertura de alguns para-raios ficou constatado que a verdadeira causa das explosões foi a perda da estanqueidade e a penetração de umidade, conforme Figuras 5.4 e 5.5.

Figura 5.4. Estado interno do para-raios, onde aparece a corrosão branca nas partes metálicas

Figura 5.5. Estado dos capacitores internos prováveis fontes de descargas parciais

5.2 Ensaios em campo em Transformador de Corrente.

Nos ensaios em TC com suspeita de apresentar problemas de descargas parciais, realizadas na subestação Cabreúva 345 kV, os ensaios de medição da emissão espectral confirmaram os resultados da análise cromatográfica do óleo isolante realizada nesse TC suspeito, tendo sido possível observar padrão característico de descarga parcial.

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram medição realizada na SE Cabreúva 345 kV, em transformador de corrente com suspeita da presença de descargas parciais, tendo em vista os ensaios cromatográficos previamente realizados.

Figura 5.6 -Vista da Subestação – 230 kV, com o TC submetido ao ensaio mostrado em primeiro plano, à direita.

Figura 5.7 – Medição das descargas parciais através do TC tipo alicate, conectado ao aterramento do transformador de corrente.

Foram realizadas medições das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio acoplado ao TC alicate, instalado nos condutores de aterramento, conforme Figura 5.8. O resultado da medição é apresentado na Figura 5.9.

Figura 5.8 – Medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC alicate instalado no condutor de aterramento.

Figura 5.9 – Medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC alicate instalado no condutor de aterramento do transformador de corrente (Escala 200ns/div e 200mV/div).

Considerando-se os procedimentos de calibração descritos na seção 3.2, o valor pico a pico do oscilograma apresentado na Figura 5.10 indica uma intensidade de descargas elevada, de aproximadamente 1200 pC.

Foram realizados ensaios também na Subestação Leste de propriedade da CTEEP, nos transformadores de corrente no nível de tensão de 345 kV. As Figuras 5.10 a 5.14 mostram a realização desse ensaio.

Figura 5.10– Identificação dos TCs submetidos a ensaio – TC alicate de alta frequência instalado no condutor de aterramento.

Figura 5.11 – TCs submetidos à medição, na subestação Leste 345kV, identificação LES/STTP C-1.

Figura 5.12 – TCs submetidos à medição, na subestação Leste 345kV, identificação LES/STTP C-2.

Figura 5.13 – Identificação dos TCs submetidos a ensaio.

Figura 5.14 – TCs submetidos à medição, na subestação Leste 345kV, identificação TR-2 Primário.

Adicionalmente, foram realizadas medições no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio, conforme mostram as Figuras 5.15 a 5.17.

Figura 5.15 – Exemplo de medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC clamp instalado no condutor de aterramento do transformador de corrente, na SE Leste 345kV. (Escala 1µs/div e 100mV/div). Padrão não característico de descargas parciais.

Figura 5.16 – Exemplo de medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC clamp instalado no condutor de aterramento do transformador de corrente, na SE Leste 345kV. (Escala 1µs/div e 200mV/div). Padrão não característico de descargas parciais.

Figura 5.17 – Exemplo de medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC clamp instalado no condutor de aterramento do transformador de corrente, na SE Leste 345kV. (Escala 1µs/div e 200mV/div). Padrão não característico de descargas parciais.

Nos oscilogramas obtidos nas medições realizadas no condutor de aterramento dos TCs da subestação Leste de 345kV, não foram identificados padrões característicos de descargas parciais.

5.3 Ensaios em campo em Equipamentos com isolação SF₆

As medições do campo eletromagnético conduzido foram realizadas em disjuntores isolados em SF₆, do tipo Tanque Vivo, da classe de tensão 88 kV, na subestação Nordeste. As medições nesses disjuntores ocorreram em função de recente falha em operação observada, nessa subestação, e pela constatação de alterações no gás SF₆ (mau cheiro), nas inspeções realizadas. As medições foram realizadas com os disjuntores mantidos em funcionamento normal.

As Figuras 5.18 a 5.21 mostram o disjuntor do Paralelo das Barras 3 A e 4 A da Subestação Nordeste da CTEEP, com suspeita de alterações no gás SF₆, tendo em vista inspeção previamente realizada, na qual constatou-se odor atípico para esse gás.

Figura 5.18 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do Paralelo das barras 3 A e 4 A.

Figura 5.19 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do Paralelo das barras 3 A e 4 A

Figura 5.20 – Identificação do disjuntor submetido ao ensaio

Figura 5.21 – Identificação do modelo do disjuntor submetido ao ensaio

As medições foram realizadas com a instalação dos TCs de alta frequência em partes aterradas do disjuntor. As Figuras 5.22 e 23 mostram os TCs, tipo alicate, instalados na tubulação do gás SF₆.

Figura 5.22 – Instalação do TC de alta frequência no tubo de saída de gás SF₆, do pólo da fase VM.

Figura 5.23 – Instalação do TC de alta frequência instalado no tubo do densímetro de gás SF₆, próximo ao pólo da fase BR.

As Figuras 5.24 e 5.25 mostram oscilogramas obtidos através dos TCs de alta frequência instalados na tubulação de gás SF₆ do disjuntor.

Figura 5.24 – Disjuntor do Paralelo das Barras 3 A e 4 A 88kV SE Nordeste. Canal A (azul): Tubulação do densímetro de SF₆ escala 20ns/div e 2mV/div. Canal B (vermelho): tubo de saída do gás SF₆ do polo da fase VM escala 20ns/div e 2mV/div.

Figura 5.25 – Disjuntor do Paralelo das Barras 3 A e 4 A 88kV SE Nordeste. Canal A (azul): Condutor de aterramento da estrutura escala 1 μ s/div e 50mV/div. Canal B (vermelho): Condutor de aterramento da estrutura escala 1 μ s/div e 20mV/div.

Os oscilogramas das Figuras 5.24 e 5.25 mostram formas de onda diversas daquelas caracterizadas como indicativas da presença de descargas parciais, obtidas anteriormente neste estudo.

Posteriormente foram realizadas medições no disjuntor do banco de capacitores número 2 da Subestação Nordeste da CTEEP. As Figuras 5.26 a 5.28 mostram o disjuntor do BC2 da SE Nordeste.

Figura 5.26 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do BC2

Figura 5.27 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do BC2.

Figura 5.28 – Identificação do disjuntor submetido ao ensaio

As medições foram realizadas com a instalação dos TCs de alta frequência no condutor de aterramento da estrutura, conforme Figuras 5.29.

Figura 5.29 – Instalação do TC de alta frequência no condutor de aterramento da estrutura.

As Figuras 5.30 a 5.33 mostram oscilogramas obtidos através dos TCs de alta frequência instalados no aterramento da estrutura.

Figura 5.30 – Disjuntor do BC2. Canal A (Azul): Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 2mV/div. Canal B (Vermelho): Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 10mV/div.

Figura 5.31 – Disjuntor do BC2. Detalhe do oscilograma da Figura 5.30, utilizando-se o recurso de Zoom do osciloscópio. Canal A: Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 2mV/div. Canal B: Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 10mV/div.

Figura 5.32 – Disjuntor do BC2. Canal A: Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 5mV/div. Canal B: Aterramento da estrutura escala 500ns/div e 5mV/div.

Figura 5.33 – Disjuntor do BC2. Canal A: Tubulação do densímetro de SF_6 escala 500ns/div e 5mV/div. Canal B: tubo de saída do gás SF_6 do pólo da fase VM escala 500ns/div e 10mV/div.

Os oscilogramas das Figuras 5.30 a 5.33 mostram formas de ondas indicativas da presença de algum tipo de descarga elétrica, considerando-se os aspectos de taxa de repetição e duração, porém observa-se frequência muito elevada (próxima a 100MHz).

Aparentemente, essas descargas são originadas no interior do disjuntor. A amplitude observada é muito baixa (amplitude pico a pico de 6,5mV, Figura 5.31), mas considerando tratar-se de disjuntor com tanque vivo, e consequentemente não dispor de invólucro aterrado, descargas internas podem resultar em baixos níveis de campo eletromagnético conduzido para as partes aterradas da estrutura, portanto a amplitude medida no aterramento representa apenas uma pequena parcela do sinal.

Além do Banco de Capacitores, também foram realizadas medições no disjuntor secundário do Transformador número 1, da mesma subestação. As Figuras 5.34 e 5.35 mostram o disjuntor do Secundário do TR1 na SE Nordeste.

Figura 5.34 - Vista da Subestação Nordeste - 88kV, Disjuntor do Secundário do TR1

Figura 5.35 – Identificação do disjuntor submetido ao ensaio

As medições foram realizadas com a instalação dos TCs de alta frequência nas partes aterradas do disjuntor, conforme Figura 5.36.

Figura 5.36 – Instalação do TC de alta frequência no condutor de aterramento da estrutura.

As Figuras 5.37 a 5.40 mostram oscilogramas obtidos através dos TCs de alta frequência instalados no aterramento da estrutura.

Figura 5.37 – Disjuntor do Secundário do TR1. Canal A (azul): Aterramento da estrutura fase azul escala 1 $\mu\text{s}/\text{div}$ e 50mV/div. Canal B (vermelho): Aterramento da estrutura fase vermelha escala 1 $\mu\text{s}/\text{div}$ e 50mV/div.

Figura 5.38 – Disjuntor do Secundário do TR1. Canal A (azul): Aterramento da estrutura fase azul escala 500ns/div e 5mV/div. Canal B (vermelho): Aterramento da estrutura fase vermelha escala 500ns/div e 5mV/div.

Figura 5.39 – Disjuntor do Secundário do TR1 88kV SE Nordeste. Canal A (azul): Tubulação do densímetro de SF_6 escala 1 μs /div e 2mV/div. Canal B (vermelho): tubo de saída do gás SF_6 do pólo da fase VM escala 1 μs /div e 2mV/div.

Figura 5.40 – Detalhe do oscilograma da Figura 5.39, utilizando-se o recurso de Zoom do osciloscópio. Disjuntor do Secundário do TR1 88kV SE Nordeste. Canal A (azul): Tubulação do densímetro de SF₆ escala 50ns/div e 2mV/div. Canal B (vermelho): tubo de saída do gás SF₆ do pólo da fase VM escala 50ns/div e 2mV/div.

As medições nesse disjuntor foram similares às do disjuntor do BC2. Os oscilogramas das Figuras 5.37 a 5.40 mostram formas de onda indicativas de presença de algum tipo de descarga elétrica, considerando-se os aspectos de taxa de repetição e duração, porém observa-se frequência muito elevada (próximo a 100 MHz). Aparentemente, essas descargas são originadas no interior do disjuntor. A amplitude observada é muito baixa (amplitude pico a pico de 7 mV, Figura 5.40), mas considerando tratar-se de disjuntor com tanque vivo, e consequentemente não dispor de invólucro aterrado, descargas internas podem resultar em baixos níveis de campo eletromagnético conduzido para as partes aterradas da estrutura, portanto a amplitude medida no aterramento representa apenas uma pequena parcela do sinal.

Outras medições do campo eletromagnético conduzido foram realizadas em disjuntores isolados a SF₆, do tipo Módulo Compacto, com tanque morto, da classe de tensão 460 kV, na subestação Bauru. As medições foram realizadas com os disjuntores mantidos em funcionamento normal, com seus contatos na posição fechada. A Figura 5.41 mostra o disjuntor ensaiado.

Figura 5.41 – Vista da SE Bauru, mostrando os três pólos do disjuntor nº46, à direita, com Reator 3 à esquerda.

São apresentadas as oscilografias referentes ao disjuntor 46, nas Figuras 5.42, 5.43, 5.44 e 5.45.

Figura 5.42 – Disjuntor nº46 do Reator 3 da SE Bauru. Corrente medida no condutor de aterramento dos três pólos. Canal 1 fase AZ escala 100mV/div, canal 2 fase BR escala 100mV/div, canal 3 fase VM escala 100mV/div, varredura 100ns/div. Oscilograma da fase VM com características compatíveis com a presença de descargas parciais

Figura 5.43 – Disjuntor nº46 do Reator 3 da SE Bauru. Corrente medida no condutor de aterramento dos três pólos. Canal 1 fase AZ escala 100mV/div, canal 2 fase BR escala 100mV/div, canal 3 fase VM escala 100mV/div, varredura 100ns/div. Oscilograma da fase VM com características compatíveis com a presença de descargas parciais

Figura 5.44 – Disjuntor nº46 do Reator 3 da SE Bauru. Corrente medida no condutor de aterramento dos três pólos. Canal 1 fase AZ escala 100mV/div, canal 2 fase BR escala 100mV/div, canal 3 fase VM escala 100mV/div, varredura 100ns/div. Oscilograma da fase VM com características compatíveis com a presença de descargas parciais

Figura 5.45 – Disjuntor nº46 do Reator 3 da SE Bauru. Corrente medida no condutor de aterramento dos três polos. Canal 1 fase AZ escala 100mV/div, canal 2 fase BR escala 100mV/div, canal 3 fase VM escala 100mV/div, varredura 100ns/div. Oscilograma da fase VM com características compatíveis com a presença de descargas parciais

As medições realizadas na fase VM do disjuntor nº46 do Reator 3, na SE Bauru, apresentaram características compatíveis com a presença de descargas parciais.

5.4 Medições usando Antena Direcional

Descargas parciais são pulsos rápidos de corrente, com duração na faixa de microssegundos ou menos, em que os componentes de altas frequências estão associados e, conseqüentemente, mudanças rápidas de campos magnéticos e elétricos também estão associados. Pulsos de corrente com frequências na ordem de MHz (pelo menos) são comuns. Assim, espera-se que os pulsos de DP também gerem ondas eletromagnéticas originadas a partir da localização da DP. Ao usar este conceito, as DPs podem também ser detectadas por meio de sensores de radiação eletromagnética, sintonizados na gama de frequências característica deste fenômeno. (TATIZAWA, 2014)

Foram realizados ensaios no disjuntor com isolamento a gás SF₆ no disjuntor primário do Transformador 7 da Subestação Baixada Santista de propriedade da CTEEP. O disjuntor é do modelo Magrini Galileo 245MHM15000 e em tensão de funcionamento de 230 kV. Esse disjuntor foi submetido à medição de descargas parciais através de TC de alta frequência e a antena ativa.

As Figuras 5.46 e 5.47 mostram o disjuntor em questão.

Figura 5.46 – Em primeiro plano, fase Azul do Disjuntor Magrini Galileo 245MHM15000 de 230kV, do primário do transformador TR7. Instalação do TC de alta frequência no aterramento do disjuntor da fase AZ para medição de descargas parciais.

Figura 5.47 – Medição de descargas parciais no Disjuntor Magrini Galileo 245MHM15000 de 230kV, do primário do transformador TR7, utilizando-se antena direcional, acoplada a osciloscópio.

A Figura 5.48 mostra oscilograma obtido nas medições, com assinatura compatível com a presença de descargas parciais, ambas apresentam o tempo de início e a forma de onda muito próximos e são simultâneas. Com a utilização de antena direcional, mostrada na Figura 5.47, identificou-se a coluna de acionamento dos contatos do disjuntor, como possível foco das descargas parciais.

Figura 5.48 – Medição de descargas parciais no Disjuntor Magrini Galileo 245MHM15000 de 230kV, do primário do transformador TR7. Canal 1 (amarelo): DP medida com TC de alta frequência instalado no aterramento do disjuntor, escala 200mV/div – 200ns/div. Canal 3 (roxo): DP medida com antena direcional apontada para a coluna de acionamento, escala 500mV/div – 200ns/div. Canal 2 (verde): Interferência (corona) medida com TC de alta frequência medida no aterramento da torre. escala 500mV/div – 200ns/div.

Posteriormente o disjuntor foi desmontado e retirado de operação para realização de ensaios e inspeções.

A Figura 5.49 mostra a coluna de acionamento com suspeita de descargas parciais

Figura 5.49 – Coluna de acionamento do disjuntor (seta).

Para fins de análise cromatográfica dos gases dissolvidos, foram retiradas amostras do óleo isolante da coluna de acionamento dos contatos do disjuntor, possível foco das descargas parciais, conforme mostra a Figura 5.50.

Figura 5.50 – Procedimento de coleta de amostra de óleo isolante da coluna de acionamento, realizado no campo, para posterior análise cromatográfica.

Foram realizadas análises cromatográficas, através do aparelho Kelmamm Transport X. A Figura 5.51 mostra o aparelho de análise cromatográfica de gases dissolvidos na amostra de óleo isolante, retirado da coluna de acionamento do disjuntor.

Figura 5.51 – Análise cromatográfica dos gases dissolvidos na amostra de óleo isolante da coluna de acionamento, utilizando-se o aparelho Kelmamm Transport X.

A coluna de acionamento foi desmontada, para a realização de análise visual, conforme mostram as Figuras 5.52 a 5.54. Verificou-se a presença de depósitos de resíduos de cor esbranquiçada, não identificadas, com aparência de trilhamento elétrico.

Figura 5.52 – Procedimento de retirada da haste de madeira da coluna de acionamento.

Figura 5.53 – Detalhe do interior da coluna de porcelana, apresentando depósito de resíduos de cor esbranquiçada, não identificados, em formato de trilhamento, no sentido longitudinal.

Figura 5.54 – Detalhe do interior da coluna de porcelana, apresentando depósito de resíduos de cor esbranquiçada, não identificados, em formato de trilhamento, no sentido longitudinal.

A Tabela 5.2 mostra os resultados da análise cromatográfica realizada no óleo isolante contido na coluna de acionamento do contato do disjuntor das fases Azul (suspeita) e Branca (não suspeita), utilizando-se o aparelho Kelmamm Transport X.

Tabela 5.2 – Resultados, em ppm, das análises cromatográficas efetuadas nas amostras de óleo isolante da coluna de acionamento do disjuntor – fases Azul (suspeita) e Branca (não suspeita)

Amostra	Fase Azul Suspeita	Fase Branca não Suspeita
hidrogênio (H ₂)	7	Menor que 5
*Água (H ₂ O)	*85	*73
*metano (CH ₄)	*121	*152
monóxido de carbono (CO)	172	135
*dióxido de carbono (CO ₂)	*15624	*9173
*etileno (C ₂ H ₄)	*308	*319
*etano (C ₂ H ₆)	*772	*944
acetileno (C ₂ H ₂)	Menor que 0,5	Menor que 0,5
*total de gases combustíveis	*1380	*1552

A interpretação dos resultados das análises cromatográficas foram realizadas por intermédio da norma IEC 599/99 (IEC, 1999).

Com base nas tabelas 5.3 e 5.4, os gases dissolvidos e valores obtidos considerados suspeitos estão indicados por (*).

Tabela 5.3 - Limites aceitáveis de gases dissolvidos em óleo (para transformadores), conforme a literatura

Fabricante	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	TCG
Electra (1978) [2]	28,6	289	42	86	75	...	520
Hydro-Quebec [3]	500	900	35	20	85	2	1.600
General Electric (3-year-old Trf)	200	200	50	20	100	20	595
General Electric (6-year-old Trf)	500	500	100	400	200	25	1.725
Doble [2]	100	250	100	60	100	5	<700
IEEE Geração [5]	240	580	160	115	190	11	1.296
IEEE Transmissão [5]	100	350	120	65	30	35	700

Nota: TCG = total de gás combustível; trf = transformador

Fonte: (Griffin, PA, 1988)

Tabela 5.4 - Limites aceitáveis de gases dissolvidos em óleo (para transformadores)
Gas, ppm (Vol./Vol.)

	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	TCG
Doble	100	250	100	60	100	5	610
IEEE Geração ⁽¹⁾	140	580	160	115	190	11	1.296
IEEE Transmissão ⁽¹⁾	100	350	120	65	30	35	700
Electra (CIGRE) ⁽²⁾	28,6	289	42,2	85,6	74,6	...	520
Manufacturer	200 (250)	500 (1000)	100 (200)	100 (200)	150 (330)	15 (35)	1.065 1985

⁽¹⁾ Em processo de ser revisado.

⁽²⁾ Valores corretos 1978.

() = Valores 6 a 7 anos

Fonte: (Savio, 1988).

As Tabelas 5.5 e 5.6 mostram os indicadores para análise do tipo de descargas, segundo critério da norma IEC 599/99. (IEC, 1999).

Tabela 5.5- Indicadores para análise do tipo de descargas, segundo critério da norma IEC 599/99 para as descargas com intensidade moderada

Amostra	Fase Azul Suspeita	Fase Branca Não Suspeita
C_2H_2/C_2H_4	0,002	0,002
CH_4/H_2	17,2	38
C_2H_4/C_2H_6	0,4	0,3

Tabela 5.6- Indicadores para análise do tipo de descargas, segundo critério da norma IEC 599/99 (IEC, 1999) para as descargas com baixa intensidade.

Amostra	Fase Azul suspeita	Fase Branca Não Suspeita
C_2H_2/C_2H_4	0	0
CH_4/H_2	2	2
C_2H_4/C_2H_6	0	0

Tabela 5.7– Limites aceitáveis de gases dissolvidos em óleo, conforme a literatura (IEC, 1999)

		Código de Gama de Proporções			
Proporção de Gases Característicos		$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	
<0,1		0	1	0	
0,1-1		1	0	0	
1-3		1	2	1	
>3		2	2	2	
Caso Nº	Característica da Falta				Exemplos Típicos
0	Sem falta	0	0	2	Envelhecimento normal
1	Descarga parcial de baixa densidade de energia	0	1	1	Descargas em cavidades gasosas resultantes de impregnação incompleta, ou super saturação, cavitação ou alta humidade.
2	Descarga parcial de alta densidade de energia	1	1	0	Como acima, mas levando à perfuração do isolamento sólido.
3	Descarga de baixa energia (veja a nota 1)	1 → 2	0	1 → 2	Faíscas contínuas em óleo entre má conexão de potencial diferente ou potencial flutuante. Repartição de óleo entre materiais sólidos
4	Descarga de alta energia	1	0	2	Descargas com poder de quebra de moléculas de óleo formando arco-voltaicos entre enrolamentos ou eletrodos à terra.
5	Falta térmica de baixa temperatura < 150°C (veja a nota 2)	0	0	1	Superaquecimento geral do condutor isolado
6	Falta térmica de média temperatura 150°C - 300°C (veja a nota 3)	0	2	0	Aquecimento local no núcleo devido a concentrações de fluxo. O aumento da temperatura do ponto quente; variando do núcleo, ao aquecimento de cobre devido a correntes de Foucault, maus contatos / articulações até núcleo e tanque circulando correntes
7	Falta térmica de média temperatura 150°C - 300°C (veja a nota 3)	0	2	1	Faíscas contínuas em óleo entre má conexão de potencial diferente ou potencial flutuante. Repartição de óleo entre materiais sólidos
8	Falta térmica de alta temperatura > 700° (veja a nota 4)	0	2	2	Descargas com poder de quebra de moléculas de óleo formando arco-voltaicos entre enrolamentos ou eletrodos à terra.

Fonte: IEC, 1999.

De acordo com os indicadores da IEC599 a dissolução de gases pode ter ocorrido por falha térmica de baixa temperatura, na faixa de 150°C-300°C (ou média temperatura, na faixa de 300°C-700°C) ou sobreaquecimento local, pontos quentes localizados, mal contatos ou formação de carbonização pirolítica.

A presença de água na amostra pode indicar infiltração ou falta de estanqueidade do invólucro de porcelana da coluna de acionamento do disjuntor.

A coluna de acionamento, que no sentido longitudinal está sujeita à tensão fase-terra de $\frac{230\text{kV}}{\sqrt{3}}$, é constituída, basicamente, por corpo em porcelana contendo em seu interior a haste de acionamento, em madeira, imersa em óleo isolante. Como essa coluna não apresenta partes condutoras, estando tão somente submetida à tensão fase-terra, a presença de pontos quentes e de carbonização, sugerida pelos ensaios cromatográficos, pode estar associada à presença de trilhamento elétrico no interior da coluna de acionamento, sugerida pelas Figuras 5.53 e 5.54. A hipótese da presença de trilhamento elétrico é reforçada pelos resultados das medições de descargas parciais em campo, pelas assinaturas de descargas obtidas apresentarem características associadas a esse fenômeno, principalmente pela duração relativamente longa das descargas obtidas, observa-se também que as descargas apresentam simultaneidade nas três fases, conforme Figura 5.55.

Figura 5.55 – Disjuntor 245MHM15000 - ch1 fase AZ escala 200mV/div, ch2 fase BR escala 100mV/div, ch3 fase VM escala 100mV/div, escala de tempo 200ns/div.

Foi possível verificar que esse equipamento apresentava regiões com intensa corrosão das partes metálicas. A análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante contido na coluna do acionamento do contato, realizada nas fases Azul e Branca, apresentou resultados

considerados suspeitos, para a ampla maioria dos gases analisados (em 7 dos 9 gases analisados). A interpretação dos resultados da análise cromatográfica, utilizando-se os critérios da norma IEC599/99 (IEC, 1999), indicou a ocorrência de sobreaquecimento e carbonização do óleo isolante. Foi constatada a presença de umidade elevada, próxima à saturação, nas amostras de óleo dessas duas fases, podendo indicar infiltração ou perda de estanqueidade dessas colunas. A inspeção visual realizada no interior da coluna de acionamento suspeita (fase Azul) constatou a presença de indícios de trilhamento elétrico.

5.5 Ensaios em campo em reator

A técnica foi aplicada na medição de descargas parciais em reator de 460kV, 66,7MVA, com histórico de presença de gases combustíveis em níveis anormais, nas análises cromatográficas dos gases dissolvidos no óleo isolante. A Figura 5.56 mostra o reator suspeito.

Figura 5.56 – Reator suspeito da presença de descargas parciais, tensão 460kV, potência 66.7MVA.

A Tabela 5.8 mostra resultados da análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante do reator de 460kV, 66.7MVA.

Tabela 5.8 – Análise cromatográficas dos gases dissolvidos no óleo isolante do reator de 460kV, 66.7MVA

Gás	23/08/12	17/11/12	22/11/12	01/12/12	07/01/13	30/01/13	14/02/13	21/03/13
H ₂	19	28	24	25	40	50	44	56
O ₂	12558	16715	24583	23846	14876	15415	9573	2555
N ₂	57951	44723	78992	75146	65590	68090	36753	30068
CH ₄	ND	5	6	5	8	9	8	9
CO	90	142	183	152	209	217	259	485
CO ₂	549	540	695	527	1329	ND	1355	1557
C ₂ H ₄	4	5	6	4	9	11	12	15
C ₂ H ₆	ND	1	1	1	ND	ND	ND	ND
C ₂ H ₂	2	9	10	9	17	19	19	33
TGC	115	190	230	196	283	306	323	598

A Tabela 5.8 mostra uma tendência de aumento dos gases combustíveis totais, no decorrer do tempo, indicando a possível presença de descargas internas.

As Figuras 5.57 e 5.58 mostram oscilogramas das medições efetuadas com o TC de alta frequência.

Figura 5.57 - Medições realizadas com TC de alta frequência instalado no condutor de aterramento do reator. Escalas 2 µs/div e 200mV/div.

Figura 5.58 - Medições realizadas com TC de alta frequência instalado no condutor de aterramento do reator.
Escala 2 ms/div e 200mV/div.

A medição de descargas parciais utilizando antenas em transformadores e em reatores pode ser mais difícil do que no disjuntor SF₆ mostrado na seção anterior, enquanto o tanque metálico pode ter um efeito de blindagem para as ondas eletromagnéticas. No entanto, esse efeito de blindagem apresenta imperfeições, e algumas ondas eletromagnéticas se propagam para o exterior.

Considerando-se que as dimensões do tanque são pequenas quando comparadas com o comprimento de onda do sinal de descarga parcial (geralmente em ordem de MHz), as descargas no interior do tanque agem como uma fonte eletromagnética próxima (HEMMING, 1992), perto das paredes do tanque.

Na situação de campo apresentada, o componente magnético é mais forte do que o componente elétrico da onda eletromagnética, dessa maneira as antenas direcionais são mais adequadas para este tipo de medição. Nas medições, foi utilizada uma antena comercial direcional ativa (isto é, com amplificador interno) operando na faixa de 9kHz -20MHz.

Para fins de comparação, uma estimativa de blindagem eficaz de uma folha metálica (ferro) para o campo elétrico e o campo magnético, é apresentada na Figura 5.59. Para uma folha de cobre 2,54 milímetros de espessura, em uma frequência de 1 kHz, a eficácia de blindagem (eixo vertical) para o componente elétrico de onda é maior que 260 dB, e a eficácia de blindagem para o componente magnético é de 140 dB. Isto significa que o tanque metálico é um melhor escudo para o campo elétrico do que para o campo magnético.

Figura 5.59- Eficácia da blindagem de uma folha metálica (ferro) para campo elétrico e magnético para campo eletromagnético próximo à fonte.

Fonte: Hemming, 1992

No campo, às vezes, o sinal DP é forte, e pode ser um desafio encontrar o equipamento real a produzi-lo, uma vez que todos compartilham o mesmo equipamento de malha de aterramento, e o sinal DP se propaga através dele. A antena pode ser útil nesta situação.

A Figura 5.60 apresenta a medição realizada com antena direcional e osciloscópio.

Figura 5.60 – Medição realizada com antena direcional.

As Figuras 5.61 e 5.62 mostram resultados das medições com antena.

Figura 5.61 – Medições com antena, na faixa de 9kHz-20MHz
Escala: 100ns/div and 100mV/div.

Figura 5.62 – Medições com antena, na faixa de 9kHz-20MHz .
Escala: 50ns/div and 100mV/div.

O reator foi desligado para verificação interna e localização do foco das descargas. Nessa inspeção, indícios de descargas foram observados na janela de inspeção da bucha de alta tensão H1, conforme mostram as Figuras 5.63 e 5.64.

Figura 5.63 - Indício de descargas observadas na janela de inspeção da bucha de alta tensão H1

Figura 5.64 - Indício de descargas observadas na janela de inspeção da bucha de alta tensão H1

As medições com antena direcional foram concordantes com as medições com o TC, com nível baixo de ruído.

6 EXEMPLOS DE INTERFERÊNCIAS OBTIDAS EM CAMPO

Nas Figuras 6.1 a 6.10, são apresentados exemplos de medições realizadas em campo, obtendo-se oscilogramas não compatíveis com assinaturas de descargas parciais, que em sua maior parte, são constituídos por sinais não síncronos com a tensão senoidal do sistema. Algumas das possíveis origens dessas interferências são emissões originadas por estações de radio difusão (radio ou TV, por exemplo), por reatores eletrônicos dos sistemas de iluminação baseados em lâmpadas de descarga (fluorescentes, vapores metálicos, por exemplo), por sinais de sincronismo do clock de equipamentos ou dispositivos digitais (relés de proteção digitais, microprocessadores ou microcontroladores, por exemplo).

Figura 6.1 – Interferência causada por distorções harmônicas. (Local: subestação blindada - SE Centro)

Figura 6.2 – Interferência causada por distorções harmônicas. (Local: subestação blindada - SE Centro)

Figura 6.3 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro)

Figura 6.4 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro)

Figura 6.5 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro)

Figura 6.6 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro)

Figura 6.7 – Interferências causadas por reatores eletrônicos do sistema de iluminação e por distorções harmônicas. (Local: subestação blindada - SE Centro)

Figura 6.8 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação. (Local: subestação blindada - SE Centro)

Figura 6.9 – Interferência causada por reatores eletrônicos do sistema de iluminação

Figura 6.10 – Interferência com origem não identificada. Não suspeito. (Local: subestação blindada - SE Anhanguera)

Outro fenômeno é a ocorrência de indução do sinal gerado pelas descargas elétricas, em equipamentos conectados entre si através da malha de aterramento, neste caso um para-raio defeituoso, apresentando descargas, foi posicionado próximo a um outro isento de descargas. O equipamento defeituoso foi conectado ao transformador de alta tensão, e sua base conectada à malha terra do laboratório. O para-raio isento de descargas não foi ligado ao transformador de alta tensão, porém com sua base conectada à malha de terra do laboratório. A Figura 6.11 mostra os dois para-raios posicionados próximos entre si, ambos com as respectivas bases conectadas à malha de terra do laboratório.

Figura 6.11 – Verificação da indução do sinal gerado pelas descargas elétrica, em para-raios conectados entre si pela malha de terra.

As Figuras 6.12 a 6.14 mostram oscilogramas da corrente medida nos condutores de aterramento dos para-raios mostrados na Figura 6.11, utilizando-se dois TCs de altas frequências. Para conexão dos dois TCs de altas frequências ao osciloscópio Fluke Scopemeter 199C, foram utilizados cabos coaxiais de mesmo comprimento.

Figura 6.12 – Oscilogramas da corrente medida no condutor de aterramento dos para-raios, conectados entre si através da malha de terra. Canal A (vermelho) corrente no para-raios defeituoso e apresentando descargas internas. Canal B (azul) corrente no para-raios isento de descargas internas. Escalas: Canal A 50mV/div e 100ns/div, Canal B 20mV/div e 100ns/div. Amplitude pico a pico do canal A 126,31mV. Amplitude pico a pico do canal B 68,49mV. Atraso entre os dois sinais (aproximado) 10ns.

Figura 6.13 – Oscilogramas da corrente medida no condutor de aterramento dos para-raios, conectados entre si através da malha de terra. Canal A (vermelho) corrente no para-raios defeituoso e apresentando descargas internas. Canal B (azul) corrente no para-raios isento de descargas internas. Escalas: canal A 20mV/div e 100ns/div, canal B 10mV/div e 100ns/div. Amplitude pico a pico do canal A 121,8mV. Amplitude pico a pico do canal B 50,2,8mV. Atraso entre os dois sinais (aproximado) 10ns.

Figura 6.14 – Oscilogramas da corrente medida no condutor de aterramento dos para-raios, conectados entre si através da malha de terra. Canal A (vermelho) corrente no para-raios defeituoso e apresentado descargas internas. Canal B (azul) corrente no para-raios isento de descargas internas. Escalas: canal A 20mV/div e 100ns/div, canal B 10mV/div e 100ns/div. Amplitude pico a pico do canal A 124,8mV. Amplitude pico a pico do canal B 50,4m. Atraso entre os dois sinais (aproximado) 10ns.

Observa-se que, de fato, ocorre indução do sinal originado pelas descargas, em equipamentos conectados entre si através do aterramento. O sinal medido no para-raios que dá origem às descargas tem amplitude maior. O sinal medido no para-raios que dá origem às descargas apresenta-se ligeiramente adiantado, possivelmente devido ao tempo de propagação do sinal através dos condutores de aterramento, até atingir o para-raios não defeituoso. A análise das amplitudes relativas dos oscilogramas obtidos com os TCs de altas frequências, e do atraso relativo entre as descargas, juntamente com a análise da distribuição das descargas ao longo do ângulo de fase da senoide da tensão aplicada ao para-raios, pode viabilizar um procedimento para identificação do para-raios defeituoso, em campo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através de medição com Transformadores de corrente de alta frequência, tipo alicate, no cabo de aterramento de equipamentos energizados, acoplado a um osciloscópio é possível realizar a medição de descargas parciais de maneira efetiva.

Tanto na fundamentação teórica, quanto com os resultados obtidos na prática, em laboratório e em campo, notou-se que a forma de onda comum da descarga parcial medida pelo TC de alta frequência é uma senoide subamortecida, comportamento este que era esperado devido à construção do TC.

Em laboratório as interferências são menos significativas, tendo em vista que somente um aparelho é ensaiado por vez, dessa maneira não há influência da malha de aterramento na medição, resultando que o diagnóstico se aplica ao equipamento sob teste.

O comportamento obtido em campo é similar àquele obtido nos ensaios laboratoriais, sendo as assinaturas das descargas encontradas em campo próximas às obtidas em laboratório.

As dificuldades encontradas com relação à malha terra em campo são iguais àquelas levantadas em laboratório, porém com uma medição nos equipamento adjacentes é possível detectar qual é o equipamento sob falha, pois o mesmo possui uma intensidade maior e está adiantado com relação aos demais equipamentos.

É possível localizar o local do defeito através da utilização das antenas direcionais ativas, pois toda descarga tem um campo eletromagnético e, mesmo nos equipamentos que possuem tanque, a blindagem eletromagnética não é impermeável, resultando em sinais que podem ser medidos através deste equipamento.

Os padrões de descargas foram localizados em equipamentos com isolamento a óleo, a gás SF₆ e em para-raios.

Sugere-se um estudo mais aprimorado das influências eletromagnéticas nessas medições, e como as mesmas interferem nas medições com antena ativa e com Transformador de Corrente de Alta Frequência.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM, 1988. **Electrical Insulating Oils**, STP998. H.G. Erdman org., Ed. ASTM, Philadelphia

BACEGA, Wilson R ; TATIZAWA, H. ; BACEGA, F. . Detection of partial discharges at field in SF₆ insulated equipments. In: **IEEE PES 2012 Transmission & Distribution Conference and Exposition**, 2012, Orlando - EUA. Proceedings of the IEEE PES 2012 Transmission & Distribution Conference and Exposition, 2012. v. 1. p. 1-5

BACEGA, Wilson R ; TATIZAWA, H. ; BACEGA, F. Detecção de descargas parciais em equipamentos isolados em SF₆, em campo. In: XV ERIAC – **Encontro Regional Iberoamericano do CIGRÉ**, Maio de 2013, Foz do Iguaçu.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 270 - Parcela Variável por indisponibilidade, **Diário Oficial da União**, Brasília, 09 de julho de 2007.

CISPR, **Specifications for radio disturbance and immunity measuring systems apparatus and methods**, 2006-8.

CONTI, M., **Development of artificial intelligence system for electrical insulation defect. Identification trough partial discharge measurements**. 2003. 218f.. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade de Bologna, Bologna, 2003.

FUHR, J. et al. **Detection and Location of Internal Defects in the Insulation of Power Transformers**. IEEE TEI, v. 28, n. 6, p. 1057-1067, Dec. 1993.

GRIFFIN, PA, 1988. **Criteria for the interpretation of data for dissolved gases in oil from transformers (a review)**. **Electrical Insulating Oils**, STP998. H.G. Erdman, Ed. ASTM, Philadelphia, pp 89-106

IEC, 1999. International Electrotechnical Commission **IEC 60599**. Mineral oil -impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. New York.

IEC, 2000. Standard, High voltage techniques – partial discharge measurements **IEC 60270**, 3rd edition, 2000.

IEEE, **IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery**, 2010.

JUDD M.D., Yang L., Hunter A.B.B., Partial discharge monitoring sensors for power transformers using UHF sensors. Part I: Sensors and signal interpretation, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, march/april 2005.

KUFFEL E., Zaengl W.S., Kuffel J., **High voltage engineering: Fundamentals**, 2nd edition, Newness, Great Britain, 2000.

KUNDUR P., Kishore N.K., Sinha A. K., Identification of two simultaneous partial discharge sources in an oil-pressboard insulation system using acoustic emission techniques, **Applied Acoustics**, ed. 73, pág. 395-401, India, 2012.

L.L. Hemming, “Architectural electromagnetic shielding handbook – A design and specification guide”, **IEEE Press**, New York, 1992. ISBN 0-87942-287-4

OLIVEIRA, João Jose dos Santos; RÚVOLO FILHO, Adhemar; TATIZAWA, Hédio. Introdução ao comportamento dos isolantes empregados em cabos para redes aéreas isoladas. São Paulo, Centro de excelência em distribuição em energia elétrica/IEE-USP, 1994

ORSINI, Luiz de Queiroz, **Curso de Circuitos Elétricos, Volume 1**, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, Brasil, 1991.

PAPOULIS A., **The Fourier integral and its applications**, McGraw-Hill, 1962.

PAUL, Clayton R., **Introduction to Electromagnetic Compatibility**, USA, 1992.

PAUL, C. R., **Electromagnetics for Engineers**, USA, 2004.

SUEHIRO J., Zhou G., Hara M., Detection of partial discharge in SF₆ gas using a carbon nanotube-based gas sensor, **Sensor and Actuators**, ed. 105, pág. 164-169, Japão, 2005.

SAVIO, I., 1988. **Transformer fault gas analysis and interpretation – a user’s perspective. Electrical Insulating Oils**, STP998. H.G. Erdman, Ed. ASTM, Philadelphia, pp 83-88.

STONE G. C., Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment, **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, Vol. 12, No. 5, Canada, 2005.

TATIZAWA, H. ; BACEGA, Wilson R ; BACEGA, F. . Detection and Location of Partial Discharges in a 460kV – 66.7MVA Reactor at Field Using Antenna. In: **IEEE PES 2012 Transmission & Distribution Conference and Exposition**, 2014, Chicago - EUA.