



**XXII SNPTEE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GDS/07
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES DE MANOBRAS DE CHAVES SECCIONADORAS
NO SETOR DE 345 KV DA SUBESTAÇÃO DE TIJUCO PRETO**

**Guilherme Sarcinelli Luz (*) Davi Sixel Arentz Eberth Antonio Piantino
João Bosco Dias Volnei Wladimir Braz
FURNAS Centrais Elétricas S.A.**

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados das medições de tensões nos terminais dos transformadores de 765/345/20 kV da SE Tijuco Preto decorrentes de manobras de chaves seccionadoras e das simulações digitais no programa ATP visando reproduzi-las. As medições foram realizadas com o objetivo de prover subsídios para a investigação da possibilidade de causa sistêmica para as diversas falhas ocorridas com estas unidades e serviram de base para validação das simulações realizadas com o mesmo fim.

PALAVRAS-CHAVE

AUTOTRANSFORMADOR, RESSONANCIA INTERNA, MANOBRAS DE CHAVE E DISJUNTORES

1.0 - INTRODUÇÃO

A falha de seis unidades monofásicas de autotransformadores de 765/345/20 kV de 500 MVA de fabricantes diferentes na subestação de Tijuco Preto de FURNAS durante os anos de 2005 e 2008, determinou uma investigação detalhada de suas causas por parte de FURNAS [1]. Em continuidade a estas investigações foram realizadas algumas manobras de chaves seccionadoras e disjuntores com o objetivo de testar a instalação de um monitoramento contínuo de tensão desenvolvido pelo CEPEL utilizando os BPD's (Bushing Potencial Device) das três unidades de um dos bancos de transformadores (AT07), bem como registrar a tensão transitória decorrente destas manobras visando identificar suas componentes principais.

Com o objetivo de garantir a obtenção dos registros e dispor de um meio de avaliar a qualidade do novo sistema de medição, o laboratório móvel de FURNAS (CTE.O) também conectou o seu sistema de medição através de DCP. Este artigo apresenta os resultados das medições feitas pelo CTE.O e de simulações no programa ATP realizadas com o propósito de reproduzir digitalmente os transitórios decorrentes destas manobras.

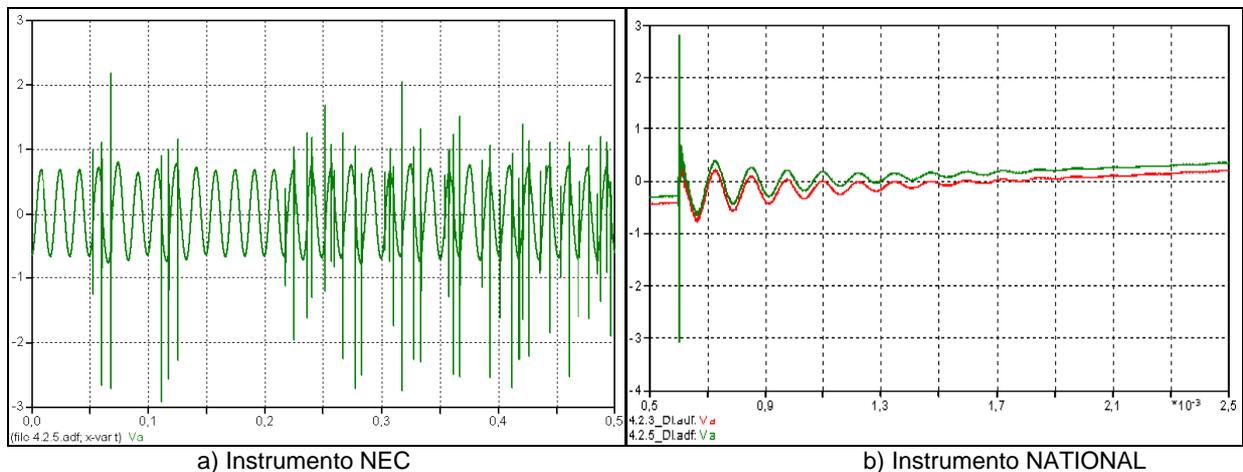
As manobras realizadas envolveram as chaves seccionadoras e os disjuntores associados à energização do banco de transformador AT07. Este artigo apresenta as análises associadas às manobras de chaves seccionadoras e a identificação das componentes principais destes transitórios de tensão visando obter informações para avaliar a ação destas manobras na suportabilidade dielétrica das unidades de transformadores, pois, embora suas amplitudes máximas estejam abaixo do nível de proteção, seus valores de frequência e taxa amortecimento poderiam resultar em amplificações internas nestas unidades [2].

2.0 - SISTEMA DE MEDIÇÃO

A Figura 1 mostra as fotos dos DCP's e do Laboratório Móvel onde o sistema de aquisição foi instalado. A capacitância total introduzida em cada fase, de modo a reduzir a tensão no terminal do transformador para a aquisição da medição, foi calculada em 0.3 nF. As medições realizadas pelo CTE.O foram aquisitadas por dois instrumentos: NEC, utilizando uma amostragem menor (1 μ s) e NATIONAL com uma amostragem maior (0.1 μ s). As medições aquisitadas pelo instrumento NEC puderam registrar diversas reinições do arco, porém não o evento completo. Com o instrumento NATIONAL, a aquisição foi de apenas um dos primeiros impulsos associados a estas reinições visando definir melhor o espectro de frequências. A Figura 2a apresenta o registro de uma das medições (4.2.5) na manobra de fechamento da seccionadora 8473 com o banco AT07 desenergizado. Este registro apresenta um intervalo de 0.5 s de um evento que pode durar alguns segundos e corresponde ao início de uma sucessão de impulsos que tendem a aumentar o número de ocorrências por ciclo e diminuir de intensidade com a aproximação dos contatos. Vale ressaltar que a velocidade de aproximação dos contatos não é exatamente constante tornando mais difícil a reprodução exata desta manobra. A Figura 2b apresenta a primeira reinição de duas manobras (4.2.3 e 4.2.5) obtidas pelo instrumento NATIONAL indicando que o evento se repete. É possível, também, observar a semelhança dos resultados entre ambos os instrumentos.



Figura 1 – Sistema de medição do CTE.O – DCP's e Laboratório Móvel para a aquisição das medições



a) Instrumento NEC

b) Instrumento NATIONAL

Figura 2 – Medições de manobra de chave seccionadora

3.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

3.1 Identificação das componentes principais e dos elementos mais relevantes

Uma análise do transitório das medições de tensão apresentadas nas Figuras 2a e 2b permite identificar a presença de quatro componentes principais que foram denominadas da seguinte forma:

- **FRONTAL**: presente no início do transitório, de maior amplitude e mais alta frequência, sua definição torna-se imprecisa tanto pelas limitações do sistema de medição como dos modelos de simulação;
- **OSCILATÓRIA**: com amplitude e frequência bem identificadas, seu valor está entre 6 e 8 kHz dependendo da resposta em frequência da impedância da unidade do transformador conectada à fase.

- **AMORTECIDA:** com frequência da ordem de 250 kHz, não apresenta maior relevância no transitório da medição pela baixa amplitude e curta duração.
- **FUNDAMENTAL:** de frequência fundamental, como o nome diz, está presente antes do transitório e, certamente, é causada por indução dos circuitos da subestação (SE).

Para obter uma reprodução mais próxima possível destas medições, além da modelagem detalhada da subestação e linhas conectadas, foi necessário buscar uma modelagem da chave seccionadora que incluisse a modelagem do arco [3] e reproduzisse as diversas reignições [4], apresentadas na Figura 2a, formadas durante o seu movimento de fechamento. Comparando algumas simulações entre si, utilizando circuitos mais e menos completos, foi possível identificar os elementos mais relevantes na formação destes transitórios, bem como estabelecer que:

- A representação do sistema externo a subestação não tem influência relevante nas componentes principais desta manobra.
- A eliminação sucessiva das ilhas de bancos de capacitores, linhas, transformadores e conexões da SE aumenta progressivamente o amortecimento da componente AMORTECIDA.
- A componente FRONTAL é identificada na simulação por uma frequência acima de 1 MHz e se manteve constante e bem amortecida ao longo das alterações no circuito utilizado.
- A componente OSCILATÓRIA é função do modelo de transformador conectado e a frequência coincide com a 2ª ressonância paralela do modelo correspondente, como será visto adiante.
- Ficou confirmado que a componente FUNDAMENTAL é induzida pelos circuitos próximos ao transformador; pois não aparece nas simulações. Contudo, é uma componente bastante conhecida em medições nas subestações em geral.

A Figura 3 apresenta os elementos mais relevantes na simulação do fenômeno em análise, quais sejam: o modelo do transformador, da chave seccionadora, do disjuntor e dos trechos que conectam o transformador ao barramento principal. O disjuntor, na condição aberto, foi modelado pela sua capacitância de equalização. A Figura 4 apresenta um trecho de 300 ms de simulação, visando reproduzir a medição da manobra 4.2.5 apresentada na Figura 2a. A velocidade de fechamento da chave, responsável pela variação do dielétrico, em que o arco se produz com valores cada vez menores de tensão entre os seus terminais, foi considerada constante na simulação. A componente de frequência fundamental da Figura 4 foi induzida através de um circuito paralelo adicional a um dos trechos. A Figura 5 apresenta 400 μ s da medição comparada com a simulação no programa ATP, onde as três componentes (FRONTAL, AMORTECIDA e OSCILATÓRIA) podem ser identificadas. A Figura 6 apresenta o mesmo para os 10 μ s iniciais, onde a componente FRONTAL é melhor definida tanto para a medição como para a simulação.

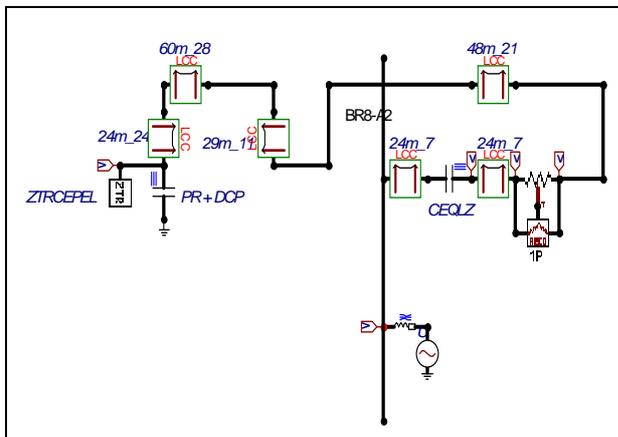


Figura 3 – Circuito básico para a simulação

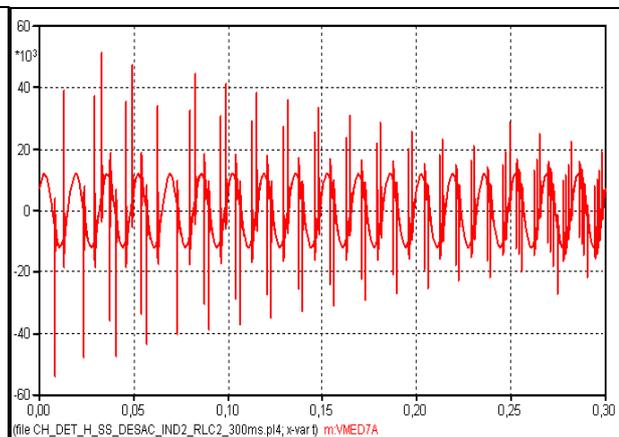


Figura 4 – Simulação no ATP da manobra de chave

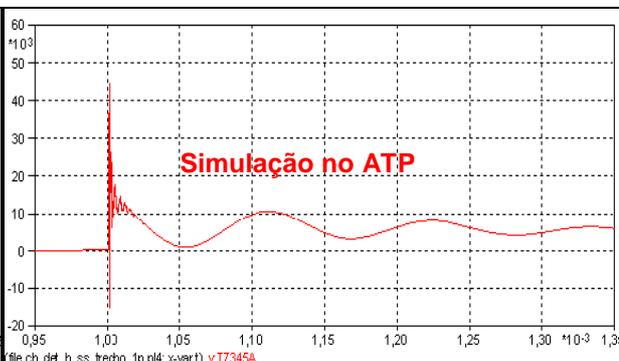
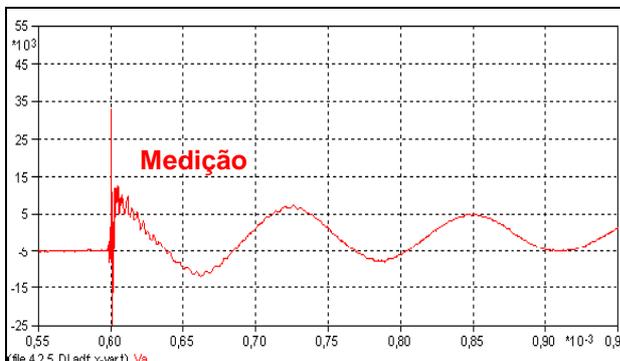


Figura 5 – Medição (a) e simulação (b) da manobra de chave seccionadora (400 μ s)

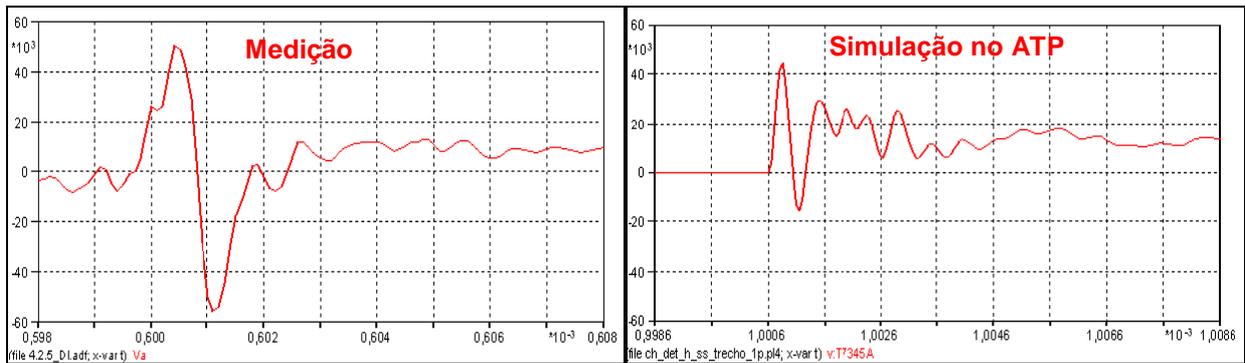


Figura 6 – Medição (a) e simulação (b) da manobra de chave seccionadora (10 μ s)

A Figura 7 mostra, para as duas faixas de tempo (400 μ s e 10 μ s), o gráfico da tensão no terminal da fase A do transformador, obtida utilizando o circuito da Figura 3, comparada com a tensão obtida utilizando-se uma representação onde, tanto a subestação como o sistema, foram representados de forma bem mais detalhada. Ambas as modelagens apresentaram as componentes FRONTAL e OSCILATÓRIA exatamente iguais. A representação mais detalhada apresentou um amortecimento menor para a componente AMORTECIDA, indicada nesta Figura.

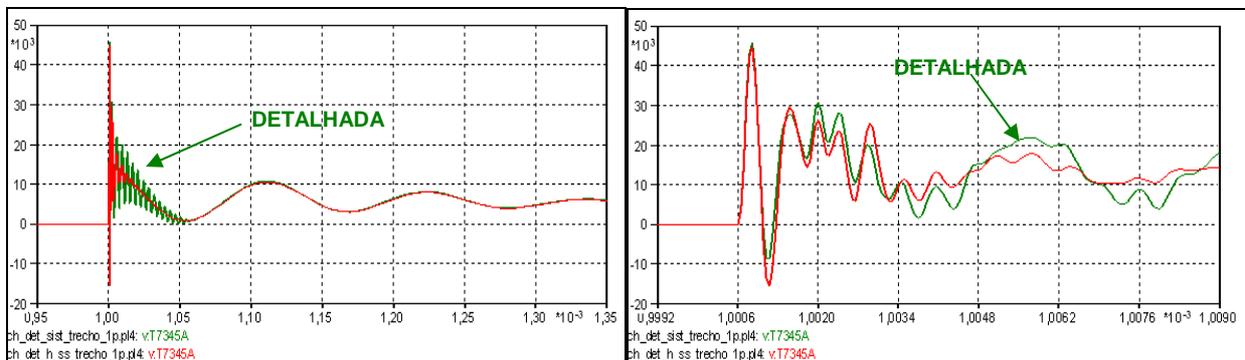


Figura 7 – Simulação representando a SE de forma simplificada e detalhada

3.2 Influência dos elementos mais relevantes

Algumas variações foram feitas nos elementos do circuito da Figura 3a de modo a identificar a influência de cada um deles. Assim, o modelo do transformador, o valor da capacitância de equalização e o comprimento do trecho de conexão foram variados.

3.2.1 Influência do modelo do transformador

A Figura 8 mostra o gráfico da resposta em frequência de tres modelos disponíveis (**ZTR**, **BBC** e **ABB**), que reproduzem medições de impedância vista pelo terminal em análise (345 kV) de unidades de diferentes fabricantes, bem como de algumas impedâncias específicas, tais como: resistências de sequência positiva e zero com valores iguais às impedâncias de que modelam o trecho final (**Z0Z1**), uma indutância de 20 μ H (**L2uH**) e uma capacitância de 7 nF (**C7nF**). A capacitância corresponde ao valor da impedância do modelo **ZTR** para frequências em torno de 100 kHz, enquanto que o modelo de indutância está relacionado às frequências acima de 1 MHz. As frequências dos principais pontos de ressonância de cada um dos três modelos das unidades de transformadores estão também indicadas.

A variação da representação do transformador permitiu observar os seguintes aspectos:

- Quando o transformador é modelado pelas resistências, a onda que atinge o transformador possui uma forma igual a curva **Z0Z1** mostrada na Figura 9. Esta onda corresponde ao pulso de energia que atravessa o trecho de conexão decompondo-se devido a diferença de velocidade entre a sequência positiva e a sequência zero e alcança o transformador sem produzir reflexões. Quando o transformador é representado por um dos modelos disponíveis de impedância vista medida (**ZTR**), observa-se que a resposta é formada pela componente **FRONTAL**, resultante da onda incidente **Z0Z1** com uma indutância de 20 μ H (**L2uH**), somada à componente **AMORTECIDA**, resultante da mesma onda incidente com uma capacitância de 7 nF (**C7nF**). Como esperado estas duas componentes estão associadas às faixas mais altas de frequência do modelo do transformador.

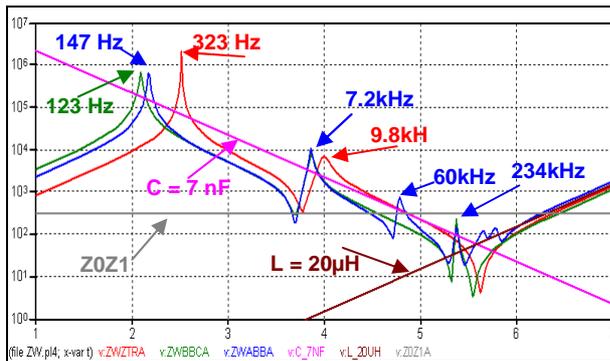


Figura 8 – Resposta em frequência da impedância dos diversos modelos de transformadores

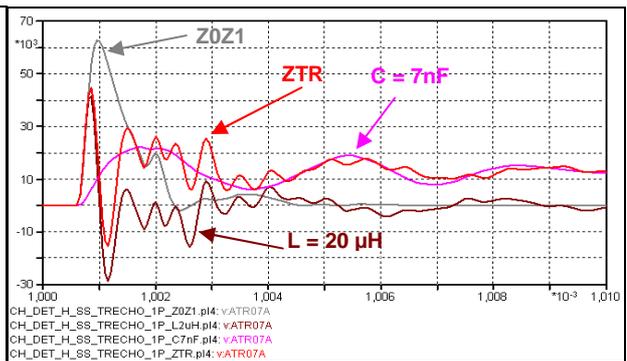


Figura 9 – Detalhe da componente FRONTAL para diferentes modelos do transformador

b. A frequência da componente OSCILATÓRIA está associada a 2ª ressonância paralela de cada modelo e o amortecimento pode ser associado à amplitude da impedância na frequência correspondente. A Figura 10 apresenta os valores associados à componente OSCILATÓRIA das tensões simuladas para os três modelos de transformadores disponíveis e suas frequências podem ser comparadas aos valores indicados na Figura 9. O mesmo ocorreu com as medições como mostrado na Figura 11, que apresenta os valores associados às componentes OSCILATÓRIAS das tensões na medição da manobra 4.2.7 da seccionadora 8471 para as três fases do banco AT07. Como cada fase está composta por unidades de fabricantes diferentes, a frequência desta componente é levemente diferente.

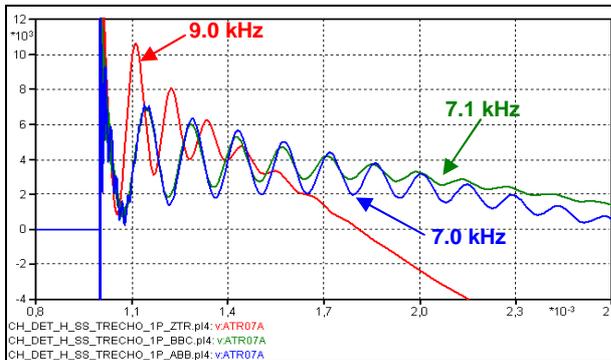


Figura 10 – Componente OSCILATÓRIA simulada para os diferentes modelos de transformador

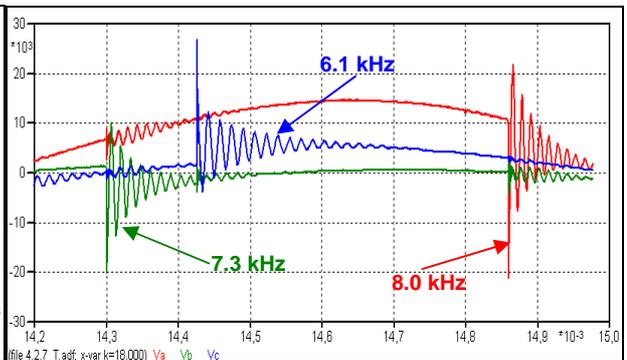


Figura 11 – Componente OSCILATÓRIA medida nas três fases do banco AT07

c. As tensões calculadas utilizando os dois modelos ABB e BBC apresentam, na Figura 12, a componente AMORTECIDA com a frequência de 234 kHz que pode ser associada à ressonância paralela observada na Figura 9 para estes dois modelos. No modelo ZTR esta componente surge mais amortecida e com valor de frequência de 275 kHz e poderia ser associado ao valor de capacitância equivalente nesta faixa de frequência, já que o modelo ZTR não apresenta aí nenhuma ressonância paralela.

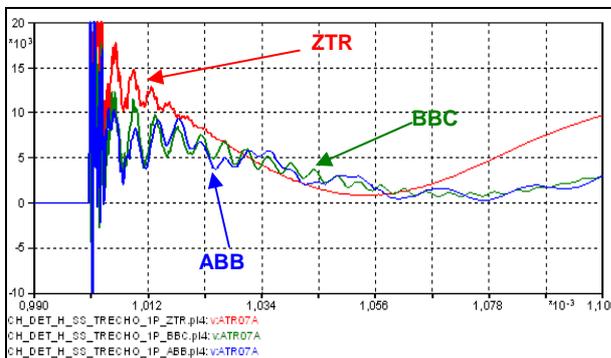


Figura 12 – Componente AMORTECIDA simulada para os diferentes modelos

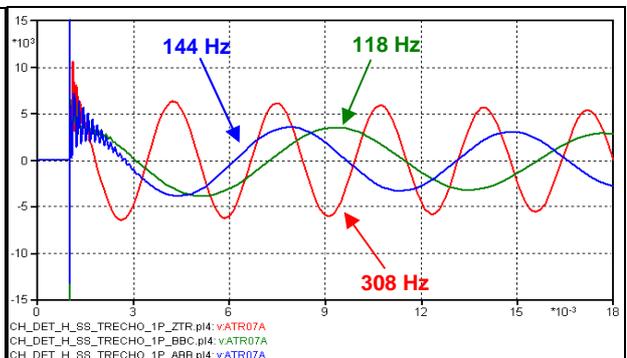


Figura 13 – Componente de baixa frequência para os diferentes modelos de transformador

d. Apenas nas simulações com os modelos de transformador variando com a frequência aparece uma componente

de muito baixa frequência (entre 110 e 310 Hz) e de muito baixo amortecimento. A Figura 13 apresenta o gráfico da tensão para os três diferentes modelos de transformadores, para um tempo maior de simulação, com a indicação da frequência correspondente, cujos valores são muito próximos da 1ª ressonância de cada modelo utilizado, apresentados na Figura 9. Entretanto, esta componente de baixa frequência não foi identificada nas medições. Por isso, admitiu-se que a impedância real vista por cada unidade, quando os demais terminais estejam conectados aos respectivos barramentos, possam apresentar esta ressonância bem mais amortecida. Por outro lado, a medição apresenta uma componente associada à frequência fundamental (60Hz). Assim, de modo a buscar reproduzir melhor a medição, um dos modelos (**ZTR**) foi ajustado para amortecer bem a 1ª ressonância e diminuir o amortecimento da 2ª ressonância. Além disso, foi considerando a indução de uma tensão de frequência fundamental modelada através de um circuito paralelo representado em um dos trechos do circuito de conexão entre o transformador e a chave seccionadora. A Figura 14 apresenta, em uma janela de 30ms, a comparação da medição mostrada na Figura 2a e da simulação mostrada na Figura 4, correspondente à manobra de fechamento de uma chave utilizando este modelo **ZTR** ajustado e o circuito modificado. A velocidade constante na simulação produz reações homogêneas espaçadas.

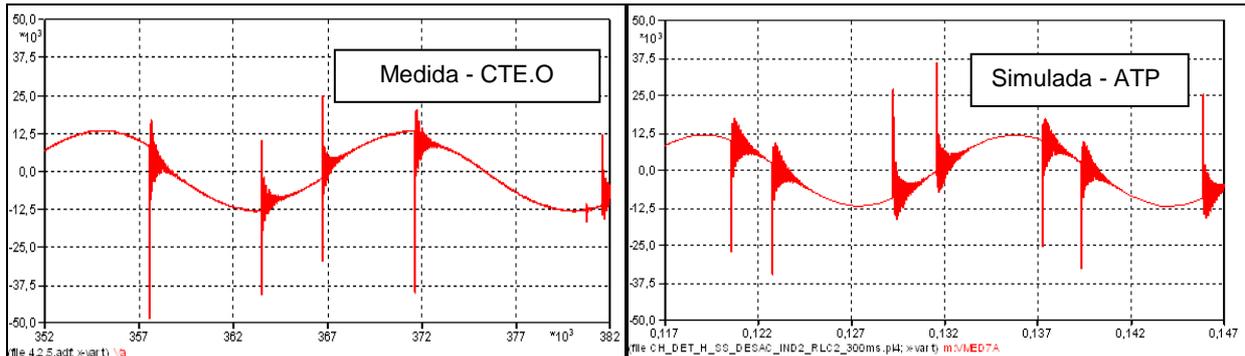


Figura 14 – Manobra 4.2.5 – medida e simulada

3.2.2 Influência da capacitância de equalização

A variação do valor da capacitância de equalização do disjuntor altera a amplitude das diversas componentes, sem alterar significativamente suas frequências. A Figura 15 apresenta as componentes FRONTAL e AMORTECIDA para um aumento, de 655 pF para 1250 pF, e uma diminuição, de 655 pF para 300 pF, do valor desta capacitância.

A Figura 16 apresenta a forma de onda do impulso que alcança o transformador para os diferentes valores de capacitância quando o modelo do transformador é representado pelas resistências (R0R1) iguais às impedâncias de sequência positiva e zero (Z0Z1) que modelam o trecho de conexão do transformador. Fica evidente que a energia armazenada no capacitor de equalização é maior quanto maior for o valor de sua capacitância determinando, com isso, a quantidade de energia a ser transferida como impulso durante a formação do arco.

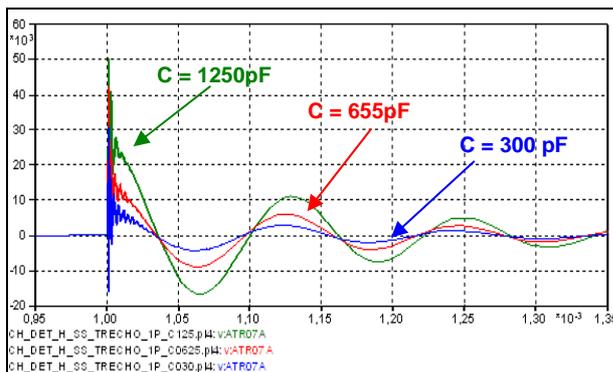


Figura 15 - Variação da capacitância do disjuntor – modelo ZTR

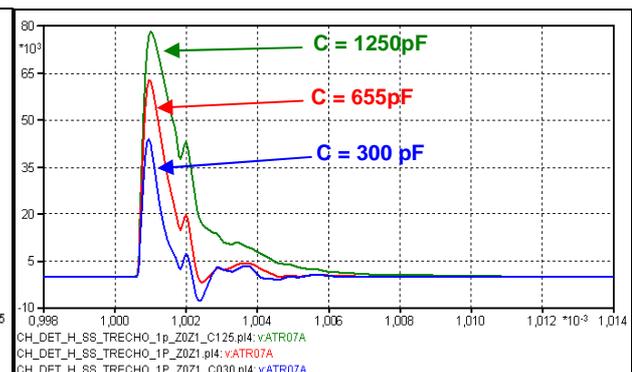


Figura 16 - Variação da capacitância do disjuntor – modelo Z0Z1

3.2.3 Influência do comprimento do trecho de conexão

O aumento do comprimento do trecho que conecta o terminal de 345 kV do transformador à chave seccionadora, de 161 m para 261 m, praticamente não alterou a frequência da componente OSCILATÓRIA, porém diminuiu a amplitude da componente FRONTAL e diminuiu também o amortecimento e a frequência da componente AMORTECIDA. A Figura 17 mostra o efeito desta alteração de comprimento. Este efeito explica também o fato de que a alteração das chaves manobradas não modificou significativamente os resultados das simulações, assim como não foram identificadas alterações relevantes nas medições.

3.2.4 Manobras de abertura de chaves seccionadoras

O fenômeno que acontece durante a manobra de abertura de uma chave seccionadora é semelhante à manobra de seu fechamento. Inversamente, porém, os maiores pulsos de energia ocorrem no final e não puderam ser registrados dentro do intervalo de 500 ms. Os registros efetuados indicam que a resposta geral é a mesma da manobra de fechamento, já que o circuito é o mesmo, variando apenas a quantidade de energia envolvida. A Figura 18 apresenta como exemplo a manobra 4.2.6, onde as componentes FRONTAL e OSCILATÓRIA são facilmente identificadas, sendo suas amplitudes bem menores.

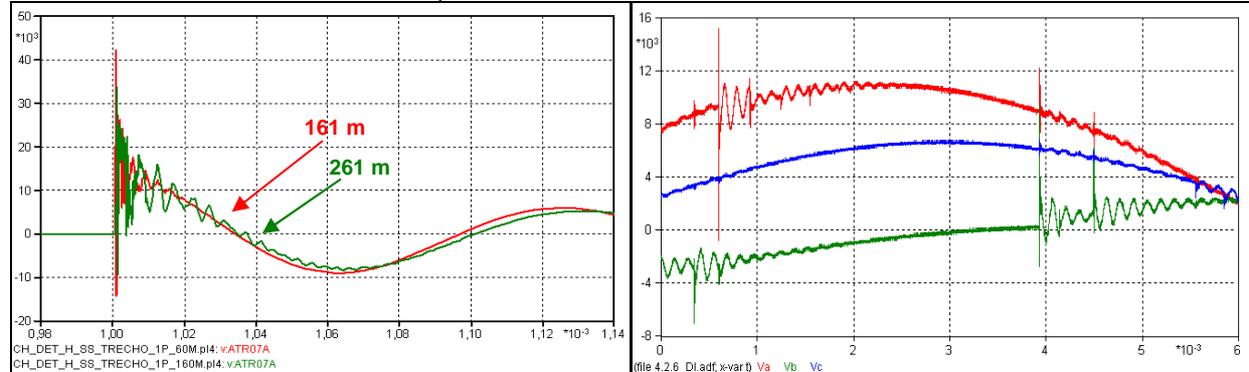


Figura 17 - Variação do comprimento de conexão entre o disjuntor e o transformador

Figura 18 – Medição da manobra 4.2.6 de abertura da chave 8471

4.0 - CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser tiradas a partir da análise das medições e simulações:

- a. A manobra de chave seccionadora, tanto no fechamento quanto na abertura, apresenta um número muito alto de pulsos (várias dezenas) ao longo de alguns segundos, formado pelas várias reignições cada vez que o dielétrico entre os seus terminais é rompido e as características principais são as mesmas entre os diferentes pulsos.
- b. Na manobra de abertura o fenômeno é semelhante a do fechamento, porém inverso quanto ao aparecimento dos arcos elétricos, ou seja, apresentam amplitudes menores no início e maiores no final, quando as lâminas estão mais afastadas.
- c. Foi possível identificar as principais componentes do transitório gerado pelo pulso de energia emitido na direção do transformador a cada vez que se rompe o dielétrico durante uma manobra de fechamento de chave seccionadora. Os pulsos ocorrem em uma sucessão de arcos elétricos com amplitudes maiores no início e menores no final, quando as lâminas da chave estão mais próximas.
- d. A impedância do transformador é o elemento essencial na geração das componentes transitórias em seus terminais [5], já que este se comporta como um filtro, absorvendo, nas ressonâncias série, parte da energia do pulso e refletindo outra parcela na forma de componentes cujas frequências estão associadas às suas ressonâncias paralelas principais.
- e. Quatro componentes principais foram identificadas. Para facilitar a análise e a explicação, elas foram nomeadas de: FRONTAL, AMORTECIDA, OSCILATÓRIA e FUNDAMENTAL.
- f. Apenas duas, destas quatro componentes, se mostraram mais relevantes em função das amplitudes e amortecimentos associados, quais sejam: a componente FRONTAL e a componente OSCILATÓRIA.
- g. A componente FRONTAL, de maior frequência e amplitude, corresponde à resposta do modelo do transformador para as frequências mais altas. Dada as limitações dos sistemas de medição para uma faixa de frequência acima de 500 kHz, torna-se difícil a sua caracterização de forma mais precisa, bem como avaliar a simulação por não se dispor de um referencial definitivo. Os modelos de transformadores também são limitados pelas medições de suas impedâncias.
- h. A componente OSCILATÓRIA é a componente de melhor definição e está claramente associada à 2ª ressonância da impedância do transformador vista pelo terminal de 345 kV, no qual as tensões foram medidas. Esta componente apresentou o mesmo valor de frequência para cada fase nas manobras das diferentes chaves do setor de 345 kV (8473, 8471, 8763 e 8761). Esta evidência também foi confirmada pelas simulações.
- i. A componente AMORTECIDA, foi assim denominada por se apresentar muito amortecida e não se mostrou relevante na análise deste fenômeno.
- j. Na simulação foi identificada uma componente associada à 1ª ressonância que não foi observada na medição. Supõe-se que quando os terminais do transformador estejam conectados aos barramentos, o que não ocorre na medição da resposta em frequência, a impedância vista sofra alteração nesta faixa inicial de frequência. Em contrapartida, a componente FUNDAMENTAL, de 60 Hz, observada nas medições, certamente proveniente de indução dos circuitos energizados, precisou ser induzida nas simulações através de um condutor paralelo ao trecho entre o transformador e o disjuntor.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Sarcinelli, D. Sixel, E. A. Piantino, "Investigação da Influência de Manobras de Bancos de Capacitores na Falha de Autotransformadores em Tijuco Preto", XIX SNPTEE, Out. 2007, Rio de Janeiro.
- [2] JWG A2/C4-03 – Brochura do CIGRÉ Brasil - "Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com Foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Freqüência" - 2010
- [3] MIGUEL, P.M., "Modelo de chave com representação do arco elétrico e sua utilização para a simulação de fenômenos de VFOT", XXI SNPTEE, Out. 2011, Florianópolis.
- [4] V. S. Rashkes, L. D. Ziles, "Very High Frequency Overvoltages at Open Air EHV Substations During Disconnect Switch Operations" - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996
- [5] F. M. S. Carvalho, R. M. de Azevedo e R. Vaisman, "Sobretensões Transitórias de Alta Freqüência Provocadas por Manobras de Disjuntores e Chaves Seccionadoras em Subestações E.A.T. Isoladas a Ar" - SBSE 2008 - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2008 – Belo Horizonte – MG

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



GUILHERME SARCINELLI LUZ, brasileiro, nascido no RJ em 1957, engenheiro eletricitista pela UFRJ (1981) - Engenheiro de FURNAS C. Elétricas S.A., lotado na Diretoria de Operação.
Áreas de atuação: Transtórios Eletromagnéticos e Sistemas de Corrente Contínua
(guiluz@furnas.com.br)



DAVI SIXEL ARENTZ, brasileiro, nascido no RJ em 1973, engenheiro eletricitista pela UFF (1997) - Engenheiro de FURNAS C. Elétricas S.A., lotado na Diretoria de Operação.
Áreas de atuação: Transitórios Eletromagnéticos e Qualidade da Energia Elétrica
(sixel@furnas.com.br)



VOLNEI WLADEMIR BRAZ, brasileiro, nascido em MG em 1961, Técnico de Nível Médio Operacional de FURNAS Centrais Elétricas S.A., lotado na Diretoria de Operação.
Área de atuação: Medição e Ensaio elétricos especiais em equipamentos do sistema de transmissão.
(volneiw@furnas.com.br)

EBERTH ANTONIO PIANTINO, brasileiro, nascido em Passos, MG em 1953; engenheiro eletricitista pela PUC – Minas Gerais (1980); Engenheiro de FURNAS Centrais Elétricas, desde 1980; lotado na Diretoria de Operação.
Área de atuação: Medição e Ensaio elétricos especiais em equipamentos do sistema de transmissão.

JOÃO BOSCO DIAS, brasileiro, nascido em MG em 1957, Engenheiro Operacional pela UNIFRAN (1984) - Técnico de Furnas desde 1980 - lotado na Diretoria de Operação
Área de atuação: Medição e Ensaio elétricos especiais em equipamentos do sistema de transmissão.
(jbdias@furnas.com.br)