



# XV SNTPEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

GAT / 13

17 a 22 de Outubro de 1999  
Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil

GRUPO IV  
ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)

## TESTE DE COMISSIONAMENTO PARA VERIFICAÇÃO DO AMORTECIMENTO DAS OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO TCSC

Carlos Gama\*  
Eletronorte

Gunnar Ingeström  
ABB Power Systems

### RESUMO

A fase final do comissionamento da Interligação Norte/Sul, realizada em fevereiro de 1999, envolveu testes de sistema para verificar o desempenho dos TCSCs no amortecimento do modo de oscilação inter-área. Este trabalho apresenta alguns resultados destes testes, bem como uma discussão sobre diferentes algoritmos de controle para amortecimento de oscilações de potência.

A principal conclusão do trabalho é que os TCSCs foram bastante efetivos, provendo um alto amortecimento para o modo Norte/Sul. Além disso, um novo tipo de POD (amortecedor de oscilações de potência) foi desenvolvido e testado com resultados extremamente satisfatórios.

### PALAVRAS CHAVE

Comissionamento, TCSC, Amortecimento de Oscilações de Potência, FACTS.

### 1.0 INTRODUÇÃO

A linha Norte/Sul, em operação comercial desde março de 1999, é a primeira interligação entre os sistemas Norte/Nordeste (sistema Norte) e o Sul/Sudeste/Centro-Oeste (sistema Sul). Trata-se de um circuito compacto em 500 kV, com 1020 km, desde Imperatriz (Maranhão) até Serra da Mesa (Goiás), com três subestações intermediárias (Colinas, Miracema e Gurupi). Está dimensionada para transmitir de 0 a 1300 MW em ambos os sentidos, objetivando a otimização energética do sistema interligado de forma a garantir um benefício estimado em 600 MW-ano. Apresenta um valor compensação reativa paralela próximo de 100% e um total de 54% de compensação série fixa (Figuras 1 e 2).

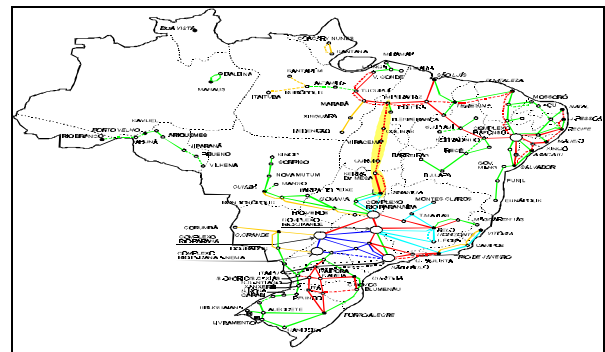


FIGURA 1: Localização Eletrogeográfica da Norte/Sul

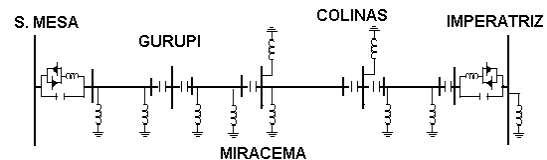


FIGURA 2: Diagrama Unifilar da Interligação

Além da compensação série fixa, foram também instalados dois TCSCs (Capacitores Série Controlados a Tiristor) com o objetivo de assegurar o amortecimento do modo de oscilação eletromecânica entre os sistemas Norte e Sul (modo Norte/Sul). Um banco está instalado em Imperatriz e o outro em Serra da Mesa.

Ambos os TCSCs estão dimensionados para operarem em regime permanente com uma reatância aparente de  $-15,9$  ohms (6% da reatância total da linha Norte/Sul). Este valor corresponde a 1,2 vezes o valor da reatância do capacitor do TCSC, que é de  $13,27$  ohms. Em outras palavras, o Fator de Amplificação (FA) em regime permanente é de 1,2. Definimos FA como sendo a relação entre a reatância aparente e a reatância do capacitor do TCSC.

Durante distúrbios no sistema, a função POD, que tem como entrada a potência ativa da linha, pode fazer a reatância do TCSC excursionar de forma contínua entre  $-13,27$  ohms (tiristores bloqueados) e  $-39,8$  ohms ( $FA = 3,0$ ). O TCSC pode também saltar do valor de  $-13,27$  ohms para a condição de "bypass", passando a operar com uma reatância indutiva de  $2,5$  ohms [1].

## 2.0 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO TCSC DE IMPERATRIZ

O TCSC é composto basicamente de um capacitor em série com a linha de transmissão, em paralelo com o conjunto um formado pela válvula a tiristores em série com um reator. Nota-se também, na Figura 3, o esquema de proteção contra sobretensões composto de Varistores de Óxido Metálico (MOV).

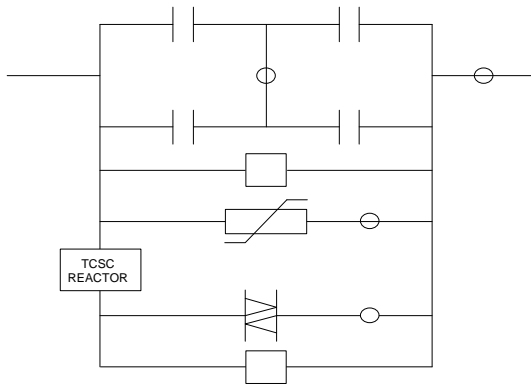


FIGURA 3: Layout do TCSC de Imperatriz.

A característica de impedância do TCSC em função da corrente de linha é mostrada na Figura 4 e os principais parâmetros são apresentados na Tabela 1. É importante notar a limitação dinâmica da reatância capacitiva do TCSC para valores elevados da corrente de linha. O TCSC apresenta diferentes modos de operação:

- CAP (Operação na faixa capacitiva contínua);
- BLK (Tiristores bloqueados);
- CBP (Bypass por controle);
- PBP (Bypass protetivo).

O modo CAP é a condição normal de operação, na qual o sistema de controle determina uma ordem de reatância entre os extremos ( $-13,27$  e  $-39,8$  ohms). A válvula é bloqueada (BLK) quando a corrente na linha é inferior a  $150$  A. O modo CBP é usado para aumentar a eficiência da função POD durante oscilações de potência provocadas por grandes distúrbios.

## 3.0 ESTRUTURA DO POD

O sistema de controle de reatância capacitiva do TCSC é baseado no esquema "Synchronous Voltage Reversals (SVR)". Este esquema foi desenvolvido de

forma a tornar o TCSC imune ao fenômeno de Ressonância Subsíncrona (RSS).

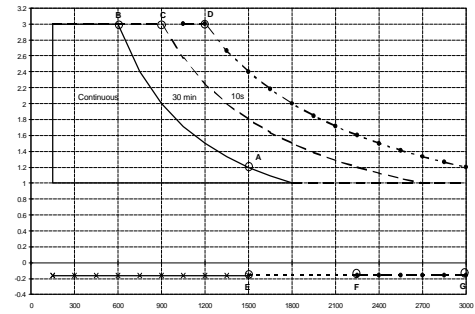


FIGURA 4: Capacidade de Reatância (p.u.) do TCSC

TABELA 1: Valores Nominais do TCSC

Parâmetro	Valor
Tensão Máxima (Fase-Fase)	550 kV
Potência Nominal	108 Mvar
Reatância Capacitiva Nominal ( $X_c=1$ pu)	$13,27 \Omega$
Reatância Capacitiva Aparente ( $X_{ef} = 1,2$ pu)	$9,92 \Omega$
Reatância Capacitiva Aparente Máxima ( $3 X_c$ )	$39,81 \Omega$
Corrente de Linha Nominal (1 pu)	1500 A
Tensão Contínua Nominal ( $V_{max}=1$ pu)	23,88 kV
Corrente de Sobrecarga de 30 Minutos (1,5 pu)	2025 A
Corrente de Sobrecarga de 10 Segundos (2,0 pu)	3000 A
Sobretensão por 30 Minutos (1,5 pu)	35,82 kV
Sobretensão por 10 Segundos (2,0 pu)	47,76 kV

A ideia básica do controlador é a de manter a tensão reversa do capacitor equidistante no tempo, ao mesmo tempo em que é gerada uma ordem de reatância aparente para o TCSC. O instante em que a ordem de disparo é enviada se baseia em medições dos valores instantâneos da tensão sobre o capacitor e da corrente de linha, em oposição ao usual controle de malha aberta que se baseia no ângulo de disparo dos tiristores.

O sistema de controle recebe uma ordem de reatância (XORDER) que é a soma da ordem de reatância em regime permanente (XREF) com a saída do POD (PODOUT). Tanto a potência ativa quanto a corrente da linha podem ser usadas como entrada para o POD. A eficiência do TCSC para amortecer as oscilações de potência é proporcional ao carregamento da linha.

Em função deste fato, uma estratégia de ganho variável foi utilizada de forma a adaptar o ganho da função POD às diversas condições de carregamento da linha Norte/Sul. O ganho para um determinado valor de corrente na linha é obtido por interpolação linear, tendo-se por base os valores ideais de ganho para o valor de potência máxima (1300 MW) e

também para a condição de baixos fluxos (abaixo de 300 MW). A entrada para a estratégia de ganho variável é a potência na interligação, obtida através de um filtro passa-baixa com constante de tempo da ordem de 15 a 20 segundos (Figura 5).

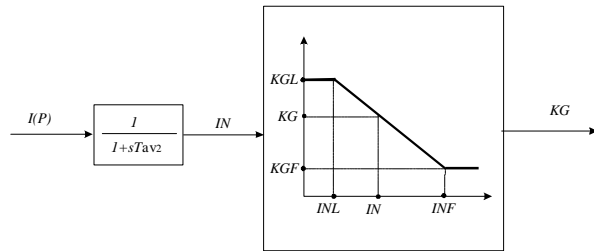


FIGURA 5: Estratégia de ganho variável.

### 3.1 Realização com filtros tipo Lead-Lag

A forma tradicional de implementar controladores como este é através de filtros lineares tipo Lead-Lag, cuja função é prover o ajuste de fase necessário entre a saída e a entrada do controlador. Tal controlador é ilustrado na Figura 6. A função do bloco Washout é eliminar o valor médio do sinal de entrada.

Observe que os filtros Lead-Lag estão equipados com limitadores tipo “non-wind up”, ou limitadores dinâmicos (L1, L2, L3 e L4). Estes limitadores existem para refletir os limites físicos do TCSC de forma a garantir que a ação dinâmica do POD seja mantida dentro da faixa de controle possível do TCSC, evitando a saturação do equipamento em um de seus limites operativos.

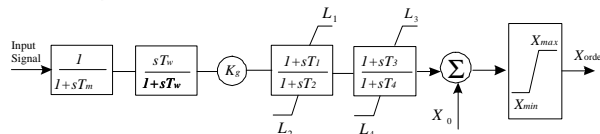


FIGURA 6: Estrutura do controlador tipo Lead-Lag.

Sem estes limites, pode ocorrer que a saída dos blocos Lead-Lag reflita uma ordem de reatância variando entre valores que estejam fora de um dos limites operativos do equipamento. Neste caso, o equipamento fornecerá como saída um valor fixo de reatância por tempo indeterminado, eliminando completamente a ação dinâmica do controlador. Este cenário é ilustrado na Figura 7, na qual, um TCSC dimensionado com capacitor de  $-13,27$  ohms, apresentaria reatância de saída saturada neste valor durante quase todo o tempo, anulando sua contribuição para o amortecimento das oscilações.

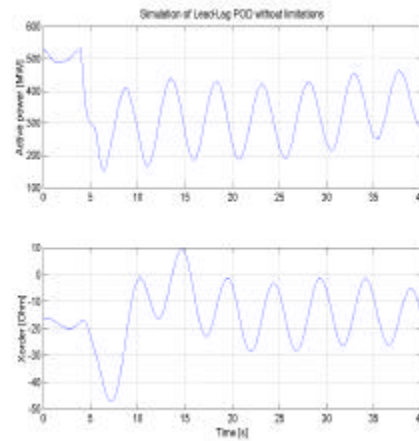


FIGURA 7: Saturação com POD tipo Lead-Lag sem Limitadores.

Contudo, os limitadores dinâmicos também não resolvem todos os nossos problemas. O que acontece, por exemplo, quando uma combinação de ganho do POD com uma dada amplitude de oscilação de potência é tal que leve a saída do controlador para o limites do equipamento em cada ciclo de oscilação? Sim, começamos a perder a fase desejável do controlador e, com isto, a sua contribuição para o amortecimento é reduzida. Este comportamento é mostrado em um dos testes de campo realizados para verificar o desempenho dos TCSCs (Figura 11).

Assim, introduzimos os limitadores para evitar a saturação do controlador, porém, isto criou um outro problema: perda da correta relação de fase provida pelos filtros Lead-Lag. Ao invés de limitadores, poderia ser uma idéia a introdução de um bloco Washout após os Lead-Lag. Acontece que a constante de tempo deste Washout deveria ser grande o suficiente para não comprometer o ajuste de fase do controlador. Por outro lado, uma constante de tempo elevada poderia implicar em um longa saturação do controlador (da ordem de 10 segundos). Isto, além de eliminar a ação de amortecimento do TCSC, faria com que o equipamento viesse a utilizar desnecessariamente toda a sua capacidade de sobrecarga de curta duração.

### 3.2 Estimativa Fasorial (Phasor estimation)

Uma outra forma de projetar um controlador para amortecimento de oscilações consiste em fazer uso de mais informações sobre o modo de oscilação que se deseja amortecer.

Todos os estudos da Norte/Sul mostraram que o modo de oscilação é de 0,2 Hz, afastando-se muito pouco deste valor em função das mais diversas condições operativas. Se nos perguntássemos qual o propósito dos blocos Washout e Lead-Lag em um controlador tradicional, certamente a resposta seria: gerar um sinal de saída com determinada relação de ganho e fase em relação à entrada. Sim! Muitos de

nós estamos familiarizados com algo conhecido por PLL (Phase Locked Loop). O PLL é um controlador que se presta a extrair o ângulo de fase instantâneo de grandezas à frequência fundamental, tais como tensão, corrente de linha, etc.

A mesma filosofia pode ser usada no projeto de um POD. Com base na medição da potência ativa da interligação, desejamos modular a reatância do TCSC de forma a fornecer amortecimento para o modo inter-área, que, conforme já mencionado, fica em torno de 0,2 Hz. Podemos então trabalhar com as seguintes premissas:

- A potência ativa da interligação pode ser descrita como a soma de duas contribuições;
- A primeira contribuição representa a potência média na interligação;
- A segunda contribuição corresponde à oscilação de potência na frequência de 0,2 Hz.

Se, agora, pudermos separar estas duas contribuições de forma a obter o ângulo de fase instantâneo e a amplitude das oscilações de potência, então teremos uma base muito boa para o projeto de um controlador tipo POD. Existem diferentes formas de obtenção dos sinais desejados, sendo uma delas ilustrada na Figura 8 abaixo.

Para extrair a contribuição referente à oscilação de potência, gera-se um sinal de referência na frequência de 0,2 Hz. De posse deste sinal e utilizando-se o mesmo tipo de tecnologia de um PLL, pode-se extrair três diferentes sinais a partir da potência ativa medida:

- Potência ativa média na interligação;
- Amplitude da oscilação de potência;
- Ângulo de fase da oscilação de potência.

Com estas informações em mãos, torna-se fácil a geração de um sinal de modulação da reatância do TCSC para garantir o amortecimento das oscilações de potência. No caso da Norte/Sul, pode-se mostrar que o ângulo de fase entre a ordem de reatância do TCSC e o sinal de potência ativa na linha deve ser de  $-90$  graus elétricos para se garantir o máximo de amortecimento para o modo inter-área. É importante enfatizar que este atraso de 90 graus é o ajuste necessário qualquer que seja a frequência do modo inter-área Norte/Sul [2].

A reatância de saída do POD é proporcional à amplitude das oscilações. Como este sinal de saída oscila simetricamente em torno do valor zero, o problema de saturação em qualquer um dos limites físicos da faixa de controle do TCSC é contornado de forma eficiente. Como o controlador usa o sinal de potência ativa na linha como entrada, um sinal de correção relativo ao sentido do fluxo deve ser incluído. Este detalhe é fundamental e evita a operação indevida do TCSC em condições de baixo fluxo já que, neste caso, é comum a inversão de fluxo durante as

oscilações. A Figura 9 mostra uma simulação do POD fasorial, realizada no programa Matlab e usando como entrada um sinal real de potência ativa medida na linha Norte/Sul durante os testes de comissionamento

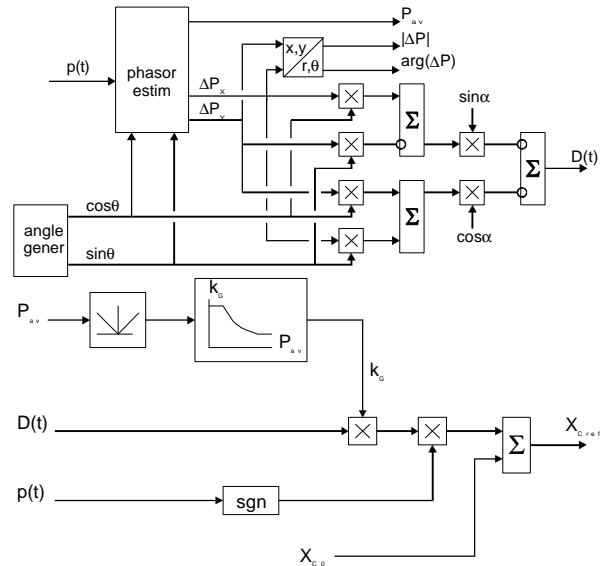


FIGURA 8: Estrutura do POD fasorial.

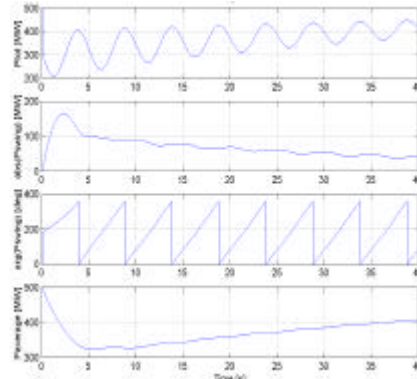


FIGURA 9: Simulação do POD Fasorial no Matlab.

O controlador da Figura 8 trabalha com um valor predefinido de frequência de oscilação. Entretanto, esta frequência pode ser alterada de forma adaptativa, a fim de permitir que o controlador trabalhe com uma faixa de frequência de oscilação mais ampla. Uma forma de se fazer isto consiste em se monitorar o ângulo de fase entre o fasor de referência e o sinal de oscilação de potência estimada. Se este ângulo relativo aumenta, então o valor real da frequência de oscilação está maior que a frequência do sinal de referência, e, portanto esta referência de frequência deve ser aumentada e vice-versa.

#### 4.0 TESTES DE DESEMPENHO DO SISTEMA

Uma extensa lista de testes foi planejada para os testes dos TCSCs, envolvendo pequenos e grandes distúrbios em diferentes cenários de sistema e configuração dos TCSCs. Um dos principais objetivos foi a verificação da eficiência dos TCSCs no

amortecimento do modo Norte/Sul, e a comprovação da inexistência de qualquer interação negativa entre eles. Desta forma, estes testes envolveram as seguintes configurações para os TCSCs:

- Nenhum POD ativado;
- POD de Imperatriz ativado e o de Serra da Mesa desativado;
- POD de Serra da Mesa ativado e o de Imperatriz desativado;
- Ambos os PODs ativados.

Estas configurações foram testadas em vários cenários de sistema. Os principais cenários foram definidos como:

- **Norte exportador** (fluxos de 300 MW do Norte para o Nordeste e 500 MW para o Sudeste);
- **Nordeste exportador** (fluxos de 700 MW do Nordeste para o Norte e 500 MW para o Sudeste).

O sistema foi colocado em uma condição bastante severa, de forma que o modo inter-área pudesse ser excitado com baixo amortecimento. A pior condição ocorreu estando o sistema operando com fluxos de 700 MW do Nordeste para o Norte e de 500 MW do Norte para o Sul (de Imperatriz para Serra da Mesa). Nesta condição, os seguintes distúrbios foram aplicados ao sistema:

- Desconexão e inserção após 30 segundos de banco de capacitor série entre Imperatriz e Colinas
- Desconexão e inserção após 30 segundos de banco de capacitor série entre Serra da Mesa e Gurupi
- Trip de um gerador com 300 MW em Tucuruí
- Trip de um gerador com 200 MW em Serra da Mesa
- Curto monofásico na linha compacta Tucuruí/Marabá, seguido de abertura permanente da linha.
- Curto monofásico na linha convencional Samambaia/Serra da Mesa, seguido de abertura permanente da linha.
- Excitação do modo inter-área via modulação de reatância do TCSC de Imperatriz.

#### 4.1 Análise dos testes de pequenos distúrbios

Em todos os testes de aplicação de pequenos distúrbios tais como a desconexão de bancos de capacitores e excitação das oscilações via o TCSC, o sistema se mostrou estável para todos os cenários, estando os PODs ativados ou não. Em outras palavras, o sistema, mesmo sem os PODs, apresenta amortecimento positivo para o modo inter-área em resposta a pequenos distúrbios.

#### 4.2 Análise dos testes de grandes distúrbios

Nestes casos o sistema na condição de Norte exportador se apresentou estável mesmo sem os

PODs para todos os distúrbios. Os PODs aumentaram drasticamente o amortecimento do sistema para todos os distúrbios.

Na condição de Nordeste exportador, o sistema, com os PODs desativados, apresentou amortecimento positivo para todos os distúrbios exceto para o trip de geração em Tucuruí. Sem os PODs, o sistema se mostrou instável para este distúrbio, o que resultou em trip da linha Norte/Sul após 70 segundos conforme resultado de teste apresentado na Figura 10. Este caso veio como uma grande surpresa, já que as simulações digitais mostram um sistema amortecido para este distúrbio.

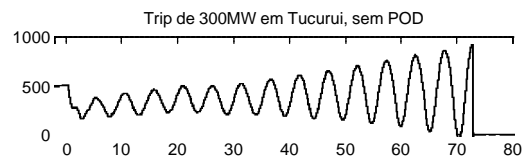


FIGURA 10: Trip de 300 MW em Tucuruí com ambos os PODs desativados.

Este passou a ser o caso base a partir do qual diversos outros testes foram realizados. Durante os primeiros testes, ambos TCSCs estavam equipados com os PODs realizados por blocos Lead-Lag. A Figura 11 apresenta o resultado do mesmo teste estando apenas o POD de Imperatriz ativado. Note que a saída do POD foi distorcida e se distancia de uma forma de onda senoidal. Este é um efeito dos limitadores dos integradores dos blocos Lead-Lag. Estes blocos, ajustados para fornecer um atraso de 90 graus, na verdade não apresentou esta desejada defasagem em relação ao sinal de entrada. O POD, em consequência, perdeu boa parte do seu potencial de amortecimento.

Conhecendo estes resultados, o desenvolvimento de um POD tipo fasorial teve início e, após uma semana, estava implementado e pronto para ser testado. Nesta fase, uma forma bastante efetiva de se verificar a implementação do novo POD foi usada. Um gerador de sinal foi usado para alimentar o POD com sinal de potência similar ao obtido nos testes anteriores. O mesmo sinal era então introduzido em modelo do POD no programa Matlab, permitindo assim, a verificação da correta implementação do código do novo POD. Esta comparação é apresentada na Figura 12.

Os testes também evidenciaram a presença constante de pequenos distúrbios na operação do sistema em regime permanente, algo que não pode ser visto nas simulações digitais, as quais idealizam um regime estacionário perfeito, que, na prática nunca existe. Estas pequenas oscilações são naturais e não prejudicam o sistema. Porém, podem fazer com que o TCSC utilize desnecessariamente, em regime permanente, a sua capacidade de sobrecarga, na tentativa de amortecer estas oscilações.

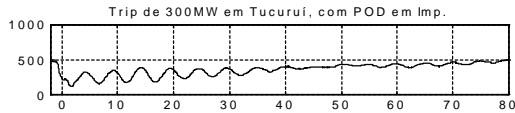


FIGURA 11: Trip de 300 MW em Tucuruí, POD tipo Lead-Lag ativado em Imperatriz. POD de Serra da Mesa desativado.

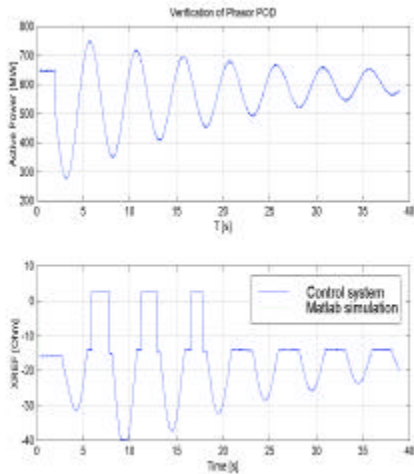


FIGURA 12: POD fasorial. Comparação entre o controlador real e o modelo no Matlab.

Parar sanar este problema, ho  
foram implementados. Em regime permanente o POD apresenta um ganho bastante reduzido (25% do nominal). O ganho nominal é ativado tão logo se detecte amplitude de oscilação superior a 30 MW. Este ganho nominal, uma vez ativado, permanece inalterado por um período de um minuto.

Como o sistema (sem os PODs) apresentou amortecimento inferior ao previsto pelas simulações, decidiu-se por acionar o modo CBP (Bypass por controle) durante as oscilações de potência. Este modo amplifica bastante a capacidade de introdução de amortecimento do equipamento, permitindo uma utilização otimizada dos recursos do mesmo. A figura 13 apresenta o resultado do trip de 300 MW em Tucuruí, estando apenas o POD de Imperatriz ativado. Pode-se observar a operação no modo CBP. A Figura 14 apresenta o mesmo teste mas com ambos os PODs ativados.

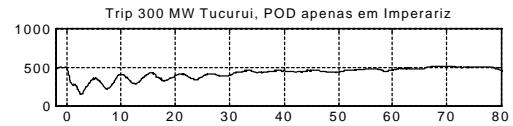


FIGURA 13: Trip de 300 MW em Tucuruí, POD fasorial ativado em Imperatriz. POD de Serra da Mesa desativado.

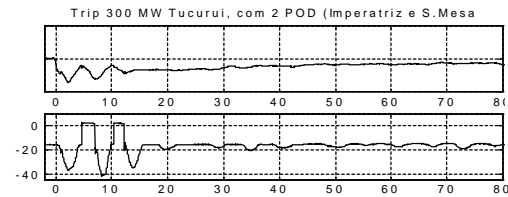


FIGURA 14: Trip de 300 MW em Tucuruí, POD fasorial em Imperatriz, POD tipo Lead-Lag em Serra da Mesa.

## 5.0 CONCLUSÕES

Os testes comprovaram claramente dois pontos fundamentais sobre a Norte/Sul:

1. Os TCSCs são fundamentais para a operação da Interligação;
2. Os TCSCs amortecem muito bem o modo Norte/Sul em qualquer cenário de sistema, inclusive na condição de baixo fluxo (abaixo de que 200 MW).

Um novo controlador POD, tipo fasorial, foi desenvolvido e implementado no TCSC de Imperatriz. Este novo POD, de estrutura totalmente não-linear apresentou excelente resultados e pode vir a ser utilizado em outros controladores tais como PSS, SVCs e qualquer outro dispositivo FACTS.

## 6.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Gama, R. Leoni, J. B. Gribel, R. Fraga, M. J. Eiras, W. Ping, A. Ricardo, J. Cavalcanti, R. Tenório, "Brazilian North-South Interconnection – Application of Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC) to Damp Inter-Area Oscillation Mode", Cigré 37 Session, Paris, 1998.
- [2] C. Gama, M. Noroozian, "Control Strategy for Damping of Power Swings Using TCSC", Cigré Symposium Kuala Lumpur, 1999.