



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

GAT-10  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

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

**ESPECIFICAÇÃO DE UNIDADE DE CONTROLE NO COMPENSADOR ESTÁTICO DE BOM JESUS DA LAPA  
PARA AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS DA INTERLIGAÇÃO SUDESTE-  
NORDESTE**

**Juerges Lottes  
Siemens AG**

**Michael Baer  
Siemens AG**

**Álvaro J. P. Ramos\*  
Andesa**

**Rita K. D. Menezes  
Andesa**

**RESUMO**

Este trabalho analisa os diversos elementos de controle do CE da subestação Bom Jesus da Lapa e apresenta as análises que subsidiaram a especificação do POD sob os seguintes aspectos:

- a) Definição da Estrutura de Controle – Trata da função de transferência, ajustes de parâmetros, variáveis de entrada captadas do sistema elétrico, necessidade de filtros, etc;
- b) Definição das condições para as quais o POD deve ser ativado ou desativado de modo que as funções de amortecimento sejam realizadas adequadamente sem “efeitos colaterais” indesejáveis que podem ocorrer em certas condições.

**PALAVRAS-CHAVE**

Compensador Estático – CE; Amortecedor de Oscilações de Potência – POD; Interligação Sudeste – Nordeste – SE/NE; Reator Controlado a Tiristor – TCR (“Thyristor Controlled Reactor”); Capacitor Chaveado a Tiristor – TSC (“Thyristor Switchable Capacitor”)

**1.0 - INTRODUÇÃO**

À semelhança dos estabilizadores do sistema, que já são usados rotineiramente nos geradores síncronos a muitos anos, o denominado Amortecedor de Oscilações de Potência – POD (“Power Oscillation Damper”) vem sendo incorporado nos sistemas de controle dos modernos Compensadores Estáticos como uma facilidade adicional que o usuário pode fazer uso para

melhor atender aos requisitos de desempenho do sistema em cada situação específica.

Previsto para operar na subestação de Bom Jesus da Lapa - BJL, ponto intermediário da interligação Sudeste-Nordeste – SE/NE, o Compensador Estático – CE de B. Jesus da Lapa (-250Mvar a +250, 500kV) dispõe de um sistema de controle de múltiplas funções e recursos capazes de assegurar um apropriado desempenho em diversas situações. Por exemplo, o sistema de controle do CE BJL proporciona uma excelente resposta transitória para qualquer condição operacional assegurada por um sistema de auto-ajuste automático de ganho da malha de controle principal que se adapta em tempo real à potência de curto circuito do sistema a cada 10 minutos.

Outros recursos especiais de controle como o Bloqueio de Subtensão-UBS (“Undervoltage Blocking Scheme”), o Detector de Oscilação/Redutor de Ganho que atua em caso de ocorrência de oscilações pouco amortecidas e o Amortecedor de Oscilações do Sistema – POD (“Power Oscillation Damper”) constituem elementos de grande importância para assegurar que o CE atenda aos mais severos requisitos de desempenho do sistema elétrico

A Figura 1 apresenta de forma simplificada as interligações entre os sistemas Norte - NO, Nordeste - NE e Sudeste - SE, mostrando a SE B. Jesus da Lapa que se localiza aproximadamente no meio entre Serra da Mesa e Sapeaçu. Vários cenários são considerados nos estudos de planejamento com relação à direção e magnitude dos intercâmbios entre as áreas NO, SE e NE. O intercâmbio máximo considerado do SE para o NE, medido em S. da Mesa, a saída de linha para Rio das Éguas é de 800MW. No sentido inverso, o fluxo NE - SE, chegando em S. da Mesa é algo em torno de

\* Avenida Domingos Ferreira, 2215 – salas 604/605 - CEP 51020-031 - Recife - PE - BRASIL  
Tel.: (081) 3467-5734 - Fax: (081) 3465-2711 - E-MAIL: alvaro@andesa.com.br

130MW. A interligação SE - NE se conecta ao sistema da CHESF na subestação de Sapeaçu 230kV que se insere no seccionamento das linhas G. Mangabeira – Funil 230kV, como mostrado na Figura 1.

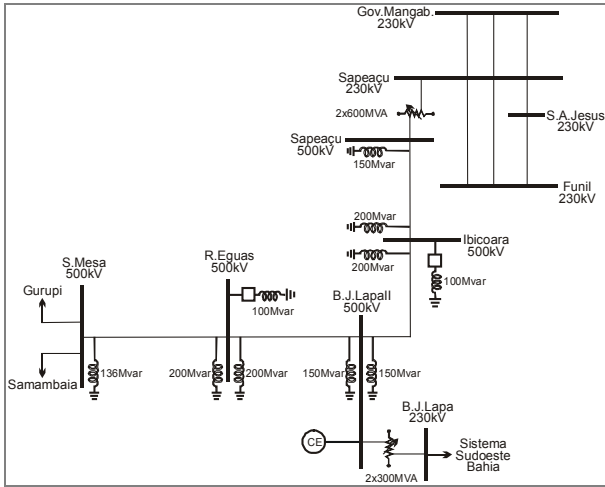


FIGURA 1 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

2.0 - CONFIGURAÇÃO DO CE B. JESUS DA LAPA

A configuração do CE B.JL é mostrada na Figura 2. Os parâmetros do Reator Controlado a Tiristor -TCR, do Capacitor Chaveado a Tiristor -TSC e dos filtros- F1 e F2 são apresentados na Tabela 1.

O CE é constituído de dois TCR, um TSC e dois filtros conectados ao barramento 17.5 kV. Os TCR e o TSC são conectados em ligação “delta” enquanto os filtros são ligados em “Y” não aterrado. O sistema de controle do CE manipula os TCR e TSC de tal forma que uma variação contínua de admitância no barramento 17,5kV seja obtida em termos de frequência fundamental.

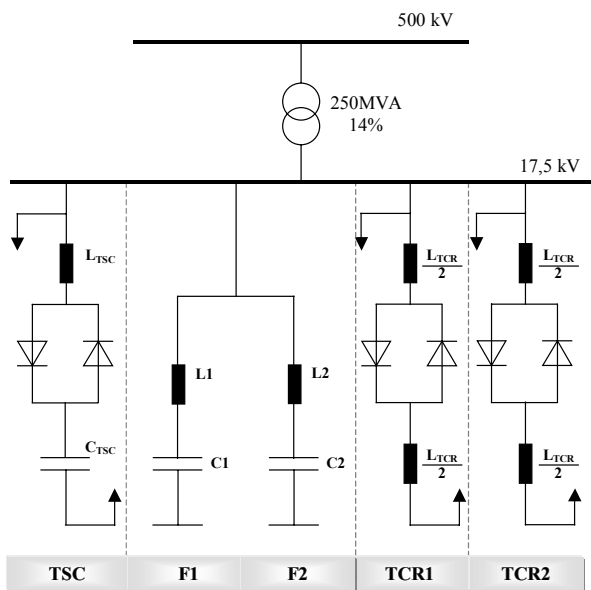


FIGURA 2 - CONFIGURAÇÃO DO CE B.JL

TABELA 1 - CONFIGURAÇÃO DO CE B.JL

Elem.	Nom.	Unidade	Faixa
TCR1,2	L <sub>TCR</sub>	13,5 mH	-1,80519 → 0
	C <sub>TSC</sub>	404 μF	0 ou 1,4936
TSC	L <sub>TSC</sub>	1,1 mH	0 ou 1,4936
	C <sub>TSC</sub>	404 μF	
F1	L1	1,4 mH	0,25303
	C1	210 μF	
F2	L2	0,38 mH	0,44792
	C2	380 μF	

\* Em “pu” referido a 17,5kV, 100MVA, e frequência fundamental.

3.0 - SISTEMA DE CONTROLE

3.1 Funções Gerais do Sistema de Controle

O sistema de controle do CE B.JL compreende inúmeras funções, das quais, as principais para a presente análise são mostradas na Figura 3.

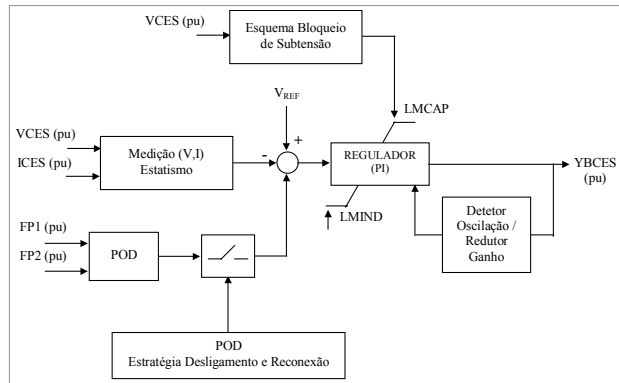


FIGURA 3 – PRINCIPAIS FUNÇÕES DO SISTEMA DE CONTROLE DO CE B. JESUS DA LAPA

**Malha de controle principal:** compreende a medição de tensão e corrente realizando a função de estatismo e os reguladores de tensão tipo PI. O ganho proporcional do PI é ajustado automaticamente pelo sistema de controle em intervalos de 10 minutos em função da sensibilidade da tensão no barramento B.JL 500 kV para variação de potência reativa ( $\Delta V/\Delta Q$ ), medida em tempo real, e do ajuste do estatismo. Este recurso é referido como Adaptador Automático de Ganho. Como este é um processo lento não é representado no modelo do CE.

**Esquema de Bloqueio de Subtensão – VSUB** é um recurso especial para evitar que o CE tente controlar a tensão do barramento de conexão durante curtos circuitos.

**Amortecedor de Oscilações do Sistema – POD** representa uma unidade de controle complementar que se destina a introduzir amortecimento para as oscilações eletromecânicas com base na medição dos fluxos de potência ativa medidos nas linhas B. Jesus da Lapa para Ibicoara e Rio das Éguas. Associado ao POD existe um

conjunto de funções responsáveis pela desativação e reconexão do POD sob determinadas condições.

**Detector de Oscilação/Redutor de Ganho** - esta função de controle detecta oscilações não amortecidas associadas ao sistema de controle do CE e sua interação com a rede elétrica, a partir do sinal de saída do regulador PI e inicia um processo de redução lenta, “passo a passo” do ganho do regulador até a eliminação das oscilações. Esta função só é ativada para oscilações de frequência superior a 4Hz, que caracteriza a faixa de frequência deste tipo de problema (3).

### 3.2 Malha de Controle Principal

A malha de controle principal consiste das funções de medição e estatismo e do regulador PI como mostrado na Figura 4.

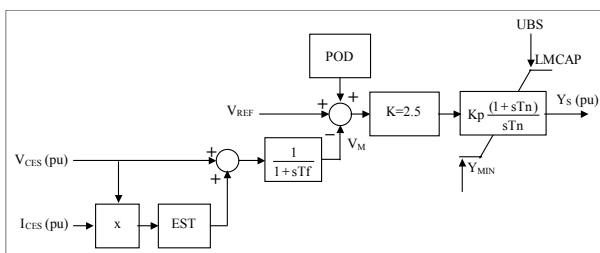


FIGURA 4 – MALHA DE CONTROLE PRINCIPAL

O ganho  $k=2,5$  é utilizado para adequar o modelo, cujos parâmetros são referidos ao nominal do CE (250MVA), à base do programa de transitórios eletromecânicos ANATEM (100MVA).

O sinal de saída do POD é introduzido no ponto de soma que forma o erro de controle.

### 3.3 Função de Transferência do POD

A Figura 5 mostra a função de transferência do POD cujo sinal de entrada é FP (pu).

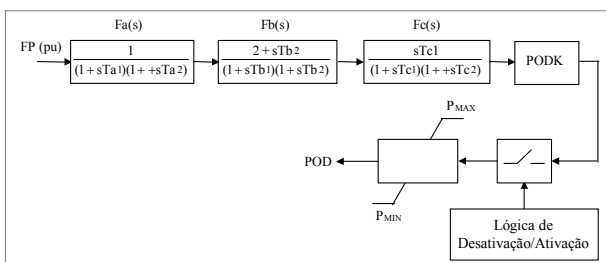


FIGURA 5 – FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO POD

Os valores de fluxo  $F_{P1}$  e  $F_{P2}$  são medidos de acordo com as direções indicadas na Figura 6, isto é, são positivos quando a direção é aquela indicada na Figura 6. Por exemplo, quando o fluxo está na direção A, FP1 é negativo, FP2 é positivo e inclui a carga de B. Jesus da Lapa.

O valor selecionado a ser usado pelo POD será o valor líquido que flui na interconexão, ou seja, para casos de fluxo na direção A:

$$|PF| = |FP1| = |FP2| - \text{CARGA}$$

Quando o fluxo está na direção B, então:

$$|PF| = |FP2| = |FP1| - \text{CARGA}$$

O símbolo “|X|” indica valor absoluto de “X”.

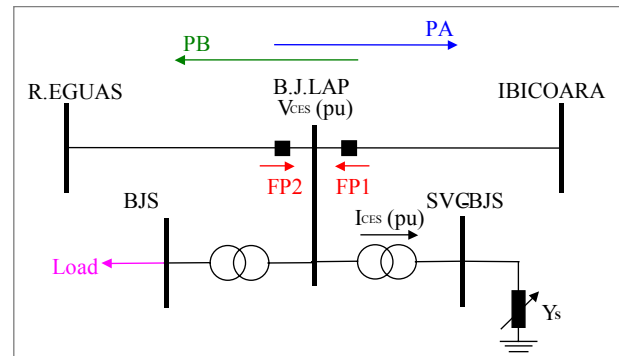


FIGURA 6 – DEFINIÇÃO DAS POTÊNCIAS MEDIDAS PARA SÍNTESE DO SINAL DE ENTRADA DO POD (FP)

### 3.4 Estratégia de Desligamento e Reconexão do POD

Como se sabe, a função do POD é introduzir amortecimento nas oscilações eletromecânicas no fluxo de potência ativa medida na interligação SE – NE através da modulação da tensão terminal do CE. Esta é, portanto, uma função adicional que interfere no controle de tensão terminal do CE. O grau de amortecimento que o POD é capaz de introduzir no sistema depende da sintonia da sua função de transferência para a frequência de oscilação e do respectivo ganho do POD.

É evidente que o efeito de amortecimento é obtido à custas de maiores variações de tensão no barramento 500kV de B. Jesus da Lapa. Existe pois, um compromisso entre o nível de amortecimento desejado devido ao POD e a magnitude das oscilações de tensão que se aceita introduzir no sistema. Este é um ponto importante considerando que cargas são supridas no regional derivado da subestação de B. Jesus da Lapa 500/230kV. Em Rio das Éguas ou Ibicoara onde não existem consumidores, um maior grau de modulação de tensão seria, em princípio, mais tolerável.

Assim sendo, depreende-se que existe “um preço” a ser “pago” pela ação de estabilização do POD que se manifesta por maiores amplitudes de variação de tensão. A “dosagem” ideal do grau de ação do POD é estabelecida pelo ajustes dos seus parâmetros.

Entretanto, em algumas situações a ação do POD é desnecessária ou mesmo perniciosa o que indica a conveniência de desligá-lo temporariamente. Desta forma o controle do CE tem programado uma estratégia

de desligamento e reconexão do POD que será discutida em detalhes neste trabalho.

#### 4.0 - ANÁLISE PARA PEQUENAS PERTURBAÇÕES

Dependendo do tipo e localização da perturbação é possível se “excitar” modos de oscilação de frequências distintas. É desejável que o desempenho do CE/POD sejam satisfatórios para toda a faixa de frequência que cubra estes modos de oscilação. A condição de carga do sistema e o cenário, isto é, os fluxos de intercâmbios entre regiões têm também influência nos modos de oscilação. Um estudo detalhado para definição de ajustes deve considerar os diversos cenários esperados (SE=Sudeste Exportador; NE=Norte Exportador; NX=Nordeste Exportador, etc). O nível de intercâmbio também influencia o desempenho do POD.

O presente estudo não tem o objetivo de definir ajustes adequados, mas apenas comprovar o potencial de amortecimento do POD.

O ajuste mais adequado depende mesmo da filosofia operacional a ser adotada, isto é, quanto se deseja e se julga necessário de amortecimento e quanto se considera razoável se “abrir mão” do extraordinário recurso de controle transitório de tensão do CE BJL.

A Figura 7 mostra o desempenho do sistema para um chaveamento de reator no barramento em Ibicoara 500kV por 100ms, na condição de carga pesada para um cenário do Sudeste Exportador (SE). Neste caso FP=FP1=-590MW (direção de Ibicoara).

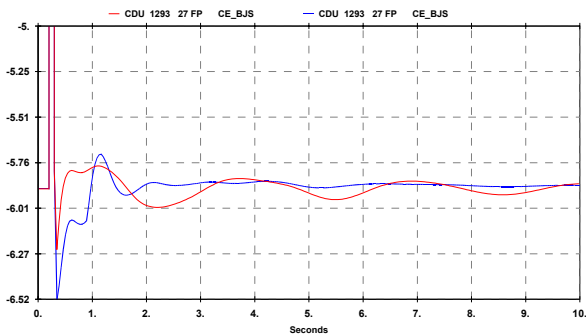


FIGURA 7 – (a) – FLUXO FP: VERMELHO=SEM POD; AZUL=COM POD. FP1=-590MW, CENÁRIO SE.

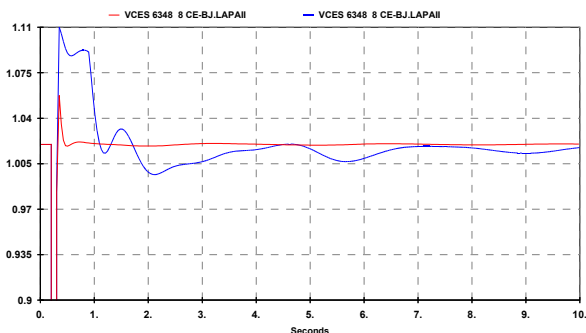


FIGURA 7 – (b) – TENSÃO B.J.LAPA 500KV: VERMELHO=SEM POD; AZUL=COM POD.

A Figura 8 mostra o desempenho para o mesmo evento em carga leve e para um cenário Nordeste Exportador (NX) com FP2=-131MW.

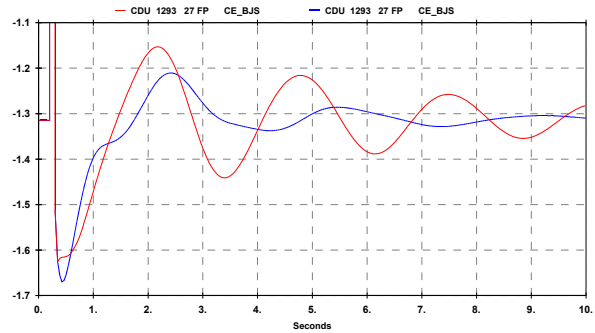


FIGURA 8 – (a) – FLUXO FP: VERMELHO=SEM POD; AZUL=COM POD.

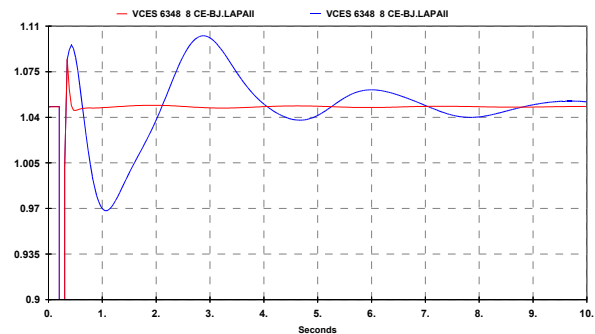


FIGURA 8 – (b) – TENSÃO B.J.LAPA 500KV: VERMELHO=SEM POD; AZUL=COM POD.

Figura 9 mostra o desempenho do CE/POD para a manobra de reator em Imperatriz 500 kV em carga leve e para o cenário Nordeste Exportador (NX).

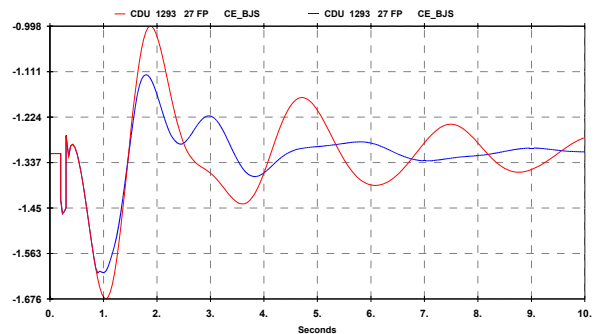


FIGURA 9 – (a) – FLUXO FP: VERMELHO=SEM POD; AZUL=COM POD. FP2=-130MW, CENÁRIO NX.

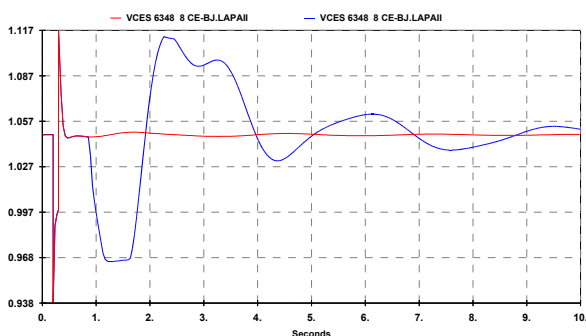


FIGURA 9 – (b) – TENSÃO B.J.LAPA 500KV: VERMELHO=SEM POD; AZUL=COM POD. FP2=-130MW, CENÁRIO NX.

Observamos que neste caso outras frequências de oscilações se manifestam e a ação do POD faz a tensão de B.J.L. atingir até 1,117pu. A saída do POD para este caso já atinge por um curto período de tempo os limites definidos em +/- 10%, como mostrado na Figura 10.

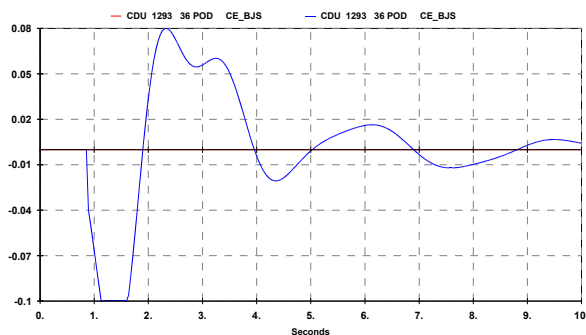


FIGURA 10 – SAÍDA DO POD. FP2=-130MW, CENÁRIO NX. MANOBRA DE REATOR EM IMPERATRIZ 500 KV EM CARGA LEVE.

A diversidade de cenários prováveis de intercâmbios entre as regiões Sudeste, Norte e Nordeste, diferentes condições de carga traz uma certa dificuldade de encontrar uma sintonia que assegure um desempenho otimizado para todas as condições. Esta tarefa se torna ainda mais complexo quando estamos considerando as grandes perturbações que são objeto de análise a seguir.

## 5.0 - ANÁLISE PARA GRANDES PERTURBAÇÕES

Nas grandes perturbações o fluxo de potência ativa que é medido pelo CE/POD de B.J.L nem sempre apresenta um comportamento simples que possibilite uma ação apropriada do POD. Por exemplo, em carga pesada e no cenário Norte Exportador e um fluxo de 552MW do Sudeste para o Nordeste, um defeito fase – terra com perda de um circuito Imperatriz – Colinas 500kV causará uma redução tipo rampa nos instantes imediatamente após o evento que reflete a acomodação dos intercâmbios entre as regiões frente a brusca e significativa mudança de impedância entre o Sudeste e Norte representado pela perda do circuito entre Imperatriz e Colinas. Este caso é mostrado na Figura 11 (a) a (c).

Como mostrado na Figura 11, a partir da perda do circuito Imperatriz – Colinas em aproximadamente 0,3s, o fluxo FP, medido pelo CE/POD inicia um decaimento em módulo tipo rampa até 1,3s, causando saturação do POD e conseqüente sobretensão de 115%. Este comportamento se assemelha à tomada de carga das máquinas síncronas causando a saturação dos PSS (“Power System Stabilizer”). O desligamento do POD nestas condições é recomendável. A adoção de estratégias conhecidas de redução de ganho transitório para os PSS poderá a se constituir em ponto a ser investigado desde que os benefícios de tal esforço se justifiquem.

Pelo exposto, depreende-se que em inúmeras situações é desejável se desativar o POD.

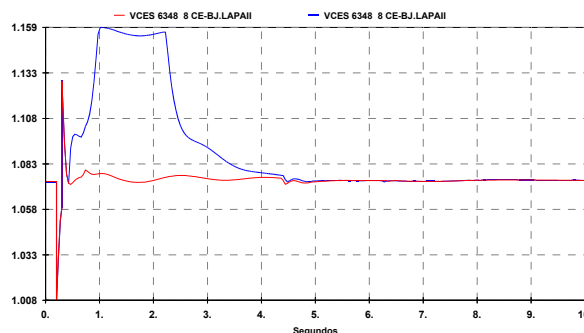


FIGURA 11 – (a) TENSÃO B.J.LAPA 500KV: VERMELHO=SEM POD; AZUL=COM POD.

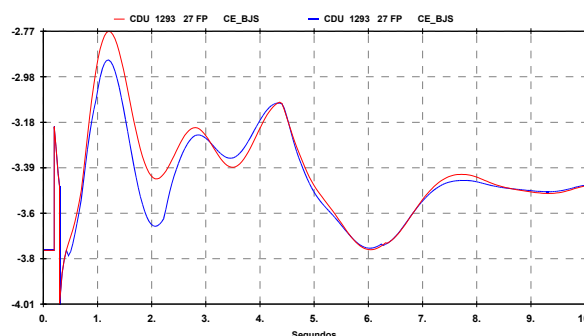


FIGURA 11 – (b) FLUXO FP: VERMELHO=SEM POD; AZUL=COM POD. FP=FP2=-375MW, CENÁRIO NE.

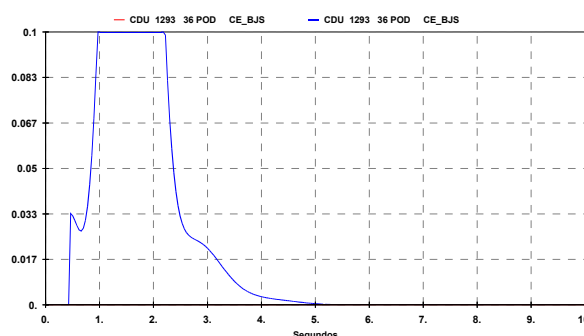


FIGURA 11 – (c) – SAÍDA DO POD SATURANDO NOS INSTANTES INICIAIS.

## 6.0 - ESTRATÉGIA DE DESLIGAMENTO E RECONEXÃO

O POD deve está ativo ou inativo nas condições abaixo:

- ❑ **Em Regime Permanente:** nestas condições o POD deve está inativo.
- ❑ **Condições de Bloqueio em Regime Permanente:** o POD deve permanecer inativo mesmo que um transitório seja iniciado se:
  - a)  $|FP| \leq 100\text{MW}$  – isto é, quando o fluxo de B JL para Rio das Éguas ou Ibicoara seja inferior a 100MW. Esta condição cobre as situações de baixo fluxo entre o SE e NE ou quando o disjuntor da linha para Ibicoara ou Rio das Éguas está aberto;
  - b) quando os fluxos medidos FP1 e FP2 têm a mesma polaridade, o que significa que a carga de B JL está sendo suprida parte por Rio das Éguas e parte por Ibicoara.
- ❑ **Condições em que o POD é ativado:** se nenhuma das condições do item anterior ocorrer, o POD é ativado quando o módulo da sua saída se tornar maior do que 3% por um tempo superior a 50ms.
- ❑ **Condições de em que o POD é desativado:**
  - a) estando em operação, o POD é desativado sempre que a sua saída se tornar maior (módulo) do que ser 10% por mais do que 1,0s;
  - b) Houver a atuação do Esquema de Bloqueio de Subtensão.
- ❑ **POD é desativado quando se encerra um período transitório:** quando a saída do POD (módulo) se torna menor do que 1% por mais de 3s. Isto é uma indicação de que o regime permanente se restabeleceu.

## 7.0 - CONCLUSÃO

- A definição dos ajustes dos parâmetros do POD que assegure um desempenho adequado deve considerar os cenários mais prováveis, diferentes condições de carga ou mesmo configurações outras além da normal. Isto é particularmente importante para o presente caso de Bom Jesus da Lapa em face da diversidade de cenários e condições possíveis de operação. Os ajustes dos parâmetros devem, evidentemente, cobrir os modos de oscilação dominantes, assegurando amortecimento apropriado para toda a faixa de frequência associada.
- A função principal de controle do CE, que é a regulação de tensão, deve ser compatibilizada com a função suplementar de amortecimento, proporcionada pelo POD, lembrando que o amortecimento é obtido através da modulação da tensão terminal do CE B JL. Este fato é importante considerando que a subestação de Bom Jesus da Lapa supre cargas do respectivo regional.

- A análise das grandes perturbações deve fornecer os elementos para os ajustes da estratégia de desligamento e reconexão evitando-se situações em que o POD possa causar sobre ou subtensões.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LERCH, E., POVH, D., XU, L. "Advanced SVC Control for Damping Power Oscillation", IEEE, Transactions on Power System, Vol. 6, nr. 2, pp. 524 – 535, May 1991.
- (2) HAMMAD, A. E. "Analysis of Reactive Power System Stability Enhancement by Static VAR Compensators", IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. 1, Nr. 4, pp. 222 – 227, November 1986.
- (3) A. J. P. RAMOS, H. TYLL "Dynamic Performance of a Radial Weak Power System with Multiple Static VAR Compensators". IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. 4, pp. 1316 – 1325, November 1989
- (4) MARTINS, N., MACEDO N. J. P., LIMA L. T. G., PINTO H. J. C. P. "Control Strategies for Multiple Static VAR Compensators in Long Distance Voltage Supported Transmission Systems". IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. 8, pp. 1107 – 1117, August 1992.