

Estudo da Propagação de Surtos de Alta Frequência, Devido a Manobras de Chaves Seccionadoras em Subestação Blindada e Isolada a Gás SF₆

L.C. Zanetta Jr, E. Azzari, C.E.M. Pereira, PEA-EPUSP,
C. Machado Jr, A.J.A. Amoras, J.C.V. Costa, ELETRONORTE

Resumo - Este artigo apresenta os resultados do estudo de medidas corretivas para redução de sobretensões causadas por manobras de chaves seccionadoras na GIS de Tucuruí. Os estudos foram realizados com o programa ATP usando diferentes níveis de detalhamento do modelamento dos componentes da GIS, como chave, disjuntor e transformador. A análise de resultados permitiu a proposição de medidas para redução das sobretensões, como o uso de resistor de inserção na chave seccionadora, com conseqüente redução de risco de dano aos transformadores.

Palavras-chave— sobretensões, transformadores, transitórios, GIS, chave seccionadora.

I. INTRODUÇÃO

Após a entrada em operação das unidades geradoras de 330 MW de Tucuruí em 1984 foram observadas algumas anormalidades advindas das manobras de chaves seccionadoras na SE blindada a SF₆. Em conseqüência de simulações efetuadas [5], [10] com o EMTP em 1987, ensaios de campo realizados pelo CEPEL em 1991 e da análise desses trabalhos, foram implantadas diversas soluções pelas áreas de manutenção da Eletronorte e por parte dos fabricantes para minimizar os efeitos das manobras de seccionadoras, adotados cuidados adicionais de segurança quando da operação das mesmas, e ainda estabelecida restrição operativa de só manobrar a seccionadora com a unidade geradora correspondente parada.

Os ensaios então realizados pelo CEPEL evidenciaram valores máximos de sobretensão no ponto de medição (chave seccionadora) de 1,52 pu com o gerador G4 parado e de 1,63 pu na condição de oposição de fases. Estes valores são bastante baixos frente ao NBI (3,80 pu) dos equipamentos associados a SE blindada. A elevação transitória do potencial de terra verificado nos ensaios foi de no máximo 32,3 kV de pico na estrutura suporte da bucha SF₆/Ar com duração de 2 microsegundos, o que justificou a adoção de cuidados especiais com a segurança do pessoal.

Considerando a inerente característica estatística dos resultados obtidos nos ensaios, os valores máximos registrados não correspondem aos valores máximos possíveis de

ocorrerem, e para uma avaliação mais precisa da amplitude das solicitações dielétricas a que os equipamentos possam vir a ser submetidos, as simulações digitais representaram uma importante ferramenta de análise. Os resultados das simulações comparados com os resultados obtidos nos ensaios indicaram naquele trabalho uma razoável consistência da modelagem da GIS no ATP validando os modelos então utilizados.

O principal fator desde os primeiros estudos que determinou a adoção da restrição da manobra da chave com o gerador em operação foi a elevada taxa de crescimento da tensão, observada tanto nos ensaios quanto nas simulações, e que indicaram taxas de crescimento muito maiores do que aquelas provocadas por surtos atmosféricos.

São relatadas na referência [11] três principais ocorrências (em maio 1988, junho de 1988 e outubro de 1994) envolvendo falha nos transformadores em conseqüência da manobra de seccionadoras, sendo que em duas delas os transformadores foram completamente destruídos. Os estudos então realizados pela Eletronorte e ABB, baseados em simulações via ATP com modelo de transformador para altas frequências, evidenciaram significativas solicitações impostas à isolação interna dos enrolamentos e importantes ressonâncias para frequências de 1.5, 1.9 e 2.5 MHz.

As restrições operativas desde então estabelecidas em conseqüência das sobretensões transitórias de alta frequência associadas às manobras de chaves seccionadoras causam sérias dificuldades na operação do sistema.

O desenvolvimento de modelo do transformador para altas frequências [2] permitiu aprimorar o entendimento do fenômeno e quantificar com maior precisão as amplitudes e formas de onda das sobretensões transitórias rápidas às quais esses equipamentos são submetidos quando da manobra das chaves. Neste modelo, o transformador é representado em detalhes, através das capacitâncias (séries e paralelas), indutâncias (próprias e mútuas) e resistências. Dessa forma, para um transformador específico e determinada configuração da GIS, a análise das simulações relativas às manobras de chaves, podem contribuir significativamente para o adequado projeto do enrolamento e isolação interna do transformador, bem como permitir para instalações já existentes a avaliação de medidas mitigatórias que possibilitem reduzir o risco e as conseqüências das manobras das seccio-

nadoras.

Uma interessante alternativa proposta na literatura para a supressão das sobretensões transitórias de alta frequência, e apresentada na referência [8] para GIS de tensão 1100 kV é a instalação de resistores fixados nas chaves seccionadoras. Com base no exposto naquela referência, avaliamos nesse trabalho o efeito da utilização de resistores nas chaves seccionadoras sobre a amplitude e forma de onda das sobretensões transitórias na GIS de Tucuruí.

O fenômeno denominado TGPR (Transient Ground Potential Rise) é relatado na literatura principalmente associado às subestações blindadas à SF6, com potenciais da ordem de 100 kV ou mais nos invólucros dessas SE's.

Uma das principais fontes de TGPR é a manobra de seccionadoras. Entretanto, em estudos de transitórios associados a manobras de seccionadoras em GIS, onde se queira apenas avaliar as sobretensões internas ao condutor encapsulado, normalmente, não é considerada a representação do invólucro do barramento.

A modelagem do invólucro é avaliada e também o efeito dessa representação sobre o cálculo das sobretensões internas através do ATP. Considerando a possibilidade de representação do invólucro, é ainda investigado o efeito de varistores ou pequenos pára-raios de ZnO acoplados às blindagens no cálculo das sobretensões transitórias internas. É observado que a utilização de pára-raios de ZnO acoplados à blindagem da GIS altera e atenua também as sobretensões verificadas no barramento encapsulado.

II. REVISÃO DA LITERATURA

A. Modelagem das blindagens

A malha de aterramento da GIS e as conexões dos equipamentos a esta malha são dimensionadas para escoar as correntes de curto-circuito à frequência industrial, sem risco à segurança pessoal. Normalmente, as características mais relevantes deste sistema são a suportabilidade térmica à corrente de curto-circuito e a impedância à frequência industrial. Entretanto, as impedâncias deste sistema de aterramento são principalmente indutivas e, portanto, aumentam com a frequência. Por outro lado, a impedância entre partes energizadas e aterradas decrescem com o aumento da frequência porque têm uma característica capacitiva.

Na faixa de MHz a impedância de aterramento se eleva significativamente, enquanto decresce a impedância entre partes energizadas e partes aterradas. A razão entre estas impedâncias se eleva tanto que não obstante os baixos valores de correntes envolvidas, a elevação de potencial das partes aterradas pode alcançar 100 kV ou mais.

Para a modelagem do invólucro em simulações através do ATP, são propostas na referência [4] algumas alternativas, dentre as quais a utilização de modelos de linhas multifásicos não transpostos onde para o sistema condutor e invólucro, podemos ter uma linha bifásica onde o condutor energizado é a fase 1 e o invólucro a fase 2, não transpostos, sendo distintas as impedâncias de surto correspondentes às fases 1 e 2.

O diagrama unifilar para o trecho estudado é apresentado

na figura 1 a seguir:

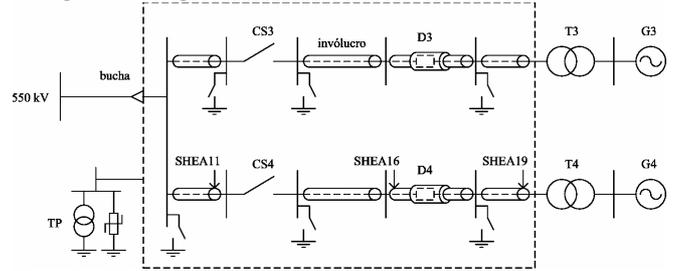


Figura 1 – Diagrama unifilar do trecho estudado da GIS.

B. Modelagem do transformador para altas frequências

Neste modelo, fornecido pela Eletronorte, o transformador é representado em detalhes, através das capacitâncias (séries e paralelas), indutâncias (próprias e mútuas) e resistências.

Através de simulações no ATP com esse modelo, é possível determinar as sobretensões de alta frequência, resultantes das manobras de chaves, a que o transformador é submetido nos seus terminais e nos seus enrolamentos internos.

Portanto, para um transformador específico e determinada configuração da GIS, a análise das simulações relativas às manobras de chaves pode ser utilizada para o adequado projeto do enrolamento e isolamento interno do transformador, pois as solicitações locais na isolamento entre espiras e bobinas adjacentes dos enrolamentos podem ser determinadas e comparadas com os limites de suportabilidade da isolamento local correspondente.

Dessa forma, a simulação das manobras de chaves, interagindo com o modelo da GIS com o modelo detalhado do transformador permite ainda a verificação da coordenação de isolamento e a análise de medidas que possibilitem reduzir a severidade das sobretensões impostas por essas manobras.

Para o presente estudo os parâmetros utilizados para a modelagem do transformador foram fornecidos pela Eletronorte e são equivalentes ao do transformador de Tucuruí em análise nesse trabalho.

C. Modelagem de resistor na chave seccionadora.

A referência [8] comprova, através de simulações digitais e ensaios, a efetiva redução das sobretensões transitórias de alta frequência devidas à manobra de chaves seccionadoras em uma GIS 1100 kV com a utilização de resistores instalados nas chaves.

A chave seccionadora é projetada para conectar um resistor (acoplado lateralmente ao contato estacionário) em série com o circuito no momento da descarga, não tendo esse resistor contato mecânico com o contato móvel (figura 2).

As simulações efetuadas naquele trabalho, variando os valores dos resistores entre 200 ohm e 1000 ohm, reduziram as máximas sobretensões na GIS de 2,8 pu para quase 1,0 pu em uma determinada condição de chaveamento. Quanto maior o valor do resistor maior o valor de energia dissipada. Quanto maior o valor da capacitância do lado de carga também maior o valor da energia dissipada.

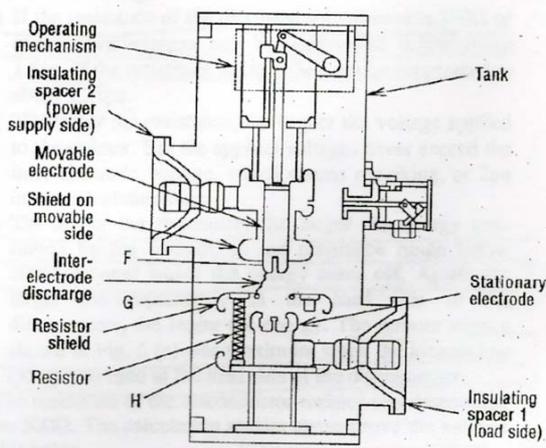


Figura 2 – Resistor fixado à chave seccionadora.

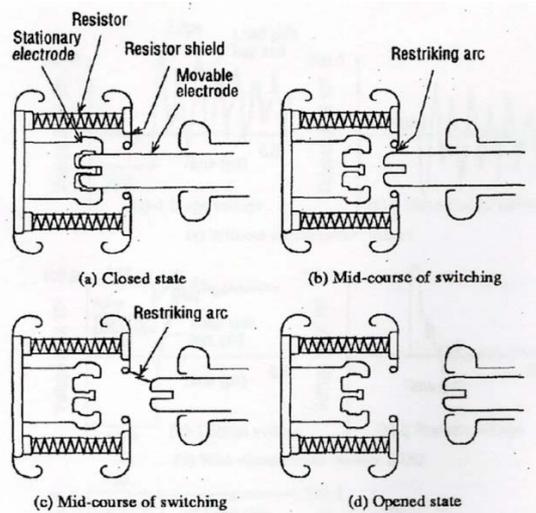


Figura 3 – Ilustração do chaveamento com o resistor fixado à chave seccionadora.

Como as descargas ocorrem até que os contatos estejam suficientemente afastados, deve-se avaliar a energia total dissipada nas repetidas descargas, e a capacidade do resistor em absorver essa energia.

D. Modelagem de pára-raios de ZnO acoplados às blindagens e ao barramento

As simulações realizadas indicaram, que a representação de pára-raios de ZnO interligados entre os encapsulamentos, bem como acoplados da blindagem para a terra, influem significativamente não somente nos máximos valores de TGPR no encapsulamento, bem como reduzem as máximas sobretensões calculadas no interior da GIS. Para os casos processados, com conjuntos de pára-raios de tensão nominal 5 kV e 30 kV foram registradas reduções das máximas sobretensões da ordem de 9,2% a 11,0%.

A referência [7] através de simulações e ensaios de campo apresenta medidas para a redução dos valores de TGPR no encapsulamento de 100 kV para valores da ordem de 30 kV, com a utilização de pára-raios de ZnO acoplados às blindagens de uma GIS em 1000 kV.

A referência [9] indica que a presença de pára-raios de ZnO nos barramentos é uma medida adequada para proteger o transformador de sobretensões ressonantes na faixa de MHz. Entretanto, a referência [9] ressalta que essa medida

nem sempre é efetiva ou mesmo possível.

III. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O caso base adotado foi o da manobra da seccionadora do bay do trafo 4, estando a unidade 4 fora de serviço (caso próximo ao da figura 7 da referência [5]), e a unidade 3 energizada. Não foram consideradas cargas residuais nos barramentos.

A. Modelagem das blindagens

A máxima sobretensão transitória calculada para um ponto próximo da chave manobrada (PMC) é de 572 kV.

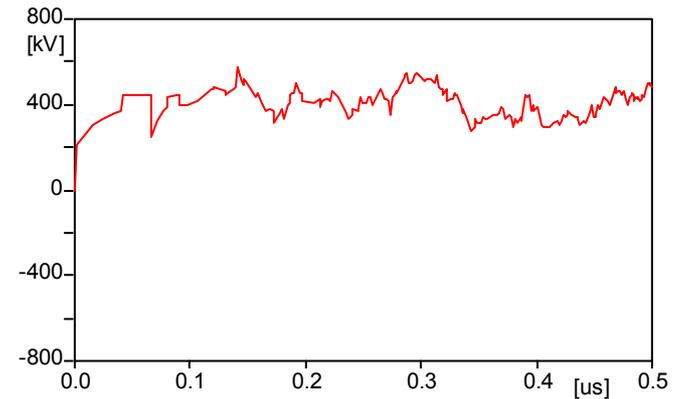


Figura 4 – Sobretensão próxima à chave seccionadora – sem invólucro.

A simulação do mesmo caso, porém, com a representação dos invólucros (não interligados), apresentou valores máximos de sobretensão transitória mais elevados da ordem de +8,7 %, atingindo 622 kV na chave manobrada. Observa-se também uma alteração na forma de onda como pode ser vista abaixo.

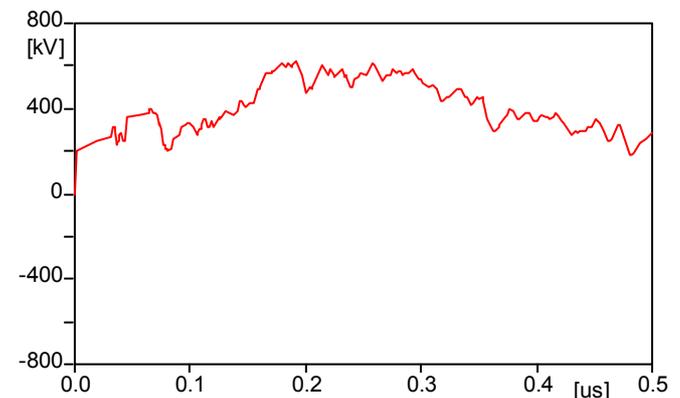
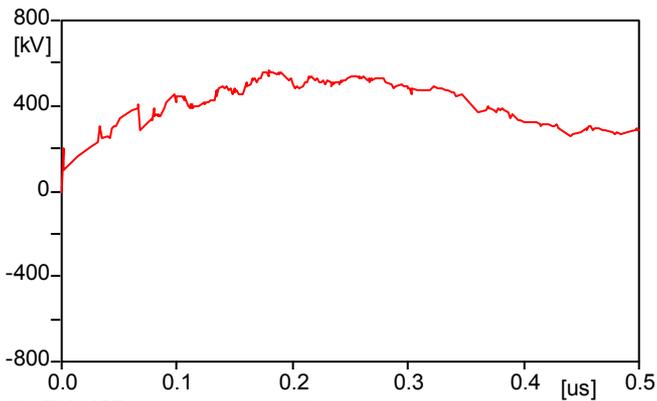


Figura 5 – Sobretensão próxima à chave seccionadora – com invólucro.

As sobretensões registradas nos invólucros estão entre 40 kV a 90 kV e, portanto, são da ordem de grandeza indicada na literatura pesquisada.

Com a representação dos invólucros e de pára-raios de 5 kV interligando os invólucros e outros pára-raios de 5 kV para a terra próximos ao disjuntor e ao trafo, reduziram-se os valores máximos de sobretensão transitória próxima a chave para 565,0 kV (-9,2%).



(file TUC13PR.pl4; x-var t) v: PMC

Figura 6 – Sobretensão próximo à chave seccionadora –com ZnO e invólucro.

B. Influência do resistor em série com a chave seccionadora

De forma similar ao exposto na referência [8], nas simulações aqui efetuadas considerando-se a utilização de resistor em série com a chave seccionadora, observou-se uma efetiva redução das sobretensões transitórias de alta frequência de 1,84 pu para valores próximos de até 1,17 pu quando utilizado um resistor de 400 Ohm na chave.

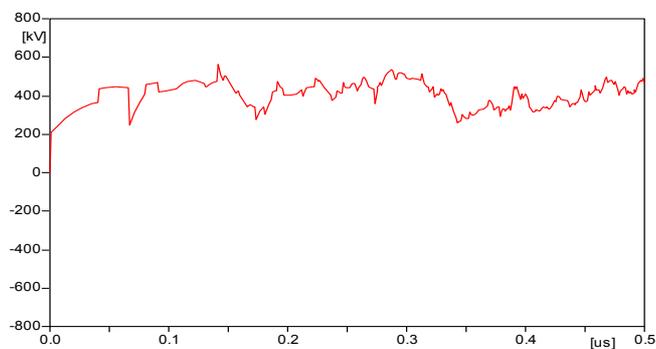
Para comparação de resultados foi considerado o caso base de manobra da seccionadora do bay do gerador 4 em condição de oposição de fases. Inicialmente não foi considerado o modelo de trafo para alta frequência.

C. Modelagem do transformador para altas frequências.

A adequada modelagem do transformador para altas frequências permite observar a amplitude e as taxas de crescimento da tensão na bucha de entrada do transformador e em pontos internos do enrolamento. Além disso é possível identificar a natureza de possíveis condições ressonantes em consequência da excitação inicial causada pela manobra das chaves.

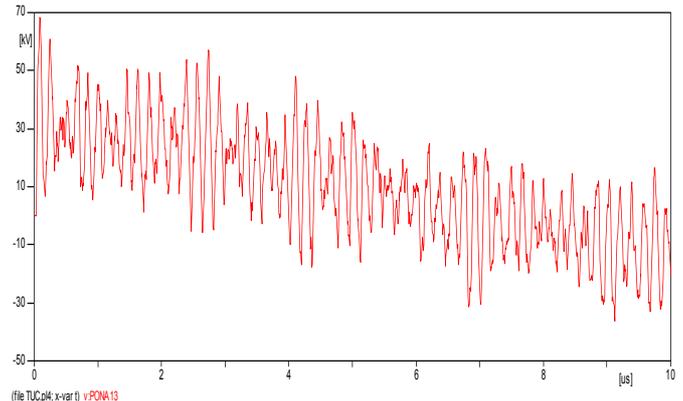
Para o caso simulado com o gerador 4 fora de serviço, embora a amplitude da tensão na bucha de entrada do transformador não seja elevada (0,17 pu), registra-se uma taxa de crescimento da tensão da ordem de 750 kV/ μ s e uma possível condição ressonante em torno de 5,55 MHz.

Modelagem básica com o gerador 4 fora de serviço:



(file TUC.pl4; x-var t) v: PMC

Figura 7 – Tensão na chave seccionadora 562,6 kV em 0,141 μ s.



(file TUC.pl4; x-var t) v: PONA13

Figura 8 – Tensão na alta do transformador 68,1 kV em 0,090 μ s.

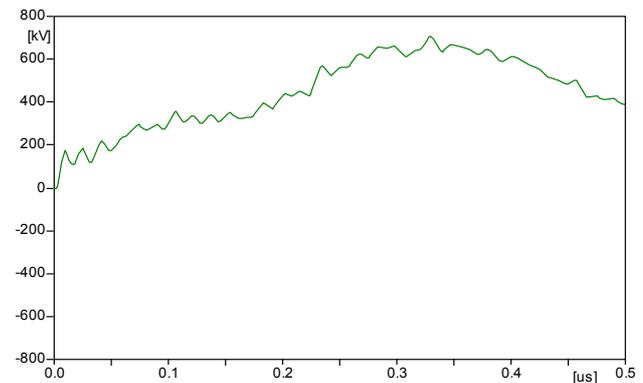
D. Influência da modelagem da chave seccionadora e do disjuntor

A qualidade da simulação depende da qualidade do modelo de cada componente da GIS. Sendo assim, a modelagem da chave seccionadora e do disjuntor foram alteradas de acordo com os parâmetros fornecidos pela Eletronorte. Para os casos identificados a seguir as simulações foram realizadas considerando-se também a modelagem do transformador para altas frequências, conforme apresentado em 3.3.

E. Modelagem completa

As simulações apresentadas a seguir foram realizadas considerando a modelagem do transformador para altas frequências, a modelagem detalhada do seccionador e disjuntor, bem como a representação dos encapsulamentos.

Essas simulações foram realizadas sem a conexão de pára-raios ZnO de 5 kV.



(file TUCB.pl4; x-var t) v: FMC

Figura 9 – Tensão na chave seccionadora 776,6 kV em 0,309 μ s.

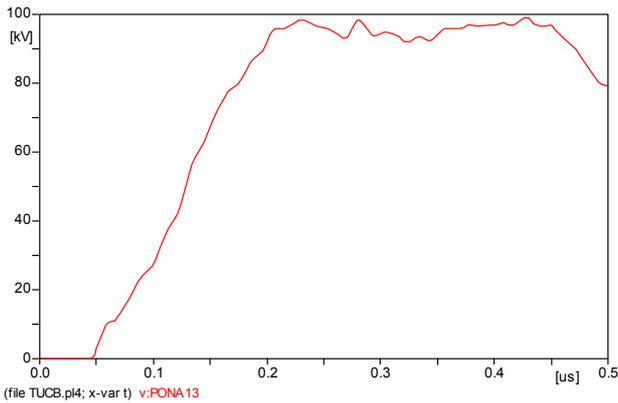


Figura 10 – Tensão na alta do transformador 99,1 kV em 0,427 μ s.

A figura 11 mostra as freqüências ressonantes da ordem de 1,5 MHz e 50kHz:

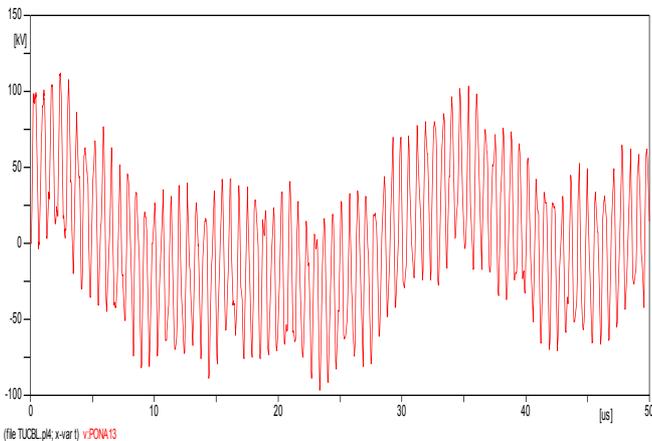


Figura 11 – Tensão na entrada do transformador – alta.

A modelagem completa e detalhada dos equipamentos permite identificar freqüências ressonantes da ordem de 1,5 MHz, como também observado na referência [11]. As amplitudes dessas sobretensões aqui calculadas foram da ordem de 100 kV no transformador e de aproximadamente 80 kV (TGPR) na blindagem da GIS, no ponto de saída.

Foram considerados pára-raios de 5 kV na blindagem para a terra na saída da GIS próxima ao transformador e interligando as blindagens nos trechos de barramento próximos ao ponto PMA.

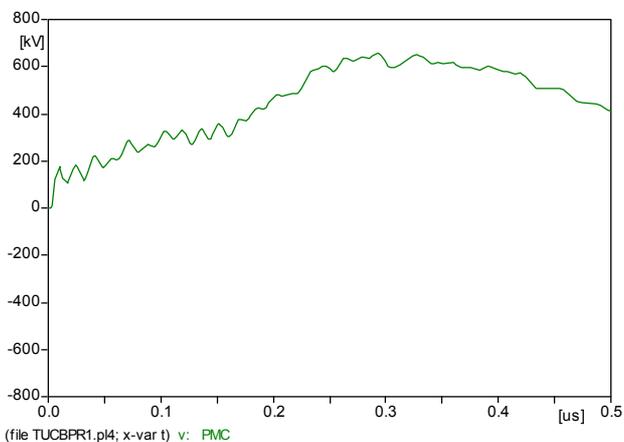


Figura 12 – Tensão na chave seccionadora 655,0 kV em 0,293 μ s.

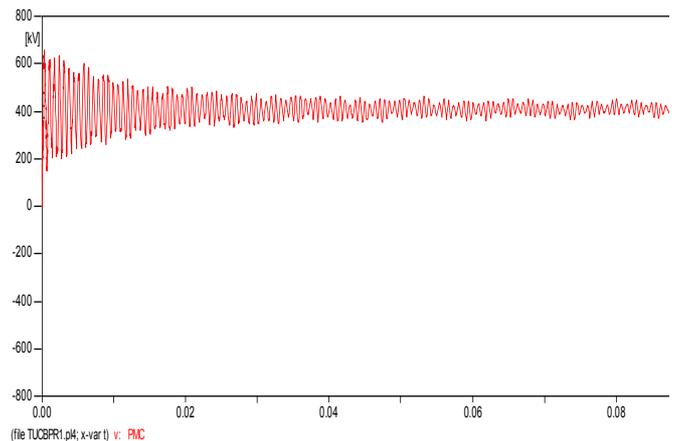


Figura 13 – Tensão na chave seccionadora.

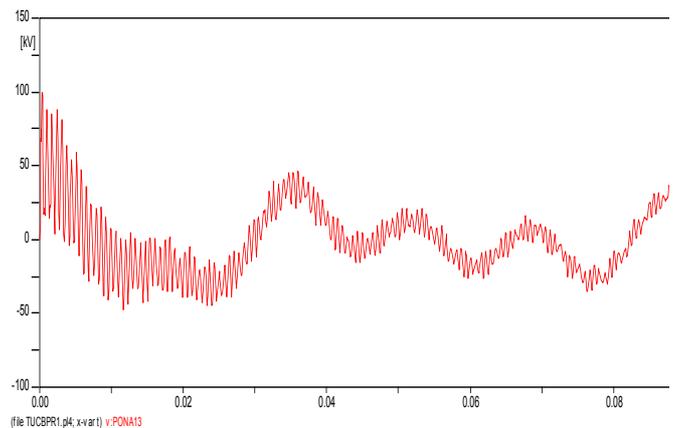


Figura 14 – Tensão na entrada do transformador – alta.

A representação de um maior número de pára-raios de ZnO nas blindagens, reduz ainda mais a amplitude das sobretensões no interior da GIS e aumenta a atenuação da condição de ressonância.

Representando um resistor de 400 Ω na chave:

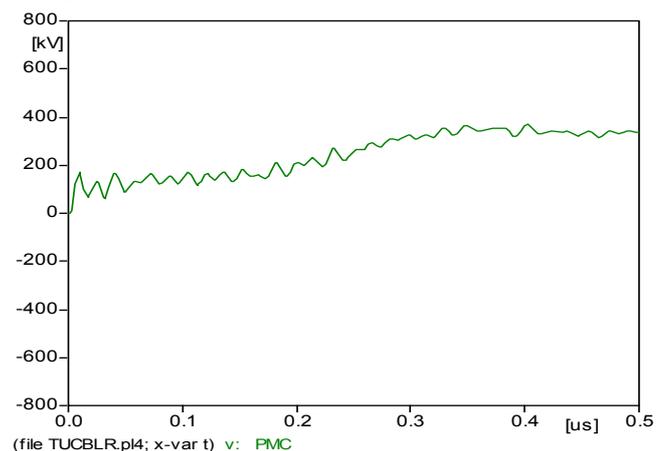
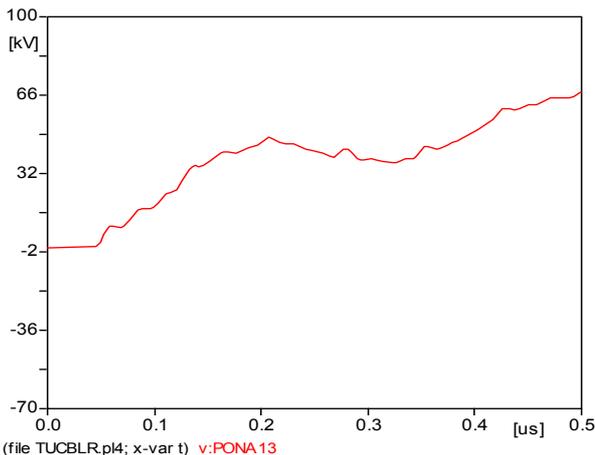
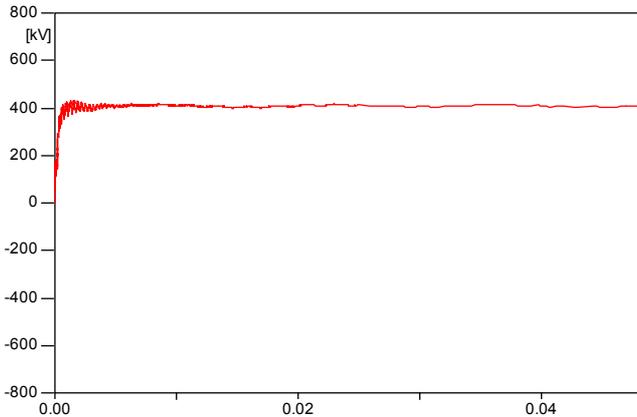


Figura 15 – Tensão na chave seccionadora 431,9 kV em 1,55 μ s.



(file TUCBLR.pl4; x-var t) v: PONA13

Figura 16 – Tensão na alta do transformador 67,1 kV em 0,500 μ s.



(file TUCBLR.pl4; x-var t) v: FMC

Figura 17 – Tensão na chave seccionadora.

A representação do resistor de 400 Ohm eliminou a condição ressonante em 1,5 MHz nos barramentos internos, observando-se apenas a oscilação em 50 KHz citada anteriormente. O resistor na chave não eliminou a sobretensão transitória de alta frequência no encapsulamento.

IV. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As simulações realizadas indicaram, que a representação do invólucro influi na amplitude das sobretensões transitórias calculadas no interior da GIS, e para os casos considerados eleva o máximo valor encontrado em torno de 8,7% a 13,6%.

A representação de pára-raios de ZnO interligados entre os encapsulamentos, bem como acoplados da blindagem para a terra, influem significativamente não somente nos máximos valores de TGPR no encapsulamento, bem como reduzem as máximas sobretensões calculadas no interior da GIS. Para os casos processados, com conjuntos de pára-raios de tensão nominal 5 kV e 30 kV foram registradas reduções das máximas sobretensões da ordem de 9,2% a 11,0%.

Os resultados aqui encontrados permitem recomendar um aprofundamento no estudo do efeito e representação da modelagem de pára-raios de ZnO acoplados às blindagens da GIS em Tucuruí e a reavaliação das máximas sobretensões possíveis de ocorrerem no interior da GIS considerando a utilização desses elementos.

Além da representação dos pára-raios de ZnO, sugere-se uma discussão prévia da modelagem a ser utilizada, para adequação da representação de todos os elementos da GIS de acordo com os modelos e parâmetros já definidos em estudos anteriores pela Eletronorte para chaves, disjuntores, trafos, buchas, etc.

A manobra de chaves seccionadoras na GIS em estudo causa sobretensões transitórias de alta frequência nos barramentos internos e no encapsulamento, as quais conduzem à sobretensões no enrolamento do transformador com ressonância na frequência de 1,5 MHz. Esta ressonância parcial associada a tensão nominal do sistema resulta em uma sobretensão que pode deteriorar a isolamento do enrolamento e causar a sua ruptura dielétrica (ver referências [6] e [12])

A utilização de resistor em série com a chave mostrou ser uma medida efetiva para redução e mesmo eliminação dessas sobretensões no interior da GIS. Entretanto, o resistor na chave não eliminou a sobretensão transitória de alta frequência no encapsulamento.

Além de controlar a sobretensão no encapsulamento, a utilização de pára-raios de ZnO acoplados às blindagens elimina a ressonância no interior da GIS e reduz a amplitude das sobretensões transitórias de alta frequência advindas da manobra das chaves seccionadoras para a configuração avaliada.

Recomenda-se a realização de ensaios de campo com a utilização de pára-raios de ZnO fixados aos encapsulamentos para reprodução e comparação com os resultados das simulações aqui efetuadas.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D'AJUZ, A. et al. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - Aplicação em sistemas de potência de alta tensão 1. ed. Rio de Janeiro, FURNAS Centrais Elétricas S.A., 1987.
- [2] CARVALHO, F.M.S. "Modelagem de subestações isoladas a SF₆ e de seus componentes internos e adjacentes nas simulações em programas digitais para cálculo de sobretensões transitórias de alta frequência: Guia de aplicação," 3^o ERLAC, Anais. Foz de Iguaçu -1989
- [3] ROHRBACH, P.; LACORTE, M.; MENDES J.C.; JUNIOR X.M. "Subestação elevadora 550 kV isolada a gás SF₆ simulações de VFT como suporte no projeto de transformador," Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, XVI SNPTEE, Campinas, Outubro 2001.
- [4] DOMMEL, H.W. Simulation Travelling Waves Inside and Outside GIS Enclosures with the EMTP. University of British Columbia.
- [5] LIMA FILHO, J.F.; BLANCO, F. A. F. P.; D'AJUZ, A.; NASCIMENTO, L. F. A. Tucuruí's 500 kV SF₆ Gas-Insulated Substations Fast Transient Analysis, Modelling and Fields Test Conditions. IPST 95 International Conference on Power Systems Transients. - Lisbon, 3-7 september 1995
- [6] FUJIMOTO, N.; DICK, E.P.; FORD, G.L. Transient Ground Potential Rise in Gas Insulated Substations - Experimental Studies. IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N^o 10 october 1982
- [7] SHIMODA, N. et al. Suppression of Very Fast Transient Overvoltages Across Insulation Flange of 1000kV GIS. High Voltage Engineering Symposium 22-27 August 1999 Conference Publication N^o 467 IEE, 1999.
- [8] YAMAGATA, Y.M.; et all. Suppression of VFT in 1100kV GIS by adopting resistor-fitted disconnector. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N^o 2, April 1996, Pages 872-880.
- [9] HENRIKSEN, E.E.; - Study of Very Fast Transient Overvoltages in Transformers (VFTO). ELECTRA n^o 179 August 1998.
- [10] NASCIMENTO, L.F. de A.; LIMA FILHO, J.F.; SEGOVICE, E.E.; CERQUEIRA FILHO, W.B.; OLIVEIRA FILHO, O.B.; D'AJUZ, A.; FERNANDES, J.H.M.; SANTOS, C.C. - Sobretensões transitórias na

SE Blindada e Isolada a Gás SF6 de 550 kV da UHE Tucuruí, Devido a Manobras de Seccionadoras – Simulação e Medição. XII SNPTEE – Grupo VIII – RE/GSU/04 Recife, 1993.

- [11] JUNIOR, C.M.; DE LIMA Fº, J.F.; PINTO,W.S.; MENDES,J.C.; MARCONDES,R.A. – Tucuruí's Generator Step-Up Transformers Failures Due to Very-Fast Transients in GIS. IPST97 – International Conference on Power Systems Transients. Seattle, June 22-26, 1996
- [12] DONG, X.; ROSADO, S.; LIU,Y; WANG, N.; GUO, T. – Transients at GSU Transformer Terminals Part I: Historical Case Analysis. Power Engineering Society Winter Meeting 2001. IEEE Vol.1, 28 Jan. 1 Feb. 2001, Pages 312-317