



GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

EXPERIÊNCIA COM MONITORAÇÃO ON-LINE DE CAPACITÂNCIA E TANGENTE DELTA DE BUCHAS CONDENSIVAS

Marcos E. G. Alves *

Marcos A. C. Melo

TREETECH SISTEMAS DIGITAIS LTDA.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

RESUMO

A capacitância e a tangente delta são reconhecidos como alguns dos principais parâmetros para diagnóstico de condição da isolação de buchas, por serem diretamente afetados pela deterioração da isolação. Este artigo apresentará uma técnica para monitoração on-line da capacitância e tangente delta de buchas, além da experiência com sua utilização em campo para monitoração de buchas de 550kV e 245kV em autotransformadores e reatores de potência.

Serão descritos os resultados obtidos durante aproximadamente um ano, inclusive com a detecção on-line de deterioração da isolação de uma bucha de 550kV, evitando uma possível falha com explosão, o que foi posteriormente comprovado através de medições off-line de capacitância e tangente delta e por análise de gás-cromatografia em amostra de óleo da bucha.

Adicionalmente, serão apresentadas as questões práticas relacionadas à instalação dos sistemas de monitoração on-line de buchas tanto em transformadores equipados com Dispositivos de Potencial de Bucha (DPB), onde o tap da bucha já se encontra em ocupado, quanto em equipamentos onde foi possível a conexão direta ao tap da bucha.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, Bucha, Monitoração on-line, Capacitância, Tangente delta.

1.0 - INTRODUÇÃO

Apesar de se tratar de um acessório dos diversos equipamentos citados, e de em geral seu custo individual ser relativamente pequeno quando comparado ao custo global do dispositivo, as buchas condensivas desempenham uma função essencial à operação de equipamentos de alta tensão tais como transformadores de potência e reatores de derivação.

Por outro lado, as buchas estão sujeitas a esforços dielétricos consideráveis, visto que é o primeiro equipamento a receber eventuais sobretensões decorrentes de manobras, impulsos atmosféricos ou outros fenômenos. Uma falha em sua isolação pode se refletir em danos não somente à bucha, mas também ao equipamento a que está associada. Em casos extremos, uma falha dielétrica em uma bucha pode levar à total destruição do equipamento de alta tensão, além do risco para as pessoas próximas.

Para evitar esse tipo de ocorrência, as concessionárias de energia utilizam-se tradicionalmente de programas de manutenção preventiva baseados no tempo, retirando o equipamento de serviço periodicamente para medições off-line de capacitância e tangente delta da isolação das buchas. Tomando-se como exemplo a norma ANSI/IEEE C57.19.100-1995 (1), são indicados intervalos típicos de 3 a 6 anos para se efetuarem essas medições. No entanto, essa filosofia de manutenção apresenta as seguintes desvantagens principais:

- A possibilidade de defeitos se desenvolverem no período de tempo entre duas medições, culminando em falhas graves,

- A necessidade de desligamento do equipamento para se realizarem as medições, acarretando custos por indisponibilidade e reduzindo a confiabilidade geral do sistema elétrico, e
- A ocupação das equipes de engenharia de manutenção, geralmente com número reduzido de pessoas, para a realização dos testes.

No caso de Furnas, o intervalo normal previsto no plano de manutenção da empresa para essas medições era de 6 anos. Entretanto, no caso da Usina de Serra da Mesa, suspeitas em relação a uma determinada família de buchas levaram à necessidade de redução do intervalo entre as medições off-line para apenas 3 meses em um banco de autotransformadores monofásicos de 133,33MVA 550/245/13,8kV e um banco de reatores monofásicos de 55MVar 550kV, elevando em muito os custos de manutenção e de indisponibilidade do sistema.

A alternativa para superar estas desvantagens da manutenção baseada no tempo é a monitoração on-line da capacitância e da tangente delta das buchas, que permite que essas medições sejam feitas de forma contínua e durante a operação normal do equipamento. Dessa forma, em Novembro/2005 foi instalado o sistema de monitoração de buchas BM, da marca Treotech, para monitoração on-line da capacitância e da tangente delta dessas buchas.

2.0 - MONITORAÇÃO ON-LINE DE BUCHAS

2.1 Forma construtiva das buchas condensivas

As buchas do tipo condensiva têm seu corpo isolante constituído de diversas camadas isolantes cilíndricas concêntricas, intercaladas a camadas condutoras também cilíndricas cuja função é uniformizar ao máximo o campo elétrico, como mostra a Figura 1. A camada condutora mais externa é conectada à flange da bucha, e esta por sua vez ao terra. Já as camadas condutoras intermediárias permanecem isoladas, com potencial flutuante, com exceção de uma das mais externas, que é aterrada através de uma ligação removível próxima à base da bucha, denominada tap de tensão ou tap de teste (Figura 1). Para aplicação ao tempo, este conjunto, denominado corpo condensivo, estará contido em um invólucro impermeável, que pode ser de porcelana, silicone ou material polimérico à base de silicone.

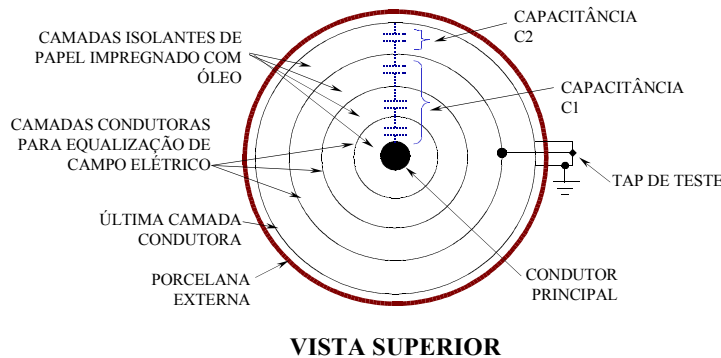


Figura 1 – Forma construtiva de uma bucha condensiva

O conjunto descrito acima atua eletricamente como diversos capacitores conectados em série, formando um divisor de tensão capacitivo. Desta forma, a diferença de potencial total do condutor principal em relação ao terra é dividida entre os diversos capacitores.

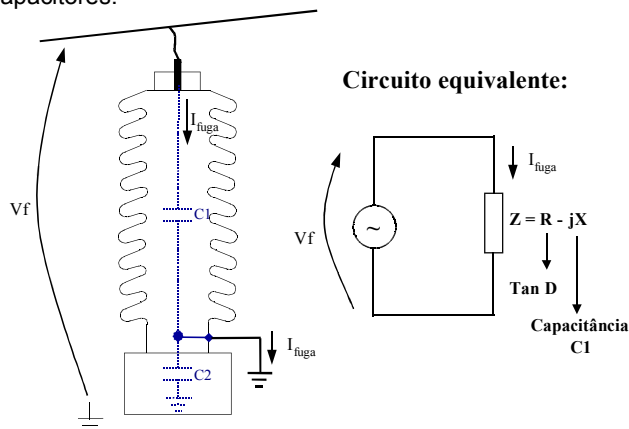


Figura 2 – Circuito equivalente de uma bucha condensiva energizada

Quando a tensão fase-terra é aplicada à bucha, uma corrente, denominada corrente de fuga, passa a circular através de sua isolação, devido principalmente à sua capacitância, e em muito menor proporção devido às suas perdas dielétricas (expressas pelo fator de dissipação ou tangente delta). A Figura 2 ilustra esta situação; nesta figura podemos observar o equivalente elétrico obtido com a construção mostrada na Figura 1, já com a bucha energizada. Este é o modelo elétrico equivalente “série”. Um modelo elétrico “paralelo” poderia também ser aplicado, com os mesmos resultados. Com o modelo adotado, temos a seguinte corrente de fuga resultante:

$$I_{\text{fuga}} = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_f}{R - jX}$$

Onde “R” representa a componente resistiva da impedância da isolação, que gera a parte resistiva da corrente de fuga, associada às perdas dielétricas, sendo “X” a componente reativa devido à capacitância da isolação.

2.2 Filosofia de operação da monitoração on-line

O objetivo da monitoração on-line de buchas condensivas é a detecção de alterações na isolação da bucha ainda em sua fase inicial, indicando o desenvolvimento de condições que poderão levar à falha dielétrica do equipamento. Para isto é necessário detectar, com a bucha energizada, mudanças na capacitância e na tangente delta da isolação, ou seja, mudanças na impedância “Z” da isolação da bucha.

Em cada uma das buchas a corrente de fuga I_{fuga} flui através da capacitância C1 para o terra, passando pelo tap de teste ou de tensão, sendo esta corrente função da tensão fase-terra e da impedância da isolação. Desta forma, qualquer alteração na impedância da isolação (capacitância ou fator de dissipação) se refletirá em uma alteração correspondente na corrente de fuga que, em teoria, se poderia utilizar para a detecção da alteração ocorrida na impedância.

Entretanto, um dos obstáculos que se encontra para a detecção conforme descrito acima é a ordem de grandeza das alterações que se deseja monitorar. Alterações tão pequenas quanto um incremento algébrico de 0,3% no fator de dissipação de uma bucha podem representar a diferença entre uma bucha nova, em boas condições, e uma bucha no limite do aceitável. Fica evidente que uma alteração tão pequena no fator de dissipação provocará uma alteração praticamente insignificante na corrente de fuga da bucha, tornando inviável sua detecção por meio da monitoração apenas da corrente de fuga de cada bucha.

Uma das técnicas que permite superar a limitação prática demonstrada é a utilização da soma vetorial da corrente de fuga das três buchas em um sistema trifásico. Em um arranjo como este, as três correntes de fuga estão defasadas entre si em aproximadamente 120°, e normalmente tem a mesma ordem de magnitude, pois as três buchas têm capacitâncias em princípio semelhantes e as tensões das três fases estão próximas do equilíbrio. Com isso, a somatória das três correntes de fuga tende a um valor bastante menor que cada uma das correntes de fuga tomadas individualmente, como ilustrado na Figura 3.(a) para uma dada condição inicial de capacitâncias e fatores de dissipação.

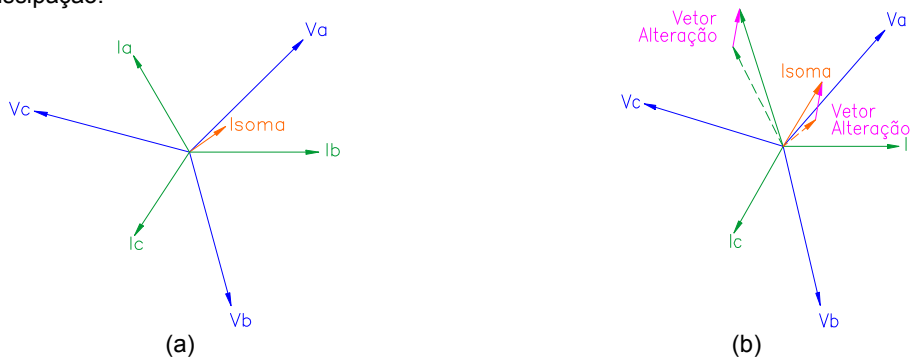


Figura 3 – Correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico e sua somatória; (a) Para uma dada condição inicial; (b) Com alteração na capacitância e fator de dissipação da bucha da fase A.

Supondo agora que ocorra uma alteração na capacitância e no fator de dissipação da bucha da fase A, como mostrado na Figura 3.(b), o Vetor Alteração ΔI 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 ΔI .

$$\Delta I = I_{a \text{ ATUAL}} - I_{a \text{ ANTERIOR}} = I_{\text{SOMA ATUAL}} - I_{\text{SOMA ANTERIOR}}$$

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.

Pelo exposto acima, observam-se algumas características intrínsecas ao método utilizado:

- É necessária a determinação de uma referência inicial de correntes para o sistema, para em seguida compará-la às novas medições on-line, de forma a determinar as alterações ocorridas na capacitância e no fator de dissipação das buchas;
- Não é efetuada a medição dos valores absolutos de capacitância e tangente delta das buchas, mas sim a medição das variações ocorridas nestes parâmetros. Porém, uma vez que sejam conhecidos os valores iniciais de capacitância e tangente delta de cada bucha (valores presentes no momento em que é determinada a referência inicial de correntes), a medição das variações ocorridas permite conhecer os valores atuais de capacitância e tangente delta;
- No caso de buchas novas, podem ser utilizados como valores iniciais de capacitância e tangente delta os valores de placa determinados pelo fabricante das buchas. Porém para buchas já em operação é recomendável que, na instalação do sistema de monitoramento on-line, seja efetuada a medição destes parâmetros através de métodos convencionais, com as buchas desenergizadas. Com isso se garante que estão sendo utilizados pelo sistema de monitoramento valores iniciais corretos.

2.3 Segurança do sistema de monitoração on-line

Como se pode observar do acima exposto, as correntes de fuga e a corrente somatória são influenciadas não apenas pelas mudanças na capacitância e tangente delta das buchas, mas também por alterações nas tensões fase-terra em cada bucha. Esta influência é eliminada por meio de tratamentos matemáticos e estatísticos realizados nas medições, razão pela qual o processo de determinação da referência inicial de correntes é efetuado num período de tempo ajustável de 1 a 7 dias após o início de operação do sistema de monitoramento. Já o processo de medição das alterações ocorridas, pelas mesmas razões, tem uma constante de tempo de resposta da mesma magnitude.

A construção física da bucha dá origem a um divisor de tensão capacitivo, como demonstrado anteriormente, sendo a porção inferior deste divisor normalmente curto-circuitada aterrando o tap da bucha, de modo que a tensão deste em relação ao terra é de zero volts. Para que seja possível a medição da corrente de fuga da bucha, este aterramento passa a ser efetuado pelo circuito de medição da corrente de fuga. Devido à baixa impedância deste circuito, a tensão do tap em relação ao terra permanece próxima de zero. No entanto, em caso de interrupção acidental do circuito de medição, o divisor de tensão capacitivo geraria uma tensão no tap da bucha que normalmente é superior à rigidez dielétrica do tap em relação ao terra, com riscos de danos à bucha.

Para evitar esta ocorrência, o adaptador de conexão ao tap da bucha está provido de dois dispositivos limitadores de tensão conectados em paralelo, em uma configuração redundante. Estes dispositivos entram em condução em caso de abertura do circuito de medição, constituindo um caminho de baixa impedância para a corrente de fuga, de forma que a tensão do tap em relação ao terra permanece em poucos volts. Os dispositivos limitadores de tensão não estão suscetíveis a desgastes de natureza elétrica ou mecânica, o que permite que cada um deles separadamente conduza, por tempo indeterminado, no mínimo 2,5 vezes a máxima corrente de fuga encontrada nos diversos modelos de bucha existentes.

Além disso, os dispositivos limitadores de tensão atuam como proteções contra as sobrecorrentes e sobretensões que se desenvolvem no tap da bucha quando da ocorrência de sobretensões transitórias no sistema elétrico. Isso permite também que todos os ensaios dielétricos (por exemplo, tensões de impulso) sejam realizados nas buchas já com o sistema de monitoração on-line conectado e em operação.

3.0 - INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO ON-LINE

O sistema de monitoração de buchas empregado tem concepção modular, sendo constituído de 3 partes básicas:

- Adaptadores para tap – provêm a conexão elétrica aos taps das buchas, garantindo também sua vedação contra intempéries. Incorpora as proteções redundantes contra abertura acidental do circuito de medição, evitando que o tap permaneça em aberto;
- Módulos de Medição – recebem as correntes de fuga de três buchas de um conjunto trifásico, efetuam as medições destas correntes e seu processamento matemático e estatístico, disponibilizando para o módulo de interface os valores atuais de capacitância e tangente delta através de uma porta de comunicação serial;
- Módulo de Interface – recebe as informações dos módulos de medição e as disponibiliza de forma local em seu display e remotamente através de contatos de saída para alarme, saídas analógicas (mA) e portas de comunicação serial. Opcionalmente, o Módulo de Interface pode ser conectado também à rede Intranet da empresa para acesso remoto às medições.

Nesta aplicação, a instalação do sistema de monitoração de buchas incluiu os seguintes equipamentos:

- Três buchas de 550kV e três de 245kV, todas com taps de tensão conectados a Dispositivos de Potencial de Bucha (DPB), em um banco de autotransformadores monofásicos;
- Três buchas de 550kV com taps de teste, sem conexão a DPB's, em um banco de reatores de derivação monofásicos.

No caso do banco de reatores, que não utilizam DPB's, a conexão aos taps de teste foi efetuada utilizando-se Adaptadores para Tap fornecidos pela Treetech, como mostra a Figura 4-(b). Os Adaptadores das buchas das três fases do banco são então conectados às entradas de um Módulo de Medição instalado no Painel Comum do banco de reatores, Figuras 4-(c) e 4-(d).

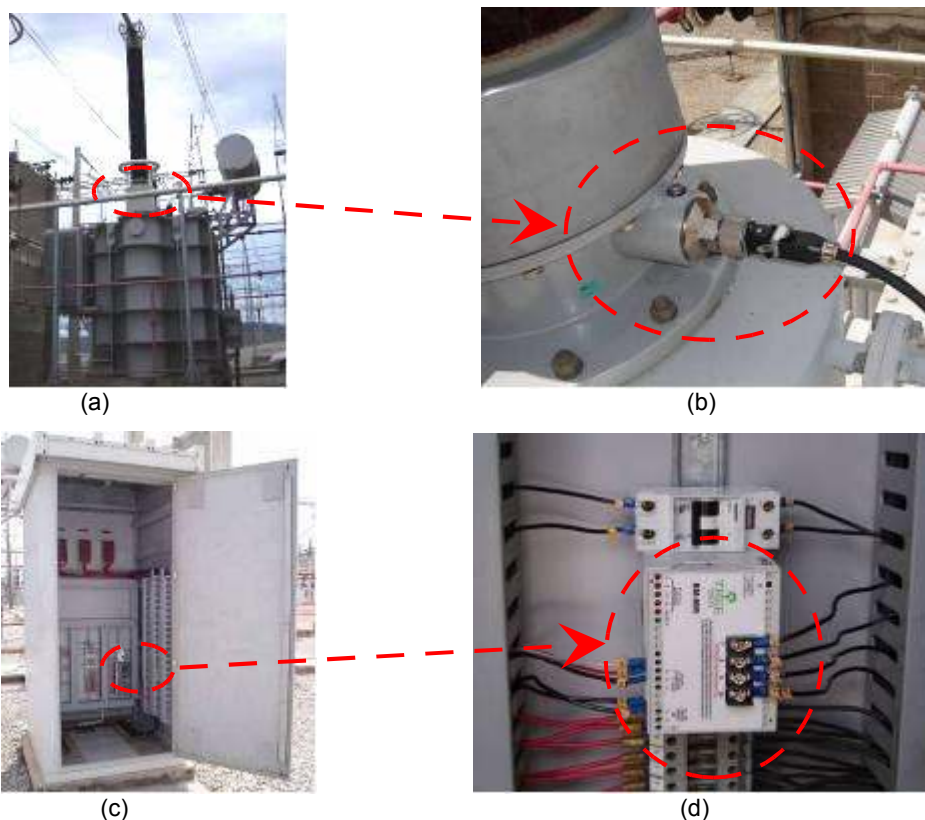


Figura 4 – Monitoração das buchas do banco de reatores monofásicos; (a) Reatores; (b) Adaptador no tap de bucha 525kV; (c) Painel Comum do banco de reatores; (d) Módulo de Medição para as buchas dos reatores.

Para o banco de autotransformadores não são empregados Adaptadores para Tap, pois como se observa na Figura 5-(b), já existem Dispositivos de Potencial de Bucha conectados aos taps das buchas. Uma vez que a tensão de saída de um DPB é afetada de forma proporcional às variações na capacitância C_1 da bucha a que está conectada, essas tensões são empregadas como sinais de entrada para os Módulos de Medição do sistema de monitoração, utilizando-se para isto capacitores de acoplamento.

Desta forma, para os bancos de autotransformadores são empregados dois Módulos de Medição: um que recebe os sinais dos DPB's das buchas de 550kV e outro que recebe os sinais dos DPB's das buchas de 245kV. Ambos os Módulos de Medição são instalados no interior do Painel Comum do banco de autotransformadores, como mostram as Figuras 5-(c) e 5-(d).

Um único Módulo de Interface foi empregado para o banco de autotransformadores e o de reatores, inicialmente instalado no Painel Comum do banco de autotransformadores. Como a interligação entre os Módulos de Medição e o Módulo de Interface é efetuada através de uma rede RS485, com cabo metálico tipo par-trançado, posteriormente o Módulo de Interface foi movido para a Sala de Relés da subestação, distante cerca de 100 metros dos equipamentos. Essa mudança teve por objetivo permitir a interligação do Módulo de Interface à rede intranet de Furnas, que já se encontrava disponível nesta sala, sem a necessidade de levar a intranet ao pátio da subestação, o que exigiria um link de fibra ótica. Ao invés disso, a rede RS485 que interliga os módulos do sistema de monitoração foi levada à Sala de Relés através de um simples cabo par-trançado blindado de baixo custo. Vide Figura 5-(b).

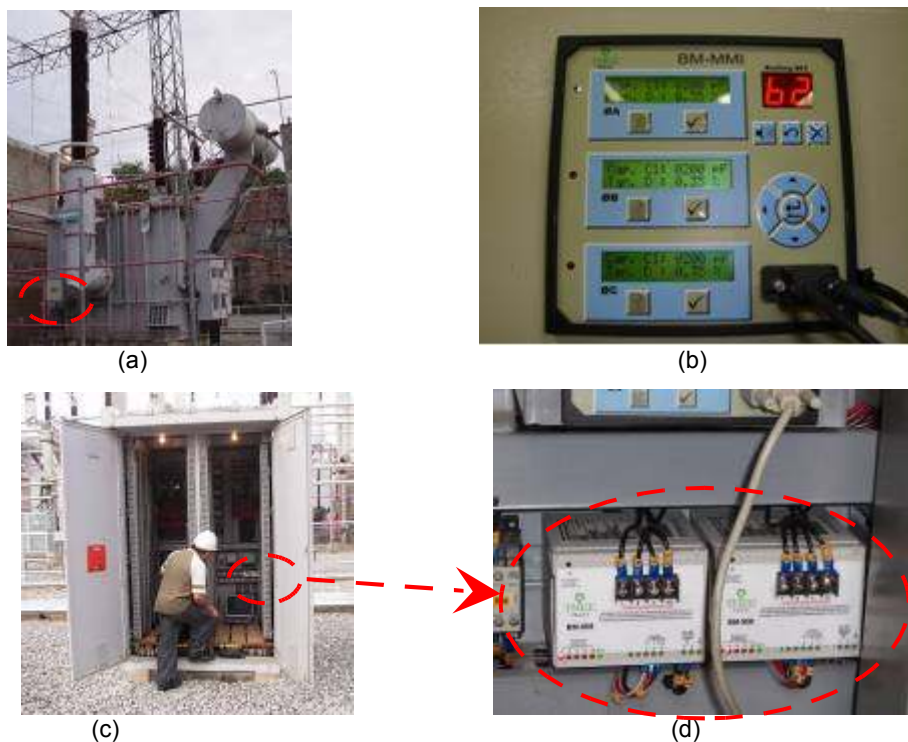


Figura 5 – Monitoração das buchas do banco de autotransformadores monofásicos; (a) Autotransformador com DPB; (b) Módulo de Interface na Sala de Relés; (c) Painel Comum do banco de autotransformadores; (d) Módulos de Medição para as buchas dos autotransformadores.

Com o Módulo de Interface conectado à intranet de Furnas, todas as informações do sistema de monitoração de buchas, tais como medições atuais e atuação de alarmes, podem ser acessadas remotamente dos escritórios da empresa na usina ou fora dela.

4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Estabilidade das medições

No caso do banco de reatores, em que existe a conexão direta entre os Adaptadores para Tap e o Módulo de Medição, são monitoradas tanto a capacitância como a tangente delta das buchas de 550kV. Nos gráficos da Figura 6 é mostrado o comportamento típico dessas variáveis, onde se observa que o sistema de monitoração proporcionou medições estáveis, com variações da ordem de 0,1% para as capacitâncias e 0,1% (em variação absoluta) para as medições de tangente delta.

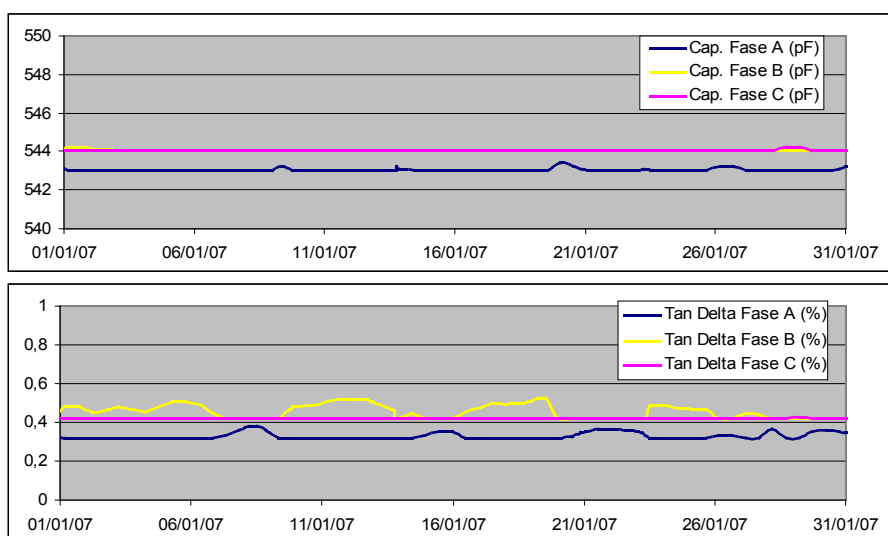


Figura 6 – Comportamento típico das medições de Capacitância e Tangente Delta nas buchas dos reatores

Além de mostrar que a isolação dessas buchas não apresentou variação no período, esses resultados, demonstram também a estabilidade da técnica empregada para a monitoração on-line, praticamente imune à interferência de fenômenos normalmente encontrados nos sistemas de potência, tais como oscilações nas tensões fase-terra, desequilíbrios entre fases e surtos de manobra.

Para as buchas do banco de autotransformadores, a tensão de saída dos Dispositivos de Potencial de Bucha (DPB) é utilizada como sinal de entrada para o sistema de monitoração. Portanto, eventuais variações nessa saída dos DPBs, causadas por mudanças de temperaturas, por exemplo, podem influir nas medições do sistema de monitoração on-line. Esse fato fica mais evidente nas medições de tangente delta, devido à pequena magnitude das correntes de perdas dielétricas da isolação das buchas comparadas às correntes capacitivas. Já as medições de capacitâncias, pelo mesmo motivo, são muito pouco afetadas por variações nos DPBs.

Dessa forma, as buchas de 550kV e 245kV do banco de autotransformadores são monitoradas apenas através da medição de suas capacitâncias, não se empregando a medição de tangente delta. O comportamento típico dessa medição é mostrado no gráfico da Figura 7, onde se verificam oscilações inferiores a 0,2% na medição de capacitância apesar das variações causadas pelos DPBs.

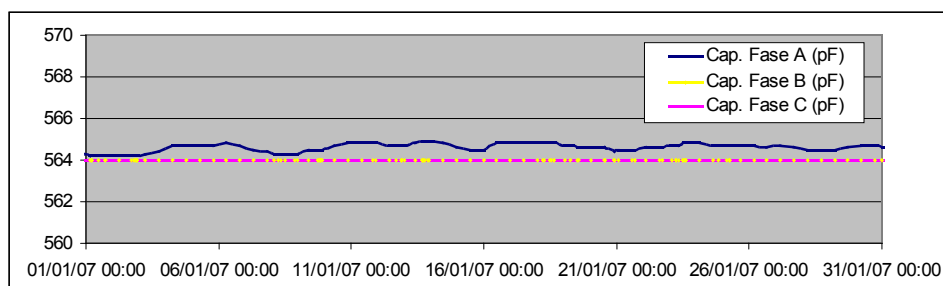


Figura 7 – Comportamento típico das medições de Capacitância nas buchas de 550kV dos autotransformadores

4.2 Detecção de defeito em uma bucha de 550kV

Como mencionado, a instalação da monitoração on-line de buchas foi motivada pelas suspeitas que existiam em relação a uma família de buchas. Essas suspeitas foram confirmadas durante a operação do sistema de monitoração, que emitiu alarme devido a uma grande elevação da capacitância na bucha de 550kV do autotransformador da fase A, de 560pF para 594pF, cerca de 6%, como mostra o gráfico da Figura 8.

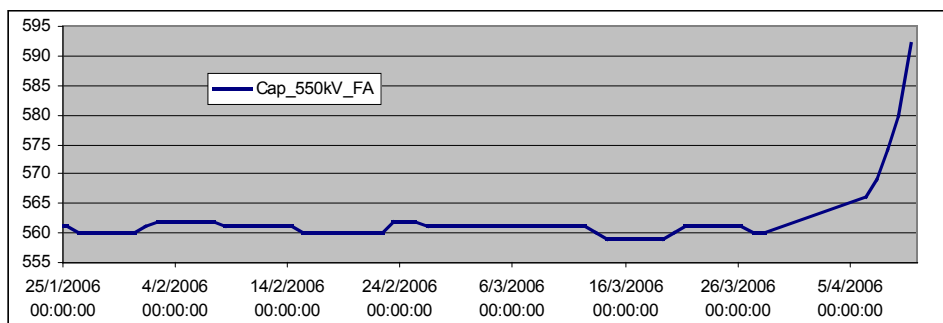


Figura 8 – Aumento da Capacitância na bucha de 550kV do autotransformador da fase A

Ainda mais grave, porém, foi a constatação de uma elevada taxa de aumento para a capacitância, o que levou ao rápido desligamento do banco. Com o banco de autotransformadores desenergizado foram realizadas medições off-line de capacitância, além de retirarem-se amostras de óleo para análise de gases dissolvidos em laboratório. As amostras foram enviadas ao laboratório de Furnas e também ao do fabricante dos autotransformadores, ambos indicando resultados semelhantes, mostrados abaixo na tabela 1. Chamam a atenção as elevadas concentrações de gases combustíveis, principalmente o acetileno, com quase 7000ppm, o que confirma a existência de um defeito interno em evolução na bucha.

Tabela 1 – Gases dissolvidos no óleo da bucha do autotransformador da fase A

Gás	H2	O2	N2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	C2H2	TGC
Teor (ppm)	7401	2100	47969	5477	2000	10665	4597	1728	6904	28107

Através das medições off-line de capacitância foi possível confirmar também o alarme emitido pela monitoração de buchas on-line, indicando a existência de camadas de isolação em curto-circuito. Nessas medições foi verificada tangente delta de 0,97% e capacitância de 853pF, superior à indicada nas medições on-line. Essa diferença entre

as medições se explica pelo fato da capacitância encontrar-se em um processo de elevação contínua, o que causa uma defasagem de tempo entre a capacitância real e a indicada pela monitoração on-line devido ao tempo de resposta desta, conforme explanado no item 2.3. Em outras palavras, se a capacitância das buchas se estabilizasse em um determinado valor, a medição da monitoração on-line alcançaria este mesmo valor depois de decorrido o seu próprio tempo de resposta.

5.0 - CONCLUSÃO

As buchas de alta tensão condensivas são um acessório essencial para a operação de diversos equipamentos de alta tensão, tais como transformadores de potência e reatores. Este artigo demonstrou o princípio de funcionamento que permite a monitoração on-line deste tipo de bucha, assim como a experiência de aplicação desse sistema às buchas de autotransformadores monofásicos 550/245kV e de reatores monofásicos de 550kV em Furnas, na Usina de Serra da Mesa.

Durante a operação, as oscilações observadas nas medições on-line foram da ordem de até 0,4% para capacitância e 0,13% para tangente delta (em valor absoluto, no banco de reatores, onde esta é medida), permitindo ajustes bastante sensíveis para os alarmes. Isso permitiu que fosse detectada com sucesso a evolução de defeito na isolamento de uma bucha de 550kV em um dos autotransformadores, permitindo a retirada de operação desse equipamento antes que ocorresse uma falha grave, com a provável explosão dessa bucha.

Dessa forma, ficou demonstrado na prática que a monitoração on-line de buchas pode ser um instrumento adicional e confiável para a prevenção de acidentes com esse tipo de equipamento, não somente aumentando a confiabilidade e disponibilidade do sistema elétrico e mantendo a integridade dos equipamentos, mas também aumentando a segurança para as pessoas presentes nas instalações.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) The Institute of Electrical and Electronic Engineers, ANSI/IEEE Std C57.19.100-1995, "IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings", Março/1995.
- (2) Alves, Marcos, "Sistema de Monitoração On-Line de Buchas Condensivas", Revista Eletricidade Moderna, Abril/2005.
- (3) Alves, Marcos; Zanetta, Luis, "Monitoração do Envelhecimento Térmico em Buchas Condensivas Isoladas com Papel Impregnado com Óleo", X SEPOPE, Maio/2006.
- (4) Alves, Marcos, "Sistema de Monitoração On-Line de Transformadores de Potência", Revista Eletricidade Moderna, Maio/2004.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marcos E. Guerra Alves - Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 15 de julho de 1975, trabalha com a Treotech Sistemas Digitais desde 1992. Especializado em sistemas de controle e monitoramento de transformadores de potência, é gerente do departamento de Pesquisas e Desenvolvidos. Formou-se Engenheiro Elétrico em 2001 pela Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, e em 2005 concluiu o seu Mestrado na área de Energia e Automação da Universidade de São Paulo (USP).

Marcos A. Caddah Melo - Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 24 de Janeiro de 1969, trabalha com Furnas Centrais Elétricas desde 1993. Especializado em engenharia de manutenção de equipamentos de alta tensão, com foco em transformadores e reatores de potência, atua na Área de Engenharia de Manutenção de Equipamentos de AT. Formou-se Engenheiro Eletricista em 1992 pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET-RJ, Rio de Janeiro.