



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

GAT 02
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

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

REFLEXOS DA MANOBRABILIDADE DE USINAS NUCLEARES NA OPERAÇÃO DE SISTEMA ELÉTRICO

Márcio Luiz da Fonseca *
José Renato B. Marinho

Antônio Carlos Ferreira
Alquindar de Souza Pedroso

ELETRONUCLEAR – Eletrobrás Termonuclear S.A

COPPE/Universidade Federal do RJ - UFRJ

RESUMO

Com base na experiência internacional, onde as unidades termonucleares (UTNs) podem participar na modulação e no controle automático de geração de seus sistemas elétricos, este trabalho tem como objetivo fazer uma iniciação à exploração das potencialidades da manobrabilidade destas unidades no Sistema Interligado Nacional (SIN). Em particular, são desenvolvidas simulações envolvendo diversas contingências de situações operacionais de desbalanço de geração em relação à carga, para avaliação dos reflexos no comportamento estático e dinâmico, considerando a participação das unidades Angra 1, 2 e também a futura unidade 3 na modulação e regulação primária de frequência, em diferentes pontos de operação.

PALAVRAS-CHAVE

Manobrabilidade de Unidades Termonucleares, Simulação de Sistemas Elétricos, Controle de Geração

1.0 - INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o Brasil explorou intensivamente os aproveitamentos hídricos. No entanto, as disponibilidades energéticas atuais estão se afastando cada vez mais dos grandes centros consumidores. Outro aspecto importante é a maior dificuldade de autorização e licenciamento de novos empreendimentos de geração hidrelétrica, devido ao crescimento das exigências de caráter ambiental, dentre outros fatores. Esse cenário tem favorecido à implantação de empreendimentos térmicos, face ao seu curto prazo de instalação e uma razoável flexibilidade de localização em pontos mais estratégicos do sistema elétrico, geralmente junto aos centros de carga. Estando os maiores turbogeradores localizados nas proximidades das áreas Rio de Janeiro e São Paulo, estes contribuem para acentuar a característica de cada vez mais ter a geração hidráulica distante e uma geração térmica próxima dos grandes consumidores.

Por ser uma grande importadora de energia, a área dos estados do Rio de Janeiro (RJ) e Espírito Santo (ES) é significativamente influenciada pelas condições de carga e geração das vizinhanças, principalmente da área São Paulo e em menor escala, Minas Gerais. Essa influência é minimizada pela operação das UTNs Angra 1 e 2, que contribuem na melhoria da confiabilidade do fornecimento para a região.

É a partir desse ponto, que este trabalho tem como objetivo fazer uma iniciação à exploração das potencialidades da manobrabilidade das UTNs no controle de geração, através da avaliação dos reflexos no comportamento estático e dinâmico do SIN, e particularmente na área RJ/ES, com simulações de modulação e controle de geração dessas unidades, diante dos diferentes pontos de operação e da resposta da regulação primária de frequência.(1)

Ao explorar o tema, não se pretende aprofundar a análise no sentido de vir a poder elaborar uma proposta efetiva para a alteração do sistema atual, mas precisamente em proporcionar uma reflexão técnica mais ampla, diante da experiência operacional externa e do fato de que possivelmente, num futuro não tão distante, o Brasil não seja mais um País majoritariamente de hidrelétricas.

2.0 - O CONTROLE DE GERAÇÃO E A MANOBRABILIDADE DE UMA UTN

O Controle Automático de Geração (CAG), de um sistema elétrico tem como meta o restabelecimento dos valores nominais de frequência e fluxo de potência de intercâmbio entre áreas logo após a ocorrência de um desequilíbrio de carga e geração. Um sistema de potência não precisa obrigatoriamente ter todas as unidades geradoras inseridas na regulação primária e/ou na secundária. Dependendo das características do comportamento da carga, das particularidades operacionais das unidades geradoras e da reserva de potência do sistema, podemos ter unidades contribuindo no controle carga-freqüência de várias formas, como ilustrado na figura 1.

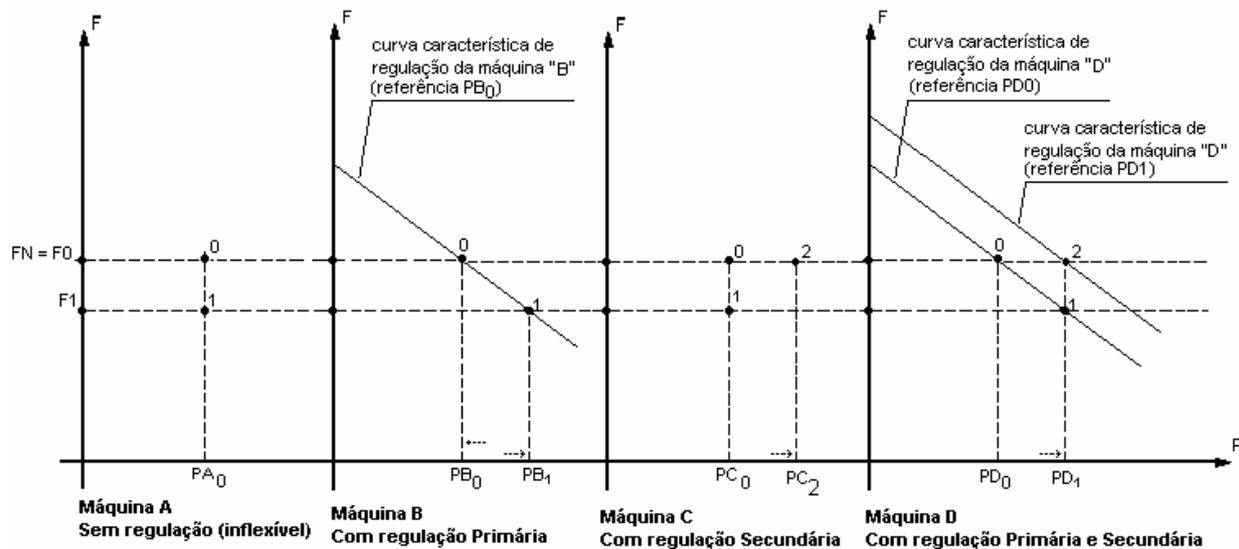


FIGURA 1- Comportamentos das unidades geradoras diante das várias modalidades de participação no CAG

No Brasil, as unidades térmicas, incluindo as UTN's, não participam do CAG, enquadrando-se como inflexíveis (sem regulação), estando com seus reguladores de velocidade bloqueados, mantendo sua geração constante.. Isto deve-se ao fato da matriz energética brasileira ter sua reserva operacional em sua maioria constituída por geração de origem hidráulica com maior simplicidade operacional, em oposição as limitações técnicas das unidades térmicas e os critérios de segurança e confiabilidade adotados nas unidades termonucleares. Em situações de emergência, os reguladores de velocidade das unidades inflexíveis desbloqueiam-se automaticamente somente para reduzir a potência, contribuindo para evitar que a freqüência atinja valores demasiadamente altos. Porém, neste caso a regularização da geração original só deverá ocorrer de forma manual. A variação de geração térmica, por razões elétricas e em tempo real, somente pode ser adotada depois de esgotados todos os recursos operativos disponíveis, atingidos os parâmetros mínimos definidos ou carregamentos máximos em linhas e equipamentos.(2, 3).

Na regulação primária, a unidade geradora aumenta (ou reduz) sua geração conforme suas características ajustadas, através da atuação dos reguladores de velocidade. A medida que o sistema de potência recompõe sua freqüência nominal, através das demais unidades equipadas com controle secundário, a unidade dotada somente de controle primário voltará a sua condição inicial, antes da perturbação. Um ponto comum com a experiência externa, é quanto ao valor do estatismo dos reguladores de velocidade, fixado em 5 %. A regulação primária não deve atuar para os seguintes desvios de freqüência indicados na tabela 1.(4, 5, 6)

Área/localidade	Freqüência Nominal	Faixa de insensibilidade (banda morta)	
Brasil (ONS)	60,0 Hz	+/- 0,040 Hz	+/- 0,067 % pu
EUA (NERC)	60,0 Hz	+/- 0,036 Hz	+/- 0,060 % pu
Europa (UCTE)	50,0 Hz	+/- 0,020 Hz	+/- 0,040 % pú

TABELA 1 – valores de banda morta de freqüência para regulação primária

No Brasil, a faixa de operação normal de frequência é de 59,99 a 60,01 Hz e a modalidade de controle adotada é o intercâmbio e frequência constante - TLB (Tie Line Bias). A modalidade frequência constante (FF) somente é admitida em uma única área de controle.

Na ocorrência de distúrbios, a frequência nunca deve ficar fora do intervalo de 56,5 e 66,0 Hz. Havendo disponibilidade de geração para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, a frequência deve retornar a faixa entre 59,5 à 60, 5 Hz em um período máximo de 30 segundos. O CAG é desligado automaticamente sempre que a frequência apresenta desvios superiores a +/- 0, 5 Hz.

A manobrabilidade de uma unidade termonuclear é prevista em projeto e possível operacionalmente, dentro de valores máximos pré-estabelecidos, com o objetivo de manter integralmente a vida útil do empreendimento. Taxas de variação de 5 à 10 % da potência nominal por minuto ou degraus de 10 % são possíveis. Na prática, são adotados valores bem mais conservativos, por motivos diversos, dentre os quais estão segurança, confiabilidade, condicionamento de combustível, controle do Xenônio etc.(7)

As peculiaridades geográficas e climáticas da Europa, EUA e Japão, principais consumidores mundiais de energia, requerem a utilização prioritária de geração térmica. Na Europa, as UTN's participam ativamente no controle primário e secundário. Sua estrutura de controle de geração é feita pela Union for the Cooperation of Transmission of Electricity (UCTE), no qual os países integrantes são interconectados sincronizadamente. Uma parte do norte da África também encontra-se sincronizada com a UCTE. A operação coordenada do sistema é feita pelo European Transmission System Operators (ETSO). Geralmente, cada País faz parte de uma área de controle. A opção comumente adotada para a participação das UTN's no CAG, é a variação de sua potência nominal na faixa de 60 à 100 %, em períodos máximos de 10 minutos.

As taxas típicas de variação de potência no controle secundário adotadas pela UCTE para as unidades térmicas, definidas no Operation Handbook (OH), são: 8 % por minuto para unidades à óleo ou gás, 2 a 4 % por minuto para unidades à carvão, 1 a 2 % por minuto para unidades à linhito e 1 a 5 % por minuto para unidades nucleares.

Para as unidades hidroelétricas a taxa de variação é de 1,5 a 2,5 % por segundo. É importante salientar que as normas internacionais não permitem ao órgão coordenador do sistema elétrico atuar diretamente na taxa de variação de potência das UTNs, permanecendo esse ajuste restritamente sob responsabilidade do operador do reator nuclear.

3.0 - CRITÉRIOS ADOTADOS

A delimitação física da área RJ/ES no sistema de 500/345 KV, onde encontra-se inserida as UTN's de Angra, está indicada na figura 2, no qual os pontos assinalados referem-se aos locais de medição de fluxo ativo RJ (FRJ).

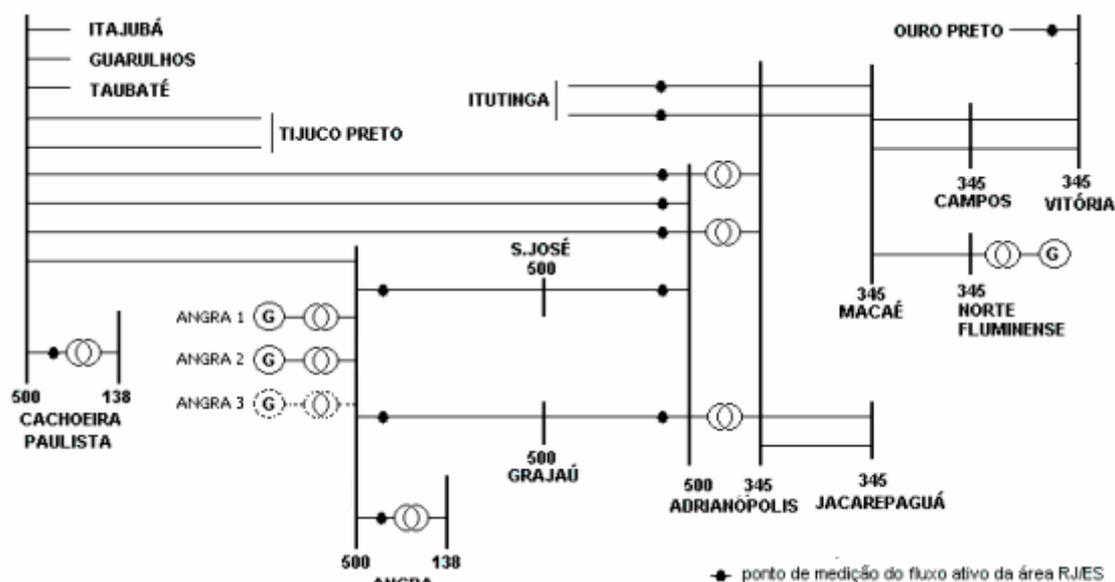


FIGURA 2 – Delimitação da área RJ/ES no sistema de 500/345 kV

Para o desenvolvimento das simulações, foram adotados os seguintes critérios, dentre outros:

- manutenção dos mesmos modelos matemáticos (CDUs) adotados pelo ONS para as UTNs com a alteração dos valores dos ajustes de insensibilidade aos desvios de velocidade (banda morta) de modo a permitir a liberação do regulador de velocidade;
- adoção dos níveis de carga da região Sudeste/Centro-Oeste correspondentes ao mês de fev/05 e utilização dos pontos de operação (P.O), em 60, 70 e 80 % para as UTNs;
- estabelecimento do controle de tensão nas barras de geração das UTNs em 0,90 pu, de modo a garantir o perfeito funcionamento do serviço auxiliar destas unidades;
- monitoramento dos limites referentes as taxas de variação de potência mecânica da turbina para verificação de possíveis violações operacionais;

As simulações são divididas em duas etapas complementares. A primeira tem como objetivo a obtenção de casos convergidos de fluxo de potência com as UTNs operando em pontos de operação diferenciados. A segunda, refere-se a análise dos comportamento de transitórios eletromecânicos para situações de falta com perda de geração, com e sem contingências, tendo como base os casos de fluxo de potência obtidos.

4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Os aspectos mais significativos relacionados à manobrabilidade das UTNs que contribuem na performance do sistema elétrico são:

4.1 Efeitos da modulação de geração em regime permanente

Atualmente, nos horários de carga leve e mínima, a manutenção da geração termelétrica inflexível na área RJ/ES provoca a redução do carregamento das linhas de transmissão que trazem energia de geração remota, tendo como consequência a elevação dos níveis de tensão nas principais barras. Nessas circunstâncias, os recursos normalmente utilizados para a adequação da tensão compõem-se na introdução de reatores e chaveamentos de alguns circuitos de 500 kV. Os circuitos normalmente manobráveis com o objetivo de reduzir ao máximo os níveis de tensão dos setores de 345 e 500 kV são, em ordem de prioridade: circuito 2 da LT 500 kV Cachoeira Paulista – Adrianópolis, circuito 2 da LT 500 kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista e circuito 3 da LT 500 kV Cachoeira Paulista – Adrianópolis. (8)

De forma inversa, a variação dos pontos de operação das UTNs modifica também o carregamento das linhas de transmissão, ocasionando alteração no perfil de tensão local. A figura 3 mostra as tensões dos principais barramentos que compõem a área RJ/ES, com as UTNs operando em 80 e 60 %. Consta-se que a modulação adequada da geração local poderá ser uma técnica alternativa eficaz no controle de tensão.

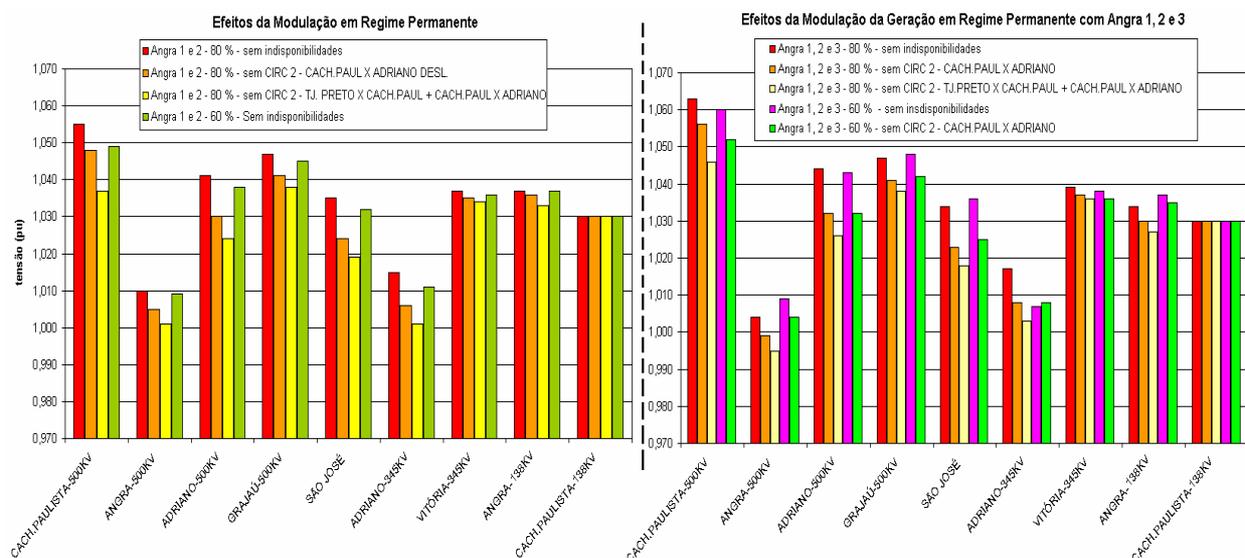


FIGURA 3 – tensões da área RJ/ES em carga leve, com chaveamento de LTs e mudança no P.O das UTN's

4.2 Efeitos da regulação primária no controle de frequência

As simulações desenvolvidas com as UTNs atuando na regulação primária apresentaram resultados que mostraram uma contribuição para a redução dos valores de desvios dinâmicos de frequência desde 2,80 a 8,38 % do desvio original. Reduções no tempo de restabelecimento da frequência, aos patamares normais de operação em até 1,135 segundo foram obtidos. Esse parâmetro é de relevada importância para a melhoria do fator de Desempenho da frequência durante distúrbios (DFD) e na contribuição da redução do tempo de operação das turbinas térmicas fora da faixa normal de operação. O exemplo mostrado na figura 4, representa a simulação de um desequilíbrio de geração de 1400 MW com as UTNs, inclusive Angra 3, com P.O em 80 % da potência nominal.(9, 10)

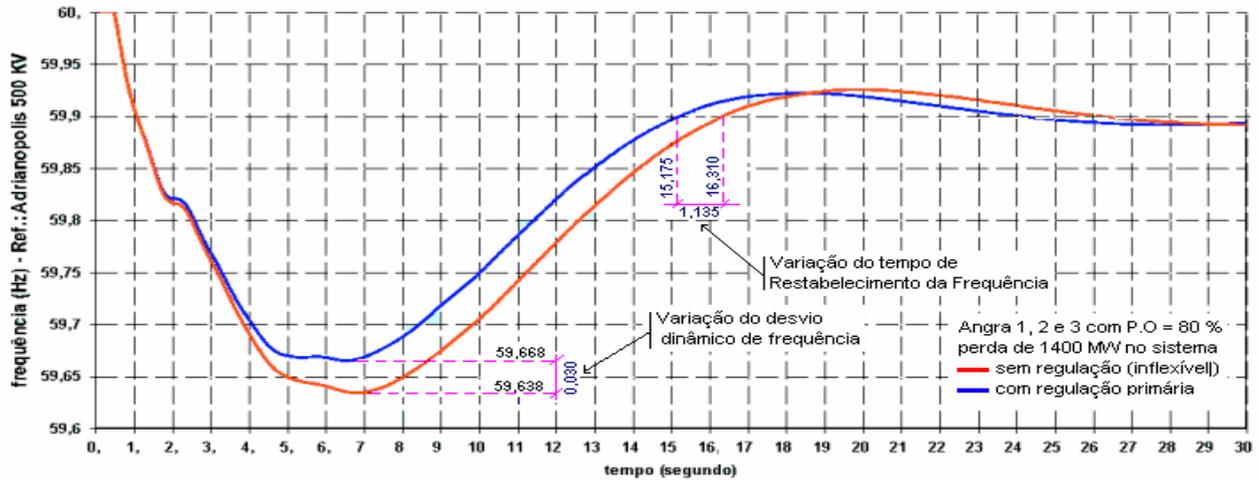


FIGURA 4 – atuação da regulação primária das UTNs para um deficit de geração de 1400 MW

4.3 Potencial de melhoria da estabilidade

A figura 5 mostra que uma maior participação das UTNs faz com que os ângulos das máquinas fiquem mais próximos da referência (Centro de Massa - 0°). Esta característica é mais acentuada com a entrada da unidade Angra 3. A aproximação dos ângulos de todas as unidades à referência e estes também mais próximos entre si, permite concluir que o aumento de geração na área vem a contribuir para uma melhoria do desempenho dinâmico do sistema (maiores torques de sincronização entre máquinas) e portanto, considera-se que o sistema elétrico está mais rígido com relação ao aspecto de estabilidade.

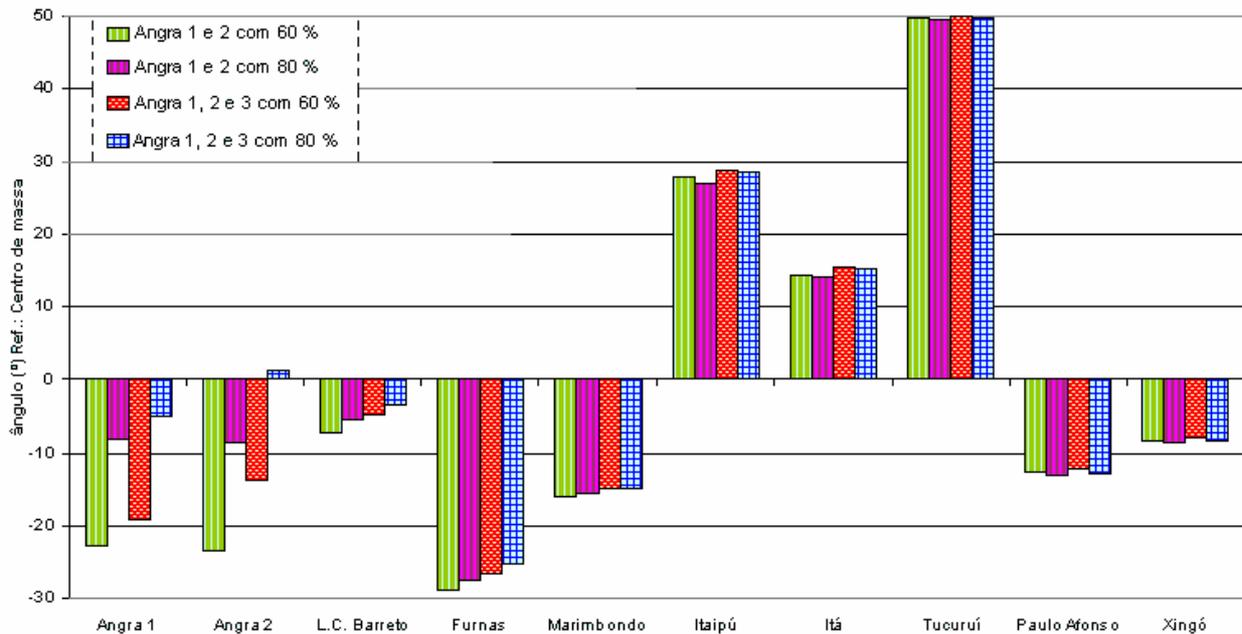


FIGURA 5 – eixo "Q" ($^\circ$) para diversos P.O das UTN's - carga média – ref. Centro de massa

As unidades Xingó e Paulo Afonso, na área Nordeste (NE), apresentam um pequeno afastamento em relação ao centro de massa, porém é verificada uma tendência de aproximação destas duas unidades à de Tucuruí, na área Norte (N), indicando que a estabilidade relativa da região Nordeste em relação ao Sul/Sudeste não sofre efeitos com o aumento da geração das UTNs de Angra, não havendo reflexos na estabilidade desta área (N/NE). A figura 6 mostra o comportamento angular das unidades Tucuruí e Ilha Solteira (referências de área), devido à participação da geração das UTNs, indicando a aproximação do ângulo de Ilha Solteira em relação ao centro de massa.

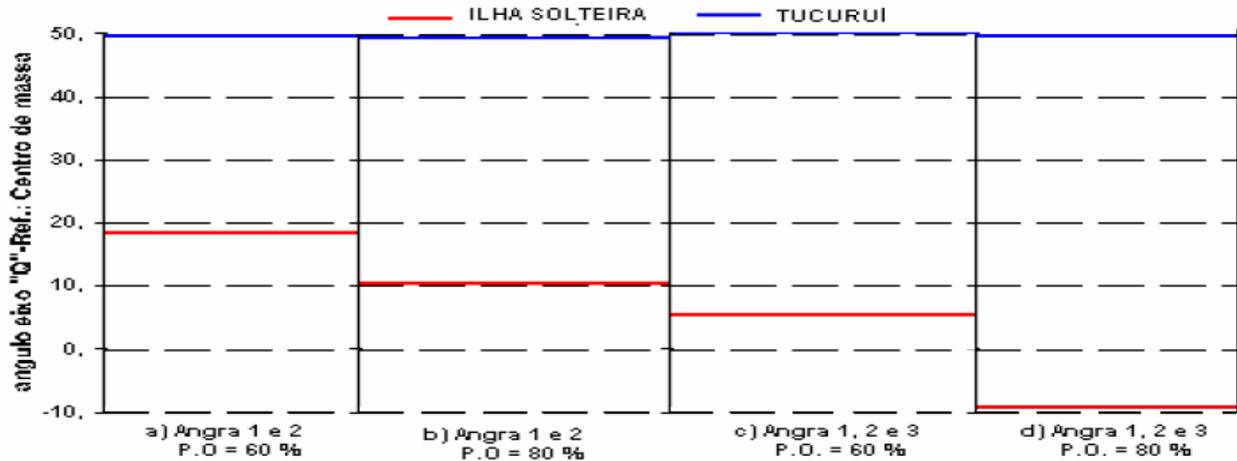


FIGURA 6 – ângulo eixo "Q" (°) - Tucuruí e Ilha Solteira – carga média–ref.: Centro de massa

A contribuição das UTNs na participação da regulação primária devido ao incremento de energia cinética, atua em melhorar marginalmente o amortecimento do ângulo da máquina na primeira oscilação, fazendo com que o mesmo se desloque no sentido positivo, não alterando a estabilidade transitória, conforme mostrada na figura 7, para um desequilíbrio de geração de 1400 MW.

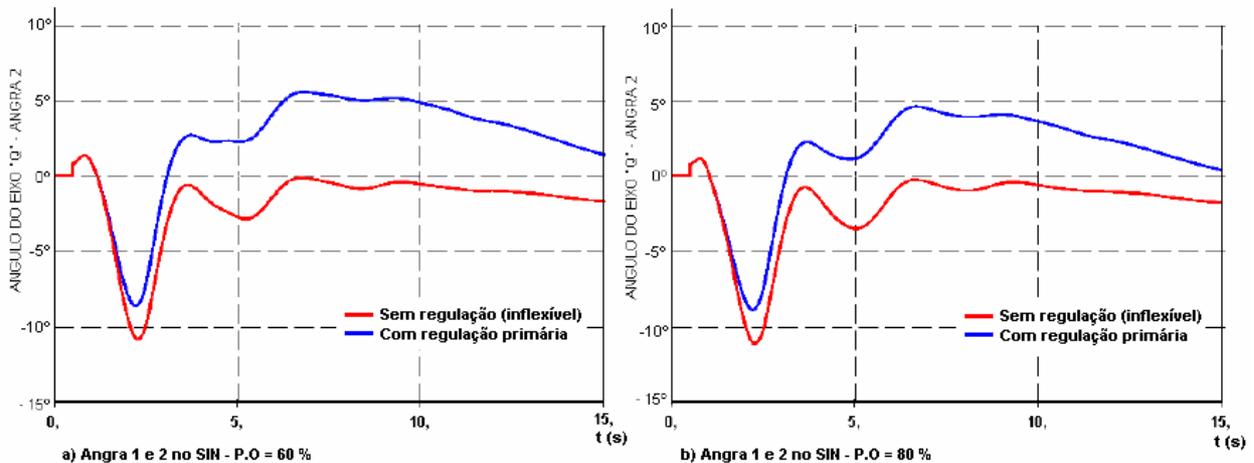


FIGURA 7 – variação do eixo Q da UTN Angra 2 em função de regulação para um deficit de 1400 MW.

5.0 - CONCLUSÃO

Os resultados apresentados nas simulações apontam para a existência de contribuições positivas das UTNs Angra 1 e 2 para o SIN, reforçados adicionalmente com Angra 3, e principalmente na área RJ/ES, através da modulação de geração e da regulação primária de frequência.

As simulações desenvolvidas indicam que a modulação, consistindo na alteração do despacho de geração das UTNs em patamares de até 20 % durante os períodos de carga mínima/leve contribui para minimizar a elevação de tensão em determinados pontos do sistema elétrico, otimizando a recorrência de chaveamento de transmissão

com o desligamento de alguns circuitos. Da mesma forma, o despacho das UTNs em patamares mais elevados de geração nos horários de maior demanda contribuem para melhorar a condição potência-ângulo entre as máquinas da região, indicando uma maior rigidez do sistema para pequenas perturbações.

A participação das UTNs na regulação primária de frequência indica a contribuição para a redução do tempo de restabelecimento do sistema e, em alguns casos, impedir que a frequência atinja valores que possam ocasionar o desligamento do CAG. Outra contribuição é minimizar o tempo de operação das turbinas das unidades térmicas em faixas de velocidade com restrições de tempo, sem causar prejuízos à estabilidade do sistema. Durante as simulações nas quais as UTNs participam da regulação primária, foi verificado que as variações de potência mecânica da turbina ficaram dentro de valores admissíveis, mesmo em casos mais severos, mantendo-se em patamares de potência nominal utilizadas para manobra dos reatores nucleares.

Os resultados apresentados podem ser considerados como definitivos, porém outros aspectos de caráter operacional, econômico, de segurança e de confiabilidade, não discutidos no escopo deste trabalho devem ser avaliados e levados em consideração para uma conclusão tecnicamente mais abrangente.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) FONSECA, MÁRCIO LUIZ. Reflexos da Manobrabilidade de Usinas Nucleares na Operação de Sistema Elétrico – Dissertação de Mestrado – COPPE/PEE/UFRJ; 2006;
- (2) ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Controle de Geração em Condição Normal, Instrução de Operação IO-CG.BR01, 2004;
- (3) ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Operação Normal da Área 500/345 kV RJ/ES, Instrução de Operação IO-ON.SE.5RJ, 2005;
- (4) UCTE, UNION FOR THE COOPERATION OF TRANSMISSION OF ELECTRICITY. Policy 1 – Load Frequency Control and Performance version 2.1, jun 2004;
- (5) UCTE, UNION FOR THE COOPERATION OF TRANSMISSION OF ELECTRICITY. Appendix A – Load Frequency Control and Performance version 1.8, mar 2004;
- (6) NPCC, NORTHEAST POWER COORDINATING NETWORK, Emergency Operation Criteria, Document A-3, New York, NY, USA,2004;
- (7) U.S.NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Standard Specifications Westinghouse Plants, NUREG 1431/1992, Volumes 1, 2 e 3;
- (8) ONS; OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Operação em Contingência na Área 500/345 kV RJ/ES, Instrução de Operação IO-OC-SE, 2005;
- (9) ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Gerência dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica, Procedimentos de Rede, Submódulo 2.8, Revisão 0, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, jul 2003.
- (10) ANSI/IEEE; Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants, STD C37.106-2003.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Márcio Luiz da Fonseca

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 25 de outubro de 1960.

Mestrado (2006) : COPPE/UFRJ e Graduação (1984) em Engenharia Elétrica: UGF- Rio de Janeiro

Empresa: ELETRONUCLEAR – Eletrobrás Termonuclear S.A, desde 2001

Engenheiro da Gerencia de Modificações de Projetos – GMP.T

José Renato Bonato Marinho

Nascido em Carangola, MG em 10 de maio de 1952.

Mestrado (2002) : PUC-RJ e Graduação (1976) em Engenharia Elétrica: UFRJ – Rio de Janeiro

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas S.A (1977 - 1997)

ELETRONUCLEAR – Eletrobrás Termonuclear S.A, desde 1997

Engenheiro da Assessoria de Comercialização – ACM.O

Antônio Carlos Ferreira

Nascido em Muriaé, MG em 29 de maio de 1963.

Doutorado (1996) : Cambridge - UK e Graduação (1987) em Engenharia Elétrica: UFRJ – Rio de Janeiro

Empresa: COPPE/UFRJ, desde 1998

Professor Adjunto do Programa de Engenharia Elétrica - PEE

Alquindar de Souza Pedroso

Nascido no Rio Grande, RS em 30 de maio de 1934.

Mestrado (1971) : Purdue - USA e Graduação (1956) em Engenharia Elétrica: UFRGS

Empresa: COPPE/UFRJ, desde 1972

Professor e Pesquisador do Programa de Engenharia Elétrica - PEE