

## PS2 - Manutenção

### Comparação de Efetividade de Ensaios Off-line X Monitoração On-line de Buchas para Detecção de Defeitos – Experiência de Campo

**Ézio D. Machado**  
Tractebel Energia

**Marcos E. G. Alves**  
**Daniel P. Santos**  
Treetech Sistemas Digitais  
Brasil

#### RESUMO

A monitoração on-line do estado das buchas foi adotada pela Tractebel para todos os transformadores elevadores de 550 kV das usinas hidrelétricas de Machadinho, Itá e Salto Santiago, com os objetivos de reduzir a probabilidade de falhas, elevar a confiabilidade da planta, reduzir os custos de manutenção e eliminar intervenções desnecessárias, que trazem o risco potencial de inserção de defeitos antes inexistentes, especialmente no caso de ensaios de gás cromatografia. Três anos após o início de operação, a monitoração on-line indicou elevações na capacitância e na tangente delta de uma bucha na UHE Itá. Com o transformador fora de operação, foram realizadas medições off-line de capacitância e tangente delta, assim como ensaio de gás cromatografia no óleo da bucha. Embora este último tenha confirmado sem sombra de dúvida a deterioração da isolamento e a veracidade dos alarmes on-line, as medições off-line de capacitância e tangente delta apresentaram resultados quase sem alterações, numa aparente contradição. Este artigo apresentará os resultados das medições on-line e dos ensaios realizados e, a partir desses dados, as análises efetuadas para esclarecer os motivos da baixa sensibilidade das medições off-line de capacitância e tangente delta ao defeito constatado. Dessa forma, será possível delinear conclusões a respeito da efetividade de técnicas de ensaios off-line que há décadas são consideradas consagradas no setor elétrico mundial, comparando-a com os resultados obtidos com a monitoração on-line.

#### PALAVRAS CHAVE

Transformador de potência, buchas condensivas, monitoramento on-line, ensaios off-line, capacitância, tangente delta, gases dissolvidos, cromatografia.

#### 1. INTRODUÇÃO

A monitoração on-line do estado das buchas dos transformadores elevadores foi adotada pela Tractebel a partir do ano de 2008 para todos os transformadores elevadores de 550 kV das usinas hidrelétricas de Machadinho, Itá e Salto Santiago, com o objetivo de reduzir a probabilidade de falhas dessas máquinas devido a problemas nas buchas condensivas, elevando assim a confiabilidade da planta, além de reduzir os custos de manutenção pela eliminação dos ensaios off-line periódicos nas buchas, o que traz também o benefício de eliminar intervenções desnecessárias que trazem o risco potencial de inserção de defeitos antes inexistentes nas buchas, especialmente no caso de retirada de amostras de óleo para ensaios de gás cromatografia.

Para isso, todas as buchas de 550 kV dos transformadores elevadores, num total de 37 (trinta e sete) buchas para as três usinas, foram equipadas com sensores inteligentes (IED – Intelligent Electronic Device) para monitoração on-line da capacitância e tangente delta (ou fator de potência) da isolamento. Os sensores instalados têm como princípio de funcionamento as medições das correntes de fuga capacitivas das buchas e da soma vetorial das correntes de fuga, calculando então as variações na capacitância e tangente delta das buchas.

Em Agosto de 2014, ou seja, 3 (três) anos após o início de operação, visto que a usina de Itá foi a última onde foi instalado o monitoramento em 2011, a monitoração on-line indicou elevações na

capacitância e na tangente delta da bucha da fase B do transformador TR1 da UHE Itá, alcançando níveis de alarme de tangente delta alta e tendência de elevação de capacitância.

Com base nessas indicações o transformador foi retirado de operação, sendo substituído pela fase reserva, e foram iniciadas as providências para realização de ensaios off-line na bucha. Esses ensaios foram efetivamente realizados 3 dias após a desenergização do transformador e incluíram medições off-line de capacitância e tangente delta e gás cromatografia no óleo da bucha.

Através do ensaio de gás cromatografia foi verificada, sem qualquer dúvida, a deterioração da isolação da bucha, confirmando, portanto, a veracidade dos alarmes do sistema de monitoração on-line. No entanto, as medições off-line de capacitância e tangente delta apresentaram resultados quase normais para ambos os parâmetros, numa aparente contradição.

Este artigo apresentará os resultados detalhados do ensaio de gás cromatografia e a análise efetuada que permitiu concluir pela efetiva degradação da bucha, assim como as medições off-line de capacitância e tangente delta. A partir desses dados serão apresentadas as análises efetuadas para esclarecer os motivos da não detecção do defeito pelas medições off-line de capacitância e tan delta.

Com base nas análises efetuadas será possível tirar conclusões a respeito da efetividade das técnicas de ensaios off-line de capacitância e tangente delta, apesar de se tratar de técnica consagrada há décadas no setor elétrico mundial, comparando-a com os resultados obtidos com a monitoração on-line, que é efetuada nas condições reais de operação do equipamento (tensão de operação, temperaturas, corrente de carga, etc.).

## **2. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO OFF-LINE DE BUCHAS**

A necessidade de diagnosticar o estado das buchas condensivas tem estado presente desde o início da utilização desses acessórios, com o objetivo de prevenir falhas catastróficas que podem acarretar riscos pessoais, danos severos aos equipamentos principais (transformadores, reatores e outros) e interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Uma vez que a monitoração on-line apenas recentemente tornou-se disponível para o diagnóstico de estado das buchas, as principais técnicas tradicionalmente utilizadas na indústria para atingir esses objetivos em relação a buchas em operação tem sido as medições off-line de capacitância e tangente delta (fator de potência) da isolação principal da bucha e a análise de gases combustíveis dissolvidos no seu óleo isolante, conforme detalhado a seguir.

### **2.1. Medições de capacitância e tangente delta (fator de potência)**

De acordo com a norma IEC 60137-2008 [1], "Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V", as medições do fator de dissipação (fator de potência, ou tangente delta) e da capacitância do dielétrico devem ser efetuadas em fábrica como ensaios de rotina, à temperatura ambiente entre 10°C e 40°C, com tensão entre 1 e 1,05 vezes  $U_m$  (tensão máxima de operação da bucha), para buchas com  $U_m$  maior ou igual a 52 kV. Nessas condições, a tangente delta não deve ultrapassar o valor de 0,7% tanto para buchas do tipo OIP (papel impregnado com óleo) quanto para buchas do tipo RIP (papel impregnado com resina). Já para a medição de capacitância não são definidos valores limites.

A norma IEC 60137-2008 não define valores limite e condições de ensaio em campo para buchas em operação, embora estabeleça que as mesmas medições de capacitância e tangente delta devam ser efetuadas também com tensão entre 2 kV e 20 kV para posterior comparação com medições efetuadas em campo.

A norma ABNT NBR 5034-2014 [2] apresenta grande similaridade com a IEC 60137-2008, exceção feita ao valor limite de tangente delta para buchas do tipo RIP, que é estipulado em 1,5% ao invés de 0,7%. Esta norma estabelece também um valor limite de 1% para a variação de capacitância antes e depois da série de ensaios de rotina, não especificando, entretanto, valores limite e condições de ensaio em campo para buchas em operação.

Já a norma ANSI/IEEE C57.19.100-2012 [3], "IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings", sugere que estas medições sejam efetuadas quando da instalação da bucha e repetidas após um ano de operação, sendo a partir daí realizadas regularmente com intervalos de 3 a 5 anos. As medições de tangente delta devem ser corrigidas à temperatura de referência de 20°C a fim de eliminar a variação normal devido à temperatura da bucha no momento do teste. É sugerido que, se a bucha apresentar aumento de tangente delta entre 1,5 e 2 vezes seu valor inicial, o aumento da frequência dos testes ou a substituição da bucha sejam avaliados, assim como em caso de aumento de 5% da capacitância em relação ao valor inicial.

## 2.2. Análise de gases dissolvidos no óleo

As normas IEC 60137-2008 [1] e ABNT NBR 5034-2014 [2] não fazem menção a ensaios de gás-cromatografia para buchas. Já a ANSI/IEEE C57.19.100-2012 [3] afirma que este ensaio não é recomendado como teste de rotina devido ao risco de inserção de defeitos na bucha devido à entrada de umidade durante a retirada de amostra de óleo ou falha de vedação após este processo, recomendando este ensaio apenas como forma de confirmação de resultados em caso de aumento de tangente delta.

Por outro lado, a norma IEC 60599-2007 [4], "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis", indica valores típicos para concentrações de gases no óleo de buchas, conforme mostrados na Tabela 1 para 95% da população de buchas utilizadas para o levantamento, assim como um método para diagnóstico baseado nas relações entre os gases.

O triângulo de Duval, mostrado na figura 5, também pode ser utilizado para relacionar entre si os gases combustíveis CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, de forma a obter o diagnóstico do tipo de defeito na bucha.

Tabela 1 - Concentrações típicas de gases dissolvidos no óleo em buchas (ppm), IEC 60599-2007 [4]

H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
140	1000	3400	40	70	30	2

## 3. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DA MONITORAÇÃO ON-LINE

A capacitância e a tangente delta são reconhecidos como os principais parâmetros para diagnóstico não invasivo da condição da isolação de buchas, pois estes parâmetros são diretamente afetados pela deterioração da isolação. Por exemplo, camadas de isolação em curto-circuito causam aumento da capacitância, enquanto o ingresso de umidade por falha na estanqueidade causa aumento na tangente delta.

Um estudo comparativo [5] correlacionando os valores obtidos nas medições off-line de capacitância e tangente delta com as análises de gases dissolvidos no óleo de buchas com suspeita de defeitos em evolução comprova a eficácia das medições de capacitância e tangente delta para o diagnóstico de defeitos em buchas.

Por se tratar de método não invasivo, ao contrário da análise de gases dissolvidos, e por mensurar de forma contínua as variações de capacitância e tangente delta da isolação, durante a operação normal do equipamento, a monitoração online é a resposta à necessidade de diagnóstico on-line do estado das buchas, detectando defeitos em estágio inicial. O princípio de operação do sistema de monitoração on-line empregado na Tractebel é descrito a seguir [6].

### 3.1. Medição das correntes de fuga das buchas

Para que a medição das correntes de fuga provenientes do tap de teste ou do tap de tensão seja realizada de forma segura e eficaz, são necessários adaptadores que servirão de interface elétrica e

mecânica entre o tap e os circuitos elétricos que conduzirão a corrente até o local de medição. A figura 1 mostra um exemplo de instalação desses adaptadores no tap de buchas de 550 kV e 230 kV.



Figura 1 - Exemplo de instalação de adaptadores de tap. Fonte: [7].

Realizando-se uma análise simplificada poder-se-ia considerar que o adaptador de tap é apenas uma tomada para permitir o contato elétrico entre o tap da bucha e a entrada de medição do monitor de buchas. Esta simplificação mostra-se tanto errônea quanto perigosa, já que devemos levar em consideração que o tap da bucha nunca deve permanecer aberto. Dentre as características elétricas que o adaptador deve possuir, para atender aos requisitos de segurança e desempenho da monitoração, destacam-se o seu desenho mecânico diferenciado e a proteção contra falha na conexão elétrica do circuito de medição ou no caso de ocorrer uma desconexão acidental.

O adaptador de tap utilizado possui em seu interior um circuito de proteção com dupla função. A primeira é a proteção redundante contra abertura do tap em caso de desconexão acidental dos cabos de ligação entre o adaptador e o módulo de medição do monitor de buchas. Esta proteção tem efeito instantâneo, entrando em ação e limitando a tensão em qualquer parte do circuito secundário do adaptador de tap em  $\approx 15$  Vac. As proteções utilizadas podem conduzir por tempo indeterminado e são dimensionadas para ensaio de impulso (BIL) 2.050 kV - bucha 765 kV. Além disso, cada adaptador possui dupla proteção, que atuando paralelamente, provê proteção redundante.

Estas características são asseguradas por um desenho mecânico que torna estas proteções inacessíveis durante o manuseio e instalação do adaptador. A segunda função é a proteção primária contra sobrecorrentes (vários kA) e sobretensões associadas, que ocorrem no tap da bucha em caso de sobretensões causadas por manobras de chaveamento ou impulsos atmosféricos.

### 3.2. Tratamento matemático e estatístico das medições

A medição de grandezas elétricas da ordem de mA e  $\mu$ A em ambientes eletromagneticamente agressivos, como o de uma subestação de alta tensão, tem sido um desafio constante na elaboração de sistemas precisos e confiáveis para a monitoração de equipamentos elétricos. No caso específico da monitoração de buchas, algumas técnicas são empregadas para abordar este desafio.

O monitor de buchas aplicado nas UHEs da Tractebel utiliza a técnica da soma vetorial das correntes de fuga das buchas de um conjunto trifásico. Esta técnica apresenta algumas vantagens, como a monitoração on-line de alterações tanto da capacitância quanto da tangente delta, além de não demandar a medição das tensões fase-terra aplicadas às buchas. Algumas técnicas não são capazes de monitorar a tangente delta. Outras têm como requisito a medição das tensões fase-terra aplicadas às buchas, sendo que muitas vezes não existem transformadores de potencial disponíveis na instalação para prover esta informação.

Em cada uma das buchas a corrente de fuga flui através da capacitância C1 para terra, passando pelo tap capacitivo, sendo esta corrente função da tensão fase-terra e da impedância da isolação. Uma alteração nesta corrente refletiria uma alteração na impedância da bucha. Em princípio, esta corrente poderia ser utilizada para mensurar esta alteração. Não obstante, a característica predominantemente

capacitiva da corrente de fuga e a ordem de grandeza das alterações que se deseja medir levam ao desafio de se medir alterações da ordem de grandeza de 0,7% no fator de dissipação – que pode ser a diferença entre uma bucha nova e uma bucha em risco – sendo que esta alteração praticamente não altera a corrente de fuga total que flui de uma bucha.

A técnica da soma vetorial das correntes de fuga, utilizada para contornar esta dificuldade, tira proveito do fato das três correntes de fuga estarem defasadas entre si em aproximadamente  $120^\circ$ , e normalmente tem a mesma ordem de magnitude. Com isso, a somatória vetorial tende a um valor bastante menor que cada uma das correntes de fuga tomadas individualmente, como ilustrado na Figura 2(a) para uma dada condição inicial de capacitâncias e tangentes deltas.

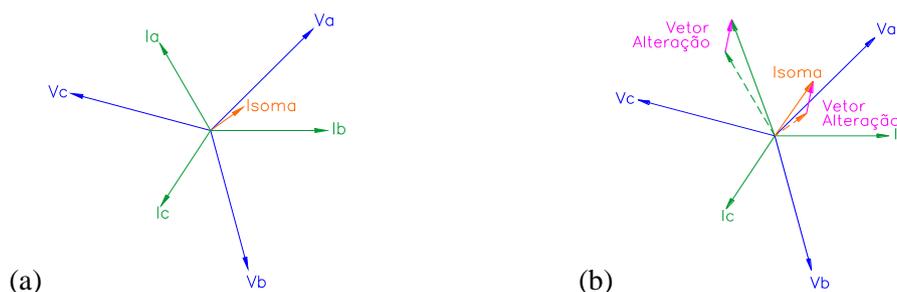


Figura 2 - Correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico e sua somatória; (a) Para uma dada condição inicial; (b) Com alteração na capacitância e fator de dissipação da bucha da fase A.

Supondo agora uma alteração na capacitância e no fator de dissipação da bucha da fase A, como mostrado na Figura 2(b), o vetor alteração que expressa o deslocamento da corrente  $I_a$  de seu valor inicial até seu valor final se reflete também na corrente somatória, que é alterada em relação a seu valor inicial segundo o mesmo vetor alteração.

Este vetor alteração tem peso praticamente insignificante quando comparado à magnitude da corrente de fuga da fase A. Porém o mesmo não ocorre quando este vetor é comparado à corrente somatória, o que permite sua detecção e, por conseguinte, a detecção da alteração ocorrida na impedância da bucha em questão. Dessa forma, a técnica da soma vetorial das correntes de fuga proporciona um aumento de sensibilidade que viabiliza a monitoração das alterações ocorridas tanto na capacitância quanto na tangente delta da isolação.

#### 4. DETECÇÃO DE DEFEITO PELA MONITORAÇÃO ON-LINE

Aproximadamente três anos após a instalação da monitoração on-line de buchas nos transformadores elevadores da UHE Itá, o monitor de buchas emitiu alarmes para a bucha da fase B do transformador TR1. Inicialmente foi emitido um aviso por tendência de elevação da capacitância, embora o valor da capacitância não tivesse ainda alcançado os valores programados para os alarme por capacitância alta e muito alta. Algum tempo depois, em 08/08/2012, a capacitância alcançou o valor de alarme por capacitância alta, confirmando a tendência anteriormente indicada pelo monitor de buchas.

O gráfico da figura 3 mostra a evolução da capacitância no período de um ano, partindo de seu valor inicial de 290 pF até atingir em 08/08/2014 o valor de alarme por capacitância alta, programado em 295,8 pF, ou seja, elevação de 2% sobre o valor inicial. Paralelamente à elevação de capacitância mostrada, houve também elevação no valor on-line calculado para a tangente delta, do valor inicial de 0,39% para um valor final próximo de 1,2%, ou seja, três vezes seu valor inicial.

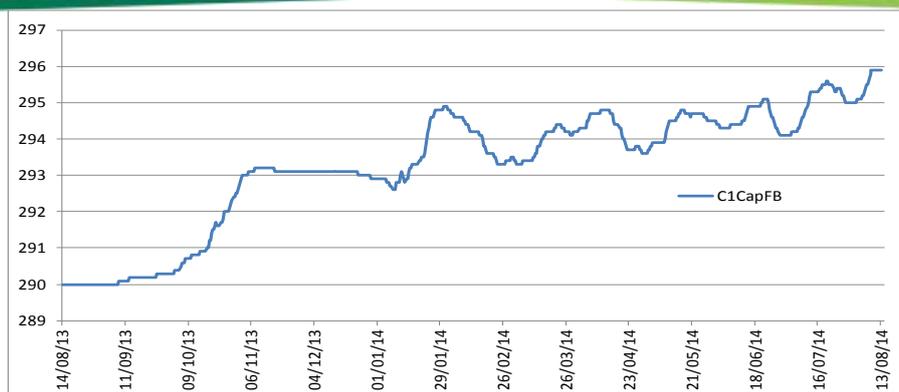


Figura 3 - Evolução da capacitância da bucha da fase B, transformador TR1

É interessante observar que a estabilidade do sistema de monitoração on-line permitiu que o limiar de alarme fosse programado com valor relativamente baixo, apenas 2% em comparação com a sugestão de 5% da norma ANSI/IEEE C57.19.100-2012 [3], de forma a prover grande sensibilidade de detecção de defeitos ao sistema de monitoração on-line sem que com isso fossem gerados alarmes indevidos.

## 5. COMPROVAÇÃO OFF-LINE DO DIAGNÓSTICO

Em função do alarme emitido pela monitoração on-line, a engenharia de manutenção da Tractebel programou um desligamento do equipamento, que foi substituído pela fase Reserva do banco, de forma a possibilitar a realização de ensaios off-line que pudessem comprovar a situação da bucha.

Estes ensaios off-line foram efetivamente realizados 3 dias após o desligamento do transformador e incluíram medições off-line de capacitância e tangente delta e gás cromatografia no óleo da bucha, obtendo-se os resultados mostrados nas tabelas 2 e 3 a seguir.

Tabela 2 - Medições off-line de capacitância e tangente delta na bucha suspeita

Grandeza	Medição	Varição	Condição de ensaio	Diagnóstico parcial
Capacitância	279,8 pF	$279,8 / 290 = -3,5 \%$	Temperatura 16 °C Tensão de ensaio 10 kV	Varição dentro dos limites aceitos por normas
Tan delta	0,52 %	$0,52 / 0,39 = +33,3 \%$	Temperatura 16 °C Tensão de ensaio 10 kV	Varição dentro dos limites aceitos por normas

Tabela 3 - Gases dissolvidos no óleo da bucha suspeita e em bucha de referência

Gás (ppm)	H2	O2	N2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	C2H2	TGC
<b>Bucha suspeita</b>	<b>639</b>	1548	11256	<b>479</b>	291	3457	<b>248</b>	<b>76</b>	<b>8</b>	1741
<b>Bucha referência</b>	21	2148	86320	9	40	216	ND*	1	N.D.	71

Como pode ser visto na tabela 2, os valores de capacitância e tangente delta obtidos no ensaio off-line, se analisados isoladamente, indicariam que a bucha encontra-se em bom estado, visto que não apresentam boa correlação com as indicações da monitoração on-line. No entanto, a análise de gases dissolvidos no óleo da bucha suspeita, conforme dados mostrados na tabela 3 e análise que se segue, indica uma conclusão bastante diferente. Nesta mesma tabela foram inseridos também os resultados de análise realizada na bucha da fase C do mesmo transformador, apenas como referência.

A análise dessas medições de gases no óleo de acordo com a norma IEC 60599-2007 [4] revela que os gases combustíveis Hidrogênio (H2), Metano (CH4), Etileno (C2H4), Etano (C2H6) e Acetileno (C2H2) apresentam valores bastante superiores aos valores considerados típicos (conforme tabela 1).

De acordo com essa norma, o diagnóstico do tipo de defeito em buchas pode ser efetuado pelo cálculo das relações entre gases simplificadas mostradas na figura 4, que devido à relação  $C_2H_4 / C_2H_6$  igual a 3,3, portanto maior do que um, direcionam ao diagnóstico "T - Falta Térmica".

Fault	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{CO_2}{CO}$
PD		<0,07		
D	>1			
T			>1	
TP				<1, >20

NOTE - PD = partial discharges  
D = discharges  
T = thermal fault  
TP = thermal fault in paper

Figura 4 - Diagnóstico pela IEC 60599-2007: T - Falta térmica. Fonte: [4]

Aplicando-se o método de Duval, as relações percentuais dos gases  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  e  $C_2H_2$  em relação à soma desses mesmos três gases direcionam para o diagnóstico "T2 - Falta térmica entre 300°C e 700°C", conforme indicado pelo ponto vermelho no triângulo da Figura 5, diagnóstico condizente com o da norma IEC 60599-2007.

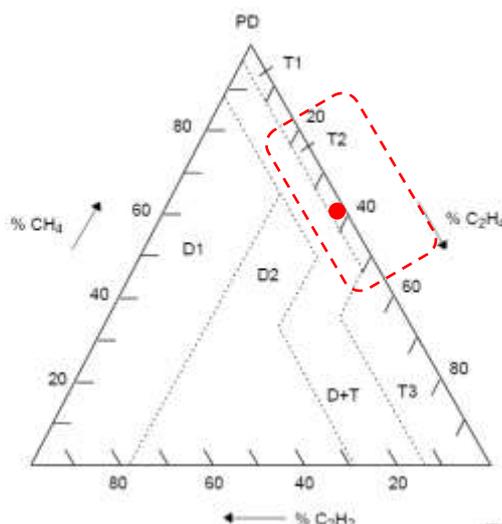


Figura 5 - Diagnóstico pelo triângulo de Duval: T2 - Falta térmica entre 300°C e 700°C. Fonte: [4].

Desta forma, o diagnóstico a partir dos gases dissolvidos no óleo corrobora o diagnóstico de defeito na bucha indicado pela monitoração on-line, comprovando que a decisão de retirada do transformador de operação foi acertada e que o sistema de monitoramento funcionou corretamente, evitando uma provável explosão de bucha e sérios danos ao transformador.

## 6. EFICÁCIA DOS MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO OFF-LINE

Conforme apresentado acima, embora os diagnósticos fornecidos pela monitoração on-line de capacitância e tangente delta e pela análise de gases dissolvidos no óleo tenham apresentado coerência entre si e confirmado a existência de um defeito na bucha, o diagnóstico obtido pelas medições off-line das mesmas variáveis medidas pela monitoração on-line (capacitância e tangente delta) divergiu, visto que não detectou variações significativas em relação aos valores de referência iniciais.

Com isso, as medições off-line de capacitância e tangente delta mostraram baixa efetividade para o correto diagnóstico do estado da bucha. Na análise efetuada com os dados disponíveis até o momento, as razões elencadas a seguir foram apontadas como sendo as mais prováveis para este fato.

## 6.1. Temperatura do dielétrico

Os ensaios para medição off-line de capacitância e tangente delta das buchas foram realizados 3 dias após a desenergização do transformador, que foi substituído pela fase Reserva do banco. Dessa forma, a temperatura do dielétrico teve tempo mais que suficiente para se equalizar com a temperatura ambiente, que no momento do ensaio era de 16 °C.

Como é amplamente conhecido, a tangente delta da isolação do tipo papel impregnado com óleo (OIP), como é o caso da bucha em questão, apresenta forte dependência com a temperatura do dielétrico, mesmo em isolações em bom estado, característica que tende a agravar-se quando a isolação apresenta elevação da tangente delta.

Dessa forma, o fato do ensaio off-line realizar-se em condição de temperatura bastante inferior à temperatura real de operação da bucha pode prejudicar a detecção de alterações na tangente delta, e por conseguinte reduzir significativamente sua eficácia para o diagnóstico de estado do equipamento. De fato, a referência [7] apresenta dados de medições em uma bucha retirada de serviço por alarme de tangente delta elevada, realizados à medida que a bucha se resfriava após a desenergização, que demonstram claramente o efeito da redução da temperatura, que causa uma redução significativa de tangente delta, podendo levar a um diagnóstico enganoso quanto ao estado da bucha.

A monitoração on-line de tangente delta, por outro lado, é efetuada com a bucha em sua condição real de operação, bem mais elevada que a ambiente devido à imersão de sua porção inferior no topo do óleo do transformador - que, no caso em estudo, opera com carga constante e próxima à nominal (carga "flat") por se tratar de um transformador elevador de usina, resultando em temperaturas do topo do óleo constantemente altas -, além das elevações de temperatura provocadas pelo efeito Joule no condutor central da bucha e pelas perdas dielétricas presentes quando a bucha é energizada com sua tensão nominal.

Dessa forma, por realizar-se na condição real de operação da bucha, a medição on-line de tangente delta mostrou-se na prática mais efetiva que as medições off-line para o correto diagnóstico do estado do equipamento.

## 6.2. Tensão aplicada ao dielétrico

Outra grande diferença entre as medições de capacitância e tangente delta realizadas de forma off-line em relação à monitoração on-line é a tensão aplicada ao dielétrico da bucha. Enquanto a monitoração on-line, durante a operação normal da bucha, esta é energizada com tensão nominal, no caso em estudo 550 kV /  $\sqrt{3} \approx 318$  kV, para os ensaios off-line é comumente aplicada tensão da ordem de 10 kV, ou seja, apenas 3% da tensão nominal.

A forma construtiva das buchas condensivas dá origem a uma grande quantidade de capacitores em série, de maneira a criar um divisor de tensão capacitivo. Uma bucha de tensão nominal 550 kV será composta de dezenas de camadas capacitivas, a depender do fabricante. Se considerarmos um número médio de 70 camadas, essa bucha energizada com tensão nominal 550 kV /  $\sqrt{3}$  terá cada camada isolante submetida a uma tensão de aproximadamente 4,5 kV. Essa mesma bucha, energizada com 10 kV para o ensaio off-line, terá cada camada submetida a apenas 140 V.

Pelo fato desta forma construtiva dar origem a diversos capacitores conectados em série, a elevação da capacitância neste tipo de bucha é causada por uma ou mais camadas de isolação em curto-circuito. Por outro lado, a experiência com dissecação de buchas nessa condição [5] [8] mostra que o curto-circuito de uma camada isolante não consiste, em geral, de um "curto franco", e sim em um caminho de impedância relativamente baixa devido à carbonização do papel isolante, presente em geral nas bordas de uma perfuração no papel. Desta forma, é razoável supor que, numa condição de baixa tensão aplicada à camada isolante danificada, esta tensão não seja suficiente para romper alguma fina barreira isolante que venha a se interpor a este caminho carbonizado, o que hipoteticamente poderia ser causado, por exemplo, por qualquer pequeno deslocamento do papel que abra espaço para a penetração de óleo isolante de regiões vizinhas e que ainda possua razoável rigidez dielétrica.

A monitoração on-line de capacitância, por outro lado, é efetuada com a bucha em sua condição real de operação, energizada com tensão nominal que resulta em elevada diferença de potencial aplicada a cada camada isolante. Muito provavelmente por este motivo, a medição on-line de capacitância mostrou-se na prática mais efetiva que as medições off-line para o correto diagnóstico do estado do equipamento no caso sob análise.

## 7. CONCLUSÃO

A experiência de campo aqui apresentada, de detecção de um defeito numa bucha de 550 kV de um transformador elevador da UHE Itá, permitiu comprovar a efetividade da monitoração on-line de buchas instalada nesta e em outras três usinas cerca de 3 anos antes, cumprindo assim os objetivos de redução do risco de falhas catastróficas, eliminação do altíssimo custo dessas falhas e aumento da confiabilidade da instalação, além do aumento da eficiência da manutenção e redução de seus custos ao se evitarem intervenções desnecessárias para ensaios off-line.

Por outro lado, esta experiência permitiu também que fosse verificada a efetividade das técnicas de ensaio que há décadas são consideradas consagradas na indústria para diagnóstico de estado de buchas em operação, constatando-se pela baixa sensibilidade das medições off-line de capacitância e tangente delta para o defeito constatado na bucha sob estudo.

Embora essa análise tenha confirmado a grande sensibilidade da análise de gases dissolvidos no óleo para a detecção de defeitos em buchas, os riscos de inserção de defeitos na bucha tornam a utilização deste ensaio aplicável somente a situações especiais, como confirmação final de um diagnóstico de defeito.

As constatações acima apresentadas, associadas à necessidade de diagnóstico contínuo e on-line durante todo o tempo de operação do equipamento, sem "zonas cegas" durante os intervalos entre ensaios, além das dificuldades para desligamento dos equipamentos, demonstram que a monitoração on-line de capacitância e tangente delta das buchas atende plenamente as necessidades da concessionária de energia elétrica.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] International Electrotechnical Commission, IEC 60137 Edition 6.0, "Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V", 07/2008.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR 5034-2014, "Buchas para tensões alternadas superiores a 1 kV", Outubro/2014.
- [3] The Institute of Electrical and Electronic Engineers, ANSI/IEEE Std C57.19.100-2012, "IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings", Fevereiro/2013.
- [4] International Electrotechnical Commission, IEC 60599 Edition 2.1, "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis", 05/2007.
- [5] Melo, M., "Investigação de Ocorrências em Buchas de Transformadores e Reatores Utilizando o Doble M-4000", IV Conferência da Doble Brasil – Cemig. Belo Horizonte, Brasil, 2003.
- [6] Melo, Marcos A. C., Alves, Marcos, "Experiência com Monitoração On-Line de capacitância e tangente delta de Buchas Condensivas", XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [7] Araújo, D. C. P., Alves, M. E. G., Teixeira, R. M., Silva, J. C., Moreira, C. R. N., "Prevenção de Falha em Transformador Trifásico 525 kV pela Monitoração On-Line de Tangente Delta de Buchas", XXII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Brasília, Brasil, 2013.
- [8] Alves, Marcos, Pena, Miguel C Medina, Severino, Cláudio "DEFEITOS DE EVOLUÇÃO RÁPIDA E MUITO RÁPIDA EM BUCHAS DETECTADOS POR MONITORAMENTO ON-LINE", XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Florianópolis, Brasil, 2011.