



SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GAT-06
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

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

BENEFÍCIOS DA REPRESENTAÇÃO DO CONTROLE AUTOMÁTICO E DISCRETO DE BANCOS DE CAPACITORES/REACTORES E DE LTC SISTÊMICOS EM ESTUDOS DE SEGURANÇA DE TENSÃO

João A. Passos Filho¹
CEPEL

Luiz Cláudio de A. Ferreira²
ONS

Nelson Martins
CEPEL

Antônio C. Zambroni de Souza
UNIFEI

RESUMO

Este artigo apresenta os benefícios de uma melhor representação do chaveamento automático e discreto de bancos de capacitores/reactores e da atuação de LTC. Esta representação é feita em um programa computacional de fluxo de potência visando análises de segurança de tensão.

A atuação destes dispositivos de controle provoca grande impacto na operação do sistema e sua representação deve ser feita de forma mais fidedigna à prática operativa. Esta modelagem é feita atendendo tanto a uma lógica de controle baseada em uma estratégia pré-definida, quanto a uma faixa de tensão, diferenciando-se das lógicas baseadas em um valor específico de tensão, como normalmente são representados aqueles dispositivos na formulação tradicional do problema.

Um caso prático de 2821 barras e 4015 circuitos, do ONS, é utilizado para avaliar o impacto destas representações na margem de carregamento da área Rio de Janeiro/Espírito Santo.

PALAVRAS-CHAVE

Chaveamento Automático de Bancos de Capacitores / Reactores, Fluxo de Potência Continuado, Segurança de Tensão, Transformadores do tipo LTC.

1.0 - INTRODUÇÃO

Ocorrências de colapso de tensão mostraram que as análises de tempo real e estudos de curto prazo devem avaliar o desempenho do sistema durante todo o processo de elevação de carga a partir de um ponto de operação conhecido [1]. Este processo apresenta

variação lenta o suficiente para permitir correções através da execução de manobras de dispositivos lentos de controle.

O chaveamento de grandes blocos de compensação *shunt* e/ou atuação manual em LTC de transformadores com característica de operação sistêmica, são exemplos de ações lentas de controle que requerem coordenação. Isso ocorre em função das interações entre estes controles e do conseqüente impacto adverso associado. Estes dispositivos de controle costumam atender a uma estratégia operativa baseada em faixas de tensão, e normalmente provocam forte impacto no sistema quando manobrados, dificultando o processo de convergência de programas de fluxo de potência quando da consideração da atuação conjunta destes controles.

Ferramentas de análise estática vêm sendo empregadas nas análises de segurança de tensão, complementando as simulações dinâmicas [2][3]. Isso permite que as condições desta segurança em um ponto de operação conhecido, ou em um ponto de operação futuro sejam melhor sinalizadas [4][5].

O sistema elétrico brasileiro possui dispositivos de controle complexos, com grandes áreas importadoras de energia, que são supridas através de grandes troncos de transmissão e, muitas vezes, apresentando pequena margem de carregamento em algumas situações de carga e/ou geração. Em sistemas com estas características, a análise estática apresenta limitações na simulação correta da atuação dos dispositivos de controle de tensão, durante condições de carregamento elevado, devido principalmente ao mau condicionamento da matriz Jacobiana [6].

Entretanto, restrições econômicas e o aumento da complexidade, tanto dos dispositivos de controle quanto da operação do sistema, apontam para a

¹ Av. Um s/nº – Cidade Universitária – CEP: 21941-590 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL (jopass@cepel.br)

² Rua Real Grandeza, 219 – 406E - CEP: 22283-900 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL (lclaudio@ons.org.br)

necessidade de desenvolvimento de ferramentas que permitam uma melhor simulação do comportamento do sistema na presença destes dispositivos [2][3][5][7][8].

Este trabalho mostra os benefícios de uma melhor representação do chaveamento discreto de bancos de capacitores/reatores e de LTC de transformadores com característica de operação sistêmica. Os resultados apresentados tratam da elevação da carga do sistema em um caso real do sistema elétrico brasileiro, tendo-se como foco a área Rio de Janeiro/Espírito Santo.

A seção 2 descreve o modelo matemático utilizado para representação de controles no problema de fluxo de potência; a seção 3 discorre sobre a área estudada, apresentando seus recursos e a metodologia empregada; os resultados e benefícios de uma melhor representação destes recursos são apresentados e analisados na seção 4, enquanto a seção 5 apresenta as conclusões do artigo.

2.0 - MODELAGEM DE DISPOSITIVOS DE CONTROLE NO FLUXO DE POTÊNCIA

Uma representação flexível de dispositivos de controles no fluxo de potência é obtida acrescentando-se, ao sistema original, equações que descrevem a ação de cada controle e a variável controlada associada [7]. Este sistema de equações aumentado é descrito em (1):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial V} & \frac{\partial y}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (1)$$

O modelo matemático adotado para representação dos dispositivos de controle, abordados neste trabalho, consiste na adição de uma equação de controle ao sistema de equações original. Desta forma, a nova matriz Jacobiana tem maior dimensão do que a matriz Jacobiana original, conforme mostrado na equação (1).

Para a representação do chaveamento automático da compensação *shunt* variável, a susceptância do equipamento é considerada uma nova variável de estado [7][8]. Para o controle de tensão feito através de transformadores do tipo LTC, o *tape* do transformador é considerado como variável de estado adicional [7].

Considerando uma barra k cuja tensão deve ser controlada através do chaveamento automático de dispositivos *shunt* localizados na barra m , tem-se [8]:

$$\Delta x = \Delta b_m^{sh} \quad (2)$$

Para o caso do controle de tensão na barra k ser feito através do *tape* de um transformador, e ainda adotando-se este equipamento conectado entre as barras m e n , a nova variável de estado é [7]:

$$\Delta x = \Delta a_{mn} \quad (3)$$

A equação adicional mostrada em (1) é relativa à barra onde a tensão é controlada para ambos os casos. Logo, tem-se que:

$$\Delta y = V_k^{esp} \Delta V_k \quad (4)$$

onde,

V_k :	Tensão na barra k em coordenadas polares
x :	Variável de controle
V_k^{esp} :	Valor especificado da tensão controlada na barra k
Δy :	Erro da tensão controlada na barra m
a_{mn} :	<i>Tape</i> do transformador conectado entre as barras m e n

É importante destacar que na modelagem adotada, a tensão controlada deve permanecer dentro de uma faixa de operação permitida, e não ser mantida em um valor fixo. Desta forma, a estrutura de controle adicional à matriz Jacobiana, mostrada em (1), somente fará parte do processo de solução quando o valor da tensão controlada estiver fora de sua faixa de operação permitida.

O valor do elemento *shunt* varia de forma discreta tal como em sistemas reais, onde são chaveados bancos de capacitores/reatores de valores fixos. Como no modelo matemático a variação é feita de forma contínua, após a convergência do processo iterativo, há necessidade de se ajustar o tamanho do banco para um valor discreto. Este procedimento é feito através de uma análise de sensibilidade de tensão simplificada com o objetivo de preservar o perfil de tensão na barra controlada. Em seguida, retoma-se o processo de solução incluindo-se o valor discreto do banco, sem a representação do controle contínuo do banco *shunt*. Este procedimento pode eventualmente ocasionar valores finais da tensão controlada ligeiramente fora da faixa de operação permitida, mas com resultados ainda bem satisfatórios.

3.0 - APLICAÇÃO E METODOLOGIA

O modelo matemático, implementado no programa de análise de redes - ANAREDE, foi testado na área Rio de Janeiro/Espírito Santo. Esta área foi escolhida para teste por ter seu desempenho fortemente influenciado pela coordenação entre os diversos recursos de controle internos e externos à área e, ainda devido a sua característica de grande centro de carga com sistema de suprimento radial (Figura 1).

A implementação das lógicas destes recursos de controle, caracterizada pela escolha das barras controladas e faixas de tensão, refletiram a experiência acumulada na operação do sistema, respeitando-se todos os limites operativos. Para se verificar a eficácia e robustez do método proposto, foram indisponibilizados dois importantes recursos de controle de tensão da área: a Usina Termonuclear Angra 2 (1350 MW; -600/600 Mvar, aproximadamente) e um banco de capacitores de 200 Mvar na SE Tijuco Preto.

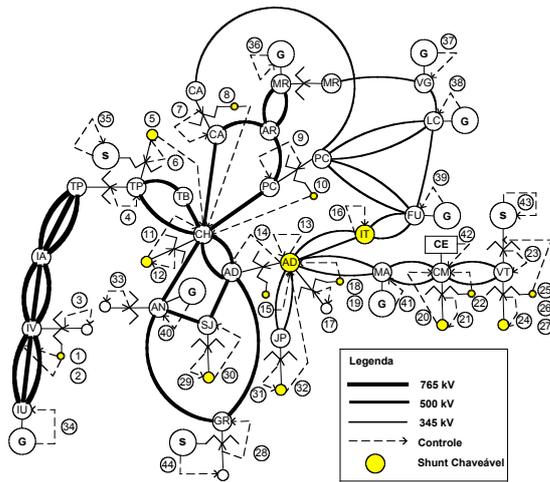


FIGURA 1 – ÁREA RIO DE JANEIRO/ESPÍRITO SANTO

A Tabela 1 detalha, dentre os 44 controles apontados na Figura 1, as compensações *shunt* chaveadas discretamente. A coluna “Valor Inicial Caso Base” lista a compensação *shunt* já conectada ao sistema no caso base, dado como condição inicial para a lógica de controle. A coluna “Valores Após Ajuste” mostra a compensação *shunt* que foi remanejada pelo ajuste coordenado dos *shunts* chaveados e *tapes* dos *LTC* da área, sem nenhum crescimento de carga.

TABELA 1 – COMPENSAÇÃO *SHUNT* CHAVEÁVEL E GERAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA

ID	Limite (Mvar)	Valor Inicial Caso Base	Valores Após Ajuste
01	3 x (-180)	- 180	- 180
02	3 x (-180)	- 180	- 180
08	2 x (-50)	- 100	- 100
10	2 x (-50)	- 100	- 100
05	5 x 200	1000	1000
16	1 x 200	0	0
13	2 x 162,5	0	0
25	3 x 10	0	20
26	3 x 10	0	20
27	3 x 10	0	20
30	2 x 250	0	0
20	2 x 50	0	50
32	2 x 100	0	100
12	2 x 75	0	0
15	3 x 8	0	24
18	1 x 40	0	40
19	1 x 40	0	40
22	3 x 10	0	30
35	-200/300	-80	-85
40	-360/360	-90	-100
43	-30/60	15	-5
44	2 x (-150/200)	-80	-200

As diferenças entre o caso base (inicial) e o obtido após os ajustes dos dispositivos de controle (final), devem-se à lógica de controle implementada, privilegiando a reserva de potência reativa em máquinas importantes para o desempenho dinâmico da área (controles 40, 43 e 44).

Utilizando o módulo de fluxo de potência continuado [6] do programa ANAREDE, a lógica de controle proposta foi então, mais uma vez empregada durante o crescimento da carga ativa e reativa na área, mantendo-se o fator de potência inicial e direção de crescimento. O aumento de geração necessário para fazer frente ao aumento de carga e perdas foi concentrado nas usinas geradoras localizadas em São Paulo, conectadas à área estudada através dos troncos de 765 e 500 kV.

A literatura aponta como desvantagem dos métodos estáticos a dificuldade em garantir que os resultados obtidos reflitam a realidade operativa. Nas simulações de rampas de carga, a atuação e a interação de dispositivos lentos devem ser considerados em função dos longos tempos envolvidos no processo.

A modelagem mais adequada dos controles nas simulações dinâmicas de médio e longo termo, permite uma melhor representação da atuação dos dispositivos e de suas possíveis iterações.

Neste artigo, de forma a apenas garantir o tempo hábil para as atuações manuais, no recurso mais lento de controle durante o processo de carregamento do sistema – as manobras, por parte dos operadores do sistema, dos *LTC* sistêmicos - foi calculado o mínimo incremento de carga no fluxo de potência continuado de forma a atender o tempo necessário para estas operações.

Assim, admitindo-se um tempo máximo de 3 minutos para a conclusão de manobras em *LTC* sistêmicos e, verificada em tempo real, em taxa máxima de variação de carga de 10 MW/min, o incremento mínimo de carga no fluxo de potência continuado deverá ser 30 MW (cerca de 0,5% da carga da área), de forma a garantir o tempo para utilização do recurso mais lento a qualquer momento.

4.0 - RESULTADOS

A Figura 2 compara resultados das curvas PV de uma barra importante da área, obtidas para níveis crescentes de utilização dos recursos de controle da área estudada.

A Curva 1 apresenta a margem de carregamento levando-se em conta somente a atuação dos *LTC* representados como automáticos nos casos base (não necessariamente automáticos no campo, mas representados assim, por conveniência de ajustes nos estudos e por não provocarem grande impacto durante o processo numérico de convergência). Estes *LTC* são os identificados na Figura 1 pelos controles 03, 12, 17, 29, 31, 33, além dos *LTC* 21 e 24, os quais são realmente automáticos.

A Curva 2 considera a atuação dos *LTC* sistêmicos, manobrados manualmente pelos operadores do sistema, além dos *LTC* automáticos no campo (21 e 24). Nesta curva, a lógica de atuação dos *LTC* é representada como na operação real: *LTC* não automáticos (todos na Figura 1, exceto os *LTC* 21 e 24), são manobrados atendendo lógica de atuação por faixa de tensão.

A Curva 3 apresenta a margem de carregamento considerando as atuações dos *LTC* da Curva 1 em

conjunto com o chaveamento discreto dos bancos de compensação *shunt*.

A margem de carregamento quando se considera a atuação real dos *LTC* do sistema em conjunto com o chaveamento discreto dos bancos de compensação *shunt*, é apresentada na Curva 4.

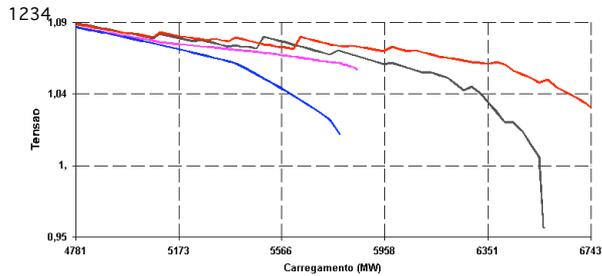


FIGURA 2 – CURVAS PV DA BARRA DE ADRIANÓPOLIS (AD) EM 500 kV

A Figura 2 mostra como a representação incompleta de recursos de suporte de tensão e potência reativa pode prejudicar as análises de segurança de tensão, obtendo resultados conservativos sobre a margem de carregamento do sistema. Esta figura também mostra que a representação inadequada da atuação dos *LTC*, durante o crescimento de carga, pode mascarar a observação do comportamento da tensão (Curva 3), indicando uma queda acentuada de tensão na região próxima ao limite.

A margem de carregamento de 41% obtida através da representação completa de todos os recursos de controle de tensão no programa ANAREDE (Curva 4) é muita próxima àquela de 43%, obtida por um programa de fluxo de potência ótimo – FLUPOT, escolhendo-se por função objetivo o máximo carregamento da área e considerando-se os mesmos critérios, recursos de controle e restrições. Esta proximidade de resultados serve como validação da metodologia proposta, uma vez que o método de otimização utilizado vem mostrando robustez e capacidade de determinar os limites de atendimento do sistema em regime permanente. Esse atendimento é obtido ao mesmo tempo em que todas as restrições do sistema são respeitadas [9].

A Tabela 2 mostra o chaveamento (“D”, desliga; “L”, liga) dos bancos de compensação *shunt* e atuação (“A”) em *LTC* durante o processo de carregamento da área. As sinalizações de atuação de *tapes*, em amarelo, acusam o esgotamento deste recurso. Observa-se nesta tabela que todos os recursos são utilizados respeitando-se o passo mínimo calculado (0,5% da carga, ou 30 MW) e garantindo tempo hábil para acionamento dos controles mais lentos. O carregamento de 6711 MW é o valor máximo obtido com o passo mínimo. Este valor é muito próximo do valor de máximo atendimento da área (6743 MW, na Figura 2). A margem adicional de cerca de 30 MW, foi conseguida através do artifício da redução progressiva do passo de incremento de carga, como recurso para convergência do fluxo de potência nas vizinhanças do limite de máximo carregamento da área.

TABELA 2 – UTILIZAÇÃO DOS RECURSOS DISCRETOS DE SUPORTE DE TENSÃO DURANTE O CRESCIMENTO DE CARGA

Passo (MW)	Shunt		LTC											
	R	C	I	T	T	C	P	C	A	A	V	G	S	J
	E	A	V	P	P	A	C	H	D	D	T	R	J	J
	A	P	5	5	3	3	3	1	3	1	3	1	1	1
4781														
5000	D				A									
5101		L												A
5178		L												
5308	D			A										
5388	D	L			A									A
5442		L												
5636		L		A										
5664									A					
5836		L												
5895				A										
5984		L												
6074	D		A	A										
6104						A								
6196						A						A		
6227				A										
6258						A								
6290				A	A							A		
6321						A								
6353				A					A	A	A			
6384		L												
6416				A	A									
6448			A	A	A	A	A	A	A	A				
6513											A			
6578		L									A			
6644											A			
6677									A	A				
6711			A	A									A	

As Figuras 3, 4 e 5 mostram as curvas PV dos principais barramentos da área. Nestas figuras, as linhas tracejadas destacam que os limites superiores de tensão são respeitados durante a utilização dos recursos chaveados, preservando a integridade dos equipamentos do sistema. As linhas pontilhadas demarcam os valores inferiores da faixa de tensão para o chaveamento (desligar, em azul, para reatores; ligar, em vermelho, para capacitores) de cada *shunt* assinalado ou para manobra de *LTC* (na cor preta).

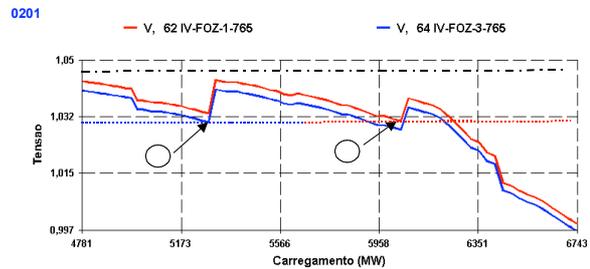


FIGURA 3 – CURVAS PV DAS BARRAS DE CAPACITORES SÉRIE DE IVAIPORÃ (IV) EM 765 kV

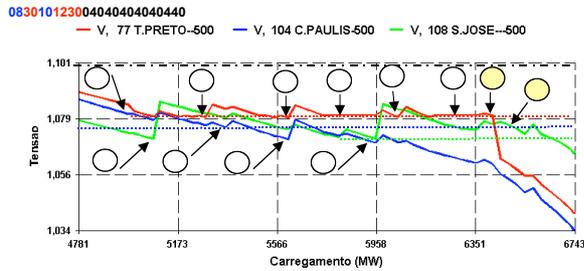


FIGURA 4 – CURVAS PV DAS BARRAS DE T. PRETO (TP), C. PAULISTA (CP) E S. JOSÉ (SJ) EM 500 KV

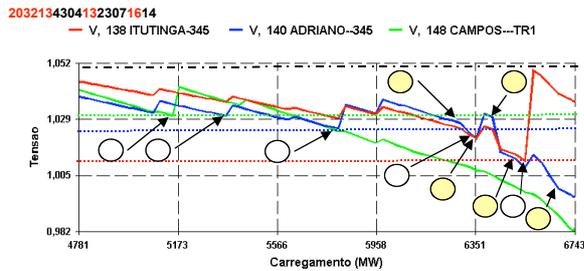


FIGURA 5 – CURVAS PV DAS BARRAS DE ITUTINGA (IT), ADRIANÓPOLIS (AD) E CAMPOS (CM) EM 345 KV

Nas Figuras 4 e 5 estão destacados, em amarelo, os pontos de esgotamento dos LTC e de geração de potência reativa dos principais geradores, durante o processo de carregamento da área.

Na Figura 5, nota-se que a redução dos recursos de controle de tensão da área inicia-se pela limitação de geração de potência reativa do Compensador Síncrono de Vitória (43), provocando, por sua vez, o esgotamento do LTC do transformador ligado a este equipamento (23). A queda de tensão no tronco de 345 kV a partir de Adrianópolis, provocada pelo esgotamento de recursos em Vitória, força a entrada do último banco de capacitores de 162,5 Mvar de Adrianópolis (13) e a atuação do LTC, até o esgotamento, da transformação 765/500 kV de Tijuco Preto (04), como recurso para manutenção do perfil de 500 kV da área.

A partir deste momento (passo 6384 MW, da Tabela 2), há a solicitação de atuação de vários LTC no sentido de recuperar o perfil de suprimento em 500 kV da área. Isso provoca o esgotamento do LTC da transformação 500/345 kV de Campinas (07) e da geração de potência reativa da usina de Angra (40), com a conseqüente repercussão destas atuações no setor de 345 kV, até o valor de chaveamento do banco de capacitores de 200 Mvar de Itutinga (16). É importante notar que o valor de referência de tensão em 1,010 pu, para chaveamento do banco de capacitores de Itutinga, foi escolhido de forma a respeitar, após sua inserção, o limite superior de tensão no setor de 345 kV (1,050 pu) e preservar equipamentos associados.

O processo de atuação dos controles finaliza com o esgotamento do LTC da transformação 500/345 kV de Adrianópolis (14) e na solicitação, pela primeira vez, do LTC 500/138 KV de Grajaú (passo 6711 MW, na Tabela 2). A influência da atuação do LTC de Grajaú na margem de carregamento da área já foi identificada

como potencialmente nociva ao desempenho do sistema em determinadas condições de carga e tensão [9].

O aumento da geração de potência reativa nas principais máquinas durante o carregamento da área, é apresentada na Figura 6. Vale observar que, a lógica adotada para utilização dos demais recursos de controle de tensão, privilegiou a reserva de potência nestas máquinas, de forma que seus limites fossem preferencialmente atingidos nas proximidades do valor de máximo carregamento.

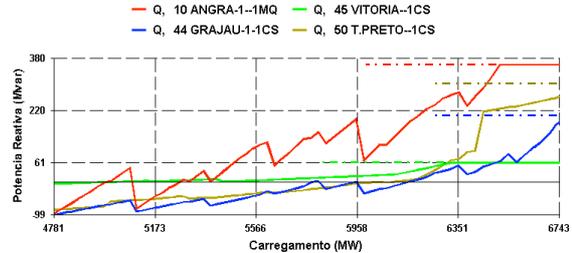


FIGURA 6 – POTÊNCIA REATIVA GERADA EM ANGRA (40), GRAJAÚ (44), VITÓRIA (43) E T. PRETO (35)

A Figura 7 apresenta, para as principais barras de transmissão da área, a evolução da margem de potência reativa em função do carregamento da área. Estas margens foram obtidas através do levantamento das curvas QV para os últimos incrementos de carga.

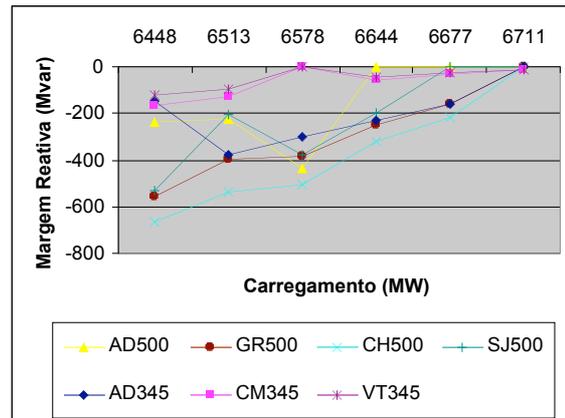


FIGURA 7 – MARGEM REATIVA DAS PRINCIPAIS BARRAS DE TRANSMISSÃO DA ÁREA RJ / ES

Para o carregamento máximo de 6711 MW, obtido com o último incremento de passo mínimo calculado (0,5 %), verifica-se que as margens de potência reativa nas principais barras de transmissão da área estão todas muito próximas de zero. A partir deste ponto, o pequeno acréscimo de carga (30 MW) obtido provoca esgotamento da margem de potência reativa de barras de níveis de tensão cada vez mais elevados, até comprometer o tronco de Itaipu (IU). Essa observação decorre da margem de carga extra ser conseguida à custa do recurso de redução progressiva do passo do incremento de carga no método da continuação.

A Figura 8 mostra a seqüência de barras que apresentam esgotamento da potência reativa, a partir

