



**XXII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTM/24  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -  
GTM**

**VALIDAÇÃO DAS NOVAS TÉCNICAS DE ENSAIOS EM BUCHAS, FP% COM VAREJURA DE FREQUENCIA E  
FDS.**

**Aguinaldo Goes de Melo(\*)**  
**COPEL G&T**

**Daniel Benetti**  
**COPEL G&T**

**Roberto de Aguiar**  
**INSTRONIC**

**Victor Simião**  
**LACTEC**

**Vinícios Bacil**  
**LACTEC**

**RESUMO**

Estatísticas apontam falhas em buchas como uma das principais causas de falha em transformadores e também a principal causa de incêndio. Assegurar a integridade das buchas e ter um controle que indique uma possível degradação de seu isolamento é fundamental para garantir a sua confiabilidade e por consequência de todo sistema nacional de produção e transmissão de energia elétrica.

A principal forma de controlar a degradação da bucha é monitorar o seu fator de potência. Neste trabalho apresentaremos os resultados da medição do fator de potência com varredura de frequência e compararemos estes com os resultados de ensaios de alta-tensão.

**PALAVRAS-CHAVE**

FP%, Bucha, PD, frequência, FDS

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O transformador de potência representa o equipamento de maior importância estratégica e maior custo para o sistema de produção e transmissão de energia.

Uma falha em um transformador pode levar a interrupção no fornecimento de energia elétrica, com transtornos e prejuízo para consumidores e para a concessionária, que será penalizada pela indisponibilidade operacional do equipamento.

Quando o assunto é falha em transformadores, a bucha é um dos componentes que apresenta elevado índice de falha e muitas vezes a avaria não se limita somente a bucha, pois a explosão da porcelana pode causar danos em equipamentos próximos.

A deflagração de falhas em buchas costuma resultar em eventos catastróficos, que podem resultar em danos expressivos por contaminação dos enrolamentos e até mesmo danos generalizados que inviabilizam a recuperação do transformador. Além dos prejuízos materiais, explosões de buchas podem causar danos às pessoas que desenvolvam atividades próximas ao transformador, o que é muito mais sério que a própria perda do equipamento.

Técnicas construtivas e desenvolvimento de novos materiais têm melhorado muito a qualidade das buchas, principalmente quanto à explosão, porém buchas com invólucro de porcelana continuarão a ser fabricadas por um longo tempo devido ao seu menor custo e prazo de fabricação.

Como a bucha é um dos principais componentes do transformador e um dos que apresenta maior frequência de falha ou defeito, é necessário manter um rigoroso controle das condições de isolamento das buchas, para tanto algumas técnicas tradicionais de ensaios off-line e on-line são utilizadas já há algum tempo, com relativo sucesso, porém é necessário desenvolver e testar novas técnicas que possibilitem diagnósticos mais seguros.

Duas dessas novas técnicas utilizam o tradicional ensaio de fator de potência do isolamento aliado à variação de frequência, em um caso com altos gradientes de tensão (milhares de volts) e um pequeno range de frequência, de

(\*) R. José Izidoro Biazetto, n° 158 – sala 185 - Bloco A – CEP 81200-240 Curitiba, Pr, – Brasil  
Tel: (+55 41) 3331-3503 – Fax: (+55 41) 3331-3686 – Email: aguinaldo.melo@copel.com

15 a 400 Hz e no outro um pequeno valor de tensão (centenas volts) num range de frequência de mHz a KHz, técnica essa conhecida como FDS. (Espectroscopia no Domínio da Frequência).

Para testar essas novas técnicas e compara-las com os ensaios de campo já tradicionais e principalmente correlaciona-las com ensaios de laboratório, 20 buchas de 230 kV com diferentes condições de conservação foram submetidas, em laboratório de alta tensão, aos ensaios tradicionais e em paralelo foram também ensaiadas empregando as novas tecnologias utilizando variação de frequência.

## 2.0 - DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Buchas Condensivas – Características

A conexão da bobina do transformador com o potencial elétrico externo, passando por meios com características geométricas que resultam em campos elétricos elevados, implicam na necessidade de dispositivos de isolamento compactos, com distâncias dielétricas críticas, características que determinam o funcionamento das buchas.

Por definição bucha é: Peça ou estrutura de material isolante, que assegura a passagem isolada de um condutor através de uma parede não isolada.

Apesar de sua aparência simples, a tarefa executada por uma bucha é realmente extraordinária. Isto porque, para equipamentos operando com centenas de milhares de volts, é quase uma tarefa hercúlea, isolar adequadamente o condutor de corrente inserido em uma barreira aterrada.

Buchas de alta tensão realizam essa tarefa contando com um sofisticado sistema de isolamento. O projeto básico das buchas condensivas ou capacitivas, não mudou em décadas e esta é talvez a maior confirmação da eficiência desse dispositivo. Este projeto envolve papel especial enrolado em torno do condutor, bem como folhas metálicas colocadas em locais estratégicos dentro deste envoltório, a fim de assegurar distribuição conveniente do campo elétrico da bucha e principalmente diminuir o estresse elétrico no ponto de menor distância com a barreira aterrada, conforme Figura 1. Buchas para altas tensões geralmente acima de 25kV, são do tipo capacitivo. Ver figura 3.

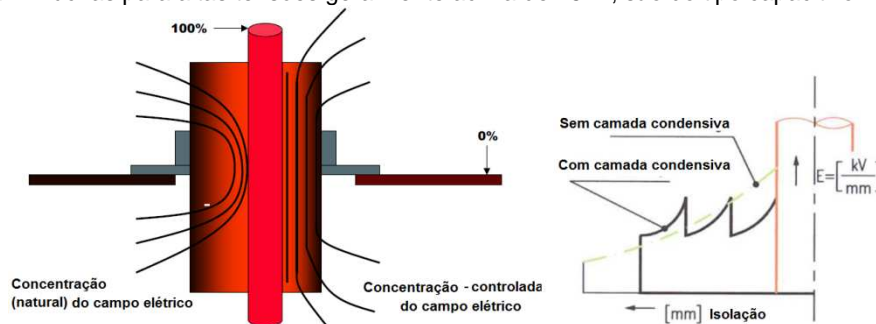


FIGURA 1 – Concentração do Campo Elétrico na Bucha

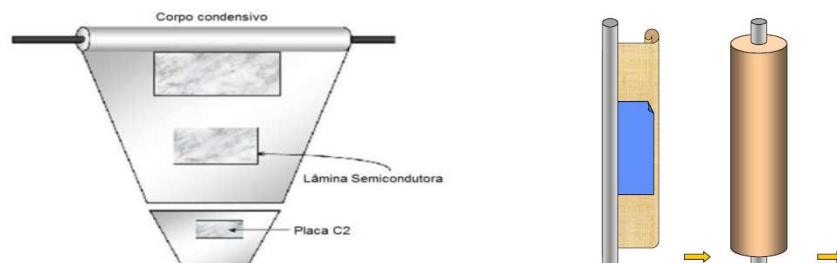


FIGURA 2 – Ilustração da Construção da Bucha Condensiva

Para a bucha atingir sua característica isolante (dielétrico) é necessária uma técnica de fabricação que não permita a presença de bolhas de ar ou gás entre as sucessivas camadas de papel. Portanto, o cilindro é completamente impregnado com óleo isolante ou por uma resina especial. Daí as duas principais tecnologias para buchas condensivas de alta tensão: OIP (Papel impregnado com óleo) e a RIP (Papel impregnado com resina).

A capacitância em um capacitor é influenciada pelo meio dielétrico assim sendo, a bucha condensiva deve ser um componente estanque, para que não haja a entrada de agentes que possam reduzir a capacidade dielétrica do óleo mineral isolante e por consequência a da bucha. Assim a bucha deve ter um tanque de expansão próprio, que permita a dilatação do volume interno de óleo, sem que haja entrada de umidade ou gases presentes no ambiente.

### 2.2 Bucha – Mecanismo de Falha

Conforme mencionado anteriormente, os dois tipos de buchas atualmente mais comuns são a Papel Impregnado com Resina(RIP), e a Papel Impregnado com Óleo(OIP), sendo que nos deteremos a discutir o mecanismo de falha desta ultima, já que os espécimes a serem ensaiados assim o são.

Os vários mecanismos de falhas têm como principal consequência alterações nas camadas capacitivas, causando significativas alterações nos gradientes de tensão, levando em última análise a bucha a falhar.

Os principais defeitos de uma bucha são normalmente originários no Núcleo (elemento ativo, condutor e papel), ou óleo isolante.

### 2.2.1- Defeitos No Núcleo.

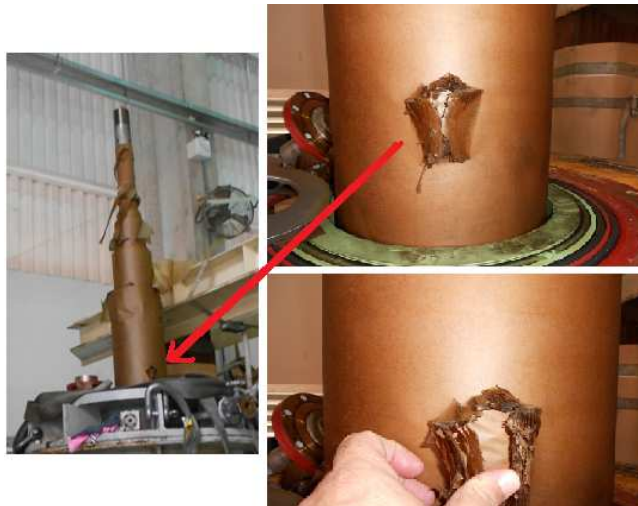
Defeitos no elemento ativo podem ser relacionados com perda de estanqueidade da bucha, pois isto acarreta a entrada de ar/umidade na parte ativa, podendo assim ocasionar a degradação da isolamento líquida e sólida, e por consequência o aumento nos valores da corrente de fuga.

Em alguns casos a degradação do elemento ativo pode estar relacionado a problemas de fabricação, tais como: umidade residual, resultado de uma má impregnação do papel, ou a presença de rugas ou bolhas no papel isolante ou na folha semicondutora causando descargas parciais (DP).

Outra causa de falhas no elemento ativo são os danos causados por longos períodos de estocagem na posição horizontal, de buchas que foram projetadas para operarem na posição vertical.

Duas causas importantes de falhas em buchas e que devem ser consideradas são a má conexão do tape capacitivo e as sobretensões transitórias muito rápidas (VFT).

- a. A má conexão do tape capacitivo pode ter como origem um problema mecânico, ou seja, tampa colocada incorretamente não garantindo a conexão elétrica da tap capacitivo com a terra, ou problema elétrico, que é um ponto de conexão com alto valor de resistência ôhmica. Em ambos os casos ocorrerá centelhamento na região do tape devido ao mesmo ficar com uma tensão de flutuação na ordem de milhares de volts. Estes problemas de aterramento do tap podem causar corrosão galvânica, e com o agravamento deste problema levar a falha da bucha.
- b. O VFT, ocorre sabidamente em Subestações Isoladas a Gás SF6 (GIS), provenientes principalmente de manobras e de falhas a terra. A presença do VFT causa problemas para a indutância (enrolamento) dos transformadores e numa escala menor na bucha.



Os parâmetros que controlam a tensões em nível de segurança são o raio do condutor central, raio de camada exterior, o comprimento da primeira camada, o comprimento da última camada e a tensão do sistema.

Para as altas frequências de VFTs, a distribuição de tensão através das camadas da bucha podem não ser uniformes.

A aplicação contínua destes transientes na bucha podem causar descargas entre camadas, este fenômeno pode degradar progressivamente a capacidade de isolamento da bucha. Na Figura 3 vemos a foto de uma bucha que falhou provavelmente devido a VFTs.

Estudos afirmam que o estresse por VFT é maior nas camadas mais externas da bucha e a consequência dessas descargas é o rompimento do papel, formando bolhas no isolamento, causando as Descargas Parciais. Já as falhas por sobretensão ocorrem normalmente na região do flange.

FIGURA 3 – Bucha que falhou provavelmente devido a VFT.

### 2.2.2 Defeitos No Óleo Mineral Isolante.

O óleo pode apresentar envelhecimento natural, principalmente se deteriorado a partir dos efeitos da temperatura, porém se for mantida a estanqueidade da bucha, dificilmente o envelhecimento natural irá acarretar maiores problemas. Já o envelhecimento precoce causado pela perda de estanqueidade ou outros defeitos como pontos quente, má distribuição no campo elétrico e contaminação por partículas ocasionaram a perda da rigidez dielétrica e a formação de sedimentos. Como a proporção de óleo / papel é pequena na bucha, mesmo a perda de pequenas quantidades de óleo por vazamento ou a entrada de umidade da atmosfera, pode degradar significativamente o isolamento sólido.



A contaminação do isolamento sólido por produtos de decomposição do óleo costumam deixar sinais no papel geralmente nas extremidades da parte ativa. Sinais identificados como arvoreamento na isolação, conforme visto na Figura 4.

FIGURA 4 – Arvoreamento da Isolação

### 3.0 - ENSAIOS DE CONTROLE

Os processos de degradação das buchas são bem conhecidos, tendo vários métodos de controle on-line e off-line, alguns já consagrados, outros em desenvolvimento.

Uma característica interessante nas buchas é que o processo de falha geralmente é lento. Devido a grande quantidade de isolamento, é necessário o colapso de várias camadas isolantes para que ocorra a falha. Em função disso as técnicas preventivas são utilizadas em larga escala.

Existem também os processos de falhas rápidos, são mais raros e acontecem principalmente em três situações:

- Buchas recém-instaladas e que permaneceram muito tempo em estoque (armazenamento indevido);
- Buchas submetidas a esforços dinâmicos intensos (corrente de curto-circuito, vandalismo, terremoto, etc);
- Buchas submetidas à sobretensões acima de sua capacidade nominal – NBI (pararraios inoperante, VFTO, etc).

#### 3.1 Medição De Descargas Parciais-DP

Falhas no processo de fabricação e a degradação do isolamento das buchas geram DP e são agravadas pela DP.

O método de descargas parciais consiste na aplicação de um campo elétrico em uma isolação composta por um ou vários materiais isolantes. Quando há algum espaço vazio, contaminante na isolação ou baixa qualidade nos materiais isolante ocorrem pequenas descargas disruptivas que deterioram com o tempo a isolação do equipamento e o leva a falhar.

Esse fenômeno ocorre em regiões localizadas no material isolante, onde o gradiente de tensão supera o nível máximo suportado pela região, entre os tipos de descargas em buchas destacam-se as descargas internas, geradas pela entrada de contaminantes ou bolhas na isolação e descargas superficiais que ocorre nas interfaces dos isolamentos sólidos com o isolamento liquido ou gasoso, esse efeito é conhecido também como trilhamento.

Portanto, a medição de descargas parciais é um método não destrutivo e é utilizado por fabricantes para controle de qualidade, ou seja, ensaios de rotina.

As descargas parciais dão origem a diversos fenômenos físicos, portanto existem métodos elétricos, óticos, acústicos, químicos, entre outros para sua detecção. Neste trabalho foi utilizado o método de detecção de descargas parciais por impulsos elétricos, devido sua sensibilidade e eficácia comprovada. Ver figura 5. A forma de medição de descargas parciais é por uma grandeza de carga aparente, medida em pC. Buchas novas devem respeitar limites inferiores impostos pela IEC 60137 e a NBR 5034, equivalente a 10pC para uma tensão de  $1,5 * U_R / \sqrt{3}$  em buchas do tipo OIP.

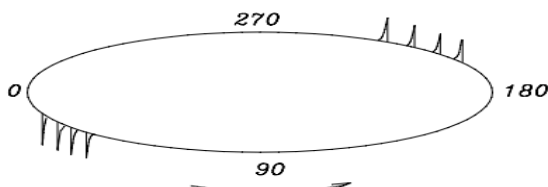


Figura 5 - Impulso característico de DP observado em um osciloscópio na base elíptica.

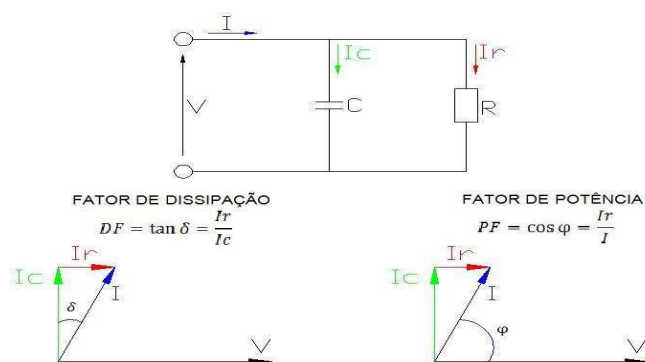
A medição de descargas parciais é extremamente sensível a interferências externas, portanto necessita de modelos matemáticos e algoritmos que filtrem sinais espúrios, apresentando na leitura somente sinais provenientes dos equipamentos sob análise. Existem técnicas caras que podem ser utilizadas em campo, mas devido à complexidade este ensaio é efetuado geralmente em laboratórios de alta tensão.

#### 3.2 Medição De Capacitancia-C1 e o Fator de Dissipação-FD%

Medida da Capacitância (C1) e Fator de Dissipação (FD%) é um importante método de diagnóstico de isolamento, o teste de fator de dissipação é o procedimento de teste de campo mais eficaz para detecção antecipada de contaminação e deterioração de bucha. Esses parâmetros são medidos com tensão nominal em fábrica (ensaio de rotina) e por norma, seus valores devem constar como dado de placa.

A degradação do dielétrico altera sua permissividade, alterando consequentemente a capacitância das camadas que compõe o isolamento da bucha. A medida que ocorrerem alterações em algumas dessas capacitâncias, a capacitância total C1 irá aumentar.

A  $Tg\delta$  é uma relação entre a potência ativa, caracterizada pela corrente de fuga que flui pelo isolamento ( $I_r$ ) e a potência reativa ( $I_c$ ), predominantemente capacitiva do isolamento. Com



a razão entre essas duas potências e multiplicada por 100, obtêm-se o seu valor em percentual. Esse ensaio também é conhecido como Fator de Potência do Isolamento (FP%), porém define as perdas através do cálculo do  $\cos\phi$  do ângulo entre a corrente ativa ( $I_r$ ) e a resultante entre  $I_r$  e  $I_c$ . Para ângulos  $\delta$  de até  $10^\circ$  que correspondente a um ângulo  $\phi > 80^\circ$  os valores obtidos para esses dois fatores é praticamente o mesmo. Ver figura 6.

FIGURA 6 – Fator de dissipação ou potência

As varias formas de degradação do isolamento das buchas alteram os valores de  $I_c$  e principalmente o valor do  $I_r$ .

### 3.3 Medição C1 e o FD% com variação de tensão e frequência

Os fabricantes de instrumento de ensaios e os fabricantes de bucha têm desenvolvido novas técnicas de ensaio para aprimorar o diagnóstico dos ensaios em buchas, das quais podemos citar:

#### 3.3.1 Medição de C1 e FD% com Variação de Tensão

A realização da medição de C1 e FD% com variação de tensão (tip-up), para isolantes em boas condições essas duas grandezas não devem se alterar com a variação da tensão.

#### 3.3.2 Medição de FD% com Variação de Frequência

Essa técnica é complementar a medição do FD% em 60Hz, mede-se o fator de potência com um instrumento com range de frequência, de 15 a 400 Hz. Isso melhora o diagnóstico, pois a variação do espectro de frequência permite análises mais detalhadas do isolamento através da comparação de gráficos que mostram sua curva de tendências ao longo do um espectro de frequência determinado. A Figura 8 mostra um gráfico em que ficou evidenciado através deste método de ensaio uma anomalia na bucha X3 de 138kV.

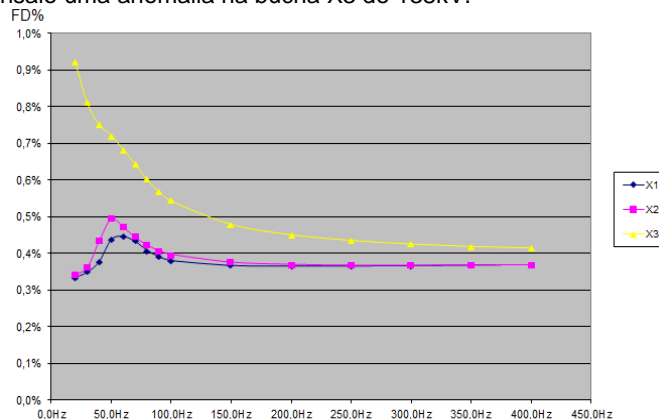


FIGURA 8 – Gráfico de FD% Com Variação de Frequência

#### 3.3.3 Ensaio de Eletroscopia no Domínio da Frequência (Frequency Domain Spectroscopy – FDS)

Quando um material dielétrico é submetido a um campo elétrico, os dipolos elétricos tendem a se alinhar ao campo aplicado. O tempo para que estes dipolos se alinhem depende da característica de cada material, sendo modificada conforme a degradação do material e a quantidade de água na isolação. A resposta dielétrica de um material pode ser obtida aplicando um campo elétrico e analisando a resposta no tempo para sinais de excitação contínuos e na frequência para sinais de excitação alternados.

O método na base do tempo mais reconhecido é denominado de PDC (Polarization Depolarization Current Method), este ensaio consiste na medição da corrente de polarização e despolarização de um material dielétrico.

Enquanto que o método de análise no domínio da frequência conhecido como FDS (Frequency Domain Spectroscopy) realiza uma série de medições da corrente de isolação com varredura de frequência. Ao contrário do fator de potência com frequência variável, a faixa de frequências é mais ampla 1mHz a 1kHz e a amplitude do sinal aplicado geralmente é inferior. Devido ao elevado tempo requisitado para efetuar o ensaio de FDS em baixas frequências, equipamentos modernos realizam uma medição híbrida utilizando o método FDS para frequências maiores que 0,1Hz e o método PDC com resposta transformada para o domínio da frequência para valores inferiores a 0,1Hz, isto garante maior rapidez nas medições permitindo a utilização deste ensaio em campo.

Atualmente há modelos matemáticos para transformadores que determinam a geometria da isolação, a condutividade do óleo e a porcentagem de umidade da isolação sólida, correlacionando faixas de frequências da resposta dielétrica obtida na medição entre enrolamentos.

#### 3.3.4 Ensaio no Óleo Mineral Isolante

A degradação do óleo mineral isolante abrange uma série de fenômenos, tais como reações de oxidação, reações de polimerização, condensação, rupturas de cadeias, etc. Os fatores que mais influenciam a degradação são a presença de oxigênio, temperaturas relativamente elevadas e contato com substâncias quimicamente ativas, sendo que a água e o calor são os dois maiores inimigos da isolação de transformador. (MILASCH, 1990).

Basicamente os ensaios dos óleos isolantes são divididos em ensaios físico/químicos, e a análise de gases dissolvidos (DGA). Para equipamentos, tais como TIs e em especial buchas, estas técnicas não são geralmente utilizadas como uma ferramenta de manutenção preventiva, devido ao pouco volume de óleo, o que acarretaria numa constante necessidade de reposição do óleo, e também ao fato desses equipamentos serem herméticos preservando assim as características físico-químicas do óleo, e quanto ao DGA, os modos de falha nesses equipamentos, principalmente devido a pouca quantidade de óleo, geram gases em proporções diferentes das estabelecidas (conhecidas) para os transformadores, dificultando a análise. A maioria das buchas ensaiadas nunca operaram e devido a isto o ensaio de DGA não foi realizado.

Os principais ensaios físico-químicos realizados em laboratório são: rigidez dielétrica, acidez, tensão interfacial, fator de potência, e teor de umidade. Para este trabalho foi considerado somente os ensaios de tensão interfacial e teor de umidade devido a baixa quantidade de óleo necessária para sua execução, aproximadamente 50ml. Abaixo descreve-se as características dos mesmos:

- a. Ensaio de tensão interfacial: empregado para avaliar se há presença de contaminantes polares e/ou produtos de oxidação do óleo isolante. A norma aplicada a este ensaio é a NBR 6239.

Os produtos de deterioração do óleo e os contaminantes polares solúveis provenientes da deterioração da isolação sólida e dos corpos com os quais o óleo entra em contato provocam a diminuição da tensão interfacial do óleo.

- b. Ensaio de teor de umidade: empregado para determinar a concentração de água dissolvida no óleo. A norma aplicada a esse ensaio é a NBR 10710.

#### 4.0 - REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Para correlacionar as novas técnicas de ensaios de campo, com os ensaios convencionais, foram realizados ensaios em 20 buchas de 230 kV, de propriedade da COPEL no laboratório de alta tensão do LACTEC. Estes ensaios foram divididos em dois tipos:

- a. Ensaios tradicionais: ensaio de descargas parciais e fator de potência com tensão nominal, ensaio de fator de potência com 10kV em 60Hz, utilizando o instrumento Midas fabricado pela Tettex e ensaios físico-químicos do Óleo Mineral Isolante.
- b. Ensaios Experimentais: ensaios de fator de potência do isolamento com 10 kV e com variação de frequência com range de frequência, de 15 a 400 Hz, utilizando o instrumento Midas da Tettex e Espectroscopia no Domínio da Frequência (Frequency Domain Spectroscopy - FDS), com o instrumento IDAX da Megger.

##### 4.1 Ensaios Tradicionais

Foi executado primeiramente o ensaio de fator de potência com 10kV a 60Hz, para que fosse realizada uma primeira avaliação da isolação a fim de evitar a aplicação de tensão nominal em uma bucha já defeituosa. Neste ensaio as buchas com número de série 88D6014 e 49055, foram reprovadas por apresentarem valores de fator de potência superiores a 10%. Devido a isto não foram executados os ensaios com tensão nominal, pois havia grande possibilidade de as mesmas falharem e colocarem em risco a segurança do laboratório. Na tabela 1 temos os dados e resultados da buchas avaliadas pelos ensaios tradicionais no laboratório de alta tensão do LACTEC.

Tabela 1 – Resultado ensaios Tradicionais.

Dados de Placa				Físico-Químicos				Ensaio Elétricos			
Fabricante	Tipo	Ano Fabricação	N. de Série	FP%	C1(pF)	H2O(PPM)	T.I.(dina/cm)	FP(%)@10kV	C1(pF)	FP(%)@155kV	DP(pC)
ABB	WTF-245	2007	W07-16082	0,41	293	9	40,8	0,39	287,8	0,38	30
ABB	WTF-245	2009	W09-19761	0,41	283	7	40,1	0,54	291,6	0,5	150
ABB	WTF-245	2009	W09-45790	0,34	301	8	40,9	0,49	294	0,39	30
ABB	WTF-245	2009	W09-45791	0,35	295	7	37,1	0,41	286,5	0,38	15
ABB	GOM-1050	2001	275811	0,43	374	5	37	0,4	370,7	0,43	15
ASEA	GOA-900	1984	141126	0,35	306	6	39,6	0,28	305,6	0,32	15
ASEA	GOE-900	1985	185329	0,39	308	7	37,6	0,37	300,3	0,36	250
ASEA	GOE-900	1985	185330	0,32	308	17	37,6	0,32	293,1	0,31	80
HAEFELY	CORPT	1977	76A439	N.C.	N.C.	9	41,8	0,18	241	0,17	15
HAEFELY	CORPT	1977	76A440	N.C.	N.C.	7	36,6	0,25	232,9	0,32	15
HAEFELY	CORPT	1977	76A441	N.C.	N.C.	11	41,2	0,75	233,9	1,06	>1000
MITSUBISHI	OT	1982	194552	0,27	367	N.A.	N.A.	0,4	388,5	0,31	<10
MITSUBISHI	OT	1982	195587	0,28	367	N.A.	N.A.	0,33	344,9	0,43	<10
NGK	C	1981	81J6040	0,24	N.I.	N.A.	N.A.	0,44	261,5	0,32	90
NGK	D	1985	85K6135	0,27	N.I.	N.A.	N.A.	0,36	371	0,25	20
NGK	D	1987	87A6012	0,21	N.I.	N.A.	N.A.	0,23	367,6	0,27	15
Passoni & Villa	PNO	1999	51406	0,41	548	21	42,5	0,54	541	0,45	15
Passoni & Villa	PNO	2004	69430	0,41	560	36	45,1	0,43	546,9	0,41	20
NGK	D	1988	88D6014	0,24	N.I.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Passoni & Villa	I-6096A	1970	49055	N.C.	N.C.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

Obs: N.C. - Não Consta a Informação na Bucha; T.I. - Tensão Interfacial; N.A. - Não Amostrado; N.E. - Não Ensiada

##### 4.1 Ensaios Experimentais

Após a realização dos ensaios tradicionais foram executados os ensaios de fator de potência com 10 kV e variação de frequência de 15 a 400Hz, e Espectroscopia no Domínio da Frequência - FDS com variação de frequência de 10m a 1kHz. Os gráficos resultantes destes ensaios podem ser vistos nas Figuras 9 e 10.

No ensaio de FDS realizado em laboratório 6 (seis) buchas apresentaram fator de potência negativo, sendo que, no gráfico elas estão marcadas com # em seu número de série.

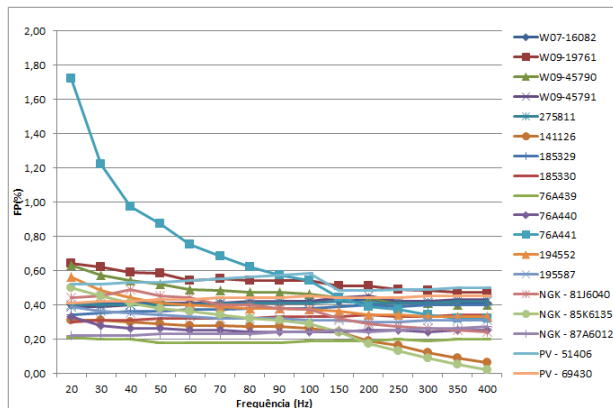


FIGURA 9 – Gráfico dos ensaios de FP%

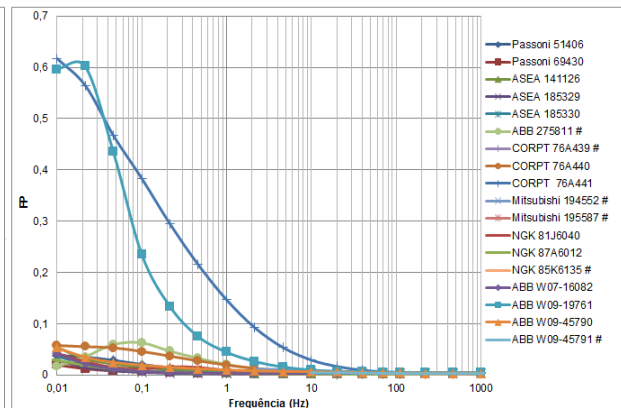


FIGURA 10 – Gráfico dos ensaios de FDS

## 5.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 Análise dos Ensaios Físico-Químicos

Foi coletado óleo mineral isolante(OMI) de 13 das 18 buchas ensaiadas com alta tensão. As 5 buchas fabricadas pela NGK e MITSUBISHI não possuíam registro ou bujões que possibilitassem a coleta do óleo.

O resultado dos ensaios físico-químico mostrados na Tabela 1, evidencia que não houve degradação do OMI pois a tensão interfacial está com valores superiores a 36 dina/cm. No ensaio de teor de umidade somente as buchas tipo PNO, da Passoni&Villa, indicaram concentração de água acima do normal. Provavelmente devido a contaminação da amostra, já que nestas buchas o óleo foi coletado primeiramente com frascos e posteriormente transferido para as seringas.

### 5.2 Análise dos Ensaios Elétricos Tradicionais.

Tradicionalmente na análise do ensaio de fator de potência admite-se um valor máximo de FP% de 1%. Porém como a tecnologia de fabricação dos instrumentos melhoraram consideravelmente nos últimos anos, com incremento na precisão dos ensaios em campo, alguns autores consideram o FP% obtido em fábrica multiplicado por 3, como valor máximo admitido para buchas em operação. Para a capacitância alterações maiores que 10% do C1 medido em relação ao valor da capacitância C1 de placa, indicam degradação do isolamento.

No ensaio com 10kV em 60Hz nenhuma das buchas foi reprovada pelo critério de variação de capacitância e apenas a número de série 76A441 ficou no limite de 3 vezes o fator de potência, se levarmos em consideração o FP duas outras buchas deste tipo, já que não há dados de placa.

Nos ensaios com tensão nominal a bucha com número de série 76A441, apresentou variação do fator de potência à medida que a tensão era elevada e se estabilizou em 1,06%, assim sendo, esta foi a única bucha reprovada neste ensaio devido ao fator de potência. Quanto ao ensaio de medição de descargas parciais as buchas número de série: W09-19761; 185329; 185330; 81J6040 e novamente a 76A441 foram reprovadas, pois apresentaram valores de descarga parcial acima de 30pC, pois consideramos este o valor máximo admitido para este ensaio.

### 5.3 Análise dos Ensaios Elétricos Experimentais.

Foi analisado o resultado dos ensaios experimentais de duas famílias de buchas totalizando aproximadamente 40% das buchas ensaiadas. Foram selecionadas as buchas tipo WTXF-245 e CORPT, pois em cada uma destas famílias houve uma bucha reprovada e o restante aprovadas, isto facilitará na análise dos resultados. Na Figura 11 têm-se o resultados dos ensaios experimentais do tipo WTXF e na Figura 12 os do tipo CORPT.

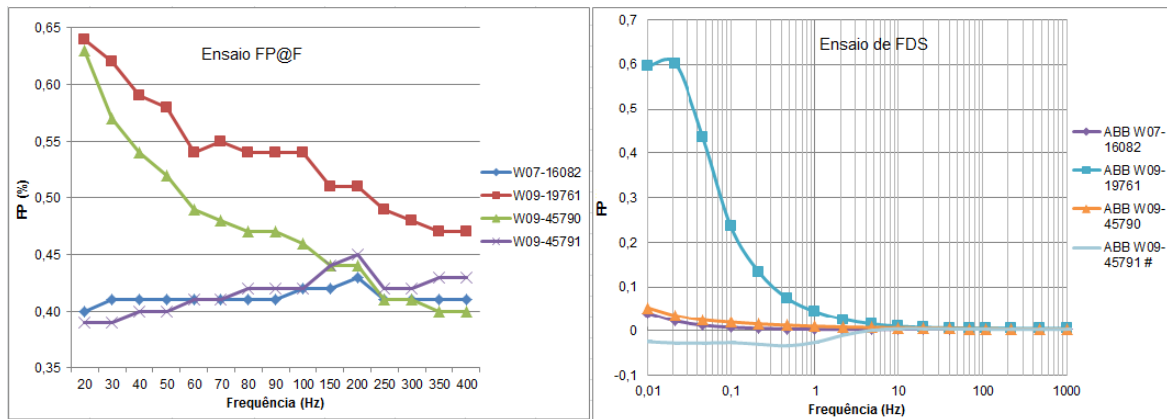


FIGURA 11 – Gráfico dos ensaios experimentais da bucha tipo WTXF

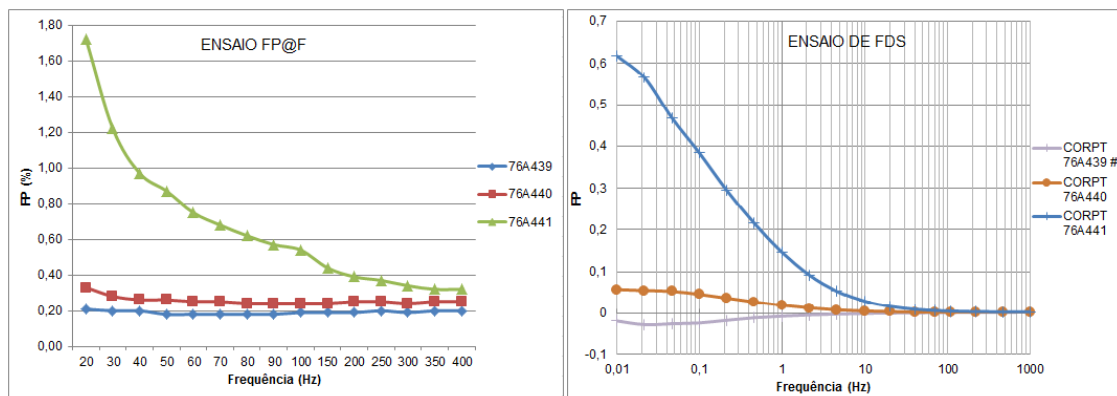


FIGURA 12 – Gráfico dos ensaios experimentais da bucha tipo CORPT

Nos ensaios de fator de potência com varredura de frequência nos dois tipos de buchas analisadas, ficou evidenciado graficamente que a buchas com defeito apresentam uma tendência de variação do fator de potência em função da frequência muito mais acentuada que nas buchas que estão em boas condições. No ensaio de FDS pode-se verificar que a variação do fator de potência em função da frequência foi mais acentuada ainda, e chegou a uma variação de mais de 1000% na mesma bucha, evidenciando mais uma vez que havia algo de errado com as mesmas. A bucha NS W09-45790 apresentou uma curva de FP em função da frequência parecida com a da bucha defeituosa, porém no ensaio de FDS isso não se repetiu. Devido a isto, serão repetidos os ensaios experimentais.

## 6.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho analisou-se os resultados de técnicas já consagradas de ensaios em buchas e comparou-se com técnicas desenvolvidas nos últimos anos, devido a grande evolução tecnológica nos instrumentos de ensaio. Após análise dos ensaios concluímos o seguinte:

- O Ensaio Físico-Químico do OMI, não detecta defeitos principiantes nas buchas, além de que sua execução poder causar contaminação da bucha pela perda da estanqueidade. Este ensaio foi realizado para verificar se o seu resultado coincidia com os valores de umidade apontados pelos modelos de curvas FDS existentes no software do IDAX, o que não foi evidenciado, já que eles foram inconsistentes com os valores dos ensaios Físico-Químico.
- O ensaio de FP% em 60Hz, não se mostrou eficaz para detecção de defeitos iniciais da isolação sólida, porém é eficiente para detectar defeitos em um estágio de degradação mais avançado.
- Os ensaios realizados com tensão nominal mostraram-se efetivos para detecção de defeitos, já que o ensaio de FP% detectou que a bucha com N.S. 76A441 estava com FP% alterado, além de o mesmo ter sofrido variação com o acréscimo da tensão, o que é um sintoma de defeito na isolação.
- O ensaio de DP foi o mais efetivo para detecção de defeitos iniciantes, e foi o ensaio que mais reprovou buchas. Vale lembrar que as DP sempre evoluem e fatalmente ocorrerão alterações no FP% das buchas.

- e. O ensaio de FP% com variação de frequência mostrou-se sensível na detecção da degradação da isolação e mostra isso nitidamente quando traça-se o gráfico do FP% em função da frequência.
- f. O ensaio de FDS mostrou de maneira mais evidente a degradação da isolação apresentada no ensaio de FP% em função da frequência, porém este ensaio é muito influenciado pelo estado da isolação da capacitância C2 da bucha, pois em 1/3 dos espécimes ensaiados houve a ocorrência de FP% negativo em baixas frequências. Conforme já relatado por vários autores, devido as diferentes distribuições de umidade dentro das buchas e diversidade dos projetos existentes, o modelo de curva de bucha do IDAX não permite calcular com precisão a umidade relativa da isolação sólida de buchas.

Com este trabalho concluímos que o ensaio de Descargas Parciais é o mais sensível na medição da degradação da isolação, e não pode ser substituído pelas novas técnicas, porém podemos afirmar que o ensaio de FP% com variação de frequência é muito mais eficiente para detecção de defeitos que o ensaio de FP% somente em 60Hz. O ensaio de FDS mostrou-se uma promissora ferramenta de detecção de defeitos em buchas, porém é necessário o aperfeiçoamento do método, com a elaboração de modelos de isolação específicos para diferentes tipos de buchas e o estudo de técnicas que diminuam a incidência de erro de leituras devido ao tipo do tap capacitivo.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MILASCH, Milan. **Manutenção de transformadores em líquido isolante**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1990.

Junior, José A. T. Medição de Descargas Parciais. Disponível em <http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/meddp1.pdf>.

acesso em: 05 de abril de 2015, 14:15.

ASEA BROWN BOVERI. **WTXF- Buchas condensivas para transformadores**. Guarulhos, 1989. Catálogo.

GARCÍA, Belén; BACELINOS, Baudilio; BURGOS, Juan C.; Determination of Water Content in Transformer Water Isulation by Frequency Domain Spectroscopy. **5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines**. Tenerife, Spain, 2005.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



### **Aguinaldo Goes de Melo.**

Londrina/PR – 20/04/1979;

2004 – Engenharia Industrial Elétrica – CEFET – PR.

2008 – Curso de Especialização em Instrumentação Industrial – UFPR – PR/PROMINP.

2010 – Curso de Aperfeiçoamento em Manutenção de Sistemas Elétricos – Fundação de Pesquisa e assessoramento da Indústria – Itajubá – MG

Engenheiro Eletricista Pleno atuando na área de Engenharia de Manutenção Eletromecânica de Equipamentos de Subestações da COPEL Geração e Transmissão.

### **Daniel Benetti.**

Astorga/PR – 29/05/1987;

2010 – Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica – UEL – PR.

2012 – Curso de Especialização em Engenharia de Confiabilidade Aplicada a Manutenção – UTFPR Engenheiro Eletricista Junior atuando na área de Engenharia de Manutenção Eletromecânica de Equipamentos de Subestações da COPEL Geração e Transmissão.

### **Roberto de Aguiar.**

Lauro Muller – SC

1978 – Eletrotécnico – CEFET/SC

Atuou por 32 anos na Companhia Paranaense de Energia – COPEL, nas subsidiárias de Geração, Transmissão e Distribuição de energia, nas áreas de campo e engenharia de manutenção de equipamentos de subestações. Especialista em manutenção de transformadores com ênfase em ensaios de laboratório e de campo. Atualmente atua como instrutor e consultor.

**Victor Simião.**

Curitiba/PR – 30/04/1981;

2000 – Técnico em Eletrotécnica – CEFET – PR.

2006 – Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica TUIUTI - PR.

Engenheiro Eletricista Pleno atuando na área de ensaios no Laboratório de Alta Tensão do Lactec .

**Vinícios Bacil**

Curitiba/PR – 23/10/1985

2009 – Engenheiro Eletricista – UFPR – PR

Engenheiro Eletricista atuando na área de ensaios no Laboratório de Alta Tensão do Lactec.