



XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

FI/GAT/01
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

BELO MONTE – ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS NO SISTEMA CA COM A ENTRADA DO SEGUNDO BIPOLO - MODELAGEM DOS SISTEMAS CA/CC NO PROGRAMA ATP

Ricardo André de Andrade Gonçalves(*)
ELETOBRAS/FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S/A

RESUMO

No último SNPTTE (XXII, 2013) foi apresentado um trabalho de modelagem do sistema CA/CC com os resultados das avaliações das sobretensões no programa de transitórios eletromagnéticos “ATP” [6] oriundas de faltas nos sistemas CA, tanto da Retificadora quanto da Inversora para o primeiro Bipolo do sistema CCAT (Corrente Contínua em Alta Tensão) de Belo Monte. A intenção desse primeiro trabalho foi demonstrar a viabilidade de se fazer uma modelagem aproximada do primeiro bipolo de Belo Monte avaliado no programa ATP [6], validando os resultados através da comparação com aqueles encontrados com o programa PSCAD [5], utilizado para a elaboração do Relatório R2 do Leilão do Primeiro Bipolo (Xingu-Estreito) de Belo Monte.

Dando continuidade a esse trabalho, avaliações realizadas no âmbito da EPE recomendaram, resultante dos estudos produzidos pelo Grupo de Estudos de Belo Monte, através do Relatório R1, a chegada do segundo Bipolo na nova subestação denominada de “Terminal Rio” (próximo à localidade de Nova Iguaçu, Rio de Janeiro). A extensão da linha de corrente contínua para esse segundo Bipolo gira em torno de 2440 km (superior 350 km em relação à linha do Bipolo 1). Nessa segunda etapa replicou-se para o Bipolo 2 os mesmos dados de transformadores conversores, filtros CA e CC, reatores de alisamento, controle e ajustes, alterando-se apenas a extensão da linha CC. O equivalente utilizado procurou representar os dois Bipolos, sendo duas barras para trás para Belo Monte e Terminal Rio (foco desse estudo) e abranger uma rede menos extensa próxima ao inversor do Bipolo 1 (Estreito).

PALAVRAS-CHAVE

Sistema de Transmissão de Belo Monte, Sistema Equivalente, Terminal Rio, Modelagem no ATP, Bipolo 2.

1.0 - INTRODUÇÃO

Assim como nos estudos para o Bipolo 1 de Belo Monte, foi formado outra vez um grupo de trabalho para a elaboração do Relatório R2 (Estudos de Transitórios Eletromagnéticos), sendo a coordenação a cargo da EPE. Como nos estudos para o Bipolo 1, as simulações seriam realizadas através do programa PSCAD, ferramenta largamente utilizada internacionalmente em estudos envolvendo sistemas de corrente contínua, a exemplo dos estudos básicos desenvolvidos para o projeto Madeira. Todavia, como o ATP [6] é uma ferramenta computacional, de uso internacional e isenta de custo, um modelo validado e que considerasse todos os dados dos sistemas CA e CC usados no PSCAD [5] seria uma outra ferramenta para avaliar o desempenho do novo sistema frente aos transitórios eletromagnéticos, desde que apresentasse resultados minimamente coerentes com aqueles que fossem encontrados com o PSCAD [5].

A extensão dos equivalentes de rede foi delimitada pelo Grupo de Transitórios, para o novo cenário (2020), no sentido de melhor representar o sistema CA, tanto do sistema Norte como no sistema Sudeste, que apresentasse

(*) Rua Real Grandeza, n 219 - bloco C sala 1104 – CEP 22.283-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-2125 – Fax: (+55 21) 2528-4857 – Email: randre@furnas.com.br

resultados aceitáveis diante das manobras a serem avaliadas no lado retificador, onde os dois Bipolos se conectam à mesma barra e no lado inversor, próximo a Terminal Rio (chegada do segundo Bipolo). Foram selecionados dois cenários de intercâmbio entre os subsistemas Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste do SIN, representativos de situações dimensionadoras, indicadas no Relatório R1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, para as condições de transmissão direta (Norte→Sudeste) e transmissão inversa (Sudeste→Norte). As simulações de transitórios eletromagnéticos de manobra foram realizadas através do programa PSCAD [5], com representação dos elos de corrente contínua desenvolvida para os estudos do primeiro bipolo da SE Xingu (± 800 kV Xingu – Estreito) **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Uma vez definido os controles principais, tais como, CCA (Current Control Amplifier), VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limiter), dentre outros, procederia para a etapa de introduzir esses controles e ajustes no programa ATP [6]. Como já havia sido modelado para o Bipolo 1, foi replicado para o Bipolo 2 os mesmos controles e settings previamente definidos. Essa enorme quantidade de variáveis e barras de sistema obrigou a fazer uso de uma versão com maior capacidade do ATP [6], conhecida como ATPGIGA que possibilita a modelagem de sistemas extensos como é o caso em questão. A comparação de resultados entre o ATP [6] e o PSCAD [5], para algumas manobras nas redes retificadora e inversora, para o mesmo sistema CA equivalente, garantiriam a validade do modelo no ATP [6], para estudos de Planejamento. Tendo sido feita essa validação, vários transitórios poderiam ser analisados, usando o sistema modelado no programa ATP [6]. Nesse trabalho serão apresentados os primeiros resultados do horizonte inicial de entrada em operação do segundo Bipolo de Belo Monte (2020), cujo sistema equivalente detalhado, considerando as redes Norte e Sudeste, foi modelado em conjunto com os dois Bipolos e seus controles no ATP [6]. O trabalho faz a comparação de resultados obtidos com o PSCAD [5] com o ATP [6].

2.0 - CONFIGURAÇÃO DA REDE UTILIZADA

Na Figura 1 é mostrada de forma geográfica os dois Bipolos, com as diferentes extensões e a proximidade entre as duas estações inversoras que possibilitam uma transmissão total de 8000 MW. Os dados básicos do segundo Bipolo está descrito no lado direito da mesma Figura.

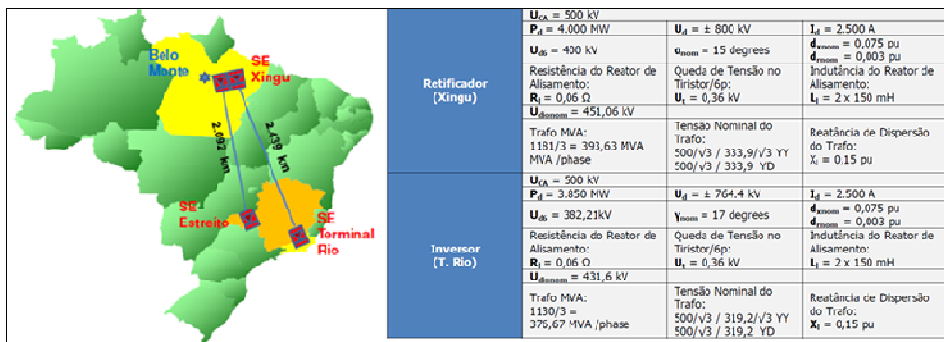


FIGURA 1 – Configuração Geográfica do Sistema CCAT de Belo Monte e Dados Básicos do Bipolo 2

Na Figura 2 a seguir, é mostrada de forma simplificada o sistema Norte modelado tanto no PSCAD [5] quanto no ATP [6].

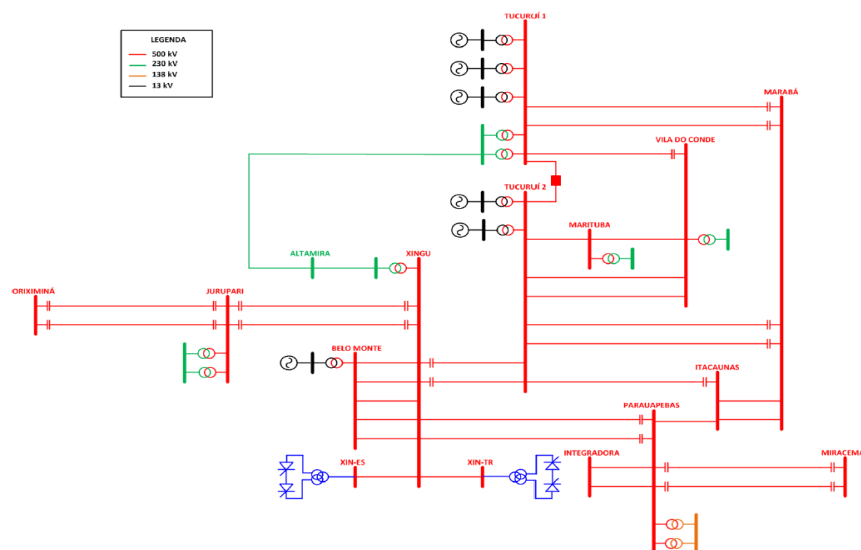


FIGURA 2 – Rede Norte Modelada no PSCAD e no ATP

3.1 Current Control Amplifier (CCA):

A função do CCA é controlar a corrente CC para seguir uma ordem de corrente obtida pelo controle de potência ou pela memória da própria ordem de corrente. O CCA gera um sinal de tensão calculado a partir de um sinal de erro de corrente, obtido da comparação da corrente ordem e da corrente medida, atuando de forma a antecipar ou retardar o disparo das válvulas, alterando assim o ângulo de disparo “alfa”, para anular o erro. O modelo de CCA utilizado no PSCAD [6] é mostrado na Figura 5, a seguir:

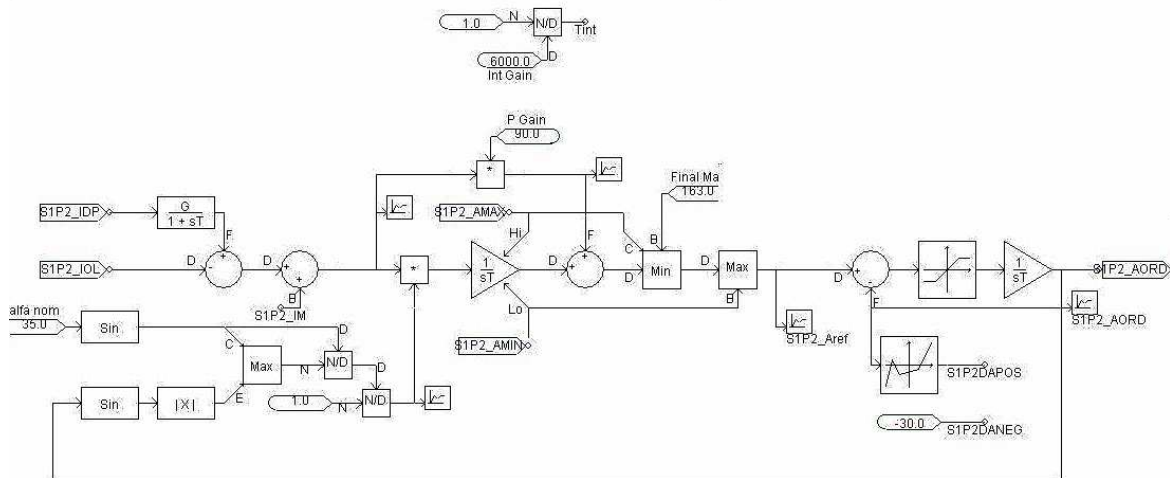


FIGURA 5 – CCA – “Current Control Amplifier” para Retificador e Inversor

Os ajustes de controle são os mesmos para ambas as estações, uma vez que o sistema poderá trabalhar com fluxo reverso. Os pontos mais importantes são os ganhos, integral/proporcional de 6000^o/90^o por unidade de corrente.

3.2 VDCOL – Voltage Dependent Current Order Limiter:

Algumas perturbações podem provocar a diminuição da tensão CA e o consequente aumento do ângulo de comutação, o que pode acarretar falhas de comutação e o aumento do consumo de reativos pela conversora associada a rede sob falta.

O VDCOL tem por finalidade evitar que as válvulas venham a conduzir por um tempo além do de projeto, e ajudar na recuperação do sistema sob falta, uma vez que reduzindo o consumo de reativos pela conversora, propiciará uma retomada de tensão mais rápida na rede CA associada a esta. Para realizar estas tarefas, o VDCOL reduz a ordem de corrente proporcionalmente à queda da tensão CC, procurando evitar um aumento excessivo do ângulo de comutação. A Figura 6 ilustra a implementação no PSCAD. A obtenção do sinal da tensão CC para o cálculo do fator multiplicativo da corrente de ordem, pode ser feito através de uma das duas constantes de tempo indicadas. No caso da tensão ser decrescente, o que pode indicar uma perturbação no sistema, uma rápida atuação do VDCOL faz-se necessária. Utiliza-se então a constante de tempo rápida na leitura da tensão CC. No caso da tensão ser crescente, o que pode indicar que o sistema está se recuperando de uma perturbação, se fosse utilizada a constante de tempo rápida a recuperação também rápida da corrente CC poderia vir a causar uma falha de comutação. Por essa razão se usa uma constante de tempo mais lenta. No VDCOL do novo ELO foram utilizadas: Constante Rápida - Tdown = 10 ms e Constante Lenta - Tup = 50 ms.

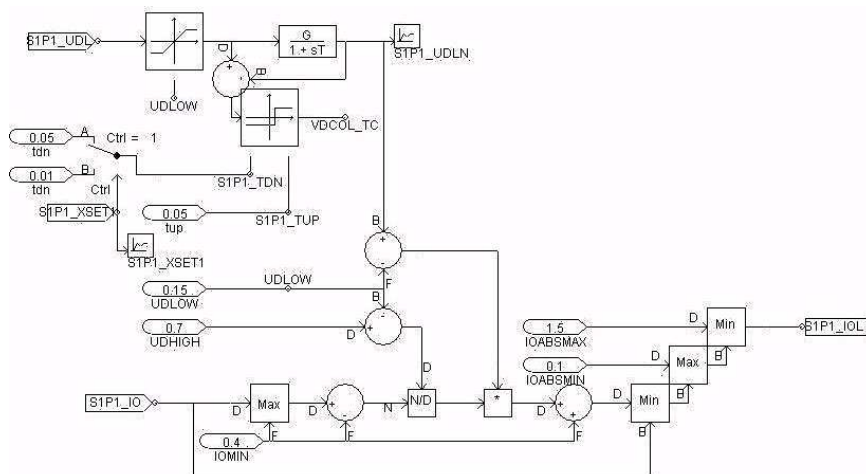


FIGURA 6 – VDCOL – “Voltage Dependent Current Order Limiter” – Retificador e Inversor

3.3 Controle de Alfa Máximo no Inversor:

Este controle não é nada mais que controle do ângulo de comutação no sentido de ter uma rampa positiva na região da corrente de margem para aumentar a estabilidade do controlador de corrente. Durante transitórios, o ângulo de extinção (gama) irá aumentar para evitar falhas de comutação dependendo de quão severa é a falta. Se as tensões permanecerem baixas, falhas de comutação poderão ser detectadas pela comparação da corrente de curto-circuito CC e as correntes CA, aumentando 5° no valor mínimo de gama. A Figura 7 mostra este controle.

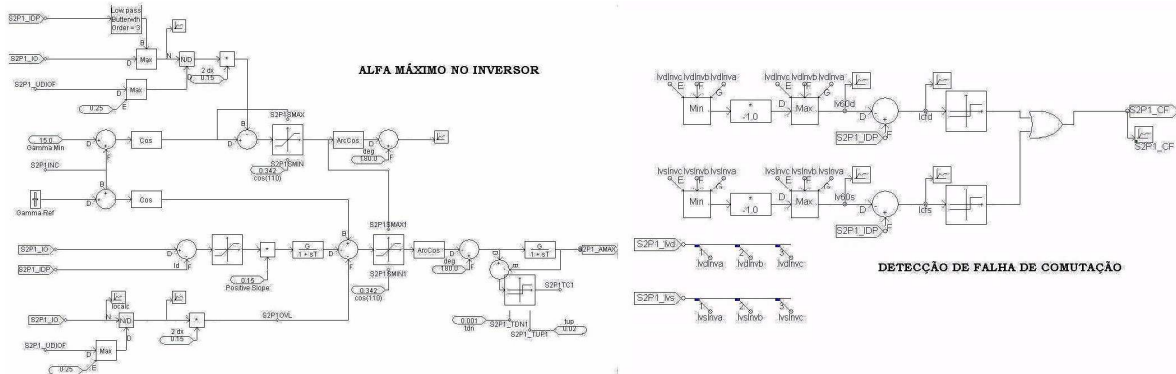


FIGURA 7 – Cálculo de Alfa Máximo e Detecção de Falha de Comutação

3.4 Controle de Alfa Mínimo no Retificador:

A finalidade desse controle é melhorar a recuperação do ELO após faltas no lado CA do Retificador. A sua ação é no sentido de aumentar o ângulo mínimo de disparo no Retificador durante essas faltas, forçando desta forma o Inversor a tomar o controle de corrente do ELO. Existem dois tipos de atuação para o RAML, de acordo com o tipo de falta (simétrica ou assimétrica).

A tensão ideal sem carga "Udio" que reflete de forma direta o comportamento da tensão CA do terminal, é calculada, filtrada e comparada com uma certa referência mínima. Se este valor mínimo for atingido, o controle é acionado, aumentando o alfa mínimo no Retificador. A Figura 8 mostra o diagrama de controle.

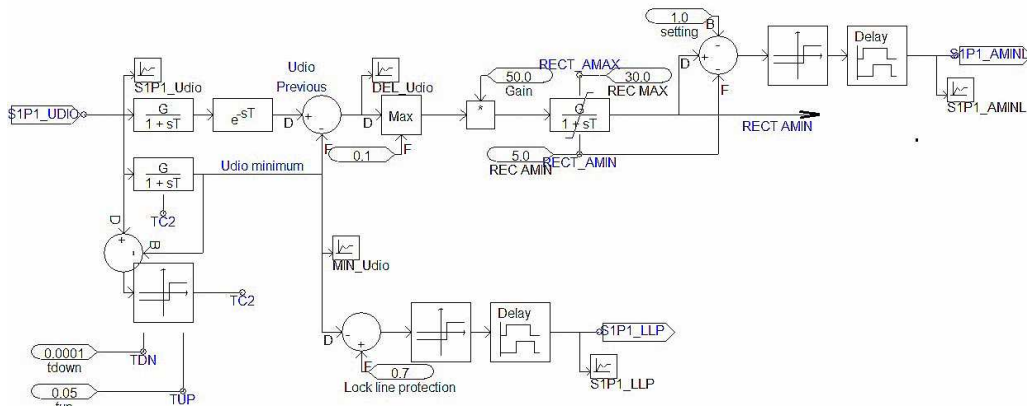


FIGURA 8 – Controle de Alfa Mínimo no Retificador

4.0 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE PSCAD E ATP

Foram simulados curtos circuitos francos a terra, trifásicos e monofásicos, durante 100 ms, nas barras em 500 kV CA das conversoras em Xingu e em Terminal Rio, além de outras barras mais distantes destas, tanto na região Norte como no Sudeste. Observa-se que a sobretensão máxima encontrada, 1,71 pu, foi registrada em Xingu 500 kV, decorrente de curto trifásico nessa barra. Na barra de T. Rio 500 kV, o maior valor encontrado foi 1,48 pu por curto trifásico na própria barra. Os demais casos resultaram em sobretensões inferiores a 1,48 pu. As sobretensões são rapidamente amortecidas, resultando em máximas sustentadas, após 200 ms da eliminação do curto, abaixo da tensão máxima operativa.

Com o intuito de prospectar sobretensões máximas nas barras analisadas, não foram representados para-raios de óxido de zinco em nenhuma barra da rede simulada. Caso esses equipamentos fossem representados os valores máximos encontrados poderiam ser ligeiramente menores.

Existe uma diferença básica entre o que foi modelado no PSCAD [5] em comparação com o ATP [6]. No PSCAD [5], tem-se dois bipolos completos, como será na prática, com linha de eletrodo e capacitores de surto entre pólos.

No ATP [6], para atual estágio, tem-se apenas um monopolo equivalente para cada Bipolo, o que por si só já apresentaria pequenas diferenças para os mesmos transitórios na rede CA (tanto para Retificador quanto para Inversores). As correntes de pólo no PSCAD [5] são em sentidos contrários e no ATP [6], são no mesmo sentido.

Existem outras funções no PSCAD [5] que não estão representadas no ATP [6], principalmente aquelas que dizem respeito a funções de controle para transitórios no lado de corrente contínua.

Para a comparação dos modelos, existe uma infinidade de possibilidades de aplicação de faltas, tanto no lado CA do Retificador quanto do Inversor, a nível de severidade da falta. Como não haveria condições de apresentar neste trabalho uma infinidade de resultados, a nível de comparação, optou-se por considerar faltas trifásica e monofásica nos barramentos CA das conversoras do Bipolo 2, Xingu – Terminal Rio pois esse era o foco do relatório R2. O tempo de duração do defeito foi considerado ser de 100 ms, com a limpeza sendo feita sem a perda de qualquer elemento da rede CA. As condições iniciais foram ajustadas de tal forma que se obtivesse o mesmo fluxo de potência nas redes CA's retificadora e inversora. Nas barras conversoras, as tensões estão com o mesmo módulo e em fase. Dessa forma, as faltas são aplicadas e eliminadas nos mesmos pontos das ondas de tensão CA. As faltas francas (quase sólidas) foram aplicadas através de pequenas resistências e indutâncias modo a levar a tensão do barramento CA a uma queda maior que 98% da tensão de regime permanente.

4.1 Faltas no Lado do Retificador: (Resultados do PSCAD [5] retirados do Relatório R2 [3]).

4.1.1 Falta Trifásica em Xingu 500 kV!

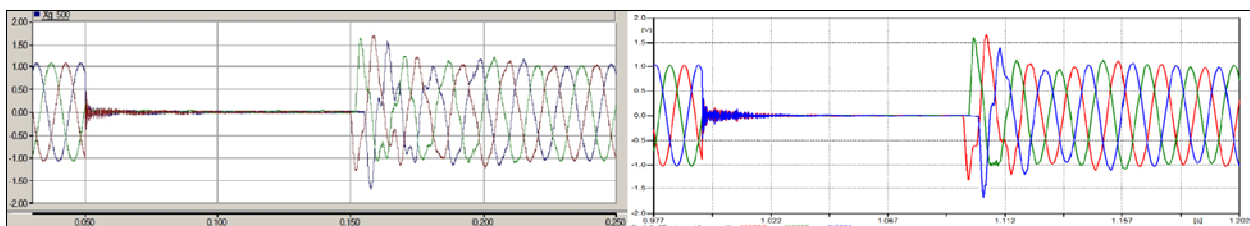


FIGURA 9 - Tensões Xingu 500 kV (pu) - **↑ PSCAD**

Tensões Xingu 500 kV (pu) - **↑ ATP**

4.1.2 Falta Monofásica em Xingu 500 kV!

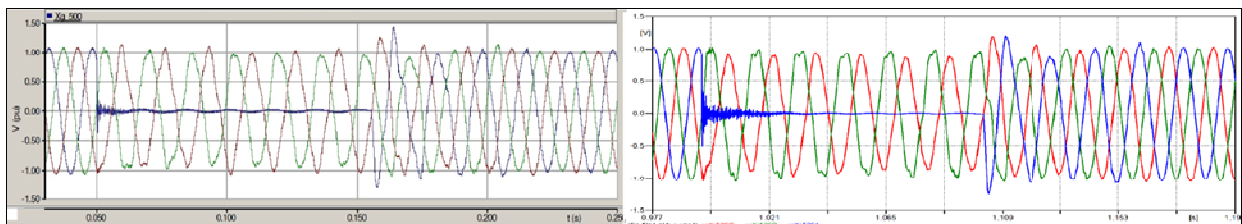


FIGURA 10 - Tensões Xingu 500 kV (pu) - **↑ PSCAD**

Tensões Xingu 500 kV (pu) - **↑ ATP**

4.2 Faltas no Lado do inversor:

4.2.1 Falta Trifásica em Terminal Rio 500 kV:

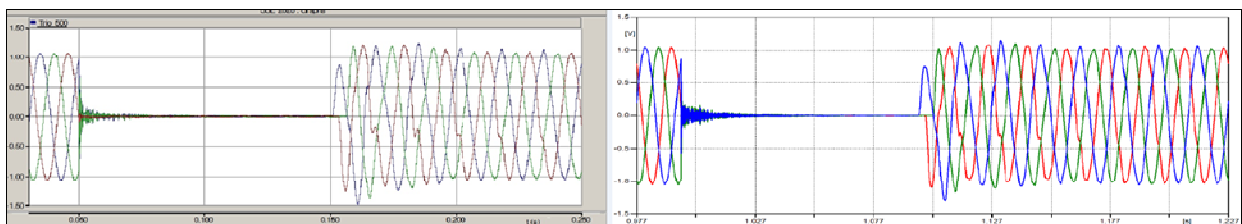


FIGURA 11 - Tensões T. Rio 500 kV (pu) - **↑ PSCAD**

Tensões T. Rio 500 kV (pu) - **↑ ATP**

4.2.2 Falta Monofásica em Terminal Rio 500 kV

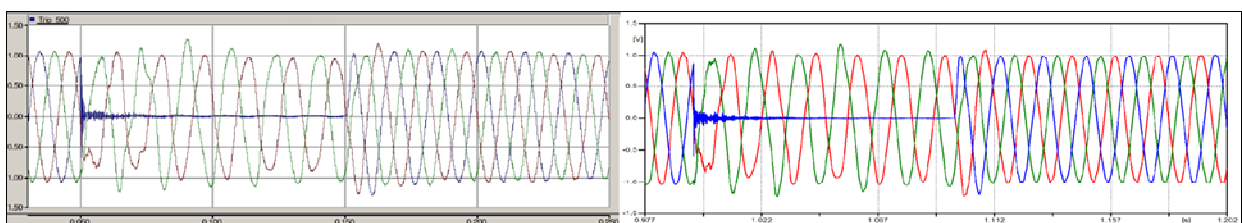


FIGURA 12 - Tensões em T. Rio 500 kV (pu) - **↑ PSCAD**

Tensões em T. Rio 500 kV (pu) - **↑ ATP**

4.3 Variáveis do Lado de Corrente Contínua: Os resultados do PSCAD [5] foram obtidos através de simulações feitas no arquivo disponibilizado pela EPE em conjunto com o Relatório R2 [3].

4.3.1 Falta Trifásica em Xingu

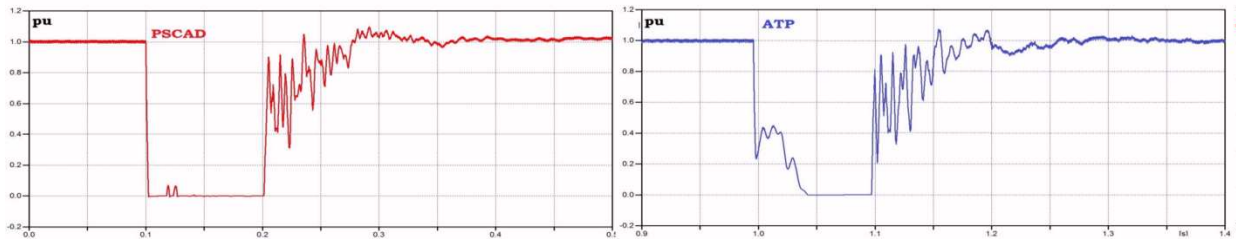


FIGURA 13 - Corrente de Pólo (pu) Xingu - PSCAD

Corrente de Pólo (pu) Xingu - ATP

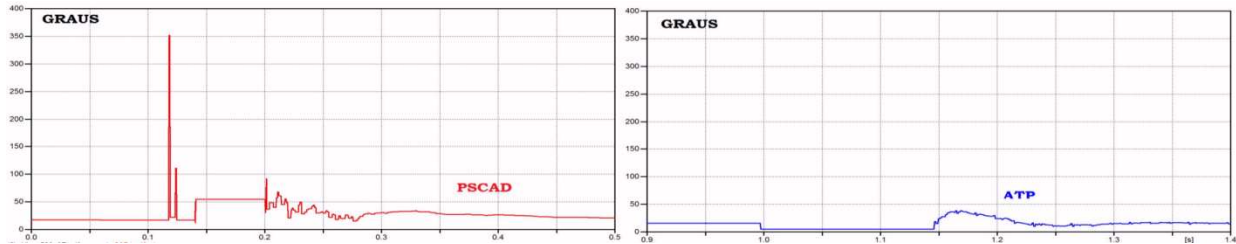


FIGURA 14 - Ângulo α (graus) Xingu - PSCAD

Ângulo α (graus) Xingu - ATP

4.3.2 Falta Monofásica em Terminal Rio

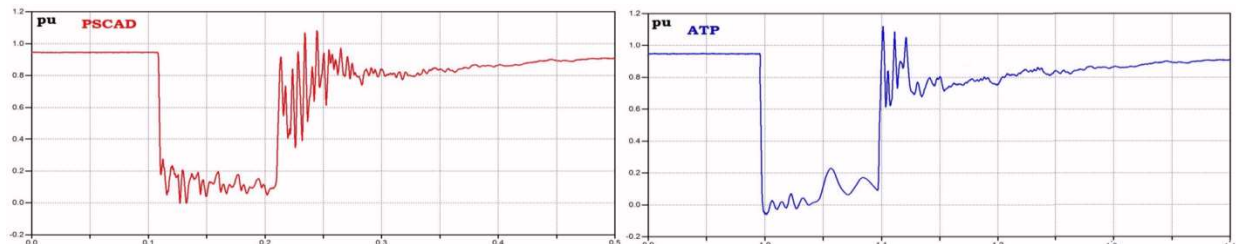


FIGURA 15 - Tensão de Pólo (pu) T. Rio - PSCAD

Tensão de Pólo (pu) T. Rio - ATP

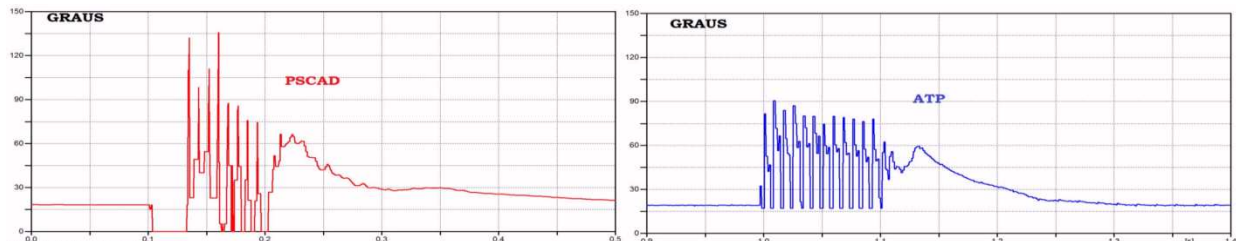


FIGURA 16 - Ângulo γ (graus) T. Rio - PSCAD

Ângulo γ (graus) T. Rio - ATP

4.4 Comparação dos Resultados Encontrados:

Assim como ocorreu no primeiro trabalho apresentado no XXII SNPTEE [4], existem diferenças no comportamento dos modelos do PSCAD [5] e do ATP [6], como pode ser visto nos oscilogramas anteriormente apresentados, mais notadamente, nas variáveis do lado de corrente contínua. O modelo do ATP [6] foi baseado nas principais informações obtidas do modelo no PSCAD [5], desenvolvido por um consultor internacional. Algumas funções de controle no PSCAD [5] que não foram implementadas no modelo do ATP [6], principalmente aquelas diretamente ligadas à proteção do lado de corrente contínua, pois o foco aqui era obter um modelo que pudesse apresentar resultados razoáveis para manobras no lado de corrente alternada. Essas funções são uma das causas dos diferentes comportamentos para os vários transitórios que foram simulados com ambos os modelos. Deve ser mencionado que existem pequenas diferenças nas redes retificadora e inversora que não permitiram obter exatamente as mesmas condições de regime permanente e, conseqüentemente, no regime transitório. Ressalta-se as curvas de saturação dos diversos transformadores do sistema. Deve ser mencionado que valores de ângulo de extinção maiores que 70° são irreais. Na realidade, durante a faltas na barra inversora, as tensões ficam distorcidas e a estimativa de gama fica comprometida durante esse período no PSCAD [5]. Os valores apresentados se referem a gama medido e não a gama controle. No ATP [6] é feito um estimacão do ângulo de comutação (μ) e

gama medido é calculado pela diferença entre 180° e μ (ângulo de comutação). Outra importante diferença é que no PSCAD [5], o instante de fechamento ou de abertura de chaves ou tiristores é calculado de forma mais precisa pois é feita uma interpolação entre dois passos subsequentes para se aproximar mais do tempo certo de abertura e fechamento, especialmente dos tiristores. O ATP [6] não tem tal artifício.

Contudo, a maior diferença entre os dois modelos se dá no fato de que na versão do ATP [6], foi modelado apenas monopolos equivalentes a cada bipolo e não dois bipolos completos. Isso faz com que as correntes nas linhas tenham sentidos iguais no ATP [6] e opostos no PSCAD [5], para cada bipolo modelado. Como no transitório, a corrente numa linha afeta o outro polo (os polos adjacentes compõem as linhas CC e estão nas mesmas torres), os comportamentos são diferentes. Num bipolo tem-se aterramento entre os pólos por linha de eletrodo e capacitor enquanto que num monopolo equivalente isso não acontece. O objetivo era mostrar em detalhes o comportamento das tensões CA para que ficasse constatado que, para o sistema equivalente considerado, a influência do ELO é muito semelhante entre os modelos elaborados no PSCAD [5] e no ATP [6].

5.0 - CONCLUSÕES

Os resultados encontrados mostraram que algumas outras funções de controle implementadas no PSCAD [5] ainda precisariam ser incorporadas também ao modelo do ATP [6] para que se possa ter comportamento durante os transitórios mais exatos. A representação completa de cada bipolo no ATP [5] ao invés de monopolos equivalentes também tem influencia importante nos resultados encontrados, mesmo tendo sido avaliado apenas transitórios nos lados CA do segundo bipolo.

Como os sistemas CA são relativamente fortes nos três terminais, apesar das diferenças nas modelagens PSCAD [5] e ATP [6], o comportamento das tensões CA mostram estreita semelhança, permitindo dizer que avaliações de transitórios no sistema CA podem ser feitos com o modelo do ATP [5], até então desenvolvido.

O ATP [5] é uma ferramenta computacional, de uso internacional e isenta de custo. Um modelo validado e que considerasse todos os dados do sistemas CA e CC usados no PSCAD [6] seria uma outra ferramenta para avaliar o desempenho do novo sistema frente aos transitórios eletromagnéticos, desde que apresentasse resultados minimamente coerentes com aqueles que fossem encontrados com o PSCAD [6]. Nesse contexto, considera-se que o modelo desenvolvido no ATP pode auxiliar nas investigações de transitórios em linhas próximas aos terminais de ambos Bipolos. Caso seja considerado o fluxo reverso (Sudeste \rightarrow Norte), ou mesmo um bipolo em fluxo direto e outro em fluxo reverso, basta proceder a uma troca de nomes de barras no controle e ajustar a condição de fluxo de carga que o modelo irá responder a essa condição adequadamente. A inicialização necessita de um tempo mínimo (300-400 ms) para chegar ao regime permanente, muito embora esse processo ainda possa ser otimizado para diminuir esse tempo.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão - Detalhamento da Alternativa Recomendada - Relatório R1 - Expansão das Interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste Parte II - Nº EPE-DEE-RE-063/2012 - Rev1 – 15/07/2013;
- (2) Detalhamento da Alternativa de Referência: Relatório R2 - Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste - Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Xingu – T. Minas - Nº EPE-DEE-RE-062/2013 - Rev0 – 05/07/2013;
- (3) Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão - Detalhamento da Alternativa de Referência: Relatório R2 - Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste - Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Xingu – Terminal Rio - Nº EPE-DEE-RE-136/2014 - Rev0 - 30/10/2014;
- (4) Sistema de Transmissão em Corrente Contínua de \pm 800 kV - Estudos de Transitórios Eletromagnéticos no Sistema CA, com a Modelagem CA/CC no Programa ATP – XXII SNPTEE – Out/2013 - Ricardo André Gonçalves;
- (5) PSCAD – Manitoba HVDC Research Center;
- (6) ATP – Alternative Transient Program – Versão “ATPGIGA”

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Ricardo André de Andrade Gonçalves, brasileiro nascido no RJ em 1957, Graduado em Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Potência, pela UFF (1982); Pós-graduação em Sistemas de Potência na UFRJ (COPPE - 1987/1988); MBA em Competências Básicas para Gerência (FGV – 1999) e MBA em Gestão de Projetos e Tecnologia da Informação (UERJ – 2008). Trabalhou na PROMON Engenharia S.A. a partir de 1983, em Estudos de Sistemas Elétricos de Alta Tensão, em Corrente Alternada e Contínua. A partir de 1987, passou a trabalhar em Furnas Centrais Elétricas S.A., no Departamento de Planejamento de Transmissão, na área de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos e Especificação de Equipamentos. Atualmente trabalha em Furnas Centrais Elétricas na Gerência de Desenvolvimento de Estudos - (randre@furnas.com.br).

Agradecimento: O autor gostaria de manifestar o seu agradecimento ao Eng. Fernando Cattan Jusan de Furnas Centrais Elétricas, pela sua colaboração nas simulações com o programa PSCAD.