



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

GSC 29
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC

MODELAGEM DETALHADA DO COMPENSADOR ESTÁTICO DE BOM JESUS DA LAPA, COM CONTROLE DIGITAL, PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS COM O ATP

Álvaro J. P. Ramos *

Germana L. P. Bastos

Heinz Tyll

Michael Bäre

ANDESA

SIEMENS AG

RESUMO

O CE Bom Jesus da Lapa representa uma geração moderna de projetos de CE, com controle digital e funções especiais que visam assegurar a melhor performance em qualquer condição operacional. As principais funções do sistema de controle são descritas e sua modelagem com os recursos do ATP são apresentadas.

O trabalho apresenta também simulações de validação do modelo comparando os resultados com simulações realizadas com o painel de controle do próprio CE (antes de ser despachado para o campo) conectado a um RTDS que simula a rede elétrica e os eventos estudados.

PALAVRAS-CHAVE

Compensador Estático-CE, Reator Controlador a Tiristor -TCR, Capacitor Chaveado a Tiristor-TSC, Controlador Digital-PI, Controlador de Estabilidade-HE

1.0 - INTRODUÇÃO

Os Compensadores Estáticos modernos têm-se mostrado uma alternativa eficiente para o controle transitório da tensão onde vários recursos de controle disponíveis o tornam capazes de assegurar uma performance muito eficiente para qualquer configuração ou condição operacional graças as suas características de adaptação as condições presentes do sistema.

A configuração do CE BJJ é mostrada na Figura 1. O CE BJJ é constituído de dois TCR, um TSC e dois filtros sintonizados para harmônicos de ordem 5 e 7. Os TCR e TSC são conectados em "delta" e os filtros em "Y" não aterrado. Os TCR (Thyristor Controlled Reactor) representam o meio tecnológico de se obter uma susceptância variável de forma rápida e contínua em termos de frequência fundamental. Com um ângulo de disparo de 90° o reator estará totalmente inserido e com 180° estará totalmente fora. Já o TSC (Thyristor Switched Capacitor) representa capacitores shunt chaveados a tiristores de forma controlada e utilizando-se de recursos de sincronização avançados que garantem manobras de energização com o mínimo de transitórios. Os filtros são fixos e estão sempre em operação.

A tecnologia de alocação dos elementos TCR e TSC permite uma operação contínua em toda a faixa operativa do CE nas condições normais ou nos denominados modos degradados quando alguns dos elementos estão indisponíveis sem, porém tornar o CE indisponível.

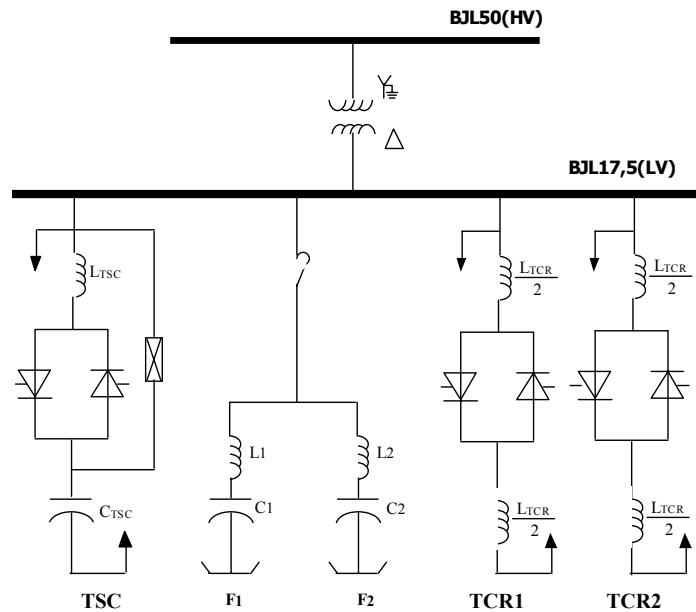


FIGURA 1 – Configuração básica do CE B.J.L.

2.0 - ESTRUTURA DO CONTROLE DO CE E DO MODELO DESENVOLVIDO

2.1 Estrutura Geral

As funções de controle do CE B.J.L são mostradas de forma simplificada na Figura 2, no modo de controle automático de tensão com base no “*voltage setpoint*”. V_{ref} pode variar na faixa de 0,95 a 1,05pu em degraus de 5kV. O ganho da malha de controle de tensão é ajustado automaticamente pela unidade denominada “*Automatic Gain Adjustment*” (AGA) que passamos a designar como “*Controlador de ganho*”. Este ajuste é realizado com base na potência de curto circuito do barramento de Bom Jesus da Lapa. A potência de curto circuito é estimada através de um recurso especial do CE que provoca um degrau de potência reativa (ΔQ_{REG}) na faixa de 15-20Mvar e mede a variação de tensão resultante (ΔV_{act}). Durante este processo o regulador de tensão fica bloqueado momentaneamente por aproximadamente 250ms para garantir a precisão do processo. Caso um distúrbio seja detectado durante este processo, o regulador é imediatamente desbloqueado e o processo interrompido.

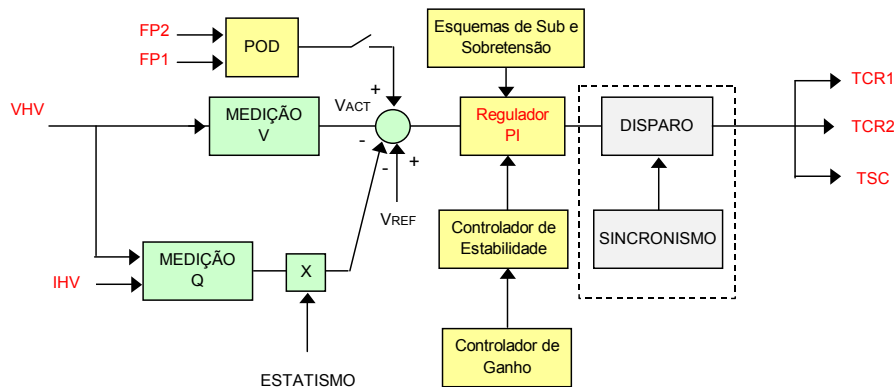


FIGURA 2 – Estrutura do Sistema de Controle do CE B.J.L.

2.2 Sistema de Medição, Estatismo e Filtragem

Consiste em todos os procedimentos de tratamento dos sinais de tensão e corrente instantâneos para obtenção do valor medido da tensão (V_{ACT}) e da potência reativa (Q_{SVC}) utilizados para definição do erro de controle. O diagrama de blocos ilustrativo do sistema de medição é mostrado na Figura 3. Os sinais de tensão e corrente obtidos de TP e TC são apropriadamente condicionados e, ainda na forma analógica, são filtrados através de um filtro “*antialiasing*” de 400Hz antes de ser digitalizados. A digitalização utiliza uma taxa de amostragem de 32 amostras por ciclo de 60Hz, ou seja, 1920 amostras por segundo. No equipamento os filtros adaptam-se a variações de frequência fundamental do sistema na faixa de 60+/-5Hz. No modelo ATP esta adequação não é considerada.

O sinal de medição da tensão terminal representa uma média das magnitudes das três tensões fase-terra no lado de 500kV na frequência fundamental. O fabricante se refere a estas tensões pela designação VHV10, VHV20 e VHV30 correspondendo às fases A, B e C.

Para se obter o sinal (V_ACT) insensível a harmônicos e que responda rapidamente as variações das tensões do sistema assegurando resposta rápida e estável, são utilizados vários filtros digitais no tratamento/transdução das tensões do sistema e a transformação (α, β) nos estágios finais de determinação de (V_ACT).

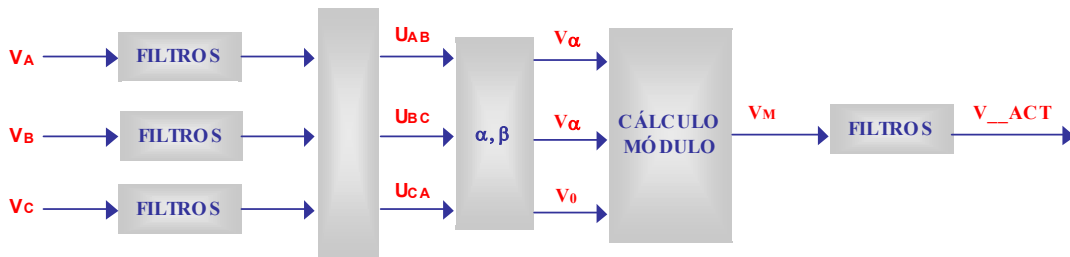


FIGURA 3 – Sistema de medição de tensão (V_ACT).

2.3 Regulador, Controles Especiais, Alocação, Disparo e Bloqueios

A partir do valor medido (V_ACT) e do valor de referência (V_REF), o regulador PI determina o valor de potência reativa (B_REG) para a devida correção do erro de controle. Na verdade, (B_REG) representa a admitância total vista do barramento 500kV em “pu” referido a 250MVA.

O ganho do regulador PI (KP_CE) é definido pelo controlador de ganho (AGA) e depende também da eventual atuação do Controlador de Estabilidade. O diagrama de blocos ilustrativo do sistema de controle e dos bloqueios do CE B JL é mostrado na Figura 4. Nesta Figura 4 a variável (B_CON) representa a admitância total vista do lado de baixa tensão (17,5kV) a ser alocada para os TCR1, TCR2 e TSC. O bloco alocador compreende a lógica que garante para cada instante, uma definição apropriada de admitância para cada TCR e TSC de modo que seja assegurada a operação do CE com variação contínua da susceptância em toda a sua faixa operacional. Isto significa que a energização e desligamentos do TSC comandados pelo controle do CE não provocam variações bruscas de admitância do CE e, portanto de valores RMS de tensão do sistema. Definidos os valores de susceptância dos TCR, o controle determina os ângulos de disparo necessários que são passados para os sistemas de sincronismo e disparo responsáveis para emitir os pulsos de disparo das válvulas.

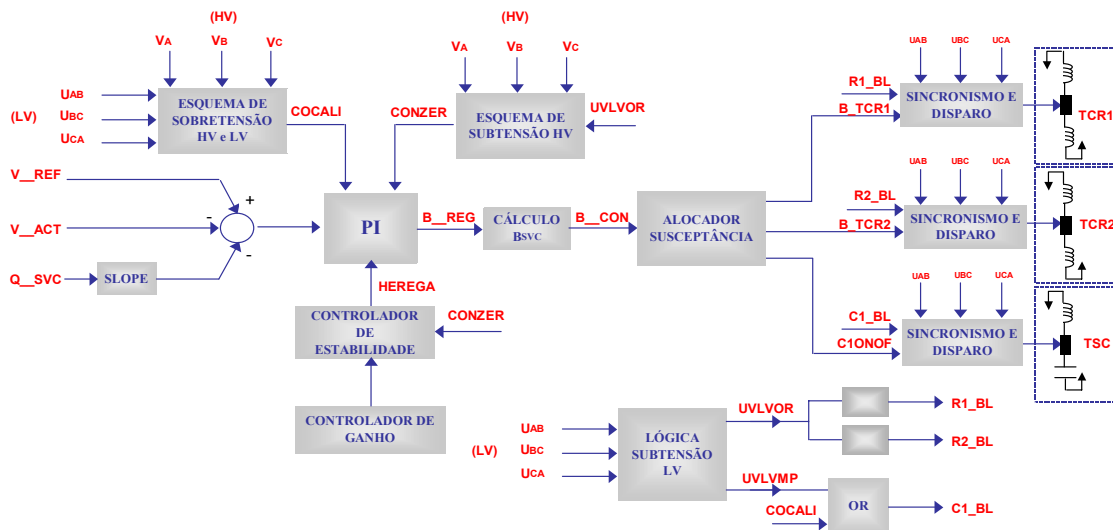


FIGURA 4 – Regulador de Tensão (PI), Controlador de Estabilidade, Alocador de Susceptância e Bloqueios.

2.4 Controlador de Estabilidade

Reduz o ganho do PI quando da ocorrência de instabilidade associada à interação do controle do CE com o sistema, casos comuns quando ocorre uma súbita redução de potência de curto circuito no ponto de conexão do CE. Este fenômeno de instabilidade de controle de CE, que é apontado e analisado na referência [03], se manifesta em frequências acima de 4Hz. Por esta razão o sistema de detecção e redução de ganho é ativado quando se observam oscilações de frequência superior a 4Hz no sinal de saída do regulador PI. O Controlador de Estabilidade atua reduzindo o ganho em degraus sucessivos de 80% realizados pela variável HEREGA. A Figura 5 mostra oscilações acima de 4Hz resultantes da abertura das linhas B. Jesus da Lapa – Rio das Éguas e B.

Jesus da Lapa –Ibicoara 500kV sem ocorrência de defeitos forçando o Controlador de Estabilidade a reduzir o ganho do CE para 32% do valor inicial para eliminar as oscilações. Nesta ocorrência, a potência de curto circuito trifásica em B JL 500kV sofre uma redução de 3260MVA para 410MVA.

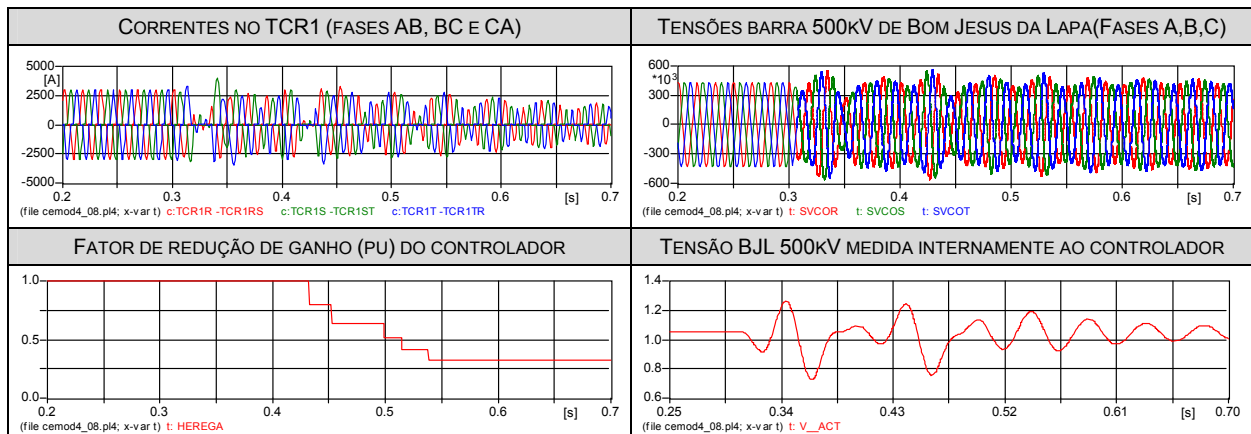


FIGURA 5 – Simulação com ATP: Ocorrência de instabilidade do controle do CE com a rede elétrica.

2.5 Esquema de Subtensão HV e LV

Sob certas condições de subtensão medidas no lado de alta tensão (500kV) do CE, o esquema de subtensão, “UBS-HV”, anula a saída do regulador PI (B_REG) quando qualquer das tensões fase-terra ou fase-fase ficam abaixo de 85% do valor nominal (500kV). O esquema realiza o “reset” quando todas as tensões acima referidas tornam-se superiores a 90% do valor nominal. Estes valores são ajustáveis em função das necessidades do sistema.

O esquema de subtensão relativo ao lado de baixa tensão (17,5kV), “UBS-LV”, atua quando a tensão fase-fase no LV em pelo menos uma das fases torna-se inferior a 25% do nominal (17,5kV). O valor de “reset” é 30%. Quando este esquema atua, os TCR e o TSC são bloqueados, isto é, as respectivas válvulas de tiristores não são permitidas de disparar visto que, nestas condições, não há garantia de que ocorra um disparo correto. Quando o TCR1 ou TCR2 é bloqueado, a variável R1__BL ou R2__BL assume o valor zero. O bloqueio do TSC ocorre quando a variável C1__BL torna-se zero.

2.6 Esquema de Sobretenção HV e LV

O esquema de sobretenção HV, “OBS-HV”, atua quando a tensão fase-terra em qualquer fase torna-se superior a 120%. O esquema tem “reset” quando a máxima tensão entre as fases torna-se inferior a 115%.

O esquema de sobretenção LV, “OBS-LV”, atua quando a tensão fase-fase em qualquer das fases torna-se superior a 120,7%. Ambos os esquemas de sobretenção atuam limitando o CE em 36Mvar e bloqueando o disparo do TSC.

2.7 Sistemas de Sincronismo e Disparo dos TCR

No modelo/ATP os sistemas de sincronismo e disparo dos tiristores dos TCR são representados em elevado nível de detalhes o que garante uma boa fidelidade do mesmo. Entretanto as compensações existentes no equipamento real para casos de variação de frequência fundamental do sistema não são consideradas no modelo.

O sistema de sincronismo e disparo define os pulsos para os TCR com base na informação de susceptância definida a cada instante pelo regulador e pela lógica de alocação de susceptância, necessária para a correção da tensão. As tensões de sincronização medidas no barramento 17,5kV são filtradas para evitar que componentes harmônicas perturbem a precisão do disparo dos tiristores. As tensões filtradas têm as fases devidamente compensadas.

2.8 Sistemas de Sincronismo e Disparo do TSC

O sistema de sincronismo e disparo do TSC recebe o comando do sistema de controle através da variável C1ONOF que tem o nível lógico 1 quando o TSC deve ser ligado.

O sincronismo do TSC se baseia nas tensões das três fases aplicadas às válvulas de tiristores. O pulso de disparo de comando do fechamento da válvula de tiristores ocorre no momento em que a tensão da válvula passa por zero. Em alguns casos em que o capacitor do TSC está previamente carregado, as tensões das válvulas podem não cruzar o zero dependendo da magnitude da tensão do capacitor. Nestes casos o disparo é realizado quando o valor absoluto das tensões atinge um valor mínimo. Quando o valor absoluto da tensão mínima é superior a 1,5pu a energização do TSC é bloqueada para evitar “stress” excessivo sobre a válvula. Esta situação ocorre quando o capacitor/TSC está previamente carregado com tensão elevada resultante devido a sobretenção transitória do sistema.

A Figura 6 mostra as formas de onda de tensão e corrente na válvula, fase CA por ocasião da energização do TSC com o capacitor previamente descarregado. Como se sabe, mesmo com a manobra realizada na passagem da tensão por zero, não se evita o transitório como indicado na forma de onda da corrente (Figura 6, a direita).

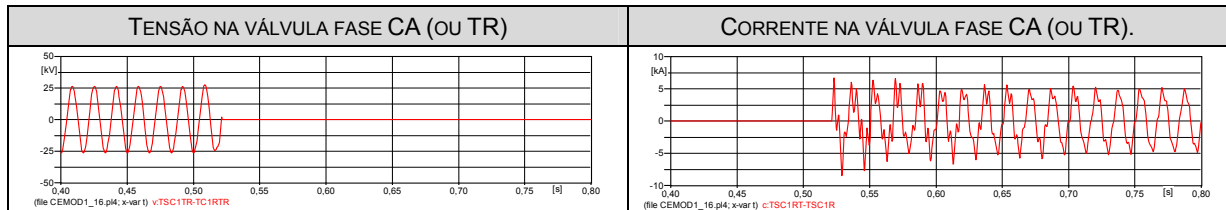


FIGURA 6 – Formas de onda da tensão e corrente na válvula com a energização do TSC com o capacitor previamente descarregado.

A Figura 7 mostra as formas de onda de tensão e corrente na válvula, fase CA por ocasião da energização do TSC com o capacitor previamente carregado com a tensão muito próxima ao valor de pico do sistema. Este é o caso onde ocorre o mínimo de transitório visto que no instante da manobra, a tensão do sistema passa pelo valor máximo praticamente igual à tensão do capacitor, sendo nulos a tensão na válvula e o dv/dt sobre o capacitor. Neste caso, o transitório observado na corrente (Figura 7) é muito reduzido.

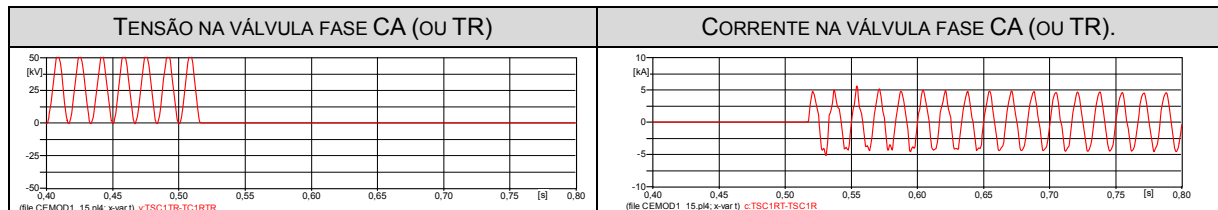


FIGURA 7 – Formas de onda da tensão e corrente na válvula com a energização do TSC com o capacitor previamente carregado.

3.0 - MODELAGEM PARA O ATP

3.1 Comentários Gerais

O modelo do CE B JL para o ATP é constituído de um arquivo principal e arquivos auxiliares que tratam procedimentos e cálculos realizados repetidas vezes durante o processamento e que são chamados pelo comando “INCLUDE”.

3.2 Elementos de Potência

Transformador, TCR, TSC, filtros F1 e F2, pára-raios, circuitos “snubber”, chaves tipo 11 (representando as válvulas de tiristores) foram os elementos usuais para representar os elementos de potência do CE.

3.3 Sistema de Controle, Sincronização e Disparo

As funções de condicionamento dos sinais de tensão e correntes medidos são realizadas através de funções comuns da TACS inclusive os filtros analógicos. A conversão A/D dos sinais medidos bem como todos os filtros e funções digitais devem ser sincronizados pelo sinal de “clock” obtido através de uma fonte tipo “23” da TACS com uma frequência de 1920Hz.

As lógicas e operações que constituem as diversas funções de controle e bloqueio são realizadas no ATP com os recursos da TACS e são praticamente as mesmas que são efetivamente programadas nos processadores de controle do CE. Apenas funções do equipamento que visam dar robustez e confiabilidade a operação real do mesmo são dispensáveis tais como verificações e bloqueios diversos. Também as facilidades operacionais, como, por exemplo, operar o TCR2 em substituição do TCR1 quando este estiver indisponível, não são de interesse para o modelo. A possibilidade de operar nos modos degradados sem um TCR ou sem o TSC são previstos no modelo uma vez que esta condição pode ocorrer e ser necessário sua simulação.

3.4 Inicialização

A operação em regime permanente dos TCR não pode ser determinada fasorialmente com exceção para o ângulo de disparo de 90 ou 180 Graus. Caso os TCR não operem inicialmente nestes ângulos, os resultados do regime permanente fasorial que o programa ATP apresenta no arquivo tipo “.LIS” pode não representar a condição inicial desejada.

Entre as alternativas possíveis optamos por inicializar o modelo com as válvulas dos TCR e TSC abertas. Nestas condições, o CE B JL estará nos resultados do fluxo de carga do ATP apenas com o filtro e gerando aproximadamente $Q^0(CE)=73 * (V_ACT)**2$ Mvar.

Uma forma de se obter a solução do fluxo de carga inicial do ATP refletindo o ponto de operação real desejado do CE e do sistema no caso base em consideração é conectar no barramento BJL 500kV uma fonte de tensão ideal com tensão igual à de BJL 500kV em módulo e ângulo do caso base. Como a fonte de tensão ideal (Fonte 14) impõe a tensão em módulo e ângulo ela irá gerar a diferença entre o que o CE gera que é $Q^0(\text{CE})$ só com os filtros e o valor real do caso base. A fonte ideal pode ser desconectada logo no início da simulação em $t=1\text{ms}$ para cumprir este objetivo. Se houver interesse em acelerar a inicialização esta fonte pode ser retirada 20ms após ($t=20\text{ms}$). Nos casos testados não verificamos a necessidade de ficar com a fonte de inicialização por 20ms.

Caso se deseje inicializar o CE com os capacitores do TSC ligados, o CE estará gerando o máximo capacitivo $Q^0(\text{CE}) = 250 * (V_ACT)^2 \text{ Mvar}$. Esta alternativa é interessante quando o ponto de operação do CE no caso base é capacitivo acima de 100Mvar. De forma geral, deve se inicializar o CE de forma que a geração da fonte ideal gere o mínimo, o que contribui para uma inicialização mais rápida.

3.5 Parâmetros da Simulação

Observou-se que o processo numérico principalmente no que diz respeito ao perfeito funcionamento dos filtros digitais, é sensível ao intervalo de integração "DELTAT" utilizado. A experiência atual de estudos e testes realizados indicam que DELTAT igual a $2,5\mu\text{s}$ ou seus múltiplos $5,0\mu\text{s}$ e $10,0\mu\text{s}$ produziram resultados satisfatórios. O parâmetro EPSILN também tem significativa influência no processo numérico e não deve ser maior do que $1,0\text{E}-9$, conforme a experiência de vários casos. Valores maiores do que este podem levar a resultados totalmente inconsistentes uma vez que os filtros digitais não funcionarão adequadamente. O valor recomendado antes que maior experiência seja obtida é $\text{EPSILN}=1,0\text{E}-16$.

4.0 - TESTES DE VALIDAÇÃO

A Figura 8 apresenta resultados da simulação de curto circuito trifásico franco nos terminais do CE obtidos com o modelo do ATP e de estudos realizados com o painel real do CE conectado a um RTDS no laboratório. Neste caso foi utilizado uma rede equivalente simplificada para acomodar à capacidade de representação disponível do RTDS. Esta mesma rede simplificada foi montada para o modelo do ATP de forma que as simulações do ATP e RTDS fossem as mais idênticas possíveis. A determinação do instante de aplicação e remoção do defeito, por exemplo, representou a maior dificuldade uma vez que não se dispunha de registros destes instantes de forma exata.

Como pode se observar na Figura 8, a resposta do sistema de medição e filtragem (V_ACT), do controle (B_REG), do sistema de alocação (ALFAR1) foram reproduzidas de forma muito fiel à resposta do controle real. O cuidado em simular os instantes de aplicação e remoção do defeito com maior fidelidade possível, possibilitou uma reprodução muito boa do comportamento das formas de onda das correntes e tensões do CE.

5.0 - CONCLUSÃO

Os ensaios de validação mostraram que o modelo desenvolvido para o ATP apresentaram uma boa fidelidade com os resultados obtidos dos estudos do RTDS realizados com o equipamento real conectado a uma rede simulada e simplificada. O nível de detalhes utilizado para representar os filtros, as funções de controle e lógicas diversas foi imprescindível para se atingir este nível de fidelidade. Para isto, entretanto se obtém um modelo muito complexo que exige um razoável esforço computacional. Este fato é preocupante para casos de estudos que exigem maior detalhes de representação da rede o que pode tornar o caso excessivamente pesado ou mesmo inviável. Uma versão com algumas simplificações parece-nos oportuna de forma a possibilitar a representação mais extensa do sistema e de outros componentes (máquinas síncronas, pára-raios, outros CE, etc) sem perda de qualidade dos resultados.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) "SVC Bom Jesus da Lapa – Closed Loop Control – Manual", Relatório SIEMENS, referência E50105-A1985-U961.
- (2) "Modelagem do Compensador Estático de Bom Jesus da Lapa para o ANATEM", Relatório ANDESA, Agosto 2002.
- (3) Alvaro. J. P. Ramos and Heinz Tyll, "Dynamic Performance of a Radial Weak Power System with Multiple Static VAR Compensators", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, October 1989.
- (4) A.N. Vasconcelos, A. J. P. Ramos, J.S. Monteiro, M.V.B.C. Lima, H.D. Silva, L.R. Lins "Detailed Modeling of an Actual Static VAR Compensator for Electromagnetic Transient Studies", IEEE, Transactions on Power Systems Vol. 7, January 1992.

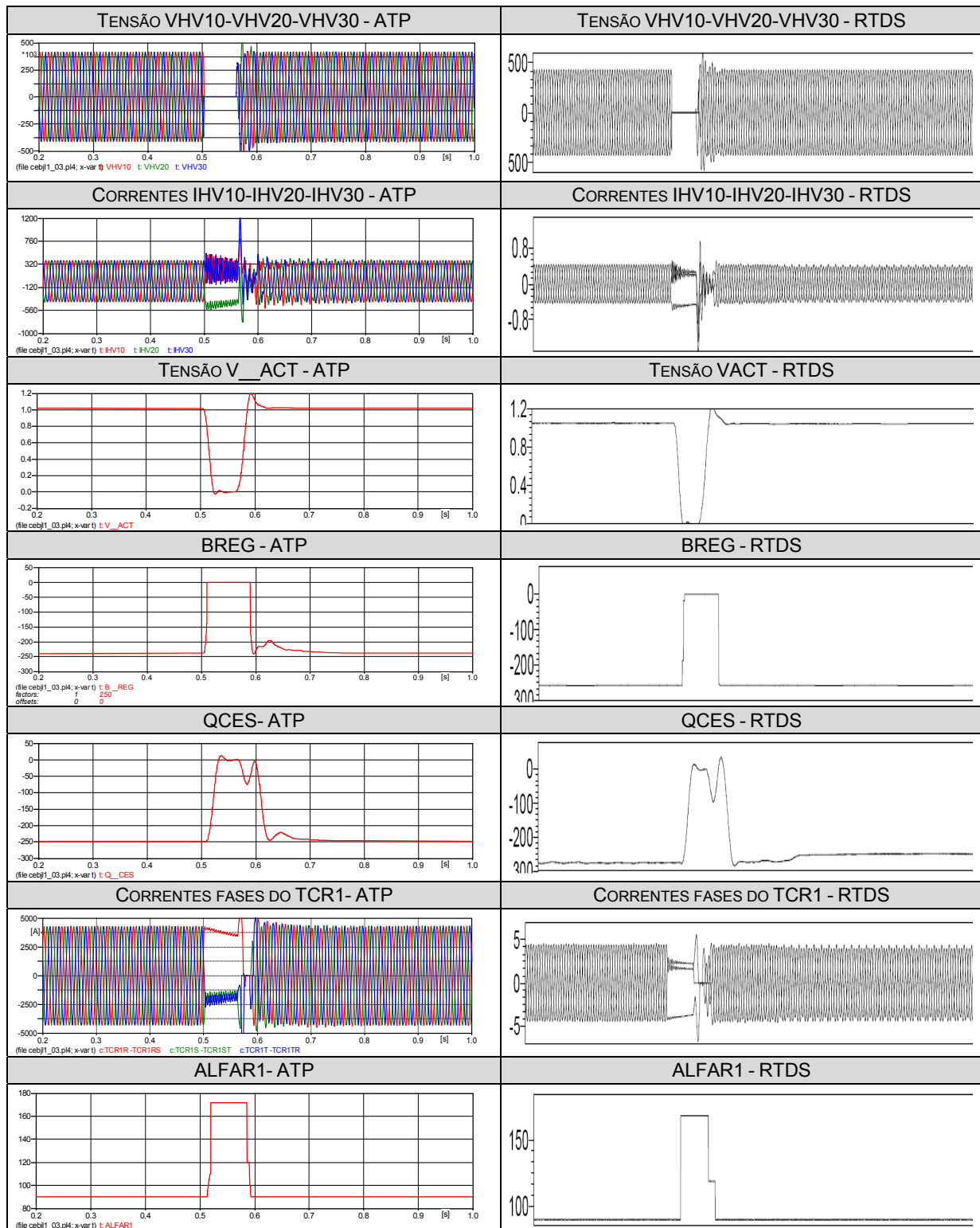


FIGURA 8 – Curto circuito trifásico Bom Jesus da Lapa 500kV.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Álvaro J. P. Ramos

Nascido no Recife; 1951

Mestrado (1975) EFEI e Graduação (1973) na Escola de Engenharia da UFPE.

Engenheiro da CHESF desde 1974; Chefe da Divisão de Estudos Elétricos Especiais da Operação de 1988 a 1996; Assessor Técnico da Diretoria de Engenharia de 1996 a 1998;

Diretor da ANDESA desde 1998 onde é responsável por diversos projetos na área de sistemas elétricos.