



GAT-006

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

#### GRUPO IV

#### GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

### ANÁLISE DO DESEMPENHO DO TCSC DE SERRA DA MESA NO PROGRAMA DE ESTABILIDADE ELETROMECÂNICA ANATEM

Guilherme Sarcinelli Luz (\*)  
Nilo José P. de Macedo

Venilton R. de Oliveira

FURNAS Centrais Elétricas

Operador Nacional do Sistema

#### RESUMO

Este informe técnico apresenta os resultados da análise realizada com o modelo do Capacitor Série Controlado a Tiristor de Serra da Mesa no programa de estabilidade ANATEM utilizando-se uma representação completa do sistema elétrico. Este modelo havia sido validado a partir do modelo do RTDS (Real Time Digital Simulator) utilizando-se um sistema equivalente. O modelo do RTDS, por sua vez, foi validado através de casos com o controle real. Instalados na interligação Norte/Sul, os TCSC's tornaram viável esta interligação em Corrente Alternada, eliminando o risco de instabilidade e aumentando o amortecimento do modo de oscilação entre os dois sistemas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Capacitores-série Controlados a Tiristores, FACTS, Oscilação Natural de Potência, Operação de Sistemas Elétricos

#### 1.0 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o objetivo de amortecer as oscilações do modo interárea, em torno de 0.2 Hz, presentes ao interligar-se os sistemas Norte/Nordeste e Sul/Sudeste, foi especificado e instalado um TCSC (Thyristors Controlled Series Compensation) em cada uma das extremidades desta interligação, ou seja, um em Imperatriz (Eletronorte) e outro em Serra da Mesa (FURNAS). Para cumprir esta função foi definida uma malha de controle denominada POD (Power Oscillating Damping).

Quando realizados os testes de comissionamento, o amortecimento deste modo de oscilação apresentou condições muito mais severas do que as calculadas utilizando-se os programas de estabilidade, durante as fases de planejamento, especificação e planejamento da operação. Isto apontava a necessidade de uma investigação mais rigorosa a partir de simulações que

refletissem o comportamento observado no campo, apoiadas em um modelo que representasse corretamente o controle do TCSC, a fim de consolidar a análise do desempenho deste equipamento.

No contrato de compra deste equipamento, FURNAS havia também especificado, um modelo do controle do TCSC de Serra da Mesa para simulações em tempo real. Este modelo foi desenvolvido pelo fabricante e implantado no RTDS (Real Time Digital Simulator) de FURNAS, tendo sido validado a partir dos resultados dos testes de fábrica com o controle real.

Os testes de fábrica e de validação do modelo do TCSC no RTDS, contudo, foram realizados utilizando-se um equivalente de rede que representava, de forma simplificada, a potência de curto-circuito e o modo de oscilação interárea. Deste modo, a análise definitiva do desempenho deste controle só seria possível com a utilização de um modelo validado em um programa de estabilidade eletromecânica onde fosse possível a representação completa do sistema elétrico.

O programa ANATEM foi escolhido por ser o programa utilizado nos estudos de elétricos de planejamento da operação em FURNAS e, tomando-se como referência o modelo do controle do TCSC no RTDS, foi possível representá-lo detalhadamente e validá-lo a partir dos resultados dos testes de fábrica.

Posteriormente, novas análises do controle do TCSC no próprio RTDS apontaram a necessidades de uma investigação mais intensa, reforçando ainda mais a importância do modelo no programa de estabilidade.

Deste modo, partindo da representação validada do controle do TCSC de Serra da Mesa no programa de estabilidade eletromecânica ANATEM, com o sistema elétrico brasileiro amplamente representado com os diversos reguladores de tensão, reguladores de velocidade e PSS's, e ajustando-se as condições do

modo de oscilação analisado com as condições obtidas nos testes de comissionamento, foi realizada uma análise detalhada do desempenho deste TCSC.

## 2.0 - RESULTADOS DE COMISSIONAMENTO

A Figura 1 apresenta um registro da potência ativa medida na interligação, obtido após a rejeição programada de uma máquina de 300Mw da usina de Tucuruí, durante o comissionamento da função de amortecimento dos TCSC's (POD) [1]. É possível identificar claramente o modo de oscilação interárea, presente quando os dois sistemas, N/NE e S/SE/CO, estão interligados. Como ambos os POD's encontravam-se desativados, o nível de amortecimento e a frequência medida de 0.193 Hz correspondem ao inerente ao sistema elétrico associado à configuração operativa, ou seja, sem a contribuição dos TCSC's. A interligação abriu pela ação de proteção de perda de sincronismo (PPS).

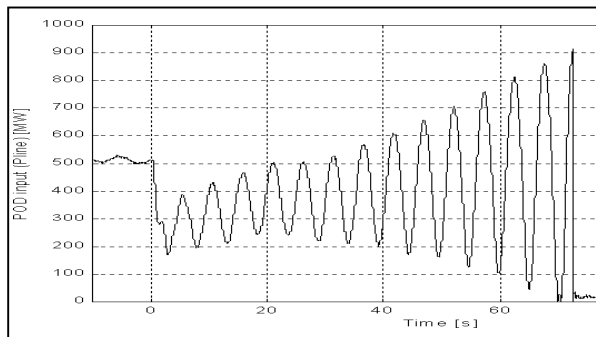


FIGURA 1

Apesar da condição bastante crítica de amortecimento natural do sistema elétrico, a ação amortecedora dos TCSC's demonstrou ser capaz de estabilizar o modo interárea. Cada um dos POD's foi testado individualmente submetendo o sistema ao mesmo impacto de rejeição de uma máquina de Tucuruí e, tanto o TCSC de S. Mesa como o de Imperatriz, obtiveram sucesso. A Figura 2 apresenta a potência ativa na interligação para a condição em que o POD do TCSC de Serra da Mesa se encontrava ativo.

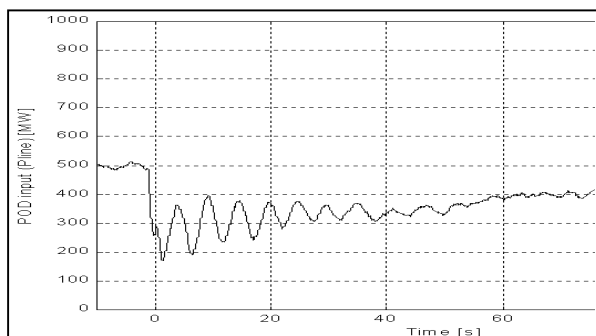


FIGURA 2

Entretanto, houve uma perturbação no sistema, na área S.Paulo, durante os testes do comissionamento em que o TCSC de S. Mesa não foi capaz de amortecer estando apenas o seu POD ativo. A Figura 3 apresenta o registro do campo para esta condição.

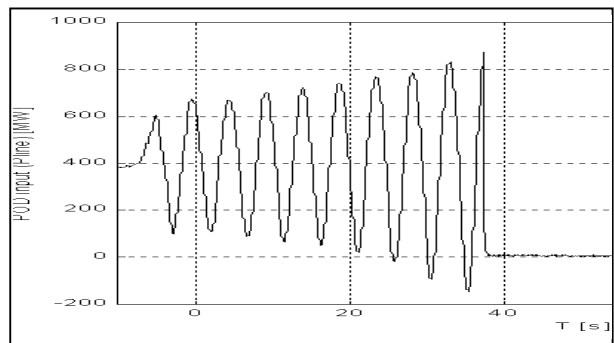


FIGURA 3

Isso intensificou a necessidade de se dispor de um modelo confiável do controle do TCSC em um programa de estabilidade onde o sistema elétrico fosse representado de forma completa e detalhada e que as condições de amortecimento observadas fossem ali reproduzidas.

## 3.0 - ANÁLISE COM O MODELO DO RTDS

Durante os testes de fábrica, os cubículos de controle do TCSC de Serra da Mesa foram conectados a um sistema elétrico equivalente simplificado modelado no RTDS. Este conjunto, operando em tempo real, permitiu o teste de diversas funções do controle [2].

O POD também foi testado e, apesar de apresentar um desempenho global satisfatório, a função AWC, que atua nos limites da função de transferência para atender às contingências de perda de geração ou de carga, quando a potência média sofre uma variação brusca, apresentou algumas restrições. Como esta função havia se mostrado eficiente durante os estudos de planejamento utilizando-se uma representação do sistema completo, optou-se naquela ocasião, por mantê-la ativada e avaliá-la, posteriormente, durante o comissionamento.

De fato, a contingência em São Paulo, ocorrida durante o comissionamento e apresentada na Figura 3, levantou a suspeita de que a função AWC poderia ter atuado de forma inadequada.

Deste modo, ao ser instalado no RTDS de FURNAS, o modelo do TCSC, uma análise intensa foi conduzida utilizando-se o mesmo sistema equivalente, porém modificando-o para refletir de forma mais próxima à condição de amortecimento negativo do modo interárea. Esta análise levou à conclusão de que a função AWC torna-se inadequada nas situações em que o modo interárea apresenta valores de frequência mais baixos, sobretudo em condições de menor amortecimento e, principalmente, quando este é negativo. A Figura 4 apresenta o resultado da simulação no RTDS comparando o desempenho do POD com a função AWC desativada e ativada. Nesta oportunidade, chegou-se a uma solução onde a função AWC, atuando apenas nos 5 segundos iniciais, deu ao POD um desempenho global satisfatório nas diversas situações de frequência, amortecimento e contingências simuladas.

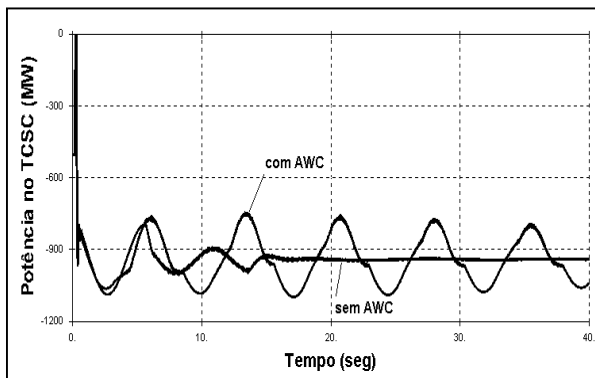


FIGURA 4

#### 4.0 – MODELO VALIDADO NO ANATEM

Para que a solução indicada pudesse ser transformada em alteração no controle real do TCSC, já instalado no campo e em operação comercial, era necessária uma comprovação de sua eficácia e de sua real necessidade através de simulações digitais. O planejamento da operação utiliza programa de estabilidade desenvolvido pelo CEPEL, ANATEM, onde o sistema elétrico é representado de forma muito mais completa. Nestas simulações, as conclusões poderiam ser acatadas pelo fabricante responsável pela alteração no controle.

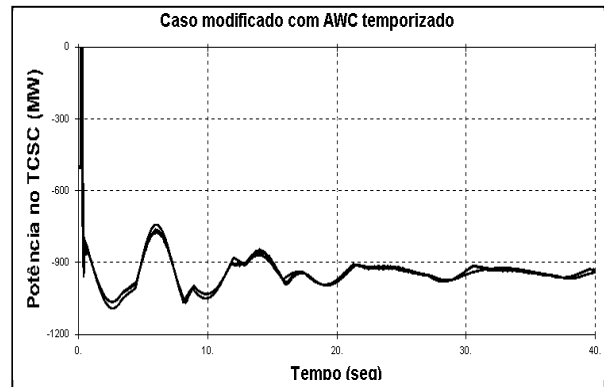
Entretanto, foi necessário, inicialmente, desenvolver e validar o modelo do TCSC com o controle do POD para este programa [3]. Para isto, o modelo do RTDS foi utilizado, uma vez que este já havia sido validado com o controle real através dos casos dos testes de fábrica. Este processo permitiu a consolidação de uma validação bastante confiável.

Como os casos de fábrica e do modelo do RTDS estavam processados com um sistema equivalente, este sistema original foi inicialmente utilizado. E uma primeira etapa, foi feita uma validação do sistema elétrico sem a ação do POD. Em seguida, foi introduzida a ação do POD sem e com a função AWC ativada. Posteriormente, utilizou-se o sistema modificado das análises descritas no item 3.0, quando então se validou também a temporização de função AWC.

A Figura 5 apresenta o caso comparativo entre a simulação no RTDS e no programa ANATEM para o sistema modificado considerando a solução de temporização da função AWC. Como pode ser visto nesta figura, além de apresentarem os mesmos resultados, a solução de temporização elimina a condição desfavorável apresentada na Figura 4.

Nesta etapa, também foi representada e validada a função TSR, que permite o TCSC operar na parte indutiva, aumentando, assim, a sua faixa de atuação, embora de forma não contínua. Esta função, apesar de disponível no equipamento, como definida em sua especificação, não se encontrava ativada na época do comissionamento, uma vez que, durante as

simulações digitais realizadas pelo fabricante para definir as características do controle do TCSC, ela não apresentou resultados importantes.



Como o sistema elétrico apresentou um amortecimento natural bem mais crítico do que o simulado durante os estudos que antecederam a instalação dos TCSC's, a função TSR foi considerada importante para esta fase de análise e, portanto, modelada e validada. A Figura 6 apresenta a mesma comparação da Figura 5 com o TSR ativo.

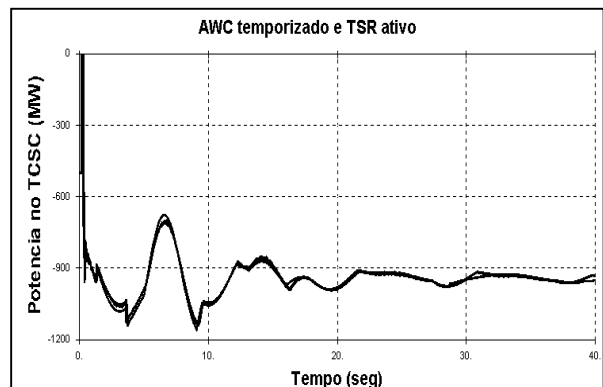


FIGURA 6

#### 5.0 ANÁLISE COM O SISTEMA COMPLETO

A fim de reproduzir o mais próximo possível os resultados do campo, foi inicialmente ajustado o amortecimento do modo interárea, utilizando-se como referência o caso apresentado na Figura 1. Uma vez que a função AWC apresentou um comportamento mais desfavorável para frequências mais baixas, optou-se pela retirada de um circuito (Corumbá - Itumbiara 345 kV), o que reduziu um pouco a frequência deste modo para valores entre 0,19 e 0,18 Hz, dependendo do distúrbio de origem.

A figura 7 apresenta o comportamento do fluxo de potência ativa na interligação para as duas condições de amortecimento quando da rejeição de 300 MW em Tucuruí com 500 MW de fluxo na interligação no sentido Norte-Sul, sem atuação dos TCSC's de Serra da Mesa e Imperatriz.

A condição de amortecimento positivo é a que normalmente vinha sendo utilizada nos estudos de

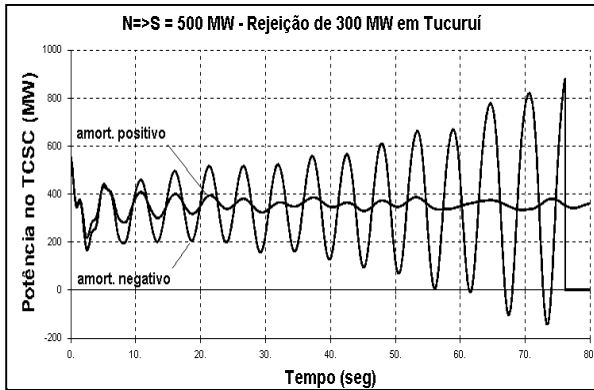


FIGURA 7

planejamento da operação e a de amortecimento negativo foi obtida ajustando-se o amortecimento das cargas do sistema Norte/Nordeste de modo a representar um efeito equivalente ao observado no campo e apresentado no registro oscilográfico da Figura 1. A rigor, este efeito pode ser proveniente tanto das cargas, como da atuação do CAG (não representado nestes estudos), da atuação dos reguladores de velocidade, da dinâmica das turbinas, etc. Apenas uma pesquisa detalhada das causas poderia identificar mais precisamente a participação de cada elemento no amortecimento negativo observado no campo.

A partir deste ajuste, foram processados diversos casos considerando o POD ativo com a função AWC ativada, desativada e temporizada, bem como, a ação da função TSR. Todos os casos analisados consideraram apenas o desempenho do controle do TCSC de Serra da Mesa, estando, deste modo, o controle do TCSC de Imperatriz desativado.

### 5.1 Casos com o amortecimento negativo e frequência mais baixa

A Figura 8 apresenta a comparação entre os casos de rejeição de 300 MW em Tucuruí considerando o amortecimento negativo e a frequência mais baixa para este modo interárea. Nesta figura, o desempenho do POD com a função AWC ativa e desativa é comparado com o caso sem o POD e a função AWC apresenta um desempenho desfavorável.

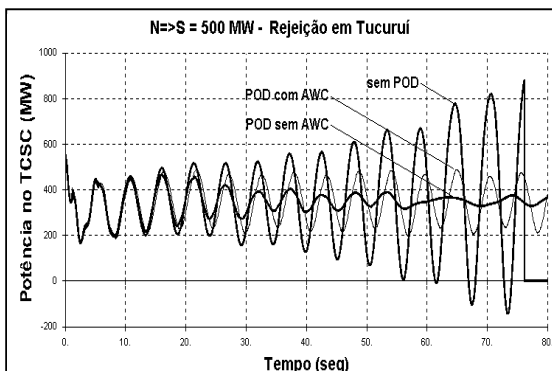


FIGURA 8

A Figura 9 apresenta a mesma comparação da Figura 8 considerando o fluxo de 400 MW na interligação e uma rejeição de máquina seguida de rejeição de carga na área São Paulo. Este caso tenta reproduzir aproximadamente a ocorrência apresentada na Figura 3.

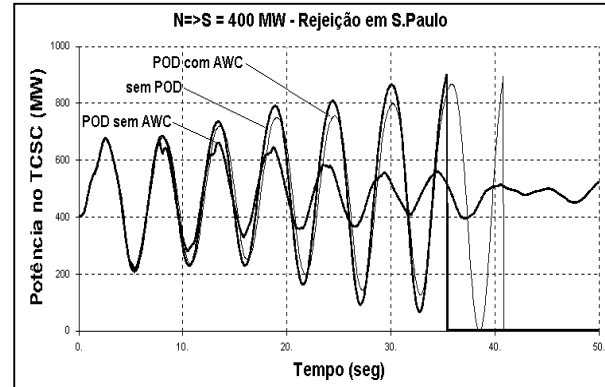


FIGURA 9

### 5.2 Influência da frequência

Em seguida, foram processados alguns casos com a frequência um pouco mais alta a fim de confirmar sua influência na ação da função AWC. A Figura 10 e 11 apresentam a comparação com e sem um circuito de Corumbá – Itumbiara 345 kV, onde a frequência sofre uma pequena alteração, para os casos associados, respectivamente, às figuras 8 e 9. O POD se encontra ligado com a função AWC ativa. Nota-se o efeito do valor da frequência na efetividade desta função.

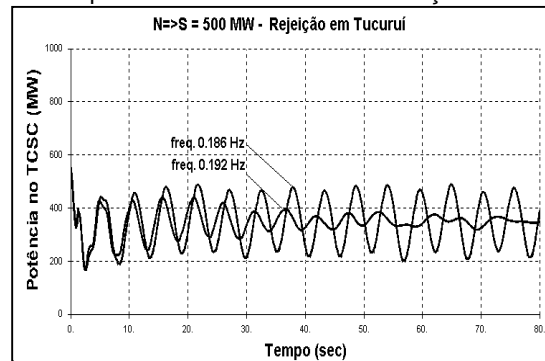


FIGURA 10

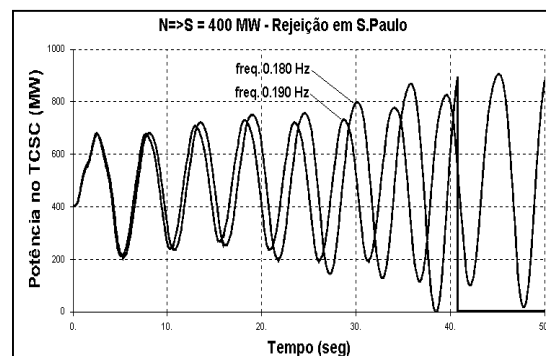


FIGURA 11

### 5.3 Influência do amortecimento

As Figuras 12 e 13 apresentam os mesmos casos das figuras 10 e 11, respectivamente, considerando o amortecimento original para sistema elétrico e a frequência mais próxima de 0.20 Hz, pela reinclusão do circuito de Corumbá – Itumbiara 345 kV. Nesta condição, observa-se que a função AWC diminui sua influência, uma vez que os limites do equipamento são menos solicitados.

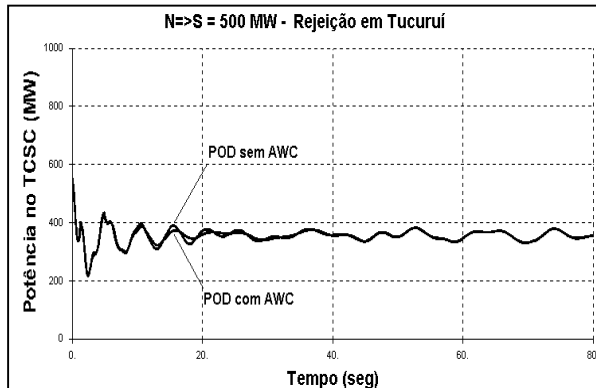


FIGURA 12

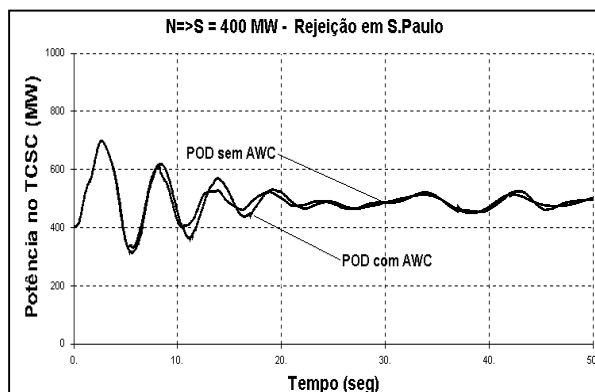


FIGURA 13

### 5.4 Temporização da função AWC

Como os resultados de estudos anteriores com o sistema completo haviam apontado a vantagem da função AWC para as condições em que o modo de oscilação é maior ou igual a 0,20 Hz, foi analisada a proposta de temporização. Desta forma, independente da condição de amortecimento e frequência, a função AWC atua momentos iniciais do distúrbio, conduzindo mais rapidamente o controle do POD para a faixa de atuação do TCSC e, ao suspender sua ação após 5 segundos, evita um comportamento inadequado do controle.

Assim foram reprocessados os casos já apresentados na figuras 8 e 9, considerando-se agora a temporização de 5 segundos da função AWC, como mostram, respectivamente, as Figuras 14 e 15. Como pode ser observado, a temporização elimina a deterioração provocada pela permanência da função AWC, permitindo a estabilização dos casos anteriormente instáveis.

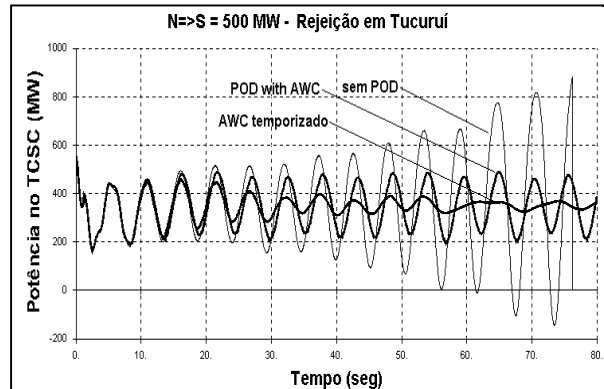


FIGURA 14

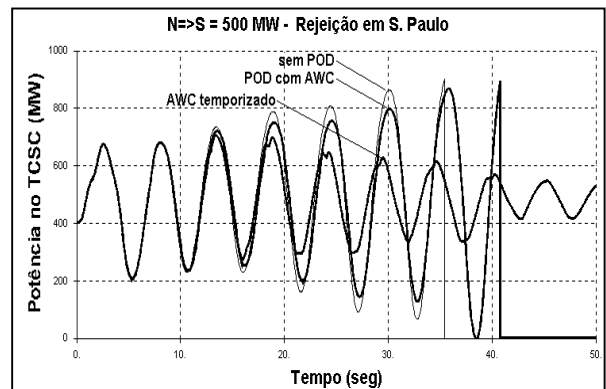


FIGURA 15

### 5.5 Ativação do modo TSR

Com o objetivo de explorar sua máxima capacidade, uma vez que o sistema elétrico real apresentou-se menos estável do que o previsto inicialmente nos estudos digitais, decidiu-se analisar a ativação do modo TSR (Thyristor Switched Reactor), atualmente disponível no sistema de controle do TCSC. Os dois últimos casos apresentados foram reprocessados considerando-se este modo ativado.

As figuras 16 e 17 apresentam os casos comparativos do modo TSR, respectivamente para o distúrbio em Tucuruí e em S.Paulo, considerando o POD com AWC temporizado em todos eles. É possível observar que, principalmente para o caso da Figura 17, a ação do modo TSR traz benefícios.

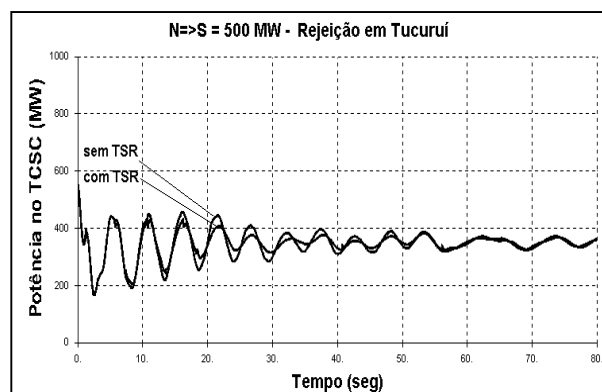


FIGURA 16

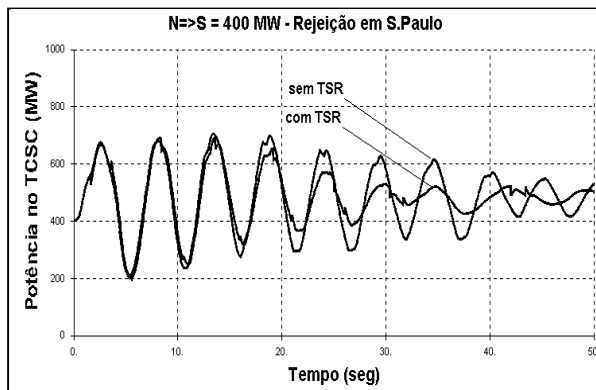


FIGURA 17

A fim de avaliar o desempenho do modo TSR na condição de maior amortecimento, foram processados os mesmos casos das figuras 16 e 17 considerando-se o sistema com o amortecimento positivo. As Figuras 18 e 19 apresentam estes resultados onde o modo TSR atuou normalmente sem produzir alterações significativas no desempenho do controle.

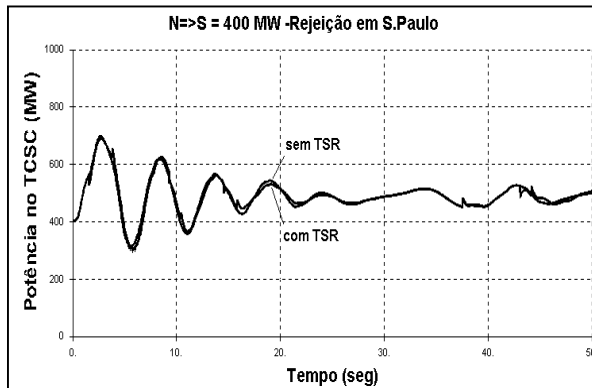


FIGURA 18

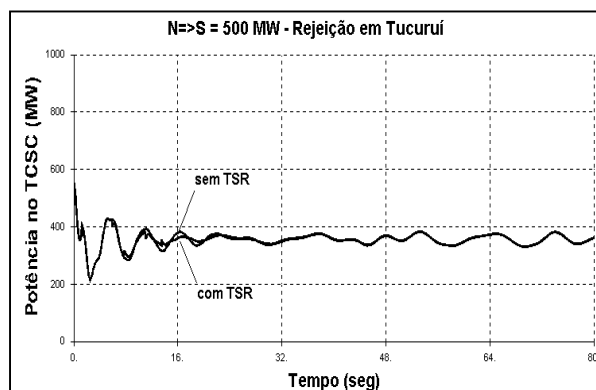


FIGURA 19

## 6.0 IMPLANTAÇÃO DAS MODIFICAÇÕES

O comissionamento do TCSC de Serra da Mesa e sua entrada em operação comercial ocorreram em março de 1999. Em novembro de 2000, as modificações propostas foram implantadas. A certeza da necessidade destas modificações e as discussões junto ao fabricante foram o resultado de esforços realizados por iniciativa de FURNAS, conduzidos ao

longo deste período, a partir da disponibilidade de um modelo que serviu de referência para uma análise segura.

O resultado tem se mostrado favorável e ambos os TCSC's de Serra da Mesa e Imperatriz tem obtido um desempenho satisfatório. Foi implantado um sistema de medição das principais variáveis do controle do TCSC de Serra da Mesa, onde é recolhido um registro a cada atuação do POD, que permite analisar o seu desempenho. O modo TSR tem atuado em diversas situações de maior oscilação de potência e não houve nenhuma ocorrência em que a interligação haja aberto devido à instabilidade do modo interárea, como na ocorrência mencionada no item 2.0 e apresentada na Figura 3.

## 7.0 CONCLUSÕES

Este artigo descreve a metodologia utilizada e os resultados obtidos para consolidar as conclusões que levaram a estas pequenas alterações no controle visando assegurar o funcionamento adequado deste equipamento nas diversas situações, especialmente naquelas não previstas durante a etapa de sua definição, devido ao curto espaço de tempo em que esta interligação foi planejada, especificada e implantada.

As restrições iniciais do controle do TCSC de Serra da Mesa foram eliminadas através de um estudo detido de seu desempenho.

A implantação destas modificações, já realizadas, só se tornou viável devido à confiabilidade e à compatibilidade de resultados provenientes dos diversos modelos.

## 8.0 - BIBLIOGRAFIA

- [01]- G.Sarcinelli, C.Gama, etc, "Avaliação do Desempenho dos Amortecedores de Oscilação de Potência das Compensações Série Controladas a Tiristores da Interligação Norte/Sul" - VII SEPOPE, 21 a 26 de Maio de 2000, Curitiba, Brasil
- [02]- K.Bergman, K.Braun, I.Baran, G.Sarcinelli, P.Forsyth, T.Maguire, et al - "Advanced Fully Digital TCSC Real-Time Simulation in Comparison with Computer Studies and On-Site Testing", Proceedings of the 1999 International Conference on Digital Power System Simulators, 25-28 de Maio, Västerås, Sweden.
- [03]- G.Sarcinelli, N.J.P.Macedo, V.R.Oliveira - "Validação do Modelo do Controle do TCSC de Serra da Mesa no Programa ANATEM utilizando-se o Modelo do RTDS" - VII SEPOPE, 27 a 31 de Maio de 2001, Foz do Iguaçu, Brasil