



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

BR/GAT/28  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - IV**

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

**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**

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

**RESUMO**

Avaliações realizadas pelo Planejamento do Setor Elétrico Nacional recomendaram, resultante dos estudos produzidos pelo Grupo de Estudos de uma grande usina do Norte, a alternativa de referência para reforçar a interligação Norte-Sudeste/Centro Oeste, decorrente da integração dessa usina ao SIN (Sistema Interligado Nacional), um sistema de CCAT (Corrente Contínua em Alta Tensão) constituído por dois bipolos de 4000 MW, com tensões operativas em  $\pm 800$  kV. As conexões desse novo Elo de Corrente Contínua (ELO) se darão no Norte, relativamente próximo à Tucuruí, onde será inserida uma nova grande UHE e em duas novas subestações: uma no Estado de Minas Gerais, para o primeiro bipolo, e outra no Estado do Rio de Janeiro, para o segundo bipolo.

Tendo sido definida a alternativa de transmissão, foram formados alguns grupos de trabalho. Um subgrupo foi criado, com a participação de várias empresas do Setor Elétrico, para a elaboração do Relatório de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos. Foi decidido que as simulações seriam realizadas através do programa PSCAD [4], ferramenta largamente utilizada internacionalmente em estudos envolvendo sistemas FACTS, a exemplo dos estudos básicos desenvolvidos para o projeto do ELO do Madeira. Uma vez definidas as redes equivalentes para os estudos, ficou acordado que a definição e ajustes dos controles de ambos os bipolos seriam feitos por um consultor internacional, (através do programa PSCAD), com experiência reconhecida em ELOS de Corrente Contínua, inclusive com sistemas de  $\pm 800$  kV CC. Todavia, como o ATP [5] é uma ferramenta computacional, de uso internacional e isenta de custo, não se fechou a janela para que também o mesmo viesse a ser usado, desde que se demonstrasse viável a modelagem correta do sistema de potência e dos controles dos bipolos. O uso do ATP teria apenas o sentido de avaliar o desempenho do novo sistema frente aos transitórios eletromagnéticos, com outra ferramenta, desde que apresentasse resultados minimamente coerentes com aqueles que fossem encontrados com o PSCAD, para estudos a nível de planejamento.

A comparação de resultados entre o ATP e o PSCAD, para algumas manobras nas redes retificadora e inversora, para os mesmos sistemas CA equivalentes, garantiriam a validade do modelo no ATP, para estudos de Planejamento. Tendo sido feita essa validação, vários transitórios poderiam ser analisados, usando o sistema modelado no programa ATP. Nesse trabalho são apresentados os resultados de alguns transitórios nas redes CA para o primeiro horizonte de implantação do empreendimento (primeiro bipolo), cujo sistema equivalente detalhado, considerando as redes Norte/Nordeste e Sudeste, foi modelado em conjunto com esse primeiro bipolo no ATP, demonstrando a semelhança na modelagem através da comparação de resultados com as duas ferramentas. O trabalho se concentrou na condição de fluxo do Norte para o Sudeste. Outros ajustes ainda deverão ser feitos no modelo do ATP para se chegar a uma maior fidelidade entre as ferramentas. Contudo os resultados encontrados no atual estágio (Abril/2013) de desenvolvimento já demonstram ser viável o uso deste modelo para a finalidade pretendida. Experiências anteriores, na modelagem do ELO de Itaipu [2] e [3], contribuíram para a execução desse trabalho, no que diz respeito à modelagem de controles de ELOS de Corrente Contínua no ATP.

(\*) Rua Real Grandeza, n 219 - bloco C sala 1602 – CEP 22.283-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Tel: (+55 21) 2528-2125 – Fax: (+55 21) 2528-2125 – Email: randre@furnas.com.br

## PALAVRAS-CHAVE

Modelagem PSCAD x ATP , redes equivalentes, controles do ELO, transitórios, defeitos monofásicos e trifásicos.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento do modelo no ATP, seja para o primeiro bipolo, seja para os dois bipolos, haverá a necessidade de modelagem das redes equivalentes em dois cenários distintos: anos 2017 e 2020. A extensão dos equivalentes de rede foi desenvolvida pelo Subgrupo de Equivalentes e utilizada pelo Subgrupo de Transitórios, para ambos os cenários, no sentido de melhor representar o sistema CA, tanto do sistema Norte/Nordeste como no sistema Sudeste, que apresentasse resultados minimamente aceitáveis diante das manobras a serem avaliadas. Uma vez definidas as redes equivalentes para os estudos, ficou decidido que os ajustes dos controles de ambos os bipolos seriam feitos pelo consultor internacional, através do programa PSCAD. Esses ajustes procurariam proporcionar o melhor desempenho dos dois bipolos, seja operando isolados, seja trabalhando em conjunto, para potência direta e reversa em ambos os ELOS, havendo inclusive a possibilidade de sentidos opostos de transmissão de potência nos bipolos. A seguir é mostrada a configuração planejada para o CCAT.

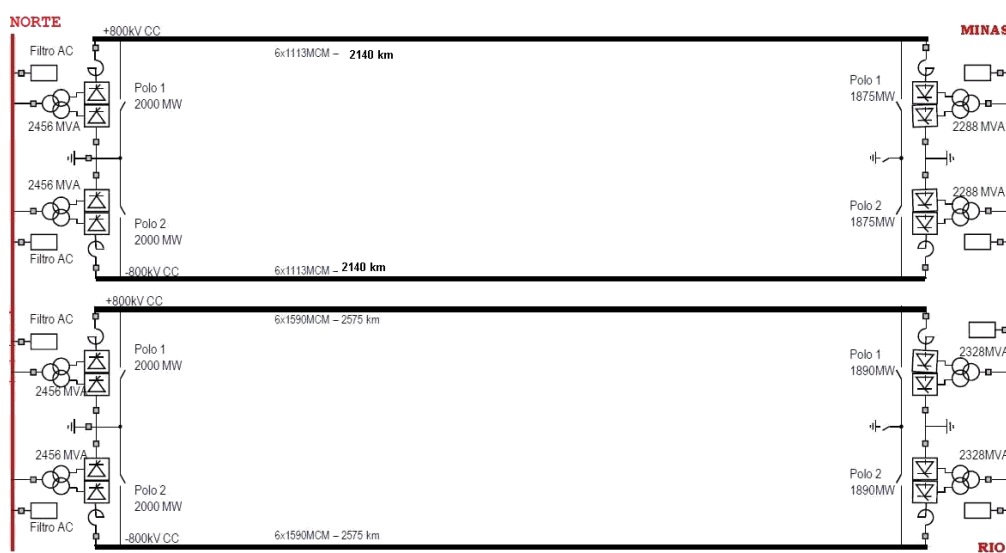


FIGURA 1 – Configuração dos Dois Bipolos da Transmissão do ELO de  $\pm 800$  kV

As Figuras 2 e 3 a seguir, mostram, respectivamente, as redes equivalentes Norte/Nordeste e Sudeste, modeladas tanto no PSCAD quanto no ATP, para o Horizonte inicial de implantação do empreendimento (foco desse trabalho). Existem impedâncias de transferência entre os dois equivalentes, que não são mostradas em ambas as figuras.

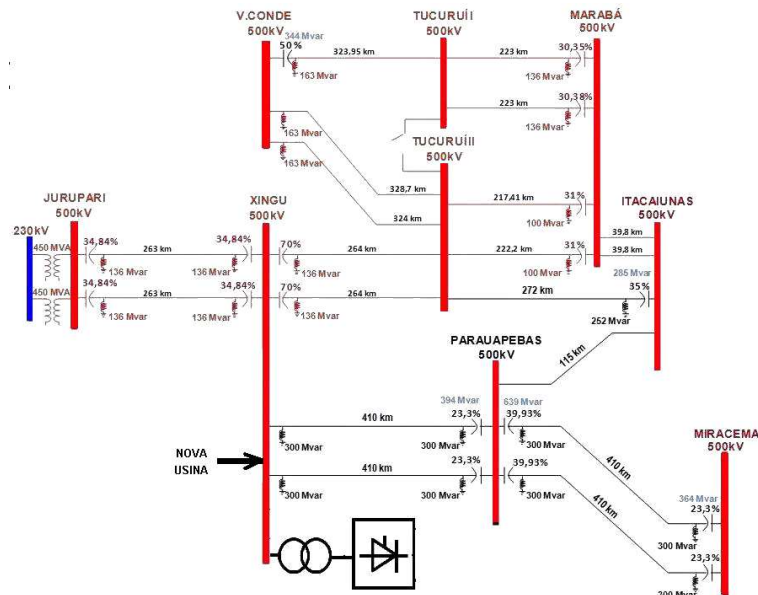


FIGURA 2 – Configuração do Sistema Equivalente da Rede Norte/Nordeste

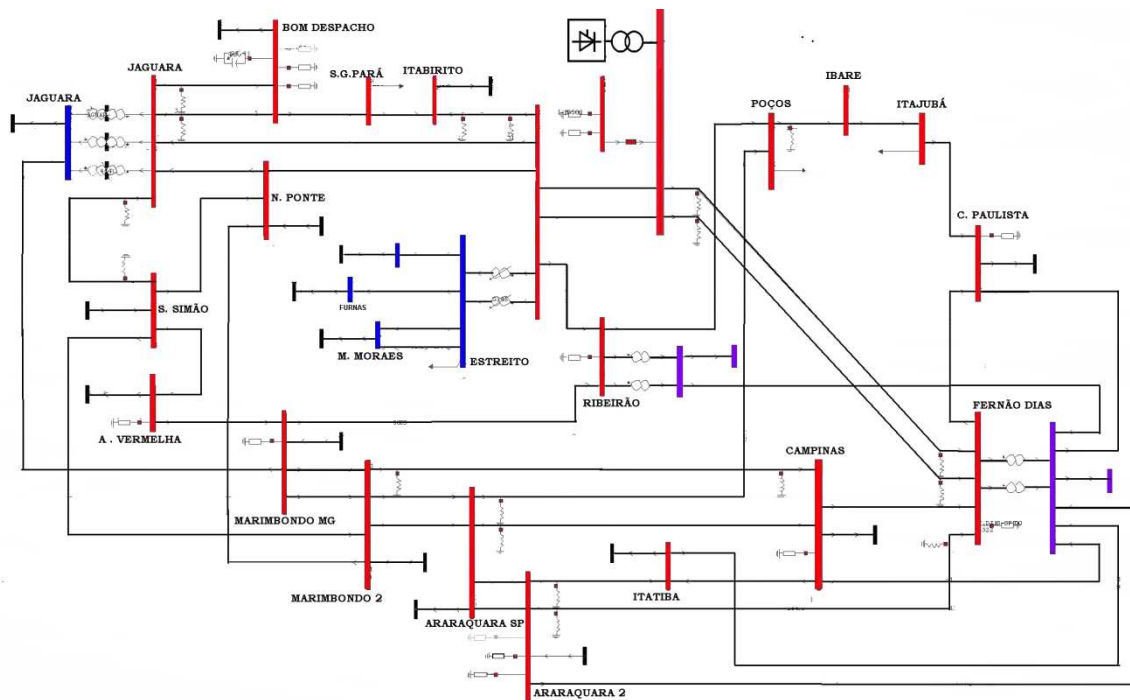


FIGURA 3 – Configuração do Sistema Equivalente da Rede Sudeste

## 2.0 - PRINCIPAIS FUNÇÕES DE CONTROLE DEFINIDAS NO PSCAD E IMPLEMENTADAS NO ATP

A seguir são mostradas as funções de controle mais importantes (existem várias outras) ajustadas no PSCAD e modeladas no ATP. Outros controles não serão descritos devido a grande número de funções no controle do ELO.

### 2.1 - 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 é mostrado na Figura 4, a seguir:

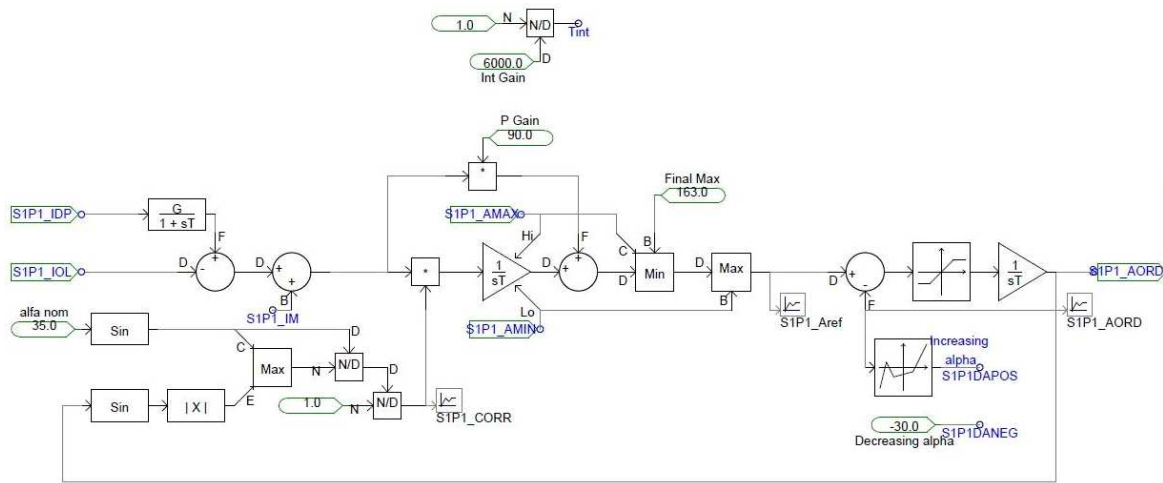


FIGURA 4 – CCA – “Current Control Amplifier” para Retificador e Inversor

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%/90° por unidade de corrente.

## 2.2 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 5 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.

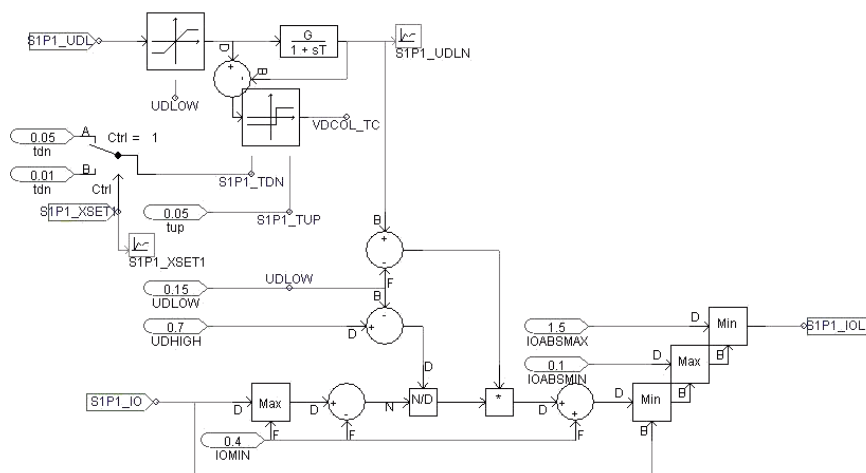


FIGURA 5 – VDCOL – Voltage Dependent Current Order Limiter – Retificador e Inversor

## 2.3 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 6 mostra este controle.

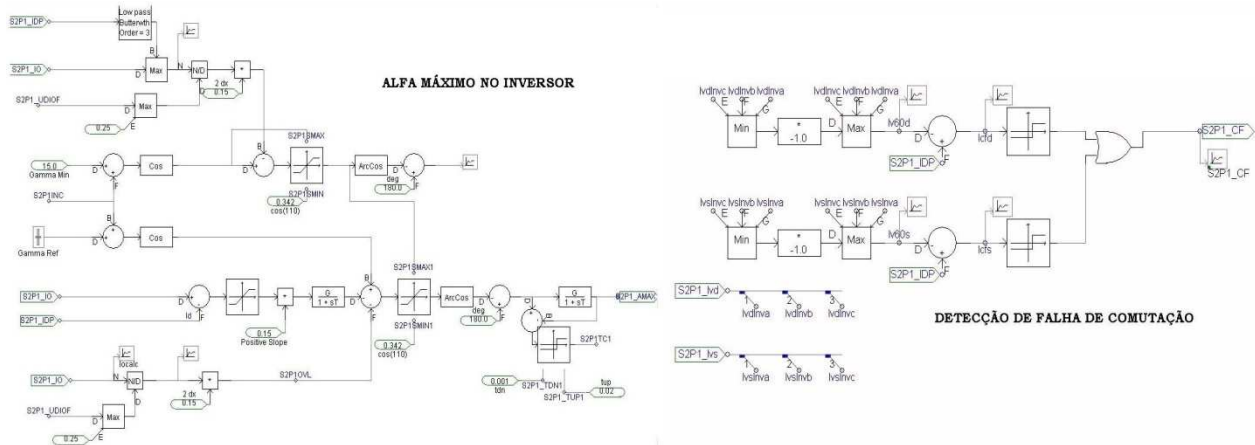


FIGURA 6 – Cálculo de Alfa Máximo e Detecção de Falha de Comutação

#### 2.4 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 7 mostra o diagrama de controle.

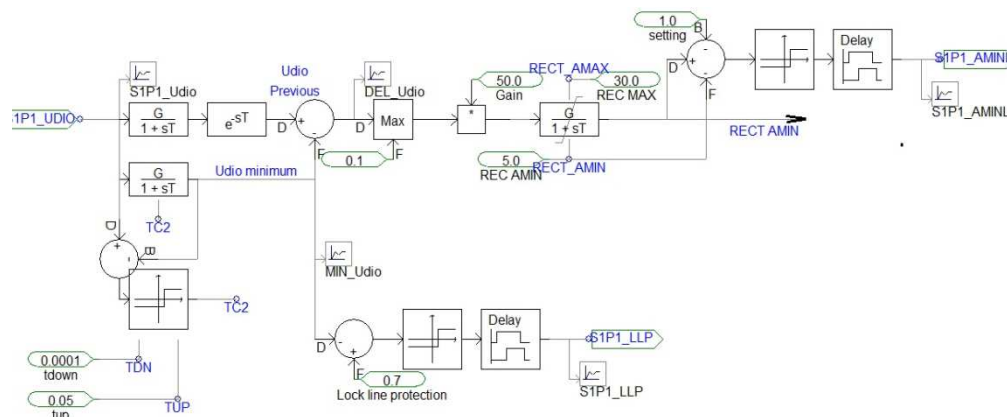


FIGURA 7 – Controle de Alfa Mínimo no Retificador

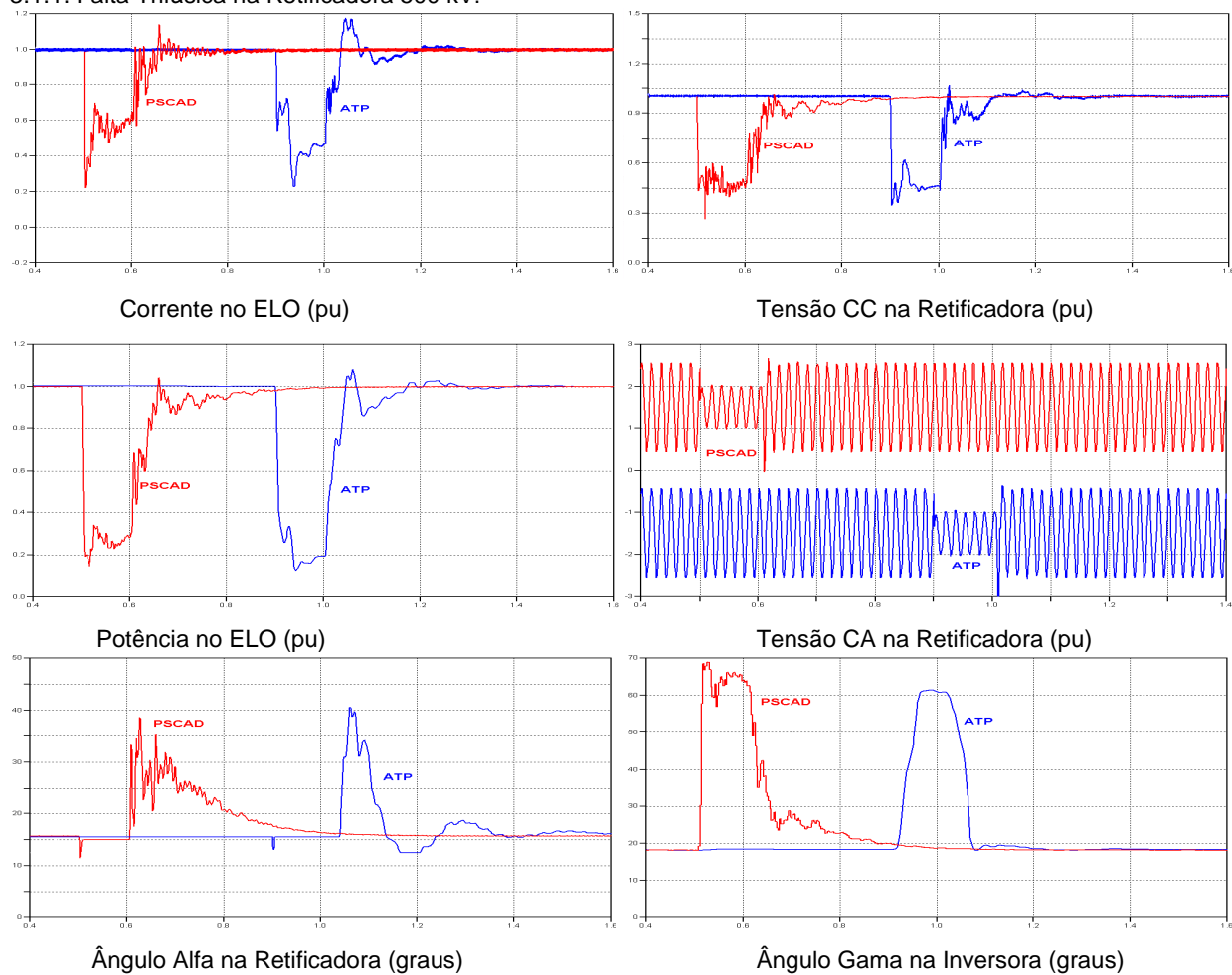
#### 3.0 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE PSCAD E ATP

Até a elaboração desse trabalho, os controles do ELO, desenvolvidos no PSCAD não haviam sido totalmente testados. Portanto, os resultados apresentados neste item são fruto do que se fez até o momento, podendo ainda ser modificado. Existe uma diferença básica entre o que foi modelado no PSCAD em comparação com o ATP. No PSCAD, tem-se um bipolo completo, como será na prática, com linha de eletrodo e capacitores de surto entre os dois pólos. No ATP, para atual estágio, tem-se apenas um monopolo equivalente, o que por si só já apresentaria pequenas diferenças para os mesmos transitórios na rede CA (tanto para Retificador quanto para Inversor). As correntes de pólo no PSCAD são em sentidos contrários e no ATP, são no mesmo sentido. Existem outras funções no PSCAD que, no estágio atual de desenvolvimento do modelo, ainda não estão representadas no ATP, principalmente aquelas que dizem respeito a funções de controle para transitórios no lado CC.

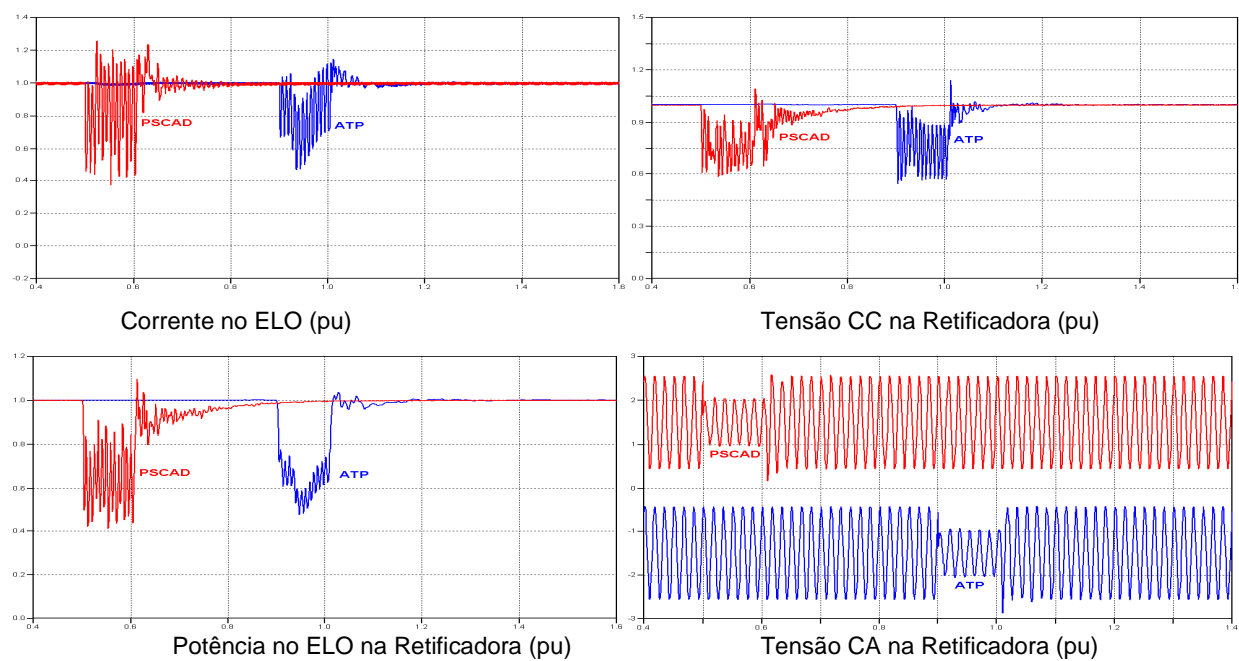
Para a comparação dos modelos, existe uma infinidade de possibilidades de aplicação de faltas, tanto no lado CA do Retificador quanto do Inversor, a nível de severidade da falta. Como não haveria condições de apresentar neste trabalho uma infinidade de resultados, a nível de comparação, optou-se por considerar faltas trifásicas e monofásicas nos barramentos CA das conversoras, que levassem as tensões desses barramentos a cair em torno de 50%, durante a falta. 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 foram aplicadas através de resistências de modo a levar a tensão do barramento CA a uma queda de 50% da tensão de regime permanente.

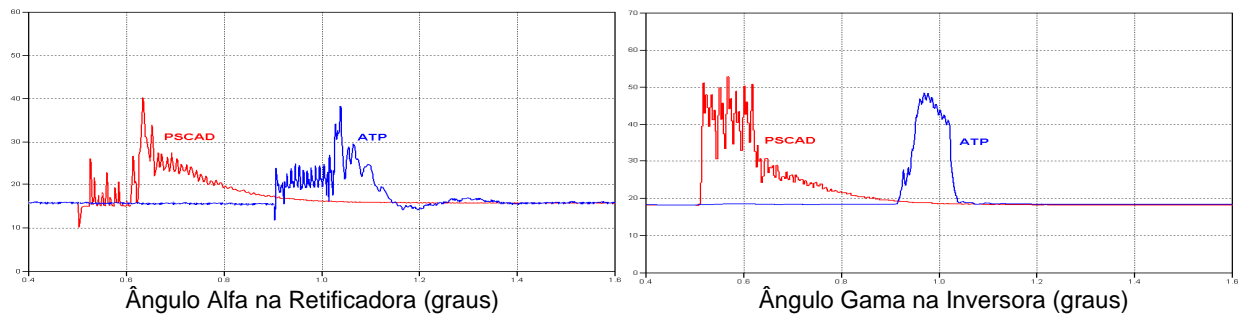
### 3.1 Falhas no Lado do Retificador:

#### 3.1.1. Falta Trifásica na Retificadora 500 kV!



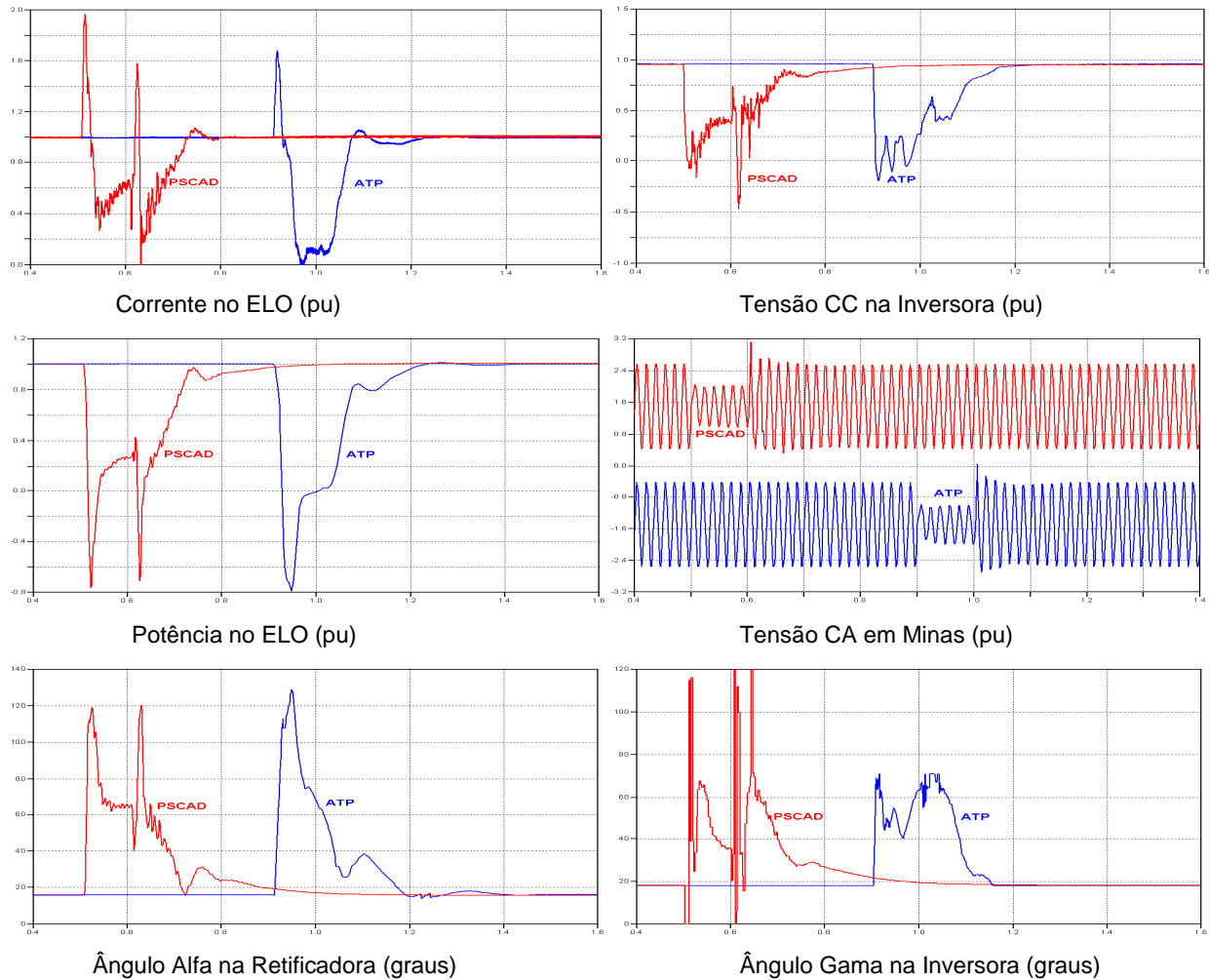
#### 3.1.2. Falta Monofásica na Retificadora 500 kV!



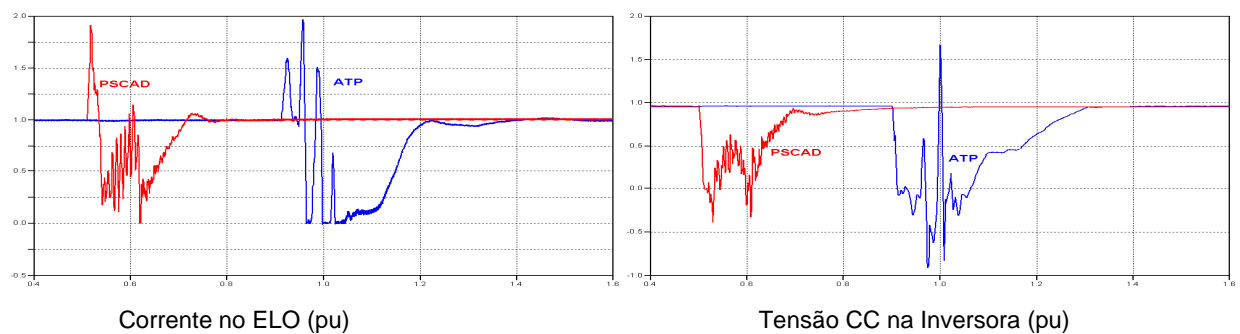


### 3.2 Falhas no Lado do inversor:

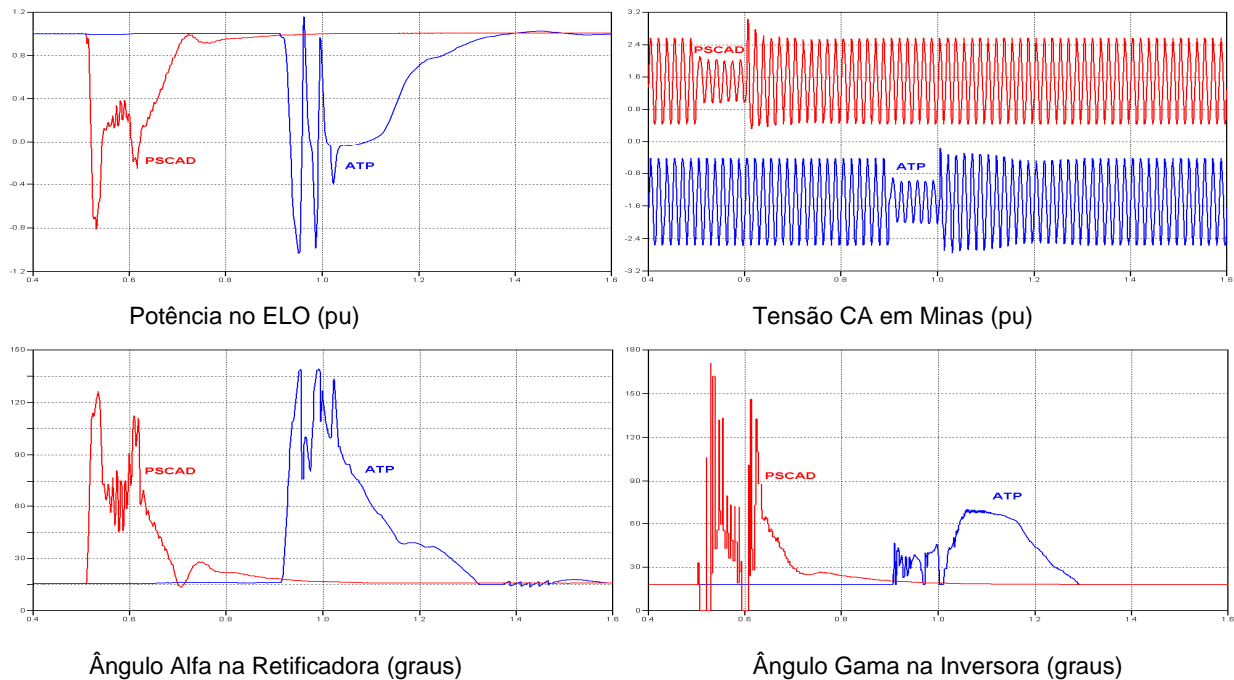
#### 3.2.1. Falta Trifásica em Minas 500 kV:



#### 3.2.2. Falta Monofásica na Inversora 500 kV!







### 3.3 Comentários Sobre os Resultados Encontrados:

Como pode ser visto nos oscilogramas anteriormente apresentados, existem diferenças no comportamento dos modelos do PSCAD e do ATP. O modelo do ATP foi baseado nas informações obtidas do modelo no PSCAD. Existem funções de controle no PSCAD que não foram implementadas no modelo do ATP por falta de tempo hábil. Essas funções são uma das causas dos diferentes comportamentos para os vários transitórios que foram simulados em ambos os modelos. Cabe ressaltar que existem pequenas diferenças nas redes retificadora e inversora que não permitiram obter exatamente as mesmas condições de regime permanente. Deve ser mencionado que valores de ângulo de extinção maiores que  $70^\circ$  são irreais. Na realidade, durante a falta na barra inversora, as tensões ficam distorcidas e a estimativa de gama fica comprometida durante esse período no PSCAD. No ATP é feito um estimado o ângulo de comutação ( $\mu$ ) e gama é calculado pela diferença entre  $180^\circ$  e  $\mu$ . Outra importante diferença é que no PSCAD, o instante de fechamento ou de abertura de chaves ou tiristores é feito 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 não tem tal artifício. A maior diferença se dá no fato que, nessa primeira versão, foi feito apenas um monopolo equivalente e não um bipolo completo. Isso faz com que as correntes nas linhas tenham sentidos iguais no ATP e opostos no PSCAD. Como no transitório, a corrente numa linha afeta o outro polo, os comportamentos são diferentes. Num bipolo tem-se aterramento entre os pólos por linha de eletrodo enquanto que num monopolo equivalente isso não acontece. Notar que escala de tempo das ondas de tensão CA (0.4 – 1.4 segundos) e diferente da restantes (0.4 – 1.6 segundos). Por essa razão os eventos parecem estar ocorrendo em tempos diferentes, para essas variáveis em relação às restantes. 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 o PSCAD e o ATP.

### 4.0 - CONCLUSÕES

Os resultados encontrados até o presente estágio de desenvolvimento do modelo no ATP mostram que outras funções de controle implementadas no PSCAD precisam ser incorporadas também ao modelo do ATP para que se possa ter modelos minimamente compatíveis. É intenção do autor continuar o desenvolvendo este modelo no ATP (inclusive já existe uma nova versão do PSCAD, com outros ajustes dos controles), com a implementação de novas funções de controle, melhoria daquelas já implementadas, duplicação do monopolo equivalente para bipolo (permitindo avaliações de transitórios no lado DC, principalmente nas linhas de corrente contínua) e uma reavaliação, função por função (CCA, VDCOL, Alfmin, Alfmax, etc), que permita validar o modelo do ATP com o do PSCAD. Os resultados mostraram que apesar das diferenças nas variáveis dos ELOS nos dois modelos, as tensões CA tem comportamento quase idêntico, o que permitiria estudos em que o foco fosse os sistemas CA, tanto da retificadora quanto da inversora.

### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dados de Sistema Obtidos na EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e de controles do ELO no PSCAD (definidos por um consultor internacional);



- (2) ELO de Corrente Contínua de Itaipu - Condicionamentos para a Aplicação de Religamento Monopolar na Linha de Transmissão de 500 kV Ibiúna – Bateias - R. A. A. Gonçalves – XII Eriac 2007;
- (3) ELO de Itaipu - Filtros de 3/5 Harmônicos da Estação Inversora de Ibiúna – Necessidade, Especificação e Projeto - R. A. A. Gonçalves, E. M. Brandi, G. S. Luz, J. R. Medeiros e A. R. Saavedra;
- (4) PSCAD – Manitoba HVDC Research Center;
- (5) ATP – Alternative Transient Program.

#### 6.0 - 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. ([randre@furnas.com.br](mailto:randre@furnas.com.br)).