



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

**COMPARAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE SOLUÇÕES PARA COLAPSO TRANSITÓRIO DE TENSÃO
NA INTERLIGAÇÃO NORTE/NORDESTE**

Richard Lester Damas Paixão *

José Luiz Scavassa

Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira

**MARTE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)**

ELETRONORTE

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma comparação técnica e econômica de soluções para o problema do colapso transitório de tensão que pode ocorrer na interligação Norte/Nordeste, na perda da interligação Sudeste/Nordeste, quando no cenário de geração Sudeste exportador. Estas soluções dão uma maior capacidade de transmissão de energia para a região Nordeste do Brasil eliminando algumas restrições operativas. Após a análise da viabilidade das possíveis soluções são analisados os custos destas.

PALAVRAS-CHAVE

Colapso de tensão, FACTS, Intercâmbio, Custo.

1.0 - INTRODUÇÃO

O estudo apresentado no relatório CCPE/CTET – 005.2002 (3) conclui que a região Nordeste deve receber, no cenário de geração Sudeste exportador (região Nordeste recebendo energia da região Norte e Sudeste), 590 MW a menos em relação ao cenário Norte exportador (região Norte exportando energia para o Sudeste e o Nordeste), quando recebe 3250 MW. Esta restrição de transmissão de energia para a região Nordeste deve-se ao fato de que no cenário de geração Sudeste exportador, a emergência da Linha em 500 kV Serra da Mesa – Correntina, provoca colapso de tensão na interligação Norte/Nordeste.

De fato, em tal condição de operação, a interligação Sudeste/Nordeste (Linha 500 kV Serra da Mesa – Correntina) transporta cerca de 1000 MW para região Nordeste. Assim, simulações apontam que a perda desta interligação provoca um repentino e elevado aumento no fluxo da interligação Norte/Sul e Norte/Nordeste, causando um colapso transitório de tensão, nesta última interligação, principalmente nas subestações de Presidente Dutra, Boa Esperança e Teresina. Esse aumento no fluxo de potência exige do sistema um suporte adicional de potência reativa, principalmente no tronco em 500 kV que vai de Presidente Dutra a Sobradinho, suporte este que não ocorre, causando um severo e transitório afundamento de tensão nas subestações próximas desta interligação. Esta situação é seguida de perda de estabilidade eletromecânica devido ao tempo insuficiente para que os reguladores das máquinas se ajustem ao novo ponto de operação do sistema. Esse problema, que ocorre após a entrada em operação da interligação Sudeste/Nordeste, limita o transporte de energia na interligação entre as regiões Norte e Nordeste. O esquema das interligações entre as regiões Norte, Nordeste e Sudeste é mostrada na Figura 1.

*Marte Engenharia – SCN Qd. 06 Cj. A Bloco A sala 707 – Asa Norte – CEP 70718-900 - Brasília - DF - BRASIL
Tel.: (061) 328-5888 - e-mail: richard@marte-df.com.br

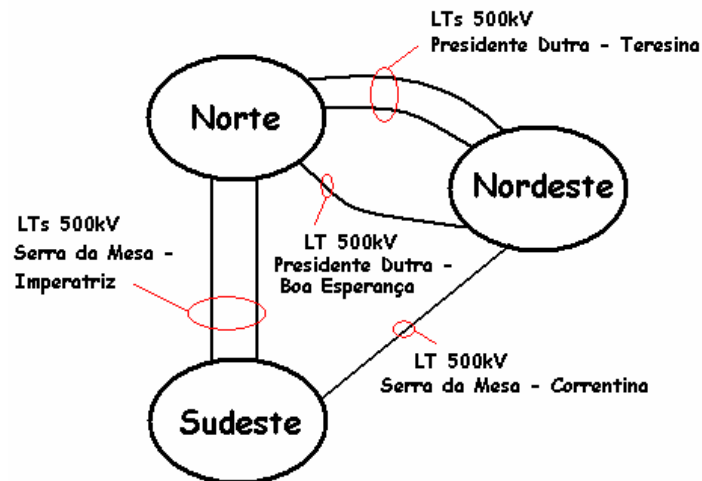


FIGURA 1 – Interligações entre as regiões Norte, Nordeste e Sudeste.

O colapso transitório de tensão ocorre em linhas de interligações devido a um desequilíbrio carga-geração em um dos sistemas, seguido por uma solicitação de suporte de reativos insuficiente (5). Ainda de acordo com (5), toda interligação possui um elo fraco que não está dimensionado para um aumento repentino e temporário de fluxo e assim sujeito à ocorrência de colapso de tensão. No caso em questão, o desequilíbrio ocorre na região Nordeste após a perda da interligação Sudeste/Nordeste, e o elo fraco seria a Linha 500 kV Presidente Dutra – Boa Esperança.

O sistema passa a suportar a perda da Linha 500 kV Serra da Mesa – Correntina, se mantida a tensão na SE Presidente Dutra igual ou superior a 1,08 p.u., ou seja, próximo ao seu limite superior, o que tira a flexibilidade de operação do sistema. A Figura 2 mostra a tensão nas subestações de 500 kV de Presidente Dutra, Boa Esperança, São João do Piauí e Teresina após a ocorrência da mencionada contingência, para tensão de operação da SE Presidente Dutra 500 kV de 1,08 p.u. onde o sistema é estável. A Figura 3 mostra as mesmas tensões com uma tensão operativa de 1,06 p.u. na SE Presidente Dutra 500 kV onde sistema perde estabilidade após a ocorrência da mesma contingência.

Assim o colapso transitório de tensão limita o transporte de energia para a região Nordeste dentro deste contexto. O presente trabalho apresenta uma avaliação técnica e econômica a respeito do ganho de transmissão obtido para a região Nordeste, através de algumas soluções analisada como: a utilização da compensação série chaveada na LT 500 kV Presidente Dutra – Boa Esperança, conforme detalhado no relatório CCPE/CTET – 042.2002 (1), e a utilização de um compensador estático na SE Presidente Dutra.

Em todas as simulações deste trabalho é considerado o ano base de 2005 com a geração disponível na UHE Tucuruí em 2006.

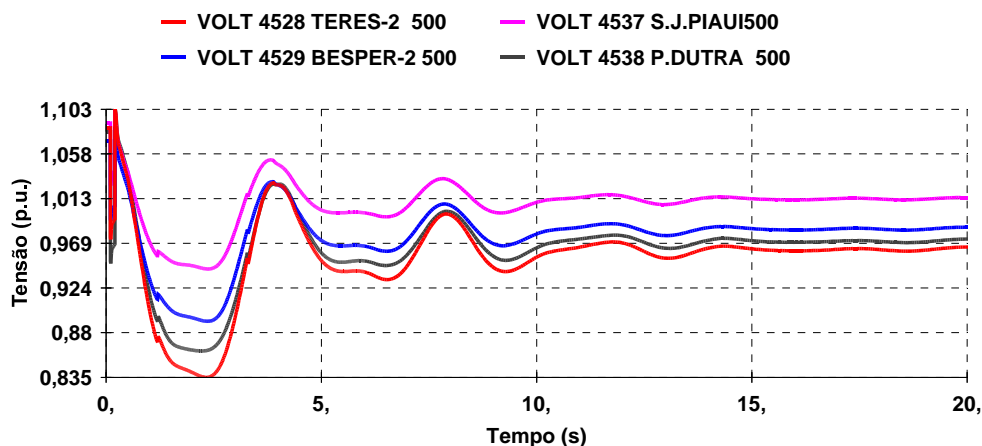


FIGURA 2 – Tensões na Interligação Norte/Nordeste (sistema estável).

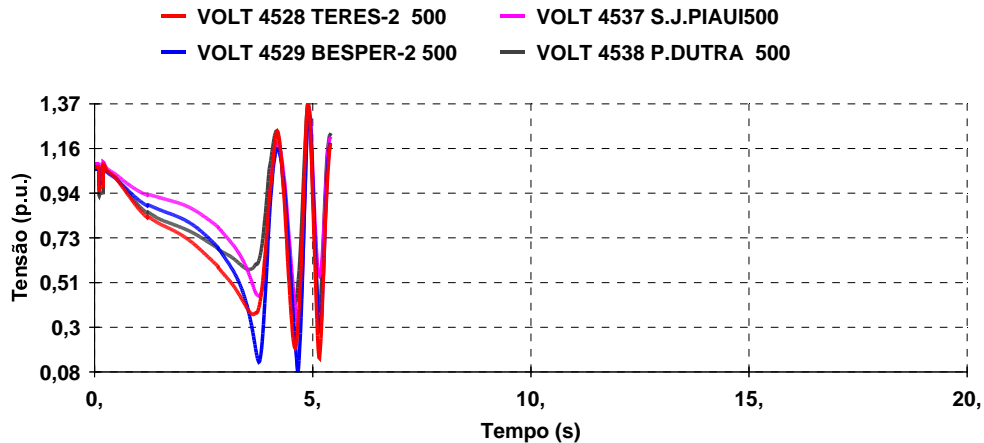


FIGURA 3 – Tensões na Interligação Norte/Nordeste (sistema instável).

2.0 - COMPENSAÇÃO SÉRIE CHAVEADA

Uma proposta para resolver o problema do colapso transitório de tensão que pode ocorrer na interligação Norte/Nordeste é apresentada em (1), ou seja, o chaveamento de um banco de capacitores série na Linha 500 kV Presidente Dutra – Boa Esperança, alguns segundos após a abertura da Linha 500 kV Serra da Mesa – Correntina, o qual deve ficar ligado por 2,5 segundos, o que fornece a potência reativa necessária para que os reguladores das máquinas tenham tempo de se ajustarem conforme a nova condição do sistema. Trata-se de uma compensação série chaveada de 39% da reatância da Linha 500 kV Presidente Dutra – Boa Esperança ($X_{csc} = -1,036\%$), 26 Mvar por fase (total de 78 Mvar), corrente nominal de 1000 A e capacidade de sobrecarga de 2,0 p.u.. O banco de capacitores série deverá ser chaveado quando o colapso de tensão na SE Presidente Dutra 500 kV for maior que 15% da tensão operativa por 0,15 segundo.

Com a utilização dessa compensação série chaveada, é possível transmitir 3250 MW no cenário de geração Sudeste exportador, da mesma maneira que no cenário Norte exportador, sem a restrição de tensão igual ou superior a 1,08 p.u. na SE Presidente Dutra 500kV. O sistema passa a ser estável com uma tensão operativa de 1,04 p.u. na SE Presidente Dutra, o que possibilita uma maior flexibilidade no controle do perfil de tensão. Isso significa um ganho de 590 MW na capacidade de transmissão de energia para a região Nordeste. A Figura 4 mostra a tensão nas subestações de 500 kV de Presidente Dutra, Boa Esperança, São João do Piauí e Teresina após a ocorrência da mencionada contingência, para tensão de operação da SE Presidente Dutra 500 kV de 1,08 p.u. e a Figura 5 para uma tensão operativa de 1,04 p.u.

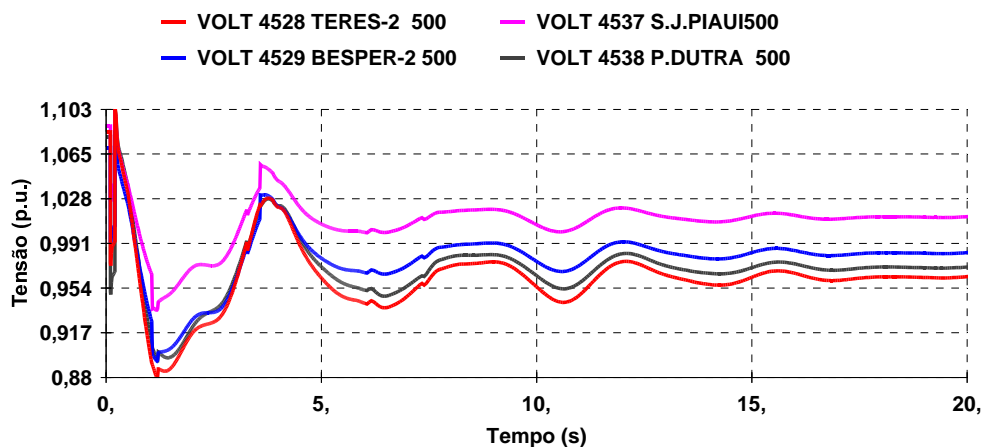


FIGURA 4 – Tensões na Interligação Norte/Nordeste.

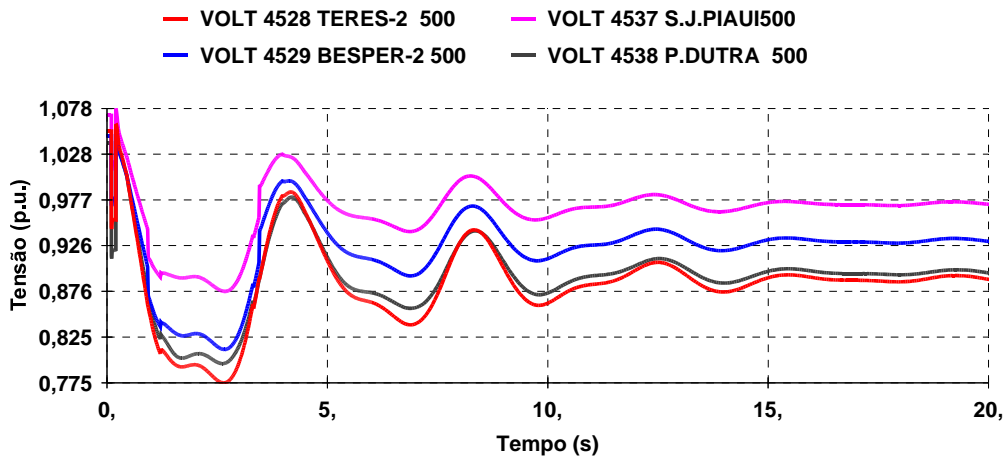


FIGURA 5 – Tensões na Interligação Norte/Nordeste.

É considerado que as proteções contra subtensões não atuam para colapsos de tensão em torno de 0,8 p.u., porém na instalação deste equipamento, um estudo detalhado deve ser realizado acerca destas proteções, o que pode tornar necessário alguns ajustes na compensação série.

O grau de compensação introduzida pela compensação série chaveada é condicionado à capacidade de transmissão da Linha 500 kV Presidente Dutra – Boa Esperança, uma vez que, além de fornecer potência reativa, provoca um aumento no fluxo de potência nesta linha. A Figura 6 mostra a geração de potência reativa da compensação série durante o período de 2,5 segundos em que ela fica chaveada no caso com tensão inicial na SE Presidente Dutra 500 kV igual a 1,04 p.u.

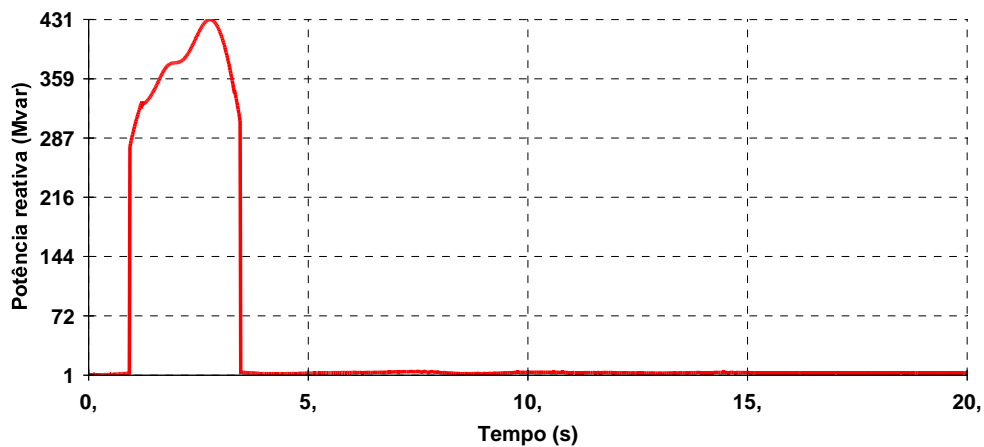


FIGURA 6 – Geração de potência reativa pelo compensador série (chaveado por 2,5 s).

3.0 - COMPENSADOR ESTÁTICO

Uma outra solução possível para o colapso transitório de tensão é a utilização de um compensador estático estrategicamente instalado no sistema. Para definição desse compensador, foi utilizada a mesma base de dados usada para a definição da compensação série chaveada, inclusive o mesmo ponto de operação. Buscou-se então, com uma tensão operativa mínima de 1,04 p.u. na SE Presidente Dutra 500 kV, um equipamento com a menor capacidade de geração de reativo possível, que após a contingência da Linha 500 kV Serra da Mesa – Correntina, o sistema permanecesse estável. Da mesma maneira que na compensação série chaveada considerou-se que as proteções não atuariam para colapsos de tensão em torno de 0,8 p.u.

Para se definir a melhor localização deste do compensador estático, são realizadas simulações com o mesmo localizado em diferentes subestações, sendo elas: Presidente Dutra, Boa Esperança e Teresina. Os resultados das simulações mostram que a melhor localização deste é na subestação de Presidente Dutra.

As simulações indicam que para a situação analisada é necessário um compensador estático da ordem de 600 Mvar na SE Presidente Dutra 500 kV. É considerado que este compensador deve ser instalado diretamente na barra de 500 kV, pois caso contrário, há necessidade de reforço na transformação 500/230 kV na referida subestação.

A Figura 7 mostra a tensão nas subestações de 500 kV de Presidente Dutra, Boa Esperança, São João do Piauí e Teresina após a perda da Linha 500 kV Serra da Mesa – Correntina, para tensão de operação da SE Presidente Dutra 500 kV de 1,04 p.u.

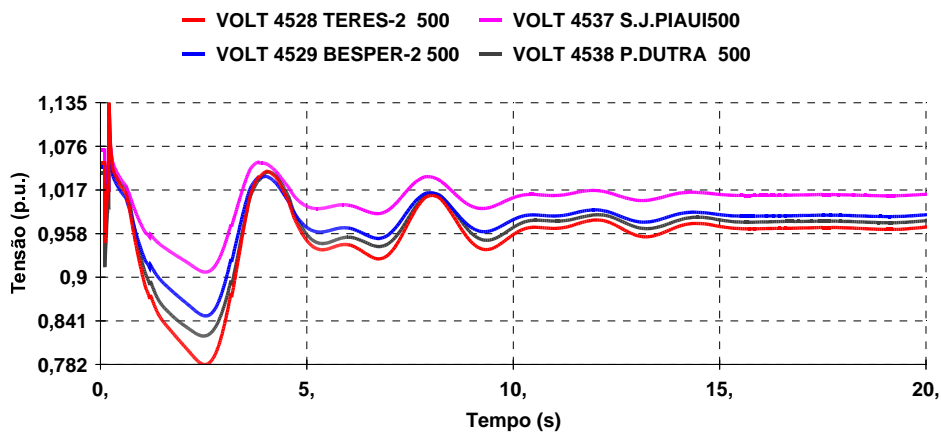


FIGURA 7 – Tensões na Interligação Norte/Nordeste.

Para que o compensador estático responda de forma satisfatória, após a perda da interligação Sudeste/Nordeste, evitando severos afundamentos de tensão, é necessário em regime normal que ele opere próximo à sua faixa central, para que durante a emergência ele tenha capacidade de fornecer a potência reativa exigida pelo sistema. A Figura 8 mostra a geração de potência reativa do compensador estático, onde se pode observar que após a emergência é utilizada toda a capacidade do compensador.

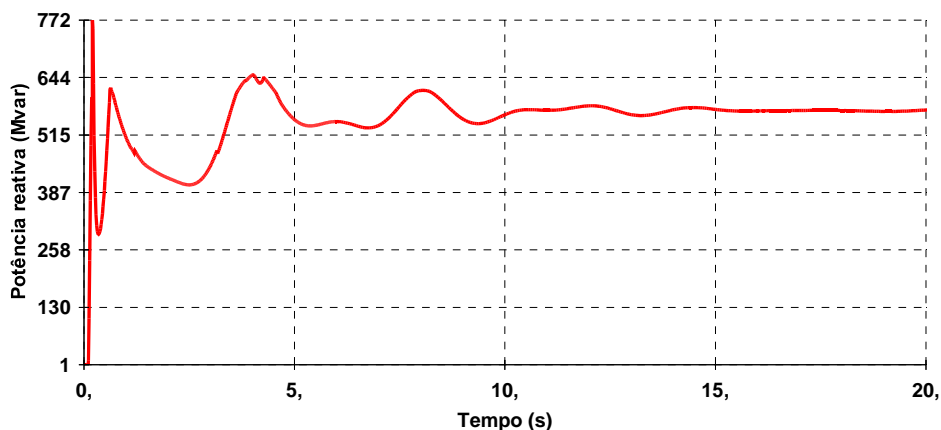


Figura 8 – Geração de potência reativa pelo compensador estático.

4.0 - OUTRAS POSSIBILIDADES

São consideradas outras possibilidades para atingir o ganho de transmissão de 590 MW, no cenário Sudeste exportador, que se obtém com a utilização da compensação série chaveada ou com a compensação estática. Uma das possibilidades é a utilização de uma compensação série fixa, já analisada em (1), que apresenta um

desempenho inferior à compensação série chaveada, uma vez que o sistema fica instável para tensão de 1,04 p.u. na SE Presidente Dutra 500 kV. Outra possibilidade, ao invés de buscar alternativas para o ganho na capacidade de transmissão para o Nordeste, é a instalação de uma geração térmica local de 590 MW neste subsistema e não utilizar nenhum tipo de equipamento de compensação para aumentar a capacidade de transmissão. Porém o custo de instalação de uma unidade térmica é elevado em relação às outras soluções, o que torna esta possibilidade inviável. A entrada de reforços nas interligações pode eliminar o problema, porém devido aos custos de longas linhas de transmissão em 500 kV, isto somente deverá ocorrer quando a necessidade de transmissão o justificar.

5.0 - COMPARAÇÃO DE ALTERNATIVAS

As simulações apontam que tanto a compensação série chaveada quanto o compensador estático solucionam o problema do colapso transitório de tensão evitando que o sistema perca estabilidade eletromecânica.

A compensação série mostra-se mais eficiente no sentido de ser necessário um equipamento de menor potência (78 Mvar) para manter o sistema estável em relação ao compensador estático de 600 Mvar, o que é um valor muito alto para este equipamento. Esta diferença deve-se ao fato de que a potência reativa fornecida pelo compensador série ser diretamente proporcional ao quadrado da corrente que o atravessa, o que não ocorre com o compensador estático em derivação. Esta característica proporcionou a utilização de um equipamento de potência menor que o compensador estático.

Por outro lado, com a utilização do compensador estático, é possível obter um perfil de tensão melhor em regime permanente de emergência após a perda da interligação Sudeste/Nordeste, pois este, diferentemente da compensação série chaveada, continua disponível no sistema e fornecendo potência reativa após a estabilização deste, enquanto que a compensação série chaveada só fornece potência reativa durante os 2,5 segundos em que fica ligada.

A experiência mostra que o custo do compensador estático é da ordem de US\$ 60,00/kvar, e o da compensação série chaveada, baseado em (4), é da ordem de US\$ 55,00/kvar. Assim, um compensador estático de 600 Mvar custa em torno de US\$ 36 milhões e a compensação série chaveada, de 78 Mvar, US\$ 4,29 milhões, conforme mostrado na Tabela 1. Ou seja, a compensação série chaveada apresenta um custo muito inferior ao do compensador estático, diferença esta que não é alterada por alguma variação no custo por kvar destes equipamentos.

TABELA 1 – Custo do compensador série x compensador estático

Equipamento	Valor (US\$/kvar)	Valor total (US\$ x 1000)	%
Compensador série	55,00	4.290,00	100
Compensador estático	60,00	36.000,00	839

Uma outra vantagem para a utilização da compensação série chaveada é que, como ela somente entrará em operação em caso de colapso de tensão, ficando chaveada por 2,5 segundos, pode-se então utilizar sua capacidade de sobrecarga diminuindo ainda mais seu custo. Sendo que as simulações apontam que o fluxo máximo de potência que atravessa o compensador série é da ordem de 1700 MW a capacidade de sobrecarga do equipamento deve ser de aproximadamente 2,0 p.u.

6.0 - CONCLUSÃO

A perda da interligação Sudeste/Nordeste (Linha 500kV Serra da Mesa – Correntina), no cenário de geração Sudeste exportador, provoca um aumento no fluxo de potência nas interligações Norte/Sul e Norte/Nordeste, exigindo um suporte adicional de potência reativa nestas interligações. Isso provoca um colapso transitório de tensão na interligação Norte/Nordeste, devido à incapacidade do sistema em fornecer, temporariamente, o reativo necessário para que os reguladores das máquinas tenham tempo de se ajustarem ao novo ponto de operação. Esse problema ocorre principalmente no tronco, em 500 kV, que vai da SE Presidente Dutra até a SE Sobradinho.

Duas soluções para o problema do colapso transitório de tensão foram analisadas: a primeira é a utilização de uma compensação série chaveada na Linha 500 kV Presidente Dutra – Boa Esperança, de 39% da reatância desta; e a segunda é a utilização de um compensador estático na SE Presidente Dutra 500 kV com capacidade de fornecer 600 Mvar.

As simulações apontaram que tanto o compensador série quanto o estático solucionam o problema do colapso de tensão transitório permitindo à região Nordeste a importação de 3250 MW no cenário de geração Sudeste exportador, ou seja, um ganho de transmissão de 590 MW. Também as duas soluções trazem a vantagem do sistema poder operar, nestas condições, com uma tensão de 1,04 p.u. na SE Presidente Dutra 500 kV, eliminando a restrição de que nesta subestação a tensão mínima devesse ser de 1,08 p.u., dando, assim, mais flexibilidade de operação ao sistema.

Tendo-se em vista que os dois equipamentos solucionam o problema do colapso transitório de tensão na interligação Norte/Nordeste, pode-se concluir, então, que é mais indicada a utilização da compensação série chaveada, pois é o equipamento de menor custo.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SCAVASSA, J. L., PINTO, W. S., HONDA, J. T. Utilização da Compensação Série Controlada para Evitar o Colapso de Tensão Dinâmica no Subsistema Interligado Norte/Nordeste. X ERLAC, 18 a 22 de maio de 2003. Puerto Iguazú, Argentina.
- (2) CCPE/CTET – 042.2002. Aplicação da Compensação Série Chaveada para Evitar o Colapso Transitório de Tensão na Interligação Norte/Nordeste.
- (3) CCPE/CTET – 005.2002. Expansão da Interligação Norte/Nordeste Etapa 2 – Análise em regime permanente e dinâmico.
- (4) ELETROBRÁS. Referências de Custos LTs e SEs de AT e EAT. Junho de 2002.
- (5) GAMA, C., RODRIGUES, V. Colapso de Tensão: Uma Abordagem sob Enfoque Dinâmico e uma Proposta de Solução Usando Compensação Série Controlada. VII SEPOPE, 19 a 23 de maio de 2002. Brasília-DF.