



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

GAT - 30  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

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

**UTILIZAÇÃO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA PARA EVITAR COLAPSO DE TENSÃO  
DINÂMICA NO SUBSISTEMA INTERLIGADO NORTE/NORDESTE**

**J. L. Scavassa\***  
Eletronorte

**W.S.Pinto**  
ESP – Engenharia

**J.T.Honda**  
Norte/Sul Engenharia

**RESUMO**

Este trabalho apresenta uma solução simples e eficiente para o fenômeno de **Colapso de Tensão Transitório (CTT)**, que consiste de afundamentos de tensão que ocorrem, principalmente nas linhas de interligações regionais, alguns segundos após um aumento repentino do fluxo de potência nestas interligações, provocado por contingências no sistema que levam a um desequilíbrio entre carga e geração de uma determinada área.

Serão apresentados os resultados da aplicação de bancos de capacitores chaveados para a correção do CTT entre os sistemas Norte e Nordeste na contingência da interligação Sudeste/Nordeste no cenário Sudeste exportador, permitindo que a região Nordeste receba uma certa quantidade de energia em qualquer cenário operativo.

Será descrito como o modelo do sistema de controle desenvolvido para o chaveamento dos bancos atua para qualquer perfil de tensão inicial, sensibilizado pelo colapso de tensão, com valor ajustável, permanecendo ligado por um determinado tempo, também ajustável, tendo ainda como dado de entrada o tempo de retardo do disjuntor de chaveamento.

**PALAVRAS-CHAVE**

Colapso de tensão - FACTS – TCSC – Projeto de Controlador.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A região Nordeste deixou de ser auto-suficiente em energia elétrica desde a entrada em operação da usina de Tucuruí (1985), passando então a importar energia da região Norte em volumes crescentes ao longo do tempo.

Com a expansão do consumo de energia no Brasil, e dificuldades de suprir a demanda com gerações locais, procedeu-se a estudos de otimização das bacias hidrográficas viabilizando a interligação dos sistemas Norte/Nordeste com o Sul/Sudeste através da interligação Norte/Sul (interliga a SE Imperatriz / MA até a SE Samambaia / DF desde 1998).

O contínuo crescimento da demanda e a necessidade de minimizar os investimentos em geração levaram ao reforço das interligações regionais, Norte/Nordeste, Norte/Sul e, à criação de uma nova interligação agora entre as regiões sudeste e nordeste (ano 2003).

(\*) Eletronorte – SCN Q. 6 Conjunto A Bloco B Sala 816 – Asa Norte – CEP.70718-900 – Brasília – DF – Brasil.  
Tel: (61) 429-6332 - Fax (61) 328-6093 - e-mail: jluiz@eln.gov.br

A figura 1, a seguir, ilustra o sistema de transmissão entre as regiões Norte, Nordeste e Sul/Sudeste, previsto no plano de expansão 2001/2010, em destaque as interligações sudeste/Nordeste, Norte/Sul e Norte/Nordeste. Estas interligações constituem-se de longas linhas em 500 kV, da ordem de 1000 km, operando quase sempre com fluxos elevados, próximos a 1000 MW.

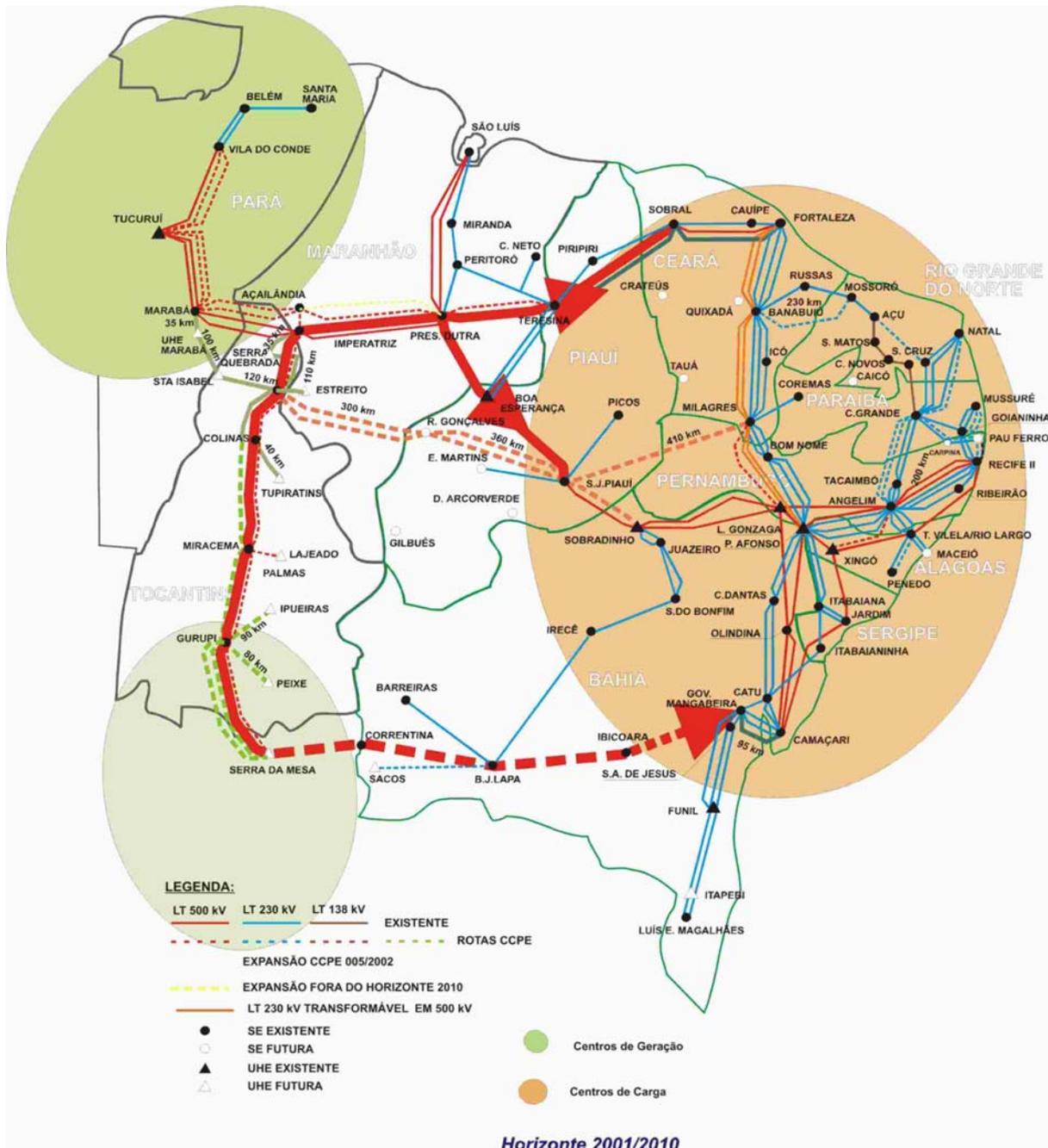


FIGURA 1 - Expansão da Interligação Norte/Nordeste

A interligação Norte/Sul, foi planejada como uma interligação energética, isto é, que otimiza a operação interligada entre os sistemas transmitindo energia do sistema que estiver com excesso para o que estiver com déficit.

A região Nordeste está quase sempre importando energia tanto do Norte como do Sudeste, por ter um parque gerador insuficiente para atender à sua demanda.

O funcionamento destas interligações nas diferentes condições operativas tem levado a algumas restrições de

transmissão em função de contingências no sistema interligado Brasileiro.

A referência [1] descreve como causa do colapso de tensão temporário em linhas de interligações entre sistemas o desequilíbrio carga – geração em um dos sistemas. Tendo como consequência natural o aumento temporário do fluxo entre os sistemas através de uma interligação fraca, seguido de uma solicitação de suporte de reativos insuficiente, que em última análise é o que provoca o **CTT** no Sistema.

Aqui, o desequilíbrio carga – Geração acontece no sistema Nordeste, e é provocado pela perda da interligação Sudeste/Nordeste que injetava aproximadamente 1000 MW na região sul do Nordeste, (Estado da Bahia). A interligação fraca é a linha presidente Dutra – Boa Esperança que não está dimensionada para um aporte adicional desta magnitude. O colapso ocorre pelo déficit transitório de reativos provocado pelo súbito aumento do fluxo de potência nesta interligação

A solução até agora utilizada foi reduzir o intercâmbio (redução de até 590 MW no intercâmbio Norte/Nordeste) de modo que a perda de qualquer interligação não leve a este colapso de tensão.

A proposta aqui demonstrada consiste em chavear um determinado valor de banco de compensação série na interligação fraca quando a tensão atingir um valor mínimo definido e retirá-lo assim que a tensão restabelecer a valores aceitáveis. Este processo fornece ao sistema nos instantes em que ele mais precisa um volume de potência reativa suficiente para suprir as necessidades transitórias do sistema evitando o **CTT** até que os controladores atuem ajustando os equipamentos à nova necessidade do sistema.

Na aplicação aqui proposta o maior impacto que o sistema deverá suportar é a perda da Interligação Sudeste/Nordeste, faltando determinar qual o montante de bancos a serem chaveados e por quanto tempo eles são necessários no sistema para corrigir o colapso de tensão.

Este trabalho apresenta assim uma aplicação que explora as causas dinâmicas do sistema utilizando-as na solução do problema.

## 2.0 - CTT – NORTE/NORDESTE

A referência [2] mostra que para o cenário **Sudeste exportador** a contingência Serra da Mesa – Correntina impõe um déficit energético na região sul do Nordeste que será suprida inicialmente por uma brusca elevação do fluxo na interligação Norte/Nordeste (Presidente Dutra – Boa Esperança) provocando uma elevada solicitação de suporte de reativo entre 3 e 5 seg. após a abertura daquela linha, tendo como consequência um afundamento de tensão na rede de 500 kV, acentuadamente nas subestações de Presidente Dutra, Boa Esperança e Teresina.

A figura 2 mostra a simulação de perda da linha Serra da Mesa – Correntina no cenário Sudeste exportador com um intercâmbio de 3250 MW recebidos pelo Nordeste; donde pode-se observar:

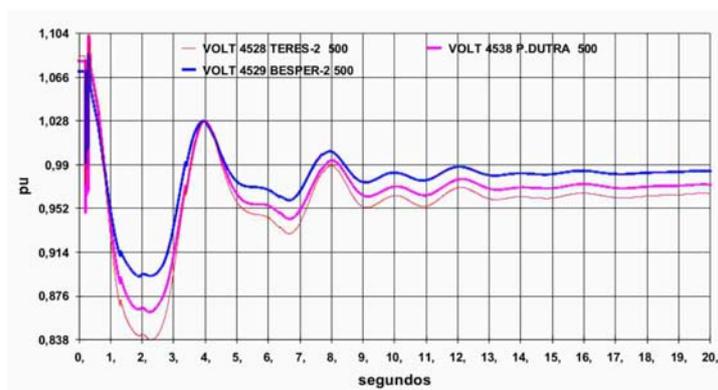


FIGURA 2 – Perfil de tensão na Interligação Norte/Nordeste.

A tensão em todo o tronco de 500 kV de Imperatriz a São João do Piauí e de Teresina a Fortaleza sofre um afundamento transitório por aproximadamente 3 s, sendo que os picos inferiores acontecem em Teresina e Sobral atingindo valores menores que 0,80 p.u.; e, nestes instantes, os equipamentos que fornecem suporte de reativos estão passando por exigências elevadas, por exemplo, a usina de Sobradinho atinge mais de 600 MVar e os síncronos de P. Dutra, 350 MVar.

A figura 3 nos mostra que no instante que o fluxo na linha PDD – BEA é máximo ocorre um mínimo na tensão em Presidente Dutra e um máximo de solicitação de reativo nos equipamentos que fornecem potência reativa.

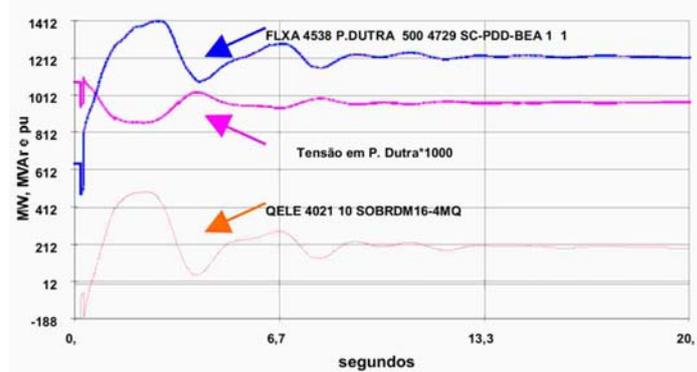


FIGURA 3 – Comportamento das principais grandezas envolvidas no **CTT** N/NE.

Pode-se notar que este colapso de tensão é maior entre 1 e 3 seg., praticamente restabelecendo-se após este período de tempo, ou seja, é um colapso de tensão transitório no sistema provocado por um aumento no fluxo de potência na interligação Norte/Nordeste, Presidente Dutra - Sobradinho, de aproximadamente 1000 MW, restabelecendo-se após 3 seg., tempo de atuação dos reguladores de tensão e velocidade dos subsistemas Norte e Nordeste.

Este colapso de tensão pode levar à instabilidade do sistema interligado, para perda da interligação Sudeste/Nordeste nas seguintes condições:

1. Fluxo maior que 3250 MW recebidos pela região nordeste;
2. Perfil de tensão nas linhas de interligação Norte/Nordeste inferior a 1,06 p.u..

As figuras 4a e 4b mostram o comportamento do sistema para perda de estabilidade, simulado com perfil de tensão de 1,06 p.u..

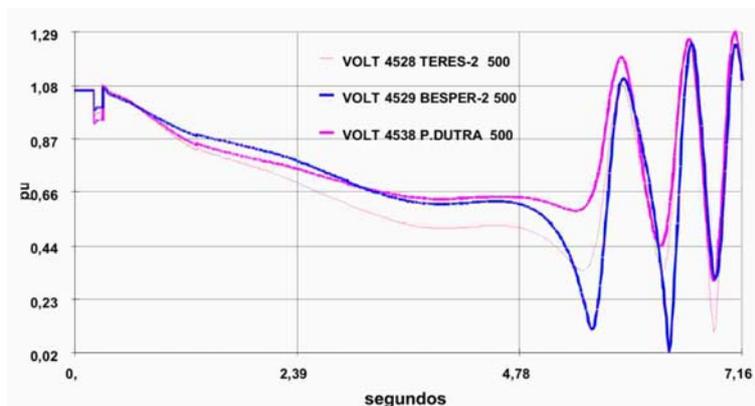


FIGURA 4a - Perfil tensão interligação Norte/Nordeste.

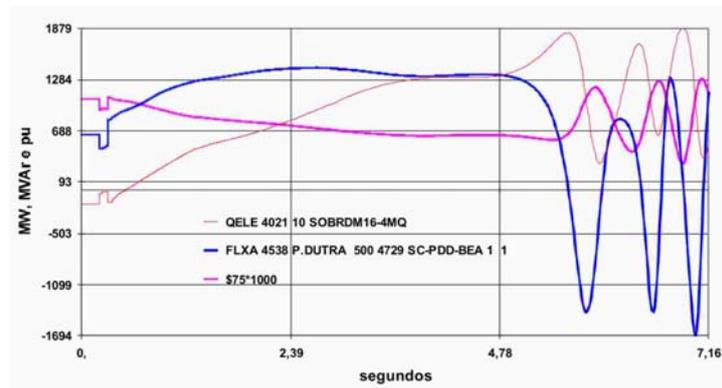


FIGURA 4b - Grandezas envolvidas no CTT N/NE.

Este fenômeno pode ser assim resumido: a perda da linha Serra da Mesa – Correntina provoca uma repentina elevação no fluxo na interligação Norte/Sul (de Serra da Mesa para Imperatriz) e Norte/Nordeste (de Imperatriz para o Nordeste, notadamente na interligação Presidente Dutra – Sobradinho). Este brusco aumento no fluxo, neste elo mais fraco da interligação, exige um elevado suporte de reativo do sistema provocando um afundamento transitório de tensão ao longo da interligação Norte/Nordeste, sendo mais acentuado em Presidente Dutra, Boa esperança e Teresina. Caracterizando o fenômeno de **Colapso de Tensão Transitório na Interligação Norte/Nordeste, (CTTI-N/NE)**.

A mesma contingência no cenário Norte Exportador não provoca o fenômeno **CTTI-N/NE** com a mesma intensidade, neste cenário a interligação Sudeste/Nordeste está menos carregada e sua perda provoca um impacto menor, suportável pelo sistema interligado.

### 3.0 - CHAVEAMENTO DE BANCOS SÉRIE NA LT PDD – BEA

A análise das figuras 2 e 3 nos indicam que, o CTT N/NE é um fenômeno que tem uma duração aproximada de 2,0 segundos, nos casos em que o sistema não perde a estabilidade. O fenômeno CTT inicia-se após a contingência e tem seu pico máximo decorrido cerca de 1s, desaparecendo após 3 segundos, com a tensão restabelecida a valores aceitáveis. O déficit de reativos é, portanto, temporário.

Então, tem-se um déficit de reativos temporário que ocorre com um aumento brusco de fluxo numa determinada linha provocando afundamentos temporários de tensão que perduram até um rearranjo natural dos sistemas interligados; podendo levar a instabilidade dos mesmos.

A proposta aqui estudada é inserir um banco de capacitor em série com a linha que sofrer maior variação de fluxo, tendo como consequência o fornecimento de uma quantidade de reativos proporcional ao quadrado da corrente na linha, Ou seja, se o fenômeno CTTI-N/NE provoca um aumento na corrente da linha, a vacina é a utilização deste aumento de corrente para suprir a necessidade de suporte de reativo transitório que o sistema requer.

Como em regime permanente não há necessidade desta compensação série, ela deverá estar no sistema enquanto durar o colapso de tensão, e sendo o fenômeno relativamente lento, da ordem de segundos, o chaveamento por disjuntor é suficiente para a solução não sendo necessário por exemplo a utilização de um TCSC.

O desafio agora é definir qual o montante de bancos a ser inserido, quando inserir e por quanto tempo permanecer inserido de forma a controlar o **CTT**.

#### 3.1– Dimensionamento dos Bancos Chaveados

O montante de compensação série a ser adicionada deve ser balizado pelo máximo fluxo admissível na linha em questão e pela máxima geração de reativos dos controladores sensibilizados pelo **CTT**, que atuarão para suprir o déficit de reativos após o rearranjo do sistema interligado e à retirada da compensação série chaveada.

Assim, no caso da interligação Norte/Nordeste, o fluxo na linha Presidente Dutra – Boa Esperança está delimitado como sendo de 1600 MW em condições de emergência (30 minutos), não devendo ultrapassar os 1200 MW em condições normais de operação.

A figura 3 nos mostra um fluxo após a contingência já da ordem de 1200 MW, sinalizando que esta interligação não suporta uma compensação série adicional em regime permanente.

O banco a ser chaveado durante o **CTT** N/NE deve ter um valor tal que não eleve o fluxo na LT P. Dutra – B. Esperança para valores muito acima de 1600 MW enquanto estiver inserido e, elimine o **CTT** para atender à perda da contingência da interligação Sudeste/Nordeste estando o Nordeste recebendo até 3250 MW, e o sul/Sudeste exportando energia para o Norte/Nordeste. Estas condições devem ainda ser atendidas para um perfil de tensão na interligação Norte/Nordeste acima de 1,04 p.u..

A determinação final do montante de compensação série a ser chaveada passa pelos resultados de simulações dinâmicas, pois a solução envolvendo as variáveis descritas é não linear e função da resposta dinâmica do sistema interligado Brasileiro.

### 3.2 – Simulações Dinâmicas

Nas Figuras 5a a 5c estão os principais resultados de simulações de perda da linha Serra da Mesa – Correntina, no cenário Sudeste exportador, com a inserção temporária de um banco de compensação série de 39% da reatância da Linha Presidente Dutra – Boa Esperança ( $X_{csc}=1,036\%$ ), quando a tensão em PDD ficar menor que  $0,85 \cdot V_{inicial}$  p.u. por pelo menos 0,15 seg. e, retirando-o quando a tensão retornar a  $0,95 \cdot V_{inicial}$  p.u., deixando-o ligado por pelo menos 2,5 seg., donde se conclui:

1. O sistema passou a ser estável para um perfil de tensão no tronco de 500 kV, barra de Presidente Dutra, acima de 1,040 p.u., transferindo 3250 MW no cenário sudeste exportador;
2. A Figura 5c mostra o suporte de reativo fornecido pelo banco chaveado durante sua atuação, chegando a 430 MVAR;
3. O chaveamento de um capacitor de 1,036% na LT PDD – BEA quando a tensão ficar abaixo de  $0,85 \cdot V_{inicial}$  p.u., por mais de 0,15 s, permanecendo ligado por 2,5 seg. foi o responsável por transformar o sistema de instável para estável, com um nível de intercâmbio do Sul/Sudeste para o Nordeste de até 3250 MW.

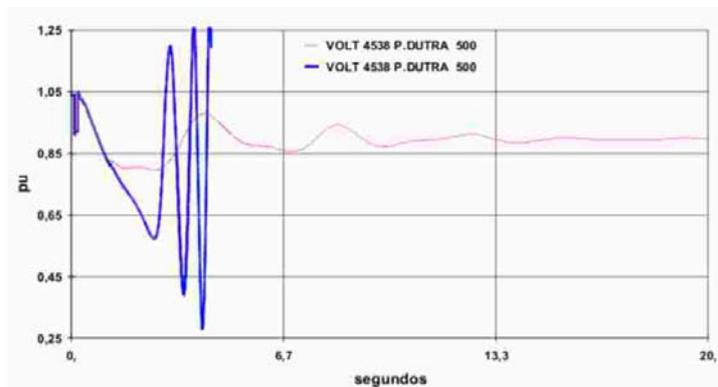


FIGURA 5a – Comparação das tensões em P. Dutra com e sem chaveamento de bancos LT PDD-BEA.

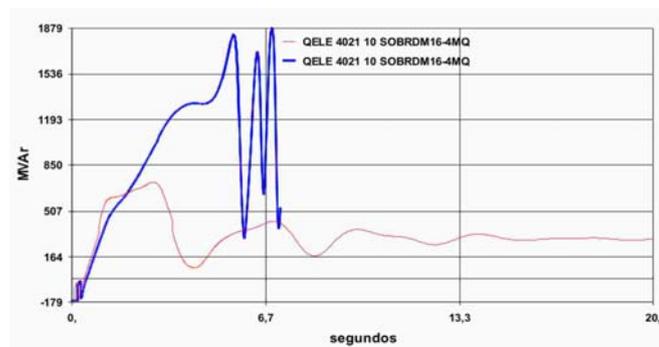


FIGURA 5b – Comparação de Reativos em Sobradinho com e sem chaveamento de bancos LT PDD-BEA.

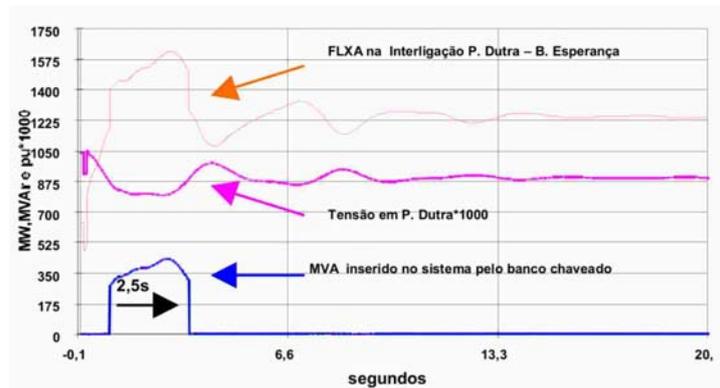


FIGURA 5c – Chaveamento de Banco série  $X_{csc} = 1,036\%$  na LT PDD-BEA, por 2,5s, quando a tensão cair 15%.

#### 4.0 - ANÁLISE EM OUTRAS CONFIGURAÇÕES

Na referência [2], Expansão da Interligação Sudeste/Nordeste, foram estudadas cinco configurações diferentes para as interligações Norte/Nordeste. Agora, após a caracterização do fenômeno CTT-N/NE, as análises daqueles resultados nos revelam as seguintes constatações:

1. O fenômeno CTT-N/NE está associado à perda da interligação Sudeste/Nordeste com valores de fluxo elevado próximos à sua capacidade nominal, 1000 MW;
2. A Perda da interligação Sudeste /Nordeste causa um déficit de energia na região sul do Nordeste (sul da Bahia) que será suprido pela(s) interligação(ões) remanescente(s), caracterizando o fenômeno CTT-N/NE, até que haja um remanejamento de geração feito pelos reguladores de velocidade e um equilíbrio da tensão no sistema feito pelos equipamentos fornecedores de reativo;
3. O impacto provocado pela perda da interligação Sudeste/Nordeste é mais acentuado nas configurações anteriores à expansão da interligação Norte/Nordeste, Coletora/Sobradinho, tendendo a se reduzir após a entrada em operação desta nova interligação, entretanto o fenômeno continuará existindo.

#### 4.1 – Sensibilidades Relativas à Localização e Tipo do BCSC.

A subestação de Presidente Dutra é a mais indicada para se instalar um banco de compensação série chaveado? Esta compensação chaveada poderá ser uma compensação série fixa? Na tentativa de dirimir tais questionamentos foram feitas ainda simulações nas seguintes condições:

1. Simulou-se uma compensação série fixa em Presidente Dutra do mesmo montante da compensação série chaveada;
2. Transferiu-se a compensação série chaveada de Presidente Dutra para São João do Piauí. Neste caso, o mesmo montante de banco de compensação série chaveado aplicado na linha Presidente Dutra – Boa Esperança, passou a ser aplicado na linha São João do Piauí – Sobradinho, como um incremento da compensação série fixa já dimensionada para esta subestação. Esta hipótese prevê que, na expansão do sistema interligado Norte/Nordeste haverá duas novas linhas chegando em São João do Piauí e, portanto, não haverá possibilidade de diminuição do fluxo passando pela compensação série.

#### 4.2 – Compensação Chaveada versus Compensação Fixa em Presidente Dutra

A implantação de uma compensação fixa em Presidente Dutra provoca um pequeno aumento no fluxo na linha Presidente Dutra – Boa Esperança (cerca de 70 MW), em regime permanente, não sendo causa de preocupações.

Entretanto, na simulação dinâmica com perfil de tensão em Presidente Dutra de 1,040 p.u. e banco fixo em Presidente Dutra, **o sistema ficou instável**. Mostrando que a implantação de um **banco série chaveado** na subestação de presidente Dutra saída para Boa Esperança é a solução mais apropriada para controle da **CTT-N/NE**.

#### 4.3 – Compensação Chaveada em São João do Piauí

O sistema ficou estável com perfil de tensão em Presidente Dutra acima de 1,060 p.u., nas mesmas condições anteriores, embora apresente afundamentos de tensão temporários em Presidente Dutra mais acentuados que no caso em que o BCSC está instalado em Presidente Dutra.

Para um perfil de tensão de 1,040 p.u. em Presidente Dutra o sistema ficou instável, indicando que o controle da **CCT-N/NE** é mais eficaz para a aplicação de um BCSC chaveado em Presidente Dutra.

#### 5.0 - CONCLUSÕES

O fenômeno de **Colapso Transitório de Tensão na Interligação Norte/Nordeste, (CTT-N/NE)**, consiste na perda da linha Serra da Mesa – Correntina, no cenário Sudeste exportador, que provoca uma repentina elevação no fluxo na interligação Norte/Sul (de Serra da Mesa para Imperatriz) e Norte/Nordeste (de Imperatriz para o Nordeste, notadamente na interligação Presidente Dutra – Sobradinho). Este brusco aumento no fluxo, neste tronco de transmissão em 500 kV, exige um elevado suporte de reativo dos controladores de tensão dispostos ao longo deste tronco de transmissão, provocando um afundamento transitório de tensão ao longo da interligação Norte/Nordeste

A solução para o fenômeno CTT-N/NE é a aplicação de uma compensação série chaveada na linha Presidente Dutra – Sobradinho, de 39% da reatância desta Linha quando a tensão em Presidente Dutra sofrer um colapso maior que 15% da tensão operativa, por pelo menos 0,15s. Este banco poderá ser retirado após 2,5 s.

A principal vantagem é poder aumentar o intercâmbio para a região Nordeste de até 590 MW, no cenário Sudeste exportador, ou seja, igualar o nível de intercâmbio para a região Nordeste nos cenários Norte e Sudeste exportador, eliminando as restrições de recebimento de energia pela região Nordeste.

Uma outra vantagem está associada à flexibilidade operativa, permitindo-se operar o sistema com tensão na barra de Presidente Dutra, acima de 1,040 p.u., e transferindo até 3250 MW para o Nordeste em qualquer cenário operativo.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – C. Gama, V. Rodrigues, “Colapso de tensão: Uma abordagem sob Enfoque Dinâmico e uma Proposta de Solução Usando Compensação Série Controlada”, XVI SNPTEE
- [2] – CCPE/CTET – 042.2002. “Aplicação de Compensação Série Chaveada para Evitar Colapso de Tensão na Interligação Norte/Nordeste”