



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

GAT-03  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

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

**CONTROLE COORDENADO DE TENSÃO – CONTROLE SECUNDÁRIO APLICADO  
AO SISTEMA ELÉTRICO ACRE RONDÔNIA**

**Alcides Sotério de O. Filho\*  
ELETRONORTE**

**Francisco Damasceno Freitas  
Universidade de Brasília**

**Fernando Pignataro Filho  
SFE Ltda**

**RESUMO**

Este trabalho investiga a adequabilidade da aplicação de uma malha de controle secundário de tensão - CST a geradores do sistema Acre-Rondônia. O CST foi aplicado para controle de tensão na SE Ariquemes – 230 kV, através de unidades geradoras da UHE Samuel, como fonte de reativo para o sistema de transmissão. Três configurações são consideradas para o sistema, tendo como base a topologia de rede para o ano 2003. Para avaliar o desempenho dos controladores, algumas contingências foram simuladas, baseadas na aberturas de circuitos CA, rejeição de carga e perdas de geração. Foram efetuadas diversas simulações e apresentadas respostas em termos de tensões em algumas barras, com e sem o CST, bem como o perfil da potência reativa dos geradores, após as contingências. Os resultados indicam a viabilidade do emprego do CST no Sistema Acre-Rondônia.

desempenho do sistema ao implementar esquemas automatizados e coordenados de controle de tensão e da geração de potência reativa. Desta forma, procedimentos que até então vem sendo executados de forma manual e baseados na experiência de operadores deverão ser automatizados localmente e coordenados através de um centro de gerenciamento do sistema.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de tensão e o fluxo de potência reativa de um sistema elétrico isolado composto por unidades geradoras térmicas e hidráulicas. Visando atender a razões sistêmicas de estabilidade de tensão e restrições de potência reativa, implementou-se a filosofia do CST num sistema real de forma a manter um despacho centralizado de potência reativa, fornecida por unidades geradoras, objetivando atenuar, após uma contingência, os desvios de tensão em uma barra piloto do sistema de transmissão.

**PALAVRAS-CHAVE**

Controle secundário de tensão - CST. Controlador PI. Sistema Acre-Rondônia. Suporte de reativo.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

No atual cenário do Sistema Elétrico Brasileiro, a minimização das perdas, o controle da potência reativa e a manutenção do perfil de tensão do sistema em níveis seguros são fatores essenciais para as empresas sob os aspectos operacionais e financeiros. Pode-se melhorar e otimizar a operação e o

**2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO**

A Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A - Eletronorte, empresa subsidiária das Centrais Elétricas Brasileiras S.A, - Eletrobrás, objetiva garantir o suprimento às concessionárias estaduais, o fornecimento aos grandes consumidores da indústria de eletro intensivos, nos estados de Roraima, Acre, Amazonas, Rondônia, Mato Grosso, Tocantins, Maranhão, Para e Amapá, bem como realiza intercâmbio elétrico com as regiões nordeste e sul/sudeste. O sistema elétrico Acre-Rondônia, conforme diagrama unifilar básico, representado na Figura 1, objeto de estudo do artigo proposto é

(\* )Centrais Elétricas do Norte do Brasil – SHN – QD 06 – Ed. Venâncio 3000, Bloco B, 8º andar, Sala 801  
CEP 70718-900 – Brasília - DF  
Tel.: (61) 429-6383 - Fax: (61) 429-5107 - E-MAIL: soterio@eln.gov.br

constituído por dois subsistemas interligados - Acre e Rondônia - formando um sistema isolado dos demais sistemas da Eletronote.

O subsistema Acre, consiste de um parque termelétrico com unidades geradoras a óleo combustível. O subsistema Rondônia consiste de um parque termelétrico e da UHE Samuel com seu sistema de transmissão. As unidades geradoras do sistema, hidrelétricas e térmicas, concentram-se na região de Porto Velho. Para o cenário de 2003 será considerada em atividade a usina termoeétrica (UTE) de Rio Acre, localizada na região de Rio Branco.

A configuração básica usada neste trabalho é referente à rede e carga pesada de cerca de 450 MW para o ano de 2003. Na sua essência, a interligação do sistema vai desde Rio Branco até Vilhena. A interligação de Rio Branco a Porto Velho ocorre em circuito simples. De Porto Velho a Usina Hidrelétrica (UHE) Samuel a ligação ocorre em circuito duplo. As unidades térmicas do Rio Acre foram consideradas desligadas. Considera-se ainda uma pequena central hidrelétrica em Cachoeira com aproximadamente 10 MW.

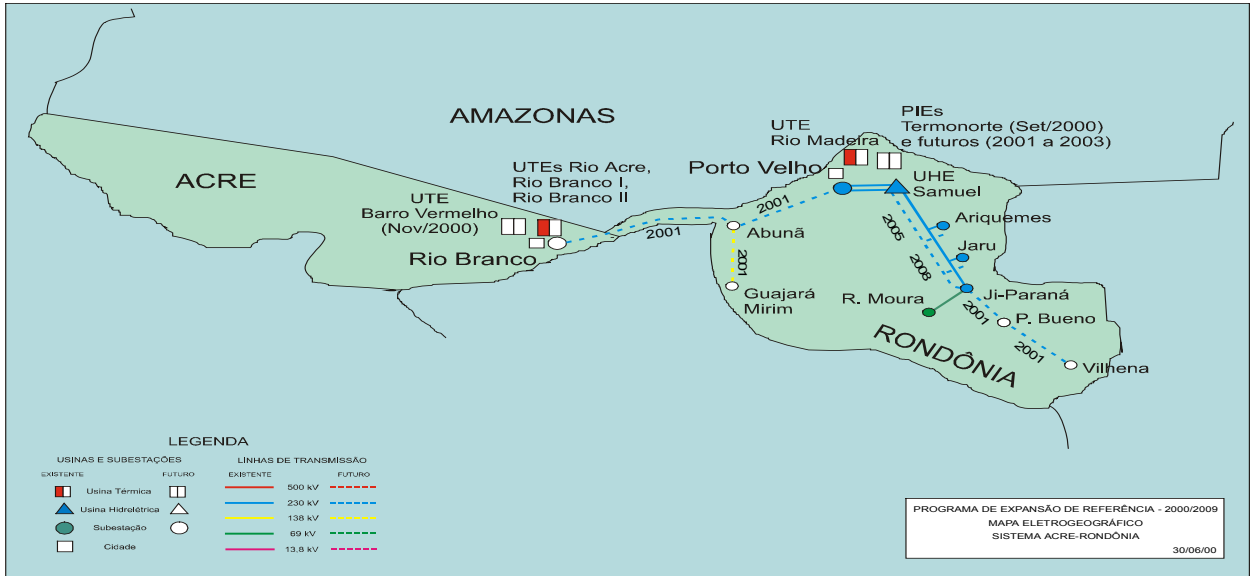


Figura 1 – Sistema Acre Rondônia - Unifilar Básico

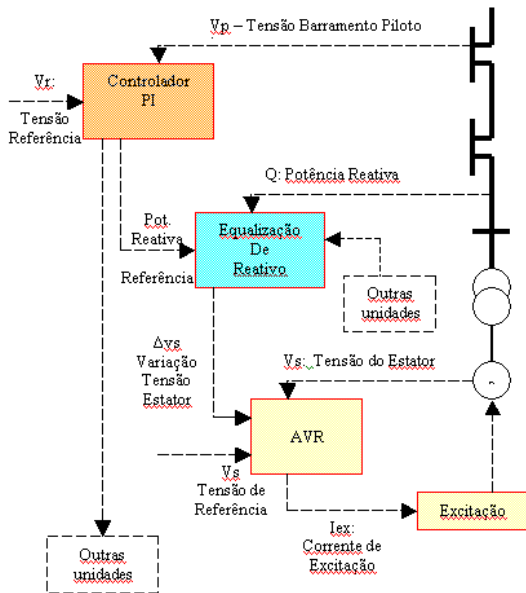


Figura 2 – Controle Secundário de Tensão Diagrama de bloco

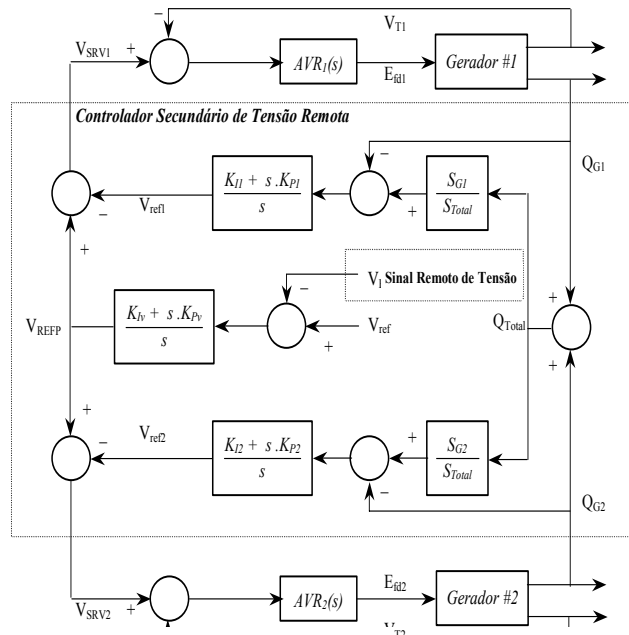


Figura 3 – Controle Secundário de Tensão Função de Transferência

### 3.0 - BASE DE DADOS E PROCESSAMENTO

Os casos convergidos de fluxo de potência foram elaborados através do Programa de Análise de Redes – ANAREDE.

O estudo do comportamento dinâmico do sistema, com abertura de LT's, rejeição de carga e perda de geração, foi realizado através do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos -ANATEM onde foram definidos os casos relevantes para o estudo em referência. Os gráficos apresentados no presente trabalho foram obtidos através do programa PLOT CEPEL.

Os programas ANAREDE, ANATEM e PLOT CEPEL, acima relacionados, foram desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

### 4.0 - ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A filosofia básica utilizada para simulação do CST no Sistema Acre-Rondônia, está representada através do diagramas de bloco representados nas Figuras 2 e 3.

Controladores do tipo integral são empregados para manter os fluxos de potência reativa de geradores de forma a atenuar as variações de tensão em barras piloto de um sistema elétrico.

A filosofia de ajuste adotada teve como objetivo atender aos requisitos do sistema a fim de restringir as excursões de tensão resultando num desempenho satisfatório frente aos eventos de abertura de circuitos, perda de geração e rejeição de carga.

### 5.0 - SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

A configuração descrita anteriormente apresenta deficiência para o atendimento da carga no ano de 2003, devido ao fato da interligação UHE Samuel – Ji Paraná constituir-se em um elo fraco para o atendimento da carga até Vilhena. É necessária, portanto, a duplicação do trecho UHE Samuel – Ji Paraná (Configuração I). Uma outra alternativa investigada é aquela que considera apenas a duplicação da linha, porém sem a existência de CER em Ji Paraná (Configuração III).

A técnica de controle secundário de tensão foi aplicada ao sistema, considerando-se as três configurações descritas anteriormente. Usou-se a mesma estrutura e parâmetros de controlador secundário apresentados no caso (1). A barra piloto selecionada foi a da SE Ariquemes 230 kV. A escolha da barra piloto foi baseada no fato de que a subestação nesta barra constituir-se em importante fonte de controle de reativo para interligação entre a UHE Samuel e a SE Ji Paraná. Também pelo fato de se poder efetuar o controle de reativo a partir da UHE- Samuel. Neste

sentido, foram escolhidos dois geradores da usina para integrar a malha de controle.

Foram avaliadas as respostas do sistema para contingências decorrentes das seguintes perturbações simuladas:

- Caso I - abertura da linha Ji-paraná-Vilhena
- Caso II - perda de uma unidade geradora de 70 MW, no PIE em Porto Velho e
- Caso III - abertura da linha Abunã-Rio Branco

No caso de abertura de linhas, por se tratar de sistema radial, há naturalmente rejeição de carga de todo trecho atingido. O resultado é a ocorrência de sobrefreqüências. Para os casos estudados, este limite não superou a 0,5 Hz. Quando ocorre o inverso, ou seja, perda de geração, a subfreqüência não caiu mais que 0,2 Hz.

#### 5.1 Testes envolvendo a Configuração I

As Figuras 4 e 5 mostram os resultados das simulações, referente ao Caso I, respectivamente, na situação sem a atuação do CST e com a atuação do CST. Quando não está presente o CST, após abertura da linha Ji Paraná-Vilhena a tensão da barra piloto (Ariquemes 230 kV) sobe a aproximadamente 1,015 pu. A situação antes da perturbação era de tensão 1,00 pu. Com introdução da ação do CST, a tensão na barra de Ariquemes retornou ao seu valor de regime permanente. Isto ocorre porque o ajuste da tensão de referência para aquela barra deve ser a mesma daquela antes da perturbação. Verifica-se que as tensões das demais barras também diminuem. Como resultado, as tensões dos geradores da UHE Samuel que participam da estratégia de controle têm as suas tensões reduzidas.

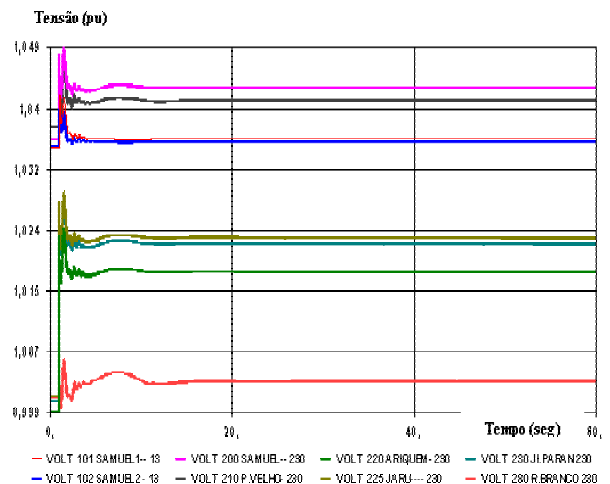


FIGURA 4 – CASO I - TENSÕES EM BARRAS - SEM CST

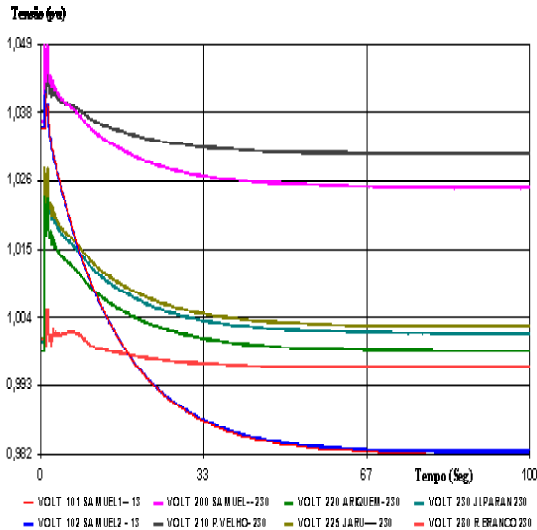


FIGURA 5 – CASO 1 - TENSÕES EM BARRAS COM CST

As potências reativas das unidades geradoras, em resposta à perturbação e a ação de controle secundário são mostradas na Figura 6. Observa-se que as duas unidades da UHE Samuel agem no sentido de absorver reativo para manter a tensão na barra piloto em 1,00 pu. Uma unidade absorve cerca de 25 MVar e a outra 10 MVar. Por outro lado, outras unidades distantes da usina controladora atuam no sentido de gerar parcelas menores de reativo.

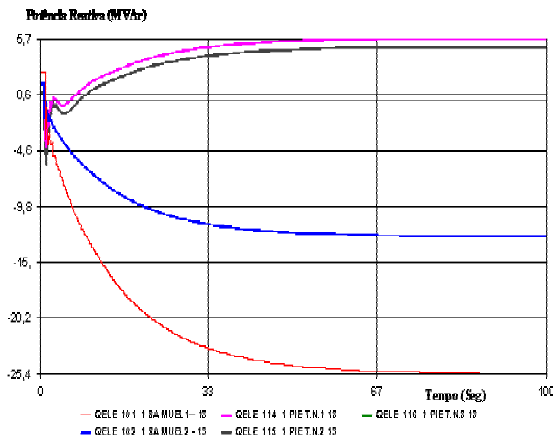


FIGURA 6 – CASO 1 – POTÊNCIA REATIVA COM CST

Testes semelhantes foram realizados considerando o Caso II, correspondente a perda de uma unidade de 70 MW da usina de Porto Velho. As simulações para este caso são mostradas nas Figuras de 7 a 8.

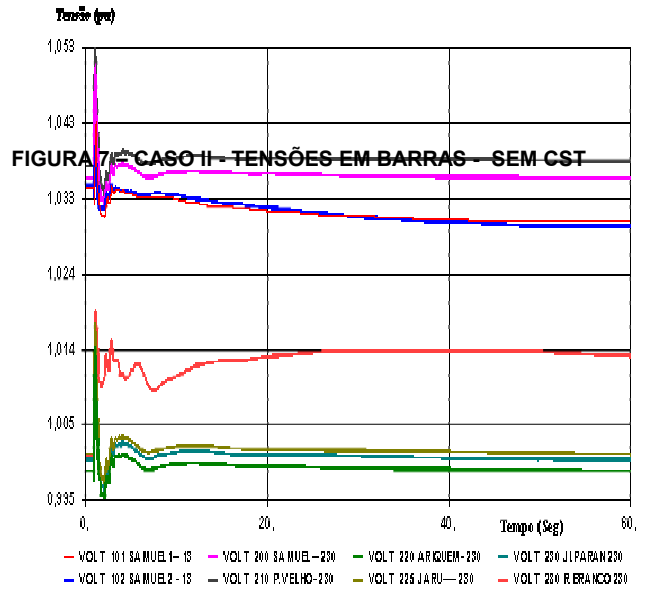
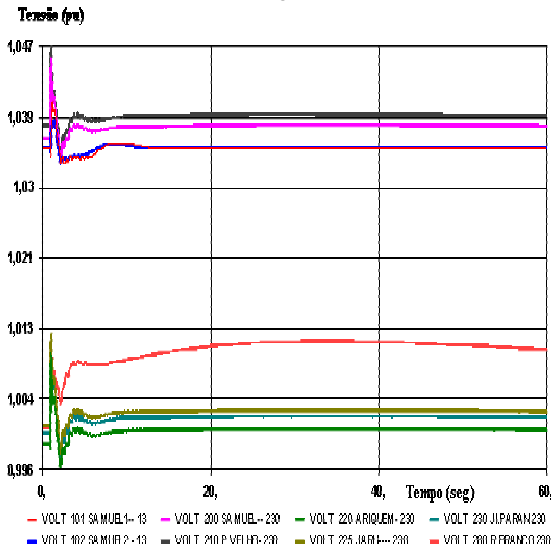


FIGURA 8 – CASO II - TENSÕES EM BARRAS - COM CST

Das Figuras 7 e 8, observa-se que não há variações significativas das tensões após a perturbação, quando ocorre a perda de 1 unidade de 70 MW da usina térmica Porto Velho. Isto se deve ao fato de que a perturbação não ocasionar mudança significativa na tensão da barra de Ariquemes, quando não há controle secundário. Por isso as demais barras também não sofrem variações de tensão significativas. As mesmas considerações podem ser relatadas em relação às potências dos geradores, não sendo este um caso crítico.

As simulações referentes à abertura da interligação Abunã-Rio Branco, a exemplo das simulações para o Caso II, não causam impacto significativo nas tensões da barra piloto e potências reativas das unidades geradoras, ao se comparar os casos com o CST e sem o CST. Isto se justifica pela localização da perturbação estar distante da barra piloto, havendo suporte de reativo suficiente das unidades próximas à abertura da interligação.

5.2 Testes envolvendo a Configuração II

Nesta subseção são apresentados os testes referentes à configuração em que supostamente ocorre atraso na duplicação do circuito entre a UHE Samuel e Ji Paraná. A seqüência de testes é a mesma apresentada na Subseção 5.1.

Inicialmente os testes são efetuados, considerando-se ausência de controle secundário de tensão e contingência referente à abertura da interligação UHE Samuel e Ji Paraná (Caso I). A Figura 9 mostra as excursões de tensão em algumas barras. A barra piloto tem uma variação superior a 10 %. Outras barras alcançam cerca de 1,15 pu em regime permanente, que é um resultado inaceitável para uma operação de longa duração. Com a ação de controle secundário de tensão as novas tensões passam a ser aquelas mostradas na Figura 10. Observa-se neste caso, que

o maior nível de tensão fica em 1,05 e a tensão da barra piloto alcança 1,00 pu. Entretanto, as tensões dos geradores controladores da barra piloto caem a níveis inaceitáveis. Uma solução para este caso seria considerar a participação de outras usinas em que houvesse suporte de reativo a fim de dividir a tarefa de manter a tensão da barra piloto e dos limites de tensão e de reativo de todas unidades geradoras.

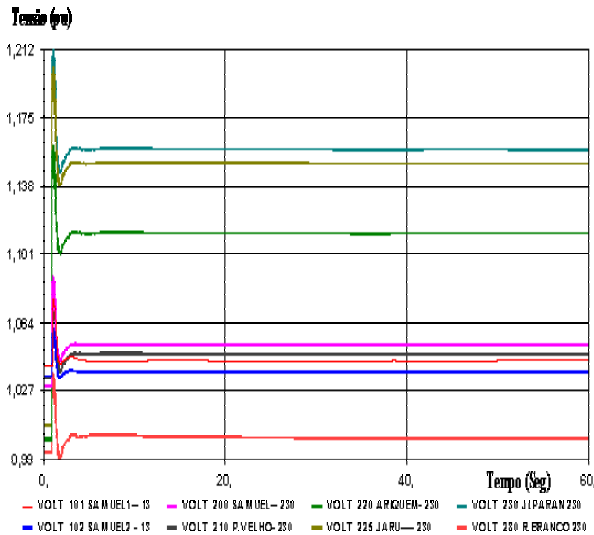


FIGURA 9 – CASO I – TENSÃO NAS BARRAS SEM CST

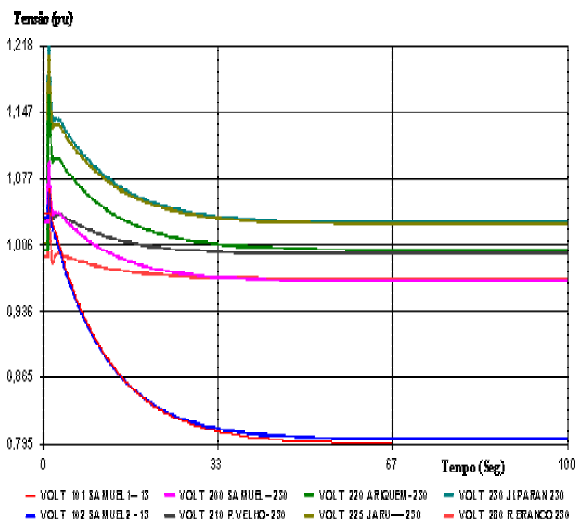


FIGURA 10 – CASO I – TENSÃO NAS BARRAS COM CST

Para reduzir a tensão da barra piloto os geradores controladores absorvem níveis elevadíssimos de potência, inviabilizando a operação. Os valores observados são devidos a não consideração de limites de reativo nos modelos de controladores. Portanto, para esta situação não é possível operar o sistema sem o suporte de reativo necessário, possivelmente havendo a necessidade de desligamento de cargas para minimizar o efeito Ferranti das linhas.

Nas simulações referentes aos Casos II e III, a exemplo dos resultados obtidos nos testes da

Configuração I, não foram observados desvios significativos das tensões, nas situações com o CST e sem o CST.

### 5.3 Testes envolvendo a Configuração III

Nesta configuração, supõe-se que o suporte de reativo na SE Ji Paraná seja constituído somente por capacitores e há duplicação da interligação UHE Samuel – Ji Paraná.

A Figura 12 mostra as tensões para a situação em que não há controle secundário de tensão. Para esta contingência, a tensão da barra piloto em regime permanente, atinge cerca de 1,02 pu. Portanto 2% acima do seu valor antes da perturbação. As demais tensões ficam abaixo de 1,05 pu. A Figura 11 exibe o resultado relativo a perturbação, agora considerando-se ação do CST. Todas as tensões ficam dentro de níveis aceitáveis. A Figura 14 mostra a excursão no tempo das potências reativas dos geradores. Como era de se esperar, os dois geradores controladores da barra piloto são os que mais contribuem para assegurar a variação de tensão verificada.

Resultados semelhantes aos verificados na Configuração I, ocorrem para teste efetuados considerando-se as contingências II e III.

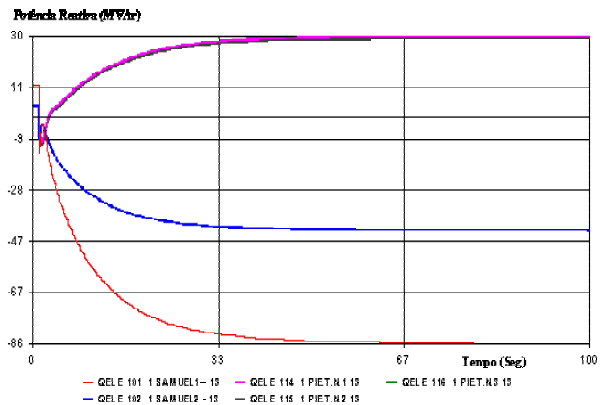


FIGURA 11 – CASO I – POTENCIA REATIVA GERADA COM CST

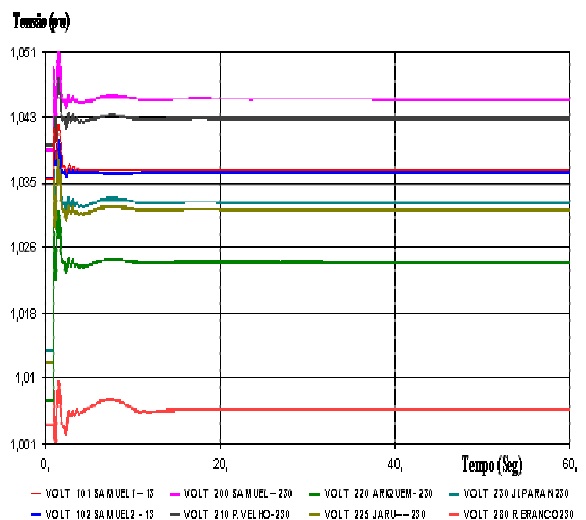


FIGURA 12 – CASO I – TENSÃO EM BARRAS SEM CST

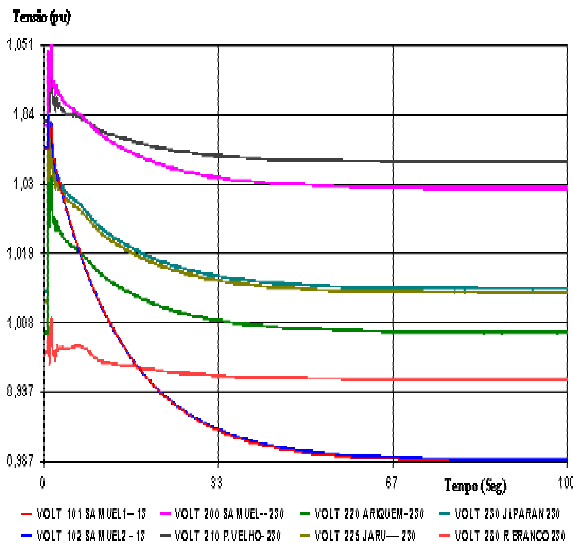


FIGURA 13 – CASO I – TENSÃO EM BARRAS COM CST

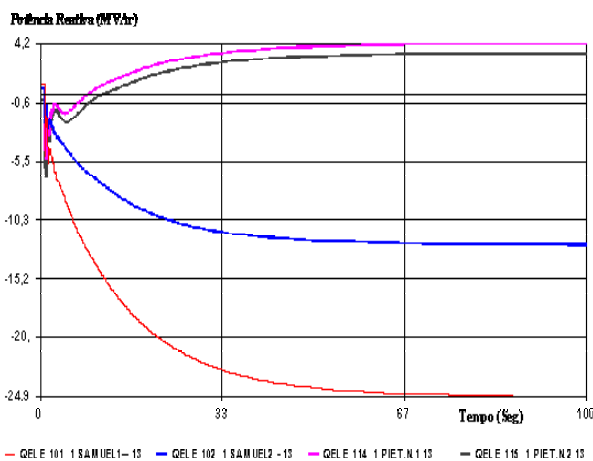


FIGURA 14 – CASO I – POTENCIA REATIVA GERADA COM CST

## 6.0 - CONCLUSÃO

Com base na avaliação das simulações realizadas, pode-se concluir que com a adoção do CST no Sistema Acre-Rondônia, serão obtidas melhoras no perfil de tensão da barra piloto e, conseqüentemente, melhora nos perfis de tensão nas áreas que estão sob a influência da barra piloto.

O CST, usado através de malha secundária, tendo como barra piloto de 230 kV na SE Ariquemes, mostrou-se satisfatório, quando aplicado a duas

máquinas da UHE Samuel. Nos caso de contingências muito severas, os geradores podem absorver elevado nível de potência reativa, a fim de manter a tensão da barra piloto com o valor que tinham antes de uma contingência. Neste caso a operação pode ser inviável.

Para melhor distribuição da potência reativa entre os geradores, outras unidades deverão ser configuradas como fonte de reativo, semelhante ao que ocorre no controle automático de geração, com finalidade de controle de frequência

Os resultados indicam a viabilidade do emprego do CST no Sistema Acre-Rondônia sendo necessário, em estudo posterior, implementar, em complemento ao CST, funções de controle de reativo integradas aos limitadores do sistema de excitação das unidades geradoras, bem como integrar as funções de CST ao Sistema SCADA, na busca da melhor combinação de ajustes dos parâmetros de controle. Da mesma forma deverá ser avaliado o suporte de comunicação necessário para aquisição, centralizada e em tempo real dos valores de tensão da barra piloto e potência reativa das unidades geradoras.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) N. Martins, J. C. R. Ferraz, S. Gomes Jr., P. E. M. Quintao, J. A. Passo F. A Demonstration Example of Secondary Voltage Regulation: Dynamic Simulation and Continuation Power Flow results – IEEE - , Vol , No. , pp.791-796 - /2000
- (2) Eletronorte – Superintendência de Planejamento da Expansão - Sistema Elétrico Acre-Rondônia – Estudo de Sobreensões Sustentadas e Oscilações Eletromecânicas – 2001.
- (3) Cigre – task Force 38.02.23 – Coordinated Voltage Control in Transmission Networks
- (4) G. Taranto, N. Martins, A.C.B. martins, D. M. Falcão, M. G. dos Santos, Benefits of Applying Secondary Voltage Control Schemes to The Brazilian System, IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, WA, July 2000.
- (5) L. C. Werberich, J. S. Freitas, Avaliação das Potencialidades de Aplicação de um Controle Secundário Coordenado de Tensão em Sistemas de Sub-Transmissão de Distribuição de Energia Elétrica.
- (6) H. Lefebvre, D. Fragner, J. Y. Bousson, P. Mallet, M. Bulot, Secondary Coordinated Voltage Control System: feedback on EDF, Panel Session on Power Plant Secondary (High –Side) Voltage Control, IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, WA, July 2000.