

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONARDO ALVES HEREDIA

CARACTERIZAÇÃO, MANUTENÇÃO E  
MONITORAMENTO *on-line* DE BUCHAS  
CONDENSIVAS PARA  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

VIRTUS IMPAVIDA

RECIFE, SETEMBRO DE 2008.

**LEONARDO ALVES HEREDIA**

**CARACTERIZAÇÃO, MANUTENÇÃO E  
MONITORAMENTO *on-line* DE BUCHAS  
CONDENSIVAS PARA  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**Dissertação** submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco como  
parte dos requisitos para obtenção do grau  
de **Mestre em Engenharia Elétrica**

**ORIENTADOR: PROF. HÉLIO MAGALHÃES DE OLIVEIRA, DOCTEUR**

Recife, Setembro de 2008.

**H542c**

**Heredia, Leonardo Alves.**

Caracterização, manutenção e monitoramento on-line de buchas condensivas para transformadores de potência / Leonardo Alves Heredia. - Recife: O Autor, 2008.

143 folhas, il : graf., figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2008.

Inclui bibliografia e Apêndice

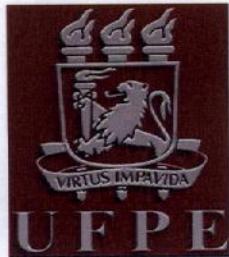
1. Energia Elétrica. 2. Buchas condensivas. 3. Transformadores de potência. 4. Dielétricos. I. Título.

**UFPE**

**621.3**

**CDD (22. ed.)**

**BCTG/2007-191**



# Universidade Federal de Pernambuco

## Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONALIZANTE DE

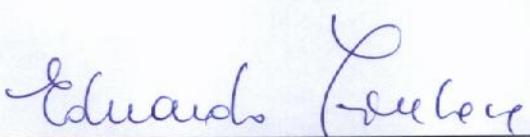
# LEONARDO ALVES HEREDIA

## TÍTULO

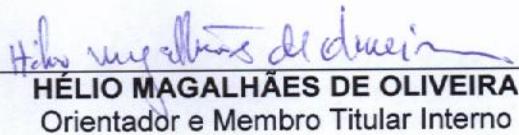
**"CARACTERIZAÇÃO, MANUTENÇÃO E MONITORAMENTO  
ON-LINE DE BUCHAS CONDENSIVAS PARA  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA"**

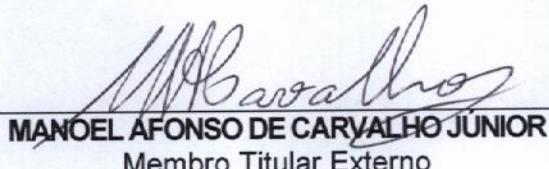
A comissão examinadora composta pelos professores: HÉLIO MAGALHÃES DE OLIVEIRA, DES/UFPE, MARCELO CABRAL CAVALCANTI, DEESP/UFPE e MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR DEESP/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **LEONARDO ALVES HEREDIA APROVADO**.

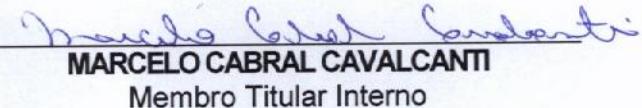
Recife, 22 de setembro de 2008.



**EDUARDO FONTANA**  
Coordenador do PPGEE

  
**HÉLIO MAGALHÃES DE OLIVEIRA**  
Orientador e Membro Titular Interno

  
**MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR**  
Membro Titular Externo

  
**MARCELO CABRAL CAVALCANTI**  
Membro Titular Interno

A DEUS por me dar forças para  
conseguir superar os obstáculos  
e a minha família, pela paciência  
nos momentos de ausência.

# A GRADECIMENTOS

A DEUS por me dar forças nos momentos em que pensei não ser possível conseguir e por sempre me dar oportunidades em que se fez necessário meu esforço para concretizá-las, em todas as fases da minha vida.

A Jesus Cristo e minha religião, por serem minha direção nos momentos de dúvida, embora em muitos deles minha imperfeição tenha feito a escolha errada.

A Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF, por me dar a oportunidade de prosseguir adquirindo e aperfeiçoando meus conhecimentos, em especial ao engenheiro Airton Freitas Feitosa.

A minha esposa, Bárbara, e minha filha, Júlia, por serem de grande paciência, durante todo este tempo de aperfeiçoamento individual.

Aos amigos de empresa que colaboraram, suprindo a minha ausência em atividades que foram atribuídas a mim, ou que forneceram informações essenciais para o desenvolvimento deste estudo, bem como os que apenas torceram para o sucesso deste projeto.

Ao engenheiro Ademar Vieira de Carvalho Júnior pelo aprendizado neste tempo de estudo e por todas as demonstrações de verdadeira amizade, inúmeras vezes confirmadas em todas as situações em que a presença de um amigo se fez necessária.

Aos professores que mostraram ser fonte de inspiração aos alunos deste mestrado, servindo de exemplo como ser humano e profissional, em especial aos “mestres” Cícero Mariano Pires dos Santos e José Maurício de Barros Bezerra.

Finalizando, ao meu orientador Hélio Magalhães de Oliveira por ser um exemplo de ser humano e um verdadeiro facilitador para o meu desenvolvimento pessoal, bem como ao meu co-orientador Miguel Carlos Medina Pena pela amizade demonstrada, necessária para a conclusão desta dissertação.

LEONARDO ALVES HEREDIA

*Universidade Federal de Pernambuco*

*22 de Setembro de 2008*

*É melhor aprender coisas úteis do  
que coisas admiráveis.*

**Santo Agostinho, (354-430)**

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**CARACTERIZAÇÃO, MANUTENÇÃO E  
MONITORAMENTO *on-line* DE BUCHAS CONDENSIVAS  
PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**Leonardo Alves Heredia**

Setembro/2008

**Orientador:** Prof. Hélio Magalhães de Oliveira, Docteur

**Área de Concentração:** Processamento de Energia

**Palavras-chaves:** Buchas condensivas, Transformadores de potência, Dielétricos, Manutenção, Monitoramento.

**Número de páginas:** 143

De acordo com pesquisas realizadas em todo o mundo, as buchas condensivas contribuem de forma expressiva na distribuição percentual dos modos de falha relacionados com transformadores de potência e é seguro afirmar que ocorrências de falhas envolvendo as mesmas têm causado danos aos transformadores em que estas estão instaladas, muitas vezes seguidos de explosões, resultando na perda total ou parcial deste equipamento, que tem o maior custo atribuído de uma instalação do sistema de transmissão elétrica. No cenário atual do mercado de energia, que exige dos agentes, por meio de novas regulamentações, um fornecimento próximo à continuidade ininterrupta, a indisponibilidade dos equipamentos elétricos tem causado consideráveis prejuízos financeiros às empresas concessionárias, resultando em esforços concentrados juntamente com os fabricantes em encontrar meios de solucionar problemas desta natureza, visando o aumento da confiabilidade e qualidade de seus serviços prestados. Diante do exposto, esta dissertação mostra estudos sobre os tipos de buchas para transformadores e seus modos de falhas dominantes, dando um maior enfoque nos processos de envelhecimento dos dielétricos envolvidos na fabricação das mesmas. As técnicas de manutenção preventivas e preditivas adotadas atualmente pelas empresas e os tipos de monitoramento on-line do estado da isolação em buchas, que permitem uma ação das equipes de manutenção em uma fase incipiente da formação de um defeito, antecipando a uma ocorrência de uma falha, complementam o escopo deste estudo.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

**CHARACTERIZATION, MAINTENANCE AND  
MONITORING ON-LINE CONDENSER BUSHINGS ON  
POWER TRANSFORMERS**

**Leonardo Alves Heredia**

September/2008

**Supervisor:** Prof. Hélio Magalhães de Oliveira, Docteur

**Area of Concentration:** Energy processing

**Keywords:** Condensives bushings, Power transformers, Dielectrics, Maintenance, Monitoring

**Number of pages:** 143

According to researches done all over the world about power transformers, the condensives bushings contribute in an expressive way for the percentile distribution of the failure ways related to the power transformers and it is certain to state that occurrences of failures involving bushings have caused damage to the transformers in which these bushings are installed many times followed by explosions resulting in the total or partial loss of the equipment which has major attributed cost of one electric transmission system installation. In the current scenery of the energy market that demands from the agents, through new regulations, a supplying next to the incessant continuity, the unavailability of the electric equipments have caused serious financial damage to the concessionary companies, resulting in concentrated efforts, with the manufactures, to find ways to solve this kind of problems, aiming the growth of the reliability and quality of their services. Based on it, this dissertation shows researches about the transformers types of bushings and their dominant failure ways, giving a bigger focus on the process of aging of the dielectrics involved in the manufacture of the condensives bushings. The preventive maintenance techniques used nowadays by the companies and the types of on-line monitoring of the condensives bushings isolation state, which allow an action from the maintenance staffs in an incipient phase of the defect formation, anticipating an occurrence of a failure, complement the purpose of this research.

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Proporção significativa das buchas na origem das falhas em um transformador elevador sem CDC. . . . .	18
2.1	Distribuição equipotencial do campo eletrostático de uma bucha. . . . .	25
2.2	Ilustração de uma bucha não-capacitiva ou não-condensiva. . . . .	26
2.3	Distribuição das superfícies equipotenciais do campo eletrostático em uma bucha condensiva. . . . .	28
2.4	Campo eletrostático e distribuição de diferença de potencial de uma bucha condensiva e uma bucha não-condensiva. . . . .	31
2.5	Bucha Não-Condensiva: Esboço indicando constituintes. . . . .	33
2.6	Bucha com isolação à papel impregnado com óleo: Esboço indicando constituintes. . . . .	34
2.7	Representação do circuito elétrico de uma bucha condensiva. . . . .	35
2.8	Bucha com isolação à papel impregnado (ou aglutinado) com resina : Esboço indicando constituintes. . . . .	37
3.1	Distribuição dos modos de falha em buchas condensivas obtidos da pesquisa realizada pelo Cigré Brasil. . . . .	42
3.2	Modos de falhas em buchas OIP baseados em pesquisa realizada pelo CIGRÉ Internacional. . . . .	47
4.1	Átomo com um momento de dipolo induzido: (a) Ausência do campo elétrico; (b) Sob a presença do campo elétrico $E$ ; . . . . .	50
4.2	Polarização de um dielétrico: (a) Ausência do campo elétrico; (b) Sob a presença do campo elétrico; . . . . .	51
4.3	Curva de corrente de fuga quando da presença de campo elétrico. O ponto $Er$ denota a máxima intensidade do campo, na qual a relação linear se mantém. . . . .	54
4.4	Diagrama vetorial (a) e circuito equivalente (b) de um dielétrico real. .	55
4.5	Relação entre teor de umidade e rigidez dielétrica de um determinado óleo isolante. . . . .	57
4.6	Influência da umidade relativa ( $\varphi$ ) sobre o equilíbrio de umidade ( $\mu_p$ ). .	58
4.7	Composição Química Hidrocarboneto Naftênico. . . . .	59

4.8	Fórmula estrutural da glicose e da celulose. Detalhe da ligação glicosídica na molécula de celulose. . . . .	63
4.9	Relação entre GP e 2-fal estabelecida por P.J.Burton. . . . .	65
4.10	Tríade de agentes de degradação do material isolante. . . . .	68
4.11	Degradação da isolação sólida por Hidrólise, formando moléculas de glicose livre e consequentemente diminuindo o GP do papel isolante. . . .	69
4.12	Degradação da isolação sólida por Oxidação, formando $H_2O$ , aldeídos e ácidos, resultando na redução do GP do papel isolante. . . . .	69
4.13	Degradação da isolação sólida por Pirólise, reduzindo o GP do papel isolante. . . . .	70
4.14	Configuração Básica do Teste de Comportamento Térmico em Buchas realizado por Easley and Craghead. . . . .	71
4.15	Disposição de Sensores na Configuração Básica do Teste de Comportamento Térmico em Buchas realizado por Easley and Craghead. . . . .	72
4.16	Curvas dos Ensaios de Comportamento Térmico de Buchas. . . . .	72
5.1	Ilustração elaborada pelo autor da dissertação mostrando a deterioração da camada dielétrica de uma bucha condensiva e consequente aumento no valor de sua capacidade. . . . .	80
5.2	Ilustração elaborada pelo autor da dissertação mostrando circuito equivalente de uma bucha condensiva com perdas dielétricas. . . . .	81
5.3	Relações trigonométricas da corrente de fuga do isolamento de um capacitor real, sendo que $I_C$ e $I_R$ denotam respectivamente as correntes capacitativa e resistiva. . . . .	81
5.4	Fator de dissipação (tangente delta) obtido nas quatro buchas sob temperatura ambiente na base inferior das mesmas. . . . .	83
5.5	Fator de dissipação (tangente delta) obtido nas quatro buchas com temperatura próxima a 70°C na base inferior das mesmas. Observa-se uma clara dependência das buchas usadas com a temperatura. . . . .	83
5.6	Ilustração desenvolvida pelo autor relacionando a formação dos gases oriundos do óleo mineral isolante e do papel isolante com o processo da pirólise. . . . .	85
5.7	Representação Elétrica de uma Descarga Parcial. . . . .	88
5.8	Presença de bolhas de gases combustíveis entre as camadas de papel isolante em inspeção realizada em buchas condensivas tipo OIP retiradas de operação devido ao aumento de gases combustíveis e do fator de dissipação do isolamento. . . . .	91
6.1	Gráficos com curvas, registradas por um sistema de monitoramento, de alteração na capacidade isolante de uma bucha condensiva tipo OIP que explodiu na Usina Hidroelétrica de Xingó (CHESF). . . . .	94

6.2	Ilustração elaborada pelo autor mostrando um diagrama resumido envolvendo todas as etapas de um monitoramento <i>on-line</i> típico de buchas condensativas. . . . .	95
6.3	Sistema de monitoramento trifásico de buchas condensivas utilizando técnica de somatório de correntes de fuga. . . . .	97
6.4	Considerações iniciais de análise do vetor <b>Is</b> correspondente a somatória das correntes de fuga das buchas de um sistema trifásico. . . . .	98
6.5	Processo de identificação da bucha em processo de deterioração devido a variação do vetor <b>Is</b> correspondente a somatória das correntes de fuga das buchas de um sistema trifásico. . . . .	99
6.6	Decomposição do vetor $\Delta Is$ e obtenção dos vetores $\Delta Isq$ e $\Delta Isr$ , correspondentes ao aumento de capacidade da bucha e fator de potência do isolamento, respectivamente. . . . .	99
6.7	Esquema elétrico simplificado do sistema de monitoramento baseado na somatória de tensões e comparação com tensão de referência. . . . .	101
6.8	Gráficos resultantes do ensaio realizado em um conjunto trifásico de buchas, utilizando o sistema de monitoramento baseado na somatória das tensões, simulando um curto-círcuito na capacidade $C_2$ da fase "a"( $C_{2a}$ ). . . . .	101
6.9	Gráfico indicando valores de amplitude da tensão e da fase de Usum e tensão de Uref, em ensaio realizado simulando curto-círcuito nas capacidades $C_{2a}$ , $C_{2b}$ e $C_{2c}$ durante todo o intervalo de tempo referente aos grupos 2, 4 e 6 respectivamente. . . . .	102
6.10	Círculo simplificado de uma bucha condensativa e sua distribuição de tensões baseado no divisor capacitivo formado por suas capacidades. . .	103
6.11	Círculo simplificado de um sistema de monitoramento de buchas baseado na análise da defasagem de ângulo entre sinais distintos. . . . .	106
6.12	Tratamento dos sinais de tensão no monitoramento de buchas que mede a defasagem entre ângulos de sinais de origens distintas, obtidos via porta lógica tipo ou-exclusivo(XOR). . . . .	107
6.13	Defasagem entre sinal de tensão $U_2$ e tensão de referência derivada da tensão $U_1$ , em um ensaio realizado em bucha de 132 kV. . . . .	108
6.14	Relação entre temperatura, umidade e valores de fator de potência do isolamento em um sistema trifásico de buchas de um dado transformador, registrados durante sete dias. . . . .	111
6.15	Diagrama unifilar simplificado elaborado pelo autor da dissertação do complexo hidroelétrico de Xingó da propriedade da CHESF. . . . .	112
6.16	Projeto resumo do sistema de monitoramento de Xingó com topologia dos equipamentos instalados, identificação e localização dos mesmos. . .	112
6.17	Diagrama simplificado e fotos ilustrativas do conector utilizado. . . . .	113
6.18	Ilustração elaborada pelo autor da dissertação que mostra a topologia do circuito de aquisição e digitalização de dados do painel AP. . . . .	114

6.19 Dados de tensão e sobretensão aquistados durante fase de aprendizagem do transformador T6 fase A da usina de Xingó. . . . .	116
6.20 Diferença do sinal aquistado de tensão nas três fases do transformador T6. . . . .	117
6.21 Valores de tensão nas três fases do transformador T6 da usina de Xingó e do desvio da capacitância da fase A, durante fase de aprendizagem. . .	117
6.22 Ilustração feita pelo autor da dissertação mostrando uma curva Gaussiana representativa dos valores calculados de desvio da capacidade do transformador T6 fase A da usina de Xingó, durante fase de aprendizagem.	118

# LISTA DE TABELAS

1.1	Proporção de falhas em buchas relacionadas com diversos tipos de transformadores. . . . .	18
1.2	Custos relativos dos componentes de um transformador com CDC. . . . .	19
2.1	Capacitâncias e tensões encontradas entre camadas condutoras em ensaio realizado em uma bucha condensiva. . . . .	32
2.2	Comparação entre buchas OIP e RIP de um mesmo fabricante. . . . .	38
3.1	Critérios utilizados pelo autor desta dissertação para classificação dos modos de falha em buchas condensivas tipo OIP. . . . .	43
3.2	Modos de falhas na pesquisa do CIGRÉ Brasil em buchas caracterizados como risco alto, após aplicação da ferramenta FMECA. . . . .	44
4.1	Valores de constantes dielétricas para alguns elementos . . . . .	52
4.2	Valores de Condutividade Elétrica de um Líquido Isolante. . . . .	54
4.3	Valores limites de ensaios realizados em óleo isolante usado, regenerado ou não, para transformadores de potência. . . . .	61
4.4	Tipos de resinas sintéticas e suas características . . . . .	66
4.5	Especificações para Fabricação de Buchas Tecnologia RIP. . . . .	67
4.6	Resultado dos Ensaios de Comportamento Térmico de Buchas. . . . .	73
5.1	Valores máximos de fator de dissipação em buchas condensivas segundo NBR 5034. . . . .	82
5.2	Gases oriundos da decomposição . . . . .	84
5.3	Método de diagnóstico Pugh ou pelo Gás Chave com a distribuição percentual de gases para transformadores de potência. . . . .	87
5.4	Valores máximos admissíveis para níveis de descarga parcial. . . . .	90
6.1	Valores de defasagem angular obtidos com sob tensão nominal e variando a carga do secundário de um dado TP. . . . .	109
6.2	Valores de defasagem angular obtidos com sob carga fixa no secundário e variando a tensão nominal U1 de um dado TP. . . . .	109
6.3	Relação entre interferências externas atribuídas a instalação em que o sistema de monitoramento está inserido e soluções encontradas pelo mesmo, no período referente a fase de aprendizagem. . . . .	115



# SUMÁRIO

<b>1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b>	<b>17</b>
1.1 Motivação . . . . .	17
1.2 Histórico de falhas em buchas . . . . .	19
1.3 Objetivos do estudo . . . . .	21
1.4 Estrutura da Dissertação . . . . .	22
<b>2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E TIPOS DE BUCHAS</b>	<b>24</b>
2.1 Introdução . . . . .	24
2.2 Princípio de Funcionamento . . . . .	24
2.2.1 Buchas Não-Capacitivas ou Não-Condensivas . . . . .	26
2.2.2 Buchas Capacitivas ou Condensivas . . . . .	27
2.3 Tipos de Bucha . . . . .	32
2.3.1 Buchas Não-condensivas . . . . .	32
2.3.2 Buchas Condensivas com Isolação à Papel Impregnado de Óleo (OIP) . . . . .	33
2.3.3 Buchas Condensivas com Isolação à Papel Aglutinado com resina (RBP) . . . . .	35
2.3.4 Buchas Condensivas com Isolação à Papel Impregnado com resina (RIP) . . . . .	36
2.3.5 Buchas Condensivas Poliméricas (SRI) . . . . .	37
2.4 Conclusão . . . . .	38
<b>3 MODOS DE FALHA</b>	<b>40</b>
3.1 Introdução . . . . .	40
3.2 Modos de Falha . . . . .	40
3.2.1 Pesquisa CIGRÉ Brasil: Modos de Falha em buchas condensivas tipo OIP . . . . .	42
3.2.2 Pesquisa CIGRÉ Internacional: Modos de Falha em buchas OIP . . . . .	45
3.3 Conclusão . . . . .	45
<b>4 PROCESSOS DE ENVELHECIMENTO</b>	<b>48</b>
4.1 Introdução . . . . .	48
4.2 Dielétricos . . . . .	49

4.2.1	Dipolos Elétricos . . . . .	49
4.2.2	Constante Dielétrica . . . . .	51
4.2.3	Condutividade no dielétrico . . . . .	53
4.2.4	Perdas Dielétricas . . . . .	55
4.2.5	Rigidez Dielétrica . . . . .	56
4.2.6	Higroscopidade . . . . .	58
<b>4.3</b>	<b>Isolação Líquida: Óleo Mineral isolante . . . . .</b>	<b>59</b>
4.3.1	Composição e Refinamento . . . . .	59
4.3.2	Características Principais e Ensaios em Óleo Mineral Isolante. . . . .	60
<b>4.4</b>	<b>Isolação sólida: Papel . . . . .</b>	<b>62</b>
4.4.1	Constituição Química . . . . .	63
4.4.2	Grau de Polimerização Molecular (GP) . . . . .	64
4.4.3	Furfuraldeído (2-fal) . . . . .	65
<b>4.5</b>	<b>Isolação sólida: Polímeros (Resinas) . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>4.6</b>	<b>Processos de Envelhecimento das Buchas . . . . .</b>	<b>67</b>
4.6.1	Efeito da Umidade e do Oxigênio na Isolação . . . . .	68
4.6.2	Efeito da Temperatura na Isolação . . . . .	70
4.6.3	Efeito de Impurezas na Isolação . . . . .	74
4.6.4	Efeito de Surtos de Tensão de Chaveamento na Isolação . . . . .	74
<b>4.7</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>5</b>	<b>TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA</b>	<b>78</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>5.2</b>	<b>Manutenção Preventiva . . . . .</b>	<b>78</b>
5.2.1	Medição de Fator de Dissipação do Isolamento e Capacitância . . . . .	79
5.2.2	Análise Cromatográfica e Teor de umidade do Óleo Isolante em buchas OIP . . . . .	84
5.2.3	Medição de Descargas Parciais . . . . .	87
<b>5.3</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>MONITORAMENTO <i>on-line</i></b>	<b>93</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>6.2</b>	<b>Etapas do Monitoramento <i>on-line</i> de buchas condensivas . . . . .</b>	<b>95</b>
<b>6.3</b>	<b>Tipos de monitoramento <i>on-line</i> . . . . .</b>	<b>96</b>
6.3.1	Somatório das Correntes . . . . .	96
6.3.2	Tipos de monitoramento: Somatório das Tensões . . . . .	100
6.3.3	Tipos de monitoramento: Medição do desvio da capacidade . . . . .	103
6.3.4	Tipos de monitoramento: Ângulo de Fase . . . . .	106
<b>6.4</b>	<b>Influência de Fatores Externos Sistêmicos e Ambientais . . . . .</b>	<b>109</b>
<b>6.5</b>	<b>Experiência CHESF: Monitoramento Buchas 500kV Usina de Xingó . . . . .</b>	<b>110</b>
6.5.1	Projeto e Detalhes de Montagem . . . . .	112

6.5.2 Fase de Aprendizagem . . . . .	114
6.5.3 Diagnósticos . . . . .	117
<b>6.6 Conclusão . . . . .</b>	<b>118</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>120</b>
<b>7.1 Conclusões e Recomendações . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>7.2 Trabalhos propostos para o futuro . . . . .</b>	<b>122</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>124</b>
<b>Apêndice A APÊNDICE</b>	<b>130</b>
<b>A.1 Analise Gás Cromatográfica . . . . .</b>	<b>130</b>
<b>Apêndice B APÊNDICE</b>	<b>134</b>
<b>B.1 Ensaios elétricos em buchas condensivas . . . . .</b>	<b>134</b>
<b>B.2 Análise de Resposta em Frequência . . . . .</b>	<b>136</b>
<b>Apêndice C APÊNDICE</b>	<b>137</b>
<b>C.1 Diagnósticos de monitoramento <i>on-line</i> de buchas condensivas</b>	<b>137</b>

# 1

# CONSIDERAÇÕES INICIAIS

*Onde quer que você esteja, esse é o ponto de partida.*

**Kabir, Filósofo Indiano (1440-1518)**

## 1.1 Motivação

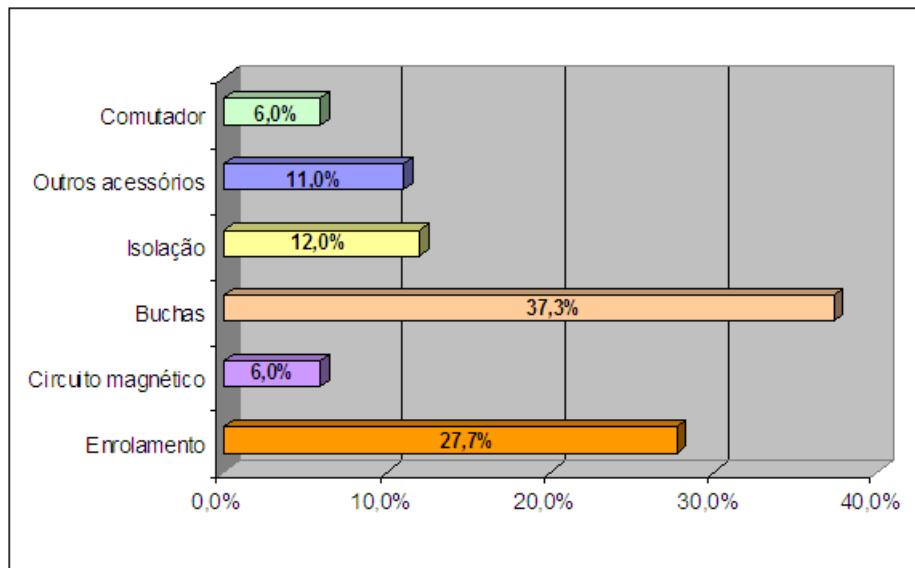
A principal função de uma bucha é possibilitar a condução de corrente, de forma segura, do equipamento principal em que a mesma está instalada para o sistema em que este se encontra conectado. De uma forma geral, no que se refere ao aspecto financeiro, podemos afirmar que o valor atribuído as buchas é bem inferior quando comparado com um transformador de potência, por exemplo. Porém, esta relação financeira não retrata a importância deste componente na confiabilidade e qualidade da operação normal de um sistema elétrico de potência.

Em 1983, o CIGRE Internacional publicou através da revista Electra [1] um estudo sobre as principais causas de falhas em transformadores de potência. Os dados englobam cerca de 1000 falhas registradas envolvendo mais de 47000 unidades, entre os anos de 1968 e 1978, obtidas a partir de registros oriundos de 13 países, como por exemplo E.U.A, Japão e vários países da Europa. A Tabela 1.1 traz um resumo dos resultados obtidos na pesquisa que possuem sua origem vinculada a falhas com buchas, relacionando a tipos diferentes de transformadores e mostrando que estas falhas ocupam uma proporcionalidade bastante significativa, justificando a preocupação com o estado de conservação durante a vida útil deste componente [1].

**Tabela 1.1:** Proporção de falhas em buchas relacionadas com diversos tipos de transformadores.

Indisponibilidade	Trafos Elevadores		Trafos de Subestação		Autotrafos	
	CDC	s/ CDC	CDC	s/ CDC	CDC	s/ CDC
Forçada	32,8%	37,3%	12,0%	8,3%	12,5%	23,6%
Forçada/Programada	29,1%	33,3%	12,3%	20,0%	11,5%	23,0%

Uma situação mais crítica é observada nas indisponibilidades com intervenção forçada em transformadores elevadores sem comutador de derivação em carga (CDC), na qual registra-se que 37,3% das falhas tem sua causa relacionada com buchas, como pode ser visto no histograma da Figura 1.1 que mostra a distribuição das falhas neste tipo de transformador, onde observa-se claramente a relevância deste item com relação aos demais envolvidos no processo de falhas.

**Figura 1.1:** Proporção significativa das buchas na origem das falhas em um transformador elevador sem CDC.

Além da distribuição de falhas mostrada na Tabela 1.1 ser bastante significativa, outro fator importante que justifica um estudo detalhado no acompanhamento dos processos de envelhecimento das buchas é que apesar do custo atribuído a este equipamento ser relativamente baixo, principalmente quando comparado aos demais componentes, falhas seguidas de explosão geralmente levam a perda parcial, ou até mesmo total, do transformador em que se encontra instalado. Em [2], Medina Pena mostra um estudo referente a distribuição de custos em um transformador de potência com CDC,

conforme pode ser visto na Tabela 1.2.

**Tabela 1.2:** *Custos relativos dos componentes de um transformador com CDC.*

Componente	Custo Relativo
Bobinas	35 a 40%
Núcleo	25 a 30%
Comutador sob carga	10 a 15%
Buchas	4 a 6%
Proteções Próprias	1 a 2%

Nas últimas décadas, desde a abrangente pesquisa realizada pelo CIGRÉ internacional [1], concessionárias de energia elétrica como a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) [2], a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) [3], dentre outras, têm realizado controle interno das taxas de falhas em transformadores de potência que confirmam esta preocupação com as buchas, já que a distribuição das falhas tem se mostrado relativamente uniforme com relação aos resultados.

Devido a esta proporção destacada com relação a distribuição de falhas, conforme visto na Tabela 1.1, este estudo se restringirá a aplicação de buchas somente para transformador de potência já que é neste tipo de equipamento justamente sua principal aplicação na indústria elétrica.

## 1.2 Histórico de falhas em buchas

Conforme descrito na seção anterior, vem trazendo grande preocupação para as concessionárias de energia o fato de que falhas originadas por buchas em transformadores de potência envolvem por consequência o equipamento principal, que neste caso trata-se do equipamento de maior custo atribuído de uma instalação de transmissão [4]. Além do evidente aspecto financeiro, existe uma outra razão de caráter social envolvida atualmente. O desenvolvimento da nossa sociedade tem mostrado que a mesma não mais convive harmoniosamente com uma condição de suprimento de energia que envolva interrupções repentinas ou demasiadamente longas, devido a sua grande dependência neste fornecimento, seja por questões de mercado, saúde ou até mesmo de segurança física.

Devido a situações como estas, têm sido criadas legislações específicas no mundo

todo sobre disponibilidade e qualidade no fornecimento de energia elétrica. No Brasil um exemplo representativo é a resolução Nº 270 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [5], exclusiva do sistema de transmissão que exige das empresas uma disponibilidade de equipamentos com valores muito próximos a 100%.

Diante do exposto tem se realizado encontros entre as concessionárias para discutir, analisar e nivelar as ocorrências que especificamente envolvem buchas de transformadores no sistema elétrico de potência nacional e internacional, com o intuito de estabelecer relações entre as mesmas, bem como com os fornecedores de equipamentos, para adotar ações preditivas com o intuito de evitar, ou mesmo reduzir estas falhas.

Em novembro de 2005, foi realizado na cidade de Brasília pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), um seminário na Eletronorte [3] sobre buchas de transformadores com a participação de fabricantes e empresas do setor elétrico. Neste foram apresentados diversos casos de ocorrências de falhas em buchas que envolveram o transformador e que causaram impactos negativos às empresas, bem como ações corretivas e preventivas das empresas e fabricantes.

A Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica (ABRATE) através do sub-grupo de equipamentos organizou um grupo de trabalho específico para tratar do assunto entre as empresas participantes, gerando como fruto do envolvimento de todos um relatório técnico sobre o estado da arte do monitoramento e diagnóstico de buchas para transformadores [6], que serve de base para o desenvolvimento do tema entre as mesmas.

Exemplos de ocorrências de grande impacto podem ser constatados através de registros feitos pela maior empresa de geração de energia da região Nordeste do Brasil, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF). Nos últimos cinco anos, em sua instalação com maior capacidade energética instalada, o complexo hidroelétrico de Xingó responsável por 3000 MW de geração, ou seja, aproximadamente 30% de toda a sua geração instalada na empresa, houve duas ocorrências de explosão dos transformadores elevadores causadas por falha seguida de explosão, originadas por buchas condensivas tipo papel impregnado com óleo (como será mostrado no Capítulo 2), que resultaram em grandes danos ao transformador e outros ativos localizados em sua região periférica, além de indisponibilidade da unidade geradora relacionada. O impacto financeiro causado pelos danos nos ativos envolvidos e da indisponibilidade dos servi-

ços prestados pela concessionária, é apenas uma das consequências de uma ocorrência desta magnitude. Impactos negativos de maiores proporções como os riscos inerentes as equipes de operação e manutenção que transitam próximos aos transformadores energizados é um exemplo da consequência de falhas envolvendo buchas e comprovam a relevância do assunto em questão.

Um fato importante que justifica a evidente preocupação das concessionárias de energia quanto as possíveis falhas em buchas é que as técnicas de manutenção preventiva utilizadas comumente nestes equipamentos limitam as ações das equipes de manutenção a utilização de inspeção visual ou a medição do estado de envelhecimento do material isolante, seja por coleta de óleo isolante ou realização de ensaios elétricos nas buchas (como serão vistos no Capítulo 5), causando indisponibilidade ao ativo principal e na maioria das vezes prejuízos financeiros à empresa.

Devido principalmente a característica peculiar de buchas não apresentarem visualmente indícios de falhas aliada a dificuldade de liberação dos equipamentos para realização de ensaios juntamente com a possibilidade de ocorrências de grande porte conforme relatado, é fato afirmar que as técnicas de manutenção *off-line* atualmente empregadas não atendem por completo quanto a uma real análise do estado da isolação de buchas de transformadores de potência, principalmente quanto a uma possível rápida evolução da deterioração do mesmo, em que os desligamentos periódicos dos ativos podem não ser suficientes para evitar uma falha. Com isso, as técnicas de monitoramento *on-line* de buchas condensivas têm sido mais difundidas e empregadas pelas concessionárias, devido a sua capacidade de identificação de falhas em sua fase incipiente.

### 1.3 Objetivos do estudo

Diante do exposto até então juntamente com a necessidade de uma melhor compreensão dos fenômenos relacionados aos processos de envelhecimento envolvendo buchas de transformadores, foi idealizado este estudo específico sobre as mesmas e os objetivos deste são listados a seguir.

- Descrever o funcionamento básico e os tipos de buchas existentes atualmente na indústria do mercado de energia elétrica.

- Mostrar os modos de falhas listado de buchas, destacando seus modos dominantes e realizar uma correlação com a possibilidade de monitoramento *on-line*.
- Enfatizar os processos de envelhecimento de buchas, envolvendo seus principais constituintes, mostrando desde seus conceitos básicos até sua relação de decomposição com outros fatores, como por exemplo temperatura.
- Mostrar as técnicas de manutenção preventiva adotadas para buchas atualmente com o equipamento desenergizado.
- Detalhar os métodos disponíveis de monitoramento de buchas condensivas, enfatizando as influências externas nos mesmos e mostrar exemplos de utilização.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

A estrutura de organização desta dissertação foi definida da seguinte forma:

- O Capítulo 2 mostra uma visão sobre o princípio de funcionamento das buchas condensivas, assim como as principais características dos tipos disponíveis no mercado atual.
- Utilizando pesquisas realizadas em âmbito nacional e internacional sobre modos de falha de buchas para transformadores de potência, no Capítulo 3 é realizada uma análise entre os mesmos, utilizando ferramentas de engenharia de manutenção, enfocando a sua criticidade, destacando os modos dominantes e a possibilidade de monitoramento.
- Falhas no sistema de isolamento de buchas têm sido a principal causa da indisponibilidade dos equipamentos principais em que as mesmas estão instaladas, e portanto este tem sido o ponto escolhido para a utilização das técnicas de monitoramento *on-line*. Devido a esta constatação, no Capítulo 4 são abordados os conceitos básicos de dielétricos, as características dos principais constituintes das buchas, ou seja, o óleo isolante, o papel e a resina e, ainda, os processos de envelhecimento aos quais os mesmos estão submetidos.
- No Capítulo 5, são mostradas as técnicas de manutenção preventiva e preditiva com o equipamento desligado comumente aplicadas em buchas, como forma de evitar ocorrências.

- No Capítulo 6, são analisadas as características e princípios de funcionamento dos sistemas de monitoramento de buchas disponíveis atualmente, realizado um estudo sobre a influência de interferências externas no mesmo e mostrados exemplos de aplicação destes.
- Concluindo, no Capítulo 7 realiza-se uma análise, mostrando as conclusões obtidas em todo o estudo, indicando recomendações e propostas para trabalhos futuros referentes ao tema.

# 2

## PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E TIPOS DE BUCHAS

*Ter-se a consciência de que se é ignorante, constitui um grande passo na direção da sabedoria.*

**Benjamin Disraeli, Político Inglês**  
**(1804-1881)**

### 2.1 Introdução

Para um melhor entendimento do equipamento e dos possíveis modos de falhas do mesmo, este capítulo apresentará os princípios de funcionamento das buchas de uma forma geral, seus diversos tipos, seus modos de fabricação e outras informações importantes para um conhecimento prévio do equipamento em estudo.

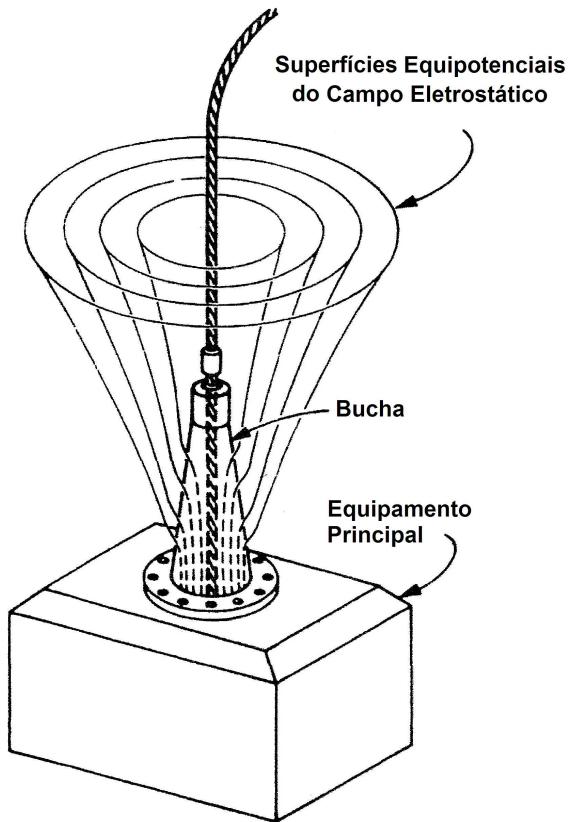
### 2.2 Princípio de Funcionamento

A NBR 5034/1989 define bucha como sendo “Peça ou estrutura de material isolante, que assegura a passagem isolada de um condutor através de uma parede não isolante” [7].

Podemos entender como sendo a função principal de uma bucha, conduzir corrente através de um condutor próprio, instalada em um equipamento principal, transformador ou um disjuntor, por exemplo, isolando-o do meio ambiente externo e garantindo que a distribuição do campo elétrico criado pelo condutor não venha a comprometer o seu pleno funcionamento.

A Figura 2.1 mostra uma distribuição equipotencial das superfícies de um campo

eletrostático criadas pelo condutor de uma bucha [8].



**Figura 2.1:** Distribuição equipotencial do campo eletrostático de uma bucha.

A distribuição do campo eletrostático na região próxima do referencial terra da bucha, no caso específico da Figura 2.1 o corpo do equipamento principal no qual a mesma se encontra instalada, é o principal ponto de fragilidade com relação a possíveis falhas e esta característica está associada com as maiores dificuldades encontradas nos seus projetos de fabricação, devido ao fato de que nesta região se encontra a menor distância para o condutor central.

Em sistemas com níveis de tensão mais elevados, este problema tende igualmente a ser intensificado e é fato afirmar que a tecnologia aplicada na fabricação de buchas está ligada ao controle da distribuição deste campo eletrostático, ou seja, basicamente é o que define o material isolante utilizado e o tipo da fabricação da bucha.

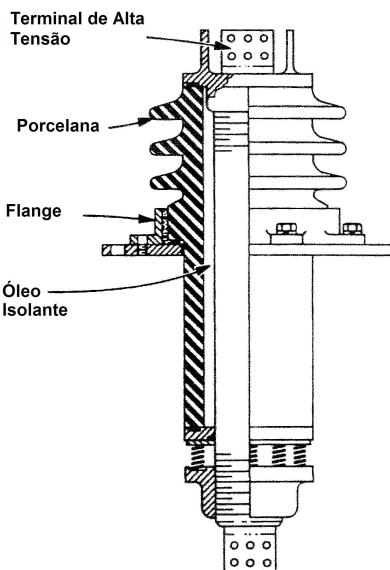
Com relação à sua tecnologia podemos classificar as buchas como sendo de dois grupos, conforme mostram as seções seguintes.

### 2.2.1 Buchas Não-Capacitivas ou Não-Condensivas

As buchas do tipo não-capacitivo ou não-condensivo podem ser classificadas como sendo [9] [7]:

- Constituídas de porcelana, com isolação a ar e tem aplicação restrita a equipamentos com tensão nominal com valores até cerca de 25 kV;
- Buchas com um isolante sólido, geralmente papel, que envolve um condutor central ambos imersos em um isolador de porcelana com óleo isolante, tendo sua aplicação restrita em equipamentos com tensão nominal de até cerca de 69 kV.

Conforme mencionado, normalmente estes tipos de bucha são limitados a um nível de tensão nominal de até cerca de 69 kV, devido a não utilização de uma tecnologia mais adequada para o controle das superfícies de campo eletrostático criado pelo condutor da mesma. Como compensação a esta limitação, estas buchas apresentam diâmetros e volumes de óleo isolante maiores que as capacitivas, para evitar ou minimizar a possibilidade de rompimento do dielétrico em locais de maior fragilidade, como por exemplo nas estruturas de fixação aterradas das mesmas. A Figura 2.2 ilustra uma bucha tipo não-capacitiva, descrevendo os principais componentes que compõem a mesma [8].



**Figura 2.2:** Ilustração de uma bucha não-capacitiva ou não-condensiva.

### 2.2.2 Buchas Capacitivas ou Condensivas

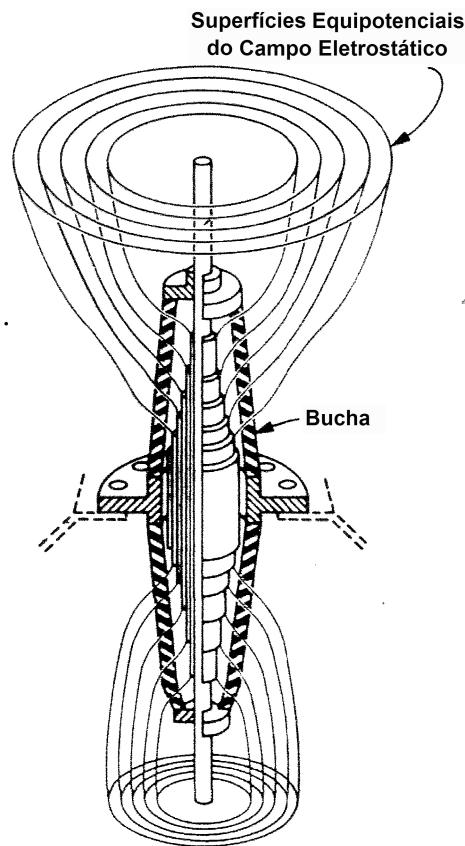
No início do Século XX, o aparecimento da tecnologia de construção de buchas condensivas publicada através de artigos técnicos pelas empresas do ramo de energia elétrica da época, revolucionou a fabricação das mesmas. A principal razão foi que com os recursos desenvolvidos para o controle do campo eletrostático criado pelo condutor implantados neste tipo de bucha, tornou-se possível a sua boa utilização em aplicações com tensões elevadas, acompanhando a então tendência de crescimento nas tensões para transmissão de energia das empresas da época. No que se refere ao melhor aproveitamento econômico, obteve-se uma diminuição do diâmetro das buchas, quando comparada com as buchas não-condensivas, resultando em menores custos envolvidos em sua fabricação [8].

A idéia básica consiste na utilização de chapas metálicas de espessura fina concêntricas com o eixo do condutor, dividindo o material dielétrico da bucha em camadas, alternando materiais condutores, as chapas, e não condutores, o dielétrico. O resultado desta divisão é que estas camadas funcionam como capacitores em série eletricamente, e portanto, dividindo a tensão entre o condutor central e o potencial terra em degraus discretos, já que em uma distribuição em série de capacitores a tensão total é dividida proporcionalmente às camadas capacitivas [10].

Com esta divisão, a distribuição do campo eletrostático é melhor controlada, permitindo como mencionado previamente uma construção mais eficiente da bucha, conforme mostra a Figura 2.3 [8].

Em projetos de buchas condensivas, as técnicas e os métodos empregados são definidos com o intuito de determinar dimensões internas e definir materiais isolantes adequados para as camadas capacitivas, que possibilitem o menor esforço elétrico entre as mesmas, garantindo da maneira mais eficiente a sua suportabilidade dielétrica, bem como a ótima distribuição do campo eletrostático criado pelo condutor. Esta fase do projeto, que envolve os cálculos associados na determinação dos limites dos esforços elétricos internos e externos, assim como define as características do material dielétrico utilizado, é a mais complexa, já que são muitas as variáveis envolvidas no contexto, como por exemplo a presença de bolhas de ar entre as camadas diminuindo sua capacidade isolante ou ainda a consideração de surtos de sobretensão transitórios.

Durante sua vida útil uma bucha pode ter sua capacidade de operação alterada por



**Figura 2.3:** Distribuição das superfícies equipotenciais do campo eletrostático em uma bucha condensiva.

diversos fatores que serão alvo de nosso estudo posteriormente. Um parâmetro eficaz, e muito difundido, de medição utilizado durante a fase de operação que permite monitorar a qualidade da bucha em funcionamento é a capacitância da mesma. Partindo do modelo de capacitâncias concêntricas, utilizado neste tipo de bucha, a forma de calcular a capacitância existente entre duas camadas condutoras concêntricas adotada é a seguinte:

$$C = \frac{k \times l}{l \times \frac{r_1}{r_2}}, \quad (2.1)$$

em que:

- ✓  $l$  é o comprimento do envoltório entre os dois cilindros de raios internos e externos conhecidos como  $r_1$  e  $r_2$ , respectivamente e;
- ✓  $k$  é uma constante que contém as propriedades físicas e de conversão necessárias.

Um projeto em que a distribuição das tensões internas dos cilindros concêntricos capacitivos é realizada de forma que não ultrapasse o limite da capacidade dielétrica de cada camada, tende a se mostrar eficiente, porém uma análise mais detalhada na determinação do dielétrico se faz necessária para um projeto mais eficiente e econômico.

Para a determinação dos esforços elétricos, os cálculos envolvidos são baseados nos princípios do eletromagnetismo que definem as condições de contorno, os valores de fronteira, dos problemas de eletrostática [11]. A partir da Lei de Gauss para um meio linear que estabelece que o fluxo elétrico total através de uma superfície fechada é igual à carga total encerrada por essa superfície, podemos afirmar que:

$$\begin{aligned}\psi &= Q_{enc}, \\ \psi &= \oint_s d\psi = \oint_s D \cdot dS, \\ \psi &= \int \rho_v \cdot dv,\end{aligned}\tag{2.2}$$

em que:

- ✓  $Q_{enc}$  é a carga total encerrada em uma superfície fechada,  $D$  é a densidade de fluxo elétrico e  $\rho_v$  é a densidade volumétrica de cargas através de uma superfície fechada.

A partir desta afirmação, é obtida a equação de Poisson que é utilizada na determinação do campo eletrostático em meios dielétricos homogêneos e que para o caso dos estudos nos cilíndricos concêntricos capacitivos das buchas, esta consideração que é adotada e serve como base na determinação do coeficiente do meio dielétrico ideal a ser utilizado [11].

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon}. \tag{2.3}$$

Diante da dificuldade em se definir a densidade volumétrica de cargas existente no dielétrico,  $\rho_v$ , a ser utilizado na especificação dos projetos de buchas e ao longo do tempo de vida útil das mesmas, invariavelmente são estabelecidas algumas considerações físicas que simplificam os cálculos envolvidos [8]:

- O material dielétrico envolvido é livre de perdas;
- Não existem depósitos de cargas elétricas;
- O campo é eletrostático (tempo invariável).

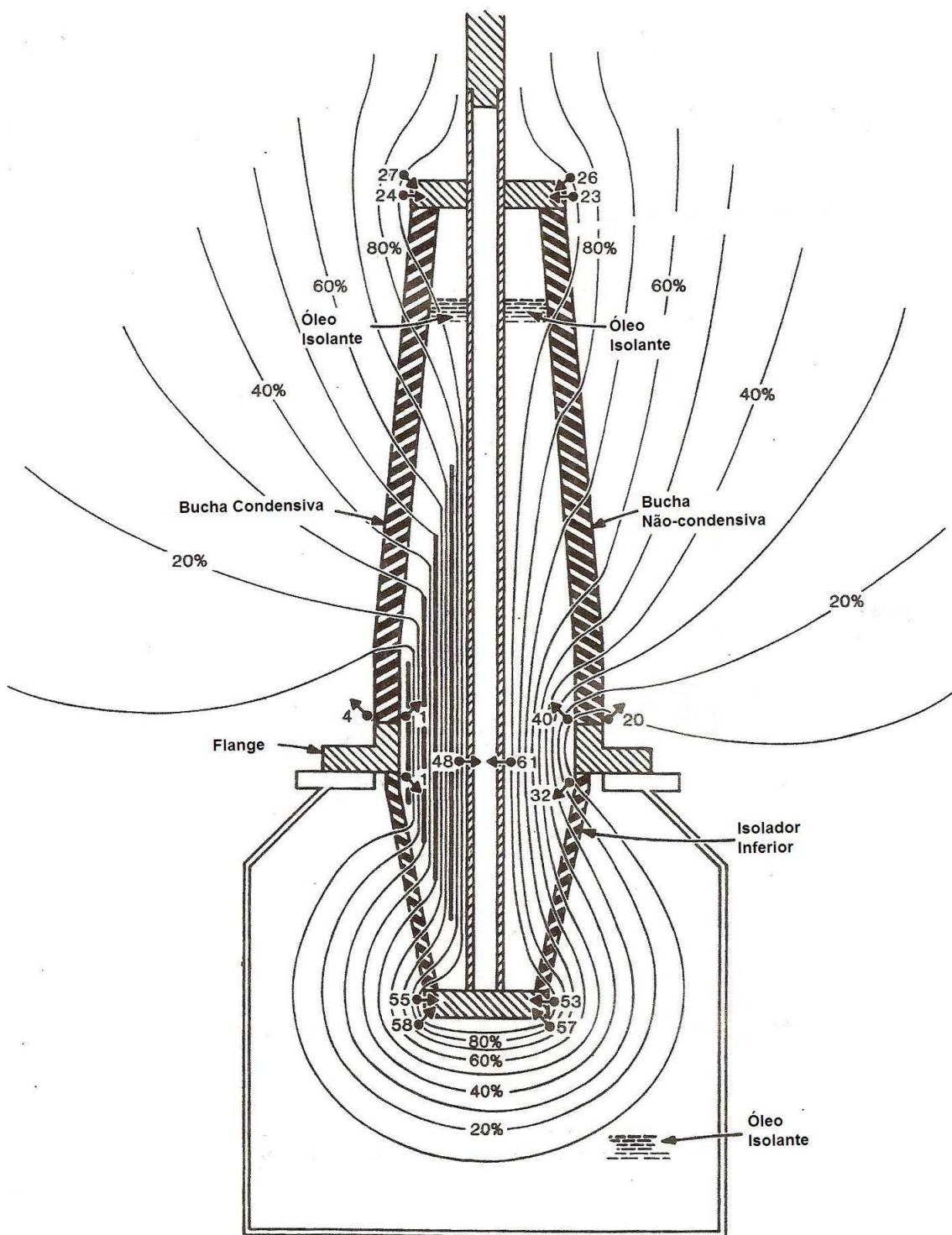
Estas considerações possibilitam a utilização de um caso particular da equação de Poisson conhecida como equação de Laplace [11].

$$\nabla^2 V = 0. \quad (2.4)$$

As premissas adotadas podem ser consideradas como aproximações que geram resultados próximos ao desempenho encontrado em regime permanente nas buchas. Para as duas primeiras hipóteses podemos considerar que seja sempre utilizado um material dielétrico em boas condições no que se refere a sua capacidade isolante, estando com sua rigidez dielétrica adequada ao projeto, livre ou com quantidade insignificante de material condutor no mesmo. Quanto a terceira, como em regime permanente os equipamentos funcionam com uma frequência muito baixa, 50 ou 60 Hz, pode-se considerar satisfatória está condição imposta para utilização da equação de Laplace.

Em [8], Easley e Stockum relatam um exemplo de distribuição de tensão em uma bucha condensiva, comparando a mesma com outra de mesmas dimensões físicas, ou seja, mesma estrutura de porcelana e fixação, porém com sua constituição dielétrica preenchida somente com óleo isolante, sem a presença das folhas metálicas concêntricas condutoras. A Figura 2.4 mostra os resultados obtidos de distribuição de tensão e de campo elétrico, nas duas buchas, sendo o lado esquerdo composto pela bucha capacitiva composta de quatro folhas metálicas, e o lado direito com o preenchimento feito apenas com óleo isolante [8].

Analizando a Figura 2.4 quanto ao campo eletrostático, percebe-se uma distribuição mais uniforme do mesmo na bucha condensiva, devido a presença das folhas metálicas. Este fator ganha maior importância na região ao redor da flange de fixação, ponto aterrado mais próximo do condutor central. A distribuição nas regiões da bucha condensiva para as quais não existe presença das folhas é bastante similar àquela bucha convencional, conforme esperado. Outra observação interessante, é que na parte superior e inferior da bucha os valores encontrados são levemente superiores na bucha condensiva, porém este não é um ponto preocupante no que se refere ao projeto da mesma. Com relação à distribuição de tensão, novamente percebe-se na região da flange da bucha convencional os valores mais significativos encontrados, registrando valores de até cerca de 40 vezes superiores aos encontrados na bucha condensiva, como pode ser observado na parte interna superior da mesma.



**Figura 2.4:** Campo eletrostático e distribuição de diferença de potencial de uma bucha condensativa e uma bucha não-condensativa.

Ainda sobre a experiência realizada por Easley and Stockum [8], a Tabela 2.1 mostra os resultados das capacitâncias encontradas na simulação realizada com base na Equação 2.1 e nas dimensões estabelecidas no projeto do exemplo da bucha capacitiva, assim como também a distribuição de tensão a partir destes resultados.

**Tabela 2.1:** Capacitâncias e tensões encontradas entre camadas condutoras em ensaio realizado em uma bucha condensiva.

Camada	Capacitância(pF)	Tensão(kV)	Limite(kV)
Condutor p/ 01	271	25	35
01 p/ 02	284	24	35
02 p/ 03	259	25	35
03 p/ 04	217	31	35

Considerando o limite dielétrico por camada de 35 kV, conforme mostra a tabela, percebe-se que esta distribuição de tensão apesar de não ser uniforme, atende perfeitamente em regime permanente a capacidade dielétrica do material isolante utilizado no projeto.

A significativa contribuição desta tecnologia em buchas no que se refere aos esforços elétricos é a possibilidade de utilização de buchas com diâmetros menores, principalmente com a utilização de compostos isolantes eficientes, reduzindo custos e garantindo maior segurança no bom funcionamento das mesmas.

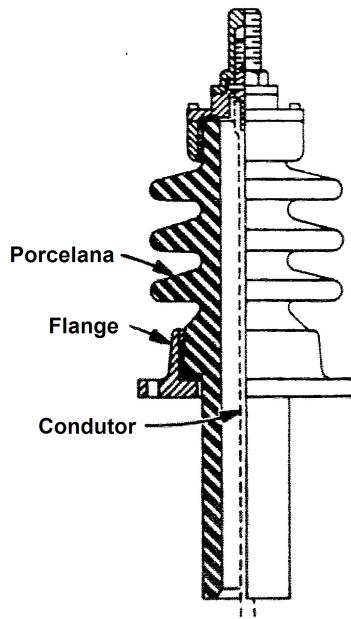
## 2.3 Tipos de Bucha

A classificação dos tipos de buchas encontradas é realizada basicamente com relação a sua concepção de projeto, conforme listado a seguir [12] [8] [9] [7] [13]:

### 2.3.1 Buchas Não-condensivas

Podemos definir uma bucha como sendo não-condensiva quando sua isolação interna é provida por um material cerâmico ou similar, não possuindo a existência de folhas metálicas concêntricas internas para controle da distribuição do campo eletrostático interno [9]. Este é o tipo de bucha de construção mais simples e sua aplicação é restrita a tensões geralmente inferiores a cerca de 69 kV.

Os condutores destas buchas podem ser tanto flexíveis quanto rígidos, e geralmente são feitos de cobre. O preenchimento do espaço entre o condutor e a porcelana pode ser feito com ar, óleo isolante do equipamento em que está instalada, óleo isolante próprio, resina ou um mistura de óleo com outros compostos, conhecida como *compound*. Um exemplo deste tipo de bucha é mostrado na Figura 2.5 [8].



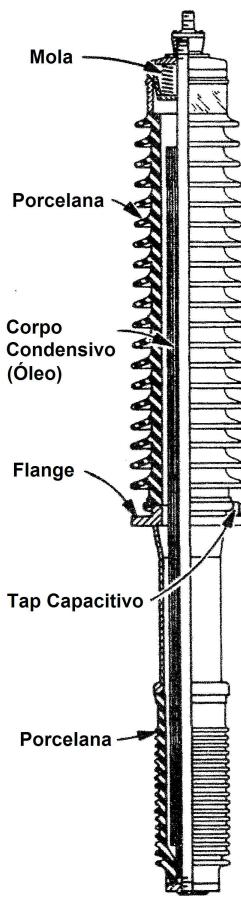
**Figura 2.5:** Bucha Não-Condensiva: Esboço indicando constituintes.

Estas buchas devido ao seu projeto simples, exigem um plano de manutenção preventiva igualmente simplificado, que incluem geralmente apenas inspeções visuais e limpeza da superfície externa. Quando de sua utilização em sistemas acima de 69 kV, geralmente nota-se a existência do efeito corona com intensidade destacada, tanto no condutor como na flange externa [9].

Devido a sua pouca complexidade e limitação de sua aplicação, este tipo de bucha não será mais abordada no restante deste estudo.

### 2.3.2 Buchas Condensivas com Isolação à Papel Impregnado de Óleo (OIP)

Define-se como sendo "uma bucha condensiva na qual a isolação interna consiste de um condutor central enrolado em papel e folhas metálicas concêntricas e em seqüencia impregnado com óleo mineral", conforme pode ser visto na Figura 2.6 [8].



**Figura 2.6:** Bucha com isolação à papel impregnado com óleo: Esboço indicando constituintes.

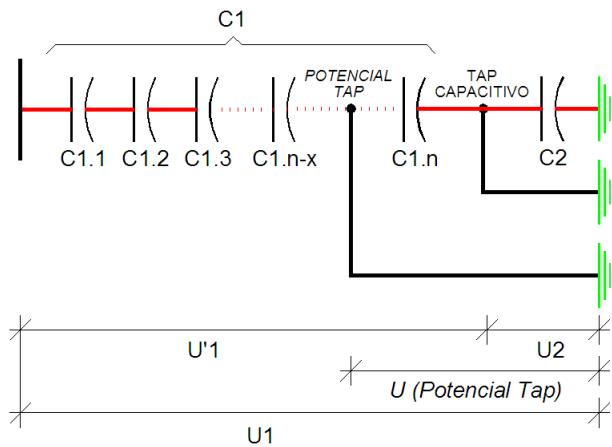
Dentre as buchas tipo capacitiva, existe uma ampla maioria nas instaladas atualmente nos equipamentos com tensões acima de 69 kV, face sua excelente característica de descargas parciais e boa estabilidade térmica.

Na Figura 2.6, observa-se um importante dispositivo das buchas condensivas, em geral é o *tap* capacitivo, que é uma derivação entre a última camada condutora do corpo condensivo da bucha e o flange. Este é utilizado para a realização de ensaios ou instalação de monitoramento, para verificação do estado da isolamento como será mostrado nos capítulos seguintes. Em algumas buchas condensivas existe ainda uma outra derivação das camadas condutoras conhecida como *potencial tap*, que é uma derivação entre o corpo condensivo e o flange, com a função de fornecer uma tensão reduzida proporcional a tensão do sistema em que a bucha está conectada. Neste estudo não abordaremos a utilização do *potencial tap*, portanto deste ponto em diante,

a palavra *tap* indicará *tap* capacitivo.

Outro dispositivo mostrado na Figura 2.6 são as molas que tem função de compensar a dilatação do conjunto devido a variação de temperatura em que o equipamento pode ficar exposto quando energizado.

A Figura 2.7 ilustra uma representação do circuito elétrico de uma bucha condensiva, independente do composto utilizado na isolação, mostrando as derivações mencionadas e destacando importantes notações que serão utilizadas durante todo este estudo.



**Figura 2.7:** Representação do circuito elétrico de uma bucha condensativa.

Legenda:

- **U1** é a tensão fase-terra do sistema;
- **U2** é a tensão do *tap* capacitivo da bucha para o referencial terra;
- **C1** é a capacidade entre o condutor central e a derivação do *tap* capacitivo, a qual é dividida em diversos capacitores em série, conforme visto na Seção 2.2.2;
- **C2** é a capacidade entre o *tap* capacitivo e o referencial terra;

### 2.3.3 Buchas Condensivas com Isolação à Papel Aglutinado com resina (RBP)

Segundo a NBR 5034/1989 [7] esta bucha tem em sua isolação principal, um núcleo formado pelo enrolamento de papel previamente resinado juntamente com folhas metálicas concêntricas ao condutor, e que durante o seu processo de fabricação cada

camada de papel é aglutinada com a camada anterior, por meio de um revestimento de resina epoxi fenólica. Uma porcelana faz a sua isolação externa e o espaço intermediário entre o corpo condensivo formado e a mesma é preenchido, geralmente com óleo isolante. A conclusão do corpo condensivo é obtida com o processo de cura desta resina.

Pertence a primeira geração das buchas condensivas que utilizam resina e sua maior limitação é a presença de muitos pequenos espaços vazios no corpo de sua isolação, inerente ao seu processo fabril, causando com isso um alto nível de descargas parciais, com valores registrados acima de 250 pC (como será visto com maiores detalhes no Capítulo 5).

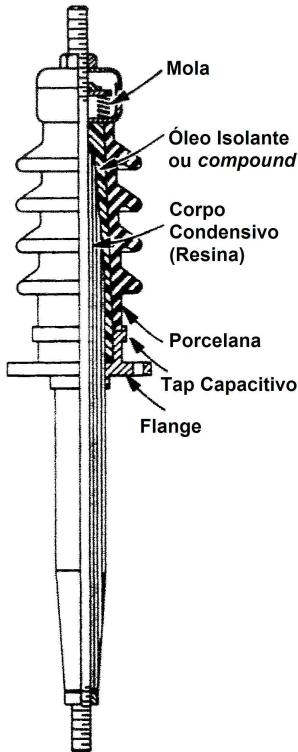
Atualmente, devido ao histórico de problemas constatados pelas empresas concessionárias, face a sua pouca eficiência quanto a suportabilidade dielétrica, sua fabricação é praticamente inexistente e, quando aplicada, é restrita para sistemas com tensões inferiores a 69 kV.

#### 2.3.4 Buchas Condensivas com Isolação à Papel Impregnado com resina (RIP)

Segundo a NBR 5034/1989 [7] esta bucha é definida como tendo em sua isolação interna um núcleo formado de papel e folhas metálicas concêntricas a um condutor central, e em seguida, impregnado com resina. A sua isolação para o meio externo é feita com um invólucro de porcelana e o espaço intermediário entre o corpo condensivo e a mesma é preenchido com material isolante, geralmente óleo isolante ou algum composto específico, a depender do fabricante.

O processo de fabricação das buchas RIP, apesar de também ser utilizada resina epoxi fenólica difere bastante das buchas RBP, pois a impregnação da resina resulta em uma isolação com um desempenho muito superior no que se refere a descargas parciais (cerca de 10 pC). Seu desempenho é semelhante ao das buchas tipo OIP no que se diz respeito a perdas elétricas e descargas parciais, porém seu quantitativo de unidades instaladas é ainda reduzido quando comparado a estas buchas devido ao seu alto custo atribuído no início da fabricação de seu projeto. Atualmente na Europa e EUA seu custo de fabricação tem se equiparado ao das buchas tipo OIP, resultando na expansão de sua produção, sendo atualmente líder de mercado na Europa. Um exemplo desta tecnologia de impregnação ou mesmo aglutinação de resina é mostrado

na Figura 2.8 [8].



**Figura 2.8:** Bucha com isolação à papel impregnado (ou aglutinado) com resina : Esboço indicando constituintes.

As buchas tipo RBP e RIP também possuem o circuito elétrico equivalente ao mostrado na Figura 2.7.

### 2.3.5 Buchas Condensivas Poliméricas (SRI)

Esta tecnologia consiste na substituição da porcelana utilizada como revestimento externo das buchas por um material polimérico, que tem sua base formada por fibra de vidro juntamente com borracha siliconada e livre de vazios em sua composição. A isolação interna destas buchas é feita com papel impregnado com óleo (OIP) ou, principalmente, com papel impregnado de resina (RIP) [12].

A principal vantagem é que em ocorrências de explosão de buchas, as pessoas e os equipamentos na periferia permanecem íntegros, já que ao contrário da porcelana, este revestimento não causa dispersão de estilhaços. Outras vantagens interessantes são a sua aplicação em regiões poluídas devido a sua superfície ser de difícil aderência com

relação aos depósitos de impurezas, necessitando de um baixo custo de manutenção para sua limpeza e ainda o seu peso, geralmente em torno de 75% inferior a uma bucha de mesma especificação com revestimento de porcelana.

## 2.4 Conclusão

Nos estudos dos modos de fabricação e tipos de buchas ficam evidentes as vantagens da utilização de buchas condensivas em sistemas elétricos e como exemplo destas podem ser citadas:

- Eficiente controle do campo eletrostático e da diferença de potencial interna da bucha, permitindo um projeto mais otimizado;
- Possibilidade de utilização de técnicas preventivas mais eficientes, ou mesmo, instalação de um sistema de monitoramento, possibilitando um melhor acompanhamento da condição de sua suportabilidade dielétrica;

A Tabela 2.4, baseada em dados técnicos de um mesmo fabricante de buchas, mostra uma comparação entre as buchas OIP e RIP [14].

**Tabela 2.2:** Comparação entre buchas OIP e RIP de um mesmo fabricante.

Características	RIP	OIP
Descargas Parciais	< 10 pC	< 10 pC
Tg Delta (Isolamento)	< 0,007 %	< 0,007 %
Desempenho Térmico	Até 120 °C	Até 105 °C
Segurança Externa	Alta (Operação sem pressão)	Moderada (Pressão do óleo)
Resistência ao Fogo	Alta	Moderada
Resistência Mecânica	Alta	Baixa
Tempo de Vida Útil	> 30 anos	> 30 anos

Como pode ser observado na Tabela 2.4, quanto ao desempenho elétrico as buchas tipo OIP ou RIP possuem respostas bem similares como mostra seus resultados, esperados em buchas novas, para os parâmetros de sua isolamento (descargas parciais e fator de potência do isolamento). Porém importantes características como a alta resistência a propagação do fogo, o fato de não operar com pressão interna do óleo e um melhor

desempenho térmico, tornam as buchas tipo RIP, durante a operação em regime permanente, mais seguras, assim como possui uma possibilidade consideravelmente menor de ocorrência de incêndio quando de falhas.

Apesar das buchas tipo OIP predominarem no quantitativo de buchas condensivas instaladas no mundo, atualmente podemos afirmar que existe predominância na fabricação das buchas condensivas tipo RIP e a tendência é que ocupem cada vez mais espaço no mercado, principalmente as do tipo SRI com isolamento a base de papel impregnado com resina, já que quando da ocorrência de falhas não projetam estilhaços ao seu redor, garantindo maior segurança para os operadores e mantenedores, bem como dos equipamentos na região mais próxima.

# 3

## MODOS DE FALHA

*Só depois de praticadas, é que as falhas nos ensinam como podiam facilmente ter sido evitadas.*

**Emanuel Wertheimer, Filósofo  
Austro-Alemão (1846-1916)**

### 3.1 Introdução

O conhecimento sobre as causas, os efeitos e os modos como as falhas acontecem, é essencial quando se deseja implementar técnicas de manutenção ou monitoramento adequadas a um determinado equipamento, devido a necessidade prévia de se conhecer os processos de envelhecimento a que se está submetido o equipamento.

Neste capítulo, o autor realiza uma análise da gravidade, detectabilidade e capacidade de evolução dos modos de falha de buchas condensivas tipo OIP, baseado em um estudo realizado pelo CIGRÉ Brasil, através de um projeto piloto sobre modos de falha em transformadores imersos em líquido isolante e seus componentes. É mostrado também um segundo estudo, realizado pelo CIGRÉ Internacional, também sobre os modos de falha de buchas de papel impregnado com óleo.

### 3.2 Modos de Falha

Conforme a NBR-5462, que trata de confiabilidade e mantinabilidade, um modo de falha é uma combinação de efeitos através dos quais uma falha é detectada [15]. Os modos de falha descrevem como as falhas podem acontecer, ou seja, o mecanismo

de falha ou o que pode falhar. O seu estudo é de fundamental importância quando se trata de engenharia de manutenção, visto que são as chaves para as formas adequadas de combate a ocorrência de uma falha [16].

A Engenharia de Manutenção dispõe de algumas ferramentas de análise que servem de base em qualquer estudo do desempenho de um sistema, o objetivo requerido é estimar os vários parâmetros de confiabilidade deste. Geralmente o sistema é dividido em subsistemas que estão correlacionados entre si e suas confiabilidades estimadas são combinadas de tal forma a obter a confiabilidade do sistema como um todo ou parte dele, utilizando como base as leis da probabilidade. Em um sistema complexo, no qual a sua confiabilidade tem a associação de diversos fatores ou subsistemas e não são obtidas de maneira simples, tem-se utilizado métodos como a Análise da Árvore de Falha (*Failure Tree Analysis - FTA*), Análise de Pareto, a Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis - FMEA*), dentre outros [17].

A análise dos modos de Falha e seus efeitos - FMEA, é um método estruturado de determinação das funções, falhas funcionais e modos ou causas das falhas de um equipamento, e seus efeitos. O objetivo deste método é proporcionar um procedimento para previsão, avaliação e prevenção de falhas, ou seja, detectar antes que as mesmas aconteçam [16].

Resumidamente, sua metodologia é composta da aplicação de uma lista de verificação, geralmente como um formulário, aplicando um raciocínio dedutivo e tomando como base três perguntas chaves, para uma possível causa de falha:

- Qual é a probabilidade da falha ocorrer?
- Qual seriam os efeitos desta falha?
- Qual a probabilidade de que esta falha seja detectada antes de sua ocorrência?

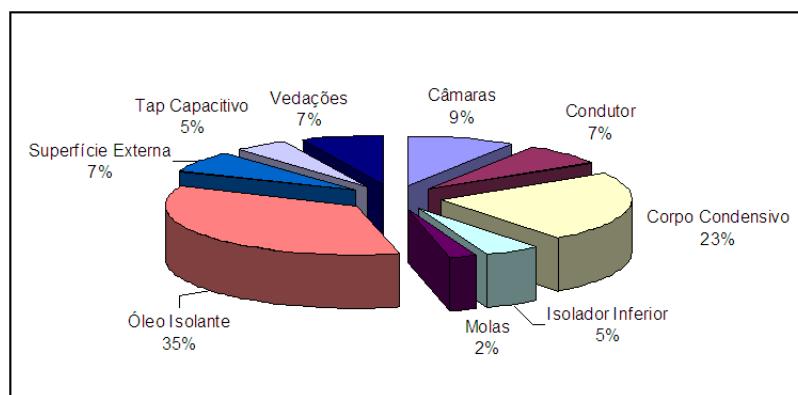
Os resultados obtidos desta avaliação podem ser classificados, de maneira que seja possível a determinação dos modos de falha dominantes, ou seja, os que causam maior impacto para o sistema ou o equipamento em si, quando de sua ocorrência. Esta classificação é fundamental para uma tomada de decisão, quanto a implementação de uma técnica de manutenção ou monitoramento para um determinado modo de falha ou um conjunto destes, ou mesmo ainda, a decisão de não realizar nenhuma ação para um outro modo de falha com menor risco ou baixa probabilidade de ocorrência. Quando da

utilização de um critério de classificação, esta ferramenta passa a ser conhecida como Análise dos Modos de Falha seus Efeitos e Criticidade - FMECA (*Failure Modes and Effects Critical Analysis*).

Devido a sua praticidade na classificação qualitativa de um conjunto de dados sob estudo e de experiências anteriores do autor desta dissertação, foi adotada a ferramenta FMECA no desenvolvimento deste trabalho para determinação da gravidade, detectabilidade e frequência (evolução) dos modos de falha obtidos em pesquisa sobre buchas condensivas tipo OIP realizada pelo CIGRÉ Brasil, conforme mostra a Seção 3.2.1.

### 3.2.1 Pesquisa CIGRÉ Brasil: Modos de Falha em buchas condensivas tipo OIP

Um Projeto Piloto do Grupo de Trabalho Conjunto (B3.01) dos Comitês de Estudo CE-B3 (Subestações), CE-B5 (Proteção e Automação) e CE-A2 (Transformadores) do Cigré-Brasil, descreve a aplicação da metodologia Manutenção Centrada na Confiabilidade - MCC a transformadores de força imersos em líquido isolante, tal como óleo mineral ou vegetal. O projeto objetivou pesquisar a aplicação da MCC a transformadores de força de grande porte, e servir de referência da aplicação da metodologia a outros tipos de equipamentos elétricos [18]. Parte dos resultados encontrados no projeto mencionado, mostra a compilação das informações de representantes de concessionárias e fabricantes sobre seus registros próprios, que resultaram em uma relação bastante abrangente dos modos de falha sobre buchas não-condensivas e condensivas tipo OIP. A Figura 3.1 mostra a distribuição dos modos de falha de buchas condensivas listados, por sistema.



**Figura 3.1:** Distribuição dos modos de falha em buchas condensivas obtidos da pesquisa realizada pelo Cigré Brasil.

De posse destes dados, juntamente com dados de histórico de falha em buchas e transformadores da CHESF [19], e utilizando a ferramenta FMECA mostrada na Seção 3.2, este autor estabeleceu critérios qualitativos para uma classificação baseada na gravidade, detectabilidade e frequência ou evolução, quando da ocorrência para cada um dos modos de falha identificados para as buchas condensivas na pesquisa. A Tabela 3.1 mostra os critérios utilizados para a classificação dos modos de falha.

**Tabela 3.1:** Critérios utilizados pelo autor desta dissertação para classificação dos modos de falha em buchas condensivas tipo OIP.

CRITICIDADE (C)	
Peso	Descrição
5	Possível ocorrência com propagação de fogo, ou até mesmo explosão, independente de outro modo de falha associado.
4	Possível ocorrência com propagação de fogo, ou até mesmo explosão, associado a ocorrência de outro modo de falha.
3	Perde confiabilidade, requer intervenção da manutenção imediata, porém dificilmente haverá ocorrência com propagação de fogo.
2	Perde confiabilidade, requer intervenção da manutenção programada.
1	Não requer ou independe da ação da manutenção.
DETECTABILIDADE (D)	
Peso	Descrição
5	Não detectável ou somente em inspeções em fábrica ou laboratório específico.
3	Realização de ensaios de rotina ou análises de amostras de óleo isolante.
1	Inspeção Visual.
EVOLUÇÃO (E)	
Peso	Descrição
5	A possibilidade de evolução para uma falha é alta
3	A possibilidade de evolução para uma falha é média
1	A possibilidade de evolução para uma falha é baixa
RISCO (C x D x E)	
Peso	Descrição
1 a 15	Baixo
16 a 59	Moderado
60 a 125	Alto

Após a aplicação dos critérios estabelecidos, a Tabela 3.2 mostra o resultado dos modos de falha caracterizados como risco "alto".

**Tabela 3.2:** Modos de falhas na pesquisa do CIGRÉ Brasil em buchas caracterizados como risco alto, após aplicação da ferramenta FMECA.

Modo de Falha	C	D	E	Sistema
Umidade no corpo condensivo.	5	3	5	Corpo Condensivo
Baixa impregnação de óleo no corpo condensivo.	5	3	5	Corpo Condensivo
Degradação do laminado do corpo condensivo.	5	3	5	Corpo Condensivo
Curto-circuito entre as camadas capacitivas do corpo condensivo.	5	3	5	Corpo Condensivo
Existência de bolhas de ar no corpo condensivo.	5	3	5	Corpo Condensivo
Contaminação por partículas metálicas no óleo isolante.	5	3	5	Óleo Isolante
Excesso de borras no óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Degradação por eletrólise no óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Sobreaquecimento do óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Excesso de umidade no óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Excesso de substâncias ácidas no óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Excesso de gases combustíveis no óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Excesso de bolhas no óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Excesso de carbonização óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Degradação por hidrólise do óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Degradação por oxidação do óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Degradação por pirólise do óleo isolante das buchas.	5	3	5	Óleo Isolante
Depósito de graxa-x no corpo condensivo.	5	3	5	Corpo Condensivo
Migração de tinta grafítica no núcleo da bucha condensiva.	5	3	5	Corpo Condensivo
Sobreaquecimento do dielétrico do corpo condensivo.	4	3	5	Corpo Condensivo
Dobras no papel do corpo condensivo.	4	3	5	Corpo Condensivo
Sobreaquecimento do corpo condensivo.	4	3	5	Corpo Condensivo

Analizando os resultados, observa-se que após a classificação, apenas os relacionados com o sistema de isolamento, *corpo condensivo e óleo isolante*, possuem o risco considerado alto. Esta constatação, associado ao fato de que estes modos de falha não são detectáveis por inspeção visual juntamente com a possível rápida evolução para falhas em condições críticas destes, reforçam a percepção de que os investimentos para aumentar a vida útil das buchas condensativas devem ser voltados para a melhoria

dos sistemas ligados a sua suportabilidade dielétrica, seja na concepção do projeto, na fabricação ou mesmo em sua operação.

### 3.2.2 Pesquisa CIGRÉ Internacional: Modos de Falha em buchas OIP

Um estudo sobre o gerenciamento da vida útil de transformadores de potência desenvolvido pelo grupo de trabalho A2.18 do CIGRÉ Internacional no ano de 2003, engloba o sistema referente as buchas condensivas com papel impregnado com óleo (OIP). A Figura 3.2, extraída deste estudo, mostra a relação entre os componentes de uma bucha deste tipo com os possíveis defeitos ou falhas e ainda com os modos de falha listados [20].

Assim como no estudo anterior, observa-se a grande dependência do estado da isolação para o gerenciamento da vida útil da bucha condensiva tipo OIP. Independente da origem da falha ou do defeito mostrados na Figura 3.2 podemos afirmar que dois tipos de falhas são esperadas: Ionização destrutiva no local de condições elétricas impostas acima do especificado e Sobreaquecimento dielétrico. Em ambas as situações, o dielétrico entre as camadas envolvidas tem sua capacidade isolante afetada, resultando em uma alteração em sua condutância, para valores maiores do que originalmente projetado, podendo resultar em falhas graves.

## 3.3 Conclusão

Nas pesquisas do CIGRÉ que servem de base para este capítulo fica bastante evidente a relação diretamente proporcional entre a condição da isolação da bucha e a perspectiva de vida útil da mesma.

Esta relação assume maior importância aliada a dificuldade de detectabilidade observada nos modos de falha dominantes, mostrada na Tabela 3.2, onde apenas a análise adequada da condição da sua isolação possibilita um diagnóstico satisfatório, utilizando por exemplo técnicas de medição de capacitância, fator de potência do isolamento ou ainda análise de amostras de óleo isolante da bucha.

Como será visto com detalhes nos Capítulo 5 e 6, os intervalos de tempo existentes entre as técnicas de manutenção convencionais *off-line*, juntamente com a possível evolução dos modos de falhas dominantes, indicam que a alternativa de investimento em monitoramento *on-line* deve ser levada em consideração na análise do plano de

manutenção a ser implantado nas buchas condensivas de transformadores de potência de “alto” custo atribuído ou de “grande” importância estratégica para o sistema elétrico em que os mesmos estão inseridos.

COMPONENTE	DEFEITOS ou FALHAS	MODOS DE FALHA
CORPO CONDENSIVO	Resíduos Impregnação pobre Dobras no papel Papel laminado Sobretensão Curto-circuito entre câmadas	Ionização Gases Combustíveis Avalanche Térmica
	Entrada de Impurezas Entrada de umidade Migração de tinta na isolação Sobreaquecimento no dielétrico Graxa X-wax	Disruptura dielétrica pontual
	Envelhecimento da isolação papel-óleo Instabilidade térmica no Óleo Instabilidade de gases no Óleo Saturação	Disruptura dielétrica total.
SUPERFÍCIE DO CORPO CONDENSIVO ÓLEO	Contaminação Envelhecimento	Descargas Parciais Superficial Descarga
SUPERFÍCIE INTERNA DA PORCELANA	Depósito de Impurezas Manchas condutivas	Gases Combustíveis
TAPS	Ausência de aterramento Curto-circuito	
CONDUTOR	Sobreaquecimento nos contatos. Sobreaquecimento no condutor.	Descargas Parciais Sobre aquecimento Gases Combustíveis
SUPERFÍCIE EXTERNA	Circulação de corrente na conexão superior Fendas Contaminação Descargas superficiais	Centelhamento Descargas Superficiais Externas

**Figura 3.2:** Modos de falhas em buchas OIP baseados em pesquisa realizada pelo CIGRÉ International.

# 4

## PROCESSOS DE ENVELHECIMENTO

*Saber envelhecer é a obra-prima da sabedoria e um dos capítulos mais difíceis na grande arte de viver.*

**Hermann Melville, Escritor  
Americano (1819-1891)**

### 4.1 Introdução

De acordo com o estudo do capítulo anterior, podemos afirmar que o sistema de isolação das buchas condensivas está diretamente relacionado com os seus modos de falha dominantes, ou seja, os que oferecem maior risco para o próprio equipamento ou para o sistema elétrico em que o mesmo está conectado, conforme mostra a Tabela 3.2. O desenvolvimento de estudos sobre os dielétricos comumente utilizados neste tipo de equipamento, são de fundamental importância para o entendimento dos processos de envelhecimento a que estão submetidos as buchas condensivas, já que cerca de 65% dos seus modos de falha são relacionadas ao sistema de isolação, conforme mostra a Figura 3.1.

Diante disto, este capítulo apresenta uma visão dos principais conceitos sobre os dielétricos e suas características principais como a permissividade relativa, condutividade, perdas dielétricas e rigidez dielétrica, e em seguida, é dado um maior enfoque nos materiais que convencionalmente são utilizados na fabricação de buchas, ou seja, o óleo mineral isolante e as isolações sólidas: papel e resina.

## 4.2 Dielétricos

Podemos considerar os dielétricos como sendo substâncias nas quais os elétrons estão fortemente ligados aos seus átomos individuais e portanto não podem participar do processo de condução elétrica. Os dielétricos, ou também conhecidos como materiais isolantes, se caracterizam por oferecerem uma considerável resistência a passagem de corrente elétrica e seu comportamento é baseado em suas propriedades físicas, sendo que para uma melhor compreensão do seu funcionamento, é necessário um aprofundamento nestas características.

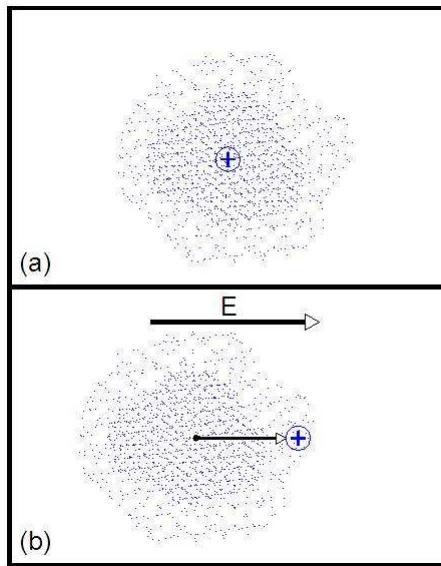
A afirmação realizada no parágrafo anterior, que destaca a forte ligação entre os elétrons não significa que a mesma não pode ser alterada sob a presença de um fator externo que modifique esta estrutura. Quando da utilização de dielétricos em aplicações que envolvem eletricidade, o mesmo está exposto invariavelmente a um campo elétrico que dependendo de sua intensidade pode interferir em sua estrutura, deslocando ligeiramente o centro das cargas positivas e negativas das moléculas, provocando um afastamento entre as mesmas e o surgimento de dipolos elétricos.

### 4.2.1 Dipolos Elétricos

Conforme dito na seção anterior, os dipolos elétricos são decorrentes de um arranjo assimétrico das cargas positivas e negativas dos átomos ou moléculas, que geralmente são concêntricas, ou seja, possuem seu centro de carga coincidente, mas que quando polarizados por um campo elétrico podem ter esta estrutura modificada, formando os dipolos induzidos, como também são conhecidos. A Figura 4.1(a) mostra um átomo representado pelo seu núcleo positivamente carregado e sua nuvem eletrônica difusa de carga negativa. Observe que os centros de carga positiva e negativa coincidem. Na Figura 4.1(b) quando o átomo é colocado em um campo elétrico externo, as cargas positivas e negativas são atraídas em sentidos opostos e os centros de cargas positiva e negativa não mais coincidem. O átomo, portanto, adquire um momento dipolo induzido [21] [22].

Esta polarização de suas partículas elementares quando sujeita a um campo elétrico externo é uma propriedade fundamental dos dielétricos e pode ocorrer de duas maneiras [23].

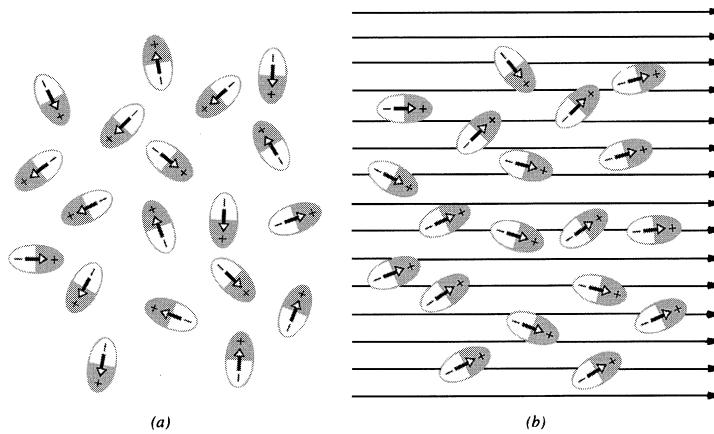
Podemos definir como sendo uma das formas de polarização, o deslocamento rever-



**Figura 4.1:** Átomo com um momento de dipolo induzido: (a) Ausência do campo elétrico; (b) Sob a presença do campo elétrico  $E$ ;

sível dos centros das cargas positivas e negativas na direção do campo elétrico externo aplicado, quando o dielétrico é formado por átomos que não apresentam momento dipolar conforme visto na Figura 4.1.

A segunda forma de ocorrer o fenômeno da polarização de um dielétrico é quando o mesmo for constituído de partículas elementares (elétrons, prótons,...) que por si só já são dipolos, como por exemplo as moléculas, que devido a sua constituição química já são dotadas de cargas negativas e positivas não-concêntricas. Neste caso, a ação do campo elétrico tenderá a orientar as partículas de acordo com a orientação do campo elétrico externo. Outra observação a ser feita é que, quanto maior for a intensidade deste campo, maior será a orientação destas partículas elementares e, consequentemente, mais acentuada será a elevação de temperatura devido a transformação do trabalho em calor. Na Figura 4.2(a) pelo fato das moléculas estarem em constante agitação térmica, observa-se que o alinhamento é desordenado. Porém, observa-se na Figura 4.2(b) que a aplicação de um campo elétrico leva a um alinhamento parcial dos dipolos, não sendo completo, pela mesma influência da agitação térmica das moléculas [21].



**Figura 4.2:** Polarização de um dielétrico: (a) Ausência do campo elétrico; (b) Sob a presença do campo elétrico;

#### 4.2.2 Constante Dielétrica

Uma importante aplicação da utilização das propriedades de um dipolo elétrico é observada quando um isolante se encontra entre duas placas condutoras, entre as quais existe uma diferença de potencial que produz um campo elétrico, orientando estas moléculas na mesma direção do mesmo, conhecido como capacitor. A capacidade é obtida através da razão entre a quantidade de carga em uma das placas pela diferença de potencial entre as mesmas, obtida pela sua fórmula mais convencional, mostrada na Equação 4.1.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (4.1)$$

Um outra forma de calcular a capacidade seria utilizando a permissividade do meio entre as placas condutoras, como mostra a equação 4.2.

$$C = \frac{\varepsilon \times A}{l}, \quad (4.2)$$

em que:

- ✓  $\varepsilon$  é a permissividade do meio dielétrico,  $A$  seria a área da placa e  $l$  a distância entre as placas condutoras.

Para o caso do meio dielétrico existente ser o vácuo, é utilizado  $\varepsilon_0$  que tem seu valor adotado como sendo  $8,85 \times 10^{-12}$  Farad/metro.

Partindo desta segunda forma, na qual se utiliza as permissividades dos meios dielétricos, de posse do valor de carga de um capacitor qualquer, com dielétrico entre as placas condutoras, e com a carga de um capacitor onde o meio seja o vácuo, chegamos a uma importante propriedade dos dielétricos conhecida como constante dielétrica ou permissividade relativa, definida pela Equação 4.3.

$$\varepsilon_r = \frac{Q}{Q_0}. \quad (4.3)$$

A constante dielétrica também pode ser obtida através da razão entre as energias armazenadas pelo capacitor nas duas situações mencionadas, ou seja, com um meio dielétrico e no vácuo, conforme mostra a Equação 4.4.

$$\varepsilon_r = \frac{\frac{1}{2} \times C \times V^2}{\frac{1}{2} \times C_0 \times V^2}. \quad (4.4)$$

Esta energia armazenada pelo capacitor refere-se ao trabalho realizado pelo campo elétrico, no deslocamento das cargas positivas e negativas do meio dielétrico e é definida como sendo a polarização do dielétrico, conforme visto na Subseção 4.2.1 [22].

Concluindo, podemos afirmar baseados nas Equações mostradas 4.3 e 4.4, que a capacidade de armazenar energia de um capacitor está relacionada diretamente com a constante dielétrica ( $\varepsilon$ ) do preenchimento utilizado entre as sua placas condutoras e, consecutivamente ligada, com a polarização deste dielétrico. Como exemplo, a Tabela 4.1 ilustra valores de constantes dielétricas para alguns materiais, onde percebe-se que quanto mais próximo da unidade, melhor a sua condição para aplicação em capacitores.

**Tabela 4.1:** Valores de constantes dielétricas para alguns elementos

Material	Constante dielétrica( $\varepsilon$ )
Água	79,5
Óleo Mineral Isolante	2 - 2,5
Gases isolantes	1

Outra consideração relevante é que o óleo mineral isolante, bastante utilizado para isolação de equipamentos elétricos, possui uma característica bastante adequada para a sua utilização, que é a baixa ou nula variação de  $\varepsilon$  em temperaturas entre 20°C e 100°C, garantindo sua isolação adequada, apesar de possíveis variações existentes, comuns em sua operação normal [24].

#### 4.2.3 Condutividade no dielétrico

A condutividade de um material ( $\sigma$ ) é definida como sendo a razão entre a sua densidade de corrente e o campo elétrico a que o mesmo está exposto, conforme mostra a Equação 4.5.

$$\sigma = \frac{J}{E}. \quad (4.5)$$

Em um dielétrico ideal espera-se que não haja densidade de corrente mesmo sob efeito de um campo elétrico, portanto, assumindo valor nulo, ou seja, como a resistividade de um material é o inverso de sua condutividade seu valor seria infinito, o que na realidade não se verifica. Os materiais isolantes quando submetidos ao esforço a que estão especificados possuem um certo valor de condutividade, suficientemente baixo, de modo a permitir a sua utilização como um isolante adequado a sua finalidade. Na prática observa-se que em um dielétrico real, quando sob efeito de um campo elétrico, apresenta valores de condutividade devido a presença de correntes, que são conhecidas como correntes de fuga e são classificadas de duas formas [22]:

**Volumétricas ou transversais:** Correntes que atravessam o corpo(volume) do material dielétrico e estão intrinsecamente relacionadas à natureza do material, suas impurezas e falhas estruturais. O valor encontrado destas correntes no material, serve de referência para avaliação do estado do mesmo ao longo de sua vida útil.

**Superficiais:** Correntes que circulam pela superfície do material dielétrico e estão intrinsecamente relacionadas à natureza da superfície (porosa ou fibrosa) do material, bem como a limpeza da mesma. O depósito de impurezas, juntamente com a presença de umidade, cria caminhos superficiais para a condução destas correntes indesejáveis.

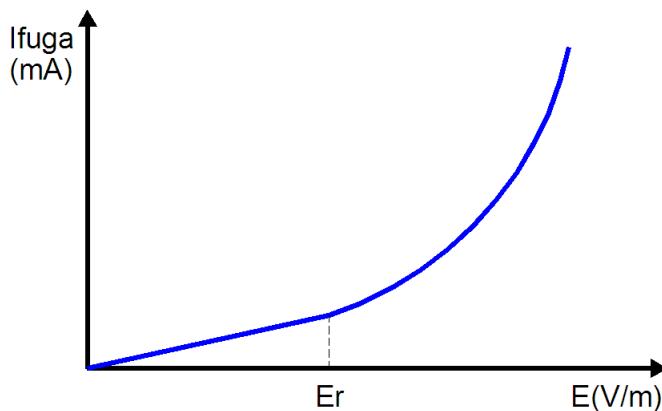
Uma observação interessante é que com a elevação da temperatura, há uma diminuição na resistividade do material, ou seja, eleva-se a sua condutividade. Um exemplo deste fenômeno acontece com o óleo mineral isolante que à medida que a sua temperatura aumenta, diminui a sua viscosidade, que é a resistência que o óleo oferece ao próprio escoamento e está intrinsecamente ligado a transferência de temperatura. Com isso aumenta-se a probabilidade de colisão das moléculas com a elevação da temperatura, e consecutivamente o seu grau de dissociação, resultando em maiores valores de

correntes de fuga volumétricas [25]. A Tabela 4.2 mostra as variações de condutividade elétrica ( $\gamma$ ) volumétrica de um determinado óleo mineral isolante, quando associado ao aumento de temperatura e consecutiva diminuição da viscosidade ( $\eta$ ) [23].

**Tabela 4.2:** Valores de Condutividade Elétrica de um Líquido Isolante.

T°C	$\gamma [\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}]$	$\eta [\text{Poise}]$
20	$1,5 \times 10^{-13}$	0,40
34	$7,0 \times 10^{-13}$	0,22
49	$1,6 \times 10^{-12}$	0,13
64	$2,8 \times 10^{-12}$	0,08
74	$4,1 \times 10^{-12}$	0,06

Na prática, a elaboração do projeto do sistema de isolamento de um equipamento é especificado de forma tal que o seu isolamento permaneça com suas propriedades de viscosidade e condutividade praticamente constantes no intervalo de variação de temperatura, em condições normais de operação.



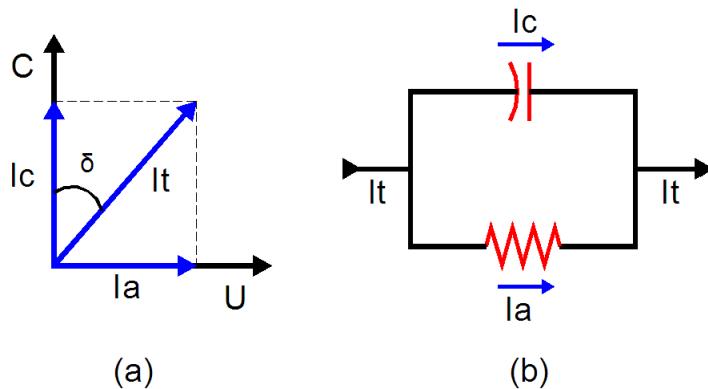
**Figura 4.3:** Curva de corrente de fuga quando da presença de campo elétrico. O ponto  $E_r$  denota a máxima intensidade do campo, na qual a relação linear se mantém.

Outra consideração interessante é que sob a presença de elevados campos elétricos ( $10 \times 10^4$  a  $10 \times 10^5$  V/m) as correntes de fuga volumétricas não mais obedecem a linearidade da lei de Ohm, conforme ilustra a Figura 4.3, já que sob tais condições também acontece uma maior concentração de íons livres.

#### 4.2.4 Perdas Dielétricas

Conforme visto anteriormente, nos dielétricos reais existem perdas devido a correntes de fuga volumétricas que interferem no funcionamento adequado dos mesmos. Além destas, outros fatores estão associados as perdas dielétricas, como por exemplo, as causadas pela perda de energia na polarização direcional do dielétrico em forma de calor, bem como pela fricção das moléculas com momento dipolar durante este fenômeno [24].

Como podemos afirmar que praticamente um dielétrico atua como um capacitor real, os seus valores de perda podem ser determinados entre duas placas alimentadas, entre as quais o mesmo é inserido. A Figura 4.4 representa um circuito equivalente do dielétrico, quando de sua aplicação em sistemas de correntes alternadas (senoidal).



**Figura 4.4:** Diagrama vetorial (a) e circuito equivalente (b) de um dielétrico real.

Analizando o diagrama vetorial da Figura 4.4(a), observa-se que  $I_t$  é a corrente total recuperada quando da remoção do campo elétrico e que a mesma é resultado da soma vetorial entre a corrente de perdas do dielétrico ( $I_a$ ), que se encontra no mesmo eixo da tensão imposta ao mesmo ( $U$ ) sendo portanto resistiva e a componente capacitativa ( $I_c$ ) da corrente total se encontra defasada em  $90^\circ$ . Em um dielétrico ideal, a componente  $I_a$  é nula, e portanto o ângulo  $\delta$  é igual a zero, porém na prática sempre que um dielétrico se encontra sob a presença de um campo elétrico, existe um valor associado às perdas dielétricas ( $I_a$ ).

Analiticamente, podemos explicar este fenômeno através da teoria de circuitos elétricos onde a potência ativa dissipada pelo circuito equivalente da Figura 4.4 é dada por [23]:

$$P = U \times Ia \quad (4.6)$$

A corrente de perdas do dielétrico dada por:

$$Ia = Ic \times \operatorname{tg}\delta, \quad (4.7)$$

e a corrente capacitativa dada por:

$$Ic = \omega \times U \times C. \quad (4.8)$$

Tem-se, a expressão da potência de perdas dielétricas em um circuito alternado senoidal:

$$P = \omega \times C \times U^2 \times \operatorname{tg}\delta, \quad (4.9)$$

em que,  $\omega = 2 \times \pi \times f$ , sendo  $f$  é a frequência do sistema na qual o dielétrico está inserido.

Percebe-se através desta expressão geral que as perdas dielétricas estão ligadas diretamente a quatro fatores:

- A frequência do sistema;
- A tensão do sistema;
- A capacidade equivalente do dielétrico;
- Ao ângulo de perdas do dielétrico.

Esta propriedade é bastante utilizada como parâmetro de medição do estado da isolação em equipamentos elétricos em geral, como será mostrado nos Capítulos 5 e 6.

#### 4.2.5 Rigidez Dielétrica

Pode-se definir rigidez dielétrica de um material isolante como sendo a resistência a passagem interna de corrente quando ao mesmo é aplicada uma tensão. Quando da presença de um campo elétrico com valores de tensão acima do especificado para o material isolante, as moléculas do dielétrico tendem a ser polarizadas de forma que a corrente de fuga volumétrica aumente consideravelmente, podendo ocasionar um arco

elétrico e consequente perfuração do material, o que é definido como disrupção dielétrica [22].

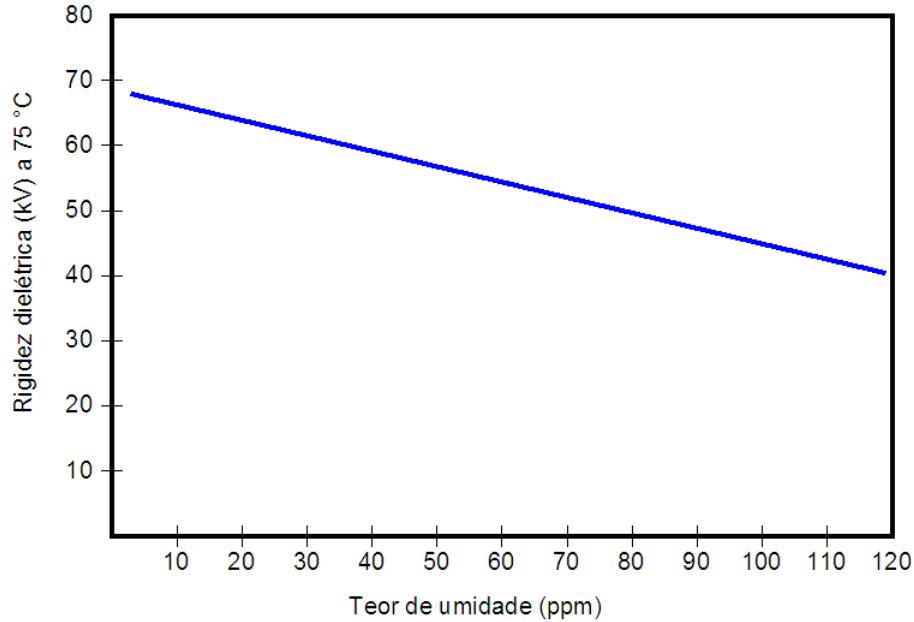
Para os casos dos dielétricos sólidos esta disrupção tem natureza irreversível e geralmente causa uma destruição parcial ou total do material isolante. Já nos materiais líquidos ou gasosos, após o término do arco elétrico, o mesmo readquire sua condição isolante.

O valor de rigidez dielétrica é dado pela razão da tensão sobre a unidade de espessura adotada no dielétrico, e pode ser definido pela Equação 4.10.

$$E_d = \frac{U_{crit}}{h}, \quad (4.10)$$

em que,  $U_{crit}$  é a maior tensão antes da ruptura dielétrica e  $h$  é a espessura do material dielétrico.

A presença de umidade influencia consideravelmente na rigidez dielétrica de um material, como visto a Figura 4.5 que mostra a influência do teor de umidade em um determinado óleo mineral diminuindo consideravelmente sua condição isolante [9].



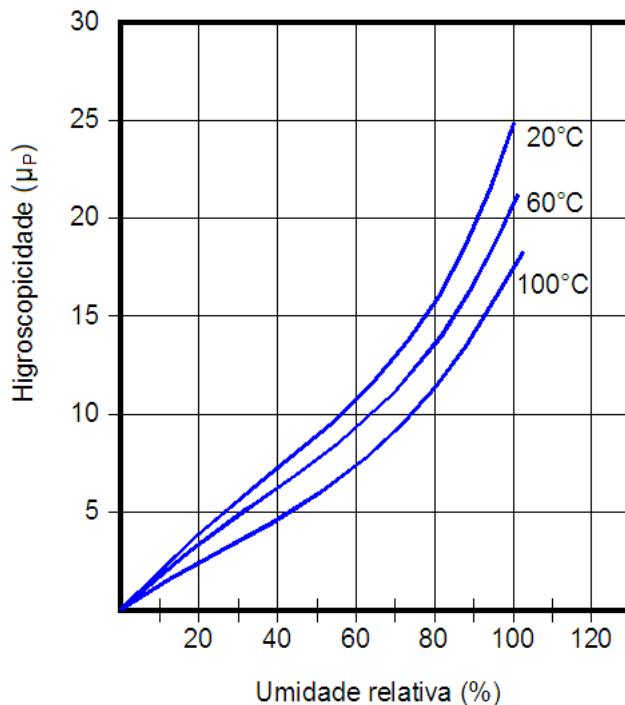
**Figura 4.5:** Relação entre teor de umidade e rigidez dielétrica de um determinado óleo isolante.

#### 4.2.6 Higroscopicidade

Podemos definir higroscopicidade de um material dielétrico como sendo a umidade de equilíbrio ( $\mu_p$ ) do mesmo em contato com o ar a 20°C e 100% de umidade relativa [23]. Este valor é obtido partindo-se de um corpo de prova do material seco e expondo-o até o seu equilíbrio, que geralmente não ultrapassa 24 horas de exposição.

A higroscopicidade de um material dielétrico é uma de suas mais importantes características, pois a absorção de umidade resulta em uma sensível perda das propriedades isolantes do mesmo. O grau de absorção de umidade varia de acordo com a temperatura, tempo de exposição e umidade relativa do ar em que o material está inserido.

A Figura 4.6 mostra a influência da umidade relativa ( $\varphi$ ) sobre o equilíbrio de umidade ( $\mu_p$ ) de um mesmo dielétrico sobre diferentes temperaturas. Percebe-se que, sob uma mesma umidade relativa, quanto menor a temperatura, maior será o acréscimo no estabelecimento do equilíbrio da umidade, ou seja em sua higroscopicidade e consecutivamente maior será a absorção de umidade através do mesmo [23].



**Figura 4.6:** Influência da umidade relativa ( $\varphi$ ) sobre o equilíbrio de umidade ( $\mu_p$ ).

## 4.3 Isolação Líquida: Óleo Mineral isolante

O óleo mineral isolante se constitui na principal, mais antiga e ainda mais utilizada isolação líquida para equipamentos elétricos e esta realidade não é diferente para aplicação em buchas como visto no Capítulo 2. Sua composição é oriunda do petróleo e suas características se adaptam corretamente para este tipo de finalidade. Para melhor compreender seu comportamento, bem como seu processo de envelhecimento, faz-se necessário um detalhamento maior de sua composição e características principais.

### 4.3.1 Composição e Refinamento

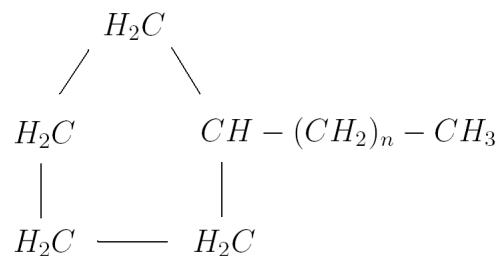
O óleo mineral isolante é derivado do petróleo e pode ser classificado como de base parafínica ou naftênica, variando de acordo com a natureza do petróleo ou do seu processo de refinamento. As reservas existentes de petróleo da base naftênica correspondem a apenas 3% do total disponível.

O óleo mineral isolante de origem parafínica é formado por hidrocarbonetos saturados de cadeia normal e sua fórmula geral pode ser representada na Figura 4.11:

$$H_3C - (CH_2)_n - CH_3, \quad (4.11)$$

com  $(.)_n$  variando de 2 a 27.

O óleo mineral cicloparafínico ou naftênico, utilizado na grande maioria dos equipamentos elétricos, é formado por hidrocarbonetos constituídos por moléculas com 1 a 6 anéis naftênicos e cadeias laterais parafínicas abertas. Sua classificação varia de acordo com o número de anéis de sua constituição. Um exemplo de um óleo naftênico monocíclico, ou seja formado por um anel naftênico, é representado em 4.7 [24].



**Figura 4.7:** Composição Química Hidrocarboneto Naftênico.

#### 4.3.2 Características Principais e Ensaios em Óleo Mineral Isolante.

O óleo mineral isolante possui propriedades físicas que o caracterizam e credenciam para sua utilização em equipamentos elétricos. A norma IEEE C57.106 trata sobre as características do óleo isolante, bem como estabelece critérios para interpretação dos testes comumente realizados [26]. Os ensaios usualmente utilizados pelas empresas concessionárias são listados a seguir:

##### **Rigidez Dielétrica**

Conforme explicado na Subseção 4.2.5, verifica a resistência da passagem interna de corrente quando ao óleo isolante é aplicada uma tensão.

##### **Índice de neutralização ou acidez**

Verifica a intensidade de compostos ácidos presentes no óleo mineral, oriundos das quebras das cadeias de moléculas naftênicas ou parafínicas. Recebe o nome de índice de neutralização, devido a utilização de um composto formado por hidróxido de potássio (KOH) para neutralização dos compostos ácidos.

##### **Tensão interfacial**

Define-se como sendo uma força de atração entre as moléculas existentes na superfície de separação entre a água e o óleo. Tem relação direta com a acidez, já que os compostos ácidos oriundos da decomposição diminuem esta força de atração, ou seja, quanto maior a acidez do óleo isolante, menor sua tensão interfacial.

##### **Fator de Potência**

Conforme visto na Subseção 4.2.4, está relacionado com as perdas dielétricas do óleo isolante.

##### **Teor de umidade**

Indica a quantidade de umidade no óleo isolante, e conforme visto na Subseção 4.2.6, tem relação inversamente proporcional a rigidez dielétrica do mesmo.

##### **Teor de inibidor de oxidação**

Indica a quantidade de inibidor de oxidação utilizado nos processos de regeneração de óleo isolante. Atualmente, o fornecimento de óleo novo também possui este aditivo para inibir a oxidação.

##### **Viscosidade**

Entende-se como sendo a resistência que o óleo oferece ao escoamento contínuo sem turbulência ou inércia. A aplicação do óleo mineral isolante depende bastante da

viscosidade do mesmo, visto que a transferência de calor está intrinsecamente ligada a esta característica. Em equipamentos elétricos, os óleos utilizados devem ter uma viscosidade baixa, ou seja, serem o mais líquidos possíveis por dois aspectos:

- Possibilitar uma melhor impregnação na isolação sólida tornando mais eficiente o conjunto dielétrico projetado, diminuindo a formação de bolhas de ar e água em produtos fibrosos, como o papel por exemplo.
- Possibilitar a adequada transferência de calor dos seus condutores para o corpo dos equipamentos. Estes geralmente são dotados de algum sistema de refriamento para que possa refrigerar o óleo e por consequência, os condutores através da mesma transferência de temperatura.

Como exemplo de aplicação destes ensaios, a Tabela 4.3 mostra os valores limites de óleo isolante usado, independente de que tenha passado por processo de regeneração, para transformadores de potência por nível de tensão [26].

**Tabela 4.3:** Valores limites de ensaios realizados em óleo isolante usado, regenerado ou não, para transformadores de potência.

Ensaios	Método	Valor limite por classe de tensão		
		≤ 69kV	> 69kV a < 230kV	> 230kV
Rigidez Dielétrica (kV mínimo)	ASTM D1816-97	23 (40)	28 (47)	30 (50)
Fator de Potência (%)	ASTM D924-99	0,5	0,5	0,5
25 °C				
100 °C		5,0	5,0	5,0
Tensão Interfacial (mN/m mínimo)	ASTM D971-99	25	30	32
Acidez (mg KOH/g máx.)	ASTM 974-02	0,2	0,15	0,10
Teor de umidade (ppm a 70 °C)		55	30	15
Teor de inibidor	ASTM D2668-96	0,09% mínimo		
Viscosidade (CentiStokes, máx.)		11		

O óleo isolante possui algumas características relacionadas com a temperatura de operação, e as mesmas são listadas a seguir:

### **Ponto de fulgor**

É a menor temperatura na qual se formam vapores (gases) inflamáveis na superfície do óleo e é identificado pela formação de um lampejo quando da presença de uma chama. Esta chama formada pelos gases, tende a se extinguir imediatamente após o afastamento da chama de ignição.

Esta temperatura pode ser oriunda tanto de falta de resfriamento ao equipamento elétrico, como da ocorrência de correntes de alto valor devido a curto-circuitos no sistema em que está inserido o mesmo.

### **Ponto de queima**

É a temperatura superior (geralmente cerca de 30 a 50°C) a do ponto de fulgor, na qual a chama não se extingue mais.

### **Ponto de ignição**

É o valor de temperatura no qual os gases se incandescem por si só.

### **Ponto de fluidez**

É a temperatura mais baixa onde o óleo deixa de escorrer sob a ação do peso próprio, também conhecido como ponto de solidificação.

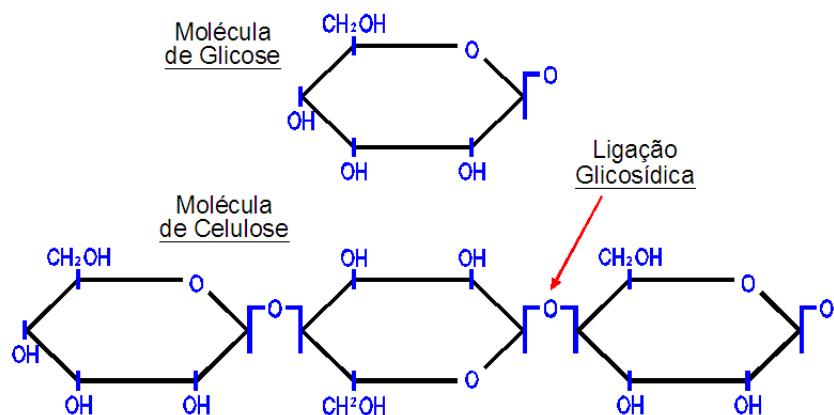
Percebe-se que a contaminação ou a deteriorização do mesmo não exerce influência sobre esta característica, que está ligada a origem de sua composição, ou seja, se parafínica ou naftênica. Embora estes valores variem razoavelmente devido ao processo de refinamento, podemos afirmar que os óleos naftênicos possuem um ponto de fluidez bem inferior (aproximadamente -40°C) que os de origem parafínica, que têm valores próximos à -15°C.

## **4.4 Isolação sólida: Papel**

Um isolante frequentemente utilizado em buchas condensivas é o papel que é constituído da fibra da celulose e quase que invariavelmente extraído de madeira, ou seja, fonte vegetal. Sua aplicação geralmente combinada com outros materiais dielétricos, óleo mineral ou resina, tem grande utilização na isolação dos equipamentos elétricos em geral, incluindo as buchas condensivas.

#### 4.4.1 Constituição Química

A fibra de celulose consiste na formação de um conjunto de moléculas de celulose de diferentes tamanhos, colocadas lado a lado. Por sua vez, a celulose é um polímero linear de moléculas de glicose, ligadas através de uma ligação glicosídica, conforme mostrado na Figura 4.8. Cada molécula de celulose, quando nova, possui de 1000 a 1400 anéis de glicose, sendo que cada fibra de celulose possui muitas destas cadeias de monômeros.



**Figura 4.8:** Fórmula estrutural da glicose e da celulose. Detalhe da ligação glicosídica na molécula de celulose.

As vantagens oferecidas pelos materiais fibrosos, dentre eles o papel destinado a indústria elétrica, são a alta resistência mecânica, sua flexibilidade, baixo custo e facilidade na manufatura. A grande desvantagem da utilização de papel como isolante é a sua elevada higroscopicidade, já que sua matéria prima básica, a celulose, é um composto orgânico constituído de 46% de oxigênio, 40% de carbono e 6% de hidrogênio. Esta higroscopicidade é explicada por se tratar de um hidrato de carbono, como visto na Figura 4.8, cuja a fórmula é  $C_6H_{10}O_5$ , com três radicais polares de hidroxila -OH. Em sua forma natural, a absorção de umidade em um fibra de celulose pode chegar a 50% de seu volume total [22].

Outra desvantagem considerável é sua pouca resistência à temperatura em seu estado natural. Devido a esta limitação a NBR5034/1989 [7] estabelece limites de temperatura, ou de elevação da mesma, para operação normal, como por exemplo para buchas OIP, em que o limite superior da média diária não pode exceder 105°C e sua elevação sobre a temperatura ambiente, por consequência, não deve ultrapassar 90°C

para o ponto mais quente das partes metálicas da bucha condensiva.

Diante do exposto para sua aplicação em equipamentos elétricos como isolação e sabendo-se que em ensaios realizados apenas 40% de um dado volume de papel é composto de fibras, invariavelmente o mesmo é impregnado com alguma substância isolante, geralmente óleo mineral ou resina, obtendo então as características ideais para esta finalidade.

O papel mais utilizado com isolante em buchas condensivas, bem como em toda a indústria elétrica, é o papel kraft, já que é econômico e convenientemente tratado apresenta boas propriedades mecânicas e elétricas [22]. O papel kraft quando submetido à um processo químico de estabilização térmica passa a ser conhecido como papel termoestabilizado, possibilitando sua operação normal em uma temperatura cerca de 10°C maior que o papel convencional, ou seja possuindo um melhor rendimento térmico, aumentando sua vida útil.

#### 4.4.2 Grau de Polimerização Molecular (GP)

A quantidade média de anéis de glicose interligados em uma cadeia como indicado na Figura 4.8 é denominada Grau de Polimerização Molecular (GP). Como o comprimento destas moléculas é o que garante a resistência mecânica de um material feito de celulose, o grau de polimerização do material dá uma medida indireta de suas características mecânicas, como por exemplo a resistência à tração, o que pode ser associado a sua funcionalidade ou a vida útil do material [27].

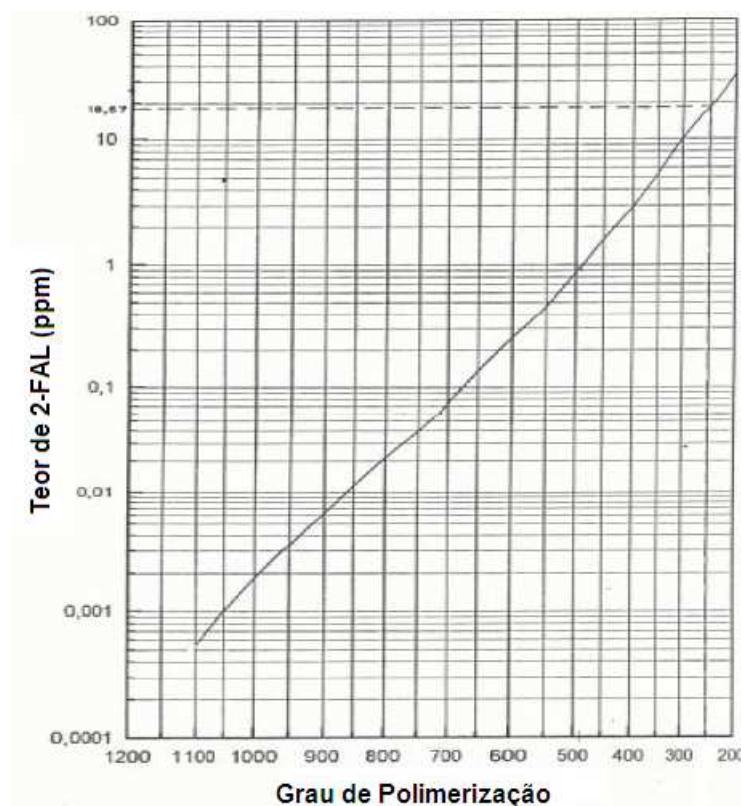
O valor inicial de GP da celulose é cerca de 1200. Os processos de secagem da isolação e tratamento do óleo a ser utilizado na impregnação em equipamentos elétricos que utilizam papel impregnado com óleo (como por exemplo transformadores de potência ou buchas condensivas tipo OIP) reduzem o GP da celulose até valores próximos a 900. Além deste processo, o enfraquecimento natural da união dos anéis de glicose, devido a reação com o oxigênio, contribui prioritariamente para a redução da GP, como será visto mais adiante na Subseção 4.6.1.

Para GPs superiores a 500, a resistência mecânica do papel é praticamente independente do valor de GP, mas à medida que o GP decresce, na gama de 500 a 200, a resistência mecânica é reduzida até cerca de 50% do valor inicial. O critério baseado no valor de GP, considera para o fim de vida útil do papel, valores entre 100 e 200,

embora não haja consenso sobre o valor específico a considerar [28].

#### 4.4.3 Furfuraldeído (2-fal)

A técnica de cromatografia líquida de alto desempenho (HPLC) foi introduzida por P.J. Burton, da *Central Electricity Generating Board* (CEGB) do Reino Unido, nas empresas do setor elétrico durante a década de 80. Esta técnica permite determinar a concentração de determinados compostos de furanos dissolvidos no óleo isolante de equipamentos elétricos, oriundos especificamente da degradação do papel isolante dos mesmos [29] [30].



**Figura 4.9:** Relação entre GP e 2-fal estabelecida por P.J.Burton.

Durante esta fase de implementação, Burton concluiu que o composto furano 2-furfuraldeído, mais conhecido como 2-fal ou furfural, é o mais facilmente detectado nos ensaios. A partir desta constatação estabeleceu uma relação entre o teor de 2-fal dissolvido no óleo isolante e o grau de polimerização do papel isolante, conforme mostra a Figura 4.9 [30].

A grande vantagem desta técnica de 2-fal com relação a medição do grau de polimerização do papel isolante é sua facilidade de análise, já que, em muitas situações com o equipamento energizado e disponível, basta retirar uma amostra de 20 ml de óleo isolante para a realização do ensaio, enquanto que para determinar a do GP é necessário uma amostra de papel isolante do equipamento, sendo necessária a sua indisponibilidade para o sistema.

Apesar do exposto esta técnica ainda não é tão difundida entre as empresas do ramo por dois motivos básicos: perda do histórico do acompanhamento quando da utilização de técnicas de regeneração do óleo isolante e ainda o fato de que papel termoestabilizado não tem produção acentuada de furfural.

#### 4.5 Isolação sólida: Polímeros (Resinas)

Os polímeros, também conhecidos como resinas, são inicialmente um verniz aplicado em forma líquida, passando ao estado sólido após seu processamento. Assim sendo podemos classificar este isolante como sendo uma isolação sólida.

As resinas são misturas estruturalmente complexas, de elevados peso molecular e grau de polimerização. Existe uma grande gama de tipos de resina e podem ser classificadas de algumas formas, como por exemplo sua origem, podendo ser natural ou sintética, ou mesmo com relação ao seu comportamento térmico, podendo ser termoplásticas, que são os polímeros que amolecem quando aquecidos, podendo se tornar líquidos e após o resfriamento retornar ao estado sólido, ou termoestáveis, que não readquirem seu estado plástico sob temperatura. No ramo da indústria elétrica atualmente somente são utilizadas resinas sintéticas e exemplos destas são listadas na Tabela 4.4, juntamente com algumas características próprias [22].

**Tabela 4.4:** Tipos de resinas sintéticas e suas características

Resina	$\epsilon$	FP	$E_d$	Observações
Cloreto de Polivinila	2 a 4	$2 \text{ a } 5 \times 10^{-2}$	300kV/cm	Revestimentos Cabos
Politetrafluoretileno	2	$1 \text{ a } 3 \times 10^{-4}$	300kV/cm	Custo elevado
Fenólica	5 a 6,5	$2 \times 10^{-3}$	180kV/cm	Massa de enchimento
Epoxi	3,5	$3 \text{ a } 5 \times 10^{-1}$	var.	Buchas Condensivas

Em que,  $\epsilon$  é a rigidez dielétrica, FP é o fator de perdas e  $E_d$  é a rigidez dielétrica

do tipo da resina.

A resina epoxi se caracteriza por uma aderência a outros materiais sólidos, é inodora, termicamente estável até temperaturas em torno de 130°C e tem higroscopidez desprezível [23]. É amplamente utilizada como isolante em buchas de tecnologia RIP e RBP, por diversos fabricantes [31] [32].

Segundo T. Isogai *et al.* em [33], a maior preocupação durante o processo de fabricação de buchas condensivas RIP é a prevenção contra a formação de vazios na isolação. Existe uma preocupação a ser destacada em isolações cilíndricas desta composição, como é o caso das buchas, que é a diferença entre o coeficiente de redução ocorrido durante o processo de endurecimento da resina e o de dilatação térmica, provocando uma tensão na direção radial, podendo resultar os vazios indesejáveis reduzindo a capacidade de isolação. Para evitar esta situação, recomenda-se a utilização de papel de fácil impregnação e boa flexibilidade, bem como resina epoxi com baixa viscosidade. A Tabela 4.5 mostra especificações básicas definidas para a fabricação deste tipo de isolação na fabricação de buchas [23].

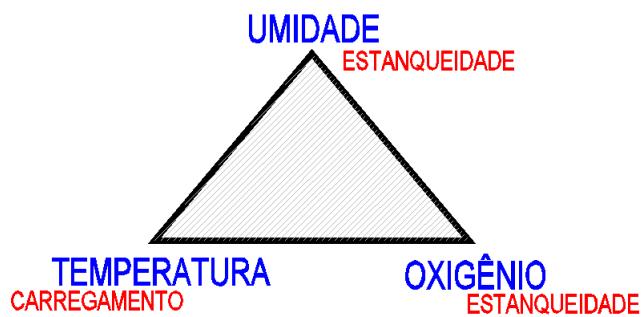
**Tabela 4.5:** Especificações para Fabricação de Buchas Tecnologia RIP.

Impregnação	À Vácuo (0,1 a 0,01 mmHg)
Modelagem	À Pressão (10 a 100 kg/cm <sup>2</sup> )
Material Base	Papel Kraft
Resina	Epoxi

## 4.6 Processos de Envelhecimento das Buchas

Podemos afirmar, em resumo, que os processos de envelhecimento a que um material isolante de um determinado equipamento elétrico está exposto podem ser controlados com a minimização da tríade de três agentes representados na Figura 4.10.

Vários fatores e características que vão desde as fases de projeto, fabricação, ensaios de fábrica, transporte, armazenamento, montagem, operação e manutenção podem contribuir para acelerar ou minimizar os efeitos da umidade, temperatura e teor de oxigênio na degradação do papel. Os três principais mecanismos de degradação do óleo, do papel, da resina e, por conseguinte, da suportabilidade dielétrica das buchas são:



**Figura 4.10:** Tríade de agentes de degradação do material isolante.

**Hidrólise** Reação da combinação de um material isolante com água.

**Oxidação** Reação da combinação de um material isolante com oxigênio.

**Pirólise** Decomposição de um material isolante com a temperatura.

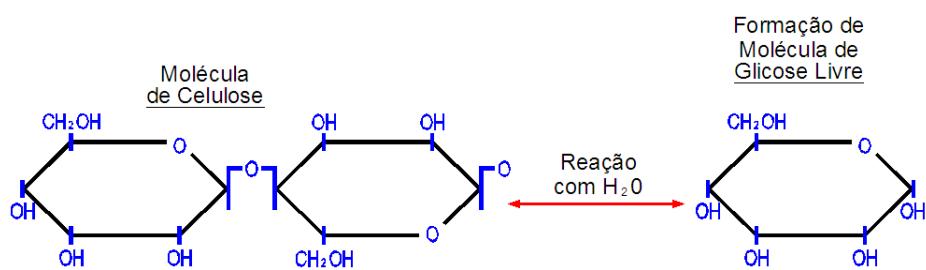
Observando a figura 4.10 têm-se uma constatação interessante, onde dois fatores, hidrólise e oxidação, são influenciados diretamente pela estanqueidade do sistema de isolação da bucha, porém a pirólise pelas condições de operação em que o equipamento está submetido, ou seja, seu carregamento [2].

#### 4.6.1 Efeito da Umidade e do Oxigênio na Isolação

As propriedades físicas e químicas do óleo e dos materiais isolantes, vistas neste capítulo, são degradadas pela contaminação de fatores externos, como por exemplo a umidade, bem como pelo seu envelhecimento através de reações químicas com o oxigênio do ar atmosférico. Portanto podemos afirmar que a água e o oxigênio são agentes aceleradores do envelhecimento da isolação de uma bucha.

A água causa a ruptura da cadeia dos anéis de glicose que compõem a fibra da celulose, pois ao afetar o átomo de oxigênio, que faz a ligação glicosídica entre os anéis, são formados dois grupos -OH, cada qual anexado a um anel de glicose, conforme pode ser visto na figura 4.11, resultando na redução do grau de polimerização, e consequentemente o enfraquecimento da fibra de celulose, reduzindo sua resistência mecânica [27]. Este fenômeno é conhecido como hidrólise.

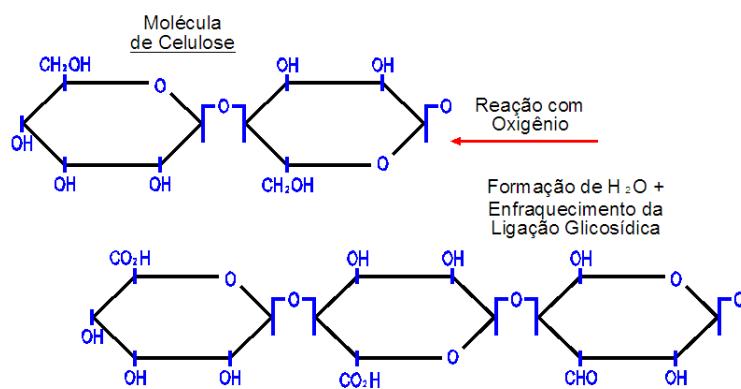
Além do impacto na isolação sólida, a presença de umidade no óleo isolante afeta diretamente a rigidez dielétrica do mesmo, conforme visto anteriormente na figura 4.5.



**Figura 4.11:** Degradção da isolação sólida por Hidrólise, formando moléculas de glicose livre e consequentemente diminuindo o GP do papel isolante.

Os átomos de carbono na molécula de celulose são atacados pelo oxigênio, formando aldeídos e ácidos, e assim como na hidrólise também ocorre o enfraquecimento da união entre os anéis de glicose, reduzindo o seu grau de polimerização (GP). Desta forma são liberados nesta reação: água, que também influenciará na hidrólise, monóxido de carbono e dióxido de carbono, este fenômeno é conhecido como oxidação. Os produtos desta reação dependem da natureza do agente de oxidação e do pH do óleo isolante, ou seja, tanto a acidez como a alcalinidade alta da isolação líquida, aumentam a taxa de oxidação [27] [34].

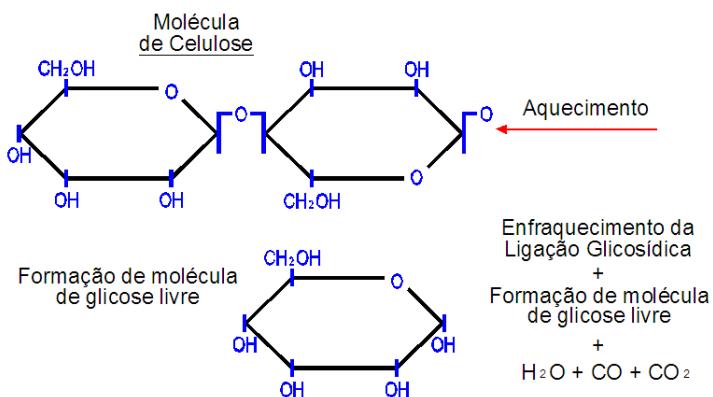
Neste processo não apenas a celulose é atacada diretamente pelo oxigênio, mas também o óleo sofre oxidação, produzindo ácidos, ésteres e outras substâncias que voltam a atacar o próprio óleo, gerando mais produtos de oxidação, formando um ciclo indesejável, conforme ilustrado na Figura 4.12.



**Figura 4.12:** Degradção da isolação sólida por Oxidação, formando  $H_2O$ , aldeídos e ácidos, resultando na redução do GP do papel isolante.

#### 4.6.2 Efeito da Temperatura na Isolação

O efeito do aquecimento da celulose, mesmo na ausência de agentes oxidantes e da umidade, tendem a quebrar a ligação glicosídica e abrir o anel de glicose. Essa reação produz moléculas de glicose livre, umidade, monóxido e dióxido de carbono e ácidos orgânicos, conforme pode ser visto na Figura 4.13. Este fenômeno conhecido por Pirólise [2], provoca danos irreparáveis no isolamento da bucha, tendo em vista o caráter irreversível das reações químicas ocorridas. Essas reações químicas, quebra das cadeias de celulose, causam a redução da capacidade das fibras de suportarem os esforços mecânicos, reduzindo a capacidade de resistir a curto-circuito, enfraquecendo também a rigidez dielétrica, e, consequentemente, o seu tempo de vida útil.

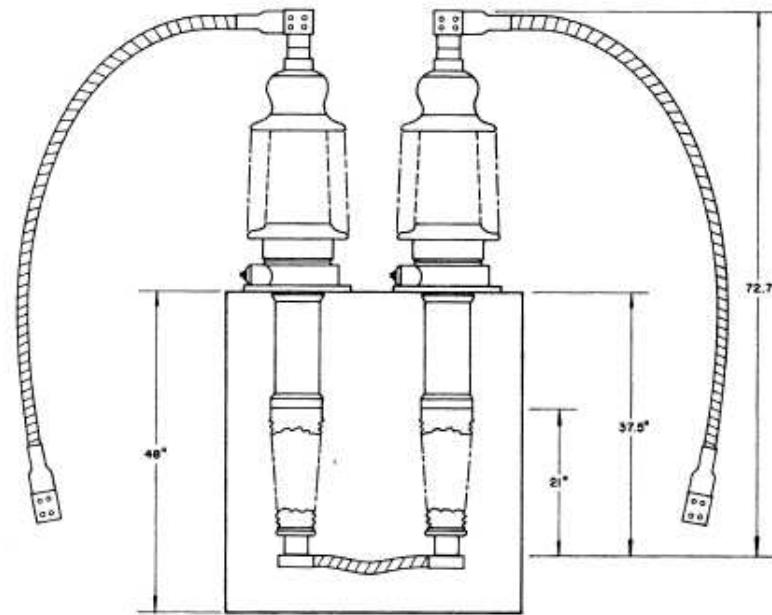


**Figura 4.13:** Degradação da isolação sólida por Pirólise, reduzindo o GP do papel isolante.

A temperatura de uma bucha condensiva está intrinsecamente ligada com dois fatores, a sua condução de corrente e a temperatura do óleo do transformador de potência em que a mesma está inserida (devido a transferência de temperatura), conforme Easley and Craghead [35] que descreve investigações realizadas em buchas condensivas com o objetivo de desenvolver e implementar um programa de teste para determinar os níveis de temperatura das mesmas quando estão sob condições de carregamento acima de seus valores nominais de corrente, avaliando as condições físicas de suas isolações após este efeito da temperatura.

O programa consiste em realizar os testes em uma bucha condensiva 69 kV com capacidade de 1200 A, conectada com outra bucha de teste com as mesmas características e imersa em um tanque preenchido com óleo isolante com temperatura controlada, conforme mostra a Figura 4.14, sob determinadas condições limites de temperatura pa-

dronizados em normas de ensaios internacionais [35].

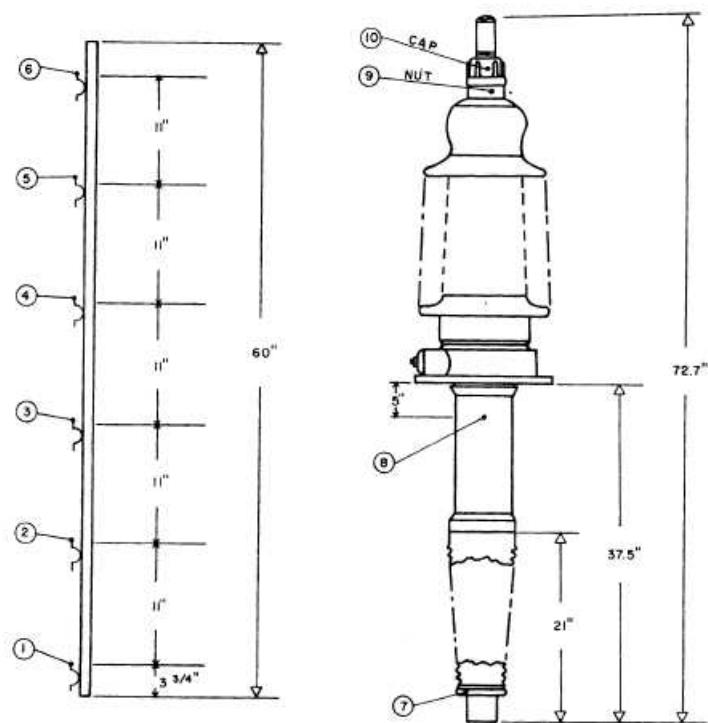


**Figura 4.14:** Configuração Básica do Teste de Comportamento Térmico em Buchas realizado por Easley and Craghead.

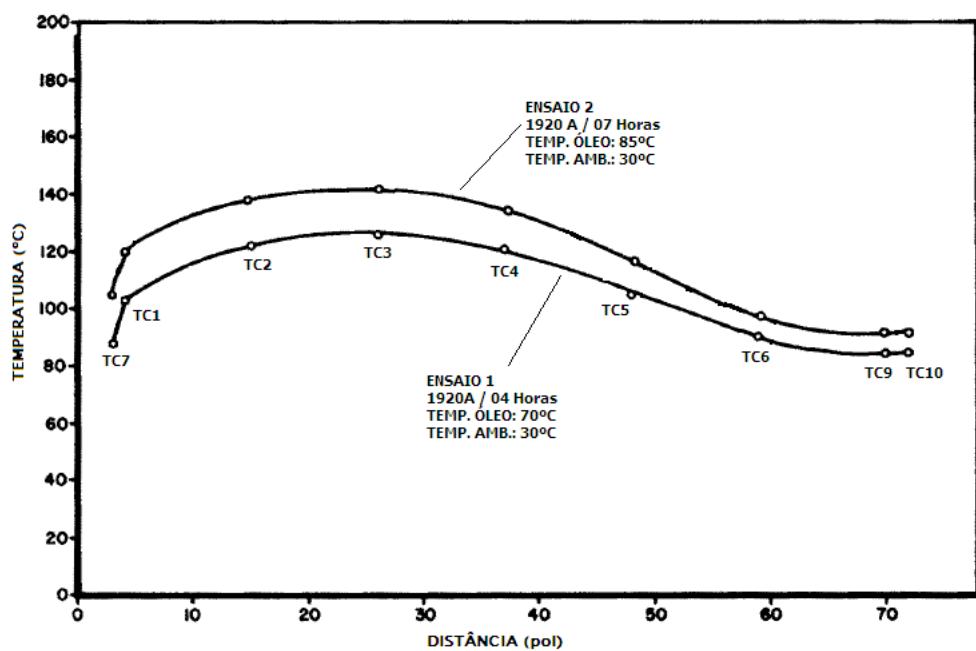
Através de sensores de temperatura inseridos no condutor central, bem como nos conectores superiores e inferiores existentes, conforme mostra a Figura 4.15, foi obtido o comportamento interno da distribuição da temperatura nas buchas [35].

Foram realizados diversos ensaios, variando a temperatura do óleo no tanque, simulando uma sobrecarga em um transformador por exemplo, assim como variando a corrente e o tempo de condução das mesmas. Curvas extraídas dos resultados obtidos de dois ensaios realizados com o comportamento térmico da citada bucha são mostradas na Figura 4.16 e como esperado, os pontos de maior temperatura (*hot spot*) são os de maior concentração de campo elétrico, ou seja, as regiões próximas a flange metálica no potencial terra.

A Tabela 4.6 traz constatações interessantes quanto ao comportamento deste dois ensaios realizados, onde nota-se que a temperatura do tanque afeta diretamente na elevação do *hot spot* da bucha, bem como o tempo em que a bucha permanece em sobrecarga também afeta na elevação de temperatura no tanque sob uma mesma condição de carregamento.



**Figura 4.15:** Disposição de Sensores na Configuração Básica do Teste de Comportamento Térmico em Buchas realizado por Easley and Craghead.



**Figura 4.16:** Curvas dos Ensaios de Comportamento Térmico de Buchas.

**Tabela 4.6:** Resultado dos Ensaios de Comportamento Térmico de Buchas.

Ensaio	Temp. Óleo	Corrente	Duração	Elevação Óleo	Elevação Hot Stop
1	70°C	1920A	4h	38°C	94°C
2	85°C	1920A	7h	53,5°C	107,5°C

Ainda neste estudo, com o intuito de avaliar o quanto uma sobrecarga prejudica a vida útil de uma bucha quando mantido por um tempo prolongado, foi realizado um ensaio com uma bucha condensiva de mesma especificação e com as mesmas conexões de teste anterior, impondo uma circulação de corrente de 2000 A, ou seja 1,66 pu de sobrecarga, obtendo um *hot spot* de aproximadamente 150°C durante 23 semanas, realizando medições de fator de potência semanalmente.

Conforme esperado, os resultados dos testes constatam o envelhecimento do dielétrico. Com relação ao envelhecimento o último quarto do enrolamento de papel (mais próximo do condutor), mostra grandes amostras de áreas escurecidas, sendo as mais próximas do condutor totalmente quebradiças, sem nenhuma resistência mecânica. Porém o restante do isolamento de papel permaneceu intacta. Foram coletadas amostras de óleo da bucha, onde constata-se produção de gases combustíveis e água oriundas da decomposição do óleo e do papel, afetando sensivelmente suas características elétricas como rigidez dielétrica, passando de 42 kV para 35 kV, e fator de dissipação alterado para 13,5%, sendo o ideal para óleo novo cerca de 0,2%.

Existem disponíveis atualmente no mercado, buchas condensivas com um sistema interno de transferência de calor entre o ponto mais quente (*hot spot*) e pontos com temperaturas mais amenas, baseado no princípio da condensação/evaporação de um fluido, que permite um aumento próximo a 50% na sua capacidade de condução de corrente, mantendo o mesmo perfil de temperatura, conforme mostra Daxion Zeng em [36] que relata testes realizados em uma bucha tecnologia RIP, utilizando como fluido a água. O desenvolvimento do estudo de buchas com estes sistemas, não faz parte do escopo deste trabalho, devido a sua quase inexistência de utilização no mercado atual.

Outros estudos sobre os efeitos da temperatura em buchas condensivas relacionando com o seu carregamento podem ser vistos em [37] e [38]. Em [39], é proposto um modelo matemático sobre o carregamento de buchas em regime permanente e transitório, na determinação dos *hot spot* das mesmas.

#### 4.6.3 Efeito de Impurezas na Isolação

A influência de impurezas oriundas do cobre na isolação sólida de buchas com papel impregnado de óleo são relatados por J. E. Castle *et al.* [40], através de inspeções realizadas em buchas condensivas e transformadores de correntes dissecados após longo tempo de operação e constatadas através do surgimento de áreas escurecidas nos enrolamentos de papel existentes. Após simulações em laboratório e baseados nos resultados encontrados das inspeções observou-se que estas regiões escurecidas são acompanhadas por cobre na forma oxidada, oriundo da corrosão das folhas metálicas inseridas nas grades capacitivas das buchas.

Análises dos enrolamentos de papel escurecidos com a presença de óxido de cobre e de sulfato de cobre, indicam que o enxofre possivelmente é resultado do óleo isolante utilizado, já a oxidação seria fruto da reação com o oxigênio dissolvido no óleo oriundo da decomposição do próprio papel, ou mesmo, da não estanqueidade do equipamento. Outra importante relação mostra que em áreas de temperaturas elevadas, surgem maior concentração das áreas escurecidas, indicando que esta decomposição da isolação necessita da associação com a temperatura.

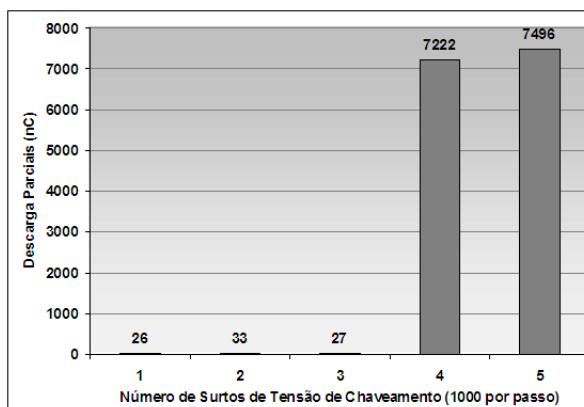
Outra importante constatação é que, segundo Vujovic *et al.*, o processo de fabricação de porcelana das buchas pode ser origem de falhas, pois em ensaios realizados após um acidente com explosão durante um processo de teste de um dado fabricante, mostra que pequenos vazios ou impurezas “inseridas” na mesma em seu processo de manufatura podem reduzir sensivelmente sua capacidade isolante em situações de sobretensões transitórias. O estudo também aponta para os procedimentos e limites nos ensaios realizados em porcelanas, que atualmente são padronizados por órgãos internacionais, que não garantem de forma segura sua suportabilidade aos esforços dielétricos citados [41].

#### 4.6.4 Efeito de Surtos de Tensão de Chaveamento na Isolação

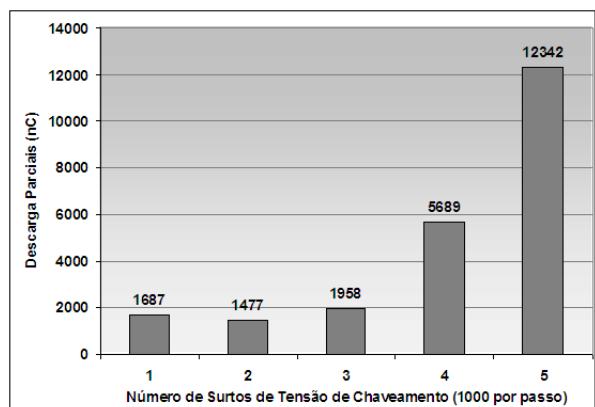
O impacto na isolação das sobretensões transitórias oriundas de chaveamento em subestações têm sido alvo de estudos detalhados em diversos equipamentos do sistema elétrico, como por exemplo, transformadores de corrente (TC) [42], de potencial capacitivo (TPC), de potência, bem como as buchas condensativas.

Um estudo desenvolvido por M. Pompili *et al.* [43] [44] mostra a relação da gera-

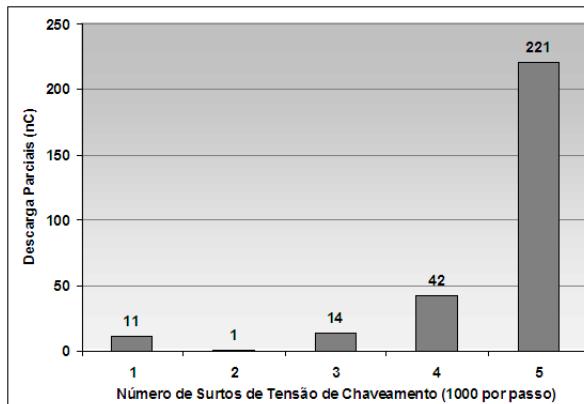
ção de gases combustíveis e aumento da existência de descargas parciais (como será visto com maiores detalhes da seção 5.2.3) na isolação de buchas condensivas quando submetidas a surtos de sobretensão transitórias oriundas de chaveamento. Nos ensaios realizados em dois protótipos de buchas condensivas com diferentes espessuras de isolação do corpo condensivo, 0,5 mm e 1,0 mm, nota-se a influência na formação de descargas parciais e sua absorção pelo corpo condensivo das buchas, após 12 horas da aplicação dos surtos de tensão, conforme mostram as Figuras 4.17(a) a 4.17(d).



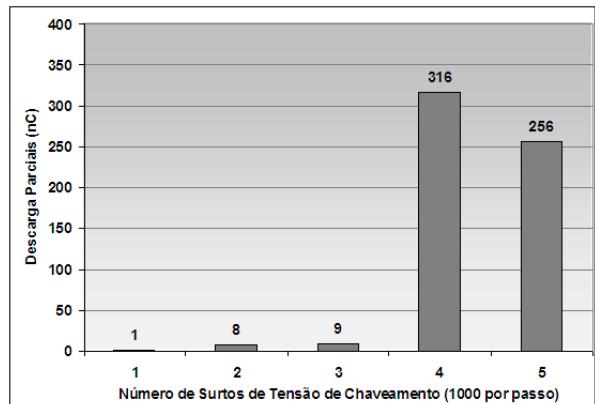
(a) Descarga parcial em uma bucha condensiva com isolação de 0,5mm de espessura em função de surtos de tensão transitórios aplicados com uma fonte de 6kVac.



(b) Descarga parcial em uma bucha condensiva com isolação de 0,5mm de espessura em função de surtos de tensão transitórios aplicados com uma fonte de 16kVac, após 12 horas.



(c) Descarga parcial em uma bucha condensiva com isolação de 1,0mm de espessura em função de surtos de tensão transitórios aplicados com uma fonte de 16kVac.



(d) Descarga parcial em uma bucha condensiva com isolação de 1,0mm de espessura em função de surtos de tensão transitórios aplicados com uma fonte de 16kVac, após 12 horas.

Baseado nos resultados encontrados é fato afirmar que a espessura do corpo condensivo das buchas tem influência tanto na quantidade verificada de descargas parciais como na absorção dos gases combustíveis através do mesmo, resultando em valores

mais altos de DP após um determinado tempo, como pode ser comprovado quando comparando os valores menos relevantes encontrados nas buchas com 1,0 mm, com os valores das buchas com 0,5 mm de espessura da isolação. Outra constatação é a preocupação sobre o impacto causado na isolação ao longo da vida útil das buchas devido a surtos de tensão transitórios oriundos de chaveamentos.

#### **4.7 Conclusão**

A Figura 4.10 sintetiza a conclusão deste capítulo sobre quais agentes devem ser controlados para obter uma boa qualidade da isolação e retardar os processos de envelhecimento das buchas condensivas. Com isso, manter controle sob a temperatura e obter máxima restrição possível quanto ao contato externo com o oxigênio e umidade atendendo as condições de operação e manutenção das mesmas.

Conforme visto, buchas operando com temperaturas acima do especificado em normas como [7], causam degradação do papel isolante utilizado no corpo condensivo por pirólise, alterando sua capacidade isolante, como pode ser constatado com a redução do seu grau de polimerização. A formação de umidade oriunda desta reação contribuirá tanto para a deterioração do próprio papel, como do óleo isolante utilizado na impregnação das buchas condensivas, decompondo-o e reduzindo a sua rigidez dielétrica. O efeito da umidade e do oxigênio em contato com a isolação, também provocam a redução das cadeias de glicose, formando moléculas de glicose livre e água, e consequentemente reduzindo também o GP do papel. Portanto, o controle da estanqueidade e da temperatura durante a operação de buchas condensivas, é fundamental para o aumento de sua vida útil, como comprovado pelas experiências em carregamento de buchas mostradas na Seção 4.6.2

Dentre todas as características vistas nos dielétricos utilizados nas buchas condensivas, para avaliação quanto a evolução dos processos de envelhecimento das mesmas, destacam-se: a rigidez dielétrica e o teor de umidade do óleo isolante, que estão intrinsecamente ligados conforme ilustra a Figura 4.5, o grau de polimerização do papel ou a quantidade de furfural no óleo isolante, também relacionados como ilustra a Figura 4.9. A formação de gases combustíveis, o aumento no fator de perdas, conforme visto na Seção 4.2.4, e nas descargas parciais da isolação, são indícios de que estes processos estão em evolução e serão alvo de maiores estudos no Capítulo 5.

Concluindo, além do exposto nesta seção sobre sua operação e manutenção, a vida útil de uma bucha condensiva dependerá fundamentalmente de um projeto e fabricação que atenda suas condições de operação em regime permanente, ou mesmo ainda, em situações transitórias, conforme exposto na Seção 4.6.4.

# 5

## TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

*Uma pessoa inteligente resolve um problema, um sábio previne-o.*

**Albert Einstein, Físico Alemão  
(1879-1955)**

### 5.1 Introdução

Conforme visto nos capítulos anteriores, percebe-se que os processos de envelhecimento das buchas estão relacionados principalmente com sua isolação e se iniciam em sua maioria sem a apresentação de indícios externos de sua decomposição. A aplicação de técnicas de manutenção preventiva são imprescindíveis para identificar o início do processo de deterioração de uma bucha e minimizar consideravelmente a possibilidade da ocorrência de uma falha.

Diante do exposto este capítulo apresenta as técnicas de manutenção utilizadas em buchas atualmente, bem como seus parâmetros de aceitação baseados nas normas vigentes.

### 5.2 Manutenção Preventiva

Entende-se como manutenção preventiva “a quem o propósito de prevenir e evitar as consequências das falhas“ [16] ou ainda “a que é efetuada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos e destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação de um item“ [15].

As ações de manutenção preventiva adotadas atualmente em buchas condensivas, de uma forma geral causam a indisponibilidade do equipamento principal em que as mesmas estão instaladas. As técnicas mais utilizadas são a medição de fator de dissipação do isolamento e sua capacidade e a coleta de amostras de óleo isolante em buchas tipo OIP, para análise cromatográfica e de teor de umidade. Outra técnica frequentemente utilizada é a medição de descargas parciais, que devido a estrutura necessária é realizada apenas em laboratórios de ensaios elétricos adequados, sendo portanto necessário a sua retirada de operação para transporte ao local de sua realização. Estas técnicas diagnosticam o processo de envelhecimento em sua fase incipiente, assim como validam o processo de fabricação das buchas. Maiores detalhes de sua realização são mostrados a seguir.

### 5.2.1 Medição de Fator de Dissipação do Isolamento e Capacitância

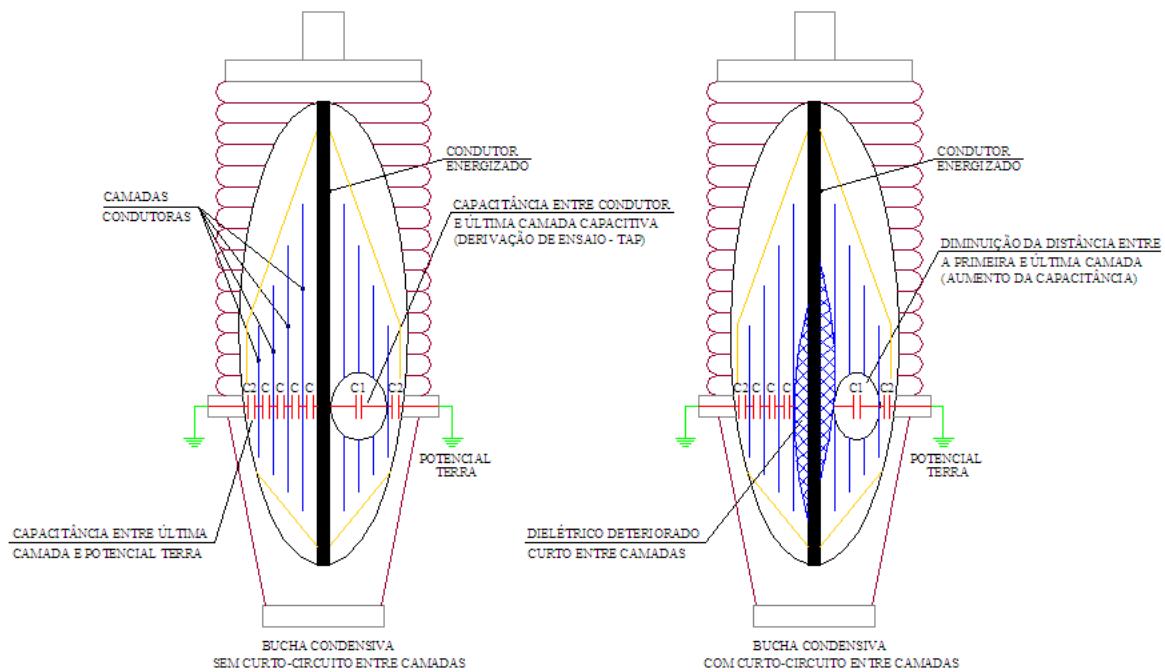
A medição de fator de dissipação (ou fator de potência) do isolamento e capacidade é a mais difundida e aplicada técnica de manutenção preventiva utilizada em buchas condensativas. Defeitos incipientes como a carbonização de enrolamentos de papel próximos ao condutor ou mesmo processos mais avançados como por exemplo, um curto-círcito entre camadas condutoras capacitivas de uma bucha, provocam um aumento nas perdas dielétricas e no valor da capacidade, e indicam na maioria das vezes alterações significativas no processo de envelhecimento de uma bucha.

Da teoria de circuitos elétricos [11], sabemos que em um capacitor, a relação entre a distância entre as placas e a sua capacidade é inversamente proporcional, como visto na equação clássica de um capacitor, Equação 5.1.

$$C = \frac{\varepsilon \times A}{d} \quad (5.1)$$

Partindo deste princípio, observa-se que um curto-círcito entre as placas de uma bucha capacitiva concêntrica, além de interferir na distribuição do campo eletrostático, diminui a distância entre as placas da bucha, elevando seu valor de capacidade, conforme visto na Figura 5.1 que mostra a deterioração do dielétrico entre o condutor e a camada mais próxima do mesmo, região de maior temperatura e *stress* dielétrico, causando um curto-círcito entre o condutor e a camada.

A norma NBR 5034 não aborda sobre valores limites de alteração nos valores da

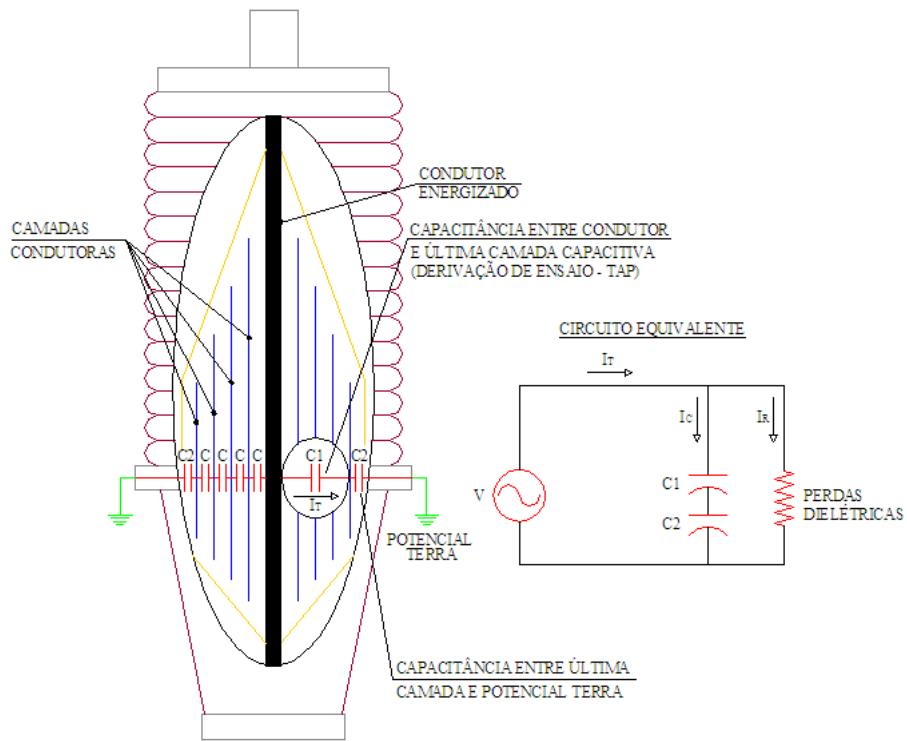


**Figura 5.1:** Ilustração elaborada pelo autor da dissertação mostrando a deterioração da camada dielétrica de uma bucha condensiva e consequente aumento no valor de sua capacidade.

capacitância de buchas condensivas. Diante disto a experiência adquirida entre as empresas de ramos de engenharia elétrica, recomenda que alterações de elevação quando comparadas aos valores encontrados de capacidades  $C_1$  e  $C_2$  nos ensaios realizados nas fábricas ou durante a fase de comissionamento da bucha durante a fase de montagem na instalação, indicam a necessidade de uma melhor investigação da origem desta não conformidade, podendo ser necessário sua retirada de serviço.

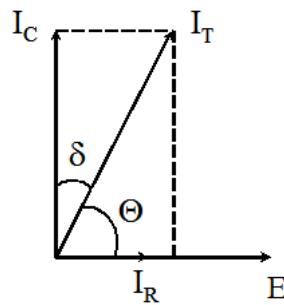
Partindo novamente da teoria de circuitos elétricos, espera-se que em um capacitor real exista uma parcela da corrente de fuga de característica resistiva que circula pelo mesmo através da isolação, que seja atribuída as perdas dielétricas. A Figura 5.2 mostra o circuito equivalente de uma bucha condensiva, mostrando as perdas dielétricas existentes na mesma.

Esta corrente de fuga, conforme visto na Figura 5.2, pode ser decomposta em uma corrente capacitiva da isolação ( $I_C$ ), responsável pelo armazenamento de energia no capacitor e uma corrente resistiva ( $I_R$ ), referente as perdas do dielétrico. Esta corrente resistiva existe em todo capacitor, e seu valor em condições normais é extremamente inferior a corrente capacitiva e pode ser desprezado, porém com a deterioração do dielé-



**Figura 5.2:** Ilustração elaborada pelo autor da dissertação mostrando circuito equivalente de uma bucha condensiva com perdas dielétricas.

trico este valor aumenta, mostrando que o dielétrico está em processo de decomposição. O acompanhamento desta corrente resistiva é o princípio do funcionamento da medição do fator de dissipação do isolamento, também conhecida como tangente delta ( $\text{tg}\delta$ ) que é a razão entre a corrente resistiva ( $I_R$ ) e a corrente capacitiva ( $I_C$ ), conforme pode ser visto nas relações trigonométricas mostradas na Figura 5.3.



**Figura 5.3:** Relações trigonométricas da corrente de fuga do isolamento de um capacitor real, sendo que  $I_C$  e  $I_R$  denotam respectivamente as correntes capacitiva e resistiva.

Outro parâmetro de medição equivalente ao fator de dissipação ( $\operatorname{tg}\delta$ ) é o fator de potência do isolamento ( $\cos\theta$ ), que é a razão entre a corrente resistiva ( $I_R$ ) e a corrente total ( $I_T$ ) do isolamento, a soma de toda a contribuição, conforme mostra a Figura 5.3. As Equações 5.2 e 5.3, mostram analiticamente estas relações.

$$\cos\theta = \frac{I_R}{I_T} \quad (5.2)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (5.3)$$

A norma NBR 5034 define valores máximos de fator de dissipação medidos com a aplicação de  $1,05 U_N / \sqrt{3}$  mostrados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1:** Valores máximos de fator de dissipação em buchas condensivas segundo NBR 5034.

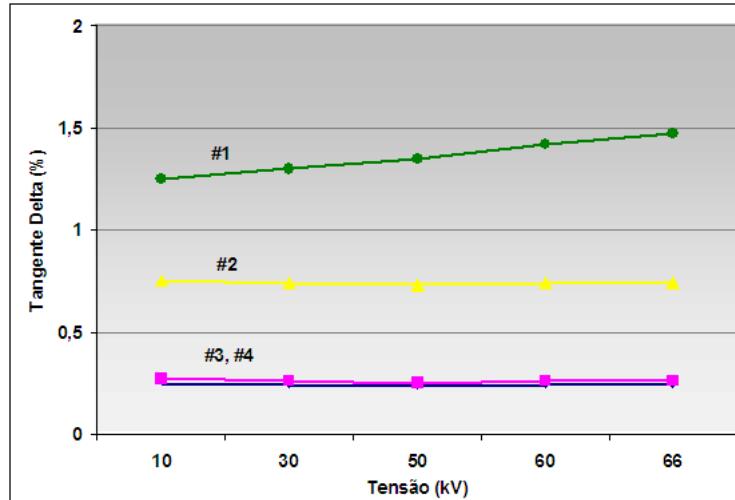
Tipo da Isolação	Valores máximos ( $\cos\theta$ )
Papel Impregnado com Óleo	0,007
Papel Impregnado com Resina	0,015
Papel Aglutinado com Resina	0,015

Diante da limitação da aplicação de tensão nominal durante ensaios realizados em campo, frequentemente são realizados ensaios nos laboratórios em diversos níveis de tensões de forma crescente, a fim de identificar alguma variação significante nas perdas dielétricas quando do aumento da aplicação de tensão. A norma NBR 5034 recomenda que devem ser obtidos em laboratório valores de referência em 10 kV e 2,5 kV, já que frequentemente estes valores de tensão são utilizados nos instrumentos de testes elétricos em campo.

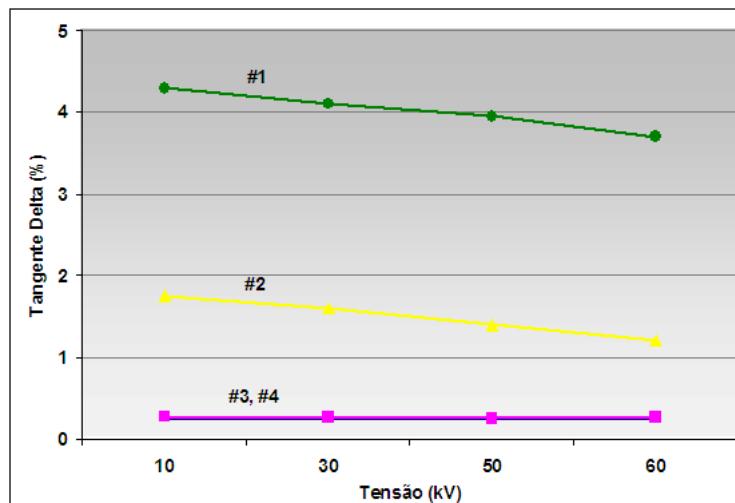
A avaliação da evolução dos valores de fator de dissipação (ou de potência) com relação ao valor inicial dos ensaios realizados em fábrica é um importante parâmetro de acompanhamento do início do processo de envelhecimento das buchas.

Uma variável de controle importante nos ensaios de medição de fator de dissipação em buchas condensivas é a temperatura em que a mesma está submetida, conforme mostra um estudo desenvolvido por R. J. Densley e B. K. Gupta [45] na qual foram utilizadas quatro buchas condensivas tipo OIP de tensão nominal 115 kV, sendo duas novas (#4 e #3) e duas retiradas de operação para a realização dos ensaios, portanto já submetidas aos esforços da operação em regime permanente (#2 e #1).

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram os valores encontrados de tangente delta nos ensaios realizados nas quatro buchas em duas condições: temperatura ambiente e com temperatura próxima a 70°C na base inferior da bucha.



**Figura 5.4:** Fator de dissipação (tangente delta) obtido nas quatro buchas sob temperatura ambiente na base inferior das mesmas.



**Figura 5.5:** Fator de dissipação (tangente delta) obtido nas quatro buchas com temperatura próxima a 70°C na base inferior das mesmas. Observa-se uma clara dependência das buchas usadas com a temperatura.

Observa-se claramente que as buchas novas (#3 e #4) mantém seu comportamento de perdas quase que contínuo independente da temperatura ou tensão aplicada, ao mesmo tempo que nas buchas usadas (#2 e #1) percebe-se uma evidente dependência

da temperatura.

Nesta experiência observou-se que a temperatura exerce baixa influência na determinação do valor de capacidade das buchas, não sendo registradas variações maiores que 1% em todos os ensaios realizados.

### 5.2.2 Análise Cromatográfica e Teor de umidade do Óleo Isolante em buchas OIP

A técnica de analisar o estado da decomposição da isolação sólida, celulose, e líquida, óleo mineral, através da análise do perfil cromatográfico dos gases emitidos se tornou amplamente difundida para todos os equipamentos elétricos com este tipo de isolamento, principalmente em transformadores de potência, transformadores de instrumentos e buchas condensivas. O reduzido tempo de indisponibilidade necessário ao processo de retirada da amostra, bem como a confiabilidade no acompanhamento dos resultados são fatores que contribuem para a utilização desta ferramenta eficiente de manutenção preventiva.

Os gases gerados na decomposição do material isolante composto nas buchas de papel impregnado com óleo são mostrados na Tabela 5.2 [46].

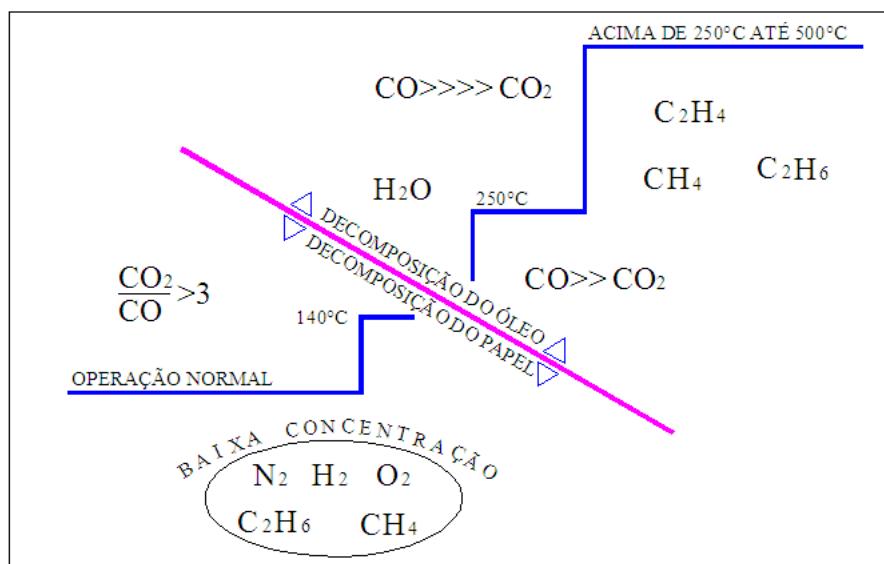
**Tabela 5.2:** Gases oriundos da decomposição

Nome	Símbolo
Nitrogênio	N <sub>2</sub>
Oxigênio	O <sub>2</sub>
Hidrogênio	H <sub>2</sub>
Monóxido de Carbono	CO
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>
Metano	CH <sub>4</sub>
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>

A experiência da CHESF na análise cromatográfica de gases é relatada por Vespúcio Filho em [47], que descreve os processos de decomposição da celulose e do óleo mineral associando os mesmos a formação dos gases citados na Tabela 5.2.

No que se refere a pirólise, a decomposição celulósica sob temperaturas de operação normais, ou até valores próximos a 140°C, existe um surgimento normal de CO<sub>2</sub> e CO,

porém com uma concentração maior de CO<sub>2</sub>. Traços de H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> também são encontrados, porém em pouca concentração. Sob temperaturas muito elevadas, com valores próximos a 250°C, a concentração de CO se torna bem superior a de CO<sub>2</sub>, porém a operação nestas condições é um fato anormal e improvável. Para a decomposição do óleo mineral sob temperatura, é necessária uma quantidade mais elevada de calor para o início da decomposição. Em condições normais de operação existe a formação de traços em pequenas quantidades de H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>. Na ocorrência de temperaturas elevadas em pontos específicos do equipamento, surgem como fruto da decomposição do óleo a formação de água à 200°C, CO<sub>2</sub> à 400°C e metano, etano e etileno à 500°C. A Figura 5.6 mostra a relação entre a temperatura e a formação de gases, oriundos da decomposição do papel e do óleo isolante de equipamentos elétricos, por pirólise.



**Figura 5.6:** Ilustração desenvolvida pelo autor relacionando a formação dos gases oriundos do óleo mineral isolante e do papel isolante com o processo da pirólise.

Outra consideração interessante é que, devido a formação das ligações das moléculas dos hidrocarbonetos, podemos afirmar que, para formação do acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), é necessária maior energia, assim como em sequência são: Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>) e finalmente o Hidrogênio (H<sub>2</sub>), o Oxigênio (O<sub>2</sub>) e o Nitrogênio (N<sub>2</sub>) que necessitam de pouca energia.

A formação dos gases não depende exclusivamente da temperatura do óleo, e sim de uma série de fatores, como por exemplo:

- Descargas Parciais
- Arco elétrico interno entre partes condutoras de diferentes potenciais.
- Sobreaquecimento em pontos específicos (Pontos Quentes).
- Hidrólise

De posse do quantitativo dos gases dissolvidos no óleo, uma importante etapa desta técnica de manutenção é o diagnóstico emitido baseado na análise do perfil cromatográfico. Existem diversos métodos disponíveis, que são utilizados a diversos anos pelas empresas do ramos de engenharia elétrica. Tais métodos em geral se caracterizam por experiências, muitas vezes empíricas, que associam a formação de alguns gases ao tipo de falha incipiente, ou também a partir dos gases encontrados é realizada uma associação a diversos tipos de problemas internos, mais prováveis de existirem e de serem responsáveis por esta geração de gases. Exemplos destes para transformadores de potência são métodos tradicionais como o método IEC [46] e Rogers.

Devido a grande diferença da relação papel/óleo, estes métodos não são aplicados para buchas condensivas tipo OIP. As empresas concessionárias e os fabricantes têm adotado atualmente para a análise cromatográfica realizada neste tipo de equipamento a quantidade de gases envolvidos nas coletas de óleo e sua evolução com relação a amostra anterior. Para um diagnóstico de causa baseado nas quantidades de gases envolvidos em uma amostra, empresas concessionárias como a CHESF têm utilizado como referência o método *Pugh* ou pelo gás chave [47], que embora seja concebido para transformadores de potência e a sua distribuição percentual dos gases seja diferente para buchas, tem se mostrado eficiente para diagnósticos.

Segundo o método *Pugh* ou pelo Gás Chave, quando da ocorrência de uma falha incipiente, existe a formação de um conjunto de gases e para cada tipo de falha, existe um gás dentro do conjunto com uma concentração que o torna predominante com relação aos demais, seja pela quantidade de sua concentração ou mesmo pela importância da sua evolução mesmo com relação aos demais, baseado em seu risco intrínseco. A Tabela 5.3 mostra os conjuntos possíveis de gases relacionados com o diagnóstico do método pelo gás chave, com a distribuição percentual para transformadores de potência [47].

**Tabela 5.3:** Método de diagnóstico Pugh ou pelo Gás Chave com a distribuição percentual de gases para transformadores de potência.

Diagnóstico	Gás chave
Arco sem envolver a celulose	<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b> (30%) + H <sub>2</sub> (60%) + CH <sub>4</sub> e C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (desprezível)
Arco com envolvimento da celulose	<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b> + H <sub>2</sub> + CO + CO <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub> e C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (desprezível)
DP sem envolver a celulose	<b>H<sub>2</sub></b> (86%) + CH <sub>4</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> e C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (desprezível)
DP com envolvimento da celulose	<b>H<sub>2</sub></b> + CH <sub>4</sub> + CO + CO <sub>2</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Super ou sobreaquecimento no óleo	<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b> (63%) + CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> (desprezível), C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (17%) + C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Super ou sobreaquecimento na celulose	<b>CO<sub>2</sub></b> (92%) + CO <sub>2</sub> + Hidrocarbonetos desprezíveis
Eletrólise	<b>H<sub>2</sub></b> (99%) + gases combustíveis desprezíveis

A quantidade de teor de umidade em amostras de óleo isolante também é um eficiente parâmetro de medição da condição do isolamento ou mesmo do sistema de estanqueidade em buchas condensivas tipo OIP. Um valor aceitável pelas concessionárias é o volume de 10 ppm (partes por milhão) de umidade para buchas aplicadas em sistemas de 500 kV ou 230 kV. A evolução deste parâmetro também é uma importante ferramenta de análise do capacidade de isolamento das buchas.

### 5.2.3 Medição de Descargas Parciais

Uma medição importante da qualidade do dielétrico de uma bucha após seu processo de fabricação, assim como com a finalidade de avaliar a qualidade de sua isolação devido ao tempo de exposição a campos elétricos ou mesmo após a necessidade de deslocamentos do equipamento que possam vir a danificar sua estrutura interna, é conhecida como medição de descargas parciais.

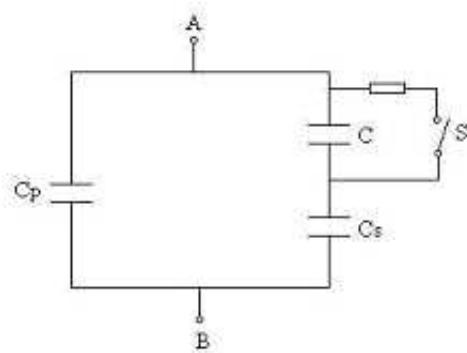
Devido as tecnologias aplicadas nas buchas, mencionadas no Capítulo 2, o processo de impregnação resina ou de óleo e principalmente o processo de aglutinação de resina, podem formar pequenas bolhas de ar no interior da sua isolação, havendo naquele ponto específico, uma diminuição na constante dielétrica do material, e por consequência uma equivalente diminuição da capacidade isolante do mesmo. O material isolante neste ponto está mais exposto a ocorrência de uma descarga elétrica havendo uma diminuição momentânea da sua resistividade, a depender da presença do campo eletromagnético em regime permanente, ou mesmo da ocorrência de uma sobrepressão transitória devido a uma falta ou chaveamento durante manobra. Este fenômeno é conhecido como descarga parcial (DP) e algumas de suas características

são listadas a seguir.

- São descargas internas que ocorrem no meio gasoso somente na seção do dielétrico onde existe uma diminuição de sua constante dielétrica.
- São repetitivas e ocorrem seguidamente em vários pontos do dielétrico.
- Possuem curta duração em relação ao ciclo senoidal de regime permanente, com intervalos da ordem de nanosegundos.
- Devido a elevação de temperatura e ao choque mecânico entre os elétrons livres na cavidade e as moléculas do dielétrico, ocorre a erosão do material isolante localizado em torno de uma bolha de ar por exemplo, sendo este processo destrutivo da isolação.

Podemos afirmar ainda que este fenômeno existe em qualquer tipo de isolação. No caso dos dielétricos sólidos essas descargas são produzidas pela ionização de pequenas cavidades de ar no interior do dielétrico; no caso dos líquidos, pela ionização de bolhas de gás no seu interior; no caso do ar pela ionização das moléculas de ar que se encontram nas pontas de maior gradiente de potencial.

A representação elétrica de um material isolante que contenha uma bolha de ar, por exemplo, na qual ocorra o fenômeno das descargas parciais pode ser vista na Figura 5.7:



**Figura 5.7:** Representação Elétrica de uma Descarga Parcial.

Em que, C é a capacidade formada pela cavidade de gás; Cp é a capacidade paralela formada pelo material isolante íntegro; Cs é a capacidade série que juntamente

com C compõe a capacidade do dielétrico em determinada linha de direção e S é chave que simula a ocorrência de uma descarga parcial.

Para proporcionar um melhor entendimento deste fenômeno, pode-se afirmar que, baseado nas “distâncias” das capacidades citadas que  $C_p \gg C \gg C_s$ , o gás contido na cavidade citada tem uma constante dielétrica bem inferior a do material isolante íntegro.

Partindo das considerações iniciais, podemos entender analiticamente o fenômeno da descarga parcial. Analisando a Figura 5.7, verifica-se que a Equação 5.4 representa a condição inicial na qual ainda não há o surgimento da DP.

$$C_n = C_p + \frac{C \times C_s}{C + C_s}. \quad (5.4)$$

Quando uma fonte de tensão alternada é aplicada aos pontos A e B, em um dado momento sob uma determinada tensão  $U_i$ , surgirá uma descarga sob a capacidade C, representada pelo fechamento da chave S e representada pela Equação 5.5.

$$C_d = C_p + C_s. \quad (5.5)$$

Neste momento a descarga na cavidade é tão rápida que a fonte de tensão não têm controle sobre a tensão do dielétrico, devido a impedância interna da mesma, acarretando em um pulso  $\Delta U$  nos seus terminais e como esta descarga é pequena não possibilita a transferência de carga entre os terminais A e B, ou seja, a carga terminal não varia, como pode ser visto na sequência de Equações 5.6.

$$\begin{aligned} U_i \times C_n &= (U_i - \Delta U) \times C_d, \\ U_i \times (C_n - C_d) &= -\Delta U \times C_d, \\ \Delta U &= U_i \times \frac{(C_d - C_n)}{C_d}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Realizando algumas substituições entre as Equações 5.4, 5.5 e 5.6, obtemos a Equação 5.7.

$$\Delta U = U_i \times \frac{C_s^2}{(C_p + C_s) \times (C + C_s)}. \quad (5.7)$$

Desenvolvendo a Equação 5.7, concluímos que a tensão  $U_{ic}$ , como visto na Equação 5.9.

$$\Delta U = U_{ic} \times \frac{C_s}{C_p + C_s}. \quad (5.8)$$

em que,

$$U_{ic} = U_i \times \frac{C_s}{C + C_s}. \quad (5.9)$$

A tensão Uic é aquela que produz a descarga medida diretamente entre os terminais da cavidade, ou seja, a descarga parcial referente a cavidade citada.

A NBR 6940 estabelece critérios para o ensaio de descargas parciais [48] e a grandeza medida deve ser a carga aparente utilizada em laboratórios de ensaio e a medida é expressa em Coulombs. Segundo esta norma os elementos de ensaios devem ser colhidos de modo a ser detectável um nível mínimo de  $5 \times 10^{-12}\text{C}$ . Uma dificuldade na realização deste tipo de ensaio é a presença indesejável de ruídos externos, muitas vezes presentes em laboratórios de ensaio elétricos, ou do efeito corona existente comumente quando aplicação de tensão, que interferem na exatidão dos resultados. A eliminação destas interferências garantem segurança na avaliação dos resultados.

A norma NBR 5034 [7] estipula valores máximos admissíveis para níveis de descarga parcial a depender do tipo de isolamento da bucha, conforme pode ser visto na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4:** Valores máximos admissíveis para níveis de descarga parcial.

Tipo de Isolação da bucha	Amplitude de descarga (pC)	
	$a 1,05U_N/\sqrt{3}$	$a 1,50U_N/\sqrt{3}$
Papel Impregnado com Óleo	-	10
Papel Aglutinado com Resina	100	250
Papel Impregnado com Resina	-	10

As medições devem ser feitas com tensão crescente até o nível suportável nominal à frequência industrial e decrescente, depois da tensão ter sido elevada para verificar a capacidade de recuperação do dielétrico, em intervalos pré-estabelecidos [7].

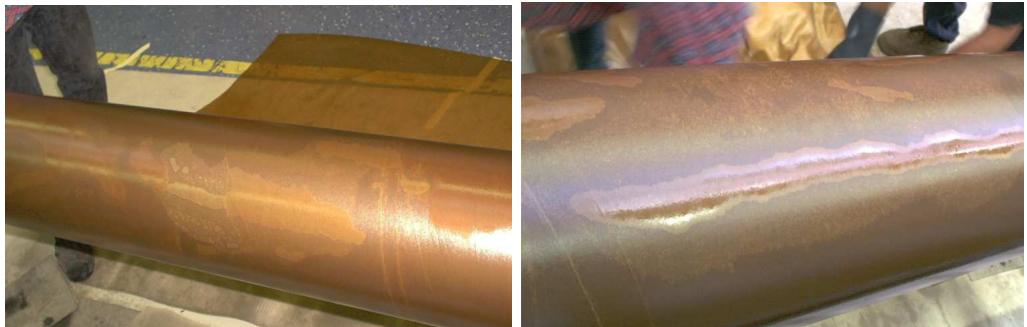
### 5.3 Conclusão

As técnicas de manutenção preventivas apresentadas se mostram eficientes e são complementares entre si quanto da realização de análises do estado de deterioração do isolamento de uma bucha condensiva.

A técnica de medição de descargas parciais se mostra eficiente, porém limitada, para atividades de manutenção preventiva, devido a sua impossibilidade de realização em campo. Sua aplicação em laboratórios é fundamental na tomada de decisão quanto a diagnósticos mais precisos de buchas em operação, ou mesmo para validação de

fabricação ou pós-reparo de buchas condensivas.

Um artigo apresentado por Marcos Caddah [49] em um seminário realizado em Brasília no ano de 2005, indica que a técnica de medição de fator de dissipação mostra indícios preliminares de deterioração com relação a alteração nos valores de capacitância. O aumento do valor das correntes de fuga resistivas pode ser constatado, alterando o valor da tangente delta, sem que haja necessariamente um curto-circuito entre camadas de um bucha condensiva, que resultaria em uma alteração na capacitância do equipamento. As medições realizadas mostram que as alterações nos valores de fator de dissipação de 0,20 a 0,23 (ou seja 15% de alteração) foram significativas e suficientes para sua retirada de operação, enquanto que os valores de capacitância praticamente não sofreram variações, com os maiores valores registrados inferiores a 0,3%. As unidades retiradas de operação foram inspecionadas e houve constatação de formação de bolhas de gás entre as camadas de papel, comprovando o início do processo de deterioração e aumento das correntes de perdas, bem como não foi encontrada nenhuma camada condutora em curto-circuito, conforme mostram as Figuras 5.3 e 5.3, comprovando a eficiência de ambos os métodos [49].



**Figura 5.8:** Presença de bolhas de gases combustíveis entre as camadas de papel isolante em inspeção realizada em buchas condensivas tipo OIP retiradas de operação devido ao aumento de gases combustíveis e do fator de dissipação do isolamento.

Ainda neste artigo foi feita uma relação entre as medições realizadas e a análise cromatográfica das buchas condensivas, mostrando uma evolução significativa de gases como metano ( $\text{CH}_4$ ), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) e principalmente o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), indicando que a realização de análises cromatográficas do óleo isolante também mostram indícios preliminares de deterioração, embora haja a necessidade de uma melhor padronização e definição de normas específicas esta análise em buchas tipo OIP.

Como o ingresso de umidade no isolamento reduz a sua capacidade isolante, a medição do teor de umidade em buchas assegura uma melhor eficiência do sistema isolante, bem como da estanqueidade das buchas condensivas, sendo portanto também uma importante ferramenta no controle da vida útil das mesmas.

O Apêndice B mostra os resultados de ensaios de medição de fator de dissipação do isolamento, capacidade e descargas parciais realizados em duas buchas condensivas em um laboratório de ensaios elétricos, além dos resultados de experiências realizadas com simulações de resposta em frequência nestas buchas.

# 6

## MONITORAMENTO *on-line*

*A arte da previsão consiste em antecipar o que acontecerá e depois explicar o porque não aconteceu.*

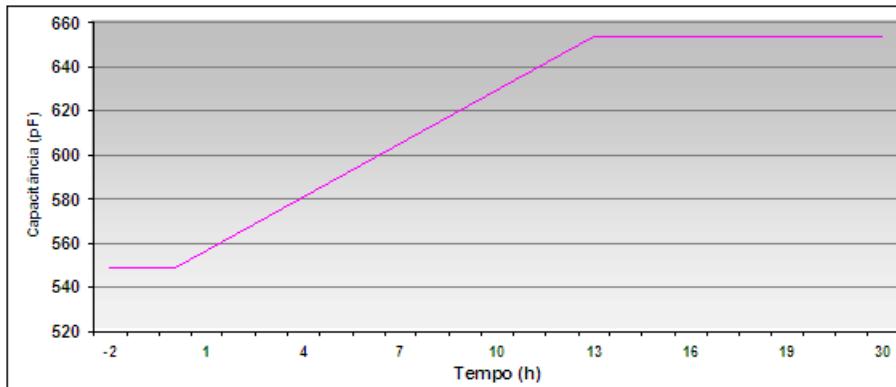
**Winston Churchill, Político Inglês  
(1875-1965)**

### 6.1 Introdução

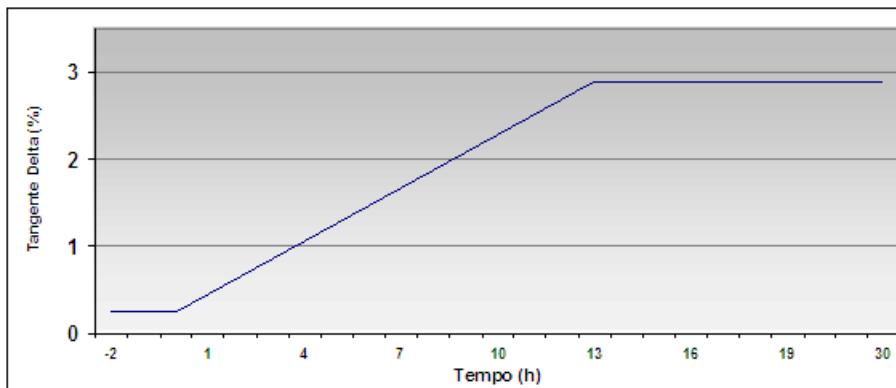
Diante dos assuntos abordados envolvendo buchas condensivas de transformadores de potência até o presente momento, podemos citar alguns motivos que justificariam em transformadores de “alto” investimento ou de importância estratégica, a necessidade da existência de um sistema de monitoramento *on-line* do estado da vida útil das mesmas. Exemplo disso é a cada vez mais escassa indisponibilidade permitida de desligamento de transformadores diante das regras atuais do mercado de geração, e principalmente, da transmissão, para realização de manutenção preventiva, ou ainda, a “alta” taxa de falha de transformadores quando da ocorrência envolvendo buchas conforme mostrado na Figura 1.1.

Mesmos sendo estes argumentos “fortes” em uma avaliação para decisão quanto a implantação ou não de um sistema de monitoramento, especificamente uma ocorrência em uma bucha condensiva tipo OIP instalada em um transformador monofásico de 500 kV do complexo hidroelétrico de Xingó de propriedade da CHESF mostra um fator a ser considerado, que é a possível rapidez da evolução de uma condição incipiente à falha do equipamento. Esta falha ocorreu quando da fase inicial de instalação de um sistema de monitoramento de buchas na citada usina (quando ainda não havia um sistema de

supervisão de dados instalado) que registrou a evolução do valor da capacitância e fator de potência do isolamento da bucha envolvida na ocorrência [50].



(a) Curva de alteração da capacitância



(b) Curva de alteração do fator de dissipação ( $\text{tg}\delta$ )

**Figura 6.1:** Gráficos com curvas, registradas por um sistema de monitoramento, de alteração na capacidade isolante de uma bucha condensiva tipo OIP que explodiu na Usina Hidroelétrica de Xingó (CHESF).

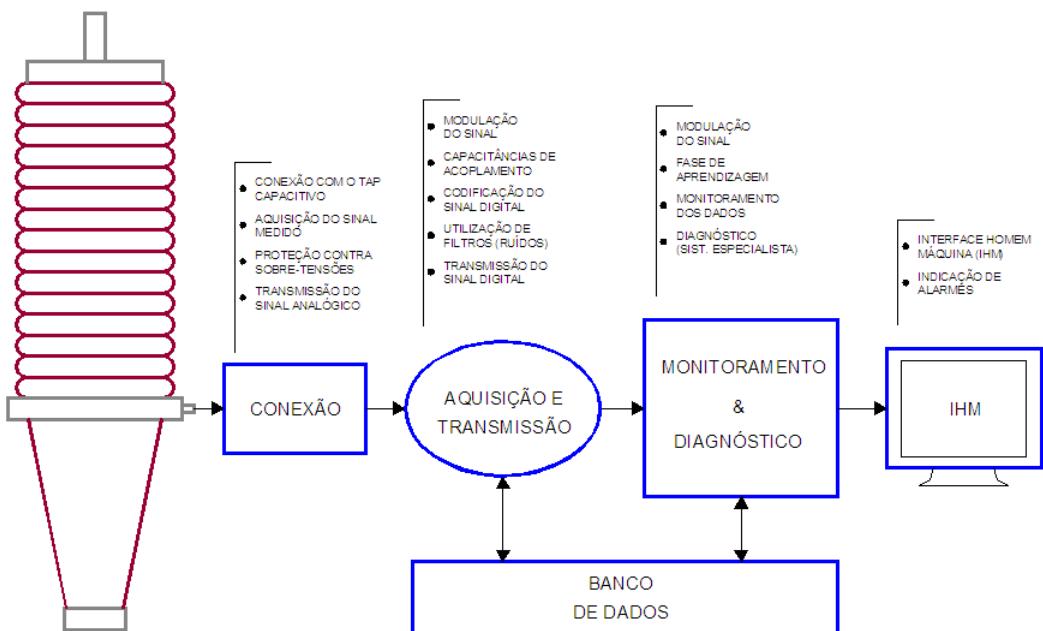
O intervalo de tempo entre o início da variação relevante das grandezas medidas pelo sistema de monitoramento e a ocorrência foi de apenas 13 horas. A capacitância se elevou de 549 pF para 654 pF, como pode ser visto na Figura 6.1(a), com um aumento aproximado de 19%, e a tangente delta alterou-se de 0,27% para 2,88%, aumento aproximado de 10 vezes, como mostrado na Figura 6.1(b).

Dante do exposto, este capítulo se propõe a mostrar as técnicas de monitoramento *on-line* de buchas condensivas para transformador disponíveis atualmente no mercado de energia, bem como a influência de fatores sistêmicos externos, como temperatura por exemplo, e o acompanhamento da implantação de um sistema de monitoramento

das buchas de alta tensão em 550 kV da usina de Xingó.

## 6.2 Etapas do Monitoramento *on-line* de buchas condensivas

Um sistema de monitoramento de buchas condensivas é composto de algumas etapas desde a captação do sinal analógico de tensão ou corrente através do *tap* capacitivo da mesma até o diagnóstico baseado em um sistema de informação. A Figura 6.2 mostra um diagrama que resume as etapas que envolvem um processo de monitoramento de forma genérica, independente do tipo de aquisição de dados definido.



**Figura 6.2:** Ilustração elaborada pelo autor mostrando um diagrama resumido envolvendo todas as etapas de um monitoramento on-line típico de buchas condensivas.

Na etapa de conexão está inserida a aquisição do sinal a ser monitorado, como por exemplo a corrente de fuga da bucha ou a tensão existente entre o *tap* da bucha e o potencial terra (**U<sub>2</sub>**). Além deste a própria conexão com o *tap*, incluindo as proteções contra sobretensões que podem ocorrer quando de uma falha no referencial de terra desta conexão e ainda a transmissão dos dados analógicos para o seu processamento.

Na etapa de aquisição e transmissão de dados está inclusa a modulação e codificação do dados para sua transmissão para a análise no sistema especialista, utilização de filtros para a eliminação de ruídos no sinal, a inserção de capacitâncias de acoplamento

mento ou outros componentes para controlar o sinal medido dentro dos parâmetros pré-estabelecidos pelo sistema.

Na etapa de monitoramento e diagnóstico estão a modulação do sinal transmitido para que o sistema especialista de monitoramento e diagnóstico para processar os dados e identificar as possíveis falhas. Ainda nesta etapa se encontra uma fase importante para a eficiência do sistema de monitoramento denominada fase de aprendizagem, que é onde o sistema reconhece as condições do sistema em que está inserido, como por exemplo variações de temperatura, de tensão, bem como desequilíbrio entre fases.

O banco de dados armazena o histórico de informações processadas para auxiliar no diagnóstico do sistema.

A interface homem-máquina é a última etapa do processo, na qual o operador do sistema reconhece e identifica os possíveis alarmes diagnosticados pelo sistema especialista.

### **6.3 Tipos de monitoramento *on-line***

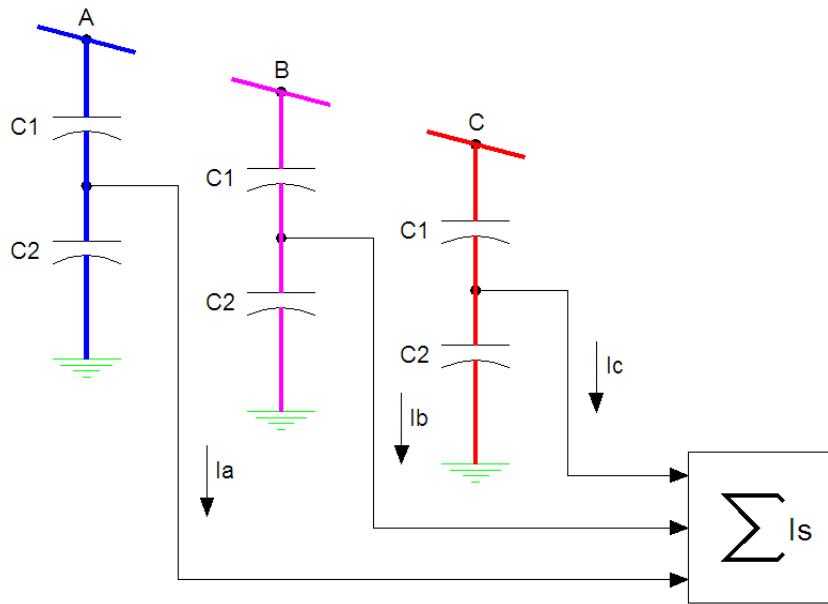
Nesta seção são mostrados os tipos de monitoramento *on-line* desenvolvidos e disponíveis no mercado atual para buchas condensivas de transformadores de potência:

#### **6.3.1 Somatório das Correntes**

A utilização de medição da corrente de fuga das buchas condensivas e suas componentes resistiva e capacitiva, através do seu tap capacitivo, diagnosticando o estado da sua isolação, se tornou uma das principais ferramentas para as atividades de manutenção preventiva, conforme visto no Capítulo 5. Desta mesma forma, atualmente os sistemas de monitoramento mais utilizados no mundo, utilizam a medição desta corrente, para avaliar e diagnosticar o quanto íntegro se encontra a sua suportabilidade dielétrica aos fenômenos do sistema em que está inserida.

Uma das técnicas de monitoramento *on-line* de buchas condensivas mais conhecida, utiliza a somatória destas correntes de fuga em um sistema trifásico de transformadores de potência para realizar esta avaliação, conforme mostra a Figura 6.3 e é descrito por Lachman [51] e Golubev [52], [53].

O princípio básico deste método baseia-se no fato de que em um sistema trifásico balanceado, utilizando buchas condensivas idênticas e em iguais condições de conser-



**Figura 6.3:** Sistema de monitoramento trifásico de buchas condensivas utilizando técnica de somatório de correntes de fuga.

vação, o vetor da somatória de suas correntes de fuga será zero, conforme ilustrado na Figura 6.4(a). Apesar desta correta afirmação, estas considerações não correspondem fielmente a realidade, já que dificilmente um sistema é perfeitamente balanceado e buchas não são necessariamente idênticas, mesmo sendo de mesmo fabricante e tipo. Portanto, é assumido como condição normal um valor inicial resultante do somatório de correntes, sendo este considerado baixo, finito e exclusivo daquele conjunto trifásico de buchas. Quando uma das buchas inicia algum processo de deterioração, sua capacidade e fator de potência são alterados, conforme visto na Subseção 5.2.1, e, consequentemente, a somatória das correntes de fuga será alterada do seu valor inicial. Então este gradiente da diferença entre o valor inicial e o medido é o indicativo, ou não, de algum princípio de falha.

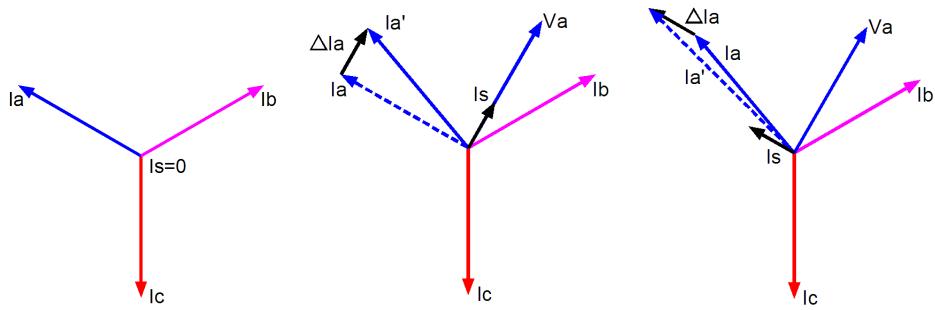
Para entendermos o processo de avaliação realizada sobre este tipo de medição do estado da isolação de um sistema trifásico de buchas condensativas, em um primeiro momento considera-se que houve uma variação somente na componente resistiva de uma bucha localizada na fase “a” do mesmo, como pode ser visto na Figura 6.4(b). Observa-se que o vetor  $\mathbf{I}_s$ , tem seu valor aumentado (supondo um valor inicial igual a zero, como visto na Figura 6.4(a)) e que sua direção está alinhada com o vetor  $\mathbf{V}_a$ , correspondente a tensão da fase “a” do sistema. Portanto, considerando o vetor

**V<sub>a</sub>** na referência, afirmamos que o vetor **I<sub>s</sub>** por estar na mesma direção do mesmo, possui somente componente resistiva. Analisando o diagrama de fases da Figura 6.4(b), concluímos que:

$$\Delta I_a = I_a' - I_a, \quad (6.1)$$

Sendo que o vetor  $\Delta I_a$  tem o mesmo módulo, direção e sentido do vetor **I<sub>s</sub>**.

Porém se considerarmos que a variação ocorreu somente na componente capacitiva da bucha localizada na fase “a”, como pode ser visto na Figura 6.4(c), observa-se que a componente  $I_s$  também tem seu valor aumentado, no entanto quanto a sua direção, observa-se que está  $90^\circ$  adiantada do vetor **V<sub>a</sub>**. Pode-se afirmar que a Equação 6.1 também é válida para esta situação.



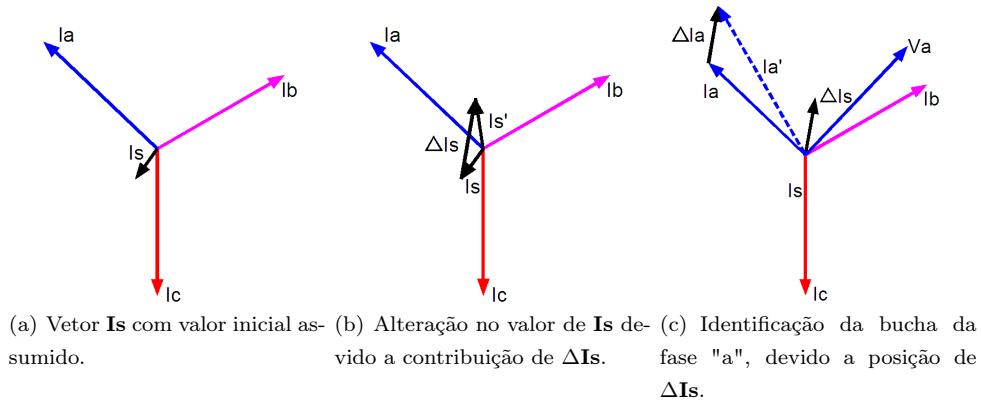
(a) Vetor **I<sub>s</sub>** nulo: Condição ideal, valores nulos de correntes de fuga nas 03 fases.  
 (b) Vetor **I<sub>s</sub>** alinhado com o **V<sub>a</sub>**: Variação somente na componente resistiva.  
 (c) Vetor **I<sub>s</sub>** defasado  $90^\circ$  do **V<sub>a</sub>**: Variação somente na componente capacitativa.

**Figura 6.4:** Considerações iniciais de análise do vetor **I<sub>s</sub>** correspondente a somatória das correntes de fuga das buchas de um sistema trifásico.

As suposições iniciais apresentadas neste capítulo de alterações do vetor **I<sub>s</sub>** puramente resistiva ou capacitiva, ou ainda o valor inicial do mesmo ser nulo, não são situações comuns encontradas. Na prática, é adotado como condição normal um valor inicial de **I<sub>s</sub>** para o sistema trifásico, conforme mostra a Figura 6.5(a), e a partir deste, caso ocorra evolução no valor é identificada qual a bucha afetada e analisada, portanto a condição de sua deterioração.

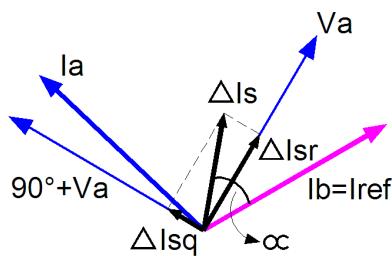
Supondo uma alteração no valor de  $I_s$  conforme mostrado na Figura 6.5(b) para  $I_s'$  devido a componente  $\Delta I_s$ , percebe-se que o mesmo não encontra-se alinhado conforme as suposições iniciais adotadas, ou seja, puramente resistivo ou mesmo puramente capacitivo. Portanto, a identificação de qual bucha foi afetada torna-se dependente da

posição do vetor  $\Delta Is$  quando do seu “deslocamento” para a origem do diagrama de fases para esta análise. Caso o mesmo encontre-se entre a quadratura formada pelos vetores  $Ia$  e  $Va$ , por exemplo, a bucha com sinais de deterioração significativos será a da fase “a”, da mesma forma, é identificada alterações nas fases “b” e “c”. A Figura 6.5(c) mostra que a bucha “a” foi responsável pela alteração no valor de  $Is$  e também mostra o novo valor de  $Ia$ , acrescido de  $\Delta Ia$  que é idêntico a  $\Delta Is$ .



**Figura 6.5:** Processo de identificação da bucha em processo de deterioração devido a variação do vetor  $Is$  correspondente a somatória das correntes de fuga das buchas de um sistema trifásico.

Para quantificar as alterações nos valores de capacitância e de fator de potência do isolamento, supondo o vetor  $Ib$  na referência, decompõe-se o vetor  $\Delta Is$  nos eixos de tensão da fase  $Va$  e no eixo  $90^\circ$  adiantado desta tensão, obtendo  $\Delta Isq$  referente ao aumento da capacitância e  $\Delta Isr$  referente ao aumento do fator de potência do isolamento da bucha, conforme mostra a Figura 6.6.



**Figura 6.6:** Decomposição do vetor  $\Delta Is$  e obtenção dos vetores  $\Delta Isq$  e  $\Delta Isr$ , correspondentes ao aumento de capacidade da bucha e fator de potência do isolamento, respectivamente.

O valor inicial, adotado como normal de  $Is$  varia de acordo com o tipo de fabricação e estado da isolação do conjunto trifásico de buchas utilizado, assim como o cálculo

adotado para sua determinação depende do fabricante do sistema adotado e de sua fase de aprendizado. Um exemplo deste cálculo é descrito por Golubev em [52] e [53], que adota a Equação 6.2 para quantificar os resultados das medições *on-line* e representar os parâmetros para diagnosticar as alterações na isolação de conjunto de buchas:

$$\gamma = \frac{\Delta I_s}{I_s} \approx \sqrt{(\Delta \tan \delta)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C_o}\right)^2}, \quad (6.2)$$

em que  $\gamma$  é parâmetro adotado para representar o estado da isolação,  $\Delta \tan \delta$  é a mudança no fator de potência do isolamento,  $\Delta C$  é a variação da capacitância e  $C_o$  é o valor inicial de capacitância.

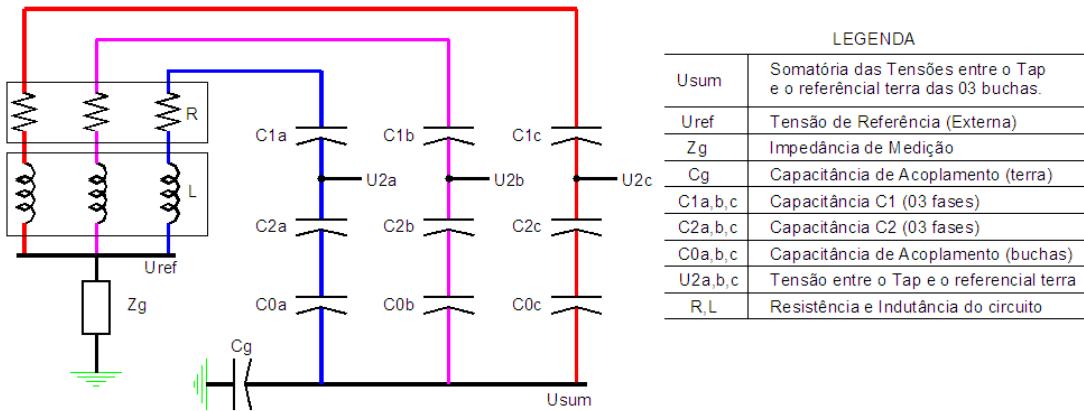
Devido a possível variação aplicada por parte dos fabricantes no cálculo deste parâmetro adotado e ainda pelo fato desta não ser uma informação relevante para este estudo, estes cálculos não serão aprofundados neste estudo em nenhum tipo de monitoramento pesquisado.

### 6.3.2 Tipos de monitoramento: Somatório das Tensões

Uma técnica comumente utilizada em ensaios em laboratórios para verificação da condição da vida útil de um equipamento é comparar uma determinada grandeza com um valor de referência. É baseado neste conceito que o tipo de monitoramento conhecido como somatório de tensões é desenvolvido, como descrito por Akabari [54] e Alireza [55]. O esquema básico de funcionamento deste monitoramento é mostrado na Figura 6.7, onde descreve-se o equivalente de um sistema trifásico de buchas condensivas.

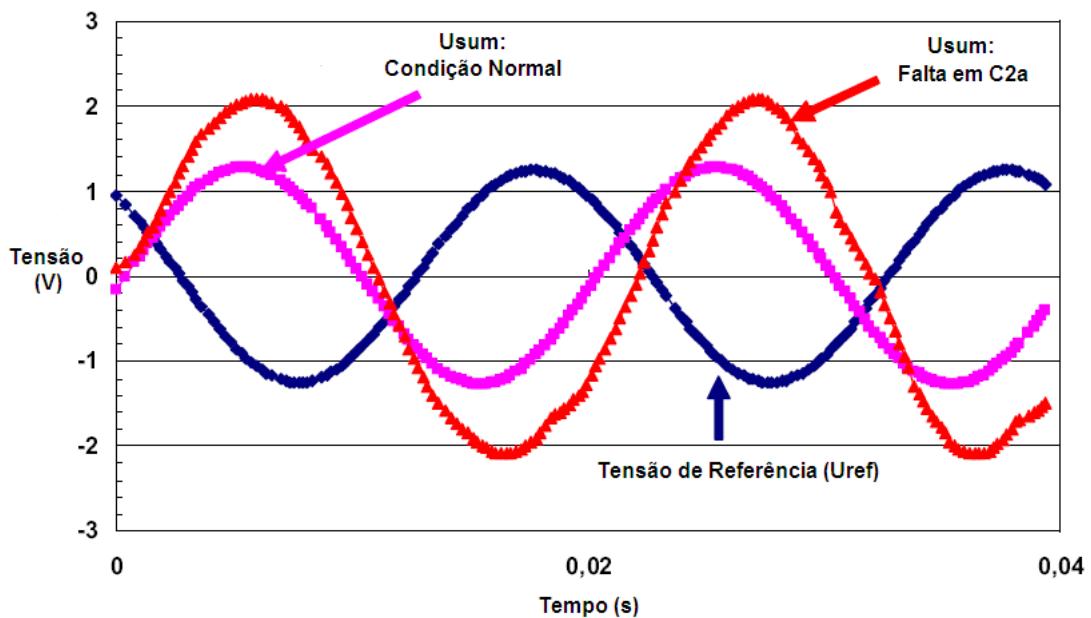
Seu princípio baseia-se na comparação da somatória das tensões referentes as três fases, com uma tensão de referência do sistema em que o transformador está conectado através de um redutor de tensão, como por exemplo um transformador de potencial capacitivo. Os componentes **C0a**, **C0b**, **C0c** e **Cg** são capacitâncias de acoplamento inseridas no circuito para possibilitar a medição da somatória das tensões, assim como a impedância de medição, **Zg**. Os valores destes são definidos de modo que o módulo da tensão medida resultante da somatória da contribuição das três fases (**Usum**) e o módulo da tensão de referência (**Uref**) sejam idênticos, ou com uma diferença padronizada considerada como aceitável.

A Figura 6.8 mostra um gráfico resultante de um ensaio realizado, utilizando este tipo de monitoramento, sendo simulado um curto-círcuito na capacitância **C2** da bucha



**Figura 6.7:** Esquema elétrico simplificado do sistema de monitoramento baseado na somatória de tensões e comparação com tensão de referência.

da fase (**C2a**).

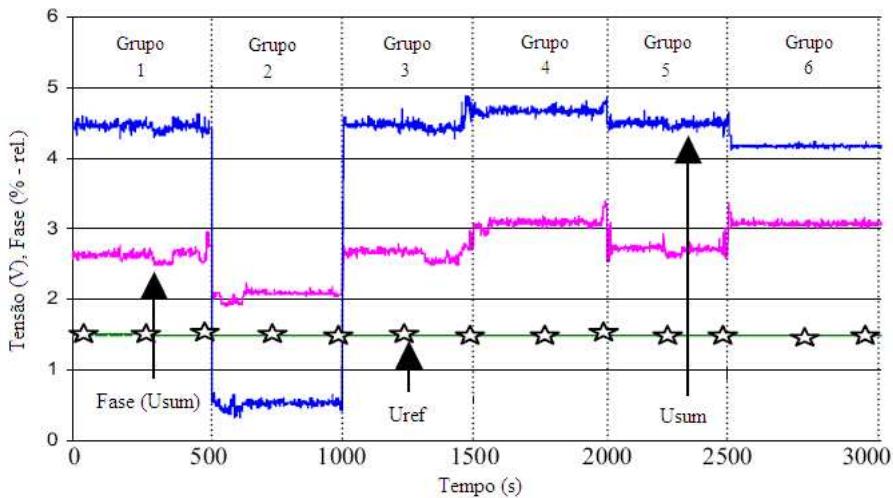


**Figura 6.8:** Gráficos resultantes do ensaio realizado em um conjunto trifásico de buchas, utilizando o sistema de monitoramento baseado na somatória das tensões, simulando um curto-circuito na capacidade C2 da fase "a" (C2a).

É observado que quando da ocorrência da falta na capacitância **C2a** o módulo da tensão **Usum** (somatória das três tensões) é alterado significativamente, mostrando claramente a influência do curto-círcito no gráfico. Nota-se também que em ambas

as situações, normal ou em falta, é considerada normal uma defasagem existente entre a tensão de somatória ( $U_{sum}$ ) e de referência ( $U_{ref}$ ), porém quando da ocorrência do curto-circuito, a defasagem entre o novo valor de  $U_{sum}$  e o valor de referência ( $U_{ref}$ ) é alterando, indicando defeito na bucha.

Quanto a identificação de que bucha contribui para a indicação de falha ou defeito neste sistema, a Figura 6.9 mostra um gráfico com os valores de amplitude da tensão e da fase de  $U_{sum}$ , dividido em seis grupos de 500 amostragens cada, com o resultado da simulação de curto-circuito nas capacitâncias  $C_{2a}$ ,  $C_{2b}$  e  $C_{2c}$  durante todo o intervalo de tempo referente aos grupos 2, 4 e 6 respectivamente. Nos intervalos referentes aos grupos 1, 3 e 5, as buchas monitoradas encontram-se em situação normal.

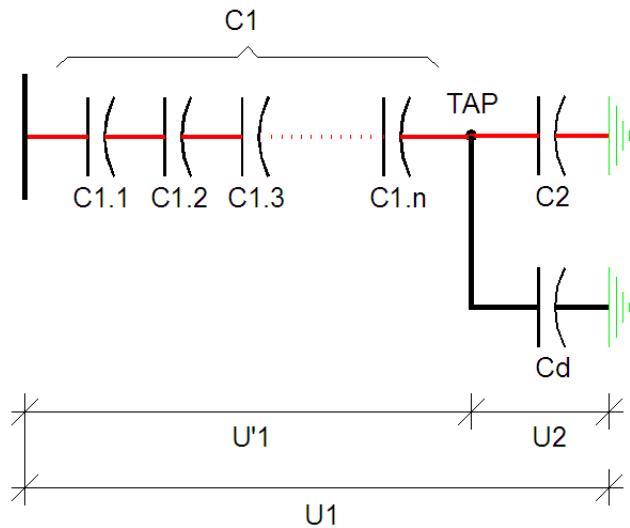


**Figura 6.9:** Gráfico indicando valores de amplitude da tensão e da fase de  $U_{sum}$  e tensão de  $U_{ref}$ , em ensaio realizado simulando curto-circuito nas capacitâncias  $C_{2a}$ ,  $C_{2b}$  e  $C_{2c}$  durante todo o intervalo de tempo referente aos grupos 2, 4 e 6 respectivamente.

No gráfico notam-se valores diferentes tanto de amplitude, como para o ângulo de fase da tensão  $U_{sum}$ , possibilitando a identificação da bucha que contribui para a somatória das tensões. Observa-se que uma falha na capacitância  $C_{2a}$ , varia negativamente de forma significativa o valor de  $U_{sum}$ , tanto em amplitude como em fase. Para as outras falhas simuladas a variação é menos brusca, porém da fácil identificação, observa-se claramente que para curto-circuito em  $C_{2b}$  a variação é positiva tanto para amplitude como para fase, já para  $C_{2c}$  a variação é negativa para a amplitude de tensão e positiva para o ângulo de fase.

### 6.3.3 Tipos de monitoramento: Medição do desvio da capacitância

A distribuição de tensões através de um divisor capacitivo é o princípio utilizado neste tipo de monitoramento, que de forma indireta mede o desvio da capacitância  $C_1$  de um conjunto trifásico de buchas condensativas, conforme relatado por [56]. A Figura 6.10, mostra de forma simplificada a distribuição de tensões de uma bucha, de acordo com suas capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$ , conforme visto anteriormente nos Capítulos 2 e 5.



**Figura 6.10:** Circuito simplificado de uma bucha condensativa e sua distribuição de tensões baseado no divisor capacitivo formado por suas capacitâncias.

Da mesma forma dos sistemas descritos anteriormente, neste sistema de monitoramento, o valor medido utiliza-se do derivação (*tap*) existente na bucha. Neste caso a grandeza medida é a tensão  $U_2$ , que conforme mostra a Figura 6.10 é resultante do paralelo entre as capacitâncias  $C_2$  e  $C_d$ . A capacitância  $C_d$  é inserida no circuito para controlar a tensão de saída, dentro dos valores definidos para aquisição do sistema inteligente de processamento de dados. A Equação 6.3 mostra o divisor capacitivo formado pelas capacitâncias mostradas na Figura 6.10:

$$\frac{U_2}{U'1} = \frac{C_1}{(C_2 + C_d)}, \quad (6.3)$$

sendo, portanto, a tensão  $U_2$  expressa conforme mostra o desenvolvimento que segue:

$$U2 = U'1 \times \frac{C1}{(C2 + Cd)}, \quad (6.4)$$

como  $U'1 = U1 - U2$ , então:

$$U2 = U1 - U2 \times \frac{C1}{(C2 + Cd)}, \quad (6.5)$$

sendo o valor de  $U1 \gg U2$ , já que  $U1$  representa o valor de tensão de fase do sistema e  $U2$  representa o valor de tensão de entrada do sistema de processamento de dados, podemos reescrever a equação da seguinte forma:

$$U2 = U1 \times \frac{C1}{(C2 + Cd)}. \quad (6.6)$$

Estando a Equação 6.6 em função das capacitâncias **C1**, **C2** e **Cd**, bem como da tensão **U1**, nota-se que uma alteração no valor de qualquer uma destas variáveis, também varia o valor de **U2**.

Realizar uma comparação entre as três fases e verificar o desvio relativo da capacitância é a maneira encontrada por este sistema de eliminar a influência da tensão do sistema (**U1**), já que este é um valor que depende de fatores não controlados, como por exemplo, carga suprida e balanceamento entre as fases, assim como a influência também de fatores externos como temperatura e umidade que influenciam nas perdas dielétricas das buchas e no seu valor de capacitância. Reescrevendo a Equação 6.6 isolando o valor de **C1**, temos:

$$C1 = (C2 + Cd) \times \frac{U2}{U1}, \quad (6.7)$$

de uma forma genérica podemos escrever que:

$$\Delta C1_N = C'1_N - C1, \quad (6.8)$$

sendo  $\Delta C1_N$  o desvio absoluto da capacitância da bucha da fase N,  $C'1_N$  a capacitância alterada desta bucha e a  $C1_N$  a sua capacitância original.

Portanto, um desvio relativo da capacitância pode ser escrito desta forma:

$$DrC_N = \frac{\Delta C1_N}{C1_N} = \frac{C'1_N}{C1_N} - 1. \quad (6.9)$$

Como o sistema tem como grandeza medida a tensão U2, conforme afirmado anteriormente, a Equação 6.9 deve ser escrita em função desta variável.

Para efeito de simplificação dos cálculos, podemos considerar que o valor de (C2 + Cd) mantém-se igual a uma constante k, já que este valores tendem a se comportar da mesma forma nas três fases em condições normais de operação. Portanto podemos afirmar que a Equação 6.7 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$C1 = k \times \frac{U2}{U1}, \quad (6.10)$$

da mesma forma também podemos afirmar que:

$$C'1 = k \times \frac{U'2}{U1}, \quad (6.11)$$

sendo U'2 a tensão alterada do *tap* capacitivo. Substituindo as Equações 6.10 e 6.11 na Equação 6.9, obtemos:

$$DrC_N = \frac{\frac{k}{U1} \times U'2_N}{\frac{k}{U1} \times U2_N} - 1 = \frac{U'2_N}{U2_N} - 1. \quad (6.12)$$

Utilizando a comparação com as três fases e sabendo que em condições normais de operação o valor de U2 de uma das fases do sistema deve ser igual a média das outras duas fases, por exemplo para a fase "a" obtemos:

$$U2_A = \frac{U2_B + U2_C}{2}, \quad (6.13)$$

portanto substituindo e aplicando a dedução da Equação 6.13 na Equação 6.12, é obtida a equação do desvio relativo percentual da bucha da fase "a" de um sistema trifásico:

$$DrC_A(\%) = 100 \times \frac{2 \times U'2_A}{(U'2_B + U'2_C)} - 1, \quad (6.14)$$

da mesma forma, pode ser aplicado para as demais fases "b" e "c" do sistema monitorado.

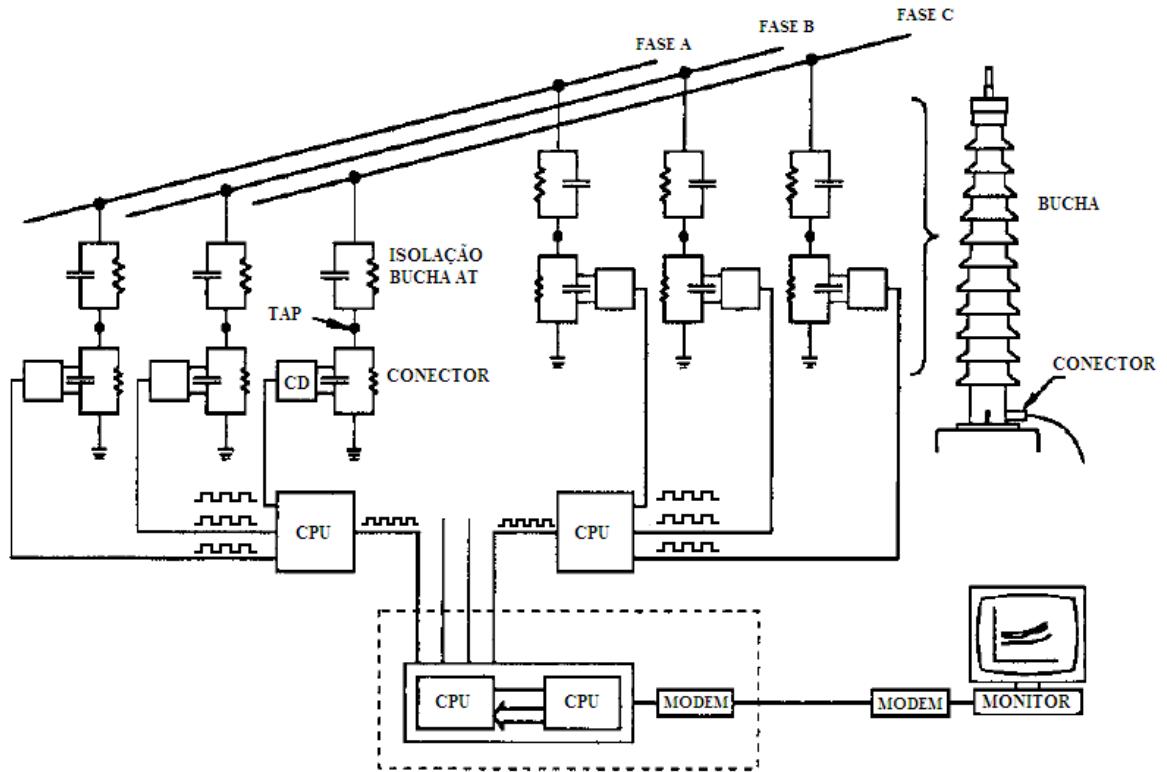
Obviamente, os valores de U2 podem não ser idênticos nas três fases, pois as buchas podem ser de fabricantes distintos, possuir tecnologias diferentes ou mesmo se encontrar em estágios de deterioração diferentes. Durante a etapa de processamento de dados, um sistema inteligente integrado a este monitoramento aplica constantes que compensam

esta diferença inicial permitindo que o início do mesmo seja possível, ainda que com esta falta de uniformidade nos dados coletados.

#### 6.3.4 Tipos de monitoramento: Ângulo de Fase

A técnica de monitoramento do estado da isolação baseada na diferença do ângulo de fase do equipamentos de potência em teste e um sinal de tensão ou corrente de referência, tem sido utilizada há algum tempo aplicada a buchas condensivas com resultados comprovados conforme descrito por Blundell *et al.* [57], Zhang *et al.* [58], Wang *et al.* [59], Hélio Amorim *et al.* [60] e Ashgar *et al.* [61].

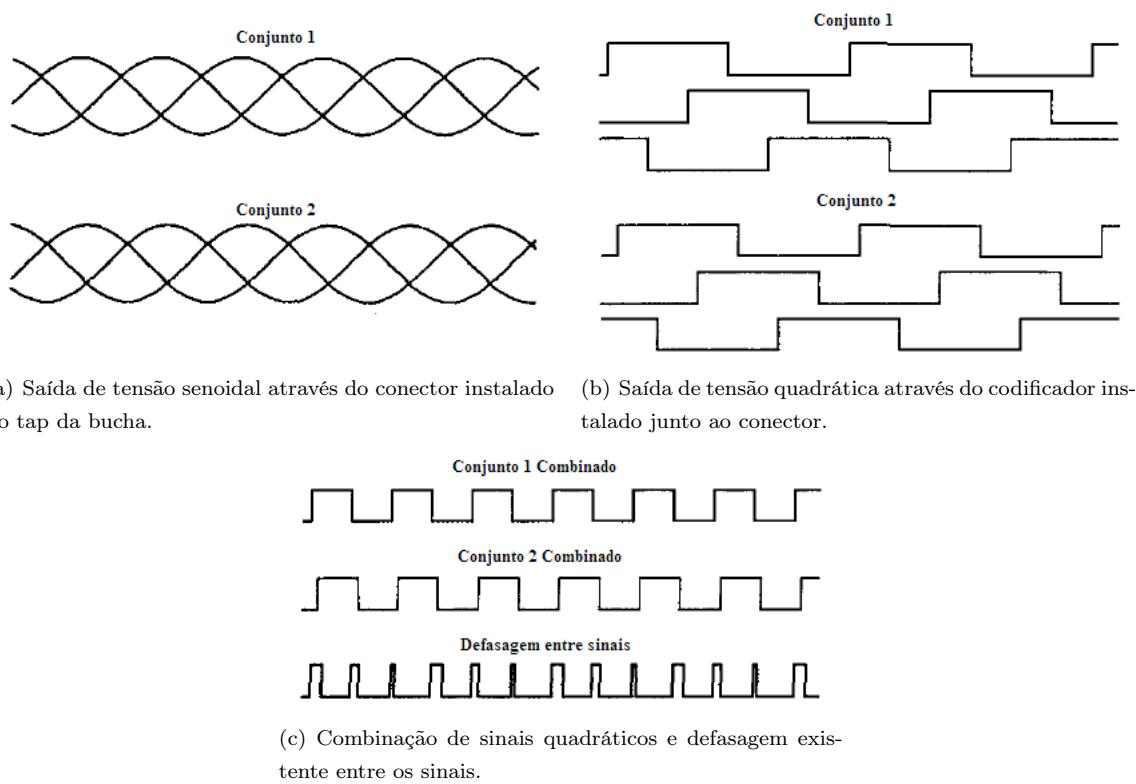
O estudo desenvolvido por Blundell *et al.* [57] mostra um circuito foi desenvolvido captando o sinal senoidal de tensão a partir dos *taps* de um sistema trifásico de buchas condensivas e comparando com outro sinal referente a um outro conjunto de buchas situado na mesma instalação, conforme mostra a Figura 6.11.



**Figura 6.11:** Circuito simplificado de um sistema de monitoramento de buchas baseado na análise da defasagem de ângulo entre sinais distintos.

De forma simplificada o processo pode ser compreendido da seguinte forma: o sinal

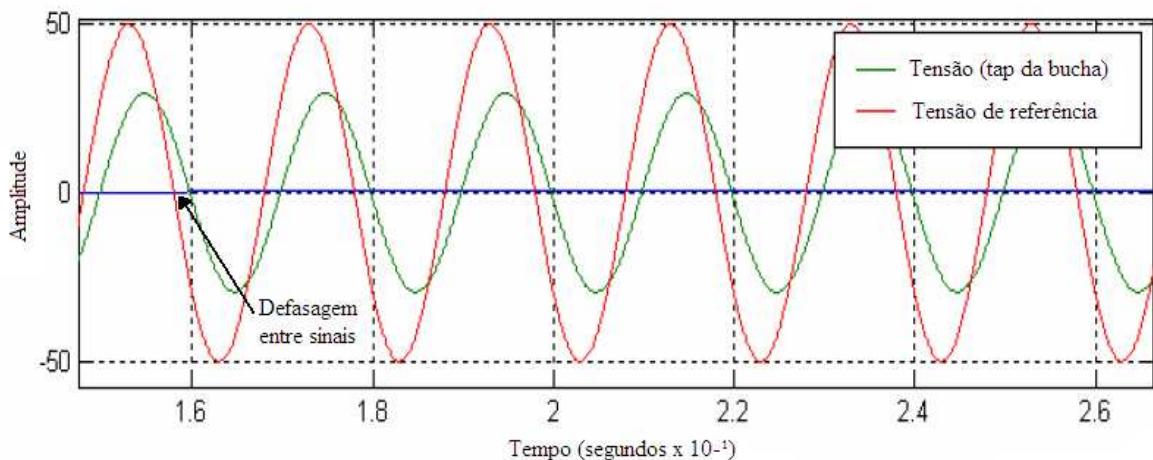
de tensão senoidal é captado através do conector localizado no *tap* das buchas, conforme pode ser visto na Figura 6.12(a) e através de um codificador (CD) é convertido para um sinal de onda quadrada, utilizando um limitador ideal (agindo como detector de passagens pelo zero), ilustrado na Figura 6.12(b) e transmitido para uma CPU onde o sinal das três fases é combinado em trem de pulso único. Com isso, estes sinais dos dois conjuntos são novamente combinados formando um único trem de pulso com a defasagem existente, obtido através do comparador de fase correspondente ao modelo clássico para sinais digitais implementado via porta lógica tipo ou-exclusivo (XOR) [62], representado pela Figura 6.12(c).



**Figura 6.12:** Tratamento dos sinais de tensão no monitoramento de buchas que mede a defasagem entre ângulos de sinais de origens distintas, obtidos via porta lógica tipo ou-exclusivo(XOR).

A variação do ângulo de defasagem entre os sinais indica uma possível alteração na capacidade dielétrica de uma das buchas do conjunto, sugerindo uma alteração no fator de potência do isolamento. Uma análise detalhada na forma de onda de cada um dos sinais quadráticos indica qual a bucha que contribui para o aumento da defasagem entre os sinais combinados.

Um experimento realizado em laboratório em uma bucha condensiva de 132 kV, relatado por [61], também utiliza a técnica de avaliação do estado da isolação baseada na defasagem angular. Neste ensaio, foram comparados um sinal de tensão obtido do tap da bucha e com um sinal de tensão de referência, captado através de um transformador de potencial padrão, instalado em paralelo com a alimentação da bucha. O gráfico com os resultados obtidos é mostrado na Figura 6.13.



**Figura 6.13:** Defasagem entre sinal de tensão  $U_2$  e tensão de referência derivada da tensão  $U_1$ , em um ensaio realizado em bucha de 132 kV.

Os resultados das medições da capacitância mostraram-se satisfatórios com erros menores que 0,9%, porém quanto a medição do fator de potência não apresentaram uma boa aproximação com o calculado, gerando imprecisão registrada da ordem de 45% (embora que com a simulação de aumento de perda dielétricas este erro tenha sido diminuído para cerca de 7%).

Experiências realizadas pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL) realizadas em laboratório com buchas condensivas de 150 kV utilizando técnica de monitoramento semelhante, também indicam uma precisão semelhante tanto para capacidade, quanto para medição do fator de potência do isolamento, como pode ser examinado detalhadamente no estudo realizado por Hélio Amorim [60].

## 6.4 Influência de Fatores Externos Sistêmicos e Ambientais

A eliminação da influência de fatores externos, como por exemplo ruídos no sinal adquirido nas medições de fator de potência do isolamento de equipamentos de potência, devido ao fato de envolver correntes de fuga com valores muito baixos da ordem de  $10^{-3}$  A, é uma das principais dificuldades encontradas pelos fabricantes de equipamentos para monitoramento *on-line* de buchas, conforme relatado por Wang *et al.* [63] e Yang *et al.* [64].

Os sensores de captação do sinal, junto ao *tap* capacitivo da bucha, não devem interferir no ângulo de fase ou mesmo na amplitude do mesmo, pois conforme mostrado nas seções referente aos tipos de monitoramento, a falta de confiabilidade nestas informações pode levar a diagnósticos equivocados.

Ainda sobre a influência externa na defasagem do ângulo, nas Seções 6.3.2 e 6.3.4 foi mostrado que é necessária a existência de uma tensão de referência externa para avaliação do estado da isolação da bucha, que na maioria das vezes é captada através de um transformador de potencial (TP) que está conectado no mesmo referencial U1 bucha. Em [64], podem ser analisados ensaios que forma realizados com um determinado TP variando a tensão nominal aplicada, bem como a carga instalada no secundário do mesmo, com os resultados mostrados nas Tabelas 6.1 e 6.2 [64].

**Tabela 6.1:** Valores de defasagem angular obtidos com sob tensão nominal e variando a carga do secundário de um dado TP.

	0,25 $S_N$	0,50 $S_N$	0,75 $S_N$	1,00 $S_N$
Fase A	0,01	-0,05	-0,11	-0,17
Fase B	0,05	0,04	0,04	0,01
Fase C	0,06	0,03	0,04	0,01

**Tabela 6.2:** Valores de defasagem angular obtidos com sob carga fixa no secundário e variando a tensão nominal U1 de um dado TP.

	0,8 $V_N$	1,00 $V_N$	1,1 $V_N$
Fase A	-0,15	-0,16	-0,21
Fase B	0,04	0,02	-0,05
Fase C	0,02	0,01	-0,05

Os resultados mostram que as variações não são significativas, não devendo ser esta

tensão de referência um fator que influencie nos resultados alcançados pelo sistema de monitoramento, estando o TP em operação sob condições de regime permanente e em bom funcionamento quanto ao seu estado de conservação.

Embora as buchas sejam projetadas e fabricadas para que, apresentando um bom estado de conservação, funcionem herméticamente seladas, ensaios realizados por Wang [63] mostram que existe uma forte influência da temperatura e da umidade nos valores de fator de potência do isolamento de um bucha, conforme visto no Capítulo 4. As Figuras 6.14(a), 6.14(b) e 6.14(c), mostram esta interdependência entre estes valores [63].

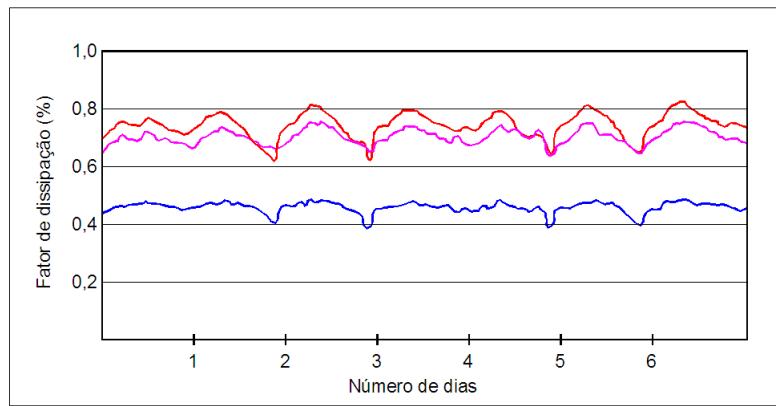
O efeito da temperatura fica evidente quando são comparadas as Figuras 6.14(a) e 6.14(b). Conforme dito na Seção 4.2.3, o aumento de temperatura provoca o consecutivo aumento na corrente de fuga volumétrica do isolamento e, como constatado, o seu fator de dissipação.

O incremento na condutividade do dielétrico devido a correntes de fuga superficiais deve ser levado em consideração no caso do acoplamento eletrostático entre o condutor central e a superfície externa da bucha ser significativo, devido a presença de alta umidade e de depósitos de impurezas na superfície externa das mesmas.

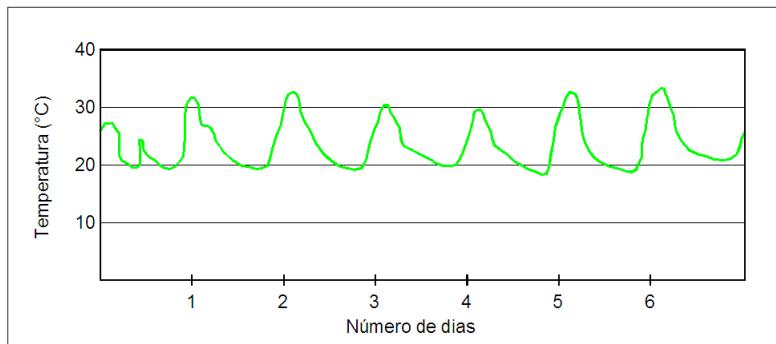
## 6.5 Experiência CHESF: Monitoramento Buchas 500kV Usina de Xingó

Conforme visto nas Seções 1.2 e 6.1, devido ao histórico de duas falhas em buchas tipo OIP instaladas em transformadores de potência conectados no sistema de 500 kV da usina hidroelétrica de Xingó de propriedade CHESF, mostrada na Figura 6.15, que resultaram em perda do ativo, assim como também em mudança na rotina operacional da instalação, como por exemplo, alteração nas atividades da operação, reduzindo bruscamente a exposição humana, ou ainda, a implementação de programa de desligamentos dos transformadores para coleta de óleo isolante e realização de ensaios de medição de fator de potência do isolamento e capacitância das buchas, conforme detalhado no Capítulo 5, foi projetado, montado e encontra-se em operação um sistema de monitoramento *on-line* de buchas condensivas.

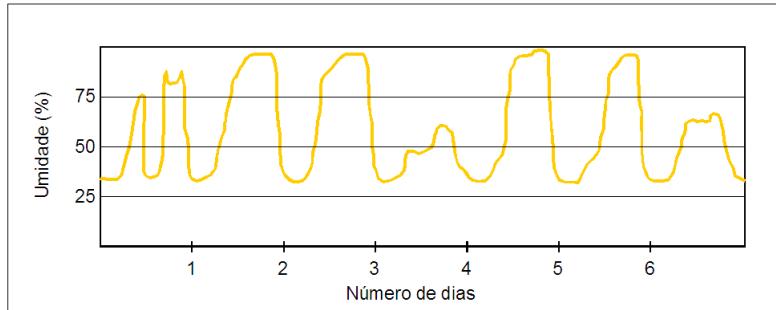
A Figura 6.15 mostra um diagrama unifilar simplificado da instalação em questão, onde são mostrados os seis geradores de 500 MW, seus respectivos transformadores



(a) Valores de fator de potência do isolamento do sistema trifásico de buchas.



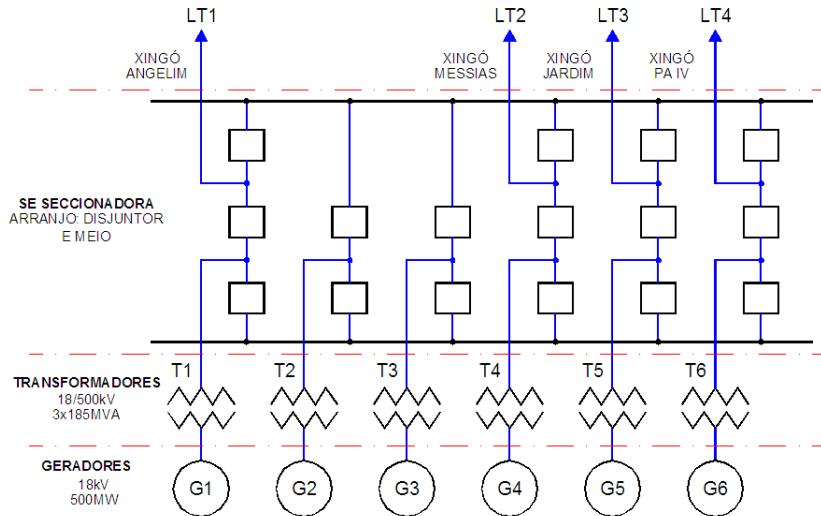
(b) Valores de temperatura registrados no mesmo período.



(c) Valores de umidade ambiente registrados no mesmo período.

**Figura 6.14:** Relação entre temperatura, umidade e valores de fator de potência do isolamento em um sistema trifásico de buchas de um dado transformador, registrados durante sete dias.

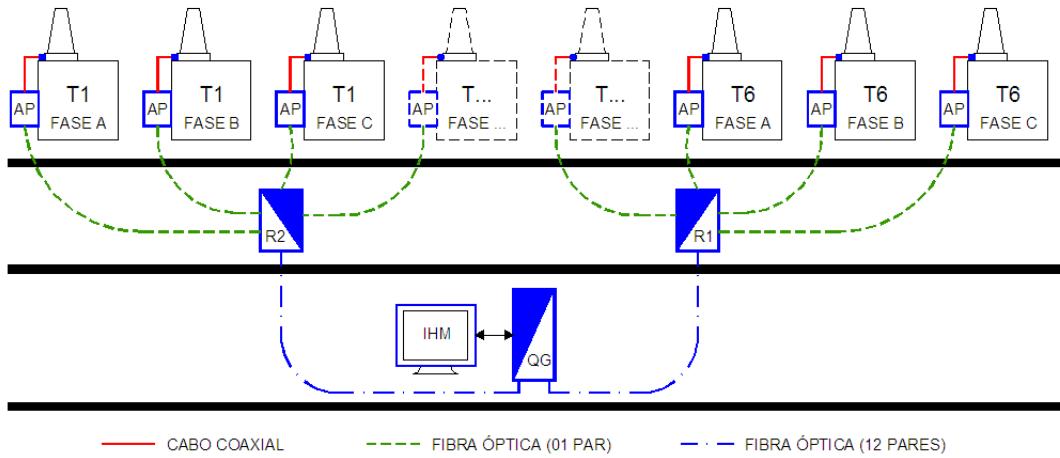
monofásicos de 18/500 kV com potência nominal de 185 MVA cada, bem como a subestação seccionadora e as linhas de transmissão derivadas da mesma.



**Figura 6.15:** Diagrama unifilar simplificado elaborado pelo autor da dissertação do complexo hidrelétrico de Xingó da propriedade da CHESF.

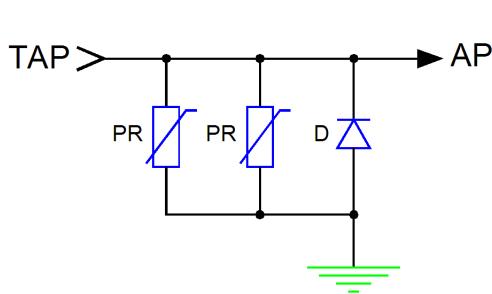
#### 6.5.1 Projeto e Detalhes de Montagem

O sistema de monitoramento instalado mede o desvio da capacitância, conforme detalhado na Seção 6.3.3. Para ter uma melhor compreensão do seu funcionamento, que envolve o monitoramento de todas as 18 buchas de 500 kV instaladas nos transformadores, a Figura 6.16 mostra um resumo deste projeto onde é detalhada a topologia dos equipamentos instalados, bem como a identificação e localização dos mesmos.



**Figura 6.16:** Projeto resumo do sistema de monitoramento de Xingó com topologia dos equipamentos instalados, identificação e localização dos mesmos.

A conexão com cada bucha é feita através de um conector adaptado para o *tap* capacitivo da mesma, composto de dois pára-raios e um diodo de rápida atuação, que tem a função de proteger o equipamento contra sobre-tensões, sejam de surtos de tensão transitórios, ou mesmo de uma possível ausência de referencial terra, o que causaria o aumento da tensão neste ponto, conforme visto no Capítulo 2. As Figuras de 6.17(a) a 6.17(c), mostram um diagrama simplificado do conector e fotos mostrando o conector com detalhes.



(a) Diagrama simplificado da conexão com o *tap* da bucha. (b) Foto do conector utilizado (Conexão com TAP).

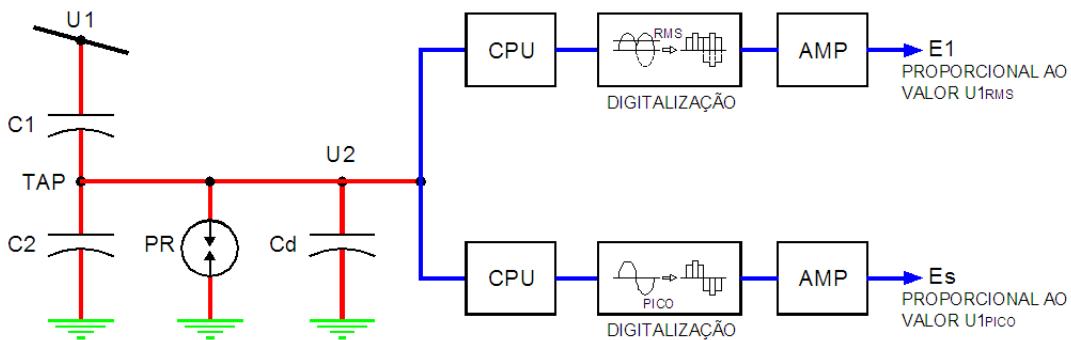


(c) Foto do conector utilizado (Conexão para o painel AP).

**Figura 6.17:** Diagrama simplificado e fotos ilustrativas do conector utilizado.

Em cada transformador tem instalado um quadro identificado como AP, onde é realizada a aquisição e digitalização dos dados para envio, através do par de fibras ópticas existente entre o painel AP e os painéis R1 e R2, mostrados na Figura 6.15. Neste painel AP, ainda se localiza a capacidade de acoplamento Cd, mencionada no desenvolvimento da Seção 6.3.3, que controla a tensão de entrada do painel, permitindo sua digitalização.

De forma simplificada podemos entender que, no painel AP existem dois circuitos em paralelo para a aquisição de dados, sendo um para a tensão entre o *tap* capacitivo e o potencial terra (**U2**), que conforme visto na Seção 6.3.3 influencia diretamente no valor calculado de desvio da capacitância, e o outro para medição das sobretensões transitórias, com uma frequência de amostragem cerca de 30 vezes mais rápida que o anterior, para verificar a influência destes pulsos de sobretensão nos valores calculados de desvios na capacitância. A Figura 6.18 mostra a topologia destes circuitos de aquisição e digitalização dos dados, incluindo os processadores (CPU), amplificadores de sinal (AMP) e a proteção contra surtos de sobretensão (PR) existente no conector.



**Figura 6.18:** Ilustração elaborada pelo autor da dissertação que mostra a topologia do circuito de aquisição e digitalização de dados do painel AP.

Os painéis R1 e R2, que exercem função apenas de conexão, concentram os pares de fibra óptica de cada um dos transformadores e enviam os dados, através de dois cabos de fibra óptica de 12 pares cada para o painel principal QG, onde os dados são processados e realizada a análise dos mesmos para a geração do diagnósticos e alarmes na IHM.

#### 6.5.2 Fase de Aprendizagem

A fase de aprendizagem de um sistema de monitoramento de buchas é onde as interferências no mesmo, externas ou não, são minimizadas, através da “adaptação” deste ao sistema em que está inserido, podendo estas influências terem diferentes impactos ou mesmo possuírem naturezas diversas.

O período da fase de aprendizagem varia de acordo com falta de uniformidade

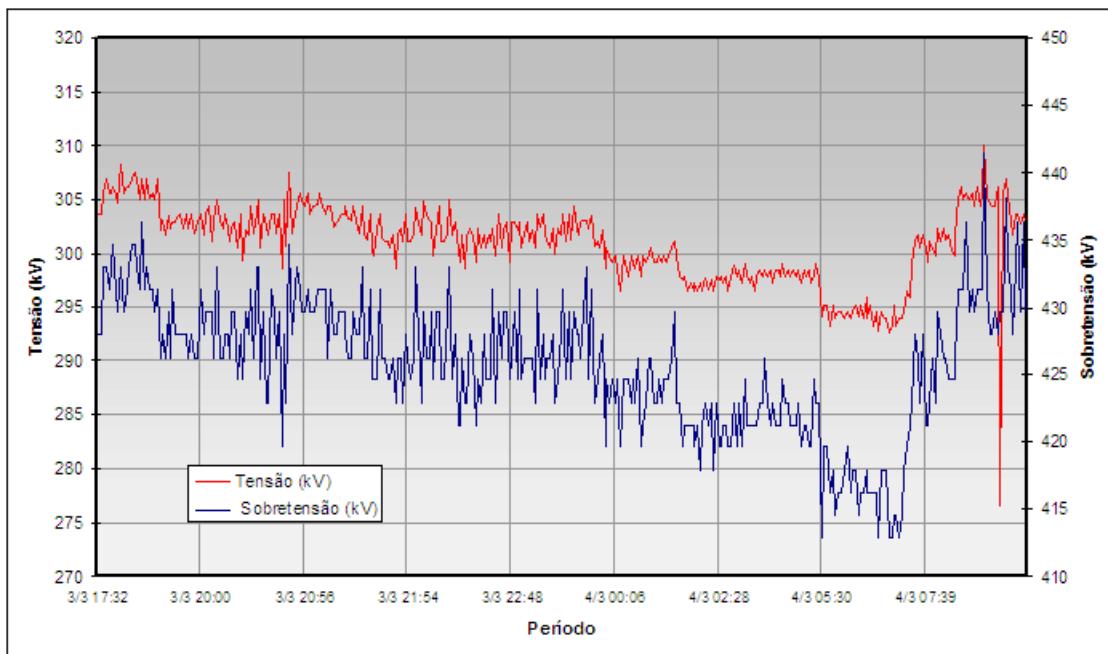
na variação dos parâmetros do sistema, como por exemplo ambientes com variação muito bruscas de temperatura que não seguem um comportamento cíclico ou mesmo variação no carregamento ou ainda na diferença de tensão entre as fases de um mesmo banco de transformadores. A Tabela 6.3 mostra uma associação entre exemplos de interferências possíveis e soluções encontradas pela lógica implementada pelo sistema de monitoramento instalado em Xingó durante o período de aprendizagem para minimizar os seus efeitos.

É importante salientar que a depender do tipo de monitoramento escolhido, visto nas Seções 6.3.1 a 6.3.4, o sistema irá adotar soluções diferentes para uma mesma interferência.

**Tabela 6.3:** Relação entre interferências externas atribuídas a instalação em que o sistema de monitoramento está inserido e soluções encontradas pelo mesmo, no período referente a fase de aprendizagem.

Interferências	Soluções Encontradas no período de aprendizagem
Desbalanceamento da tensão U1 entre fases.	Durante a fase de aprendizagem o sistema entende como condição normal este balanceamento, caso o mesmo tenha um comportamento constante durante o período.
Aumento da tensão U2 devido a variação de temperatura	O sistema entende como condição normal este aumento se as demais fases apresentam comportamento semelhante, já que existe uma comparação entre as mesmas conforme visto.
Sobretensão transitória U1	O sistema tem seus diagnósticos baseados em valores médios durante determinados períodos, diminuindo o impacto das sobretensões transitórias que tem valores altos, porém em curto espaço de tempo. Conforme visto, existe um circuito em paralelo que mede as sobretensões transitórias.
Tecnologia de fabricação das buchas diferente entre fases	O sistema entende como condição normal a diferença no desvio da capacidade devido a utilização de tecnologia diferente nas buchas, como por exemplo utilização em um mesmo sistema de buchas RIP e OIP, caso exista um comportamento na tensão U2 das três fases semelhante durante o período

Durante esta fase de aprendizagem existe uma variação nos dados calculados e registrados bem significativa devido ao processo de adaptação as condições sistêmicas mostradas. A Figura 6.19 mostra um exemplo de aquisição de dados de tensão e sobretensão dos transformador T6 fase A da usina de Xingó para exemplificar o fato descrito, onde observa-se que embora a frequência de amostragem seja diferente entre os circuitos de tensão e sobretensão, conforme visto na Figura 6.18, a curva dos sinais tem um comportamento similar.

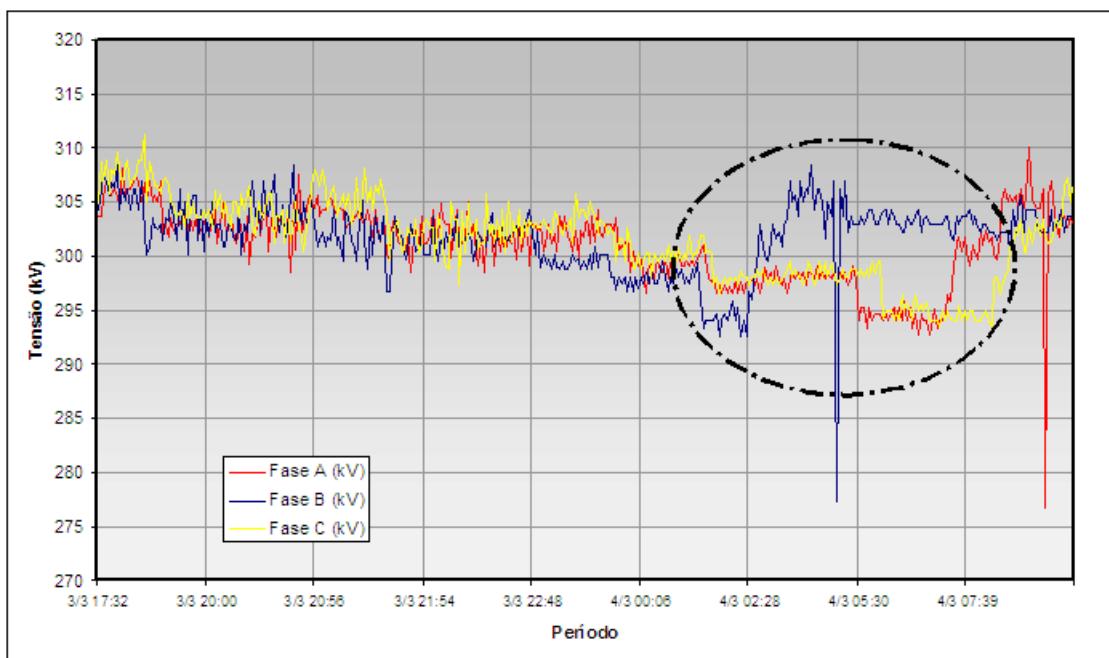


**Figura 6.19:** Dados de tensão e sobretenção aquisitados durante fase de aprendizagem do transformador T6 fase A da usina de Xingó.

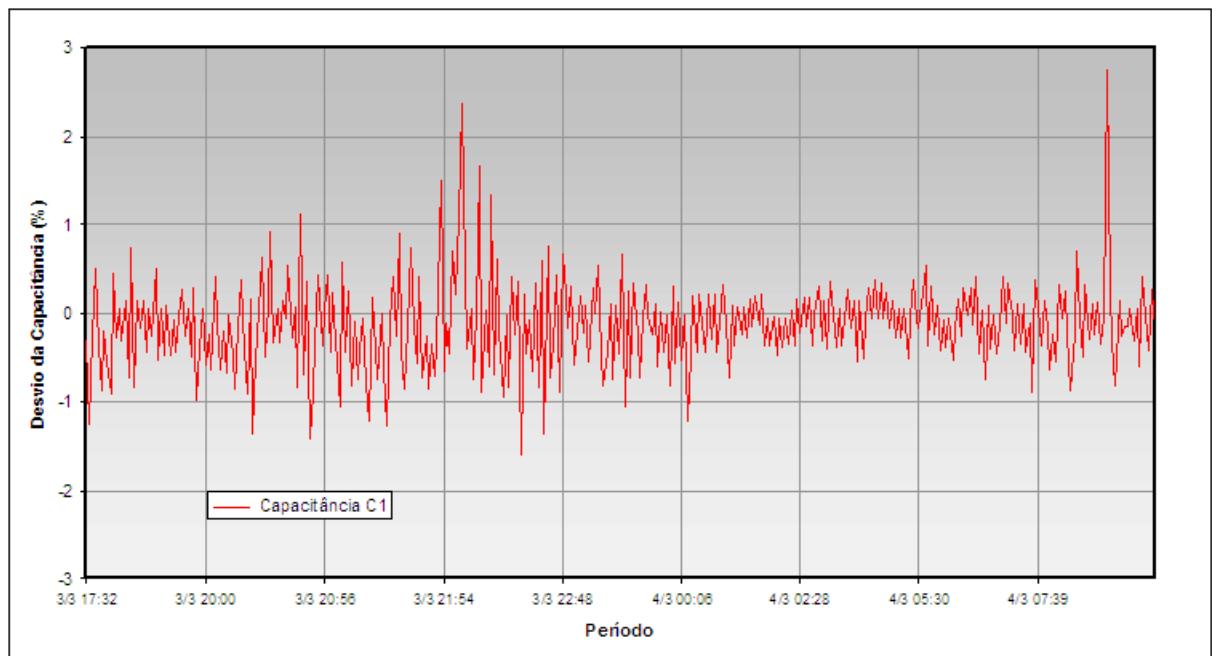
A variação registrada na curva de tensão, durante o período de aprendizagem, mostrada na Figura 6.19, tem influencia direta no cálculo do desvio da capacidade, conforme explicitado na Equação 6.14.

A Figura 6.20 mostra a diferença da tensão registrada nas três fases do transformador T6, durante um dado período desta fase.

Esta variação na diferença de tensão constatada entre fases influencia diretamente no valor calculado de desvio da capacidade, conforme mostra a Figura 6.21.



**Figura 6.20:** Diferença do sinal aquistado de tensão nas três fases do transformador T6.

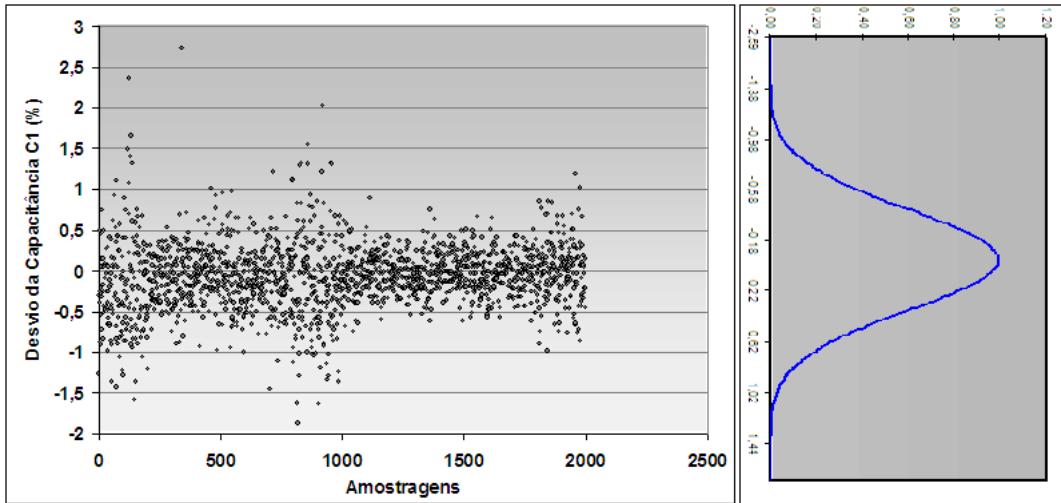


**Figura 6.21:** Valores de tensão nas três fases do transformador T6 da usina de Xingó e do desvio da capacidade da fase A, durante fase de aprendizagem.

### 6.5.3 Diagnósticos

Os diagnósticos dados pelo sistema de monitoramento utilizam a base de dados registrada e podem ser de natureza estocástica ou determinística.

De forma simplificada, os diagnósticos de natureza estocástica são determinados pelos valores calculados dos desvios da capacidade C1 ou C2 de uma fase comparada a média dos valores encontrados nas duas outras fases durante a fase de aprendizagem formando uma curva gaussiana, conforme ilustra a Figura 6.22 que tem como base os valores calculados em um dado período da fase de aprendizado do transformador T6.



**Figura 6.22:** Ilustração feita pelo autor da dissertação mostrando uma curva Gaussiana representativa dos valores calculados de desvio da capacidade do transformador T6 fase A da usina de Xingó, durante fase de aprendizagem.

De posse deste perfil de dados, os diagnósticos utilizam os dados adquiridos em um determinado período de tempo, como por exemplo, um dia ou um mês, e comparam com os limites estabelecidos na programação do sistema de monitoramento. Para melhor compreensão, o Apêndice C mostra todos os diagnósticos possíveis, bem como ações recomendadas, prognósticos e tendências referentes ao sistema implantado na usina de Xingó.

Os diagnósticos podem ser alterados de acordo com o fabricante e a especificidade da instalação.

## 6.6 Conclusão

As técnicas abordadas foram aprofundadas neste capítulo e fazem parte do escopo deste estudo por se tratarem de métodos com resultados práticos consistentes e comprovados através de registros nos diversos artigos e publicações que servem de referência

para esta dissertação.

Baseando-se nas constatações vistas no Capítulo 5 de que as alterações nos valores de fator de dissipação do isolamento antecedem as modificações nos valores de capacância e aliando-se a sua maior utilização dentre as empresas concessionárias, bem como a menor influência a fatores externos como por exemplo, uma tensão de referência oriunda de um outro equipamento elétrico também sujeito a falhas (transformador de potencial capacitivo, por exemplo), é fato afirmar que atualmente a técnica mais adequada para realizar o monitoramento *on-line* do isolamento de buchas condensivas são as que envolvem diretamente a medição das suas correntes de fuga resistivas.

Baseado na experiência da CHESF, a fase de aprendizado do sistema de monitoramento de buchas é a mais critica, já que nesta etapa todos os fatores externos envolvidos ainda estão em processo de reconhecimento e portanto, mais evidentes (e.g., a diferença do estado de conservação do isolamento entre as buchas instaladas ou ainda os efeitos transitórios de chaveamento). Outro fator relevante a se considerar nesta fase é o treinamento para a adequação dos funcionários envolvidos na operação e manutenção a esta ferramenta de manutenção preventiva.

# 7

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

*Não é o fim que é interessante, mas os meios para chegar lá.*

**Georges Braque, Escritor Francês  
(1882-1963)**

### 7.1 Conclusões e Recomendações

Acompanhando uma tendência mundial em todas as áreas que envolvem processo ou produto, as empresas concessionárias de energia elétrica estão inseridas em um cenário que exige das mesmas um maior investimento em confiabilidade e qualidade dos seus ativos. Seja devido ao novo perfil do consumidor, pela cada vez mais intensa dependência da energia para manutenção de diversas áreas da sociedade atual, ou mesmo ainda por regulamentações que, em muitas situações, exigem uma disponibilidade contínua dos serviços prestados, tornando as empresas sujeitas a severas multas sobre sua receita.

O transformador de potência é o principal ativo de uma instalação elétrica de transmissão, seja por seu custo atribuído [4] ou mesmo pela sua função desempenhada. Baseado nesta afirmação e na distribuição de falhas apresentadas no Capítulo 1 deste estudo, recomenda-se que a preocupação com as buchas para transformadores deve ser ação prioritária na política de manutenção de uma empresa de transmissão ou geração de energia, visto que em alguns casos, sua contribuição pode atingir cerca de 40% do total de falhas. Reforçada ainda pelo fato de que falhas em buchas, muitas vezes envolvem a perda do equipamento principal, o transformador.

Baseado nos estudos sobre os tipos de buchas, recomenda-se que as buchas condensivas, devido ao seu maior controle interno sobre a distribuição de campo elétrico e de diferença de potencial, devem ser aplicadas equipamentos com tensão acima de 69 kV ou mesmo ainda em um equipamento com classe de tensão igual ou inferior, mas que desempenhe uma função essencial para a empresa. Ainda sobre o seu sistema isolação recomenda-se que os investimentos devem ser direcionados para buchas tipo OIP ou RIP, que possuem rendimentos semelhantes, com relação as suas características quanto a perdas dielétricas e descargas parciais.

Devido a grande utilização de buchas tipo OIP, proporcionalmente o histórico de falhas envolvendo este tipo de isolamento é mais evidente. Porém existe uma tendência comprovada pela fabricação atual das buchas condensivas entre as empresas de direcionar seus investimentos para tecnologia com papel impregnado de resina. A utilização de buchas tipo RIP com revestimento em materiais poliméricos, como as buchas SRI, devido a sua não propagação de estilhaços de porcelana quando de uma falha em buchas tradicionais, indicam ser a tendência mundial para os próximos anos.

Fica evidente concluir que os investimentos com as técnicas de fabricação, montagem e projeto devem ser voltados para o sistema de isolamento das buchas, visto que o Capítulo 3 mostra que os seus principais modos de falha estão interligados com a sua isolação.

Assim como em todos os equipamentos elétricos, é seguro concluir que em buchas condensivas as atenções devem ser voltadas para o seu carregamento e a sua estanqueidade, controlando desta forma os três principais fatores catalisadores de defeitos: temperatura, oxigênio e umidade. Sendo adquirido um equipamento que tenha um projeto e uma fabricação que garanta um bom desempenho em regime permanente, o controle destes fatores garante o prolongamento de sua vida útil.

Para acompanhar o desempenho de uma bucha condensiva durante sua fase de operação, recomenda-se a utilização das técnicas de manutenção que mostraram ser mais eficientes no que se refere a identificar uma falha no início do seu processo, ou seja, a medição do fator de dissipação do isolamento e a análise cromatográfica do gases formados, conforme visto no Capítulo 5. Complementando, a medição do teor de umidade, devido ao necessário controle da sua estanqueidade, e a medição de sua capacidade, devido a possíveis curto-circuitos entre camadas capacitivas concêntricas,

também se mostram eficientes como técnicas preventivas de acompanhamento da vida útil para buchas condensivas em operação.

Devido a atual dificuldade de realização de desligamentos de transformadores pelas concessionárias, para aplicação de técnicas de manutenção preventiva convencional, juntamente com o fato de que os indícios de problemas em equipamentos elétricos como buchas condensivas, não são perceptíveis em inspeção visual, conclui-se que a utilização de técnicas de monitoramento *on-line* da sua isolação, em equipamentos que envolvam “alto” retorno financeiro para as empresas ou que envolvam riscos para o pessoal de operação e manutenção, é a forma mais eficiente de garantir a sua integridade e funcionamento seguro e adequado. Contribui para esta conclusão, a rápida evolução para uma falha que pode sofrer uma bucha condensiva, conforme mostrado na introdução do Capítulo 6.

Dentre as técnicas de monitoramento disponíveis, conclui-se que a técnica de somatória das correntes, que envolvem diretamente a medição das correntes de fuga da bucha mostra ser mais eficiente, devido ao fato de que o aumento deste parâmetro de medição mostra sinais de deterioração em uma fase mais incipiente do que as técnicas de medição de capacidade, tensão ou alteração no ângulo de fase. Além deste fato, a não necessidade de inclusão de tensões de referência oriundas de equipamentos periféricos ao conjunto de buchas condensivas monitoradas, como por exemplo um TPC (também suscetível a falha em seu funcionamento), aumenta a confiabilidade do sistema, devido a diminuição de influências externas para contribuição de diagnósticos equivocados.

## 7.2 Trabalhos propostos para o futuro

Devido a sua importância para integridade do sistema elétrico e das pessoas envolvidas na operação e manutenção, cabe um maior desenvolvimento nos estudos dos seguintes assuntos:

- Dielétricos envolvendo buchas condensivas, principalmente com a tecnologia que utiliza resina impregnada;
- Transitórios envolvendo buchas condensivas, iniciados no Apêndice B;

- Interligação entre os gases formados em buchas condensivas e os diagnósticos possíveis;
- Coleta de dados sobre os modos de falha de buchas condensivas entre as empresas concessionárias e fabricantes;
- Coleta de dados entre as empresas concessionárias de energia, em outros países, sobre o monitoramento *on-line* de buchas condensivas;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DIETRICH, W. An international survey on failures in large power transformers in service. *ELECTRA - International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ)*, v. 88, p. 21–48, 1983.
- [2] PENA, M. C. M. *Falhas em Transformadores de Potência: Uma Contribuição Para Análise, Definições, Causas e Soluções*. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2003.
- [3] JASINSKI, R.; AGUIAR, R. Ocorrências em buchas de transformadores. In: ELETRONORTE. *Seminário de Buchas de Transformadores de Potência*. Brasília: IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2005.
- [4] FRAGA, F. N. *Desenvolvimento de um Modelo Computacional para Análise de Confiabilidade de Arranjos de Subestações*. Dissertação (Mestrado) — UFPE, 2003.
- [5] RESOLUÇÃO Normativa 270. ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2007.
- [6] CALAZANS, A. et al. *Levantamento do Estado da Arte no Monitoramento e Diagnóstico de Buchas*. Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica - ABRATE, 2008. Relatório Técnico GTM/SGME 009/2007.
- [7] NBR5034 - Buchas para tensões alternadas superiores a 1kV. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1989.
- [8] EASLEY, J. K.; STOCKUM, F. R. Bushings. *IEEE Tutorial on Transformers*, p. 32–42, 1983.
- [9] MILASCH, M. *Manutenção de transformadores em líquido isolante*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

- [10] SHADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K. *Fundamentos de Circuito Elétrico*. Porto Alegre - RS: Bookman, 2003.
- [11] SHADIKU, M. N. *Elementos do Eletromagnetismo*. Porto Alegre - RS: Bookman, 2004.
- [12] ELLIS, K. P. Bushings for power transformers. *Doble Engineering Company*, p. 1–11, 2004.
- [13] IEEE Standard General Requirements and Test Procedure for Outdoor Power Apparatus Bushings. USA: IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1991.
- [14] MICAFIL. Rip technology. Manual Técnico do Fabricante. 2003.
- [15] NBR5462 - Confiabilidade e Mantenabilidade. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1994.
- [16] SIQUEIRA, I. P. de. *Manutenção Centrada na Confiabilidade*. Recife - PE: QualityMark, 2005.
- [17] SANTOS, C. M. P. dos. Notas de aula da disciplina engenharia de manutenção. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. 2005.
- [18] SIQUEIRA, I. P. de et al. Transformadores de força imersos em líquido isolante: Guia de manutenção centrada na confiabilidade. *CIGRÉ Brasil*, v. 1, p. 105–1117, 2007.
- [19] CHESF. Banco de dados de falhas em buchas condensivas e transformadores. 2007.
- [20] SOKOLOV, V. et al. Guide for life management techniques for power transformers. *CIGRÉ Working Group A2.18*, v. 227, p. 22–35, 2003.
- [21] HALLIDAY, D.; RESNIK, R.; KRANE, K. S. *Física 3*. [S.l.]: LTC, 1992.
- [22] LUNA, A. M. *Materiais de Engenharia Elétrica*. Recife: Bagaço, 2006.
- [23] SCHMIDT, W. *Materiais Elétricos*. São Paulo: Edgard Blücher, 1979.
- [24] LIPSHTEIN, R.; M.I.SHAKHNOVICH. *Transformer Oil*. Springfield - USA: The U.S. Department of Interior, 1968.

- [25] YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Electromagnetism*. São Paulo - SP: PEARSON, 2005.
- [26] C57.106 - IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. [S.l.]: IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers., 2002.
- [27] ALVES, M. E. G. *Monitoração de Buchas Condensivas Isoladas com Papel Impregnado com Óleo*. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) — USP, São Paulo, 2004.
- [28] MARTINS, M. A. G. Furfuraldeido - um indicador pratico da degradacao termica do papel kraft de transformadores. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, v. 19, p. 10–19, 2007.
- [29] CORVO, A. M.; DIOGO, A. C. T.; FERRATONE, D. Cromatografia líquida de alto desempenho na manutenção preditiva de transformadores de potência. *Manutenção*, v. 33, p. 7–9, 1991.
- [30] BURTON, P. et al. Application of liquid chromatography to the analysis of electrical insulating materials. *CIGRÉ International Conference Large High Voltage Electric Systems*, 1988.
- [31] BUSHINGS - RIP Technology. [S.l.].
- [32] RESIN Impregnated Paper Bushings - ABB Power Technology Products. [S.l.].
- [33] ISOGAI, T.; IKEMOTO, N.; INOUCE, T. Epoxi-resin-impregnated paper insulation system for ultra-high-voltage applications. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 6, p. 94–101, 1971.
- [34] PERUZZO, F.; CANTO, E. *Química 3*. São Paulo: Moderna, 1998.
- [35] CRAGHEAD, D.; EASLEY, J. Thermal test performance of a modern apparatus bushing. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 97, p. 1–9, 1978.
- [36] ZENG, D. An experimental thermal siphon bushing. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 15, 2000.
- [37] ZENG, D. A study of current-carrying capacity of drawlead cable in condenser bushing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, p. 925–930, 2000.

- [38] ZENG, D. An improved method for estimating temperature rise of a bushing loaded above nameplate rating. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, p. 986–995, 1999.
- [39] MCNUTT, W.; EASLEY, J. Mathematical modelling - a basis for bushing loading guides. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 6, p. 2393–2404, 1978.
- [40] CASTLE, T. B. W. J. E.; ALI, M. The transport of copper through oil-impregnated paper insulation in eletrical current transformers and bushings. *IEEE*, v. 19, p. 25–29, 2003.
- [41] VUJOVIC, D. T. P.; MEAL, D. V. The influence of impurities on the dielectric strengths of bushings. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, p. 201–205, 1994.
- [42] ROSEVAL, A. et al. Manobras de chaves seccionadoras com tensão e solicitações de alta frequência nos transformadores de corrente. *EletroEvolução*, v. 49, p. 55–61, 2007.
- [43] POMPILI, M. et al. Comparative aging characteristics os oil-impregnated-paper bushings of different thicknesses subjected to switching surges. *Conference Record of the 2000 IEEE Internacionial Symposium on Electrical Insulation*, p. 465–468, 2000.
- [44] POMPILI, M.; MAZETTI, C.; BARTNIKAS, R. Partial discharge behavior in switching-surge-aged oil-paper capacitor bushing insulation. *IEEE Transactions on Dielectric and Eletrical Insulation*, v. 9, p. 104–111, 2002.
- [45] DENSLEY, R.; B.K.GUPTA. Effect of temperature on sensitivity of diagnostic tests on oil-impregnated paper insulation. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference.*, p. 601–604, 2001.
- [46] IEC 60599 - Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. [S.l.]: International Electrotechnical Commission, 1999.
- [47] FILHO, V. N. de A. B. *Monitoramento e Diagnóstico de Estados de Grandes Transformadores, com Ênfase para o Diagnóstico pela Cromatografia com o Uso*

*de Redes Neurais.* Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, 2003.

- [48] NBR 6940 - Técnicas de Ensaios Elétricos de Alta Tensão - Medição de Descargas Parciais.
- [49] MELO, M. A. C. Falhas em buchas condensivas de 550 kv instaladas em transformadores e reatores de furnas. *Forum da Doble no Brasil*, p. 1–7, 2005.
- [50] ALVES, M. E. G. Relatório técnico threetech sobre monitoração de buchas chesf uhe xingó. 2006.
- [51] LACHMAN, M. F.; WALTER, W.; GUGGENBERG, P. On-line diagnostics of high-voltage bushings and current transformers using the sum current method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, p. 155 – 162, 2000.
- [52] GOLUBEV, A. et al. Bushing on line monitoring. *IEEE - Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, p. G–072, 2005.
- [53] KANE, C.; GOLUBEV, A. On-line monitoring of bushings on large power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, p. 54–61, 2005.
- [54] AKBARI, A. et al. On-line monitoring and diagnoses of power transformer bushings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 13, p. 608–615, 2006.
- [55] SETAYESHMEHR, A. et al. On-line monitoring of power factor and capacitance of transformer bushings. *IEEE - Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, p. G–064, 2005.
- [56] SIEMENS. Relatório técnico - sensor de tensão para detecção de falha em buchas de at descritivo e comprovação elétrica e matemática da funcionalidade. 2005.
- [57] ALLAN, D. M. et al. New insulation diagnostic and monitoring techniques for in-service hv apparatus. *IEEE - Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, p. 448 – 451, 1991.
- [58] ZHANG, Y. et al. On-site automatic measurement of hv insulation. *IEEE*, p. 642 – 644, 1988.

- [59] RAGHUVeer, M. R. et al. A digital technique for the on-line measurement of dissipation factor and capacitance. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 8, p. 228 – 232, 2001.
- [60] JR., H. P. A. et al. Desenvolvimento e implementação de um sistema integrado de medição de descargas parciais e fator de perdas on-line em transformadores de potência. *Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ*, 2007.
- [61] BAHADORI, M.; ALLAHBAKHSI, M.; AKBARI, A. Discrimination between insulation degradation and faulty conditions in condenser bushings using on-line power factor monitoring. *IEEE - Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, p. G-071, 2005.
- [62] CHUI, W. S. *Princípios de Telecomunicações - Manual de Laboratório e Exercícios*. 10. ed. [S.l.]: Érica, 1998.
- [63] WANG, H.; SHI, B.; YANG, L. Studies on the effect of influencing factors on condition monitoring of hv substation equipment. *IEEE Electrical Insulating Materials.*, p. 753 – 756, 2001.
- [64] YANG, L.; SHI, B. An investigation on the influencing factors on on-line insulation monitoring of hv apparatus. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, p. 81 – 84, 2000.

# APÊNDICE

## A.1 Analise Gás Cromatográfica

A seguir o banco de dados com todas as amostras de óleo de buchas tipo OIP da usina hidroelétrica de Xingó de propriedade da CHESF. Em destaque, com letras na cor vermelha, as unidades que foram retiradas de operação.

ID	F	COLETA	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
B1T6	C	7/1/2007	144	4039	101459	26	92	143	0,7	9	0
B1T6	C	22/10/2006	94	6930	94812	22	53	117	0,9	8	0
B1T6	C	2/7/2006	83	4015	85579	22	67	79	2	7	0
B1T6	C	22/7/2005	76	3921	100921	24	93	230	0,4	5	0
B1T6	C	14/1/2006	67	2268	69128	19	53	85	0,5	6	0
B1T6	C	27/7/2004	54	2326	101625	18	81	104	0	6	0
B1T6	C	25/8/2003	51	3076	105042	16	71	136	0,2	6	0
B1T6	C	25/9/2002	20	2865	116083	12	73	78	0,2	4	0
B1T6	B	7/1/2007	108	3734	94394	19	80	417	8	14	0
B1T6	B	22/7/2005	63	3570	87643	12	58	73	0,1	3	0
B1T6	B	14/1/2006	49	3233	68036	13	48	75	2	5	0
B1T6	B	25/8/2003	40	3793	113263	27	82	265	12	8	0
B1T6	B	21/7/2004	40	3375	103824	17	71	91	0	7	0
B1T6	B	25/9/2002	14	5211	127454	11	70	78	0	4	0
B1T6	A	22/7/2005	72	1707	73749	7	41	130	0,1	3	0
B1T6	A	14/1/2006	57	2960	66348	8	52	85	0,9	2	0
B1T6	A	25/9/2002	53	2046	120643	9	76	92	0	3	0
B1T6	A	25/8/2003	43	2984	114279	15	73	87	0,6	5	0
B1T6	A	21/7/2004	37	2068	85915	11	65	57	0	3	0
B1T6	A	2/7/2006	18	16701	80316	4	11	91	1	6	0

ID	F	COLETA	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
B1T5	C	5/1/2006	123	12382	132222	18	32	103	0,1	5	0
B1T5	C	15/10/2006	118	4724	100888	17	24	95	0,8	5	0
B1T5	C	11/2/2007	117	3213	79127	13	27	85	0,5	4	0
B1T5	C	31/5/2006	114	17363	147950	19	28	184	3	7	0
B1T5	C	2/7/2006	94	6466	92033	15	27	87	2	5	0
B1T5	C	24/9/2002	88	2436	111876	10	33	115	0,6	4	0
B1T5	C	13/8/2003	79	2564	115256	16	26	88	0	6	0
B1T5	C	21/1/2007	73	18017	121205	17	28	918	6	12	0
B1T5	C	11/5/2004	70	997	84806	14	27	67	0	6	0
B1T5	C	15/3/2004	60	2167	103238	16	33	105	0	4	0
B1T5	C	14/10/2004	57	2075	97947	17	35	115	0	7	0
B1T5	C	26/4/2005	43	1808	65712	15	24	78	0	5	0
B1T5	C	13/6/2003	38	6960	90802	22	27	145	0,2	4	0
B1T5	A	24/9/2002	1964	3606	109981	84	143	71	0,2	22	0
B1T5	A	27/9/2002	1460	2015	123971	112	174	83	0,3	30	0

ID	F	COLETA	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
B1T4	C	25/9/2002	4728	5281	136966	465	229	150	1	124	0
B1T4	C	27/9/2002	3743	1890	112388	472	230	146	2	115	0
B1T4	C	14/1/2006	3	2420	59488	1	86	6616	0,1	1	0
B1T4	C	19/5/2005	0	3594	66897	0,9	72	4290	0	0	0
B1T4	B	17/10/2002	48	2622	121788	2	64	99	0	2	0
B1T4	B	10/12/2006	47	3153	74946	3	65	84	0,7	3	0
B1T4	B	14/1/2006	36	3135	66875	4	49	80	0,7	4	0
B1T4	B	9/5/2005	35	5070	123068	4	77	96	0	2	0
B1T4	B	27/9/2004	32	5538	126502	4	48	94	0	3	0
B1T4	B	8/9/2003	30	9838	129679	3	59	89	0	1	0
B1T4	B	2/9/2003	29	2323	116793	5	63	102	0,3	4	0
B1T4	A	14/1/2006	59	6186	84748	3	35	71	1	2	0
B1T4	A	15/10/2006	57	5793	98082	3	34	75	1	3	0
B1T4	A	8/9/2003	52	4273	124892	4	53	66	0,4	2	0
B1T4	A	2/7/2006	51	2675	95071	2	49	73	0,7	2	0
B1T4	A	9/5/2005	45	5427	141450	5	60	91	0	12	0
B1T4	A	2/9/2003	43	2393	138957	5	81	208	4	4	1
B1T4	A	28/9/2004	34	3526	112926	3	44	199	0	3	0
B1T4	A	22/9/2002	12	6160	77159	2	28	45	0	2	0

ID	F	COLETA	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
B1T3	C	2/1/2006	12	10381	89224	3	45	130	0,8	1	0
B1T3	C	14/8/2003	11	17571	135407	2	35	89	0,2	0,9	0
B1T3	C	16/9/2003	10	3466	67370	2	30	67	0,2	0,9	0
B1T3	C	14/10/2003	10	4180	66321	3	38	171	0,7	1	0
B1T3	C	10/9/2003	9	4616	62886	2	25	54	0,2	0,8	0
B1T3	C	25/4/2006	7	5706	71287	3	48	128	3	0,5	0
B1T3	C	28/9/2004	6	6981	94723	3	47	145	0,3	1	0
B1T3	C	9/5/2005	6	2340	65396	4	56	95	0,2	1	0
B1T3	C	19/10/2002	5	1580	76264	2	34	110	0,2	1	0
B1T3	B	6/9/2005	87	2040	131735	4	47	134	2	2	0
B1T3	B	24/9/2002	53	2124	141484	3	58	49	0	2	0
B1T3	B	16/4/2003	44	1687	137712	4	45	74	0	3	0
B1T3	B	6/5/2004	41	2530	130578	4	57	87	0	5	0
B1T3	B	25/4/2006	39	11369	14070	3	43	123	6	0,5	0
B1T3	B	2/1/2006	31	2850	77382	2	39	110	0,4	1	0
B1T3	B	14/8/2003	29	2812	122530	2	53	60	0	1	0
B1T3	B	2/12/2004	14	5457	96014	5	73	62	0,1	5	0
B1T3	B	22/9/2002	4	787	72532	2	37	38	0	2	0
B1T3	A	28/4/2006	71	7279	112409	28	89	105	1	4	0
B1T3	A	2/1/2006	64	3640	90600	16	42	53	0,3	3	0
B1T3	A	6/9/2005	61	2251	112385	15	53	95	0,9	3	0
B1T3	A	6/8/2006	61	2200	81228	14	47	144	0,4	5	0
B1T3	A	12/11/2006	58	3009	75727	14	44	94	0,4	4	0
B1T3	A	16/4/2003	52	1744	137209	17	55	83	0	6	0
B1T3	A	6/5/2004	52	2016	92030	13	48	96	0,6	4	0
B1T3	A	14/8/2003	46	6769	125696	16	58	71	0,1	5	0
B1T3	A	2/12/2004	28	8405	111430	21	60	100	0,3	7	0
B1T3	A	22/9/2002	3	3165	105000	11	44	46	0,1	4	0
B1T3	A	24/9/2002	2	18822	170065	13	44	77	0	5	0

ID	F	COLETA	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
B1T2	C	1/2/2007	59	6942	113093	10	45	84	0,7	4	0
B1T2	C	14/1/2006	30	2491	73301	9	33	91	2	3	0
B1T2	C	25/9/2002	20	2641	120495	8	42	54	0,3	3	0
B1T2	C	14/8/2003	16	3484	111320	10	54	63	0,4	3	0
B1T2	C	18/8/2005	12	5753	98175	5	24	65	0,9	5	0
B1T2	C	2/12/2004	6	3285	82757	18	45	76	0,3	3	0
B1T2	B	27/7/2004	90	2662	107284	5	102	154	0	5	0
B1T2	B	1/1/2007	16	10958	135303	5	143	218	0,9	5	0
B1T2	B	25/9/2002	14	2895	127602	5	102	106	0	3	0
B1T2	B	14/1/2006	11	2420	65736	3	83	117	0,1	2	0
B1T2	B	14/8/2003	7	3922	109655	6	113	116	0	3	0
B1T2	B	18/8/2005	7	4519	103330	4	100	190	9	3	0
B1T2	A	1/2/2007	64	13268	133328	4	120	140	1	5	0
B1T2	A	14/1/2006	41	3872	80851	4	90	122	0,2	4	0
B1T2	A	15/8/2003	32	3670	104924	9	137	157	7	12	0
B1T2	A	27/7/2004	21	2394	76272	4	98	96	0	4	0
B1T2	A	18/8/2005	12	5445	106908	3	101	143	6	6	0
B1T2	A	25/9/2002	2	5521	129083	4	114	78	0	2	0

ID	F	COLETA	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
B1T1	C	6/6/2006	54	7325	123078	10	50	157	6	4	0
B1T1	C	9/9/2003	32	4355	127882	8	64	170	0,9	2	0
B1T1	C	25/9/2002	26	2383	146820	9	67	103	0,5	4	0
B1T1	C	3/9/2006	22	13672	101777	7	34	142	2	4	0
B1T1	C	17/8/2004	19	6768	126035	8	63	127	0,4	3	0
B1T1	C	16/6/2005	11	5185	123893	4	44	114	0	0,6	0
B1T1	B	6/6/2006	36	2883	92858	3	82	85	1	2	0
B1T1	B	9/9/2003	26	2462	115614	4	76	102	0,4	4	0
B1T1	B	17/8/2004	22	14202	128179	5	47	134	0	3	0
B1T1	B	25/9/2002	10	3896	146643	4	82	88	2	0,2	0
B1T1	B	16/6/2005	0	16124	119532	3	30	96	0	0	0
B1T1	A	6/6/2006	72	3880	101884	5	54	116	4	3	0
B1T1	A	3/9/2006	61	8879	112301	4	53	75	2	4	0
B1T1	A	25/9/2002	47	2092	114790	3	56	52	0	1	0
B1T1	A	17/12/2006	40	2269	76582	6	70	331	0,9	3	0,1
B1T1	A	9/9/2003	39	1590	94386	4	50	46	0,1	2	0
B1T1	A	17/8/2004	7	2772	107104	4	82	82	0	4	0
B1T1	A	16/6/2005	0	1939	100239	8	45	167	0	11	0
B1T1	A	1/4/2007	0	54436	296268	11	47	274	0,3	8	0



# APÊNDICE

## B.1 Ensaios elétricos em buchas condensativas

Durante o desenvolvimento desta dissertação, foram realizados ensaios de medição de fator de dissipação do isolamento, capacitância e descargas parciais em duas buchas condensativas no laboratório de ensaios elétricos da CHESF. As características das buchas, bem como os resultados obtidos são mostrados a seguir.

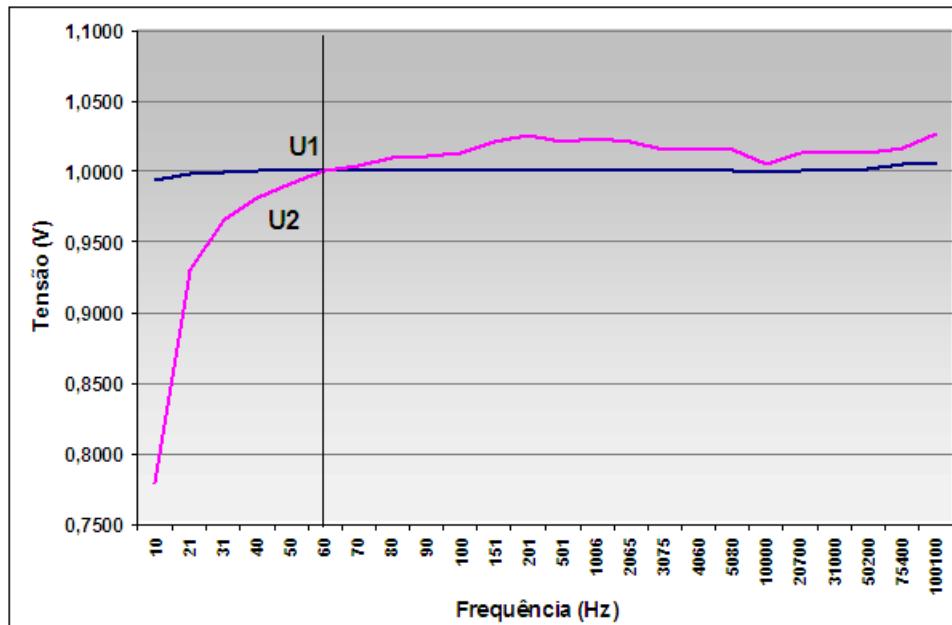
Baseada na norma NBR 5034, a bucha com isolação a base de papel aglutinado de resina, tipo RBP, foi aprovada nos três parâmetros: com relação as medições de fator de dissipação que determina o limite de 1,5% para buchas não novas, com relação capacitância não houve nenhuma alteração significante e também quanto aos resultados encontrados de medição de descargas parciais, com valores inferiores a 300 pC quando aplicado  $\frac{1,05 \times U_N}{\sqrt{3}}$ , ou seja, 46 kV.

Devido a limitação do laboratório não foi possível aplicar o valor estabelecido por norma aproximadamente 84 kV equivalente a  $\frac{1,05 \times U_N}{\sqrt{3}}$ . Com isso a bucha com isolação a base de papel impregnado de óleo, tipo OIP, não pode ser considerada aprovada com relação as medições de fator de dissipação e capacitância, embora tenha obtido valores satisfatórios (inferiores a 0,3%) quando aplicada uma tensão nominal de 70 kV. Mesmo com a limitação de aplicação de tensão, pode-se afirmar que a bucha foi reprovada quanto aos resultados encontrados de medição de descargas parciais com valores muito superiores (acima de 200 pC com 70 kV) ao limite de 10 pC.

Ano de Fabricação:	1970	
Tipo da Isolação:	OIP (papel impregnado de óleo isolante)	
Tensão Nominal:	138 kV	
<b>Medição de Fator de dissipação (tg delta) e capacitância</b>		
Tensão (kV)	Tg Delta (%)	Capacitância (pF)
2,5	0,282	499,95
10	0,279	499,99
20	0,282	500,03
30	0,283	500,05
40	0,285	500,09
50	0,287	500,12
60	0,288	500,15
70	0,297	500,17
<b>Medição de Descargas Parciais</b>		
Tensão (kV)	Tempo (min)	DP (pC)
0	1	6
44	1	110
62	1	160
62	15	163
62	30	163
70	1	210
62	1	154
62	15	153
62	30	153
44	1	100
0	1	5
Ano de Fabricação:	1970	
Tipo da Isolação:	RBP (papel aglutinado de resina)	
Tensão Nominal:	69 kV	
<b>Fator de dissipação (tg delta) e capacitância</b>		
Tensão (kV)	Tg Delta (%)	Capacitância (pF)
2,5	1,23	365,45
10	1,26	365,47
20	1,26	365,49
30	1,28	365,52
46	1,33	365,60
50	1,35	365,67
60	1,42	365,88
70	1,44	366,31
<b>Medição de Descargas Parciais</b>		
Tensão (kV)	Tempo (min)	DP (pC)
0	1	7
44	1	115
62	1	224
62	15	200
62	30	200
70	1	234
62	1	180
62	15	200
62	30	167
44	1	116
0	1	6

## B.2 Análise de Resposta em Frequência

Este apêndice mostra os resultados do ensaio realizado na bucha condensiva tipo OIP onde foi aplicada uma tensão nominal de 500 V no conector superior das mesmas, equivalente a U1, variando a frequência do sinal entre 10 e  $100 \times 10^3$  Hz e obtida a tensão entre o *tap* capacitivo e o referencial de terra da bucha, equivalente a U2.



As curvas do gráfico mostram a razão entre os resultados obtidos nas diversas frequências e o resultado obtido na frequência nominal de regime permanente, 60 Hz. Na análise do gráfico observa-se que não foi constatado nenhum valor significativo de sobretensão de U1 ou U2. Devido ao fato do equipamento ser puramente capacitivo e este ensaio ter sido realizado com o equipamento em laboratório, ou seja, desconectado do sistema, era esperado que não houvesse a presença de sobretensões nas frequências diferentes da nominal.

É recomendado um aprofundamento deste estudo para verificar a possibilidade de sobretensões transitórias oriundas de possíveis ressonâncias entre a capacitância da bucha condensiva e a indutância do sistema a que está inserido, através de resultados de laboratórios e simulações computacionais.



# APÊNDICE

## C.1 Diagnósticos de monitoramento *on-line* de buchas condensivas

Os diagnósticos implantados no sistema de monitoramento *on-line* instalado na usina hidroelétrica de Xingó servem como exemplo de possíveis tratativas quando da evolução do desvio da capacidade das buchas condensivas instaladas nos transformadores elevadores desta instalação. Para a definição destes diagnósticos, a fornecedora do sistema partiu de algumas premissas básicas:

- As camadas capacitivas mais próximas do condutor central, ou seja as mais internas, têm maior incidência de campo elétrico.
- O valor da capacidade das primeiras camadas mais próximas do condutor geralmente é maior do que as mais próximas da flange externa, porém admitisse para efeito de cálculo que todas as camadas tem suas capacidades iguais (o que torna o cálculo mais seguro).
- O curto circuito de uma camada não é motivo de retirada imediata de serviço, já que a progressão deste defeito pode levar meses ou anos. A progressão do defeito para mais camadas é que deve sugerir o desligamento imediato.
- A variação da capacidade de mais de 10% recomenda a retirada de operação em definitivo.

Para melhor entendimento dos diagnósticos listados neste apêndice é necessário a definição de algumas variáveis relativa aos desvios medidos de capacidade definidos pelo fornecedor do sistema implantado, bem como os limites estocásticos adotados como parâmetros de aceitação.

**Tabela C.1:** Definição dos desvios de capacidade medidos em um dado período.

Definição dos desvios de capacidade medidos	
DRCa	Desvio relativo da capacidade amostral de 1 dia fase A
DRCb	Desvio relativo da capacidade amostral de 1 dia fase B
DRCc	Desvio relativo da capacidade amostral de 1 dia fase C
DRCha	Desvio relativo da capacidade amostral de 1 hora fase A
DRChb	Desvio relativo da capacidade amostral de 1 hora fase B
DRChc	Desvio relativo da capacidade amostral de 1 hora fase C

**Tabela C.2:** Definição dos limites estocásticos a serem considerados na avaliação quanto aos diagnósticos baseados nas medições.

Limites Estocásticos	
DRC1	$3,5 \times$ Desvio padrão referente a fase de aprendizagem
DRC2	$100 \times 0,8 /$ número de camadas da bucha condensiva

A seguir são listados os diagnósticos, prognósticos e ações recomendadas a depender dos valores medidos de desvio da capacidade. Os exemplos são relacionados com a bucha referente a fase A do conjunto, sendo válido para as fases B e C a mesma lógica adotada.

<b>Condição :</b>	DRCha > 4 x DRC2
<b>Classificação:</b>	Diagnóstico de defeito progressivo rápido em uma bucha

### **Diagnóstico**

Bucha A com indicação estatística de defeito progressivo muito rápido, por apresentar desvio relativo da capacidade amostral de 1 hora de DRCha e maior que 4 vezes o limite DRC2. Muito provável a perda de mais de 3 camadas capacitivas da bucha por curto-circuito independentemente de diagnósticos anteriores. É muito improvável que este desvio possa ser devido a alteração significativa nas condições operativas da subestação com reflexo nos valores de tensão de linha.

### **Prognóstico**

A bucha está seriamente comprometida e pode falhar a qualquer momento.

### **Ação Recomendada**

É sugerida a parada imediata e emergencial do transformador para confirmação do diagnóstico por avaliação off-line da capacidade e tangente de delta da bucha.

Se a capacidade da bucha não sofreu alteração significativa em relação aos dados de ensaios originais, averiguar e calibrar os sensores envolvidos. Somente iniciar novo período de aprendizado após a confirmação da integridade das buchas ou após sua substituição.

<b>Condição :</b>	DRCa > 3x (maior que DRC1 ou DRC2)
<b>Classificação:</b>	Diagnóstico de defeito progressivo rápido em uma bucha

### **Diagnóstico**

Bucha A com indicação estatística de defeito progressivo muito rápido, por apresentar desvio relativo da capacidade amostral de 1 dia de DRCa e maior que 3 vezes o limite DRC2. Muito provável a perda de 3 ou mais camadas capacitivas da bucha por curto-circuito independentemente de diagnósticos anteriores. É muito improvável que este desvio possa ser devido a alteração significativa nas condições operativas da subestação com reflexo nos valores de tensão de linha.

### **Prognóstico**

A bucha está seriamente comprometida e pode falhar a qualquer momento.

### **Ação Recomendada**

É sugerida a parada imediata e emergencial do transformador para confirmação do diagnóstico por avaliação off-line da capacidade e tangente de delta da bucha.

Se a capacidade da bucha não sofreu alteração significativa em relação aos dados de ensaios originais, averiguar e calibrar os sensores envolvidos. Somente iniciar novo período de aprendizado após a confirmação da integridade das buchas ou após sua substituição.

<b>Condição :</b>	DRCa > DRC1 e DRCa > DRC2 e DRCa < 2 x (maior que DRC2 ou DRC1) então diagnóstico
<b>Classificação:</b>	Diagnóstico de defeito inicial em uma bucha

### **Diagnóstico**

Bucha A com indicação estatística de defeito inicial por apresentar desvio relativo da capacidade amostral de 1 dia de DRCa e maior que o limite DRC2 (determinado estatisticamente ou pelas características da bucha em questão). Muito provável a perda de uma camada capacitiva da bucha por curto-circuito. Este desvio ainda pode ser devido a alteração significativa nas condições operativas da subestação com reflexo nos valores de tensão de linha.

### **Prognóstico**

É possível a progressão rápida do defeito e, neste caso, um novo diagnóstico será emitido e talvez seja necessário o desligamento emergencial do transformador para avaliação off-line da capacidade e tangente de delta da bucha.

### **Ação Recomendada**

Tendo em vista que um diagnóstico adicional de progressão do defeito ainda pode ocorrer (de maior criticidade), pode-se aguardar 1 dia e após reconhecer o evento e verificar se o diagnóstico se repetirá. Se não se repetir é indicação que as condições operativas se alteraram significativamente no dia anterior. Se o diagnóstico se repetir é sugerida a parada programada em até 10 dias para confirmação do diagnóstico por avaliação off-line da capacidade e tangente de delta da bucha. Se a capacidade da bucha não sofreu alteração significativa em relação aos dados de ensaios originais, iniciar novo período de aprendizado para o modelo de desvio relativo da capacidade. Se for reiniciada a operação com a mesma bucha, ainda que com alteração de sua capacidade comprovada, não iniciar novo aprendizado. Desta forma o sistema estará apto ao diagnóstico de progressão do defeito desta bucha que poderá sugerir o desligamento imediato do transformador.

<b>Condição :</b>	DRCa > DRC1 e DRCa < DRC2 então há diagnóstico
<b>Classificação:</b>	Diagnóstico indefinido de defeito inicial em uma bucha

### **Diagnóstico**

Bucha A com possível indicação estatística de defeito inicial por apresentar desvio relativo da capacidade amostral de 1 dia de DRCa maior que DRC1 (avaliado estatisticamente para um grau de significância de 99%). Este desvio pode ser devido a alteração significativa nas condições operativas da subestação com reflexo nos valores de tensão de linha.

### **Prognóstico**

Caso haja progressão do defeito, um novo diagnóstico será emitido e talvez seja necessário o desligamento emergencial do transformador para avaliação off-line da capacidade e tangente de delta da bucha.

### **Ação Recomendada**

Pode-se aguardar 1 dia, reconhecer o evento e verificar se o diagnóstico se repetirá. Se não se repetir é indicação que as condições operativas se alteraram significativamente no dia anterior. Se o diagnóstico se repetir é sugerida a parada programada em até 30 dias para confirmação do diagnóstico por avaliação off-line da capacidade e tangente de delta da bucha. Se a capacidade da bucha não sofreu alteração significativa em relação aos dados de ensaios originais, iniciar novo período de aprendizado para o modelo de desvio relativo da capacidade. Se for reiniciada a operação com a mesma bucha ainda que com alteração de sua capacidade comprovada, não iniciar novo aprendizado. Desta forma o sistema estará apto ao diagnóstico de progressão do defeito desta bucha que poderá sugerir o desligamento imediato do transformador.

<b>Condição :</b>	Se $DRCa > DRC1$ e $DRCb > DRC1$ e $DRCc < -2 \times DRC1$ Então: Buchas A e B com indicação de defeito inicial
<b>Classificação:</b>	Diagnóstico de defeito em duas buchas simultaneamente.

### **Diagnóstico**

Bucha A e B com possível indicação estatística de defeito inicial por apresentar desvio relativo da capacidade amostral de 1 dia de  $DRCa$  maior que  $DRC1$  (avaliado estatisticamente para um grau de significância de 99%). Este desvio pode ser devido à alteração significativa nas condições operativas da subestação com reflexo nos valores de tensão de linha.

### **Prognóstico**

Caso haja progressão do defeito, um novo diagnóstico será emitido e talvez seja necessário o desligamento emergencial do transformador para avaliação off-line da capacidade e tangente de delta da bucha.

### **Ação Recomendada**

Pode-se aguardar 1 dia, reconhecer o evento e verificar se o diagnóstico se repetirá. Se não se repetir é indicação que as condições operativas se alteraram significativamente no dia anterior. Se o diagnóstico se repetir é sugerida a parada programada em até 30 dias para confirmação do diagnóstico por avaliação off-line da capacidade e tangente de delta da bucha. Se a capacidade da bucha não sofreu alteração significativa em relação aos dados de ensaios originais, iniciar novo período de aprendizado para o modelo de desvio relativo da capacidade. Se for reiniciada a operação com a mesma bucha ainda que com alteração de sua capacidade comprovada, não iniciar novo aprendizado. Desta forma o sistema estará apto ao diagnóstico de progressão do defeito desta bucha que poderá sugerir o desligamento imediato do transformador.