



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC 20
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC

INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE MANOBRAS DE BANCOS DE CAPACITORES NA FALHA DE AUTOTRANSFORMADORES EM TIJUCO PRETO

Guilherme Sarcinelli Luz *

Davi Sixel Arentz

Eberth Antonio Piantino

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

RESUMO

A ocorrência de quatro falhas de unidades monofásicas de autotransformadores na Subestação de Tijuco Preto em um período de seis meses reacendeu a suspeita de que as manobras freqüentes de bancos de capacitores no setor de 345 kV possam estar sendo responsáveis por esforços dielétricos internos resultantes de alguma interação não avaliada nos projetos destas unidades.

Uma investigação anterior já havia indicado que as tensões nos terminais destas unidades decorrentes de tais manobras apresentavam apenas componentes na freqüência de algumas centenas de Hz a alguns kHz com amplitudes muito reduzidas de cujos valores não seriam esperados problemas para o isolamento interno.

O presente artigo apresenta os resultados de uma nova investigação levada a efeito por FURNAS visando aprofundar a análise anterior e avaliar melhor a possibilidade desta interação entre os bancos de capacitores de 345 kV e as unidades de autotransformadores.

PALAVRAS-CHAVE

Autotransformador, Capacitor, Manobra, Interação.

1.0 - INTRODUÇÃO

A falha de quatro unidades monofásicas de autotransformadores de 765/345/20 kV – 500 MVA na Subestação de Tijuco Preto de FURNAS, em um período de seis meses durante o ano de 2005, determinou uma investigação detalhada por parte de FURNAS, com o objetivo de avaliar a possibilidade destas ocorrências estarem relacionadas às freqüentes manobras de cada um dos nove bancos de capacitores shunt de 200 Mvar do setor de 345 kV desta subestação. Após iniciada esta análise houve ainda uma nova ocorrência de falha em abril de 2006.

A investigação foi iniciada com a realização de medições de corrente nos terminais de alta, média e baixa tensões de algumas unidades de dois bancos de autotransformadores durante um período de cerca de duas semanas para verificar se alguma característica presente na corrente elétrica durante a operação normal do sistema poderia ser relacionada aos danos sofridos pelas unidades da transformação. Para isso foram empregados medidores de qualidade de energia elétrica para avaliar o conteúdo harmônico médio e registradores digitais de perturbação (RDP) para verificar e documentar a ocorrência de algum transitório significativo.

Em seguida procedeu-se à revisão de uma análise realizada no ano de 2000 quando da falha de duas unidades recém instaladas de autotransformadores. A análise iniciou-se com a revisão das simulações digitais dos transitórios eletromagnéticos decorrentes das manobras dos bancos de capacitores shunt realizadas na época,

(*) Rua Real Grandeza, 219 – sala 110 – Bloco E – CEP 22283-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-3605 – Fax: (+55 21) 2528-5528 – Email: guiluz@furnas.com.br

considerando, contudo, a entrada em operação de novos equipamentos nesta subestação, tais como quatro novos bancos de capacitores shunt, totalizando nove, dois novos bancos de autotransformadores (um de 765/345/20 kV – 1500 MVA e outro de 765/500/69 kV – 1650 MVA) e de três novas linhas de transmissão (uma em 765 kV, outra em 500 kV e outra em 345 kV) conectando esta subestação com o sistema em sua vizinhança. Posteriormente, procedeu-se à realização de novas medições destes transitórios utilizando equipamentos apropriados para medições de corrente e tensão para frequências mais elevadas no lado de 345 kV dos autotransformadores. Em maio de 2006 foram realizadas medições adicionais de correntes no neutro destes mesmos autotransformadores com o propósito de averiguar a existência de possíveis surtos de corrente através da malha de terra provenientes do chaveamento dos bancos de capacitores shunt.

Tomando como base as novas medições, efetuou-se outra análise digital utilizando-se uma modelagem bem mais detalhada da subestação. O objetivo desta análise foi identificar a existência de alguma componente não identificada nas simulações utilizando a modelagem anterior e que, combinada com alguma possível ressonância interna nos bancos de autotransformadores, pudesse ter um efeito estressante cumulativo em algum ponto dos enrolamentos dos autotransformadores.

Este artigo apresenta os resultados das medições, das simulações digitais, bem como das análises levadas a efeito de modo a avaliar as solicitações sobre os autotransformadores de Tijuco Preto na configuração atual das manobras dos bancos de capacitores shunt no setor de 345 kV desta subestação.

2.0 - MEDIÇÕES JUNTO AOS AUTOTRANSFORMADORES

A primeira etapa de medições, mais imediata pela facilidade de execução, foi realizada na sala de painéis aonde chegam informações de corrente para os relés de proteção e instrumentos de medição. Para isso, foram utilizados dois tipos de instrumentos, a saber, dois medidores de qualidade de energia (TOPAS 1000) e um registrador digital de perturbações (RP IV). A segunda etapa foi desenvolvida com o apoio do Laboratório de Medições de FURNAS em dois outros períodos: uma em que a equipe viabilizou medições de corrente e tensão em um ponto mais próximo dos TC durante as manobras dos bancos de capacitores, visando a identificação de frequências até 10 kHz e outra onde foram feitas medições de correntes no neutro dos transformadores com a possibilidade de identificação de transitórios em uma faixa bem mais alta de frequências (cerca de 1 MHz).

2.1 Medições de Qualidade de Energia

Estas medições visaram identificar a existência de algum conteúdo harmônico relevante nas correntes que atravessam os transformadores. A Figura 1 apresenta um dos resultados medidos durante os dez dias de observação: a Distorção Harmônica Total nos terminais de 765 kV e 345 kV. Não foi observado qualquer comportamento anormal no perfil de harmônicos existente nas correntes, tendo-se constatado, inclusive, que estas se encontravam com níveis reduzidos de distorção. O conteúdo harmônico presente na tensão também mostrou-se reduzido e inferior aos limites estabelecidos nos Procedimentos de Rede do ONS.

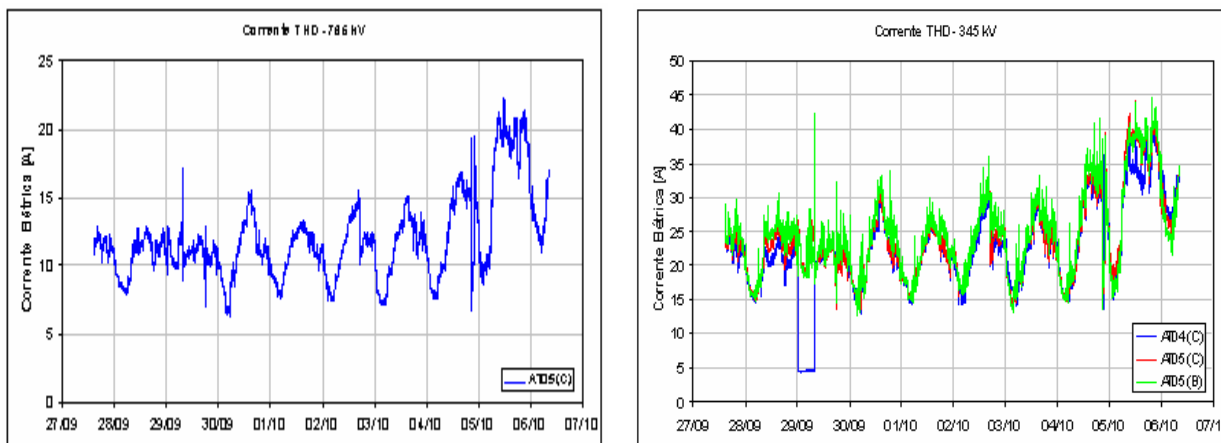


FIGURA 1 – DHT das correntes nos terminais de 765 kV e 345 kV, respectivamente

2.2 Medições com o Registrador Digital de Perturbação (RDP)

No RDP foram registradas as correntes nos terminais dos autotransformadores, em regime transitório, em janelas com duração de 0,4 segundos e em intervalos fixos de 1 hora, bem como programados disparos de registros por variação de corrente. Estas medições permitiram a visualização de frequências até 1000 Hz. O RDP não disparou em nenhuma situação de manobra dos bancos, indicando que os transitórios produzidos por estas manobras não apresentam componentes significativas dentro do espectro de frequência observável por este instrumento e as medições obtidas através dos disparos forçados não apresentaram qualquer transitório significativo.

2.3 Medições com os equipamentos do Laboratório Móvel de FURNAS

Estas medições visaram identificar os transitórios de tensão e corrente nos terminais dos autotransformadores e, posteriormente em seus neutros, durante as manobras de chaveamento dos bancos de capacitores. Tais

manobras, a princípio, não são vistas como causa de solicitações excessivas aos bancos de autotransformadores, a menos que haja alguma ressonância interna próxima às frequências geradas por estes transitórios. Como o modelo dos transformadores empregado nas simulações não permite a representação destas possíveis ressonâncias, as medições das correntes nos enrolamentos de 345 kV poderiam apontar indícios de algum efeito indesejável.

Os transitórios de corrente obtidos através destas medições apresentaram apenas componentes de baixa frequência (abaixo de 1 kHz) com amplitudes reduzidas e bem amortecidas. As tensões medidas chegaram a apresentar algum conteúdo da ordem de alguns kHz, porém com amplitudes muito reduzidas. As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados de uma das medições.

Os transitórios de corrente observados nas medições no neutro de 2 bancos de autotransformadores (Figura 4) também apresentaram componentes de baixa frequência (cerca de 450 Hz) e amplitudes reduzidas e bem amortecidas (os valores de pico das correntes são: +176 A e -299 A para um dos bancos e +175 A e -278 A para o outro).

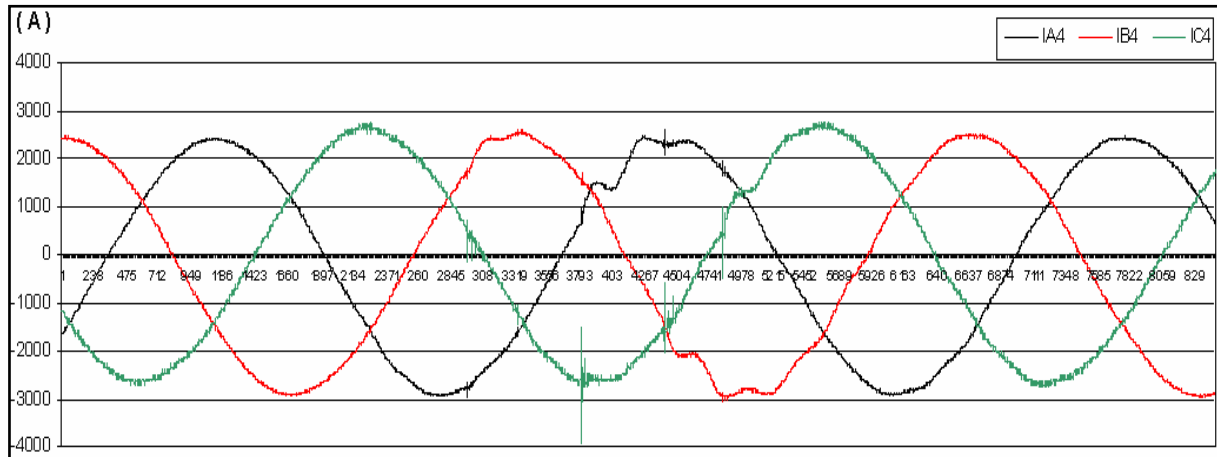


FIGURA 2 – Correntes nos terminais de 345 kV medidas durante a manobra de um banco de capacitor

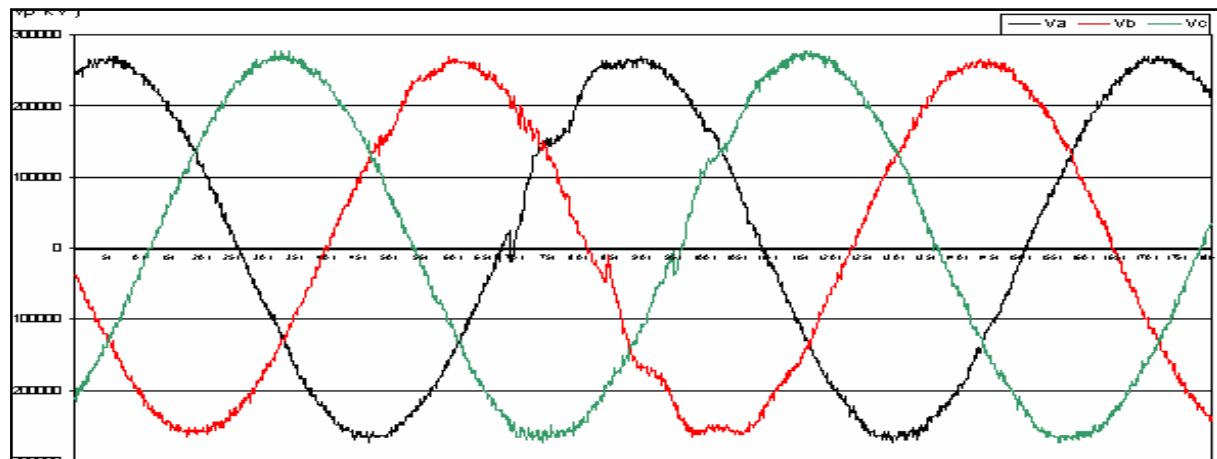


FIGURA 3 – Tensões nos terminais de 345 kV medidas durante a manobra de um banco de capacitor

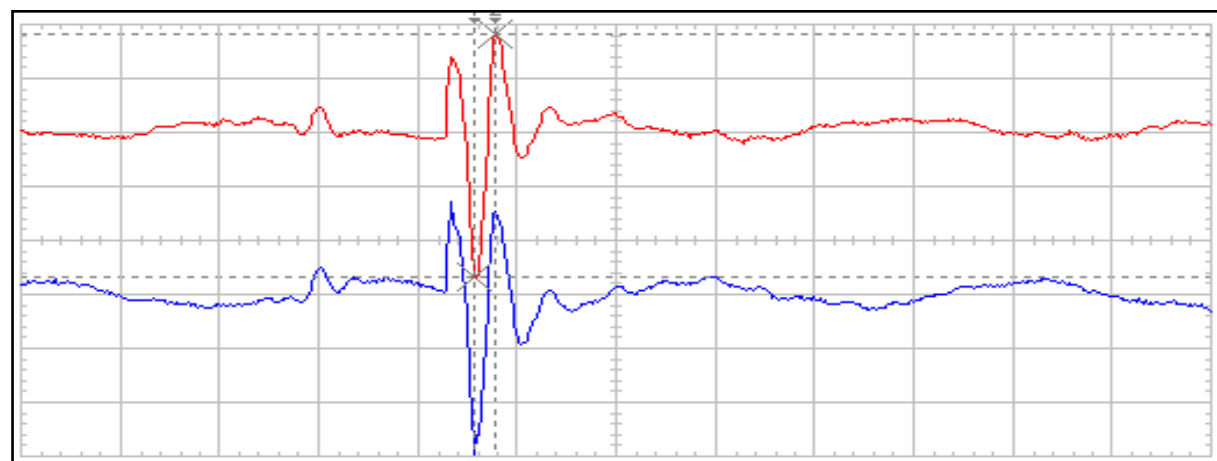


FIGURA 4 – Correntes de neutro em 2 bancos de transformadores durante a manobra de um banco de capacitor

3.0 - SIMULAÇÕES DE MANOBRAS DE BANCOS DE CAPACITORES

Diversas simulações foram realizadas visando identificar através de cálculos digitais as características das componentes transitórias nos terminais dos autotransformadores diante das manobras de bancos de capacitores da subestação de Tijuco Preto. Inicialmente procedeu-se uma revisão atualizada das simulações realizadas em 2000 considerando a atual configuração da subestação. Em seguida avaliou-se a influência do modelo utilizado para a representação dos autotransformadores. E, finalmente, procedeu-se uma representação bastante detalhada da subestação de modo a considerar um espectro de frequência mais alto no cálculo destes transitórios.

3.1 Simulações atualizadas dos casos processados em 2000

No ano de 2000 houve a queima de duas unidades recém adquiridas de autotransformadores ainda no período de garantia. Naquela época foram realizadas algumas medições de tensão no barramento de 345 kV durante manobras de energização de bancos de capacitores na referida subestação, uma vez que tais manobras foram apontadas pelo fabricante como causa provável de solicitações excessivas ao isolamento dos autotransformadores. Concomitantemente, foram realizadas simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando o programa ATP [1], nas quais as medições e seus efeitos foram reproduzidos de forma satisfatória. As sobretensões identificadas naquela época indicaram que estas manobras não poderiam ser uma causa provável e o fabricante concluiu por reparar os danos em ambos os autotransformadores falhados.

Assim, a partir dos mesmos arquivos de ATP utilizados em 2000 e atualizando-se tanto a topologia da subestação de Tijuco Preto como do sistema a ela conectado, foram realizadas novas simulações dos mesmos casos de manobra de energização, bem como dos novos bancos. Com o objetivo de maximizar os transitórios e manter a referência dos casos originais, foram considerados para o disjuntor os mesmos tempos de fechamento da câmara auxiliar das medições realizadas em 2000, porém para a câmara principal foram considerados os instantes de cada fase em que a diferença de tensão entre os pólos do disjuntor fosse máxima.

A Tabela 1 apresenta, para os dois casos mais relevantes, a decomposição em série de Fourier da tensão no terminal de 345 kV dos autotransformadores, utilizando-se o intervalo do primeiro ciclo após a energização do banco de capacitor. Como pode ser visto, as amplitudes de tensão nas frequências em torno de 500 Hz correspondem a valores abaixo de 5% enquanto que para as frequências de 3 kHz ou 5,6 kHz as amplitudes são inferiores a 1,5%.

Tabela 1 – Valores máximos de distorção harmônica obtidos nas simulações

Simulação	Fase A		Fase B		Fase C	
	Ordem harmônica	Valor [% H. Fund.]	Ordem harmônica	Valor [% H. Fund.]	Ordem harmônica	Valor [% H. Fund.]
1	9	4,467	11	2,639	9	3,461
	51	1,029	51	0,336	51	1,115
	THD	8,669	THD	2,371	THD	8,779
2	8	3,982	8	3,810	8	4,051
	94	1,041	94	0,978	94	0,994
	THD	6,141	THD	4,906	THD	6,324

A Figura 5 apresenta a simulação da tensão no barramento de 345 kV durante o chaveamento de um dos bancos de capacitores, tendo outro banco já energizado, considerando-se os mesmos tempos de operação dos disjuntores da medição realizada em novembro de 2005, mostrada na Figura 3.

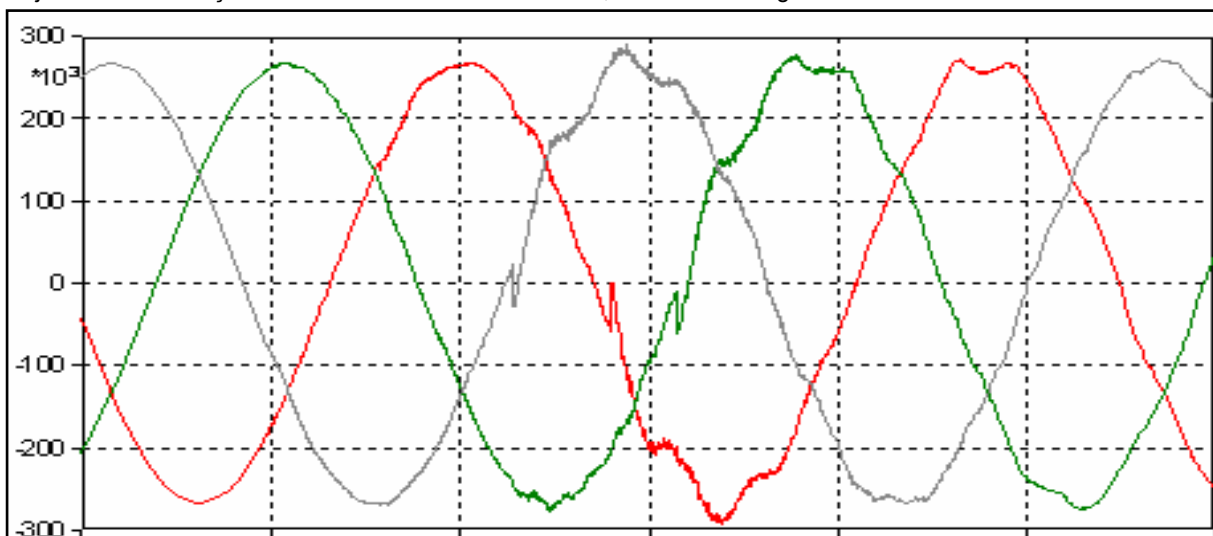


FIGURA 5 – Tensões nos terminais de 345 kV calculadas para uma manobra de banco de capacitor

A Figura 6 apresenta a comparação de uma das fases das tensões mostradas nas Figuras 3 e 5, considerando apenas as componentes transitórias, ou seja, tendo sido eliminada a componente fundamental de ambas as tensões medida e calculada. Como pode ser observado, embora existam algumas pequenas diferenças, as respostas são qualitativamente muito próximas. A componente de mais alta frequência identificada na medição está presente desde antes da manobra, indicando não ter origem nesta operação, sendo, possivelmente, proveniente da própria medição.

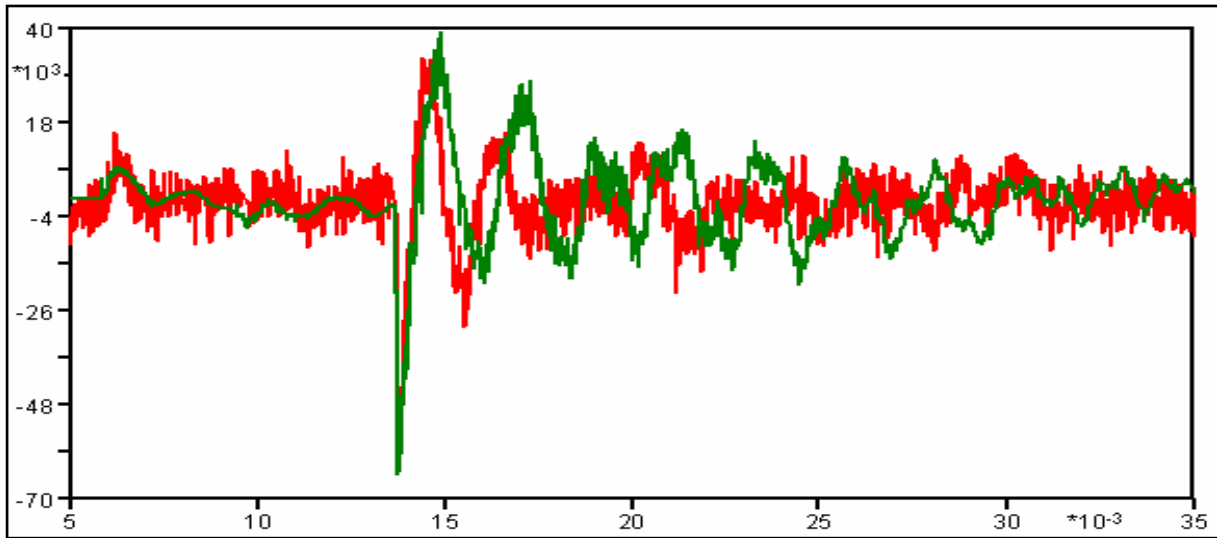


FIGURA 6 – Tensão medida e calculada nos terminais de 345 kV sem a componente fundamental

3.2 Análise da influência do modelo dos transformadores

Em seguida procedeu-se a uma análise da influência do modelo utilizado para a representação dos autotransformadores de modo a considerar a variação de seus parâmetros com a frequência. Como as simulações apresentadas consideraram um modelo para os autotransformadores adequado apenas a baixas frequências, buscou-se uma representação mais próxima da realidade, tomando-se como base o levantamento de resposta em frequência realizado em 2000 em duas unidades de fabricantes distintos (ZTR e BBC), conforme a Figura 7. Para isso foram adicionadas ao modelo tradicional algumas capacitâncias parasitas entre as buchas de alta e baixa tensão e a terra e também entre as próprias buchas. A Figura 8 apresenta a comparação da resposta em frequência entre os modelos tradicional e o que considera capacitâncias parasitas. Como pode ser visto comparando-se as Figuras 7 e 8, o modelo modificado apresenta valores de impedância na faixa de frequência de interesse (entre 1 e 10 kHz – na qual os transitórios são maiores) muito mais próximos do que o modelo tradicional.

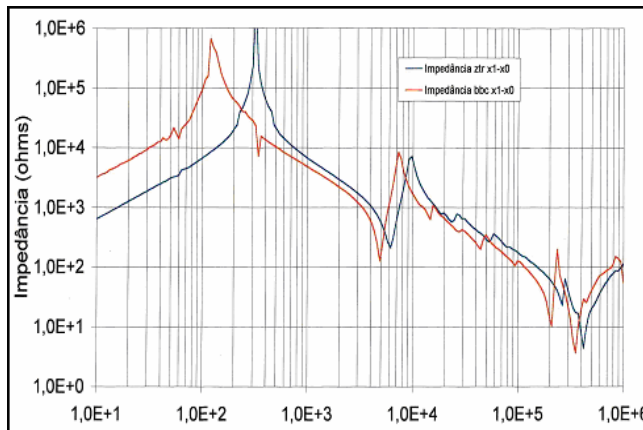


FIGURA 7 – Resposta em frequência medida para duas unidades de autotransformadores

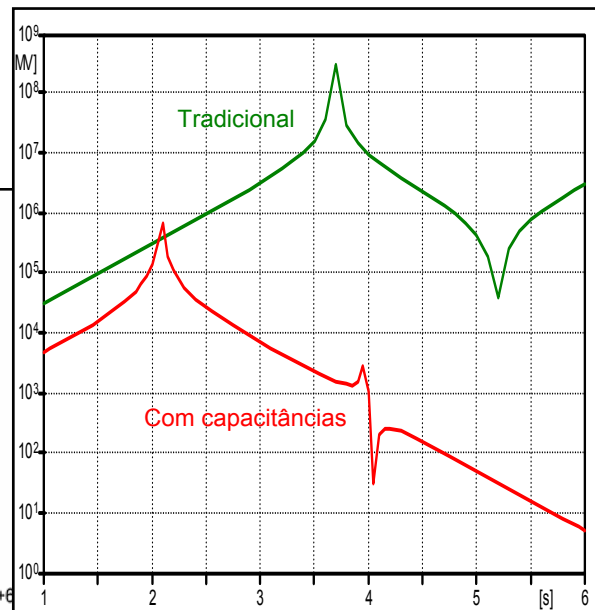


FIGURA 8 – Resposta em frequência calculada para os dois modelos de autotransformadores

As Figuras 9 e 10 apresentam, respectivamente, os resultados comparativos de uma das fases da tensão e da corrente utilizando-se os dois modelos para a simulação do caso 2 da Tabela 1. Como pode ser observado, a alteração para um modelo que representa o autotransformador mais adequadamente não influenciou nos transitórios decorrentes das manobras de energização de bancos de capacitores.

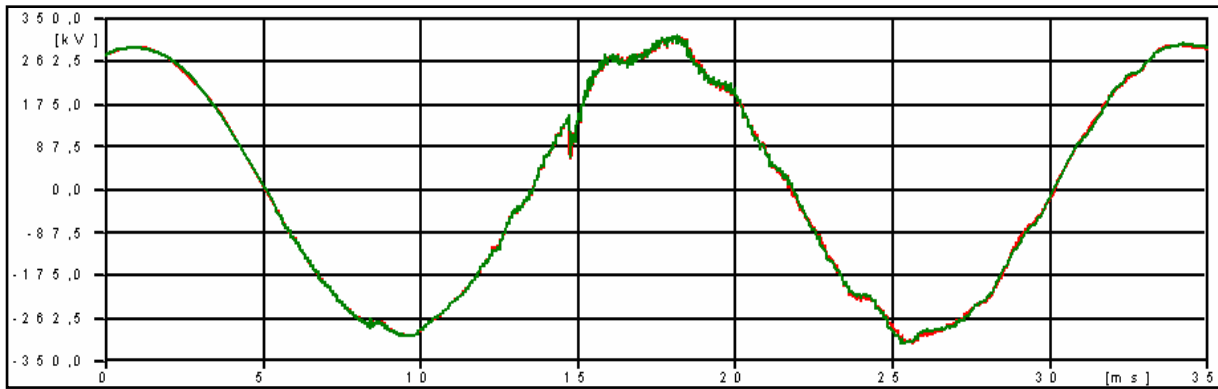


FIGURA 9 – Tensão no terminal da fase A calculada para dois modelos de autotransformadores

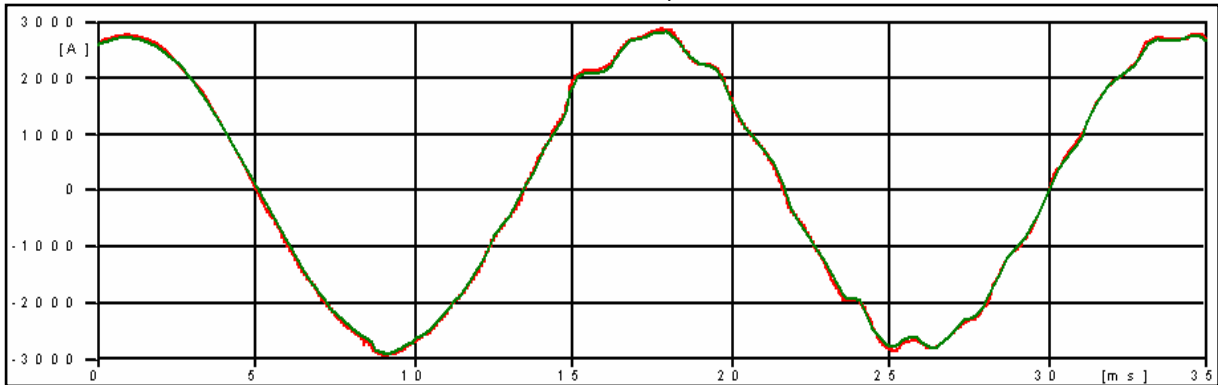


FIGURA 10 – Corrente no terminal da fase A calculada para os dois modelos de autotransformadores

3.3 Representação mais detalhada da Subestação

Os arquivos de ATP das simulações apresentadas nos itens 3.1 e 3.2, que partiram dos arquivos utilizados nas simulações de 2000, consideraram a subestação de Tijuco Preto representada da seguinte forma: todo o pátio dos bancos de capacitores foi modelado em detalhe por circuitos equivalentes RLC independentes para cada fase; os dois circuitos de 310 m que interligam este pátio com os dois barramentos de 345 kV por parâmetros distribuídos e o pátio destes dois barramentos, onde são conectadas as linhas e autotransformadores foram representados de maneira simplificada como um único nó.

A fim de avaliar se esta simplificação poderia estar ocultando alguma frequência relevante que as medições e as simulações anteriores não indicaram, decidiu-se fazer uma representação completa de todo o pátio de 345 kV, tanto dos barramentos como dos bancos de capacitores, modelando-o por parâmetros distribuídos (Bergeron a frequência de 10 kHz) com o acoplamento das fases em todos os seus trechos. A Figura 11 apresenta a representação geral do pátio de 345 kV conforme foi modelado e o detalhe indicado é apresentado na Figura 12 como ilustração.

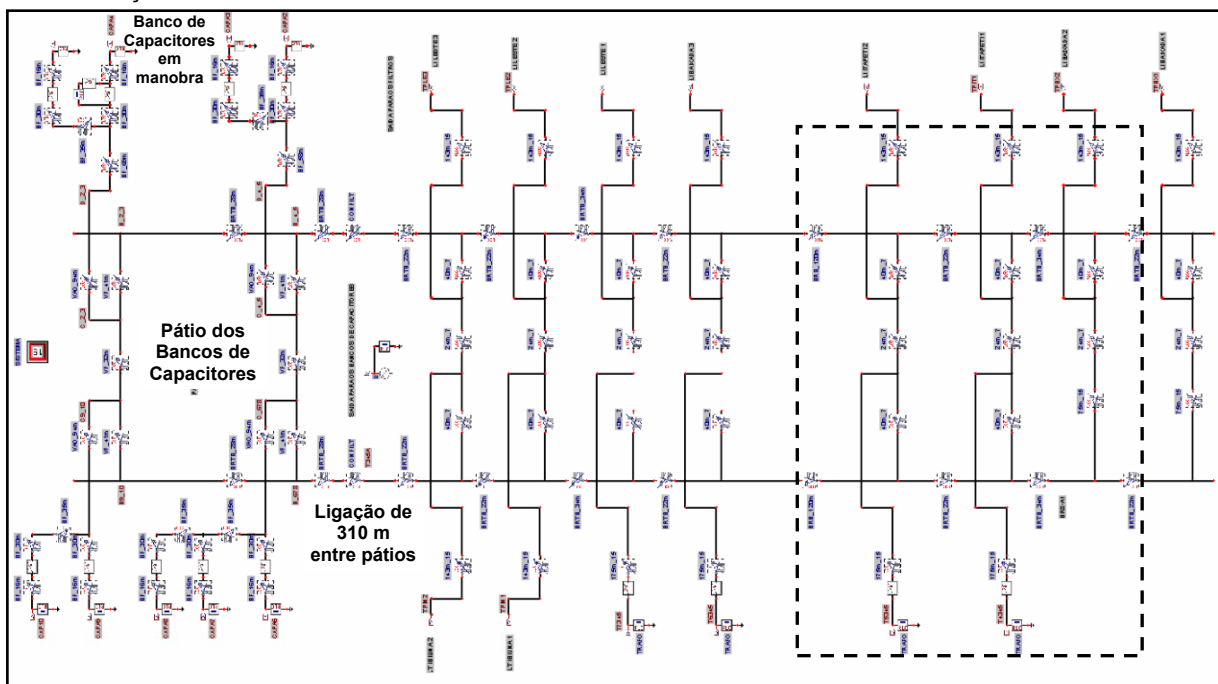


FIGURA 11 – Representação detalhada do pátio de 345 kV da SE Tijuco Preto no ATPDraw

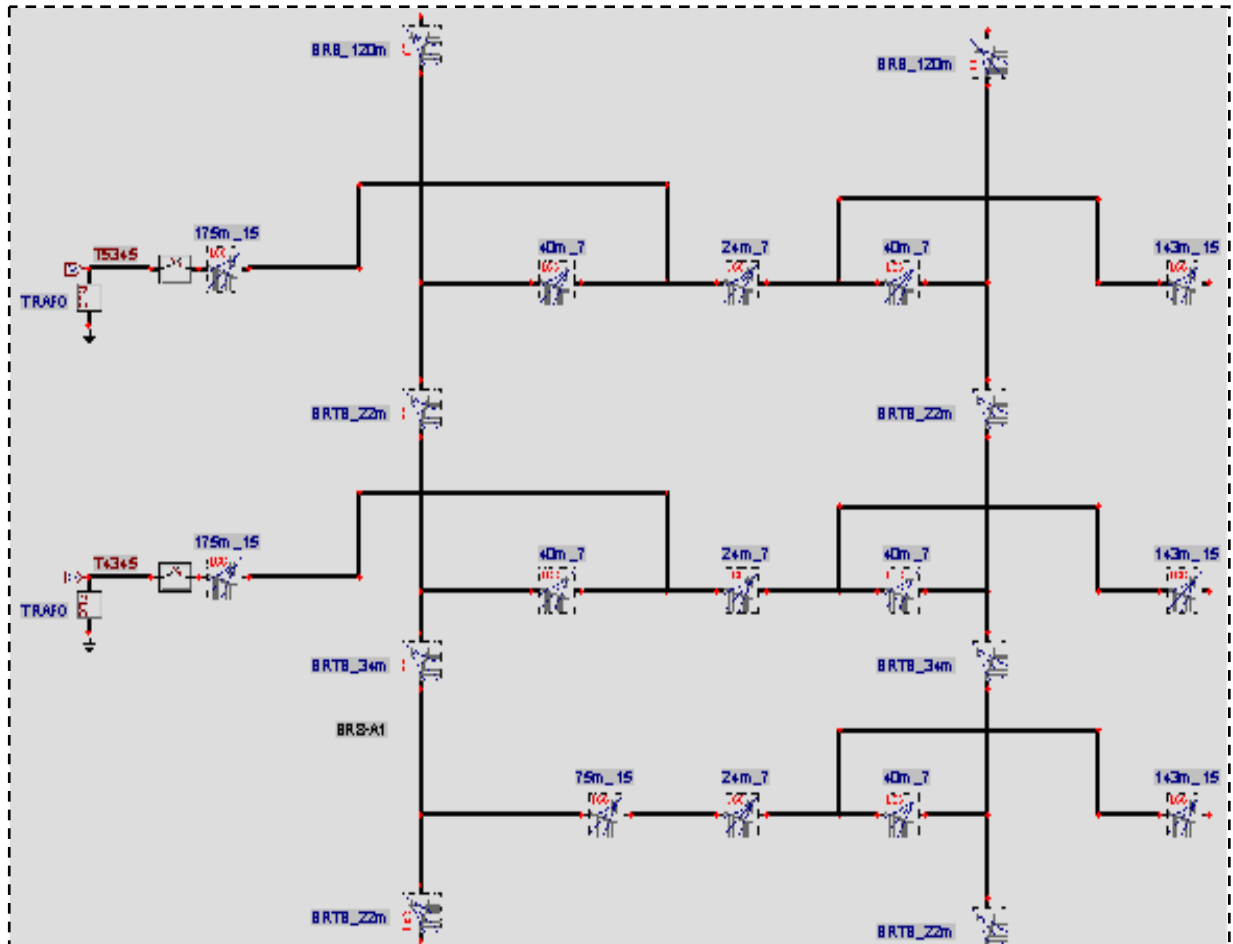


FIGURA 12 – Detalhe da Figura 11 correspondente às saídas de linha e transformadores

A Figura 13 mostra o resultado das tensões transitórias (eliminada a componente fundamental) de uma das fases no terminal de um dos autotransformadores, considerando-se ambas as modelagens da subestação, para o mesmo caso apresentado na Figura 6 do item 3.1, que tomou como base a medição de novembro de 2005.

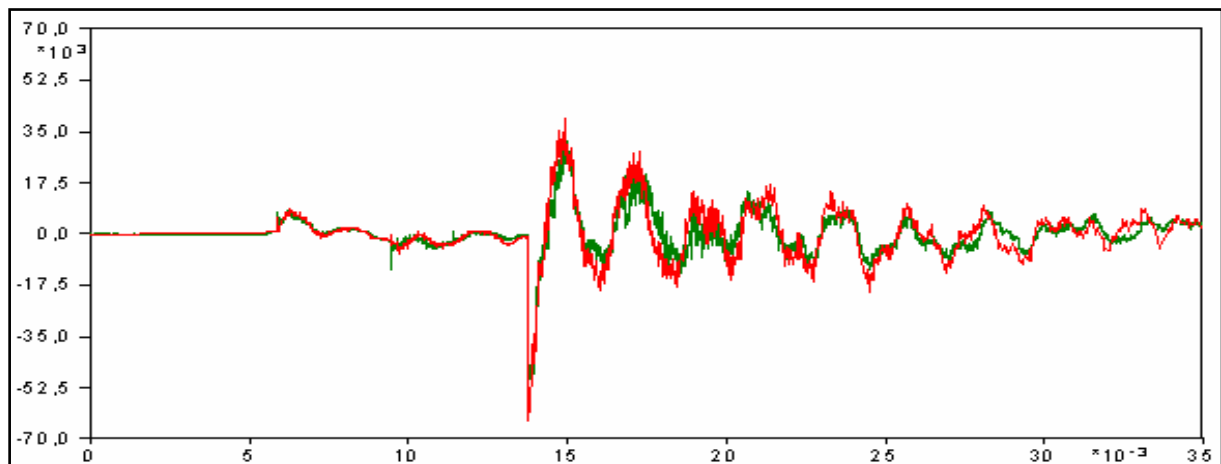


FIGURA 13 – Tensão calculada nos terminais de 345 kV sem a componente fundamental para as duas modelagens da subestação

A seguir são mostradas, para comparação, as componentes transitórias (eliminada a componente fundamental) das correntes que circulam nos enrolamentos de 345 kV de cada um dos autotransformadores de 765/345/20 kV. A Figura 14 apresenta a corrente da fase A, considerando-se a modelagem mais simplificada tanto da subestação como do autotransformador, comparada com a modelagem mais detalhada de ambos, na qual é possível observar que a diferença de modelagem não implicou em alteração significativa. A Figura 15 apresenta a componente transitória da fase A da corrente medida, onde é possível observar que as componentes são qualitativamente muito próximas, não indicando a presença de nenhuma componente relevante além daquela em torno de 500 Hz já observada na tensão mencionada no item 5.1.

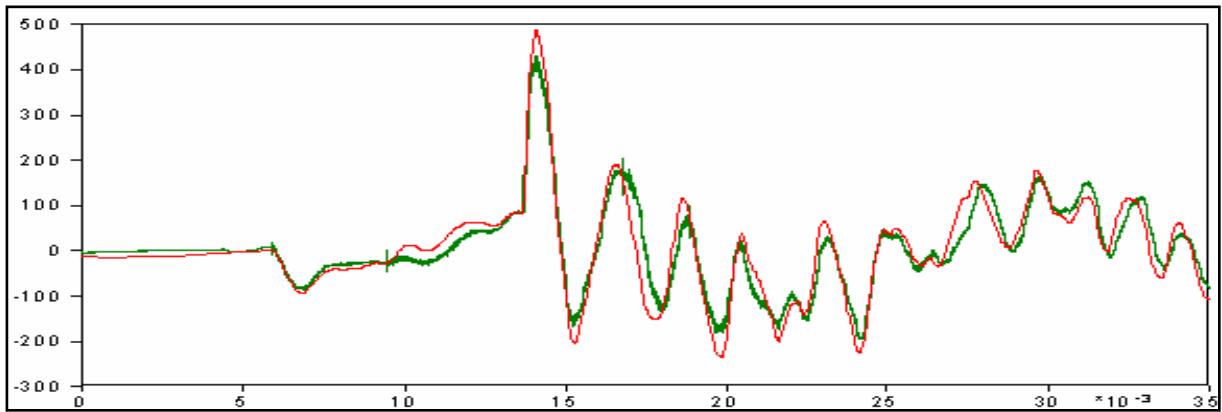


FIGURA 14 – Componente transitória da corrente calculada no terminal de 345 kV do transformador para as duas modelagens da subestação

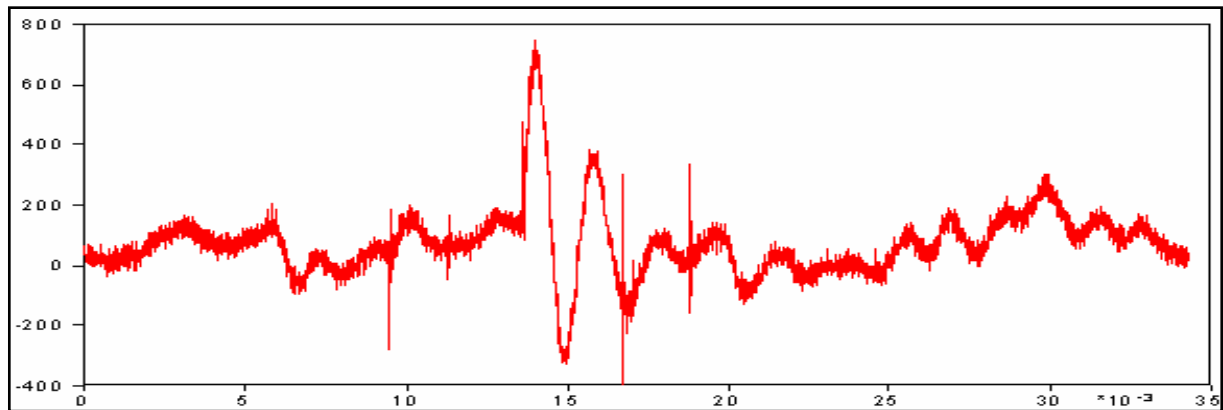


FIGURA 15 – Componente transitória da corrente medida no terminal de 345 kV do transformador

4.0 - CONCLUSÃO

As medições de harmônicos não indicaram nenhum valor acima do nível esperado e permitido, nem nenhum comportamento que merecesse maior atenção.

Não ficou evidenciado que as manobras de bancos de capacitores possam estar afetando a integridade dos bancos de autotransformadores nesta subestação. As amplitudes de tensão nas frequências acima da fundamental são principalmente da ordem de algumas centenas de Hertz e, num projeto típico de transformador, não se espera a ocorrência de ressonâncias internas nesta faixa de frequências. As amplitudes de alguns kHz apresentam-se, a princípio, extremamente baixas para se poder inferir algum impacto sobre o isolamento interno das bobinas dos autotransformadores.

As medições de corrente no neutro dos autotransformadores indicaram que não existem surtos de alta frequência ou amplitude circulando na malha de terra que penetrem nos transformadores durante a manobra de bancos de capacitores na subestação.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) ATP – Alternative Transients Program – RULE BOOK, 1987

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Guilherme Sarcinelli Luz - Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 12 de novembro de 1957; Graduação (1981) em Engenharia Elétrica: UFRJ – Rio de Janeiro; Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1993; Engenheiro do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação

Davi Sixel Arentz - Nascido em Petrópolis, RJ em 21 de maio de 1973; Graduação (1997) em Engenharia Elétrica: UFF – Rio de Janeiro; Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 2001; Engenheiro do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação

Eberth Antonio Piantino - Nascido em Passos, MG em 31 de janeiro de 1953; Graduação (1980) em Engenharia Elétrica: PUC – Minas Gerais; Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1980; Engenheiro do Centro Técnico de Ensaios e Medições