



Sistema de Monitoração On-line de Capacitância e Tangente Delta de Buchas Condensivas

Marcos E G. Alves*

Jorge C. da Silva**

* Treetech Sistemas Digitais Ltda.

** Cemig S.A.

RESUMO

Em geral, apesar do custo individual das buchas ser relativamente baixo comparado ao custo total do equipamento onde está aplicada, uma falha na isolação de uma bucha pode causar danos severos ao equipamento, como por exemplo, um transformador de potência ou transformador de corrente, podendo levar até mesmo à sua perda total.

A capacitância e a tangente delta são reconhecidos como alguns dos principais parâmetros para diagnóstico de 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 selagem causa aumento na tangente delta.

Este artigo apresentará uma metodologia para monitoração on-line da capacitância e tangente delta de buchas e de transformadores de corrente, com a filosofia e os princípios básicos utilizados, incluindo os seguintes tópicos:

- Medição das correntes de fuga das buchas diretamente em seus taps de teste ou de tensão;
- Tratamento matemático e estatístico das medições para extrair as informações de capacitância e tangente delta da isolação;
- Sensibilidade e precisão da técnica de monitoração;
- Alarmes por valores absolutos de capacitância e tangente delta;
- Alarmes por tendências de evolução de capacitância e tangente delta;
- Proteções contra sobretensões e sobrecorrentes causadas por fenômenos transitórios na rede (por exemplo, surtos de manobra e impulsos atmosféricos) e contra abertura acidental do tap da bucha.

Será apresentada a experiência obtida com a utilização deste sistema em campo, monitorando simultaneamente 3 buchas de 500kV e 3 de 230kV em um transformador de potência e 3 transformadores de corrente de linha de 500kV. Com isso puderam ser verificadas a estabilidade do sistema de monitoração e sua imunidade às variações normais do sistema de potência, além de sua operação quando sujeito a surtos de manobra e outras perturbações.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, TC, Bucha, Monitoração on-line, Capacitância, Tangente delta, Intelligent Electronic Device, IED.

1. INTRODUÇÃO

As buchas são acessórios aplicados em equipamentos de alta tensão com o objetivo de prover passagem à corrente elétrica entre o meio externo e o interior do equipamento, provendo também a isolamento necessária em relação à carcaça do equipamento. Alguns dos exemplos de aplicação mais comuns são transformadores de potência, reatores de derivação e disjuntores de alta tensão.

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 desempenham uma função essencial à operação do equipamento.

Por outro lado, as buchas estão sujeitas a esforços dielétricos consideráveis, e uma falha em sua isolamento 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 (no caso de um transformador de potência, por exemplo, os prejuízos em uma ocorrência deste porte podem ser de algumas centenas de vezes o custo da bucha que originou o problema).

Dentre os diversos tipos de bucha existentes, destacam-se para aplicação em equipamentos de alta e extra-alta tensão as buchas do tipo condensiva, em que seu corpo isolante consiste de diversas camadas isolantes cilíndricas concêntricas, intercaladas a camadas condutoras também cilíndricas cuja função é uniformizar ao máximo o campo elétrico. A camada condutora mais interna pode estar eletricamente conectada ao condutor principal, de forma a aumentar o raio e diminuir o campo elétrico nesta região (diminuindo também os intensos campos elétricos que podem ser causados por rugosidades no condutor principal). 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. Para aplicação ao tempo, todo este conjunto estará contido em um invólucro impermeável, freqüentemente de porcelana. A conexão da última camada (ou de uma das últimas camadas) condutora ao terra é feita geralmente através de uma ligação removível próxima à base da bucha, denominada tap de tensão ou tap de teste (figura 1).

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 igualmente entre os diversos capacitores.

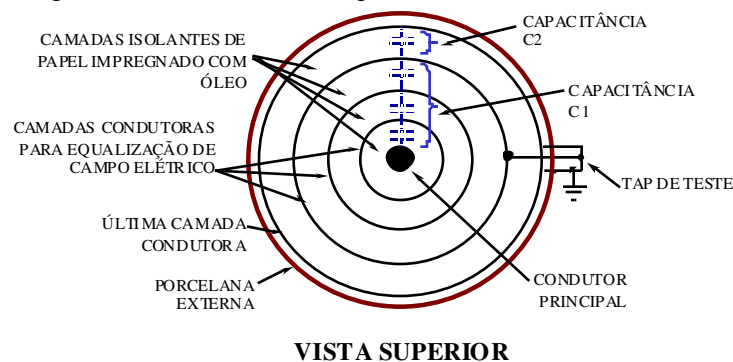


Figura 1 – Forma construtiva de uma bucha condensiva

Quando a tensão de operação é aplicada a uma bucha condensiva, uma corrente, denominada corrente de fuga, passa a circular através de sua isolamento, 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.

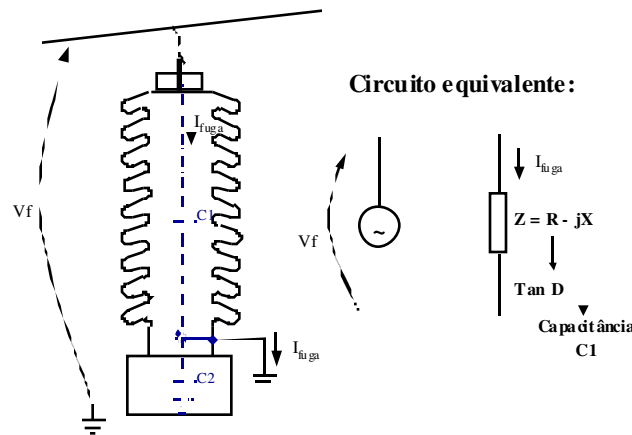


Figura 2 – Circuito equivalente de uma bucha condensiva energizada

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.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Em cada uma das buchas a corrente de fuga I_{fuga} flui através da capacitância $C1$ para o terra, passando pelo tap de teste, 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.

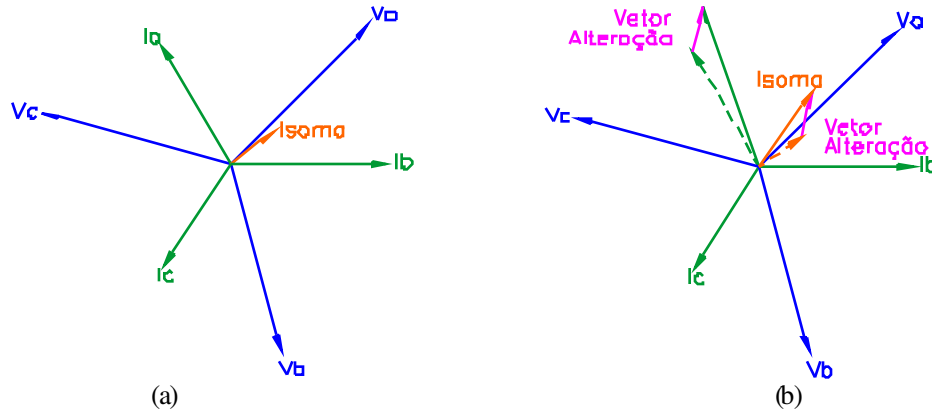


Figura 3 – Correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico e sua somatória; (a) Para uma dada condição inicial; (b) Com alteração na capacitância e fator de dissipação da bucha da fase A.

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 destas parâmetros através de métodos convencionais, com as buchas desenergizadas. Com isso se garante que estão sendo utilizados pelo sistema de monitoramento valores iniciais corretos.

Uma outra questão não abordada até este ponto é que 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 de 10 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 de aproximadamente 10 dias.

Como exposto acima na introdução, a construção física da bucha dá origem a um divisor de tensão capacitivo, 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 direto é removido e substituído 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. Deve ser observado que, em caso de interrupção acidental deste circuito de medição, o divisor de tensão capacitivo gerará 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 um dispositivo limitador de tensão que entra 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. Este dispositivo limitador não está suscetível a desgastes de natureza elétrica ou mecânica, o que permite que conduza a corrente de fuga por tempo indeterminado.

3. EXPERIÊNCIA EM CAMPO

A figura 4 ilustra a aplicação da monitoração de buchas em um transformador trifásico de 500/230kV na subestação Mesquita da Cemig. Nesta figura se pode observar a topologia típica de um sistema de monitoração de buchas, constituído de 3 partes básicas:

- Adaptadores para tap – provêem a conexão elétrica aos taps das buchas, garantindo também sua vedação contra intempéries. Incorpora a proteção contra abertura acidental do circuito de medição, evitando que o tap permaneça em aberto;
- Módulo de Medição – recebe as correntes de fuga de três buchas de um conjunto trifásico, efetua 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 do(s) módulo(s) 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.

Este sistema iniciou sua operação monitorando a capacitância e a tangente delta das buchas de 500kV e 230kV do transformador de potência. Nos gráficos da figura 5 podemos observar o comportamento típico dessas variáveis em um período de 5 meses. Nesse intervalo, observase que o sistema de monitoração proporcionou medições permaneceram bastante estáveis, com variações inferiores a 0,1% para as capacitâncias e 0,05% (em variação absoluta) para as medições de tangente delta.

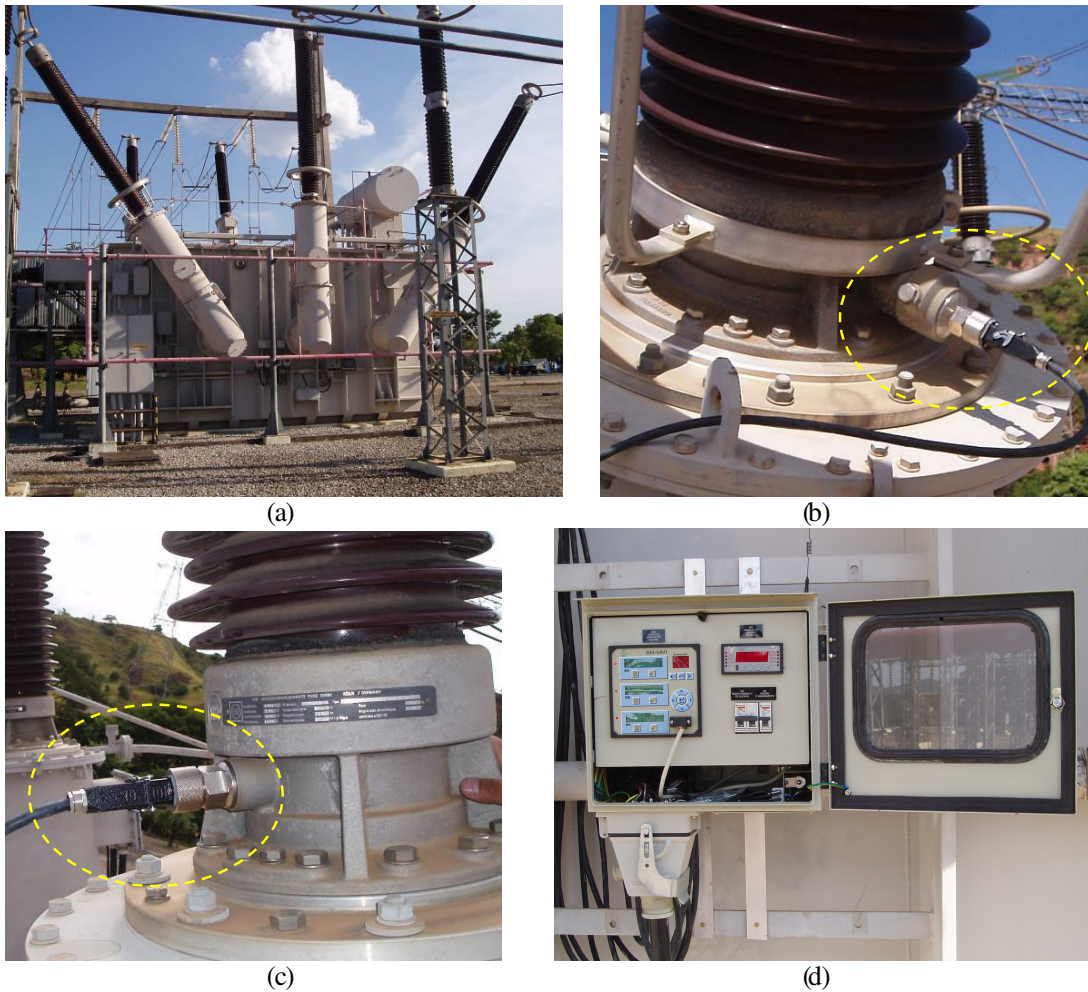


Figura 4 – Monitoração de buchas em transformador trifásico; (a) Transformador; (b) Adaptador no tap da bucha 500kV; (c) Adaptador na bucha 230kV; (d) Painel com Módulos de Medição e de Interface.

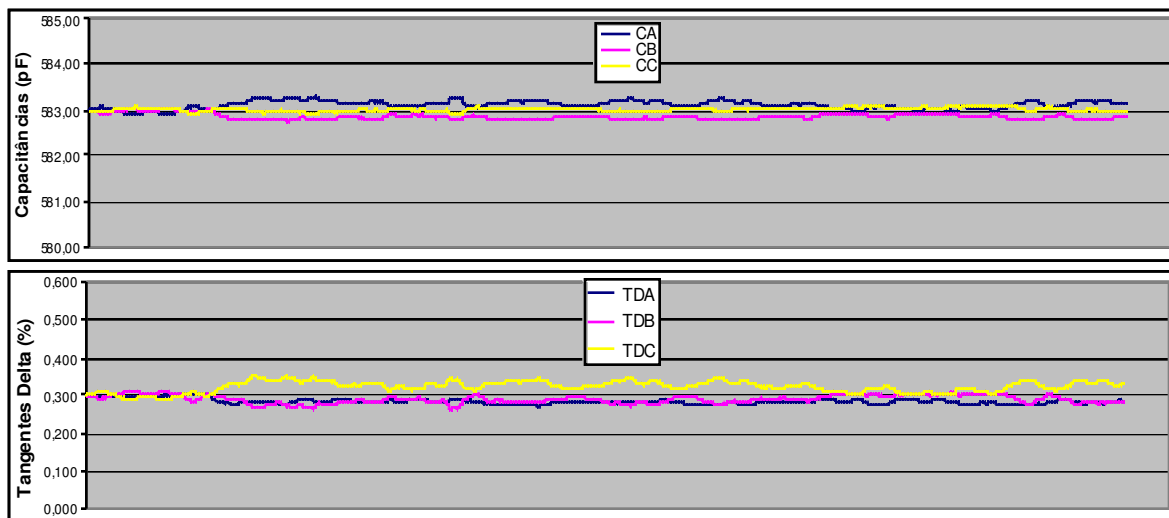


Figura 5 – Oscilações típicas nas medições de Capacitância e Tangente Delta

Esses resultados, além de mostrar que a isolação das buchas não apresentou variação no período, demonstram também a estabilidade da técnica empregada para a monitoração on-line e sua imunidade à interferência de fenômenos transitórios nas tensões do sistema de potência. Tais fenômenos podem incluir sutos de manobra, oscilações nas tensões fase-terra e desequilíbrios entre fases, como se pode observar indiretamente no gráfico da figura 6, onde são apresentadas as medições típicas das correntes de fuga nos taps das buchas para o mesmo período. Como não ocorreram variações na capacitância e na tangente delta das buchas, todas as variações observadas nessas correntes de fuga são causadas pelas oscilações normais das tensões do sistema elétrico, que no entanto não provocaram variações indevidas nas medições de capacitância e tangente delta.

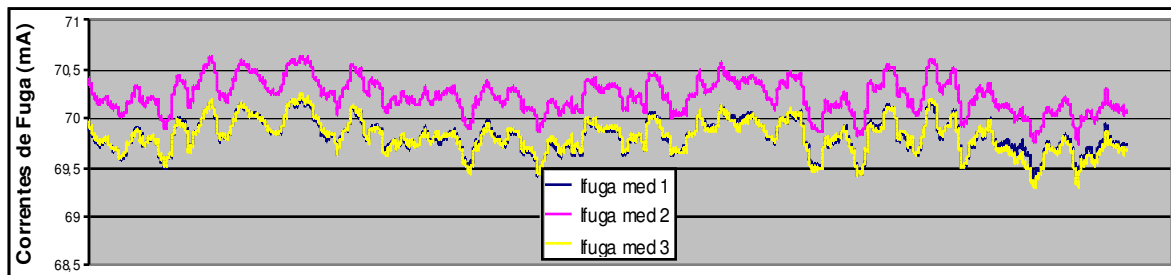


Figura 6 – Medições típicas de Correntes de Fuga

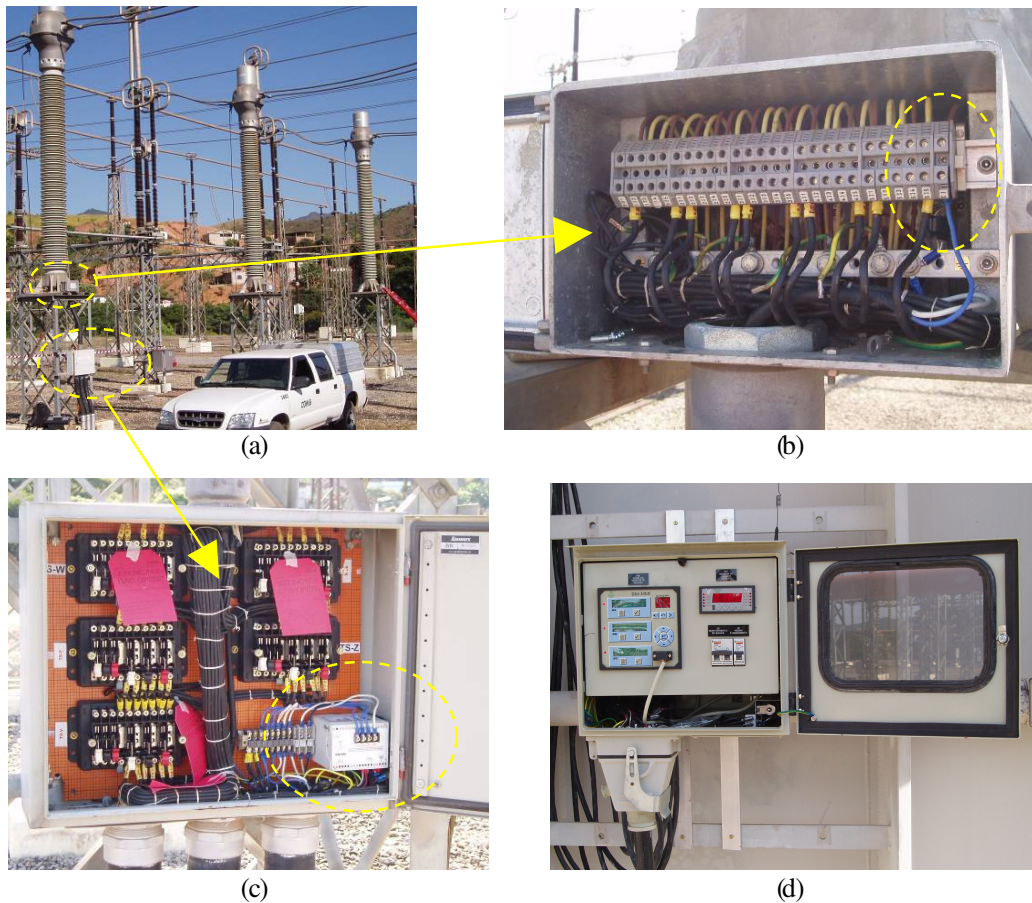


Figura 7 – Monitoração de Transformadores de Corrente; (a) TCS monofásicos 500kV; (b) Caixa secundária com aterramento da blindagem disponível; (c) Painel comum com Módulo de Medição; (d) Módulo de Interface no transformador de potência.

Posteriormente, em Fevereiro/2006, o sistema de monitoração de buchas recebeu uma expansão para monitorar a capacitância e a tangente delta de um conjunto de 3 Transformadores de Corrente monofásicos de 500kV. Isso foi possível pelo fato do aterramento da blindagem desses TCs estar disponível na caixa de ligações secundárias, como mostra a figura 7, permitindo sua conexão a um novo Módulo de Medição do sistema de monitoração de buchas. Esse Módulo de Medição foi instalado no painel comum dos TCs, efetuando a medição das correntes de fuga e de sua somatória para os três TCs, e foi interligado ao Módulo de Interface já existente no transformador de potência, que passou a monitorar a isolação (capacitância e tangente delta) tanto das buchas como dos TCs.

4. CONCLUSÃO

As buchas de alta tensão condensivas são um acessório essencial para a operação segura de diversos equipamentos de alta tensão, tais como transformadores de potência e disjuntores. Este artigo demonstrou o princípio de funcionamento que permite a monitoração on-line deste tipo de bucha, assim como a aplicação desse sistema às buchas de um transformador trifásico 500/230kV e a três transformadores de corrente monofásicos 500kV.

Através da operação desse sistema durante alguns meses puderam ser observadas sua estabilidade e imunidade a fenômenos transitórios e oscilações do sistema elétrico de potência, que não causaram variações indevidas nas medições de capacitância e tangente delta.

Durante o período sob estudo, as oscilações observadas nas medições foram menores que 0,1% para capacitância e 0,05% (em valor absoluto) para tangente delta, tomando viáveis ajustes bastante sensíveis para os alarmes de primeiro nível por elevação nessas variáveis, de forma que em caso de defeito na isolação se obteriam alertas ainda em sua fase incipiente, porém sem o risco de ocorrência de alarmes falsos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alves, Marcos, “Sistema de Monitoração On-Line de Transformadores de Potência”, Revista Eletricidade Moderna, Maio/2004.
- [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] IEEE Std C57.19.100-1995, “IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings”, Março/1995.