



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

GAT 01
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

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

DESAFIOS RELACIONADOS À CONEXÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS DE PEQUENO PORTE EM LINHAS DE INTERLIGAÇÃO

Fernando Cattan Jusan*	Marco A. de P. Fontes	Márcio G. Sereno	
Christiano L. Rodrigues	Nilo José P. de Macedo	Waldir de M. Mota Jr.	George Nakamura
FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A			CNEC Engenharia S. A.

RESUMO

Este trabalho apresenta os principais resultados dos estudos realizados por Furnas Centrais Elétricas S.A. para a integração da UHE Tijuco Alto à rede básica. Considerando que a alternativa proposta envolve a reconfiguração de um dos principais corredores de transmissão da interligação Sul-Sudeste, é extremamente importante a análise da viabilidade técnica de sua execução sob o ponto de vista de desempenho elétrico, de forma a atender os requisitos previstos na fase de Solicitação de Acesso. São apresentados os principais problemas identificados, assim como são avaliadas algumas propostas de solução para garantir a operação segura da usina e a integridade do Sistema Interligado Nacional (SIN).

PALAVRAS-CHAVE

UHE Tijuco Alto, Estudos Elétricos, Estabilidade Eletromecânica, Auto-Excitação, Curto-Circuito Capacitivo.

1.0 - INTRODUÇÃO

A conexão de novos empreendimentos de geração hidráulica à rede básica em geral encontra inúmeras barreiras de natureza sócio-ambiental e econômica. Este é o caso da UHE Tijuco Alto, localizada no Vale do Ribeira, entre os municípios de Cerro Azul e Adrianópolis no estado do Paraná, próximo à divisa com o estado de São Paulo. Com uma previsão inicial de capacidade instalada de 144 MW, a UHE Tijuco Alto foi autorizada à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) e desde então têm enfrentado diversos entraves de ordem ambiental para que sua construção fosse efetivada. Para minimizar os impactos da obra ao meio ambiente e às comunidades da região, a CBA reformulou o projeto da usina, limitando a área alagada pelo represamento do rio, o que implicou na redução da potência nominal da usina para 128,7 MW.

Inicialmente, a proposta para a integração da UHE Tijuco Alto à rede básica foi concebida a partir do sistema de 138 kV existente na região, que atualmente encontra-se no limite de sua capacidade de transmissão. Dentre as alternativas restantes, a mais economicamente viável consiste no seccionamento de um dos circuitos da linha de 500 kV Ibiúna – Bateias, circuito duplo, que atravessa a propriedade da CBA, muito próximo ao local de construção da usina. Esta alternativa envolve a construção de uma subestação em 500 kV de uso exclusivo da usina, localizada a aproximadamente 100 e 232 km das subestações terminais de Bateias e Ibiúna, respectivamente. A FIGURA 1 mostra o ponto de conexão da UHE Tijuco Alto na rede básica de transmissão.

(*) Rua Real Grandeza, 219 – sala 605 - Bloco B – CEP 22283-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil.
Tel: (+55 21) 2528-5451 – Fax: (+55 21) 2528-5576 – E-mail: cattan@furnas.com.br

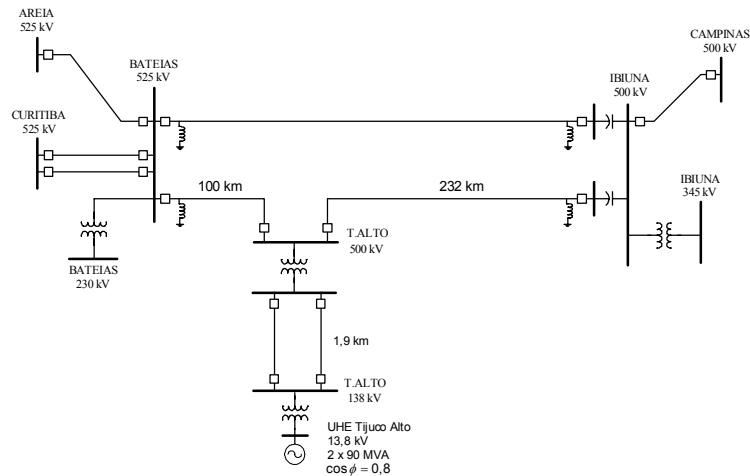


FIGURA 1 – Diagrama unifilar do ponto de conexão da UHE Tijuco Alto

Os estudos realizados buscaram avaliar os impactos que a nova instalação provoca nos padrões de desempenho da rede básica, bem como identificar a necessidade de reforços ou ampliações no sistema de transmissão para garantir a operação segura da usina e a integridade do SIN. Considerando que a alternativa proposta envolve a reconfiguração de um dos principais corredores de transmissão da interligação Sul-Sudeste, é extremamente importante a análise da viabilidade técnica de sua execução sob o ponto de vista de desempenho elétrico, de forma a atender os requisitos previstos na fase de Solicitação de Acesso.

Modelos preliminares do regulador de velocidade e do sistema de excitação para a UHE Tijuco Alto foram desenvolvidos e ajustados [1], sendo implementados no programa de análise de transitórios eletromecânicos ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL [2]. Foram realizados os seguintes estudos:

- Curto-Circuito [3]
- Desempenho em Regime Permanente [3]
- Desempenho Dinâmico à Frequência Fundamental [4]

As análises contemplaram diferentes cenários energéticos nas condições de rede completa e alterada, com fluxo na interligação Sul – Sudeste em ambos os sentidos. Foram avaliadas condições extremas de intercâmbio e carregamento no tronco, além de considerar a influência do número de unidades geradoras sincronizadas na UHE Tijuco Alto. Para os estudos de rejeição e energização, avaliou-se também um cenário energético com fluxo reduzido na LT 500 kV Ibiúna – Bateias.

2.0 - MODELAGEM DAS UNIDADES GERADORAS E SEUS CONTROLADORES

O sistema de excitação da UHE Tijuco alto é composto por reguladores automáticos de tensão (RAT) do tipo UNITROL M, da ABB, com compensação de corrente reativa, além dos limitadores de subexcitação, de corrente mínima de campo, de corrente estatórica e de sobreexcitação. Como as funções de transferência no domínio da frequência dos limitadores e suas faixas de ajuste não foram fornecidas pelo fabricante, foram considerados modelos típicos, baseados em outros modelos da família UNITROL, de forma que os limites do gerador e do sistema de excitação pudessem ser representados durante as avaliações de desempenho dinâmico da usina. A função de transferência do sinal adicional estabilizador (PSS) originalmente fornecida pelo fabricante não correspondia às especificações exigidas pelo ONS para a conexão de novas instalações à rede básica. Por isso, foi implementada no ANATEM uma estrutura do tipo PSS 2A, considerando que o fabricante irá fornecer uma estrutura compatível com a exigida pelo ONS.

Para testar a atuação do limitador de subexcitação, foi aplicado um degrau negativo de 20% na referência do regulador de tensão, considerando duas unidades geradoras em operação e um despacho inicial total de 126 MW e -50 Mvar. O resultado desta simulação é apresentado na FIGURA 2, onde são mostradas as variações na tensão terminal e nas potências ativa e reativa de uma unidade geradora.

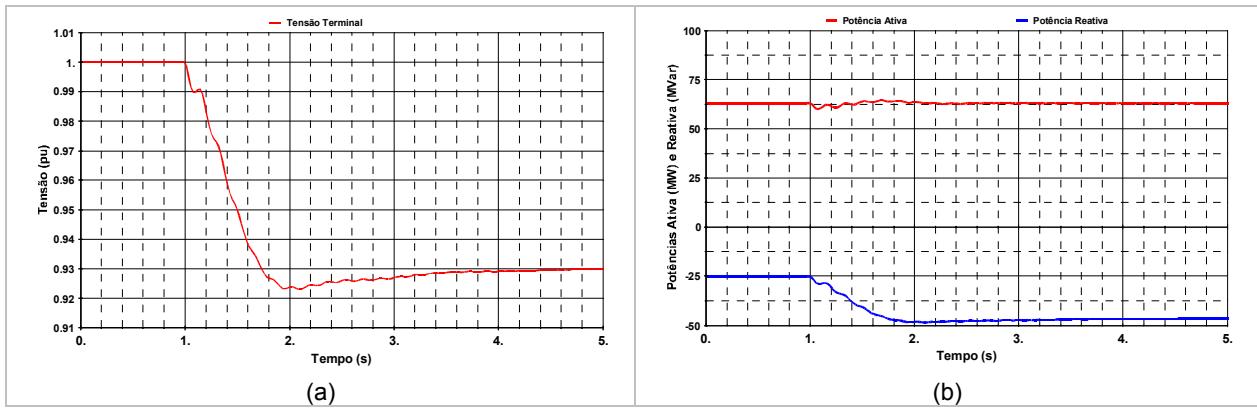


FIGURA 2 – Degrau negativo de 20% na referência do RAT: (a) Tensão terminal (pu); (b) Potências ativa (MW) e reativa (MVar) de uma unidade

Para testar a atuação do limitador de sobreexcitação, foi aplicado um degraú positivo de 10% na referência do regulador de tensão, considerando duas unidades geradoras em operação e um despacho inicial total de 126 MW e 108 Mvar. O resultado desta simulação é apresentado na FIGURA 4.

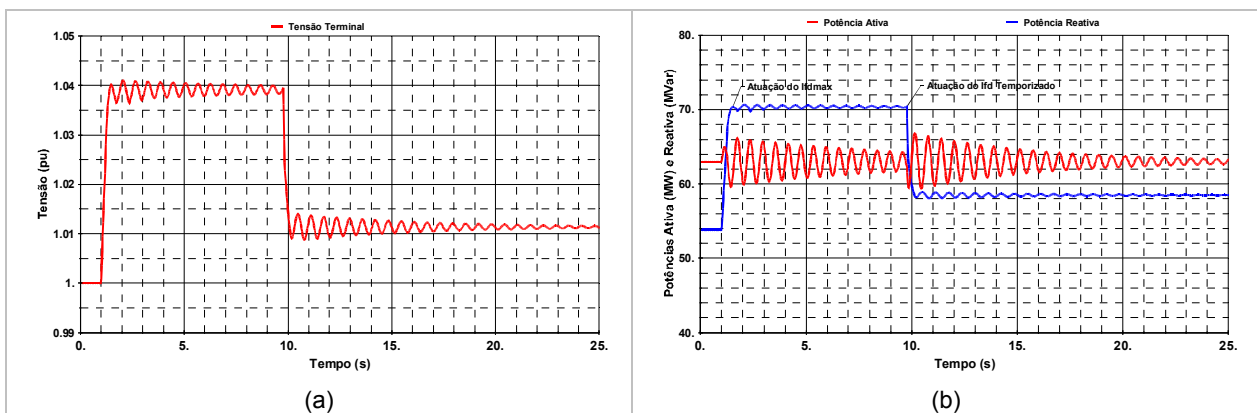


FIGURA 3 - Degrau positivo de 10% na referência do RAT: (a) Tensão terminal (pu); (b) Potências ativa (MW) e reativa (MVar) de uma unidade

As figuras a seguir mostram a localização dos pontos de operação finais de uma unidade geradora para as simulações anteriores confrontados com a curva de capacidade corrigida com a tensão terminal, na qual é verificada a correta atuação dos limitadores.

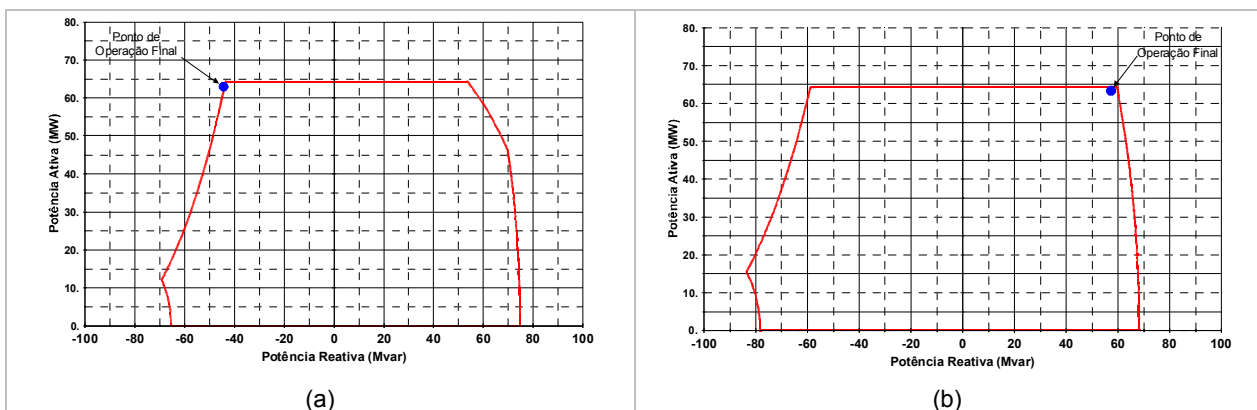


FIGURA 4 – Ponto de operação final na curva de capacidade : (a) Atuação do limitador de sub-excitação; (b) Atuação do limitador de sobre-excitação

3.0 - O FENÔMENO DA AUTO-EXCITAÇÃO

A auto-excitação é um fenômeno observado quando grandes cargas capacitivas são aplicadas às máquinas elétricas, tais como linhas de transmissão em vazio e filtros de elos CCAT, e que normalmente é decorrente de

uma rejeição de carga. Em geral, a auto-excitação envolve aumentos exponenciais da tensão em função do tempo, e pode causar grandes danos, como a dissipação de energia nos pára-raios de ZnO acima de sua capacidade nominal, a superação do nível de isolamento de diversos equipamentos da instalação e até mesmo a queima de unidades geradoras. O problema é influenciado pelas não-linearidades de alguns componentes do sistema, tais como a saturação de máquinas, transformadores e reatores, devendo ser analisado através de simulação digital.

Baseando-se nas equações de Park para a máquina síncrona e limitando a representação aos efeitos transitórios, podem-se obter as condições para auto-excitação quando uma carga capacitiva é conectada diretamente aos terminais do gerador. As equações finais para as tensões relacionadas aos enlaces de fluxo no eixo d e q são dadas a seguir, onde foram desprezadas as resistências dos enrolamentos e as variações de enlace de fluxo no estator [5].

Eixo Direto:

$$e'_q(s) = \left[\frac{E_{fd}(s) \cdot \omega}{T'_{d0}} + e'_q(0) \right] \cdot \left[\frac{1}{s + \frac{(1 - \omega^2 L'_d C)}{T'_{d0} (1 - \omega^2 L'_d C)}} \right] \quad (3.1)$$

Nesta equação, para que e'_q cresça no tempo, é necessário que:

$$\frac{(1 - \omega^2 L'_d C)}{T'_{d0} (1 - \omega^2 L'_d C)} < 0 \quad (3.2)$$

Como L'_d é sempre menor que L_d e T'_{d0} é uma constante positiva, conclui-se que a condição acima só é satisfeita quando:

$$\omega L'_d < \frac{1}{\omega C} < \omega L_d \quad \text{ou} \quad x'_d < x_c < x_d \quad (3.3)$$

Eixo em Quadratura:

$$e'_d(s) = \frac{e'_{d0}}{s + \left[\frac{(1 - \omega^2 L_q C)}{T''_{q0} (1 - \omega^2 L_q C)} \right]} \quad (3.4)$$

De forma análoga, a condição para auto-excitação no eixo q é obtida quando:

$$\frac{(1 - \omega^2 L_q C)}{T''_{q0} (1 - \omega^2 L_q C)} < 0 \quad (3.5)$$

Ou seja:

$$\omega L_q < \frac{1}{\omega C} < \omega L_q \quad \text{ou} \quad x''_q < x_c < x_q \quad (3.6)$$

As equações (3.3) e (3.6) mostram que linhas mais longas e velocidades maiores favorecem a ocorrência do fenômeno. Após uma rejeição de carga, a frequência da ilha elétrica na qual o gerador está localizado aumenta a uma taxa bastante elevada. Com o aumento da frequência, a reatância capacitiva da carga diminui e as reatâncias internas da máquina começam a aumentar. A variação destes parâmetros ocorre de forma dinâmica, podendo chegar a um ponto de operação em que o sistema entra em regime de auto-excitação. Na ausência do regulador de tensão, a auto-excitação ocorrerá sempre que o valor da reatância capacitiva, x_c , for menor que o valor da reatância síncrona de eixo direto, x_d . Nesta condição, a tensão terminal e os fluxos se elevam não muito rapidamente, possibilitando a atuação do regulador de tensão. Deve-se salientar que o regulador de tensão atua somente no eixo d da máquina, através do controle da tensão de campo, E_{fd} . Para $x_c < x_q$, dá-se início a auto-

excitação no eixo em quadratura. Neste caso, o regulador de tensão não é mais capaz de controlar a tensão. Na presença de sistemas de excitação com capacidade de corrente negativa, este fenômeno pode ser retardado até a atuação das proteções de sobrefreqüência ou sobretensão, mas não pode ser evitado.

Para uma reatância capacitiva menor que X'_d , a corrente inicial na armadura será muito elevada, sendo até superior à corrente de curto-circuito trifásico nos terminais da máquina, embora os valores finais dessa corrente e da tensão terminal sejam menores [5]. Nesta condição, é possível verificar que a corrente da armadura passa a ter um efeito desmagnetizante, semelhante a um caso com carga indutiva. Este regime é chamado de curto-circuito capacitivo (CCC). A corrente elevada na armadura na fase inicial do processo resulta em elevados conjugados transitórios na máquina.

A FIGURA 5 apresenta um resumo dos fenômenos relacionados à auto-excitação e ao curto-circuito capacitivo em função dos valores de reatância capacitiva da carga aplicada à máquina.

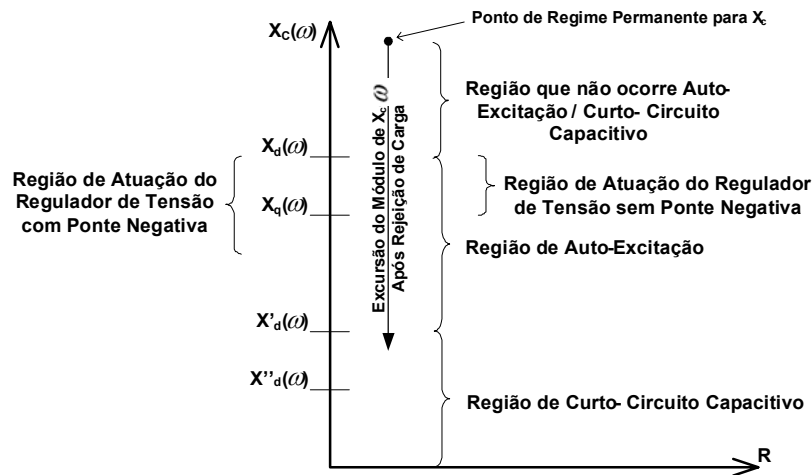


FIGURA 5 - Resumo dos fenômenos relacionados à auto-excitação e curto-circuito capacitivo em função da reatância capacitiva da carga

O problema da auto-excitação e do CCC pode ser avaliado através de programas de transientes eletromecânicos, como o ANATEM, do CEPTEL [2]. Esta ferramenta permite considerar a variação dos parâmetros com a freqüência, permitindo efetuar estudos mais acurados e obter resultados mais próximos da realidade. No entanto, o ANATEM apresenta restrições quanto à representação de pára-raios e saturação de reatores e transformadores, prejudicando uma análise mais detalhada do comportamento da tensão, principalmente nos casos mais críticos. A representação precisa destes elementos pode ser realizada através de programas de análise de transientes eletromagnéticos, como o ATP (*Alternative Transient Program*). Em estudos nos quais é necessário um elevado grau de detalhamento, as duas ferramentas devem ser utilizadas de forma complementar.

4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

De uma forma geral, o desempenho da usina se mostrou satisfatório na maioria dos casos avaliados. Os estudos de regime permanente indicaram que a UHE Tijuco Alto não apresenta influência considerável no perfil de tensão e carregamento durante as manobras de energização e sincronização da LT 500 kV Ibiúna – Bateias. Para os estudos de religamento tripolar, a única ressalva refere-se ao sentido de energização do trecho de linha entre Ibiúna e Tijuco Alto. Para evitar o surgimento de tensões elevadas sobre os pólos do disjuntor do terminal seguidor, o terminal líder deve ser localizado preferencialmente na SE Ibiúna. Como exemplo, a FIGURA 6 mostra a variação angular da UHE Tijuco Alto e o comportamento das tensões em Ibiúna 500 kV, Tijuco Alto 500 kV e no terminal em vazio da LT 500 kV Ibiúna – Tijuco Alto para a manobra de religamento tripolar desta linha. Esta simulação foi realizada para um caso de carga pesada no cenário Sul exportador, considerando-se duas unidades geradoras sincronizadas na UHE Tijuco Alto e um tempo morto de 500 ms.

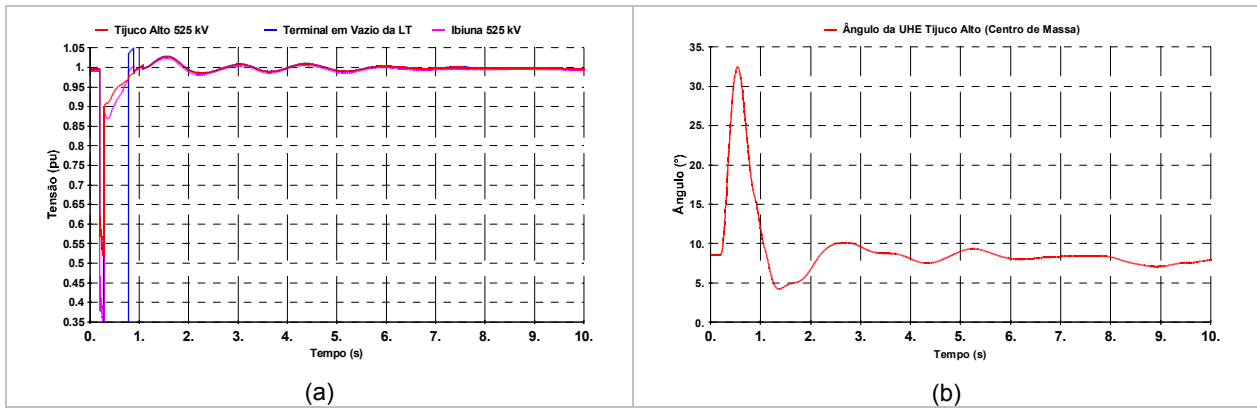


FIGURA 6 – Religamento da LT 500 kV Ibiúna - Tijuco Alto: (a) Tensão em Ibiúna 500 kV, Tijuco Alto 500 kV e no terminal em vazio; (b) Variação angular da UHE Tijuco Alto

As simulações indicaram que UHE Tijuco Alto apresenta um comportamento dinâmico estável para as principais contingências da rede de transmissão, com oscilações amortecidas e tensões e carregamentos variando dentro dos limites aceitáveis. Como ilustração, a FIGURA 7 apresenta o resultado da simulação de um curto-circuito monofásico em Ibiuna 500 kV, seguido da abertura do circuito 1 da LT 500 kV Ibiuna – Bateias para o mesmo caso base da simulação anterior.

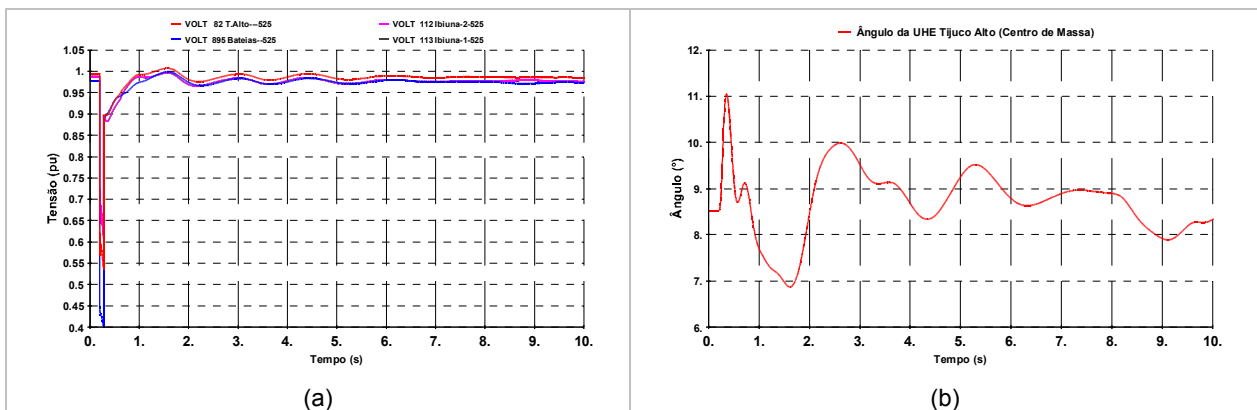


FIGURA 7 – Curto-circuito monofásico em Ibiúna: (a) Tensão em barras de 500 kV; (b) Variação angular da UHE Tijuco Alto

O problema mais preocupante refere-se ao risco de auto-excitação nas unidades geradoras da UHE Tijuco Alto, verificado quando de aberturas intempestivas apenas no terminal remoto de um dos trechos de linha originados pelo seccionamento de um dos circuitos da LT 500 kV Ibiuna-Bateias. Para que uma linha fique conectada em vazio à UHE Tijuco Alto, é necessário que não seja enviado sinal de transferência de disparo (*'transfer-trip'*) para o terminal localizado na SE Tijuco Alto 500 kV. Apesar de envolver configurações operativas de baixa probabilidade de ocorrência, suas consequências podem ser muito graves, o que justifica a sua investigação.

Considerando o sistema operando na condição de rede completa, as simulações indicaram que não é esperada a ocorrência de auto-excitação na rejeição de qualquer um dos circuitos conectados a SE Tijuco Alto 500 kV apenas no terminal remoto, independente do número de unidades geradoras sincronizadas na UHE Tijuco Alto.

A FIGURA 8 apresenta o resultado da simulação da abertura intempestiva da LT 500 kV Bateias – Tijuco Alto no terminal de Bateias, supondo que o trecho de linha entre a SE Ibiúna 500 kV e a SE Tijuco Alto 500 kV esteja fora de operação. Nas figuras são mostrados os casos com uma e duas unidades geradoras sincronizadas na UHE Tijuco Alto (curvas vermelhas e azuis, respectivamente). Quando duas unidades geradoras estiverem sincronizadas, não é esperada a ocorrência auto-excitação. Quando apenas uma unidade geradora estiver sincronizada na usina, verifica-se a ocorrência de auto-excitação aproximadamente 3,8 segundos após a rejeição. Isto não é preocupante, uma vez que o fenômeno ocorre para elevados valores de frequência, conforme indicado na figura. Neste caso, espera-se que a proteção de sobrefrequência retire as unidades geradoras de operação antes da ocorrência de auto-excitação, garantindo a sua integridade.

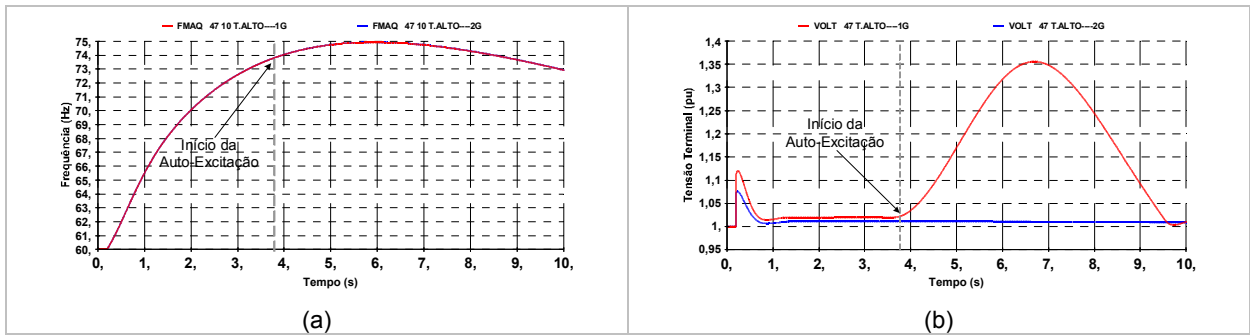


FIGURA 8 – Rejeição da LT 500 kV Bateias – Tijuco Alto no terminal de Bateias: (a) Freqüência; (b) Tensão

Quando a LT 500 kV Bateias – Tijuco Alto estiver indisponível, a abertura intempestiva da LT 500 kV Ibiúna – Tijuco Alto apenas no terminal de Ibiúna resulta em auto-excitação instantânea na UHE Tijuco Alto quando duas unidades geradoras estiverem sincronizadas na usina, conforme mostrado na FIGURA 9. As tensões terminais das máquinas atingem valores elevadíssimos antes mesmo de ocorrerem excursões na freqüência. Este caso é bastante crítico para os equipamentos, indicando a necessidade de adoção de medidas preventivas.

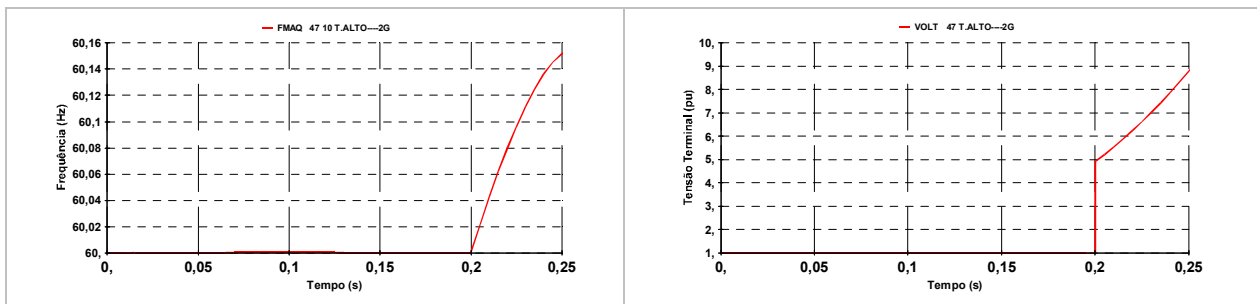


FIGURA 9 - Rejeição da LT 500 kV Ibiúna – Tijuco Alto no terminal de Ibiúna: (a) Freqüência; (b) Tensão terminal

Quando somente uma unidade geradora estiver em operação, verifica-se um comportamento bem diferente em relação ao caso anterior. A tensão terminal da UHE Tijuco Alto no instante da rejeição alcança valores muito elevados e em seguida cai rapidamente, tendendo a zero ao final da simulação. Estes resultados indicam a ocorrência de curto-circuito capacitivo nos instantes subseqüentes à rejeição, conforme visto na FIGURA 10. A corrente na armadura atinge valores iniciais muito elevados, superiores à corrente de curto-circuito trifásica aplicado aos terminais da máquina.

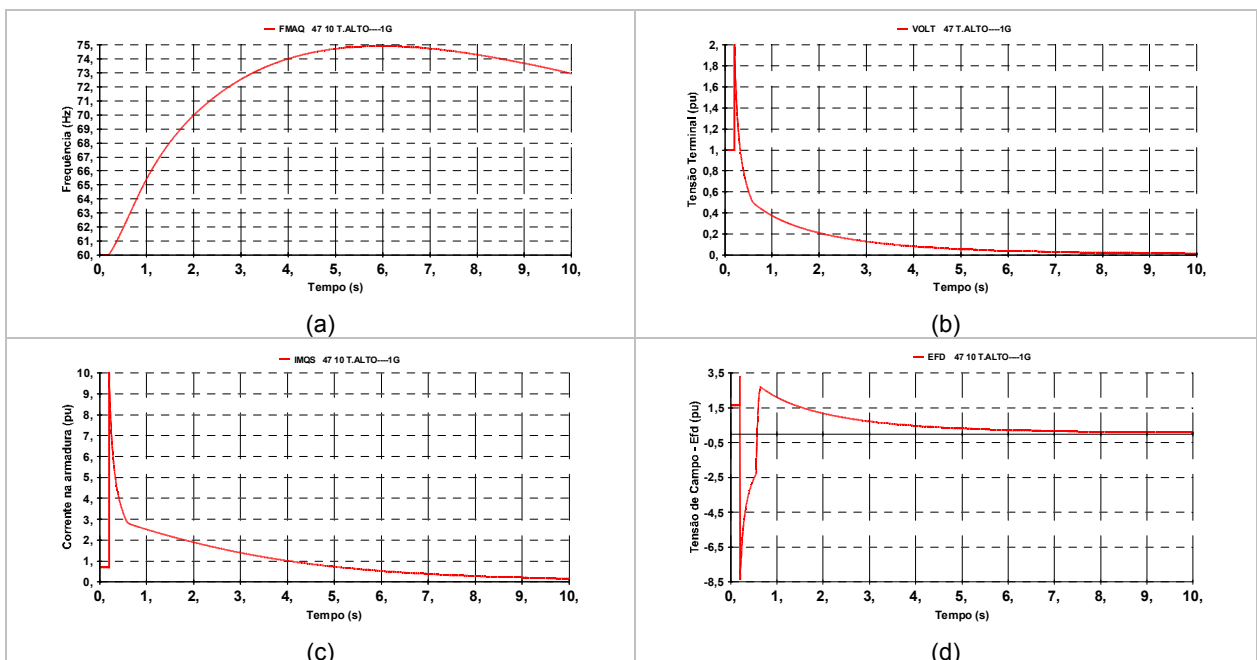


FIGURA 10 - Rejeição da LT 500 kV Ibiúna – Tijuco Alto no terminal de Ibiúna: (a) Freqüência; (b) Tensão terminal; (c) Corrente na armadura; (d) Tensão de campo

As medidas normalmente adotadas para lidar com problemas de auto-excitação envolvem desde esquemas especiais de proteção, que minimizam o risco do sistema operar em configurações proibitivas, até restrições operativas em tempo real, onde são definidos o número mínimo de unidades geradoras que devem estar em operação em função do estado da rede [6]. Para a UHE Tijuco Alto, a limitação do número de máquinas não constitui uma solução viável, uma vez que o fenômeno ocorre mesmo quando todas as unidades geradoras estiverem sincronizadas.

Uma outra medida que contribui de maneira significativa para mitigar a auto-excitação consiste na instalação de reatores dimensionados adequadamente nos terminais das linhas de transmissão. Primeiramente, avaliou-se o efeito da transferência do reator da LT 500 kV Bateias – Tijuco Alto (150 Mvar) da SE Bateias para a SE Tijuco Alto. As simulações indicaram que esta medida não era capaz de resolver o problema. Em seguida, foi avaliada a instalação de um novo reator manobrável na barra de 500 kV da SE Tijuco Alto. Verificou-se que seria necessário um reator de pelo menos 250 Mvar para que a auto-excitação ocorresse com valores elevados de frequência, superiores aos valores de ajuste de sobrefrequência normalmente adotados. Apesar de ser uma medida eficaz, a utilização de reatores indiscriminadamente no sentido de combater a auto-excitação pode resultar em restrições operativas indesejáveis, provocando efeitos adversos no perfil de tensão do sistema e nos limites de transferência de potência. Uma outra alternativa consiste na implementação de um sistema de proteção que comande primeiramente a abertura dos disjuntores localizados na SE Tijuco Alto quando da operação das proteções que atuam nos disjuntores do terminal de Ibiúna.

5.0 - CONCLUSÕES

Foram apresentados os resultados dos estudos de integração da UHE Tijuco Alto, necessários para atender os requisitos previstos na fase de Solicitação de Acesso. Os estudos de regime permanente, energização, sincronização e religamento tripolar no sistema de transmissão associado à usina mostraram que a UHE Tijuco Alto não apresenta influência significativa que demande a necessidade de reforços no sistema de transmissão ou que imponha restrições à operação do SIN.

Nos estudos de rejeição de carga, foram identificadas as configurações e contingências que expõe as unidades geradoras da UHE Tijuco Alto ao risco de auto-excitação e CCC, bem como foram avaliadas algumas medidas preventivas para mitigar o problema. É recomendado que as análises sejam aprofundadas utilizando programas de análise de transitórios eletromagnéticos, como o ATP, o qual permite a representação detalhada de pára-raios e da saturação de transformadores e reatores.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o Engenheiro Paulo Max Portugal, da Eletrobrás, pelas discussões técnicas ao longo desenvolvimento do trabalho.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) N. J. P. de Macedo, F. M. da Fonseca, G. D. de Cerqueira, “Análise do Impacto da Conexão da UHE Tijuco Alto – CBA à Rede Básica a um Circuito da LT 500 kV Ibiúna – Bateias – Parte 3: Modelos dos Sistemas de Controle da Usina de Tijuco Alto para o Programa ANATEM”, Março de 2006.
- (2) CEPEL, Manual do Usuário - Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM, V09, Rio de Janeiro, Brasil, Dezembro de 2005.
- (3) M. G. Sereno, W. M. Mota Jr., “Análise do Impacto da Conexão da UHE Tijuco Alto – CBA à Rede Básica a um Circuito da LT 500 kV Ibiúna – Bateias – Parte 1: Curto-Circuito e Regime Permanente”, Janeiro de 2006.
- (4) F. C. Jusan, C. L. Rodrigues, M. A. P. Fontes, “Análise do Impacto da Conexão da UHE Tijuco Alto – CBA à Rede Básica a um Circuito da LT 500 kV Ibiúna – Bateias – Parte 2: Energização, Religamento, Sincronização e Rejeição”, Março de 2006
- (5) N. L. Marques, A. Pedroso, J. B. Dos S. Silva, S. T. Ferreira, “Grandes Cargas Capacitivas Aplicadas às Máquinas Síncronas”, VII SNPTEE – VII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, DF, 1984.
- (6) A. L. Faria, R. J. G. C. da Silva, “Limitações Operativas Causadas por Auto-Excitação em Máquinas Síncronas”, XVI SNPTEE – XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, SP, 2001.