



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

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO - XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS  
E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM**

**INFLUÊNCIA DA CARGA DO SISTEMA NA RESPOSTA DE TRANSFORMADORES SOB SURTOS  
COM UM ENROLAMENTO EM ABERTO**

**Rubens José Nascimento (\*)**

**TRACTEBEL ENERGIA S.A.**

**Nelson Jhoe Batistela; Patrick Kuo-Peng; Mauricio Rigoni;  
André Kurowski Soares; André Giovane Furlan; Marconi Januário  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - GRUCAD**

**RESUMO**

Estuda-se transformadores excitados com componentes em alta frequência quando possui um de seus enrolamentos em aberto sob o enfoque do amortecimento elétrico envolvido. Apresenta-se uma modelagem do transformador no que diz respeito à transferência de tensão entre enrolamentos em função da frequência. Utiliza-se o programa ATP para averiguar oscilações em enrolamento em aberto, processando ou não energia e/ou quando há uma carga resistiva conectada. Avalia-se qualitativamente o efeito do amortecimento de surtos de tensão no enrolamento sob investigação. Mostra-se, através de resposta em frequência de transformadores elevadores, que quando o surto provém pelo lado de alta tensão, o enrolamento de baixa tensão sofre oscilações em uma faixa de frequência maior do que quando o surto é pelo lado de baixa tensão refletindo no lado de alta.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transitórios Rápidos, Excitação em Altas Frequências, Amortecimento, Carga de Transformadores.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A distribuição de falhas em transformadores elevadores em uma empresa concessionária de energia elétrica possui ocorrências concentradas em uma de suas plantas geradoras. Mais de cinquenta por cento de avarias ocorridas nos transformadores da empresa foram em uma mesma usina hidrelétrica. Ao longo de um período de 15 anos, consultorias técnicas, medições e estudos foram realizados na intenção de descobrir possíveis agentes causadores dos acidentes, de avaliar os projetos dos transformadores e de determinar ações com a intenção de eliminar ou mitigar os possíveis problemas, tais como a utilização dos sistemas modernos de monitoramento. Em um destes estudos (1), por meio de cálculo de campos através de elementos finitos, análises da distribuição de campos elétricos no interior do transformador mostram que, embora haja setores onde valores de campo elétrico são críticos, o potencial elétrico máximo é da ordem de vinte vezes a constante dielétrica do óleo isolante. Em outro estudo (2), (3) e (4), esforços foram realizados a fim de relacionar a causa das avarias com possíveis excitações de ressonâncias elétricas internas de frequências superiores à comercial.

Os transformadores operando nos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição de energia são vulneráveis às componentes de alta frequência geradas por transitórios elétricos inerentes à operação do sistema elétrico, bem como de distúrbios provocados por descargas atmosféricas. Estes transitórios acabam exigindo esforços nos transformadores além dos valores de projetos. Sabe-se que empresas do setor elétrico vêm sofrendo com casos de avarias em transformadores causadas por transitórios elétricos em frequências superiores à comercial. No diagnóstico das avarias, a excitação por componentes de alta frequência no transformador nem sempre é apontada como causa provável da falha. O desconhecimento da questão ou a pouca disseminação do assunto, e a falta de modelos que possam ser estudados e aplicados na investigação do problema, ou até mesmo pela complexidade em fazer tal correlação entre falha e fenômenos em altas frequências, são as razões de não se

(\*) Tractebel Energia S/A - Complexo Jorge Lacerda - Av. Paulo Santos Mello / sn, centro, Capivari de Baixo, SC, 88745 000 – Brasil

associar um evento à excitação de componentes de alta frequência no interior do transformador.

O transformador objeto deste estudo é do tipo monofásico de três enrolamentos, sendo dois enrolamentos de baixa tensão, cada qual ligado a uma fase de um gerador, denominados enrolamentos BT1 e BT2 respectivamente, e um enrolamento de alta tensão denominado enrolamento AT. Transformadores elevadores de tensão deste tipo são geralmente ligados em bancos trifásicos com os enrolamentos BT ligados em  $\Delta$  e os enrolamentos AT ligados em Y. Nesta configuração, algumas vezes apenas um dos geradores está conectado aos enrolamentos de BT dos transformadores do banco trifásico, enquanto o outro gerador inoperante fica desconectado, deixando o respectivo enrolamento em aberto. Estudos evidenciam uma tendência à ocorrência de faltas sob certas condições, e até mesmo de explosões, nos transformadores sob esta configuração de operação quando um dos enrolamentos de BT está em aberto (1). O escopo principal deste trabalho diz respeito à excitação do transformador pelo lado de AT por frequências superiores à nominal, principalmente sob carga leve.

Em dois casos conhecidos, transformadores de 19/19/303kV, 240MVA, operando com um dos enrolamentos de BT em aberto, sofreram graves avarias, provavelmente devido a surtos em alta frequência quando a condição de operação do sistema no momento do sinistro era de carga leve. Sem um estudo sistemático das ocorrências das avarias, percebeu-se também que em outras falhas os transformadores sofreram algum transiente durante a operação sob carga leve poucas horas ou dias anteriores ao acidente. Este fato motivou este estudo de transformadores operando com um dos enrolamentos de BT em aberto e sob carga leve no sistema. Duas abordagens foram utilizadas. Uma experimental, na qual um transformador protótipo em escala reduzida foi submetido a surtos no seu enrolamento de AT. A outra abordagem foi através de simulação no ATP.

Os transientes de origens diversas podem ser classificados em função da causa e da frequência do distúrbio, de várias formas e magnitudes (5). Modelos de transformadores procuram representar efeitos correspondentes ao tipo de distúrbio a ser analisado. Os modelos mais complexos são aqueles que se referem às perturbações da ordem de dezenas de MHz (5). Os conhecimentos do comportamento dos materiais quando ocorre uma perturbação de altíssima frequência, principalmente no que se refere aos dielétricos, ainda não estão consolidados. Este fato contribui para a dificuldade de se conhecer e, conseqüentemente, modelar o que ocorre na realidade no interior do transformador sob perturbações. Além disso, a obtenção de parâmetros de modelos requer metodologias e aparelhagem de medições diversas, muitas vezes com procedimentos não normalizado e/ou contendo dificuldades técnicas inerentes ao processo/arranjo de medição. Nestas frequências, há problemas críticos de instrumentos de medição e no arranjo dos testes, tanto no aspecto tecnológico do teste em si (efeito das impedâncias de sondas e cablagem, efeito "aliasing", taxa de amostragem etc.), quanto nos custos envolvidos. É pouco provável que a instrumentação e o arranjo do teste não interfiram no fenômeno em si (6). Devido às complexidades, não se pretendeu cobrir toda a gama dos possíveis tipos de perturbações e de suas conseqüências nos transformadores. Entretanto, procurou-se na medida do possível utilizar modelos de Respostas em Frequência – RFs - de transformadores quanto mais próximos da realidade.

## 2.0 - MODELAGEM

Trabalhos sobre transformadores sob excitações em frequências utilizando técnicas de modelagem e ferramentas numéricas para a representação do comportamento do equipamento são amplamente apresentados na literatura (5) – (11). No decorrer do tempo, inúmeros trabalhos foram produzidos, de onde surgiram modelos visando uma melhor representação dos transformadores, alguns baseados em dados construtivos e físicos (12), (13) e (14), outros usando RFs dos transformadores (11) e (15). E ainda, alguns mesclam a modelagem utilizando os dados construtivos e físicos com os dados das RFs (16) e (17). A utilização da técnica de RF para a modelagem retrata o equipamento apenas do ponto de vista dos seus terminais. Esta abordagem traz consigo a necessidade de modelos e de ferramentas numéricas para a determinação dos parâmetros. Na literatura (8) – (11), divide-se os modelos de transformadores em faixas de frequências (baixas, médias e altas frequências) e pelo tipo de abordagem (baseado na topologia construtiva, na análise de circuitos etc.). Em baixas frequências, abordam-se as não-linearidades como a saturação e a histerese do material ferromagnético. Os modelos para médias frequências tratam de fenômenos desde a frequência industrial até alguns quilohertz. Muitos modelos para as altas frequências (acima de alguns quilohertz) desprezam o comportamento do material magnético (11), (12) e (15) e também outros efeitos não-lineares, sendo considerados e tratados como sistemas lineares.

Neste trabalho, utiliza-se a modelagem de transformadores sob aspectos de médias e altas frequências, tipo caixa preta ("Black-Box" - o transformador é visto a partir de seus terminais). É a maneira de modelagem mais encontrada na literatura, onde as formas construtivas dos equipamentos não são levadas em conta. O modelo foi desenvolvido em (2) e (18) para um transformador de pequeno porte (100VA, 30/30/220V) por questões de facilidade, simplicidade e praticidade nas medições. Porém, ele é incapaz de representar alguns tipos de RFs. A referência (19) apresentou um modelo semelhante, apresentando resultados interessantes.

2.1 - Modelo de Transformador Utilizado

Para um transformador monofásico, a modelagem da função de transferência de tensão  $H(s)$ , na frequência complexa  $s$ , é dada pela Equação (1), tendo uma rede de circuitos equivalentes composta por parâmetros RLC (resistores, indutores e capacitores) conectados como mostra a Figura 1. Na impedância  $Z_2(s)$ , o número de blocos RLC em série depende da quantidade  $n$  de ressonâncias envolvidas. A impedância  $Z_1(s)$  é um capacitor  $C$ . A referência (18) também apresenta uma modelagem em termos de impedância de cada enrolamento. Maneiras de determinação dos parâmetros dos modelos por meio analítico ou por meio da utilização de um procedimento de busca utilizando a técnica de algoritmos genéticos – AG – são apresentadas em (18). A Figura 2 apresenta as RFs da  $H(s)$  do modelo obtidas com dois procedimentos, analítico e por meio de AG, e a curva experimental. A curva experimental foi obtida excitando o lado de Baixa Tensão (BT) com a resposta no lado de Alta Tensão (AT) do transformador de 100VA, 30/30/220V. Após 100kHz, a amplitude da resposta é fortemente atenuada.

$$H(s) = \frac{V_{sai}(s)}{V_{ent}(s)} = \frac{Z_1(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} = \frac{1/sC}{\left(\frac{1}{sC}\right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{sC_{ri} + \frac{1}{R_{ri} + \left(\frac{1}{R_{seri} + sL_{ri}}\right)}}} \quad (1)$$

FIGURA 1 – Modelo de alta frequência do transformador: (a) divisor de tensão entre os terminais do transformador e (b) rede de componentes RLC para representar a impedância  $Z_2(s)$ .

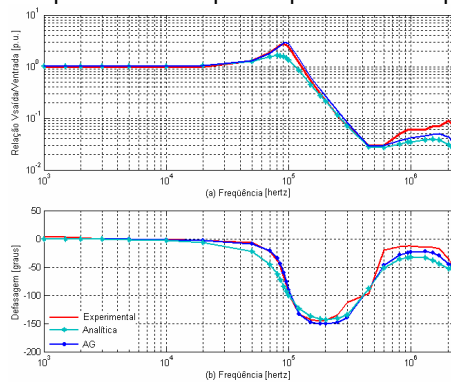


FIGURA 2 – Curvas de transferência de tensão em função da frequência obtidas experimentalmente e pelo modelo: (a) relação entre tensões por unidade (p.u.) e (b) defasagem em graus.

2.2 Validação do modelo

Para validar o modelo proposto, a resposta ao degrau do transformador monofásico de 100VA, 30/30/220V foi simulada utilizando o programa ATP (18). Os parâmetros determinados com o AG foram aplicados no modelo da RF da  $H(s)$ . Na simulação com o programa ATP, foi acrescentado no modelo um transformador ideal para representar a sua relação de transformação (ver Figura 3).

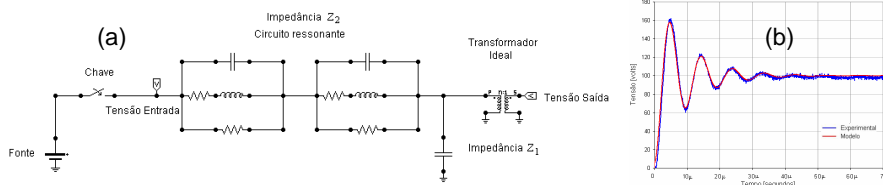


FIGURA 3. (a) Circuito usado no ATP para a simulação da resposta ao degrau. (b) Resultados de simulação e experimental a um degrau de 15 Volts.

2.3 Estudo de surtos de um banco trifásico de transformadores de três enrolamentos utilizando o programa ATP

Para um estudo sobre surtos em um banco trifásico de transformadores de três enrolamentos através do programa ATP, utilizou-se a modelagem da parte da alta frequência do transformador monofásico de três

enrolamentos 30/30/220V, mesmo sabendo-se que funções de transferência de transformadores utilizados em usinas hidrelétricas são diferentes desta. Além disso, a função de transferência foi modelada e validada para a excitação pelo lado de BT. A função de transferência  $V_{BT}/V_{AT}$ , com excitação do lado de AT e medindo-se a resposta no lado BT, possui um comportamento diferente da resposta com excitação em BT e medindo-se a resposta do lado AT ( $V_{AT}/V_{BT}$ ). Quando a excitação é em BT, geralmente após uma ressonância de baixa para média frequência, a tensão no lado de AT é fortemente atenuada (Veja Figura 2). Ao contrário, quando a excitação (surto) vem pelo lado de AT, há uma amplificação significativa da tensão no lado de BT em uma faixa de alta frequência, caracterizado por uma resposta típica de um filtro passa-faixa (ou passa alta dentro da faixa de interesse constituída pelos transientes rápidos e ultra-rápidos de frequência menores que 10MHz – em (5) há uma abordagem das frequências dos surtos típicos do sistema elétrico). Como não se conseguiu uma modelagem física para a relação ( $V_{BT}/V_{AT}$ ), e como já havia um estudo metodologicamente validado, optou-se em utilizar a modelagem conforme o circuito elétrico mostrado na Figura 3. Os resultados apresentados aqui são de menores proporções do que ocorre na prática nos transformadores elevadores das usinas quando o surto provém pelo lado de AT. Os resultados não contemplam possíveis ressonâncias mais críticas e de amplitudes elevadas (>10 p.u.) nas altas frequências. Assim, a análise do transformador processando ou não energia sob surto, com e sem carga no sistema, é qualitativa. As conclusões na análise são pertinentes e válidas quando se leva em conta que não se está contemplando a característica “passa-faixa” de transformadores elevadores para surtos em AT.

Foi utilizado o modelo de transformador saturado (20), incluindo também as reatâncias do ramo longitudinal (0,17 p.u.) de um transformador elevador monofásico de três enrolamentos de 240MVA. As reatâncias entre os enrolamentos BT foram aproximadas como sendo a soma das reatâncias de dispersão destes enrolamentos com o enrolamento AT, e estão incluídas no par de transformadores delimitados por um retângulo em azul da Figura 4. A Figura 4 mostra o modelo no ATP representando um banco trifásico de transformadores de três enrolamentos de uma usina hidrelétrica. Cada par de transformadores (destaque em azul na Figura 4) representa um transformador de três enrolamentos com valores nominais 19/19/303kV, 240MVA. Os enrolamentos de BT estão ligados em  $\Delta$ . O enrolamento BT1 está conectado a um gerador modelado por uma fonte de tensão ideal com uma impedância síncrona de valor típico. O outro enrolamento BT2 está praticamente em aberto (está conectada uma resistência de  $7M\Omega$ ). Uma carga está conectada no final de duas linhas de transmissão de 525kV (21) do tipo RL. Uma das linhas tem extensão de 3,7km (conexão da usina a uma subestação de transmissão) e outra de 200km (distância hipotética em que são aplicados os surtos). As perdas e a características de magnetização do núcleo dos transformadores foram desprezadas. A Figura 5 mostra excitações senoidais aplicadas na passagem por zero volt da tensão no lado de BT de um dos transformadores com as respostas do lado de BT2 em aberto (obs.: o lado de BT1 praticante não apresenta oscilações) para quatro frequências.

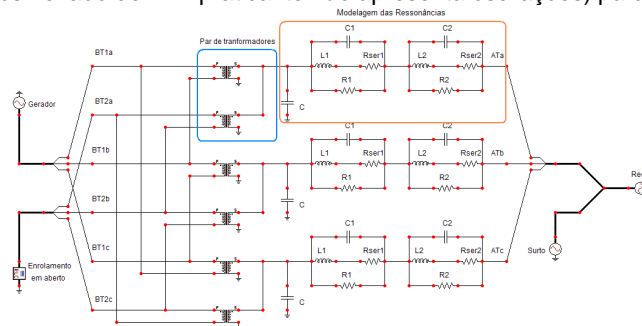


FIGURA 4 - Modelo no ATP representando um banco trifásico de transformadores de três enrolamentos

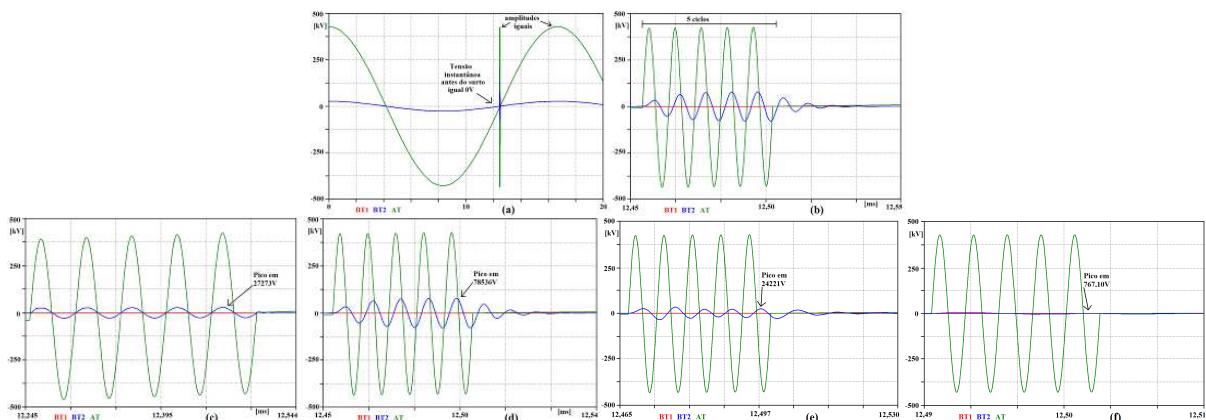


FIGURA 5 - (a) Características dos surtos; (b) detalhe dos surtos. Resultados para (c) 20kHz, (d) 100kHz, (e) 150kHz, (f) 500kHz.

Na simulação do banco, a carga exigida do gerador conectado em BT1 é o valor da carga resistiva no fim da rede. Seis testes foram realizados: variando a carga (carga “leve” – 3x1MVA - para os testes **a**, **b** e **c**, e “pesada” – 3x120MVA - para os testes **d**, **e** e **f**) mantendo o enrolamento BT<sub>2</sub> em aberto (testes **a**, **c**, **d** e **f**) ou tendo carga puramente resistiva de 3x1,5MVA (testes **b** e **e**). Aplicou-se um surto de corrente típico de uma descarga atmosférica. Foi também avaliado o efeito do posicionamento do surto, verificando o que ocorre quando ele é aplicado ao final da linha de transmissão de 200km (testes **a**, **b**, **d** e **e**) e entre as linhas (testes **c** e **f**). O valor da carga de 1,5MVA em BT2 corresponde aproximadamente à potência nominal de um circuito auxiliar de alimentação de uma usina. A Figura 6 apresenta as tensões no enrolamento de BT2 para cada um dos seis testes. As tensões mostradas estão referidas à mesma fase em que foram aplicados surtos de corrente. As seguintes considerações e conclusões podem ser obtidas dos resultados obtidos:

- no teste **c**, com o surto sendo aplicado entre as duas linhas de transmissão conectadas ao enrolamento AT, observa-se que não houve alterações significativas em relação aos dois primeiros testes;
- no teste **d**, com o aumento da potência processada pelo transformador, houve uma atenuação significativa das oscilações do surto;
- o surto sendo aplicado próximo ao transformador (teste **f**), as oscilações aumentam em relação aos resultados do teste **d**;
- acrescentando carga no enrolamento de BT2, comparando o teste **e** com o teste **d**, as oscilações de alta frequência em BT2 são atenuadas.

Destes fatos, infere-se que uma carga da ordem da potência auxiliar de uma usina em BT2 atenua as oscilações neste enrolamento nas altas frequências. Embora não tenha sido apresentado aqui, verificou-se por simulação que o enrolamento ao qual está conectado o gerador não sofre as consequências da perturbação dos surtos.

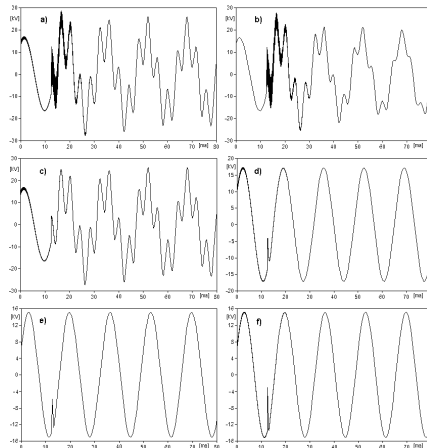


Figura 6 - Formas de onda de tensão em BT2 para cada um dos casos simulados.

### 3.0 - RESULTADOS DE ENSAIOS – MEDIÇÃO DE H(S) EM TRANSFORMADORES

Uma primeira série de ensaios foi realizada em um transformador reserva na usina hidrelétrica sob estudo. Para cada variação do arranjo de conexão da instrumentação, dos enrolamentos, de tipos de aterramento (da blindagem de cabos coaxiais, dos enrolamentos, do gerador de excitação etc.) e do comprimento dos cabos, houve uma RF distinta das demais. O objetivo não foi obter uma assinatura do transformador como normalmente é realizado para se avaliar defeitos da parte ativa. Procurou-se obter a H(s) mais próxima à situação em que os acidentes ocorreram. Assim, fez-se um estudo sistemático de maneiras de conexão dos instrumentos, dos cabos, dos enrolamentos, das referências da instrumentação e dos enrolamentos. Na literatura são apresentados alguns métodos para se obter a RF. Um dos métodos mais utilizados tem sido através da medição das tensões nos dois enrolamentos por meio de sondas de tensão (isoladas ou não-isoladas) de osciloscópios ou analisadores de impedância (22). Os estudos discutem o método de ligação das sondas aos enrolamentos, principalmente, e da referência da tensão de excitação mais adequada (22), (23) e (24). O estado-da-arte mostra que a RF é dependente da topologia/arranjo da medição. Na avaliação de RFs, devido às grandes dimensões físicas, há a necessidade de se utilizar cabos para levar o sinal da fonte ao enrolamento sob excitação e também para adquirir as tensões de ambos os enrolamentos. Deve-se considerar também a existência de RF dos cabos. Em (23) é discutido a influência do comprimento dos cabos para a obtenção da impedância em função da frequência de um transformador de distribuição. Seus principais apontamentos são que, acima de certa frequência (dependendo de cada transformador e tipo de cabo), a capacitância da bucha de AT e as capacitâncias e indutâncias dos cabos de medição se tornam significativas quando comparadas aos elementos do próprio transformador, mascarando a resposta verdadeira do equipamento. No objetivo deste estudo parcialmente apresentado aqui neste artigo, os efeitos da bucha necessitam ser considerados, pois eles afetam o comportamento da tensão no enrolamento que se encontra em aberto. Um dos testes feitos em (23) compara curvas de impedância do transformador com a utilização de cabos curtos e longos, onde as curvas são bastante similares até 400kHz.

Acima desta frequência, as topologias apresentam respostas diferentes. Os cabos longos possuem a tendência de atenuar as amplitudes e diminuir os valores das frequências das ressonâncias. Conforme (23), deve-se manter o comprimento dos cabos de medição tão curtos quanto possível e com mesmas dimensões. Entretanto, não conclui qual a melhor topologia de ligação do neutro (referência) da excitação. Em (24), obtém-se a RF de um transformador de potência de 3x35MVA através de um analisador de impedâncias com sondas de tensão ativas e sonda de corrente. Cabos de sinal blindados (coaxiais) foram utilizados. Nesta referência, um terminal de cada enrolamento sob teste, bem como as blindagens dos cabos, estão referenciados ao terra. Os autores afirmam que com os equipamentos utilizados e com a topologia escolhida, mesmo utilizando cabos de sinal com 20m de comprimento, há pouca influência da configuração da medição sobre os resultados até 2MHz. Não fornecem resultados comparativos com outras topologias.

Os ensaios apresentados neste artigo foram realizados com um osciloscópio digital Tektronix DPO 4104 (4 canais, 1 GHz, 5 GS/s) e um gerador digital de sinais Tektronix AFG-3102. Foram estudados procedimentos para obtenção da RF de transformadores que sofram a mínima influência possível relativa ao esquema de medição utilizado e à inserção dos cabos que ligam os instrumentos aos pontos de medição. Para auxílio na investigação, foi utilizado um transformador monofásico protótipo de três enrolamentos 50/50/220V com uma configuração construtiva imitando os transformadores da usina sob estudo, de núcleo tipo envolvente (*shell-type*). Foram realizadas medições no transformador em diversas topologias sem a inserção de cabos. A intenção foi procurar qual a topologia, sem a utilização de cabos, que obtivesse os resultados mais adequados. Posteriormente, foram realizadas medidas das RFs de cabos de 15m (tamanho suficiente para conectar um instrumento na altura da base do transformador até o topo de sua bucha) e 7m (tamanho suficiente para conectar um instrumento na altura da base da bucha até o seu topo). Uma terceira investigação foi das RFs do transformador protótipo com os cabos conectados em seus terminais em diversas topologias. O objetivo foi verificar qual topologia de cabos conectados ao transformador teve menor influência. Após escolhida a configuração, foram realizados testes em vários transformadores para observar se o comportamento de suas RFs em relação às diferenças de medida provocado pela inserção dos cabos se manteve como aquele observado para o transformador protótipo. O estudo utilizou o método de análise por varredura da RF (SFRA – *Sweep Response Frequency Analysis*) de 100 Hz até 2MHz, com amplitude da tensão de excitação entre 2 e 10V de pico-a-pico. As curvas levantadas são relativas à transferência de tensão do lado de AT para o lado de BT, com os valores normalizados levando em conta a relação de transformação. Dos resultados obtidos do estudo, optou-se por não aterrar os instrumentos e os enrolamentos, e utilizar sondas não diferenciais. A Figura 7 mostra um dos resultados com o arranjo escolhido. O efeito capacitivo dos cabos nas frequências mais elevadas provoca um aumento da amplitude da tensão. Pode-se corrigir parcialmente as amplitudes dividindo os valores da curva obtida com a utilização dos cabos pelos valores da curva dos cabos.

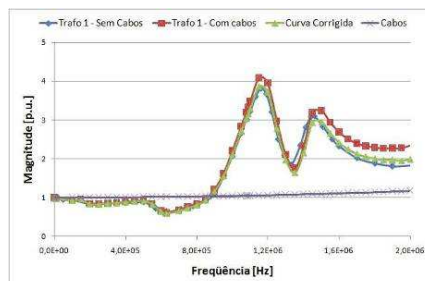


FIGURA 7 – Curvas de  $V_{BT}/V_{AT}$  para o transformador protótipo.

No transformador da usina foram realizados três ensaios onde um dos cabos de conexão foi sendo encurtado aproximando a instrumentação (Ensaio 1: 7,0m; Ensaio 2: 2,7m; Ensaio 3: 0,9m). A Figura 8 mostra os resultados. Na medida em que o cabo é encurtado, as amplitudes nas ressonâncias tendem a aumentar e se deslocam para frequências mais altas, sendo a mesma conclusão apresentada em (23). Foi levantada a curva de RF excitando-se o transformador pelo lado de BT e obtendo sua resposta na AT (Figura 9 – (a)), e excitando um dos lados de BT (BTX) e medindo-se a resposta no outro lado de BT (BTY) (Figura 9 – (b)). Para ambos os ensaios, ao contrário da RF para a  $V_{BT}/V_{AT}$ , há uma atenuação nas altas frequências.

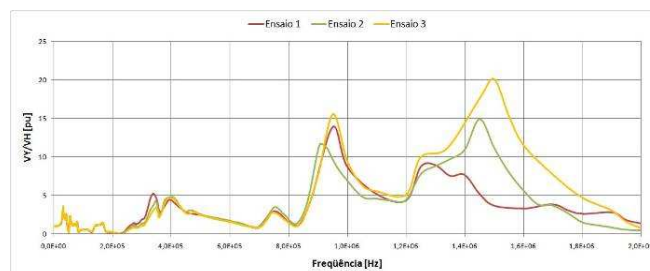


FIGURA 8 - Curvas de transferência de tensão  $V_{BT}/V_{AT}$  (p.u.) para três ensaios no transformador da usina.

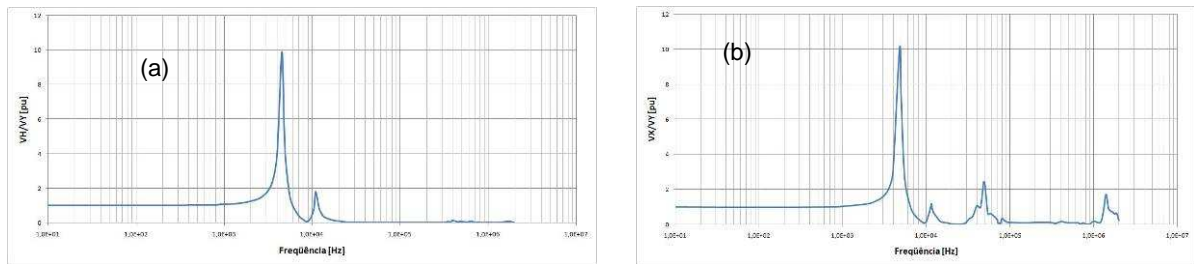


FIGURA 9 - Curvas de transferência de tensão no transformador da usina hidrelétrica: (a)  $V_{AT}/V_{BT}$ ; (b)  $V_{BT2}/V_{BT3}$ .

Utilizando o transformador protótipo, foram aplicadas descargas de tensão através de uma associação de capacitores (capacitância equivalente de 2,35nF) carregados com 300V sobre o enrolamento de AT. A Figura 10 mostra as curvas de tensão dos três enrolamentos. As curvas em azul representam o canal 1 (CH1 - BT1), em vermelho o canal 2 (CH2 - BT2) e em verde o canal 3 (CH3 - AT). Na Figura 10 - (a) com o enrolamento BT2 em aberto, nota-se que no segundo pico positivo da ressonância, enquanto que a tensão no enrolamento de AT foi de 30V para 90V (aumento de 3 vezes), a tensão no enrolamento BT2 foi de 8V a 32V (aumento de 4 vezes), tendo uma frequência de ressonância de cerca de 360kHz. Esta frequência não é ainda a crítica (vide Figura 7). Na frequência de 400 Hz, o transformador possui um ganho de tensão de AT para BT em torno de 1,5 p.u. e uma defasagem aproximada de  $15^\circ$  (o sinal de BT se adianta ao de AT). A Figura 10 - (b) mostra resultados acrescentando uma carga de  $120\Omega$  em BT2. Praticamente não há mais perturbação no enrolamento de BT2.

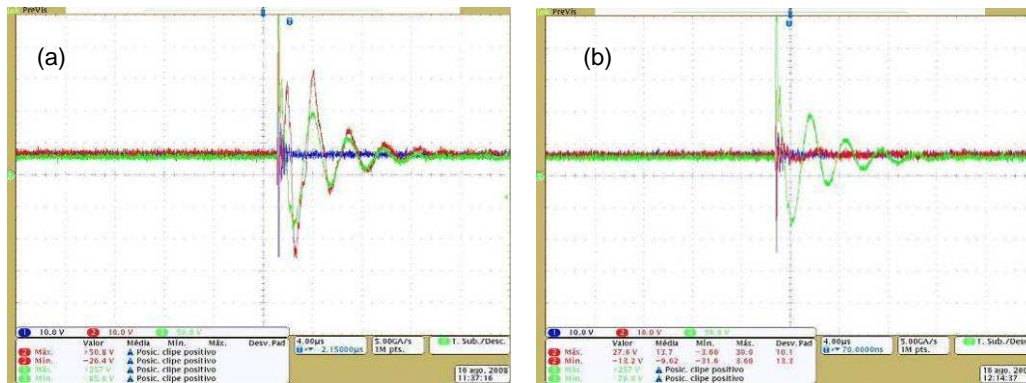


FIGURA 10 - Resultados da perturbação da descarga de um capacitor no enrolamento de AT no transformador protótipo nas tensões dos enrolamentos: (a) BT2 em aberto e (b) BT2 com uma carga resistiva.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Constatou-se que, para excitação e em determinada faixa de frequências, os transformadores elevadores apresentam um comportamento passa-faixa, amplificando as componentes de frequência em até dezenas de vezes no enrolamento de BT em aberto para surtos provenientes do lado de AT (o enrolamento de BT conectado a um gerador não sofre praticamente perturbação). Estes as amplitudes podem ultrapassar valores de projeto, podendo causar rupturas ou sucessivos estresses nos dielétricos enquanto perdurar a perturbação. O resumo das conclusões providas tanto da parte experimental como das simulações realizadas são: a) a carga ativa vista pelo enrolamento de AT faz com que os surtos cheguem com menor amplitude ao transformador, tendo função de amortecimento do surto; b) o enrolamento em que está conectado o gerador não sofre com a perturbação de surtos; c) o acréscimo de carga resistiva ao enrolamento de baixa tensão em aberto faz com que ocorram atenuação e amortecimento da perturbação. Com os resultados e conclusões dos estudos, as seguintes recomendações são propostas a uma planta geradora: a) evitar-se de operar um transformador com um enrolamento de BT em aberto; b) evitar-se de operar o transformador com um enrolamento de baixa desconectado do gerador quando o sistema estiver com carga leve; c) quando um dos enrolamentos de baixa está desconectado, evitar-se de fazer manobras com carga leve no sistema; d) se for desconectar o transformador, procurar fazê-lo com carga pesada no sistema; e) se for conectar o gerador ou o transformador ao sistema, procurar realizar com carga pesada no sistema; f) evitar-se de fazer a sincronização do transformador pelo lado de alta tensão.

Independente deste estudo, o qual tratou da situação específica de um enrolamento de BT estar em aberto, devido à característica de amplificar as altas frequências quando o surto vem da alta para a baixa, sob o ponto de vista de possíveis estresses de dielétricos, é recomendado à operação dos transformadores de uma usina que saiam do sistema preferencialmente com carga alta e entrem no sistema quando a carga estiver alta, evitando estarem sujeitos aos distúrbios de manobras sem amortecimento.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Bastos, J. P. A., Sadowski, N., Carpes Jr., W. P., Kuo-Peng, P., Batistela, N. J., Carlson, R., Rigoni, M., da Silva Jr., P. A., Rosa, A. E. e Nascimento, R. J. Análise Numérica e Experimental de Transformadores com duplo Circuito Primário Operando com um Deles em Aberto – III Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, Florianópolis, p. 1-7, 5 a 6 de dezembro de 2005, (CD Rom).
- (2) Januário, M., Kuo-Peng, P., Batistela, N.J., Carpes Jr., W.P., Spredemann, R. e Vanti, M.G. Transformer Frequency Response Modeling Using Genetic Algorithm – 16th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields – COMPUMAG, Aachen/Alemanha, vol. II, p. 431-432, 24 a 28 de junho de 2007 (CD Rom).
- (3) Januário, M., Rigoni, M., Batistela, N. J., et al. Determinação dos Parâmetros de um Modelo de Transformador a partir da Resposta em Freqüência – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – 7 CBMAG, Belo Horizonte, agosto de 2006 (CD Rom).
- (4) Januário, M., Kuo-Peng, P., Batistela, N. J., Carpes Jr., W. P., Vanti, M. G. e Nascimento, R. J. Modelagem da Primeira Ressonância de Transformadores – Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ – XII ERIAC, Foz do Iguaçu/PR, vol. 1, p. 1 a 8, 20 a 24 de maio de 2007 (CD Rom).
- (5) Povh, D., Völcker, O., Bizjak, G., et al. Calculation of Transient Phenomena – Athens Power Tech Conference – Proceeding, Athens, Greece, v. 2, p. 738-743, sept. 1993.
- (6) Greenwood, A. N. Electrical Transients in Power Systems. 2. ed., John Wiley & Sons, New York, 1991.
- (7) Van der Sluis, L. Transients in Power Systems. 1 ed., John Wiley & Sons, Delft University of Technology, Holanda, 2001.
- (8) Martinez, J. A. and Mork. B. A. Transformer for Low Frequency Transients: The State of the Art. – International Conference on Power Systems Transients – Nova Orleans, Estados Unidos, 2003: [www.ipst.org](http://www.ipst.org).
- (9) Martinez, J.A. and Mork, B.A. Transformer Modeling for Low and Mid-Frequency Transients: a Review – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, V. 20, N. 2, P. 1625-1632, APR. 2005.
- (10) de Leon, F. and Semylen, A. Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, V. 9, N. 1, P. 321-239, JAN. 1994.
- (11) Rahimpour, E., Christian, J., Feser, K., et al. Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, V. 18, N. 2, P. 493-505, APR 2003.
- (12) Cabral, Sérgio Henrique Lopes. Análise de Transitórios Elétricos em Transformadores Através do Método TLM. Florianópolis, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- (13) Shibuya, Y., Fujita, S. and Tamaki, E. Analysis of Very Fast Transients in Transformers – IEEE PROCEEDINGS GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION. V. 148, N. 5, P 377-383, SEPT. 2001.
- (14) Degeneff, R. C. A General Method to Determining Resonance in Transformers Windings – IEEE TRANSACTIONS POWER APPARATUS AND SYSTEMS, V. PAS-96, P. 423-430, 1977.
- (15) Gustavsen, B. and Semylen, A. Wide Band Modeling of Power Transformers – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, V. 19, N. 1, P. 414-422, JAN. 2004.
- (16) Popov, M., Van der Sluis, L. and Paap, G. C. A Simplified Transformer Model for the Simulation of Fast Surges and Adequate Protection Measures – IEEE Power Engineering Society Winter Meeting – Proceedings. Columbus, United States, p. 323-328, jan.-feb. 2001.
- (17) Noda, T., Nakamoto, H. And Yokoyama, S. Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, V. 17, N. 4, P. 969-976, OCT. 2002.
- (18) Januário, Marconi. Modelagem de Transformadores em Função da Freqüência, Florianópolis, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- (19) Kanashiro, G., Piantini, A. y Burani, G.F. Modelo de Transformador de Distribución Trifásico para Estudios de Máximos de Tensión (Peaks) Ocasionados por Descargas Atmosféricas – Información Tecnológica - Vol. 15 N° 1, P. 67-73, 2004.
- (20) de Herdt, H., Declercq, J., Sels, T., et al. Fast Transients and Their Effect on Transformer Insulation: Simulation and Measurements – 16th International Conference And Exhibition On Electricity Distribution – CIRED Proceedings, Amsterdam, Netherlands, v. 1, p. 5, jun. 2001.
- (21) Cheng, C. K., Liang, T. J., Chen, J. F., et al. Novel Approach to Reducing the Inrush Current of a Power transformer – IEEE PROCEEDINGS ELECTRIC POWER APPLICATIONS, V.151, N. 3, P. 289-295, MAY 2004.
- (22) Bjerkan, Eilert. High Frequency Modeling of Power Transformers: Stresses and Diagnostics. Doctoral Thesis, Trondheim, May 2005.
- (23) Wang, M., Vandermaar, A.J. and Srivastava, K.D. Transformer Winding Movement Monitoring in Service: Key Factors Affecting FRA Measurements – IEEE EL. INS. MAG., VOL. 20, NO. 5, PP. 5-12, SEPT.-OCT. 2004.
- (24) Høidalen, H.K., Brede, A.P. and Lundgaard, L. Transformer winding diagnosis using the transfer function approach – Nordic Symposium on Electrical Insulation – Stockholm, Sweden, 2001.