



19 a 23 de Maio de 2002
May – 19th to 23rd – 2002
BRASÍLIA (DF) – BRASIL

VIII SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E
EXPANSÃO ELÉTRICA
VIII SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION
PLANNING

ESTUDOS PRELIMINARES DA APLICAÇÃO DE CONTROLE COORDENADO DE TENSÃO NA ÁREA RIO

Camilo B. Gomes
COPPE/UFRJ – CEPEL

Nelson Martins*
CEPEL

Glauco N. Taranto
COPPE/UFRJ

Júlio C. R. Ferraz
COPPE/UFRJ – CEPEL

Marcelos G. Santos
ONS

Resumo

Este artigo apresenta uma análise preliminar dos benefícios da utilização de um esquema de controle coordenado de tensão na Área Rio.

Palavras-chave: Estabilidade de Tensão, Controle Coordenado de Tensão, Simulador Rápido.

1 - Introdução

O tema controle coordenado de tensão vem despertando grande interesse, como demonstra o número crescente de artigos técnicos apresentados em eventos científicos internacionais. O CEPEL, a COPPE/UFRJ e o ONS vêm desenvolvendo trabalho conjunto nessa área, visando sua aplicação em áreas críticas do sistema brasileiro, sob o ponto de vista de controle e estabilidade de tensão. Este artigo descreve simulações do comportamento dinâmico de tensão da Área Rio, considerando ou não a presença de controle coordenado de tensão (CST), semelhante àqueles que vêm sendo empregados na Itália e França.

O desempenho de tensão do sistema é avaliado considerando-se uma curva de carga típica (24 horas, com discretização horária) para a Área Rio. O CST simulado, tal como nos esquemas europeus existentes, consiste em um sistema de controle a malha fechada, de dinâmicas lentas, que regula a tensão de determinados nós do sistema, denominados barras piloto, através da atuação coordenada das fontes de reativo existentes na área. Os estudos descritos neste artigo indicam os benefícios operativos advindos da utilização do CST na Área Rio. Os geradores que participam deste controle são Angra I, Santa Cruz, Furnas, além do compensador síncrono de Grajaú. Os resultados apresentados foram obtidos com a utilização de um simulador rápido no domínio do tempo capaz de modelar adequadamente esquemas avançados de CST.

2 - Controle Coordenado de Tensão

O CCT, em geral, está subdividido em três níveis hierárquicos, sendo eles: o Controle Primário de Tensão (CPT), o Controle Secundário de Tensão (CST) e o

Controle Terciário de Tensão (CTT). O CPT é o nível hierárquico mais rápido, podendo ser subdividido em controle individual dos geradores (RAT) e controle conjunto das usinas (JVC - *Joint Voltage Control*) [1].

O CST consiste na atuação de um grupo específico de reguladores de tensão dos geradores, compensadores estáticos ou síncronos, *taps* de transformadores, etc., de forma a manter o perfil de tensão desejado em barras, ditas, piloto. As tensões dessas barras piloto devem ser representativas do perfil de tensão da região na qual estão inseridas. O controle secundário de tensão atua numa escala de tempo de 30s a 60s, por exemplo, e se caracteriza por ser um controle de efeito regional.

O CTT é o nível de coordenação mais lento, no qual a reserva disponível de geração de potência reativa é otimizada para manter um perfil de tensão adequado. Neste nível se utiliza um programa de fluxo de potência ótimo cuja função objetivo é a maximização da reserva de potência reativa e cujas restrições são associadas aos limites da tensão nos principais barramentos do sistema. Restrições associadas à margem de estabilidade de tensão também podem ser introduzidas na formulação do CTT. A Figura 1 mostra a estrutura hierárquica do CCT. Este trabalho, no entanto, trata somente do controle primário e controle secundário de tensão.

3 - Simulador Rápido

As simulações que serão apresentadas neste trabalho foram obtidas com uma ferramenta de simulação rápida no domínio do tempo [2,3,4]. Esse tipo de simulador somente considera as dinâmicas de médio e longo prazo. As dinâmicas rápidas são consideradas estáveis e instantâneas, o ponto de equilíbrio final associado com as dinâmicas rápidas existentes são representadas por um conjunto de equações algébricas. O conjunto básico de equações não-lineares é apresentado em (1).

$$\begin{aligned} \dot{y} &= 0 = g(y, x, z, w) \\ \dot{x} &= 0 = f(y, x, z, w) \\ z_d(k+1) &= h_d(y, x, z_d, z_c(k)) \\ \dot{z}_c &= h_c(y, x, z_d, z_c) \end{aligned} \quad (1)$$

* CEPEL/DTI – Av. Um, s/n – Cidade Universitária – Rio de Janeiro – RJ – CEP 21941-590 – Phone (21) 2598-6167 – Fax (21) 2260-2336/Email: nelson@cepel.br

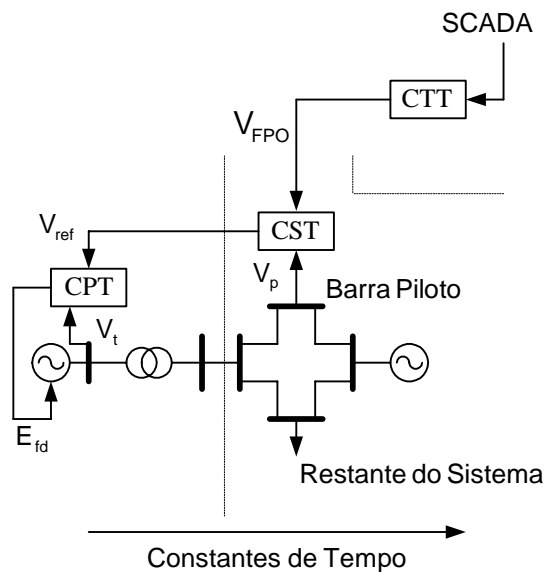


Figura 1: Estrutura hierárquica do CCT.

Onde y representa as variáveis algébricas, tais como tensões e ângulos terminais, x representa as variáveis relacionadas aos fenômenos de curto prazo, tais como tensões internas das máquinas, também é um conjunto de equações algébricas, z_d representa as variáveis de estado discretas de médio e longo prazos, por exemplo, a posição de tap , z_c representa as variáveis de estado contínuas de médio e longo prazos, por exemplo, variáveis associadas à dinâmica do CST, ao controle de tensão da barra de alta, etc. Uma análise detalhada do conjunto de equações apresentado em (1) é feita em [3].

A Figura 2 mostra uma comparação qualitativa dos resultados obtidos com uma simulação completa no tempo, isto é, considerando-se os fenômenos de curto, médio e longo prazos e uma simulação onde os transitórios rápidos são desprezados. Essa simplificação visa, entre outras coisas, acelerar o processo iterativo, principalmente em se tratando da simulação de sistemas de grande porte.

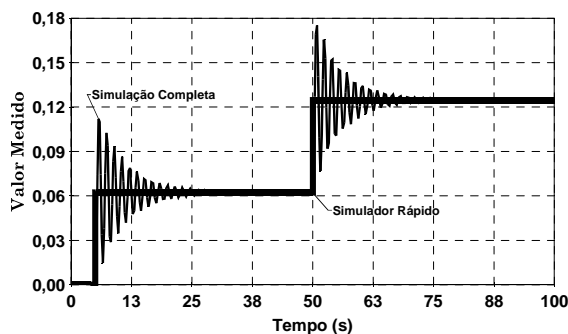


Figura 2: Simulação completa \times simulação rápida (simplificada).

4 - Descrição do Sistema Exemplo

Nesse estudo é utilizada uma configuração do Sistema Interligado Brasileiro (Sul/Sudeste), composta por 730 barras, 1146 linhas de transmissão e transformadores, 85 usinas geradoras e compensadores síncronos. A

região de interesse denominada Área Rio é formada pelas empresas Light, CERJ, ESCELSA e parte do sistema de Furnas.

A Figura 3 mostra um diagrama esquemático dos diversos corredores de transmissão que alimentam a Área Rio. O fluxo de potência para essa área flui através de quatro corredores de transmissão identificados na Figura 3 como F1, F2, F3 e F4. O somatório desses fluxos compõe o chamado Fluxo Rio de Janeiro (FRJ). Em estudos de fluxo de potência da Área Rio, uma condição operativa é geralmente descrita em função do consumo de potência ativa das empresas Light, CERJ e ESCELSA e pelo valor do FRJ [2,5].

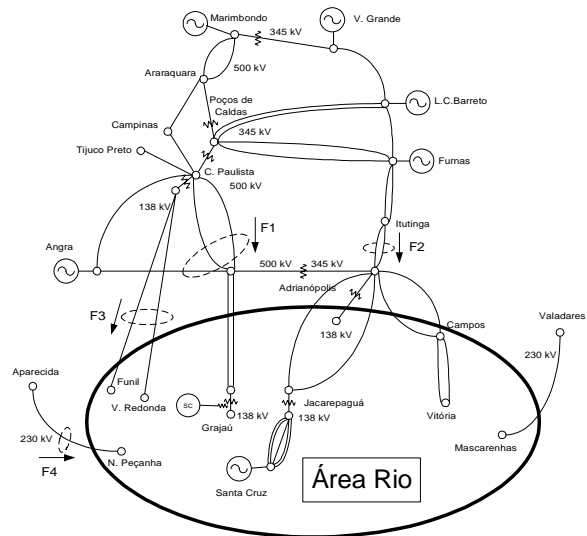


Figura 3: Principais linhas de transmissão que suprem a área rio.

Um dos principais objetivos do CST é regular a tensão da barra piloto num valor pré-especificado [6,7], nos diversos cenários de carregamento do sistema.

Os resultados que serão apresentados, neste trabalho, mostram o efeito do CST na regulação da barra piloto para uma curva de carga típica com duração de 24 horas. A barra escolhida como barra piloto foi a barra de Jacarepaguá [2,5]. A usina de Marimbondo não participa do CST, porém a tensão na barra de alta desta usina é controlada (*High Side Voltage Control – HSVC*).

A Tabela 1 mostra os fatores de participação de potência reativa aplicados nas unidades geradoras participantes do CST.

Tabela 1: Fatores de participação de potência reativa

Barra	Usina	Fator de Participação (%)
10	FURNAS---7MQ	30
16	ANGRA-1--1MQ	5
30	SCRUZ19--1MQ	10
44	GRAJAU---2MQ	55

Inicialmente, a usina de Furnas seria excluída do CST, tendo sua tensão controlada por um esquema de *HSVC*. Isto, entretanto não foi possível devido a problemas de convergência nos programas de fluxo de potência e no simulador rápido. Desta forma, as quatro usinas listadas na Tabela 1 formam o grupo mínimo de usinas

necessárias para o correto funcionamento do CST. Como este trabalho tem caráter preliminar, não foi realizada nenhuma investigação profunda buscando identificar a melhor estratégia de operação e ajuste do CST.

4.1 - Curva de Variação de Carga

O desempenho do CST pode ser mais bem avaliado pela análise de simulação que contemple o efeito da variação da carga ao longo de um dia ou ao longo de uma semana. Foi realizada, neste trabalho, a comparação entre o desempenho do sistema com e sem o CST. A curva de carga utilizada (Figura 4) foi baseada em uma curva real de parte da carga total da empresa Light, para uma quarta-feira do mês de janeiro de 1988. As potências ativas dos geradores variam, para cada patamar de carga, de acordo com o estatismo dos reguladores de velocidade das máquinas.

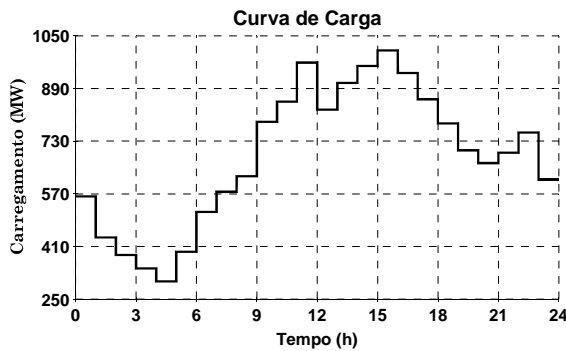


Figura 4: Curva de carga diária

5 - Resultados

A Figura 5 e a Figura 6 apresentam, na ausência e na presença do CST, o perfil de tensão das barras das usinas participantes do (Furnas, Angra I, Santa Cruz e Grajaú), da barra piloto (Jacarepaguá) e da barra da UHE de Marimbondo. A usina de Marimbondo não possui *HSVC*, nos casos cujos resultados estão descritos nas Figura 5 e Figura 6.

A Figura 7 apresenta o perfil de tensão das usinas participantes do CST, da barra piloto e da usina de Marimbondo (com *HSVC*) na presença do CST.

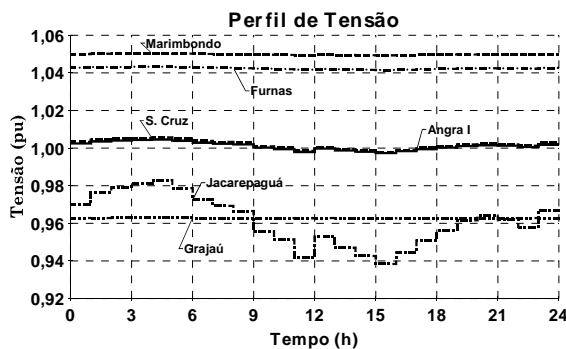


Figura 5: Perfil de tensão de barras da Área Rio sem CST e sem *HSVC*.

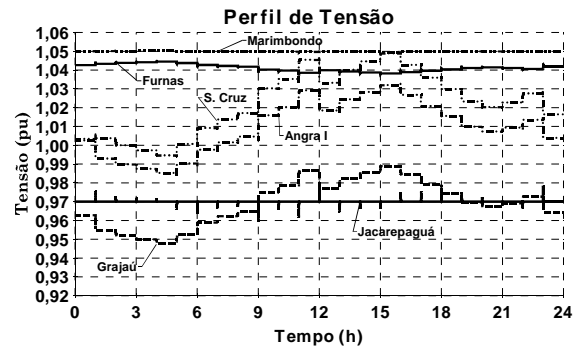


Figura 6: Perfil de tensão de barras da Área Rio com CST e sem *HSVC*.

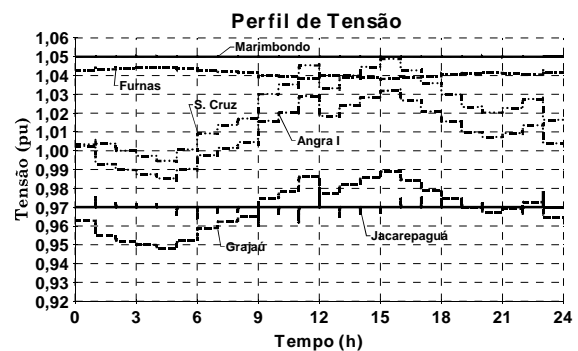


Figura 7: Perfil de tensão com CST e com *HSVC* em Marimbondo.

A Figura 8 mostra a tensão na barra de Jacarepaguá (barra piloto) na presença e na ausência de CST. A Figura 9 apresenta o detalhe (escala de tempo expandida) do comportamento da tensão na barra piloto após uma redução de carga.

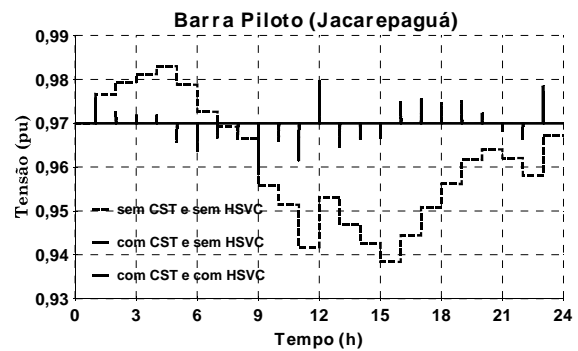


Figura 8: Tensão da barra piloto.

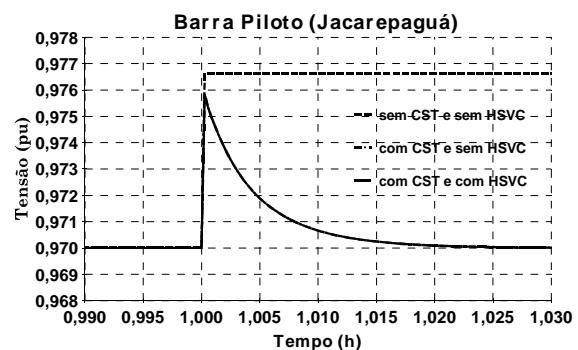


Figura 9: Detalhe do comportamento da tensão na barra piloto após uma redução de carga.

A Figura 10, a Figura 11 e a Figura 12 mostram a tensão terminal das usinas de Angra I, Furnas e Santa Cruz na presença e na ausência de CST. A Figura 13 mostra a tensão terminal do compensador síncrono de Grajaú.

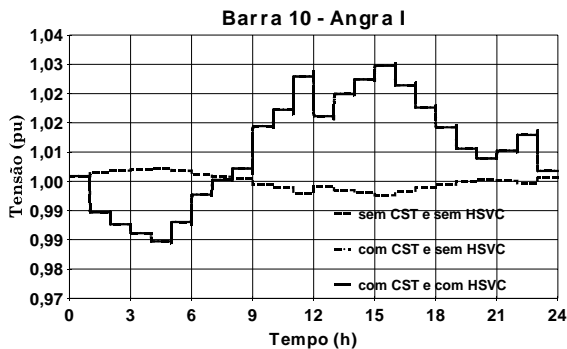


Figura 10: Tensão terminal de Angra I.

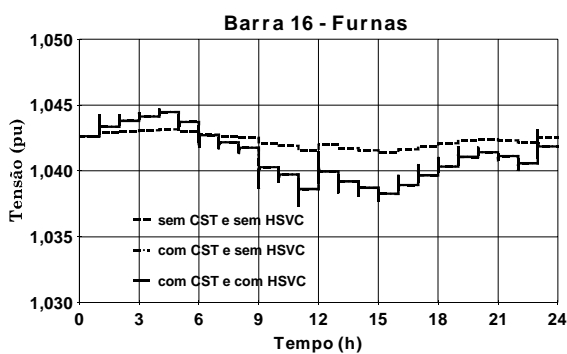


Figura 11: Tensão terminal de Furnas.

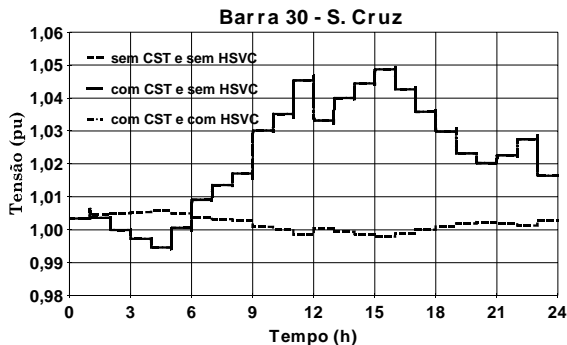


Figura 12: Tensão terminal de Santa Cruz.

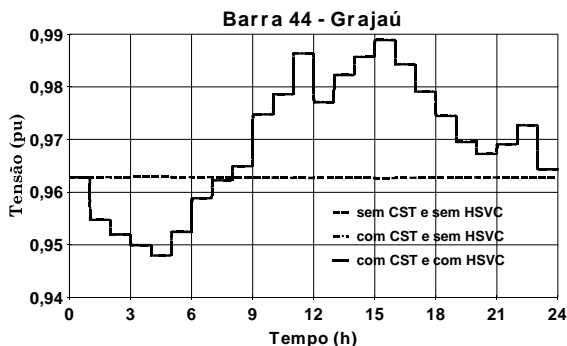


Figura 13: Tensão terminal de Grajaú.

A Figura 14 mostra a potência reativa gerada pelas usinas participantes do CST e da usina de Marimbondo (com *HSVC*) na presença de CST. A Figura 15 mostra a potência reativa total gerada pelas usinas participantes

do CST e da usina de Marimbondo, na ausência e na presença de CST.

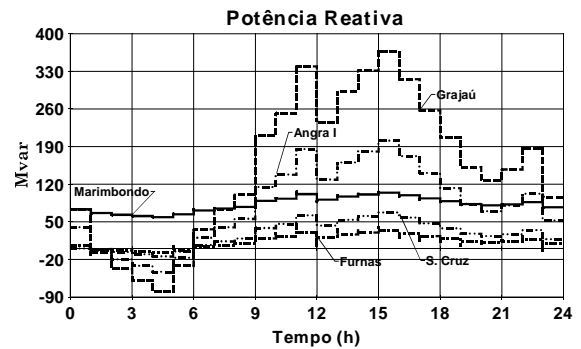


Figura 14: Potência reativa das usinas (com CST e com *HSVC* em Marimbondo).

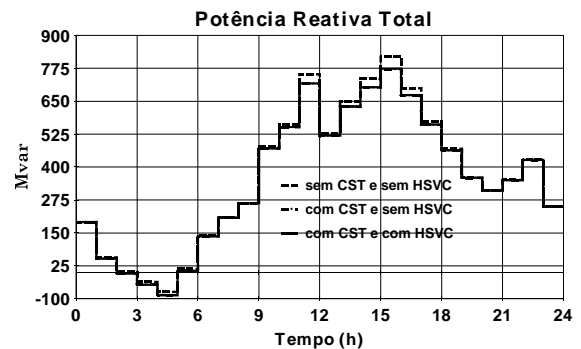


Figura 15: Potência reativa total das usinas.

Avaliando-se as figuras anteriores, nota-se que quando o CST está ativo, apesar das variações significativas de tensão nas barras terminais de Angra I (Figura 10), Furnas (Figura 11), Santa Cruz (Figura 12) e Grajaú (Figura 13), o somatório das potências reativas destes geradores apresenta variação pequena (Figura 15). Desta forma, o perfil de tensão da barra piloto é regulado no valor desejado durante a variação diária da carga sem implicar, necessariamente, no aumento da geração de potência reativa do sistema.

A Figura 16 e a Figura 17 mostram a potência reativa gerada pelas usinas de Furnas e Santa Cruz na presença e na ausência de CST. Pode ser observado que enquanto a geração de potência reativa em Furnas diminui quando o CST está ativo, Santa Cruz tem sua geração aumentada. Apesar da pequena variação de potência reativa total do sistema, as potências de cada máquina são devidamente alteradas com o objetivo de manter no valor desejado a tensão da barra piloto (Jacarepaguá).

A Figura 18 mostra a potência reativa das usinas participantes do CST verificando-se que o fator de participação se dá de acordo com o especificado.

As discrepâncias observadas nos fatores de participação especificados, só ocorrem durante um curto espaço de tempo, onde a malha de controle do CST está corrigindo os despachos de reativo para os novos valores requeridos.

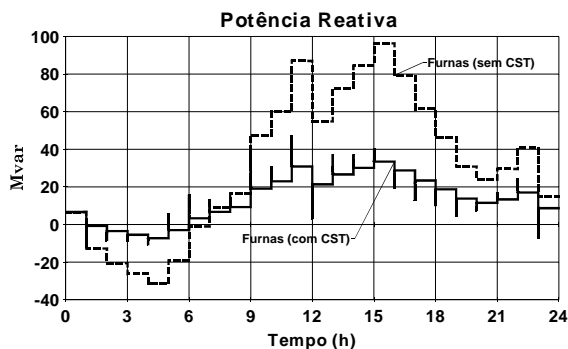


Figura 16: Geração de Potência reativa da usina de Furnas.

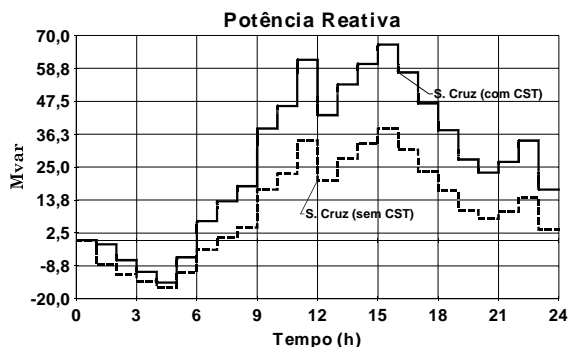


Figura 17: Geração de potência reativa da usina de Santa Cruz.

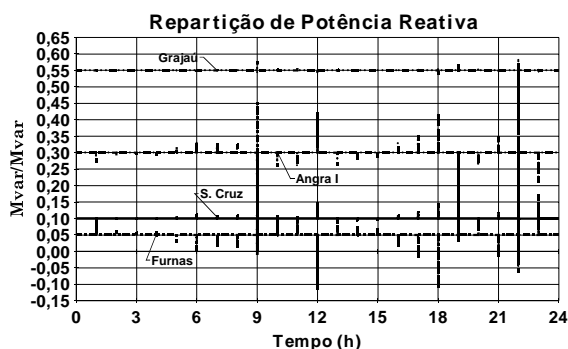


Figura 18: Relação de Mvar entre a usinas

6 - Comparação entre o Simulador Rápido e um Programa de Fluxo de Potência

Por se tratar de uma ferramenta nova, muitos testes têm sido feitos com o intuito de se validar os resultados obtidos com simulador rápido. Esta tarefa esbarra na indisponibilidade de ferramentas computacionais similares. O objetivo desta seção é mostrar que os resultados obtidos com o simulador rápido são coerentes e confiáveis. Para tanto foi utilizado o Programa de Análise de Redes (ANAREDE) do CEPEL.

Há, entretanto, diferenças importantes entre os dois programas que devem ser levadas em consideração: o simulador rápido é uma ferramenta de simulação no domínio do tempo e a modelagem de barras de tensão especificada não é feita. Apesar dessas diferenças, foi feita uma comparação utilizando a curva de carga apresentada na Figura 4. Todos os valores de cada um dos patamares calculados pelo simulador rápido foram verificados no ANAREDE. Desta forma, as diferenças

verificadas nas simulações devem-se a diferença de modelagem das barras de tensão controlada.

A Figura 19 mostra a tensão na barra de Jacarepaguá (barra piloto). O resultado obtido com o ANAREDE é uma reta com valor igual a 0,97 pu. O resultado obtido com o simulador rápido, diferentemente, apresenta variações de tensão quando há alteração de carga.

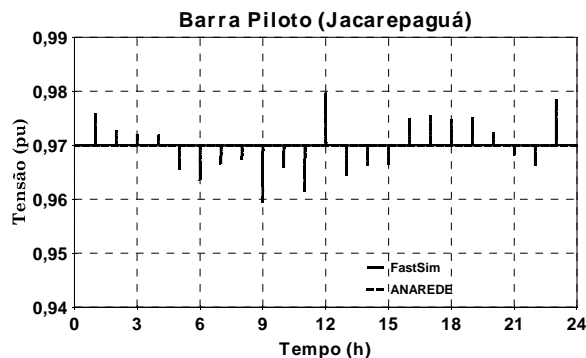


Figura 19: Comparação FastSim × ANAREDE.

A Figura 20, a Figura 21, a Figura 22 e a Figura 23 mostram respectivamente as tensões terminais das usinas de Angra I, Furnas, Marimbondo e Santa Cruz. A Figura 24 mostra a tensão terminal do compensador síncrono de Grajaú.

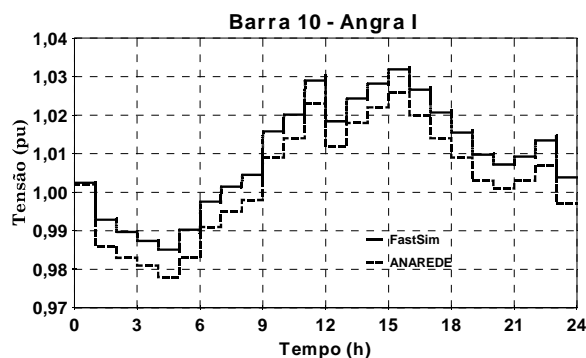


Figura 20: Comparação FastSim × ANAREDE.

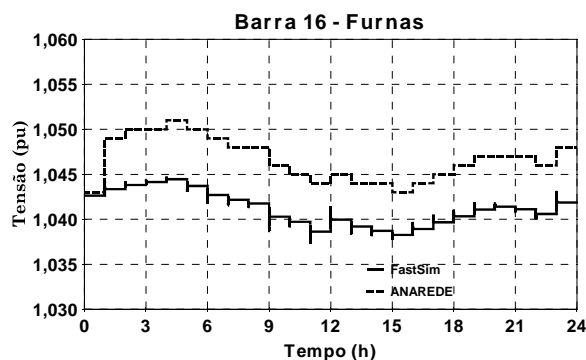


Figura 21: Comparação FastSim × ANAREDE.

A diferença entre os resultados obtidos com o ANAREDE e os resultados obtidos com o simulador rápido acontece devido às diferenças de modelagem da barra de tensão controlada. Pode-se observar que o comportamento da tensão das usinas mencionadas acima é coerente nos dois programas.

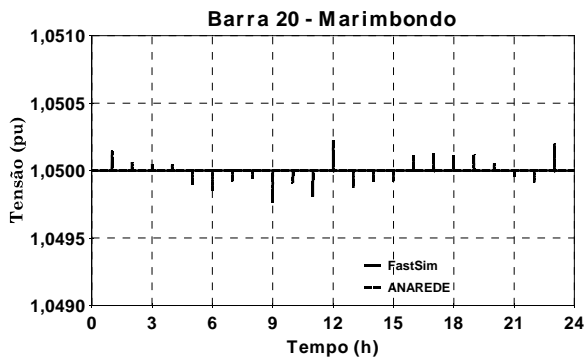


Figura 22: Comparação FastSim × ANAREDE.

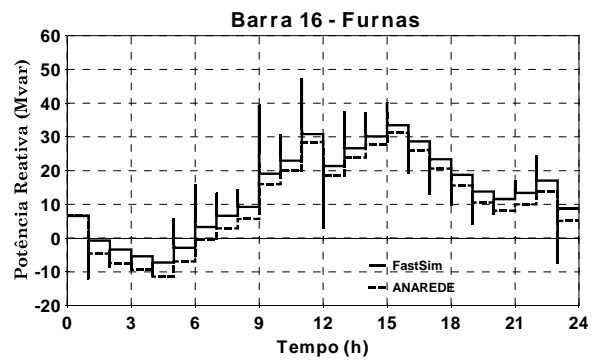


Figura 26: Comparação FastSim × ANAREDE.

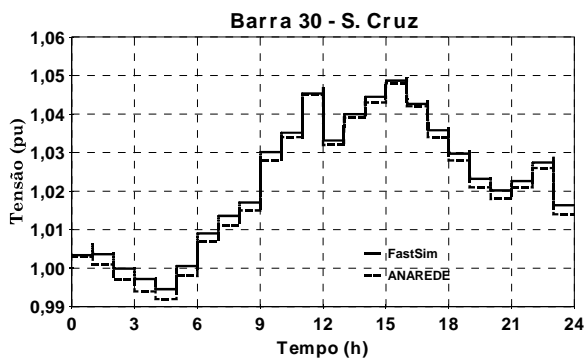


Figura 23: Comparação FastSim × ANAREDE.

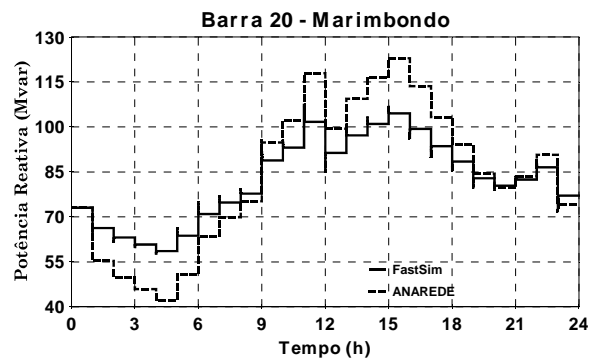


Figura 27: Comparação FastSim × ANAREDE.

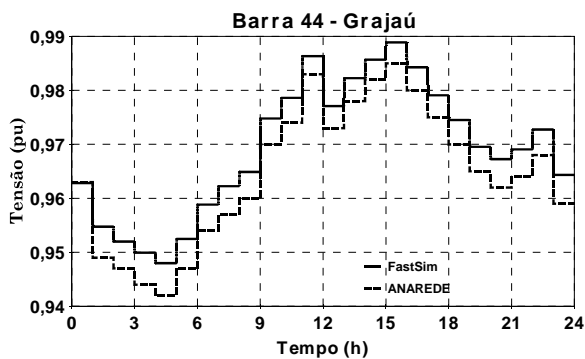


Figura 24: Comparação FastSim × ANAREDE.

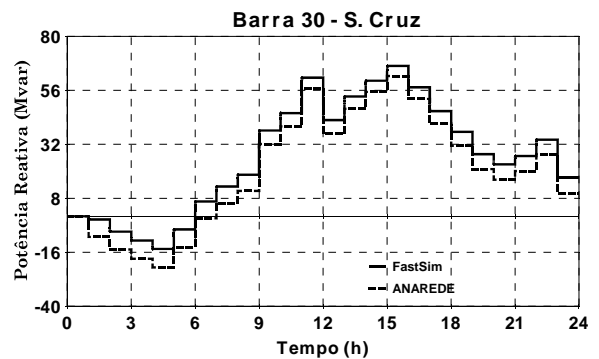


Figura 28: Comparação FastSim × ANAREDE.

A Figura 25, a Figura 26, a Figura 27 e a Figura 28 mostram a potência reativa gerada pelas usinas de Angra I, Furnas, Marimbondo e Santa Cruz, respectivamente. A Figura 29 mostra a potência reativa gerada pelo síncrono de Grajaú.

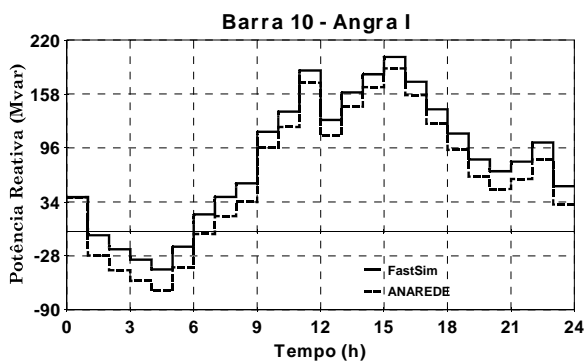


Figura 25: Comparação FastSim × ANAREDE.

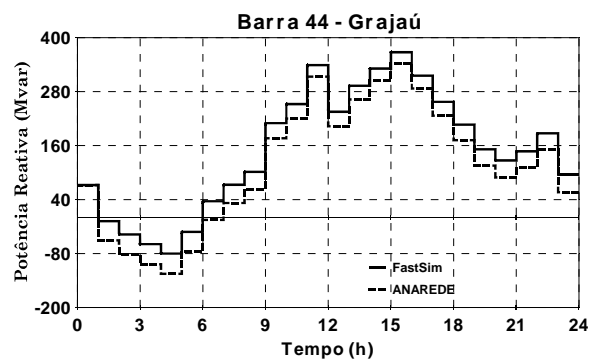


Figura 29: Comparação FastSim × ANAREDE.

Mais uma vez verifica-se pequena diferença entre os resultados, mas ocorre o mesmo comportamento coerente das curvas.

A Figura 30 mostra a potência reativa total gerada pelas usinas participantes do CST e da usina de Marimbondo (com HSVC) na presença de CST.

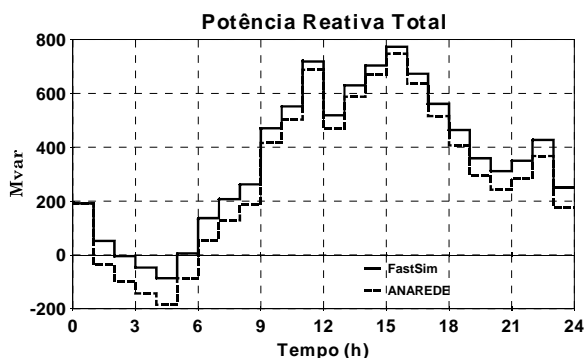


Figura 30: Comparação FastSim × ANAREDE.

7 - Conclusões

Esse trabalho descreve uma aplicação do esquema de controle secundário de tensão (CST) bem como o esquema de controle denominado *High Side Voltage Control (HSVC)* na Área Rio. Além disso, utiliza um programa de fluxo de potência, o ANAREDE do CEPEL, para validar os resultados obtidos.

O uso do simulador rápido, ferramenta que não representa as oscilações eletromecânicas e outras dinâmicas rápidas, mostrou-se apropriada para estudos de dinâmica de tensão para o sistema brasileiro.

A implementação de um esquema de controle secundário de tensão garante um perfil de tensão desejado bem como a repartição adequada de geração de potência reativa entre as máquinas participantes do CST.

O simulador rápido possui várias funções que o tornam bastante útil na análise de fenômenos relacionados à estabilidade de tensão e ao uso racional do suporte de potência reativa de um sistema. Portanto além do esquema de controle secundário de tensão com ordens de reativo e do esquema de *High Side Voltage Control*, o simulador rápido pode analisar o efeito da variação de carga em degrau, variação de carga em rampa, conexão e desconexão de bancos de capacitores e reatores, degrau na referência da tensão da barra piloto, abertura e fechamento de circuitos, bem como a simulação de uma curva de carga de 24 horas como foi apresentado nesse trabalho.

O uso do simulador rápido revelou ser bastante apropriado para estudos dinâmicos de tensão de médio e longo prazo, como o estudo de estabilidade de tensão em sistemas elétricos. Os resultados obtidos com essa ferramenta foram totalmente validados com aqueles obtidos por um programa comercial de estabilidade transitória, levando-se em conta a dinâmica lenta assim como o resultado de regime permanente [2].

Existem várias vantagens em se usar o esquema de controle secundário de tensão, como: melhoria no perfil de tensão das barras vizinhas à barra piloto; Melhor utilização das reservas de potência reativa do sistema; Repartição adequada de geração de potência reativa entre as máquinas participantes do controle.

O esquema de controle coordenado de tensão já se encontra em operação em países europeus. O controle terciário de tensão determina os ajustes a serem feitos para a tensão da barra piloto e os fatores de participação das usinas, bem como coordena o chaveamento de bancos de capacitores ou reatores. Nesse caso um programa de fluxo de potência ótimo é usado para se determinar esses ajustes e ações. O controle coordenado de tensão pode utilizar também técnicas de inteligência artificial como a lógica *fuzzy* [8]. A utilização de bancos de capacitores ou reatores chaveados e a aplicação de esquema de controle terciário de tensão em áreas do sistema brasileiro serão objeto de investigação futura.

8 - Referências

- [1] **R. J. G. C. Silva, F. M. Silva, H. A. L. Duarte, J. C. R. Chaparro and R. Justino**, “Modelagem e Ajuste do Controle Conjunto de Tensão de Itaipu 50 Hz e 60 Hz”, SNPTE, Foz do Iguaçu, PR, 1997.
- [2] **C. B. Gomes**, Implementação de Funções Utilizadas no Controle Coordenado de Tensão num Simulador Rápido. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [3] **W. J. Causarano**, Método de Simulação Rápida no Tempo para Avaliação da Estabilidade de Tensão. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.
- [4] **W. J. Causarano, D. M. Falcão and G. N. Taranto**, “A Fast Domain Simulation Method for Voltage Stability Assessment”, Proceedings of the VI SEPOPE, Salvador, BA, May 1998.
- [5] **G. N. Taranto, N. Martins, A. C. B. Martins, D. M. Falcão and M. G. dos Santos**, “Benefits of Applying Secondary Voltage Control Schemes to the Brazilian System”, Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, WA, July 2000.
- [6] **J. P. Paul, J. Y. Léost and J. M. Tesson**, “Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 505-511, May 1987.
- [7] **S. Corsi, P. Marannino, N. Losignore, G. Moreschini and G. Piccini**, “Coordination between the Reactive Power Scheduling Function and the Hierarchical Voltage Control of the EHV ENEL System”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 686-694, May 1995.
- [8] **A. B. Marques, G. N. Taranto and D. M. Falcão**, “Controle Coordenado de Tensão na Área Rio Utilizando Lógica Fuzzy”, Anais do XVI SNPTEE, Campinas, SP, Outubro 2001.