



**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**

AValiação DO RISCO DE FALHAS DIELÉTRICAS NOS TRANSFORMADORES ELEVADORES DA UHE XINGÓ DEVIDO A INTERAÇÃO COM O SISTEMA

Antonio Roseval F. Freire(*)

Rita Kátia D. M. Medeiros

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (CHESF)

RESUMO

Utilizando uma metodologia baseada em medições de resposta em frequência e simulações digitais com o ATP/EMTP, foi realizada uma análise preventiva para a UHE Xingó com avaliação do risco de falhas dielétricas nos transformadores elevadores em função das tensões transitórias de alta frequência, geradas pelas manobras de disjuntores e chaves seccionadoras na subestação ou por descargas atmosféricas incidentes nas linhas de transmissão de 500kV e nos links. Esta análise permitiu identificar alguns eventos que podem causar solicitações acima dos limites recomendados e ou que excedem as aplicadas nos ensaios dielétricos em laboratório com as formas de onda padronizadas.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores, Resposta em Frequência, Manobras de Chaves e Disjuntores, Descargas Atmosféricas, Interação Transitória

1.0 - INTRODUÇÃO

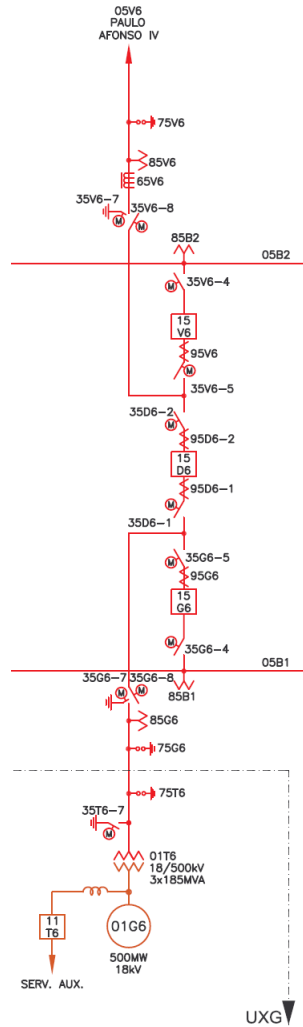
A usina hidroelétrica (UHE) Xingó, com seis geradores de 500MW, é uma instalação importante e estratégica para a operação do sistema de geração e transmissão da Chesf. A Figura 1-(a) mostra uma parte do diagrama unifilar da usina e da subestação, indicando o arranjo típico e os códigos operacionais dos equipamentos. Cada gerador da usina é diretamente conectado a um banco de transformadores elevadores de 18/500kV – 3 x 185MVA, constituído de unidades monofásicas de dois enrolamentos, com os enrolamentos de 500kV ligados em estrela aterrada e os enrolamentos de 18kV ligados em delta. Os seis geradores da usina acessam a subestação de 500kV, com arranjo em disjuntor e meio, através de três links aéreos com um comprimento de cerca de 870m, construídos com torres de circuito duplo vertical. Desta subestação saem quatro linhas de transmissão de 500kV para as subestações Messias (05V4), Paulo Afonso IV (05V6), Jardim (05V5) e Angelim II (05V1). Os barramentos de 500kV da subestação, 05B1 e 05B2, têm comprimento igual a 210m.

Na Tabela 1 são apresentados os níveis de isolamento dos enrolamentos de 500kV e 18kV dos transformadores elevadores. As buchas do lado de 500kV têm uma tensão suportável nominal de impulso atmosférico igual a 1800kV. Para a proteção dos enrolamentos de 500kV dos transformadores elevadores são utilizados pára-raios de óxido de zinco com tensão nominal 420kV, instalados conforme Figura 1-(b). A distância do pára-raios para a bucha de 500kV do transformador é cerca de 15m e o comprimento do cabo de aterramento dos pára-raios, instalados sobre pilares de concreto, é próximo de 7,5m. O nível de proteção especificado para os pára-raios é 1067kV ($0,69 \times \text{BIL}$) para uma corrente de descarga de 20kA com a forma de onda 8/20 μ s.

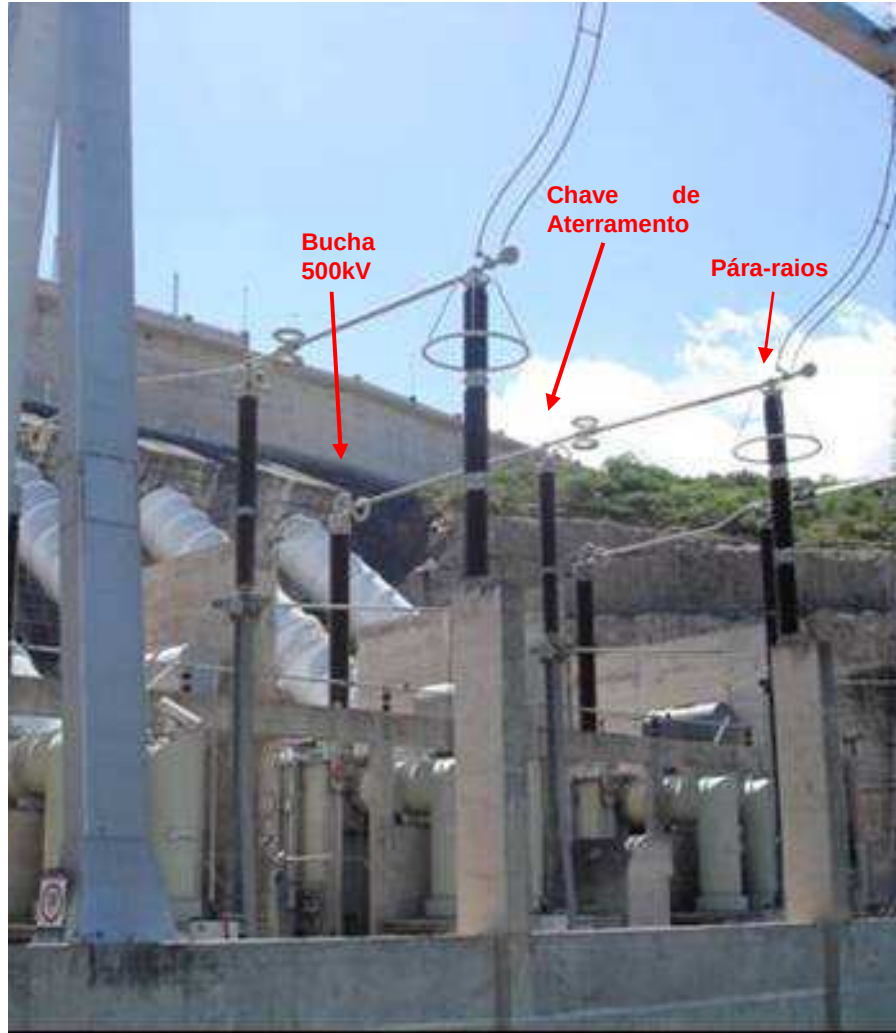
Os geradores da usina são protegidos por cubículos de surto localizados a cerca de 34m das buchas de 18kV dos transformadores elevadores. Os cubículos são equipados com capacitores de surto de 0,26 μ F e pára-raios de

(*) Rua Delmiro Gouveia, nº 333 – Sala A314 – Anexo II - Bloco A – CEP 50.761-901 Recife, PE, – Brasil
Tel: (+55 81) 3229-4048 – Fax: (+55 81) 3229-4058 – Email: roseval@chesf.gov.br

óxido de zinco com tensão nominal 24kV, ligados entre fases e terra, com tensão residual máxima igual a 54kV ($0,22 \times \text{BIL}$) para uma corrente de descarga de 5kA com forma de onda 8/20 μs . A distância elétrica entre os cubículos de surto e as buchas de 18kV influi no sentido de reduzir o nível de proteção dos enrolamentos de 18kV para as sobretensões transitórias de alta frequência que podem eventualmente ocorrer entre os terminais X1 e X2 dos transformadores elevadores.



(a)



(b)

FIGURA 1

TABELA 1 – Nível de Isolamento dos Transformadores Elevadores

Forma de Onda Padronizada	Enrolamento de 500kV	Enrolamento de 18kV
Onda Plena (BIL) 1,2/50 μs	1550kV	250kV
Onda Cortada (CW) 3 μs	1705kV	275kV
Surto de Manobra (SI) 100/1000 μs	1300kV	-

Considerando a importância da UHE Xingó, os custos de uma falha e a experiência com outras instalações do sistema de geração e transmissão da Chesf (1), (2), (3), foram realizados estudos para avaliar preventivamente o risco de falhas dielétricas nos transformadores elevadores decorrente das tensões transitórias de alta frequência geradas pela interação transformador/sistema (4), durante manobras de disjuntores e chaves seccionadoras na subestação ou descargas atmosféricas incidentes nas linhas de transmissão de 500kV e nos links.

Este trabalho apresenta uma síntese da análise realizada, incluindo a metodologia utilizada na avaliação do risco de falhas, os resultados das medições de resposta em frequência no campo, os resultados das simulações digitais e as medidas operativas ou soluções de engenharia identificadas para minimizar o risco de falhas dielétricas nos transformadores elevadores da UHE Xingó.

2.0 - METODOLOGIA DA ANÁLISE DE RISCOS

A metodologia aplicada para a avaliação dos riscos foi baseada no trabalho desenvolvido, e em fase de consolidação, pelo grupo de trabalho conjunto JWG A2/C4-03 do Cigré Brasil, denominado "Interação Elétrica Transitória entre Transformadores e o Sistema de Potência" (4). Este grupo de trabalho iniciou suas atividades em maio de 2005, com a participação efetiva de várias empresas, universidades e fabricantes que atuam no setor elétrico brasileiro.

Para levantar os dados necessários ao estudo visando uma modelagem adequada dos transformadores e a determinação das principais frequências de ressonância dos enrolamentos, são realizadas medições de resposta em frequência em fábrica ou no campo. Através da medição do módulo e ângulo da impedância terminal calculam-se os parâmetros necessários para a modelagem do transformador em altas frequências e através das medições de resposta em frequência determinam-se as principais frequências de ressonância $f_r(i)$ que estão associadas aos picos dos fatores de amplificação $k_a(i)$, para i variando de 1 até n , onde n é o número de frequências de ressonância. O fator de amplificação k_a numa frequência f é definido pela equação 1 onde r_{60} é a relação de transformação 500/18kV na frequência de 60Hz e $V_{18}(f)$ e $V_{500}(f)$ são as tensões medidas nos lados de 18kV e 500kV para um sinal senoidal de frequência f aplicado no lado de 500kV.

$$k_a = r_{60} \times \frac{V_{18}(f)}{V_{500}(f)} \quad (1)$$

Os valores máximos e as formas de onda das tensões transitórias de alta frequência nos terminais de 500kV dos transformadores são calculados através de simulações digitais com o ATP/EMTP (4), (5) e os respectivos espectros de frequências são calculados utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT). O espectro de frequências mostra a densidade espectral do sinal de tensão em função da frequência, permitindo que sejam identificadas as frequências dominantes correspondentes aos picos de densidade espectral.

O espectro de frequências da tensão transitória é comparado com a envoltória definida pelos espectros de frequências das formas de onda padronizadas, que são utilizadas no dimensionamento da isolamento do transformador e são aplicadas nos ensaios dielétricos em laboratório, com os níveis de tensão apresentados na Tabela 1 para o caso em análise. Nesta comparação calcula-se o fator de severidade para cada frequência, definido de acordo com a equação 2, onde $D_t(f)$ é a densidade espectral da tensão transitória calculada e $D_e(f)$ é a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas.

$$F_s = \frac{D_t(f)}{D_e(f)} \quad (2)$$

Existe uma condição de risco para o transformador quando a sobretensão máxima excede a tensão suportável nominal da Tabela 1 multiplicada pelo fator de segurança k_s , e ou quando o fator de severidade numa frequência de ressonância $f_r(i)$ excede o fator de segurança k_s . O fator de segurança deve levar em conta, além dos efeitos das condições de operação e manutenção (O&M) na suportabilidade da isolamento, a dispersão estatística da tensão suportável pela isolamento e o número de aplicações esperado ao longo da vida útil do equipamento. Neste trabalho adotou-se como referência um fator k_s igual a 0,8 para as tensões transitórias pouco frequentes como, por exemplo, as resultantes de descargas atmosféricas, e um fator k_s igual a 0,6 para as tensões transitórias resultantes de manobras de disjuntores e chaves seccionadoras que são realizadas com uma frequência elevada na subestação.

3.0 - ENSAIOS DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Os ensaios de resposta em frequência nos transformadores elevadores da UHE Xingó foram realizados em campo pelo CEPEL (6). Foram ensaiadas duas unidades de 18/500kV – 185MVA de tipos diferentes, uma vez que do total de vinte unidades existentes na usina nove são do tipo TA e as demais do tipo TB. As duas unidades têm diferenças construtivas e de projeto significativas, apesar das mesmas características nominais, destacando-se o tipo construtivo do enrolamento de 500kV, as conexões de saída do enrolamento de 18kV e os fabricantes das buchas de 500kV.

Nos ensaios foi medida a impedância terminal H1-H0 em função da frequência (módulo e ângulo), com os terminais X1 e X2 abertos e o terminal H0 aterrado, e o fator de amplificação entre os terminais de 18kV (X1-X2), para um sinal de tensão senoidal aplicado no terminal H1 com o terminal H0 aterrado. As medições foram realizadas com o comutador na posição 512,5kV que é a posição de operação na usina.

A Figura 2 mostra os módulos das impedâncias medidas nos transformadores TA e TB. As impedâncias têm um comportamento capacitivo na faixa de 340Hz a 725kHz e 340Hz a 543kHz, respectivamente. Nesta faixa de frequências os transformadores TA e TB podem ser representados por capacitâncias equivalentes iguais a 3600pF e 4400pF, respectivamente. Esses valores de capacitância diferem dos medidos nos ensaios de fator de potência do isolamento.

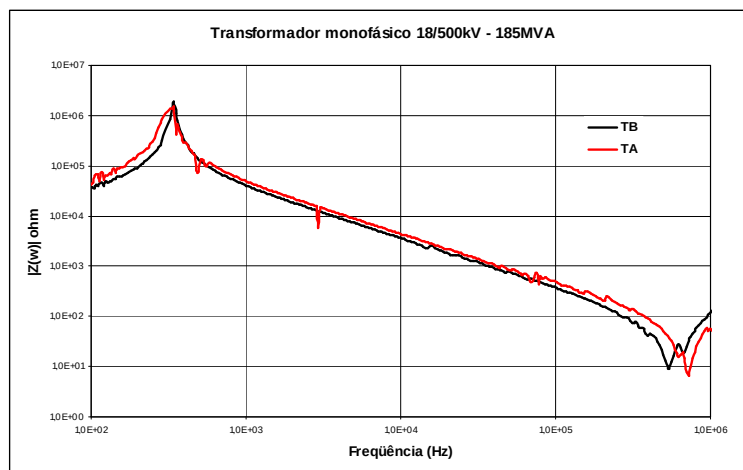


FIGURA 2 – Módulo da impedância terminal H1-H0 medida

A Figura 3 mostra os módulos dos fatores de amplificação medidos nas duas unidades. No transformador TA podem ser identificadas duas faixas de frequências com fatores de amplificação importantes. A primeira faixa está situada entre 62kHz e 75kHz, com um fator de amplificação máximo igual a 8,15pu em 66kHz, e a segunda faixa entre 533kHz e 672kHz, com um fator de amplificação máximo igual a 12,37pu em 599kHz. No caso do transformador TB podem ser identificadas três faixas de frequências com fatores de amplificação importantes, sendo a primeira faixa situada entre 133kHz e 149kHz, com um fator de amplificação máximo igual a 8,56pu em 141kHz, a segunda faixa entre 299kHz e 336kHz, com um fator de amplificação máximo igual a 9,06pu em 317kHz e a terceira faixa entre 599kHz e 712kHz, com um fator de amplificação máximo igual a 9,90pu em 672kHz.

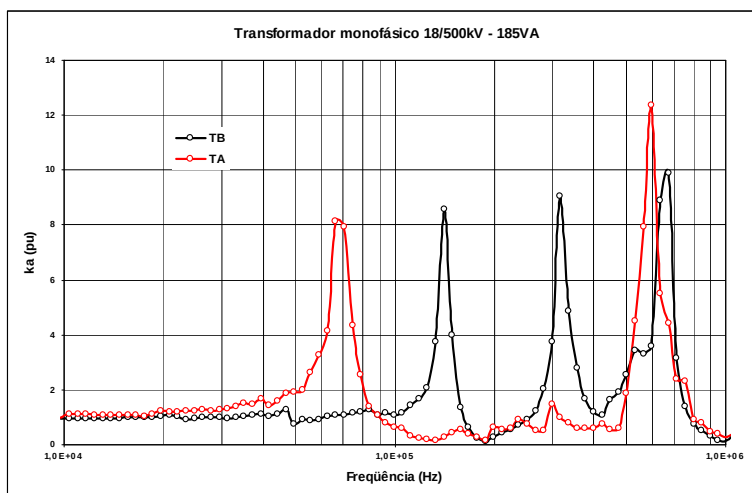


FIGURA 3 – Fator de amplificação medido X1-X2

Apesar das mesmas características nominais, na faixa de frequências de 10kHz a 1MHz as duas unidades ensaiadas apresentaram comportamentos bastante distintos em termos de resposta em frequência. A Tabela 2 apresenta um resumo das faixas de frequências de ressonância medidas.

TABELA 2 – Frequência de ressonância dos transformadores TA e TB

Transformador	Faixa de frequências (kHz)	Fator de Amplificação	
		Fator k_a (pu)	Frequência f_r (kHz)
TA	62 – 75	8,15	66
	533 – 672	12,4	599
TB	133 – 149	8,56	141
	299 – 336	9,06	317
	599 – 712	9,90	672

4.0 - SIMULAÇÕES DIGITAIS NO ATP/EMTP

4.1 Modelos Utilizados

Foram simulados vários casos de manobras de chaves seccionadoras e disjuntores e de descargas atmosféricas incidentes nas torres das linhas de transmissão e dos links, para calcular as tensões transitórias de alta frequência nos terminais dos transformadores elevadores. As manobras simuladas foram selecionadas com base nos procedimentos operativos vigentes.

Para a simulação de fenômenos transitórios de alta frequência em subestações isoladas a ar (AIS), é necessário utilizar uma modelagem adequada com uma representação dos componentes da rede que seja válida para a faixa de frequências dos fenômenos que estão sendo analisados. Neste estudo, de uma forma geral, foram utilizados modelos construídos com base em recomendações de guias e práticas já existentes (7), (8), (9), (10).

As linhas de transmissão de 500kV e os links foram representados no ATP utilizando o modelo de linha multifásica não transposta (K. C. Lee Line Model), com parâmetros distribuídos calculados para uma frequência de 100kHz, com os cabos pára-raios e de fase explícitos no modelo. O setor de 500kV da subestação foi representado detalhadamente utilizando as informações dos desenhos de arranjo físico, planta e cortes, com os vários trechos de barramento representados por linhas de transmissão trifásicas transpostas com parâmetros distribuídos calculados para uma frequência de 100kHz.

No modelo dos pára-raios de 420kV, instalados nas entradas de linha e dos links na subestação, e no lado da usina para proteção dos transformadores elevadores, foram levados em conta os efeitos da indutância do cabo de aterramento ($1\mu\text{H/m}$) e da variação da tensão residual em função da taxa de crescimento da corrente de descarga (9), (10).

4.2 Manobras de Chaves Seccionadoras e Disjuntores

De uma forma geral, nas simulações de manobras de chaves seccionadoras e disjuntores na subestação os valores máximos das tensões transitórias calculadas não representam uma solicitação significativa para a isolação dos transformadores e os fatores de severidade calculados F_s não ultrapassam o fator de segurança k_s . Entretanto, nas manobras das chaves seccionadoras associadas aos disjuntores de barra dos links e aos disjuntores centrais, as simulações mostram tensões transitórias com $F_s > k_s$ em frequências próximas ou contidas nas faixas de frequências de ressonância dos transformadores TB.

Os transformadores de diferentes posições operacionais são submetidos a diferentes solicitações e as manobras de diferentes chaves seccionadoras provocam diferentes solicitações no mesmo transformador, sendo mais severa a manobra da chave 5 com o disjuntor de barra do link e a respectiva chave 4 abertos. Os transformadores mais solicitados nesta manobra são os transformadores TB instalados nas posições operacionais 01T2 e 01T3.

A Figura 4 mostra as formas de onda das tensões transitórias fase-terra calculadas numa fase do transformador 01T3, para a manobra de abertura com reacendimento do arco na chave 35G3-5, com o disjuntor 15G3 e a chave 35G3-4 abertos, e para a manobra na sequência inversa, ou seja, abertura com reacendimento na chave 35G3-4 com a chave 35G3-5 aberta. A Figura 5 mostra o espectro de frequências da tensão transitória calculada na primeira manobra, incluindo também a envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, com os níveis de tensão apresentados da Tabela 1.

Nesta manobra o valor máximo da tensão transitória calculada no transformador 01T3 atinge apenas 1,28pu na base da tensão nominal do enrolamento, mas ocorrem fatores de severidade elevados em algumas frequências.

Na frequência de 213kHz a densidade espectral excede a envoltória definida pelas formas de onda padronizadas e os fatores de severidade nas frequências de 124kHz e 337kHz atingem 0,70 e 0,61, respectivamente, excedendo o fator de segurança k_s . Com os disjuntores 15G2 e 15D2 abertos (01G2 fora de operação), o fator de severidade na frequência de 341kHz aumenta para 0,82 e com a chave de carrier dos transformadores de potencial capacitivos (TPC) do link aberta, os fatores de severidade nas frequências de 144kHz e 335kHz aumentam para 0,95 e 0,91, respectivamente. Essas frequências são muito próximas de frequências de ressonância do transformador TB, indicando uma possível condição de risco para este tipo de transformador instalado na posição 01T3.

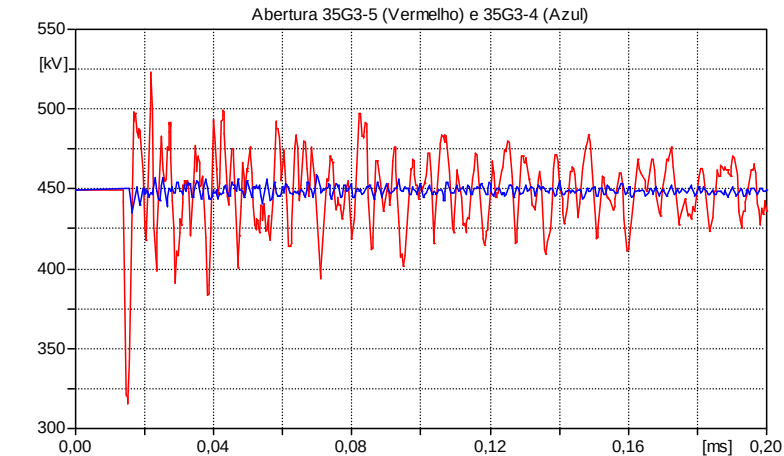


FIGURA 4 – Forma de onda da tensão transitória calculada no terminal H1

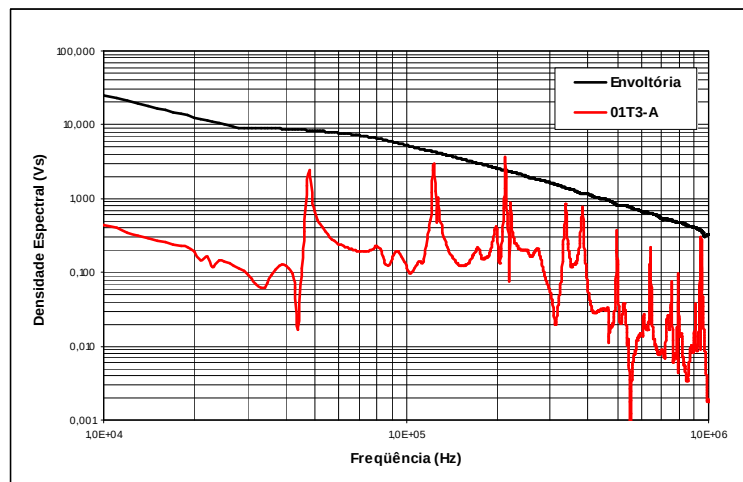


FIGURA 5 – Espectro de frequências da tensão transitória

Os resultados das simulações realizadas mostram uma influência importante da sequência de manobras, do estado (aberto/fechado) dos disjuntores da subestação e do estado (aberto/fechado) da chave de carrier dos TPC dos links. As solicitações impostas aos transformadores elevadores durante manobras de chaves seccionadoras e disjuntores podem ser minimizadas com uma sequência de manobras adequada e com os TPC dos links operando com a chave de carrier fechada.

4.3 Descargas Atmosféricas nas Linhas de Transmissão e nos Links

Foram simuladas descargas atmosféricas nas linhas de transmissão de 500kV derivadas da subestação e nos links entre a subestação e a usina, atingindo os cabos de fase ou o topo da torre, na estrutura mais próxima da subestação. Apesar do comprimento relativamente curto, considerando as dimensões das torres, o comprimento médio do link e o nível cerâmico médio para a região, estima-se que uma descarga atmosférica atinge os links a cada 1,4 anos e, portanto, os riscos associados a este tipo de evento não devem ser desprezados.

De uma forma geral, para as descargas atmosféricas incidentes nas linhas de transmissão os resultados das simulações não indicaram tensões transitórias significativas. Entretanto, para descargas atmosféricas nas linhas

de transmissão 05V5 e 05V6, com ou sem flashover nas cadeias de isoladores, foram verificadas tensões transitórias com fatores de severidade acima do limite em algumas faixas de frequências contidas nas faixas de frequências de ressonância dos transformadores TA e TB, apesar do valor máximo instantâneo bem abaixo do limite de referência. O risco associado a essas solicitações pode ser minimizado com a instalação do segundo cabo pára-raios na linha de transmissão 05V5 e com a redução da impedância de surto do aterramento das torres mais próximas da subestação.

Para descargas atmosféricas incidentes nos links, os resultados das simulações indicaram tensões transitórias com valores máximos ou fatores de severidade acima dos limites em faixas de frequências de ressonância dos transformadores TA e TB. Em termos de sobretensão máxima, os transformadores da posição 01T3 são os mais solicitados, com a sobretensão máxima calculada atingindo $1,19 \times \text{BIL}$. Nos transformadores das posições 01T5 e 01T4 foram observados fatores de severidade elevados na frequência de 317kHz quando a descarga atmosférica provoca flashover na cadeia de isoladores do pórtico de entrada na usina.

A Figura 6 mostra a forma de onda da tensão fase-terra calculada em uma fase do transformador 01T5 para uma descarga atmosférica atingindo o cabo de fase do link 05G5, com amplitude 18kA e forma de onda $1/70\mu\text{s}$, sem flashover nas cadeias de isoladores. A tensão máxima atinge $1,17 \times \text{BIL}$, excedendo o limite de referência. A Figura 7 mostra o espectro de frequências da tensão transitória calculada para esta descarga atmosférica, incluindo também a envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, com os níveis de tensão da Tabela 1. Os fatores de severidade atingem 1,22, 8,30 e 1,45 nas frequências de 141kHz, 541kHz e 705kHz, respectivamente, sendo igual a 0,93 na frequência de 317kHz.

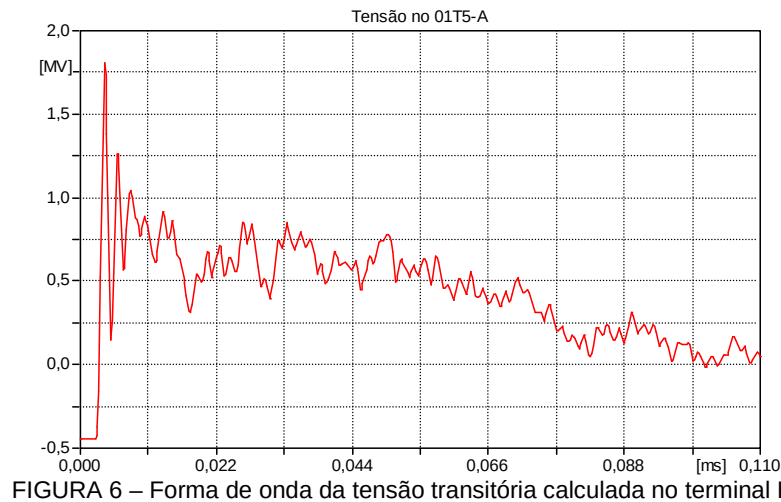


FIGURA 6 – Forma de onda da tensão transitória calculada no terminal H1

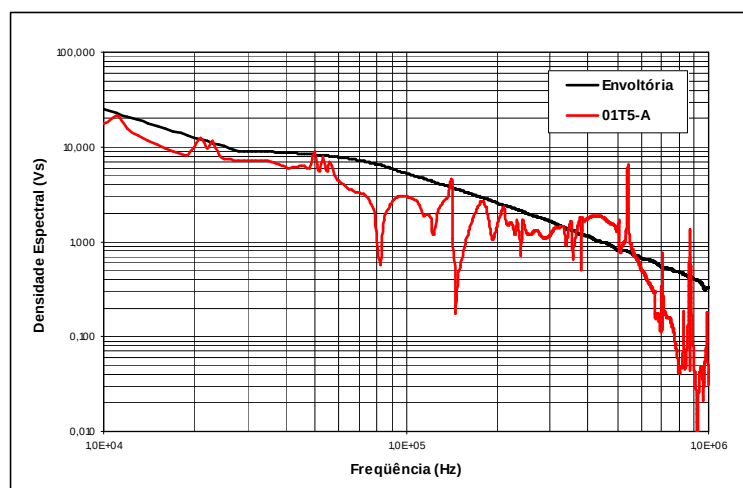


FIGURA 7 – Espectro de frequências da tensão transitória

As simulações indicam que a sobretensão máxima nos terminais dos transformadores elevadores pode ser reduzida através de um conjunto de medidas que incluem: (i) redução da impedância de surto do aterramento das torres dos links; (ii) redução da indutância dos cabos de aterramento dos pára-raios da usina; (iii) inversão da

posição das chaves de aterramento e dos pára-raios da usina; (iv) substituição dos pára-raios de 420kV por outros de menor tensão nominal ou instalação de pára-raios de linha de óxido de zinco em paralelo com as cadeias de isoladores do pórtico de entrada da usina e das torres dos links mais próximas da usina. As simulações mostram que com essas medidas também podem ser reduzidas às densidades espectrais nas faixas de frequências de ressonância dos transformadores TA e TB.

5.0 - CONCLUSÃO

As análises realizadas utilizando a metodologia descrita permitiram identificar algumas manobras de chaves seccionadoras na subestação e algumas descargas atmosféricas, nas linhas de transmissão ou nos links, que podem gerar tensões transitórias de alta frequência nos terminais de 500kV dos transformadores elevadores com valor máximo acima do limite de segurança ou com densidade espectral elevada em frequências próximas das frequências de ressonância medidas. A forma de onda, a amplitude e o espectro de frequências dessas tensões transitórias são influenciados pelo arranjo físico, pela configuração de operação e pelas características da instalação e, também, pelas características de impedância e resposta em frequência do transformador.

As solicitações críticas identificadas podem exceder as aplicadas nos ensaios dielétricos em laboratório com as formas de onda padronizadas e superar os níveis considerados seguros, mesmo com a atuação dos pára-raios de óxido de zinco que protegem os transformadores. Com essas solicitações pode ocorrer uma falha dielétrica em pontos internos, especialmente na estrutura da isolação submetida à diferença de potencial aplicada entre os terminais X1 e X2, dependendo da suportabilidade que é influenciada pelas condições da isolação.

Para minimizar as solicitações e o risco de falhas dielétricas decorrentes das manobras de chaves seccionadoras, podem ser adotadas medidas operativas simples como a padronização da sequência de manobras e a operação dos transformadores de potencial capacitivos dos links com a chave de carrier fechada. Para as solicitações originadas pelas descargas atmosféricas que atingem os links ou as linhas de transmissão, próximo da subestação, é necessário realizar estudos de engenharia para analisar alternativas que demandam algum investimento e ou alterações de arranjo físico.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MEDEIROS, R. K. D. M., FREIRE, A. R. F., PENA, M. C. M., "Estudo de Tensões Transitórias de Alta Frequência para a Subestação Luiz Gonzaga 500kV", XII ERIAC, CE C4, Foz do Iguaçu – PR, Brasil, Maio de 2007.
- (2) FEIRE, A. R. F., PENA, M. C. M., MENDES, J. C., "Estudo de Tensões Transitórias de Alta Frequência para Subsidiar o Diagnóstico das Causas das Falhas de Reatores de 500kV", XIX SNPTTE, GSC-19, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, Outubro de 2007.
- (3) FREIRE, A. R. F., PENA, M. C. M., "High Frequency Transient Voltages Study and Specifications Requirements for Transformers", Proceedings of the 74th Annual International Doble Client Conference, Boston, USA, 2007.
- (4) ROCHA, A. C. O., "Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System", CIGRE Bienal Session, Paper C4-104, Paris, France, August 2008.
- (5) LEUVEN EMTP CENTER, "ATP – Alternative Transients Program – Rule Book", Herverlee, Belgium, July 1987.
- (6) SILVA, A. N., MARTINS, H. J. A., CERQUEIRA, W. R., "Caracterização no Domínio da Frequência de Dois Transformadores Monofásicos, 18/512,5kV, 185MVA, UHE Xingó da CHESF", Relatório CEPEL DIE-40.785/2008, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 2008.
- (7) NODA, T., et ali, "The Measurement and Analysis of Surge Characteristics using Miniature Model of Air Insulated Substation", International Conference on Power Systems Transients (IPST), Paper 051, Montreal, Canada, June 2005.
- (8) AMETANI, A., KAWAMURA, T., "A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan using EMTP", IEEE Trans. on Power Delivery, April 2005.
- (9) IEC DRAFT 60071-4, "Insulation Coordination – Part 4: Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modelling of Electrical Networks", Geneva, 2001.
- (10) IEEE Task Force on Modeling and Analysis of System Transients, "Modelling Guidelines for Fast Front Transients", IEEE Trans. on Power Delivery, January 1996.