



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

**SISTEMÁTICA OPERACIONAL DE CONTROLE DA POTÊNCIA REATIVA DAS USINAS DE ANGRA 1 E  
ANGRA 2 DA CENTRAL NUCLEAR ALMTE. ÁLVARO ALBERTO**

<b>Leandro D. Penna *</b>	<b>Arthur da Silva S. Rosa</b>	<b>José R. Bonato Marinho</b>	<b>Francisco C.S. da Silva</b>
<b>ONS</b>	<b>ONS</b>	<b>ELETRONUCLEAR</b>	<b>PETROBRÁS**</b>

**RESUMO**

Este artigo propõe uma nova sistemática de operação para as usinas Angra 1 e Angra 2, com relação ao controle da potência reativa disponibilizada para área Rio de Janeiro/Espírito Santo. São apresentadas ações que visam minimizar a circulação de potência reativa entre as duas plantas, principalmente nos períodos de carga leve e mínima. O resultado deste trabalho contribui para redução da necessidade de abertura de linhas de transmissão, conseqüentemente aumentando a confiabilidade do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE**

Controle de Tensão – Controle Coordenado de Tensão – Controle Secundário de Tensão – Circulação de Potência Reativa

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Para operar adequadamente, um sistema elétrico de potência depende do bom desempenho de algumas variáveis de controle (1). Dentre essas variáveis, destaca-se a manutenção de níveis adequados de tensão em todas as áreas do sistema, ou seja, o controle de tensão.

Nos últimos anos, a área Rio de Janeiro – Espírito Santo (RJ/ES) vem aumentando sua capacidade de atendimento através de novas linhas de transmissão e por meio da inserção de novas usinas térmicas. Em contrapartida, a área tem apresentado dificuldades na manutenção dos níveis adequados de tensão, principalmente nos períodos de carga leve e mínima (2). Nesses períodos tem-se verificado uma circulação de potência reativa entre as usinas de Angra 1 e Angra 2.

Esse trabalho tem como objetivo propor uma nova forma de operação para as usinas de Angra 1 e Angra 2, com relação ao controle da potência reativa disponibilizada para a área RJ/ES. Dessa forma, é esperada uma melhoria no controle de tensão dessa área nos períodos de carga leve e mínima, com a possibilidade de reduzir a necessidade de abertura de linhas de transmissão, aumentando, assim, a confiabilidade do sistema.

Os resultados encontrados indicam que em médio prazo deve ser instalado um Controle Secundário de Tensão nas usinas de Angra 1 e Angra 2. Estudos consubstanciando este tipo de controle coordenado de tensão foram abordados recentemente em (3). Um estudo sobre o comportamento de uma malha de controle secundário de

\*Rua da Quitanda 196/13º andar, Centro – CEP 20091-005 Rio de Janeiro – RJ - BRASIL

Tel.: (21) 2203 9552 – Fax (21) 2203 9413 – e-mail: [penna@ons.org.br](mailto:penna@ons.org.br)

\*\* Participou como funcionário da Eletronuclear na identificação do problema

tensão aplicado às usinas de Angra, considerando um equivalente da representação completa do Sistema Interligado Nacional, está sendo realizado em conjunto com a ELETRONUCLEAR, a ELETROBRÁS e o CEPEL.

## 2.0 - O SISTEMA DE ATENDIMENTO À ÁREA RJ/ES

O sistema de transmissão que supre a área RJ/ES é constituído por dois troncos principais, sendo um em 500 kV e outro em 345 kV. O sistema de 500 kV interliga a área ao sistema de escoamento da usina de Itaipu e ao sistema de transmissão do Estado de São Paulo através da subestação de Cachoeira Paulista, próxima a divisa de São Paulo e Rio de Janeiro. O sistema de 345 kV interliga a área RJ/ES às usinas do Rio Grande através da subestação de Adrianópolis, de onde segue para atender Jacarepaguá e Campos, até alcançar a subestação de Vitória, no Espírito Santo.

A partir da subestação de Cachoeira Paulista partem 4 circuitos, sendo um para a subestação de Angra dos Reis no litoral sul e três circuitos para a subestação de Adrianópolis na baixada fluminense. De Angra dos Reis saem mais dois circuitos de 500 kV para atender as subestações terminais de São José e Grajaú, que são interligadas na subestação de Adrianópolis. A partir das subestações de Adrianópolis, Grajaú e São José é realizada a distribuição de energia aos centros de carga do Estado do Rio de Janeiro.

O sistema de 500 kV é responsável por cerca de 75% da potência transmitida à área. Já o sistema de 345 kV responde por cerca de 10% da potência transmitida à área. O complemento do suprimento é realizado pela geração local, sendo constituído por usinas hidrelétricas e térmicas. O diagrama unifilar do sistema de atendimento à área RJ/ES é apresentado na Figura 1.

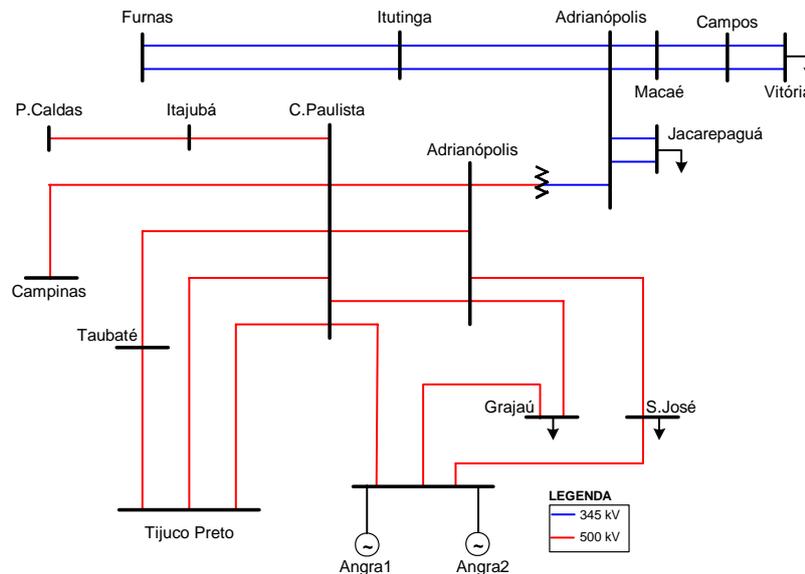


FIGURA 1: Diagrama unifilar do sistema de atendimento à área RJ/ES

## 3.0 - IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E PROPOSTAS DE SOLUÇÕES

O problema no controle da potência reativa das unidades de nucleares de Angra 1 e 2, que motivou a escolha deste tema, foi uma constatação em tempo real de uma assimetria em termos das potências reativas dessas usinas. Na maior parte do tempo, a usina Angra 1 operava fornecendo potência reativa e a usina Angra 2 operava absorvendo potência reativa do sistema.

Como exemplo do modo operacional descrito acima, o comportamento da potência reativa das usinas de Angra, referentes à primeira quinzena de Julho de 2002, é apresentado na Figura 2. É possível verificar que a usina de Angra 1 fornece ao sistema, valores da ordem de 140 Mvar, enquanto a usina de Angra 2 absorve do sistema valores da ordem de 200 Mvar. Isto provoca uma circulação de potência reativa entre as duas plantas, o que não contribui efetivamente para o controle de tensão da área RJ/ES.

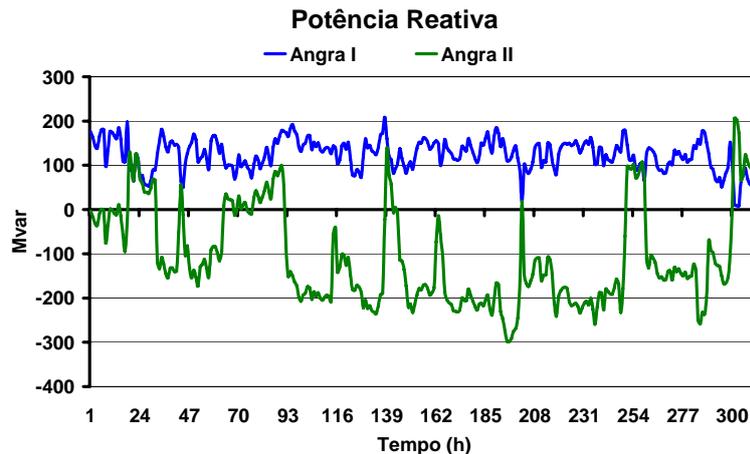


FIGURA 2: Potência reativa da UTN Angra 1 e da UTN Angra 2

Esse fato ocorre em função da forma como essas usinas executam as funções de absorção ou de geração de potência reativa. A usina de Angra 1 executa o controle de sua potência reativa por meio da tensão de excitação, enquanto que a usina de Angra 2 utiliza o LTC do transformador elevador para controlar a potência reativa disponibilizada para o sistema. Essas duas ações são independentes, o que conduz a um desequilíbrio entre os tapes dos transformadores elevadores e entre as tensões de excitação das duas unidades. Tal desequilíbrio provoca uma circulação de potência reativa entre as duas usinas e conseqüentemente uma menor potência reativa disponibilizada para o sistema.

Para solucionar esse problema, procurou-se identificar a melhor maneira de operar as duas usinas, tendo como foco principal o controle de potência reativa disponibilizada para o sistema. Foram simuladas diversas condições de carga tentando encontrar uma posição para o tape que atendesse a três pontos: i) minimizar a circulação de potência reativa entre as usinas; ii) maximizar as margens de potência reativa para o sistema, durante as condições de carga leve e mínima; iii) fornecer um nível de potência reativa adequada para as condições de carga pesada e média.

Os resultados mostraram que a utilização do LTC do transformador elevador da usina de Angra 2, para controlar a potência reativa dessa unidade contribuía efetivamente para a circulação indesejável de potência reativa entre as plantas. Isso pôde ser comprovado através de simulações mantendo a tensão de excitação das usinas Angra 1 e Angra 2 em 1.00 pu, o tape do transformador elevador da usina Angra 1 em 1.075 pu e variando o tape do transformador elevador da usina Angra 2. Esses resultados podem ser conferidos na Figura 3.

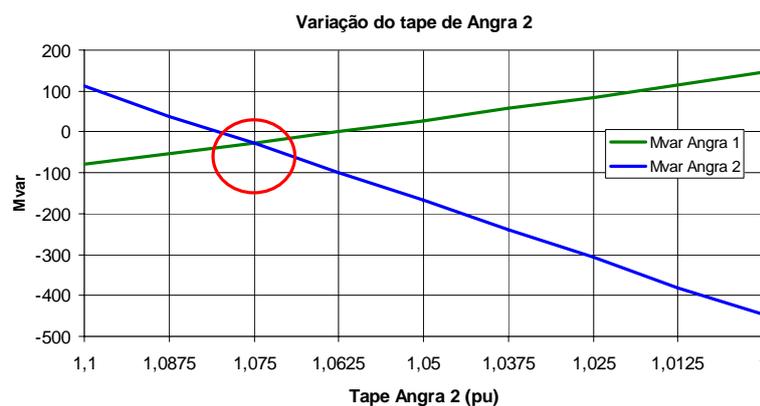


FIGURA 3: Variação do tape da usina de Angra 2

Verificou-se que a circulação de potência reativa entre as duas plantas foi minimizada quando o tape do transformador elevador de Angra 2, que funciona como LTC em modo manual, alcançou 1.075 pu, mesmo valor do tape da usina de Angra 1 na simulação. Isto indica a necessidade de fixar o LTC do transformador elevador da usina de Angra 2 e de controlar a potência reativa utilizando a excitação dessa unidade. O passo seguinte foi identificar um ajuste ótimo para fixar os tapes dos transformadores elevadores da usina Angra 1, que não possui

LTC e opera com o tape fixado na posição correspondente a 1.100 pu, e da usina Angra 2 de forma contemplar tanto as situações de carga leve e mínima quanto as condições de carga pesada e média.

Foram analisados diversos valores de tape para os transformadores elevadores das usinas de Angra 1 e Angra 2. O ajuste que se mostrou mais promissor foi o de 1.075 pu, pois apresentou uma melhor performance com relação à faixa de potência reativa total disponibilizada para o sistema (Mvar equivalente). Isso pôde ser verificado variando a tensão de excitação das máquinas de Angra 1 e Angra 2. Considerou-se três situações diferentes de ajuste dos transformadores elevadores dessas usinas: 1.100 pu, 1.075 pu e 1.050 pu. Os resultados são mostrados na Figura 4.

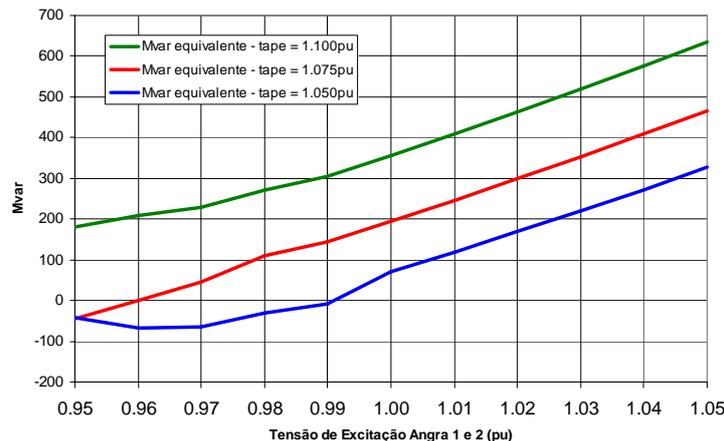


FIGURA 4: Potência reativa total disponibilizada para sistema

Observa-se que ajustando o valor de tape em 1.100 pu, o Complexo de Angra foi capaz de fornecer potência reativa para o sistema, mesmo para condições onde a tensão de excitação das máquinas foi ajustada no valor mínimo. Com os valores de tape em 1.075 pu e 1.050 pu, o Complexo de Angra foi capaz de fornecer e de absorver potência reativa do sistema. Entretanto o caso utilizando o tape ajustado em 1.075 pu apresentou respostas mais rápidas e um valor maior para a potência reativa fornecida para o sistema, aproximadamente 450 Mvar (curva vermelha). Os resultados dos estudos mostraram que duas ações deveriam ser tomadas:

- i. Alterar a filosofia de controle de tensão da usina de Angra 2, ou seja, o controle da potência reativa fornecida ou absorvida do sistema, que antes era controlado pelo LTC do transformador elevador, passaria a ser realizado por meio da tensão de excitação da máquina de acordo com o que é efetuado na usina de Angra 1, reduzindo a circulação de reativo entre as duas plantas.
- ii. Fixar o tape do transformador elevador da usina de Angra 2 na posição correspondente a 1.075 pu ou 537.50 kV, e reposicionar o tape transformador elevador da usina de Angra 1 para a mesma posição utilizada na usina de Angra 2.

#### 4.0 - VERIFICAÇÃO DA EFETIVIDADE DAS PROPOSTAS

Após a implementação das mudanças sugeridas no item anterior, alguns testes de campo foram realizados para verificar a efetividade das propostas. Os resultados indicaram que o controle da potência reativa por meio da tensão de excitação das máquinas não foi tão eficiente quanto se esperava, uma vez que a circulação de potência reativa entre as usinas, embora reduzida, não foi minimizada. Isso pode ser comprovado através da variação da potência reativa entre as usinas Angra 1 e Angra 2 e o montante de potência reativa disponibilizado para o sistema, (Mvar Equivalente) durante a realização de um teste de campo, mostrado na Figura 5.

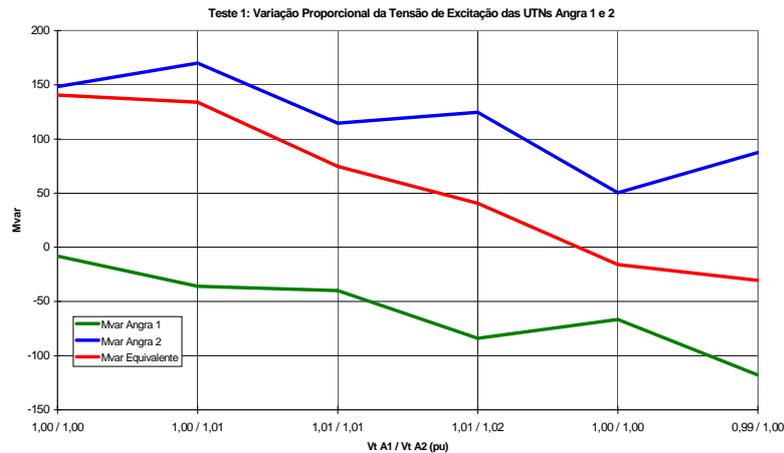


FIGURA 5: Variação proporcional da tensão de excitação

Nestes testes foi possível verificar o problema de circulação de potência reativa entre as usinas (curva vermelha), pois, por exemplo, enquanto a usina de Angra 1 está absorvendo aproximadamente 66 Mvar a usina de Angra 2 está fornecendo 50 Mvar, sendo disponibilizado para o sistema somente de 16 Mvar para uma tensão de excitação de 1.0 pu nas unidades de Angra 1 e Angra 2.

Foi verificado que apesar das usinas estarem operando com os tapes dos transformadores elevadores na mesma posição, os ajustes na tensão de excitação não eram automáticos nem simultâneos e dependiam da comunicação e coordenação entre as duas plantas, o que dificultava o controle da potência reativa disponibilizada para o sistema. Dessa forma, viu-se a necessidade de testar novas alternativas no sentido de minimizar a circulação de potência reativa entre as usinas de Angra 1 e de Angra 2.

Assim foi realizado um novo teste de campo com alteração proporcionalmente, em degraus, na potência reativa das unidades de Angra 1 e Angra 2. A variação da potência reativa das usinas de Angra 1 e Angra 2, o montante de potência reativa disponibilizado para o sistema (Mvar equivalente) e a tensão de excitação das usinas durante esse teste são apresentadas na Figura 6.

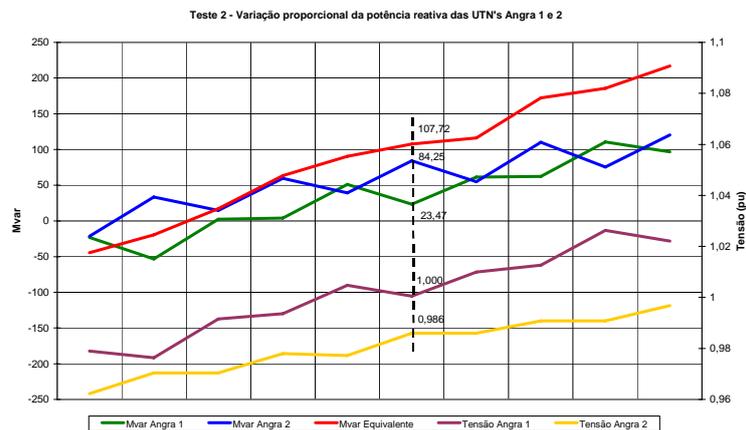


FIGURA 6: Variação proporcional da potência reativa

Pode ser comprovado que a variação proporcional e em degraus da potência reativa das unidades de Angra 1 e Angra 2 solucionou o problema de circulação de reativos entre as usinas, pois como destacado na figura 6, as usinas de Angra 1 e de Angra 2 estão fornecendo 23.47 Mvar e 84.25 Mvar respectivamente, sendo disponibilizado para o sistema um montante de 107.72 Mvar, para uma tensão terminal em Angra 1 de 1.000 pu e em Angra 2 de 0.986 pu. Entretanto verificou-se uma redução na capacidade total das plantas de fornecer ou de absorver potência reativa do sistema, uma vez que o montante de potência reativa disponível situou-se na faixa de - 45 Mvar a 217 Mvar aproximadamente.

Em função dos resultados obtidos com o segundo teste de campo, foi executado um terceiro teste, desta vez variando a potência reativa das usinas, numa proporção de 1/3 para Angra 1 e 2/3 para Angra 2, ou seja, a usina de Angra 2 fornecendo o dobro da potência reativa fornecida pela usina de Angra 1. A variação da potência reativa das usinas de Angra 1 e Angra 2, o montante de potência reativa disponibilizado para o sistema (Mvar equivalente) e a variação da tensão de excitação das usinas são mostrados na Figura 7.

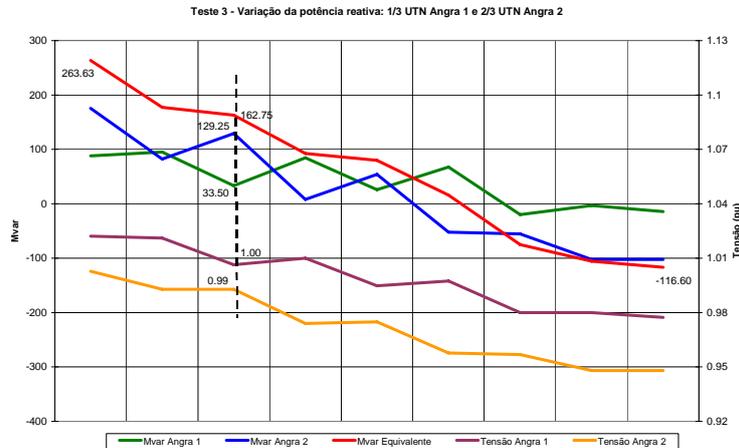


FIGURA 7: Variação da potência reativa: - 1/3 UTN Angra 1 e 2/3 UTN Angra 2

Pode ser observado que a variação da potência reativa das usinas de Angra 1 e Angra 2 na proporção de 1/3 para Angra 1 e 2/3 Angra 2, também resolveu o problema de circulação de reativo entre as usinas, pois como destacado, as usinas de Angra 1 e Angra 2 estão fornecendo 33.5 Mvar e 129.25 Mvar respectivamente, sendo disponibilizado para o sistema um montante de 162.75 Mvar, para uma tensão de excitação em Angra 1 de 1.00 pu e em Angra 2 de 0.99. Além disso, o montante total de potência reativa fornecida ou absorvida do sistema foi bem maior do que o teste anterior, situando-se na faixa entre -116.60 e 263.63 Mvar.

Os testes também indicaram a necessidade de alterar a estratégia de controle de potência reativa em tempo real, que até então era efetuada de maneira independente para as usinas de Angra 1 e Angra 2 e de acordo com os resultados, deveriam ser efetuadas de forma coordenada entre as duas usinas de forma produzir um resultado final mais eficaz.

Com isso, ficou acertado que o controle da potência reativa da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto será efetuado em degraus, até atingir o montante de potência reativa solicitado pelo ONS (COSR-SE) para atender o sistema. Este contato será efetuado com uma das usinas, no caso Angra 2, que efetuará a coordenação das ações em conjunto com a usina de Angra 1.

## 5.0 – CONCLUSÕES

O trabalho procurou minimizar as dificuldades de controle de tensão da área Rio de Janeiro – Espírito Santo notadamente nos períodos de carga leve e mínima. Desta forma, buscou uma melhor forma de operação para as usinas de Angra 1 e Angra 2 com o objetivo de melhorar o controle de potência reativa disponibilizada para a área.

Os estudos realizados indicaram a necessidade de alterar a filosofia de controle de tensão da usina de Angra 2, ou seja, o controle da potência reativa fornecida ou absorvida do sistema, que antes era controlado pelo LTC do transformador elevador, passará a ser realizado por meio da tensão de excitação da máquina de acordo com o que é efetuado na usina de Angra 1, o que permitirá a redução da circulação de reativo entre as duas plantas. Também foi verificado a necessidade de fixar o tape do transformador elevador da usina de Angra 2, que funcionava com LTC no modo manual e de ajustar o tape transformador elevador da usina de Angra 1 com a respectiva posição do tape da usina de Angra 2 em 1.075 pu ou 537.50 kV.

Entretanto, os testes realizados em campo mostraram que a melhor forma de evitar a circulação de potência reativa entre as usinas de Angra 1 e Angra 2 e ao mesmo tempo, maximizar a capacidade total das plantas em fornecer ou absorver reativo é controlando a potência reativa de forma proporcional e em degraus, sendo 1/3 para Angra 1 e 2/3 Angra 2. Assim, a usina de Angra 2 fornece o dobro da potência reativa fornecida pela usina de Angra 1.

Foi alterada também a estratégia de controle de potência reativa em tempo real, até então realizada de forma independente entre as usinas de Angra 1 e Angra 2. Agora o montante de potência reativa necessário para

atender o sistema será solicitado pelo ONS (COSR-SE) diretamente a usina de Angra 2. Essa usina efetuará a coordenação das ações em conjunto com a usina de Angra 1.

Após a implementação das mudanças sugeridas nesse trabalho, a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto passou a contribuir mais efetivamente no controle de tensão da área Rio de Janeiro – Espírito, contudo, ainda não foi suficiente para evitar a abertura de linhas para controle de tensão. Está prevista para dezembro de 2005 a entrada em operação de alguns reatores manobráveis na área Rio de Janeiro – Espírito Santo (4). Esses reatores deverão melhorar o processo de recomposição da área e também poderão evitar a abertura de linhas para controle de tensão.

Os resultados obtidos através das providências implantadas, podem ser significativamente melhorados no futuro, através da implantação de um Controle Secundário de Tensão aplicado às usinas de Angra 1 e Angra 2, conforme estudado em [2].

#### 6.0 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o valioso apoio técnico da Gerência de Planejamento da Operação (GPO), em particular a engenheira Sumara Duarte Ticom Cavalcante, da gerência de Programação e Desligamentos (GPD) e do Centro Regional de Operação Sudeste (COSR – SE) do Operador Nacional do Sistema – ONS, bem como da concessionária ELETRONUCLEAR.

#### 6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) P. Kundur, Power System Stability and Control, New York, USA, McGraw-Hill 1994
- (2) Planejamento da Operação Elétrica do Sistema Interligado Nacional – Quadrimestral Jan-Abr 2004, ONS – RE-3/375/2003
- (3) J.R.B.Marinho, J.C.Ferraz, N.Martins, R.B.Prada, C.H.C.Guimarães, “Controle Coordenado de Tensão aplicado a usinas nucleares eletricamente próximas”, XVIII SNPTEE, Uberlândia, Brasil, Outubro 2003.
- (4) Planejamento da Operação Elétrica do Sistema Interligado Nacional – PEL 2005/06, ONS – RE-3/301/2004