



VII SEPOPE

21 a 26 de Maio de 2000
May - 21st to 26th - 2000
CURITIBA (PR) - BRASIL

VII SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA

VII SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING

FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO E ANÁLISE MODAL NA AVALIAÇÃO E MELHORIA DA ESTABILIDADE DE TENSÃO DO SISTEMA SUL-SUDESTE

Julio C. R. Ferraz
COPPE/UFRJ¹, CEPEL²

Nelson Martins
CEPEL

Herminio J.C.P. Pinto
CEPEL

Djalma M. Falcão
COPPE/UFRJ

SUMÁRIO

Este trabalho mostra a utilização da análise modal e do método de continuação em estudo de estabilidade de tensão de três áreas do Sistema Interligado Sul-Sudeste. Realizada no ponto de carregamento máximo, obtido através do fluxo de potência continuado, a análise modal é bastante útil na determinação de medidas para reforço do sistema, proporcionando aumento considerável na margem de carregamento.

Keywords: voltage stability, continuation method, modal analysis.

1. INTRODUÇÃO

A solução do fluxo de potência, nas proximidades do ponto de carregamento máximo, é dificultada devido a condição de singularidade da matriz jacobiana do sistema neste ponto de máximo. A utilização do método de continuação permite a obtenção de todas as soluções reais do fluxo de potência num sistema, inclusive no ponto de carregamento máximo. O problema de fluxo de potência é alterado, permitindo que vários pontos de equilíbrio para um dado carregamento sejam encontrados. O perfil de tensão nas barras com a variação do carregamento do sistema é então obtido [1, 2, 3, 4].

Realizada no ponto de carregamento máximo do sistema, a análise modal fornece informações para determinação das medidas mais efetivas para reforço do sistema [5, 6]. Para sistemas de grande porte, métodos de solução parcial do problema de autovalores devem ser empregados. Para a obtenção do modo crítico associado a uma determinada barra ou área de interesse devem ser utilizados algoritmos de cálculo de pólos dominantes [7,8].

Essas técnicas de análise de estabilidade de tensão foram desenvolvidas e incorporadas ao programa de análise de redes (ANAREDE/CEPEL) utilizado pela maioria das concessionárias de energia do Brasil [9, 10]. Os resultados obtidos para o Sistema Interligado Sul-Sudeste mostram as vantagens da utilização conjunta do fluxo de potência continuado e da análise modal em estudos práticos de estabilidade de tensão de sistemas interligados. As medidas de reforço indicadas pelo método mostraram-se efetivas, aumentando consideravelmente a margem de carregamento do sistema.

2. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CONTINUAÇÃO E DA ANÁLISE MODAL AO ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

2.1 Método de Continuação

Na primeira etapa do método de continuação é realizada uma estimativa linear, a partir de um ponto de operação, de um novo ponto em que o carregamento do sistema foi alterado. Esta estimativa é realizada na direção tangente à função no ponto de operação inicial e com o incremento de carga pré-definido. A primeira etapa, portanto, consiste no cálculo do vetor tangente (vetor de diferenciais) e da estimação dos novos estados.

Esta estimativa linear é utilizada para dar partida ao método iterativo de obtenção do novo ponto de operação. O método de continuação resolve o problema de fluxo de potência convencional acrescido de uma equação.

Esta equação adicional especifica o valor de uma das variáveis de estado (o parâmetro de continuação). A solução correta é encontrada da seguinte forma: para um valor especificado de um dos estados (parâmetro de

¹ COPPE/UFRJ - Caixa Postal 68564 - Rio de Janeiro - RJ - 21945-970 - BRASIL

² CEPEL - Caixa Postal 68007 - Rio de Janeiro - RJ - 21944-970 - BRASIL

continuação cujo valor foi anteriormente estimado), calcula-se as outras variáveis de estado.

O sistema de equações é resolvido, nesta segunda etapa, utilizando-se o método de Newton-Raphson. A matriz jacobiana desse sistema, diferentemente do que acontece com o sistema original, não é singular no ponto de carregamento máximo [1].

2.2 Análise Modal

A natureza do fenômeno de estabilidade de tensão de um sistema pode ser mais facilmente identificada pela análise dos autovalores da matriz jacobiana reduzida J_R^Q definida em (1). Esta matriz é obtida supondo que haja variação incremental apenas de potência reativa no sistema. Assim, temos a relação entre o vetor de variação incremental de potência reativa e o vetor de variação do módulo da tensão nas barras. A matriz J_R^Q é denominada Matriz de Sensibilidade Q-V e seus autovalores para casos reais não possuem parte imaginária considerável [11].

$$\begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$(J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}) \Delta V = \Delta Q \Rightarrow \Delta Q = J_R^Q \Delta V$$

Podemos observar, utilizando a fórmula de Schur (2), que a matriz jacobiana completa J se torna singular quando a matriz J_R^Q (ou $J_{P\theta}$) se torna singular. Em estudos de estabilidade de tensão, considerando que não há problemas quanto à estabilidade angular do sistema, tem-se que $\det[J_{P\theta}] \neq 0$. Assim, a matriz jacobiana completa J se torna singular quando a matriz reduzida J_R^Q se torna singular [2].

$$J = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \Rightarrow \det[J] = \det[J_{P\theta}] \cdot \det[J_R^Q] \quad (2)$$

$$\text{onde, } J_R^Q = (J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV})$$

Podemos decompor a matriz jacobiana reduzida nas matrizes Λ (matriz diagonal dos autovalores de J_R^Q), W (matriz de autovetores à esquerda) e U (matriz de autovetores à direita), onde,

$$J_R^Q = U \cdot \Lambda \cdot W \quad (3)$$

Como é possível normalizar os autovetores tal que $W^{-1} = U$, temos a partir de (1) e (3),

$$J_R^{Q^{-1}} = U \cdot \Lambda^{-1} \cdot W \quad (4)$$

$$\Delta V = U \cdot \Lambda^{-1} \cdot W \cdot \Delta Q$$

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \frac{u_i w_i^T}{\lambda_i} \cdot \Delta Q = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\lambda_i} \cdot \Delta Q$$

onde u_i e w_i são, respectivamente, os autovetores à esquerda e à direita associados ao autovalor λ_i . A matriz P_i é definida como a matriz dos fatores de participação associados ao i -ésimo modo [5].

São definidos em (5) o vetor de variação modal da tensão (\underline{v}), o vetor de variação modal da potência reativa (\underline{q}) e a relação entre eles. Para $\text{Re}(\lambda_i) > 0$, os i -

ésimos componentes dos vetores da tensão modal e da potência reativa estão na mesma direção, ou seja, um incremento positivo de potência reativa provoca um aumento na tensão da barra, indicando que o sistema está num ponto de operação estável. Por outro lado, no caso de $\text{Re}(\lambda_i) < 0$, um incremento de potência reativa causa um decréscimo de tensão na barra, indicando que o sistema está operando num ponto instável. Na situação onde $\text{Re}(\lambda_i) = 0$, o sistema atingiu o seu limite de estabilidade de tensão, já que para qualquer pequena variação de tensão é necessária uma injeção imensa de potência reativa na barra.

$$\Delta V = U \cdot \Lambda^{-1} \cdot W \cdot \Delta Q$$

$$W \cdot \Delta V = \Lambda^{-1} \cdot W \cdot \Delta Q \Rightarrow \begin{cases} \underline{v} = W \cdot \Delta V \\ \underline{q} = W \cdot \Delta Q \end{cases} \quad (5)$$

$$\underline{v} = \Lambda^{-1} \cdot \underline{q} \Rightarrow v_i = \frac{1}{\lambda_i} q_i$$

Em [8] é mostrado que os resíduos associados ao modo de interesse de uma determinada função de transferência, fornecem uma indicação aproximada dos locais onde medidas para reforço do sistema são mais efetivas.

Neste artigo será utilizado o conjunto de funções de transferência $\Delta V^i / \Delta Q^i_{shunt}$, $i = 1, \dots, nk$, sendo nk o número total de barras do sistema. A lista de resíduos dessas funções de transferência, calculadas para o modo de interesse, pode ser usada na determinação aproximada das barras mais adequadas para a instalação de um compensador síncrono ou de um outro equipamento para suporte de tensão.

A ordem elevada da matriz J_R^Q num sistema de grande porte impossibilita o cálculo de todos seus autovalores. A análise modal em sistemas elétricos de grande porte é viabilizada pela utilização de métodos de solução parcial desse problema, como o algoritmo de múltiplos pólos dominantes. O algoritmo *DPSE (Dominant Pole Spectrum Eigensolver)* determina, de maneira simultânea, um número pré-determinado de autovalores dominantes em uma dada função de transferência, a partir de estimativas iniciais [7].

A utilização do algoritmo de pólos dominantes tem a vantagem de fornecer o modo crítico associado a uma área ou barra específica, devido à característica deste método de restringir a solução parcial do problema de autovalores a uma determinada região de interesse.

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados resultados de fluxo de potência continuado e análise modal para o Sistema Sul-Sudeste (Tabela 1) em diversas situações. Estas situações se diferem pela atuação ou não de controles, limites, pela área do sistema que tem seu carregamento incrementado, pelo aumento maior de potência reativa e pela retirada de circuitos importantes do sistema. São apresentados resultados para três áreas importantes do Sistema Sul-Susdete.

Tabela 1 – Características do sistema analisado.

Sistema	S – SE / Abril 1997
Barras	1758
Geradores	170
Circuitos	2507
Transformadores	694 (489 fixos e 205 LTCs)
Barras com Controle Remoto de Tensão	10
Carregamento Original	29585 MW / 13158 Mvar

Vale ressaltar que a análise modal convencional é baseada em métodos de iteração de sub-espço ou de Krylov, que convergem para um conjunto de autovalores de menor módulo [12]. Estes métodos podem não convergir para o modo de interesse associado à área do sistema responsável pela condição de máximo carregamento, devido à existência de outros autovalores de pequeno módulo. O modo crítico associado à área de interesse e os autovetores associados a este modo foram calculados neste trabalho utilizando-se o algoritmo DPSE, que não apresenta a deficiência dos métodos anteriores.

A Tabela 2 descreve os controles e limites utilizados na análise do sistema [9]. Nas seções seguintes eles serão referidos apenas pelas respectivas siglas (BPSI, QLIM, CTAP e CREM). Em todos os casos a modelagem de carga utilizada foi potência constante. Portanto, o ponto de máximo carregamento coincide com o ponto limite de estabilidade de tensão [4, 13, 14]. Como o objetivo é a obtenção do ponto máximo de carregamento, não foi feito o traçado de toda a parte inferior da curva PxV. Quando o carregamento, após ter atingido o ponto máximo, começa a diminuir o processo é interrompido.

Duas funções de transferência foram utilizadas pelo algoritmo DPSE na obtenção do modo crítico (Tabela 3). A primeira fornece o modo dominante relacionado a barra que leva o sistema ao colapso, enquanto a segunda pode ainda fornecer os outros modos dominantes da área de interesse.

Tabela 2 – Descrição das opções de controle utilizadas no fluxo de potência continuado.

Opção	Descrição
BPSI	Distribui a geração necessária para suprir o excedente de carga entre os geradores do sistema, de acordo com os fatores de participação determinados nos dados de entrada.
QLIM	Ativa os limites de geração de potência reativa nos geradores. Quando um limite é atingido, a tensão na barra deixa de ser controlada. Durante o processo é verificada a possibilidade da tensão voltar a ser controlada (<i>back-off</i> automático).
CTAP	Ativa o controle de tensão por variação automática de <i>tap</i> dos transformadores.
CREM	Ativa o controle de tensão por injeção remota de potência reativa.

Foi observado que não basta obter o modo de menor módulo, visto que nem sempre este é o modo dominante da área de interesse. São mostrados a seguir os fatores de observabilidade de variação de tensão do modo

crítico associado à área onde o carregamento está sendo incrementado e os resíduos da função de transferência $\Delta V^i/\Delta Q^i$ associada a este modo crítico.

Os fatores de observabilidade informam onde um dado modo é mais observável. A análise dos resíduos de funções de transferência do tipo $\Delta V^i/\Delta Q^i$, que representa a relação entre a potência reativa incremental injetada na barra “i” e a variação de tensão ocasionada, fornece uma primeira informação sobre aquelas barras PQ do sistema que são melhores candidatas para a instalação de equipamentos para controle de tensão [8].

Tabela 3 – Funções de transferência utilizadas pelo algoritmo DPSE na obtenção de modos críticos da área de estudo.

Função de Transferência	Entrada	Saída
$\Delta V/\Delta Q$ (Barra P)	Injeção de potência reativa na barra cujo módulo de tensão é parâmetro de continuação na região do ponto de carregamento máximo	Variação de tensão na barra cujo módulo de tensão é parâmetro de continuação no ponto de carregamento máximo
$\Delta V/\Delta Q$ (Área)	Injeção de potência reativa nas barras da área de interesse	Variação de tensão nas barras da área de interesse

3.1 Estudo da Área São Paulo

Nesta seção é apresentado o estudo da área São Paulo do Sistema Sul-Sudeste. Esta área abrange três empresas elétricas: ELETROPAULO, CPFL e CESP. Na Tabela 4 temos a participação carga/geração da área São Paulo no sistema S-SE/Abril 1997.

Tabela 4 – Participação da área São Paulo no sistema S-SE/Abril 97.

Área São Paulo em Relação ao Sistema S-SE / Abril 1997				
Empresa	Carga		Geração	
	P	Q	P	Q
ELETRO PAULO	32,04 %	18,98 %	0,35 %	6,70 %
CPFL	9,12 %	6,68 %	0,12 %	0,02 %
CESP	8,14 %	6,57 %	25,81 %	4,62 %
Total	49,30 % (14585 MW)	32,23 % (4241 Mvar)	26,28 % (8274 MW)	11,34 % (546 Mvar)

3.1.1 Obtenção do Carregamento Máximo

O ponto de carregamento máximo foi obtido através da utilização do método de continuação. Três situações, onde variou-se as opções de controle (vide Tabela 5), foram analisadas: 1) sem atuação dos limites de geração de potência reativa nos geradores e sem controle de tensão (seja por injeção remota de potência reativa ou por variação de *tap* dos transformadores com comutação automática); 2) com atuação de limites, mas sem atuação dos controles; 3) com atuação de limites e controles. Nos três casos a potência ativa necessária para suprir a carga excedente foi dividida entre os geradores da ELETROPAULO e da CESP. A Tabela 5 mostra a margem de carregamento obtida para cada simulação.

Tabela 5 – Margem de carregamento da área São Paulo.

Sistema Sul – Sudeste / Abril 1997			
Opções de Controle	Margem de Carregamento da Área São Paulo	Margem de Carregamento do Sistema	Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo
BPSI QLIM CTAP CREM	15,31 % (2233 MW)	7,55 %	Módulo da Tensão “ITAPETI2-138”
BPSI	9,98 % (1456 MW)	4,92 %	Módulo da Tensão “CACH----11.4”
BPSI QLIM	7,16 % (1044 MW)	3,53 %	Módulo da Tensão “CENTRO---20”

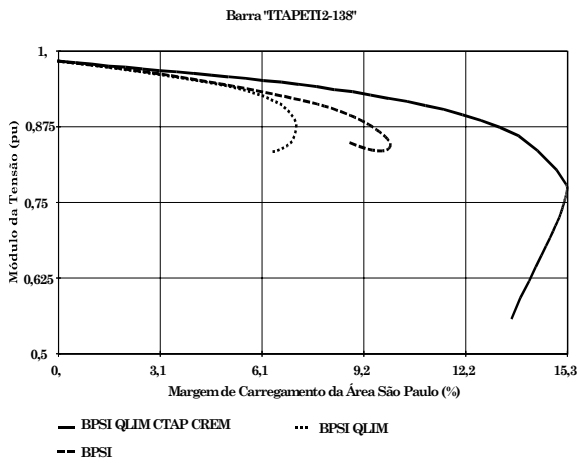


Figura 1 – Perfil de tensão na barra “ITAPETI2-138”.

O parâmetro de continuação nas proximidades do ponto máximo para cada uma das situações é descrito na Tabela 5. Na Figura 1, na Figura 2 e na Figura 3 podemos ver o perfil de tensão nas barras com maior variação em cada situação.

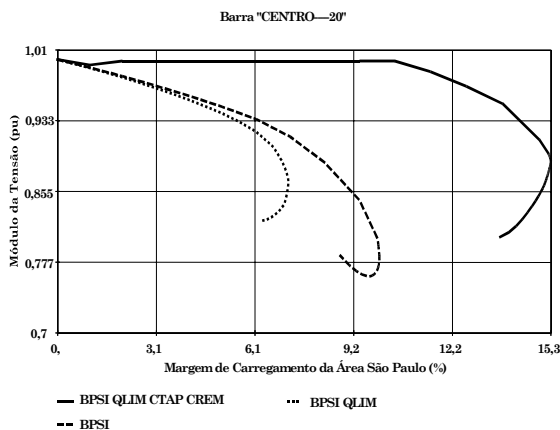


Figura 2 – Perfil de tensão na barra “CENTRO---20”.

Na Figura 2 podemos ver que o valor da tensão na barra “CENTRO---20” é mantido constante até um carregamento aproximadamente 10% maior que o inicial quando se utiliza as opções BPSI, QLIM, CTAP e CREM. A pequena variação existente no começo da curva está relacionada com os limites de atuação do comutador do transformador: uma variação na tensão menor do que 0,5% não altera a posição do tap. O

controle de tensão tem a característica de diminuir a impedância vista pela geração. O efeito benéfico do controle de tensão pode ser visto pelo aumento considerável no carregamento máximo alcançado. A Figura 4 mostra o perfil de tensão numa barra da área São Paulo.

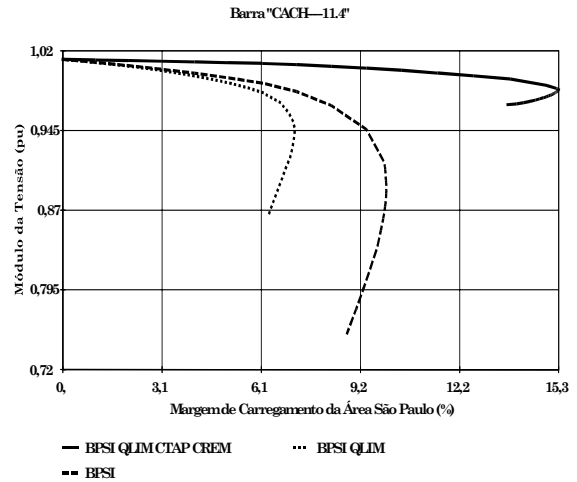


Figura 3 – Perfil de tensão na barra “CACH---11.4”.

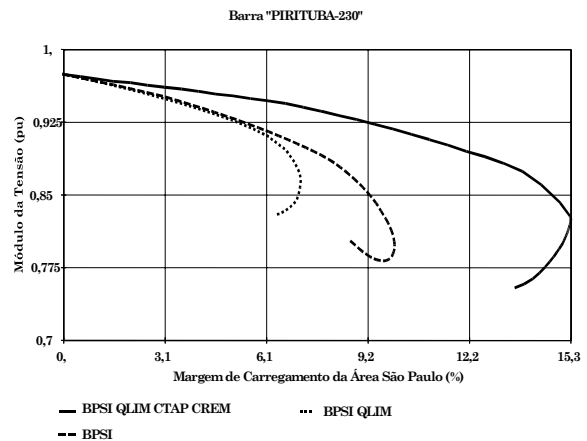


Figura 4 – Perfil de tensão na barra “PIRITUBA-230”.

3.1.2 Análise Modal

No ponto de carregamento máximo, calculado na seção anterior, foi feita a análise modal do sistema. O modo crítico, relacionado à área cuja carga foi incrementada (São Paulo), foi obtido utilizando o algoritmo DPSE a partir de um conjunto de estimativas iniciais iguais a: 0,001; 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 e 1,0.

Tabela 6 – Modo crítico associado à área São Paulo.

Opções de Controle	Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo	Margem de Carregamento da Área São Paulo
BPSI QLIM	Módulo da Tensão de “CENTRO---20”	7,16 % (1044 MW)
Modo Crítico		0,000198

Na Tabela 6 é mostrado o modo dominante calculado para as opções de controle: BPSI e QLIM. O modo crítico associado à área São Paulo é aquele com maior resíduo da função de transferência onde a entrada é a

variação de potência reativa nas barras da área e a saída é a variação de tensão nestas barras ($\Delta V/\Delta Q$ - barras da área São Paulo).

O histograma dos fatores de observabilidade de variação de tensão das barras do sistema, associados ao modo crítico, é apresentado na Figura 5. As barras que possuem os maiores valores estão relacionadas à área São Paulo. Com valores intermediários estão as barras das áreas São Paulo e Rio, indicando que o modo crítico é muito observável nestas duas áreas. Estas duas áreas têm um acoplamento elétrico elevado devido ao fato de grande parte da potência suprida ao Rio vir de São Paulo. As barras da CEEE (empresa elétrica do Rio Grande do Sul) apresentam variações de tensão pequenas, mostrando a pouca observabilidade no Rio Grande do Sul de um colapso na área São Paulo.

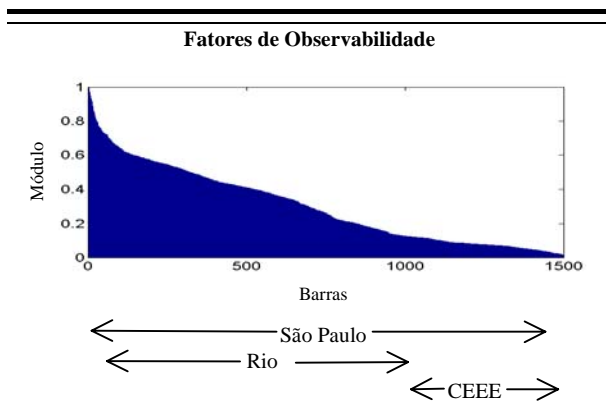


Figura 5 – Histograma dos fatores de observabilidade de ΔV associados ao modo crítico da área São Paulo ($\lambda=0,000198$).

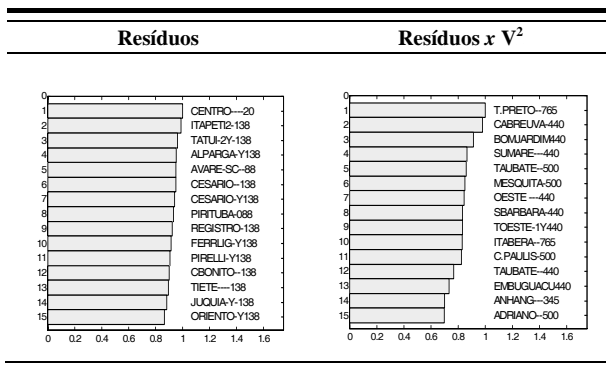


Figura 6 – Resíduos de $\Delta V^i/\Delta Q^i$ associados ao modo crítico da área São Paulo ($\lambda=0,000198$).

Na Figura 6 são apresentadas as listas de resíduos de funções de transferência $\Delta V^i/\Delta Q^i$, associada ao modo crítico. Estas listas estão ordenadas em decrescente de módulo, sendo mostrada apenas as quinze barras (de um total de 1758) mais importantes. Deve ser ressaltado que a lista de resíduos não possui escalonamento quanto ao nível de tensão nas barras. Isto atribui praticamente a mesma importância a barras com nível de tensão de 11,4 kV e barras com nível de tensão de 500 kV localizadas na região do colapso. Na Figura 6 duas listas são fornecidas, numa delas os valores originais são multiplicados pelo quadrado da tensão da barra, com o objetivo de solucionar o problema de escalonamento.

A partir das listas de resíduos foram realizadas análises para verificação do efeito da adição de equipamento de controle de tensão em barras escolhidas. Foi calculada a margem de carregamento adicional obtida com esta adição de controle de tensão. Foi calculado também o novo modo crítico do sistema obtido ao se converter a barra PQ de interesse em barra PV (equivalente à adição de controle de tensão na barra).

Tabela 7 – Análise de localização do equipamento de suporte de tensão (modo original $\lambda=0,000198$).

Barra PQ convertida em Barra PV	Margem de Carregamento Adicional (MW)	Pot. Reativa Gerada (Mvar)	Novo Modo Crítico
CABREUVA-440	1562	2528	0,094
BOMJARDIM440	1439	2470	0,095
EMBUGUACU440	1396	2662	0,092
SUMARE---440	885	1441	0,084
SBARBARA-440	819	1313	0,082
ANHANG---345	606	904	0,069
T.PRETO---765	434	445	0,073
TAUBATE---440	389	749	0,069
TAUBATE---500	384	808	0,078
TOESTE-1Y440	374	615	0,052
C.PAULIS-500	359	814	0,084
OESTE---440	353	574	0,050
ITABERA---765	218	595	0,046
ADRIANO---500	198	466	0,061
MESQUITA-500	46	85	0,018

Tabela 8 – Análise de localização do equipamento de suporte de tensão (modo original $\lambda=0,000198$).

Barra PQ convertida em Barra PV	Margem de Carregamento Adicional (MW)	Pot. Reativa Gerada (Mvar)	Novo Modo Crítico
PIRITUBA-088	301	309	0,046
CENTRO---20	135	128	0,025
CBONITO---138	87	105	0,026
ITAPETI2-138	73	84	0,023
TIETE---138	71	85	0,023
REGISTRO-138	68	76	0,019
ORIENTO-Y138	66	79	0,022
PIRELLI-Y138	66	76	0,021
FERRLIG-Y138	65	74	0,021
CESARIO-Y138	61	69	0,020
TATUI-2Y-138	59	64	0,019
ALPARGAY138	59	64	0,019
JUQUIA-Y-138	56	64	0,015
CESARIO---138	48	53	0,016
AVARE-SC-88	22	24	0,007

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da análise conduzida para as barras da lista de resíduos ponderada pelo quadrado do nível de tensão. A Tabela 8 mostra os resultados referentes a lista original dos resíduos. Analisando as duas tabelas nota-se que a ponderação da lista de resíduos possibilita a identificação de barras onde a adição de suporte de tensão é mais eficiente.

É observada também uma correlação, ainda que aproximada, entre a margem de carregamento adicional

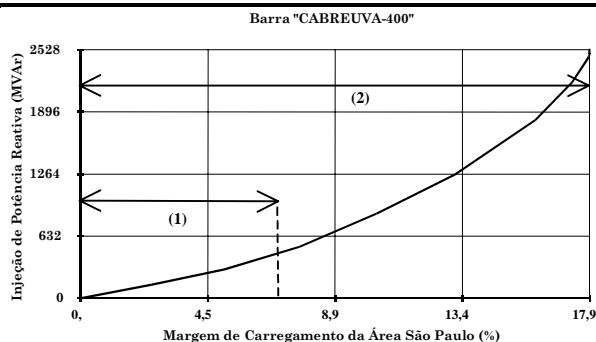
obtida e o valor do novo modo crítico. O novo modo é calculado no ponto original de máximo carregamento ($\lambda=0,000198$) convertendo-se cada barra PQ de interesse em barra PV. Quanto mais afastado o novo modo crítico estiver do modo original ($\lambda = 0,000198$), maior deverá ser a margem adicional de carregamento.

3.1.3 Adição de Suporte de Tensão

A escolha da barra para adição de equipamento de foi baseada na análise descrita na seção anterior. A barra “CABREUVA-440” foi a escolhida para ter sua tensão controlada.

Tabela 9 – Aumento da margem de carregamento da área São Paulo com o controle da tensão de “CABREUVA-440”.

Sistema Sul – Sudeste / Abril 1997		
Opções de Controle	Configuração Original	Controle de tensão em “CABREUVA-440”
BPSI QLIM		
Margem de Carregamento da Área São Paulo	7,16 % (1044 MW)	17,87 % (2606 MW)
Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo	Módulo da Tensão de “CENTRO---20”	Módulo da Tensão de “CACH----11.4”
Aumento da Margem de Carregamento		1562 MW
Potência Reativa Injetada em “CABREUVA-440” no Ponto de Carregamento Máximo		2528 Mvar



- (1) Margem de Carregamento Original - Vide Figura 8
- (2) Margem de Carregamento com Suporte de Tensão Adicional

Figura 7 – Influência da injeção de potência reativa na barra “CABREUVA-440” sobre a margem de carregamento da área São Paulo.

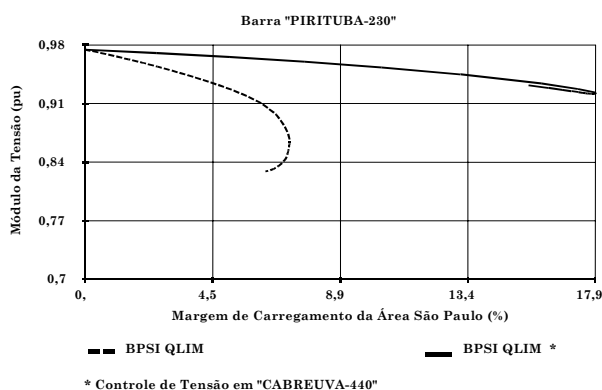


Figura 8 – Perfil de tensão na barra “PIRITUBA-230”.

Como mostrado na Figura 7 e na Tabela 9, a injeção de potência reativa na barra “CABREUVA-440” aumentou consideravelmente a margem de carregamento da área São Paulo dos 1044 MW originais para 2606 MW. Isto é obtido através da injeção adicional de 2528 Mvar de potência reativa na barra “CABREUVA-440”.

Poderia ser estipulado um limite máximo de geração de potência reativa por classe de tensão. Ao atingir esse limite, um novo ponto do sistema deve ser escolhido para adição de outro equipamento de suporte de tensão, caso se deseje aumentar mais a margem de carregamento. Outra possibilidade seria a utilização simultânea de diversos equipamentos de suporte de tensão em algumas das barras indicadas pela análise. Assim, mais de uma barra teria sua tensão controlada. A Figura 8 mostra o perfil de tensão numa barra da área São Paulo. Verifica-se uma melhora significativa após a adição de controle de tensão em “CABREUVA-440”.

3.2 Estudo da Área Rio

Esta seção apresenta o estudo da área Rio do Sistema Sul–Sudeste. Esta área abrange três empresas elétricas: LIGHT, CERJ e ESCELSA. Na Tabela 10 temos a participação carga/geração desta área no sistema S-SE/Abril 1997.

Tabela 10 – Participação da área Rio no sistema S–SE / Abril 1997.

Área Rio em Relação ao Total do Sistema S-SE / Abril 1997				
Empresa	Carga		Geração	
	P	Q	P	Q
LIGHT	13,25 %	4,01 %	2,19 %	7,48 %
CERJ	4,04 %	4,48 %	0,13 %	0,01 %
ESCELSA	3,09 %	2,62 %	0,51 %	1,02 %
Total	20,38 % (6029 MW)	11,11 % (1462 Mvar)	2,83 % (891 MW)	8,51 % (410 Mvar)

3.2.1 Obtenção do Carregamento Máximo

O ponto de carregamento máximo foi alcançado através da utilização do método de continuação. Na primeira parte do estudo foram analisadas cinco situações diferenciadas pela atuação dos limites de geração de potência reativa nos geradores, pela atuação do controle de tensão em barras e pelo incremento percentual de potência reativa (a carga da área Rio tem a característica de crescimento de potência reativa maior do que de potência ativa). Em todos casos a potência ativa necessária para suprir o aumento de carga foi dividida entre os geradores da ELETROPAULO e CESP. A Tabela 11 mostra a margem de carregamento obtida para cada simulação.

O parâmetro de continuação nas proximidades do ponto máximo para todas as situações analisadas foi o módulo da tensão na barra “CACH----11.4” (Figura 9), localizada na ESCELSA. Mais uma vez pode ser observado a atuação dos controles de tensão existentes proporcionando um aumento significativo na margem de carregamento. Os perfis de tensão numa barra da área Rio são mostrados na Figura 10.

Tabela 11 – Margem de carregamento da área Rio.

Sistema Sul – Sudeste / Abril 1997			
Opções de Controle	Margem de Carregamento da Área Rio	Margem de Carregamento do Sistema	Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo
Incremento Igual de Potência Ativa e de Potência Reativa			
BPSI QLIM CTAP CREM	6,21 % (374 MW)	1,26 %	Módulo da Tensão “CACH----11.4”
BPSI	3,04 % (183 MW)	0,62 %	Módulo da Tensão “CACH----11.4”
BPSI QLIM	2,46 % (148 MW)	0,50 %	Módulo da Tensão “CACH----11.4”
Incremento Maior de Potência Reativa ($\gamma_{Potência\ Reativa} = 1,25 \times \gamma_{Potência\ Ativa}$)			
BPSI QLIM CTAP CREM	5,97 % (360 MW)	1,22 %	Módulo da Tensão “CACH----11.4”
BPSI QLIM	2,37 % (143 MW)	0,48 %	Módulo da Tensão “CACH----11.4”

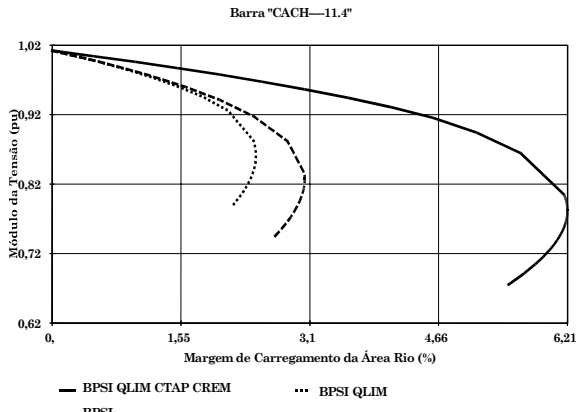


Figura 9 – Perfil de tensão na barra “CACH----11.4”.

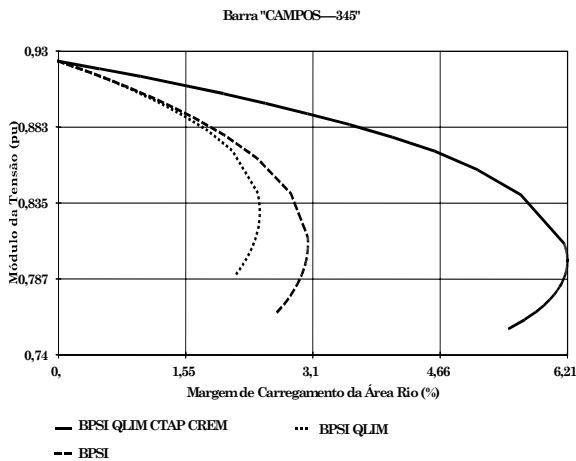


Figura 10 – Perfil de tensão na barra “CAMPOS---345”.

A carga da área Rio durante o verão (época onde a carga atinge os maiores níveis) apresenta crescimento de potência reativa maior do que de potência ativa. Esta característica da carga causa uma redução na margem de carregamento. Os perfis de tensão em barras da área Rio para este caso são mostrados na Figura 11 e na Figura 12. A evolução do módulo da tensão numa barra que possui um compensador síncrono é mostrada na Figura

12. Quando a geração de potência reativa do síncrono atinge seu limite máximo, a barra “MESQUITA-SIN” se torna tipo PQ e o módulo da sua tensão começa a diminuir.

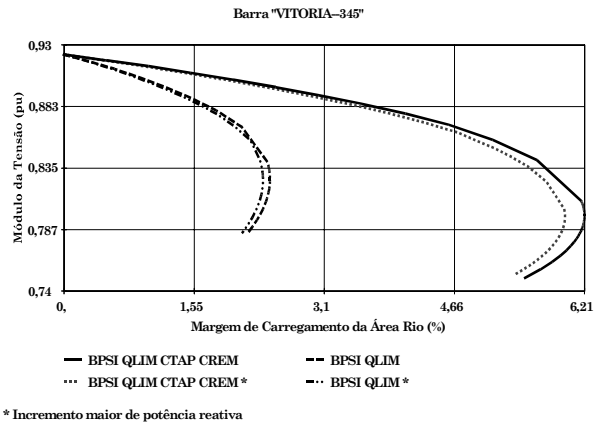


Figura 11 – Perfil de tensão na barra “VITORIA--345”.

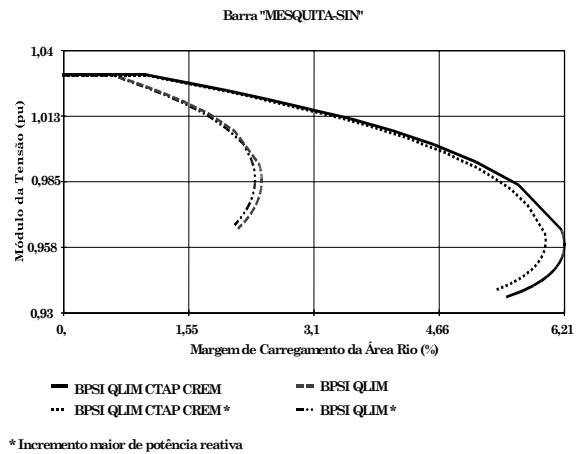


Figura 12 – Perfil de tensão na barra “MESQUITA-SIN”.

Tabela 12 – Dados das contingências analisadas.

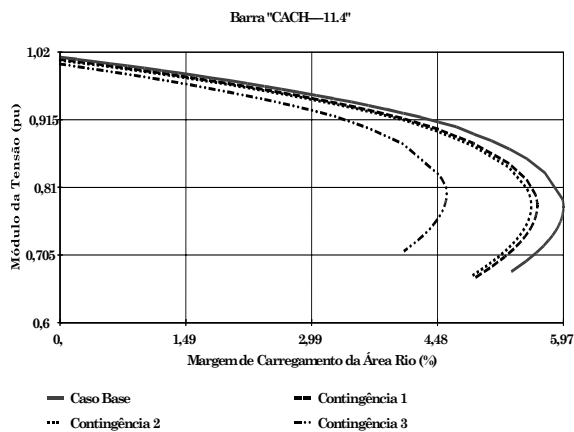
No	Circuito Retirado (Número/Total) Sentido do fluxo : DE ⇒ PARA	Fluxo de Potência no Circuito (Caso Base)	
		Pot. Ativa	Pot. Reativa
1	“C.PAULIS-138” ⇒ “V.RECOND-138” (1/1)	160,6 MW	3,6 Mvar
2	“ADRIANO--345” ⇒ “JACAREP--345” (1/2)	241,7 MW	87,8 Mvar
3	“FURNAS----345” ⇒ “ITUTINGA-345” (1/2)	560,2 MW	82,3 Mvar

Também foram analisadas situações onde alguns circuitos importantes ao suprimento de carga da área Rio são retirados. A Tabela 12 mostra o fluxo de potência nestes circuitos para o caso base. O carregamento máximo atingido para cada situação simulada está descrito na Tabela 13. Não foram analisadas as situações envolvendo circuitos críticos (e.g., “C.PAULIS-500” ⇒ “ADRIANO--500”, cujo fluxo de potência é de 2664 MW), para os quais se torna necessário o corte de carga. A Figura 13 e a Figura 14

mostram os perfis de tensão de barras para cada contingência e para o caso base.

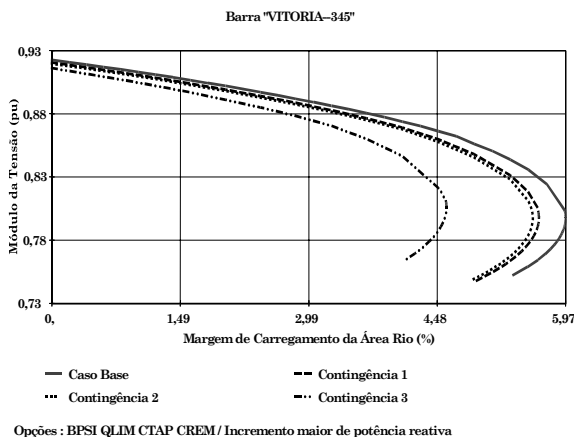
Tabela 13 – Margem de carregamento para cada contingência.

Margem de Carregamento da Área Rio ($\gamma_{Potência\ Reativa} = 1,25 \times \gamma_{Potência\ Ativa}$)			
Opções de Controle	Margem de Carregamento da Área Rio	Margem de Carregamento do Sistema	Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo
Contingência 1			
BPSI QLIM CTAP CREM	5,66 % (341 MW)	1,15 %	Módulo da Tensão "CACH----11.4"
BPSI QLIM	1,93 % (116 MW)	0,39 %	Módulo da Tensão "CACH----11.4"
Contingência 2			
BPSI QLIM CTAP CREM	5,59 % (337 MW)	1,14 %	Módulo da Tensão "CACH----11.4"
BPSI QLIM	2,04 % (123 MW)	0,42 %	Módulo da Tensão "CACH----11.4"
Contingência 3			
BPSI QLIM CTAP CREM	4,59 % (277 MW)	0,94 %	Módulo da Tensão "CACH----11.4"
BPSI QLIM	0,38 % (23 MW)	0,08 %	Módulo da Tensão "CACH----11.4"



Opções : BPSI QLIM CTAP CREM/ Incremento maior de potência reativa

Figura 13 – Perfil de tensão na barra "CACH----11.4".



Opções : BPSI QLIM CTAP CREM/ Incremento maior de potência reativa

Figura 14 – Perfil de tensão na barra "VITORIA--345".

3.2.2 Análise Modal

De maneira análoga a realizada na seção 3.1.3 foi feita a análise modal do sistema S-SE/Abril 1997 no ponto de máximo carregamento. A Tabela 14 mostra o modo dominante calculado para opção onde o incremento de potência reativa é maior.

Tabela 14 – Determinação do modo crítico da área Rio.

Opções de Controle	Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo	Margem de Carregamento da Área Rio
BPSI QLIM *	Módulo da Tensão de "CACH----11.4"	2,37 % (143 MW)
Modo Crítico		0,000507

* Incremento maior de potência reativa

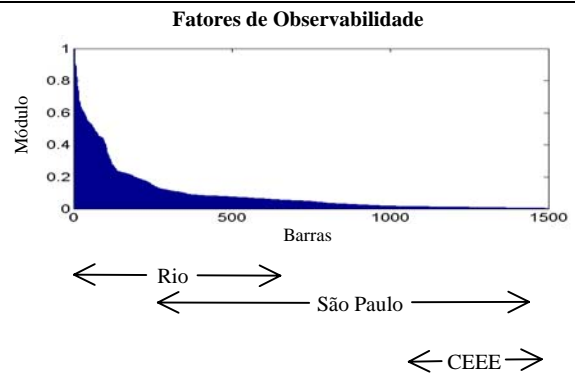


Figura 15 – Histograma dos fatores de observabilidade de ΔV e associados ao modo crítico da área Rio ($\lambda=0,000507$).

A Figura 15 apresenta o histograma dos fatores de observabilidade de variação de tensão associados ao modo crítico. As barras que possuem os maiores valores estão relacionadas à área Rio. As barras da área São Paulo e da CEEE possuem valores pequenos, indicando que o modo crítico é muito observável na área Rio, pouco observável em São Paulo e não observável no Rio Grande do Sul.

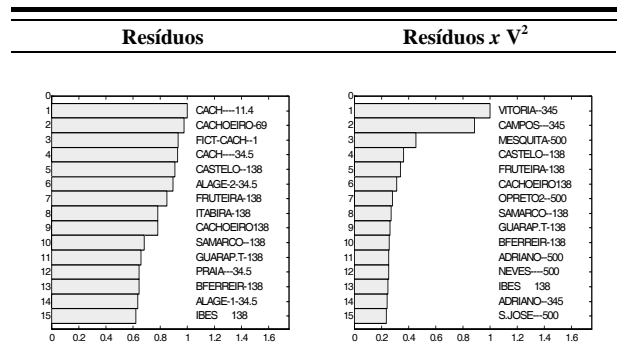


Figura 16 – Resíduos de $\Delta V^i/\Delta Q^i$ associados ao modo crítico da área Rio ($\lambda=0,000507$).

A Figura 16 apresenta parte das listas de resíduos (original e ponderada) de funções de transferência $\Delta V^i/\Delta Q^i$, associada ao modo crítico. Na Tabela 15 (baseada na lista de resíduos ponderada) e na Tabela 16 (baseada na lista original de resíduos) são apresentados os resultados da análise para determinação das melhores

barras para instalação de um equipamento de suporte de tensão.

Tabela 15 – Análise de localização do equipamento de suporte de tensão (modo original $\lambda=0,000507$).

Barra PQ Convertida em Barra PV	Margem de Carregamento Adicional (MW)	Pot. Reativa Gerada (Mvar)	Novo Modo Crítico
CAMPOS---345	246	423	0,1342
VITORIA---345	161	271	0,1289
CACHOEIRO138	98	120	0,0931
GUARAP.T-138	94	128	0,0924
BFERREIR-138	85	111	0,0819
SAMARCO---138	81	106	0,0795
FRUTEIRA-138	78	90	0,0735
CASTELO---138	66	71	0,0613
MESQUITA-500	43	129	0,0295
OPRETO2---500	32	118	0,0219

Tabela 16 – Análise de localização do equipamento de suporte de tensão (modo original $\lambda=0,000507$).

Barra PQ Convertida em Barra PV	Margem de Carregamento Adicional (MW)	Pot. Reativa Gerada (Mvar)	Novo Modo Crítico
CACHOEIRO138	98	120	0,0931
ITABIRA-138	88	109	0,0839
SAMARCO---138	81	106	0,0795
FRUTEIRA-138	78	90	0,0735
CASTELO---138	66	71	0,0613
CACH---34.5	37	36	0,0322
FICT-CACH---1	36	34	0,0306
CACHOEIRO-69	35	32	0,0297
CACH---11.4	26	24	0,0227
ALAGE-2-34.5	27	24	0,0224

3.2.3 Adição de Suporte de Tensão

A barra “CAMPOS---345” foi a escolhida para ter a sua tensão controlada, em função dos resultados descritos na seção anterior.

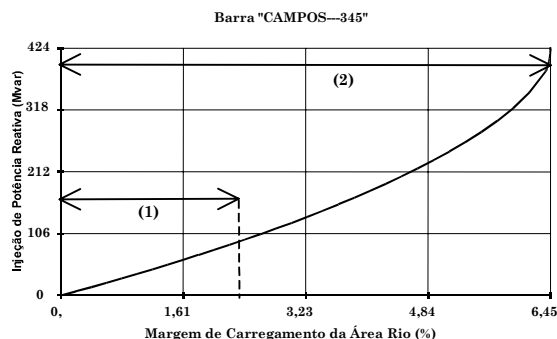
Tabela 17 – Aumento da margem de carregamento da área Rio com o controle da tensão de “CAMPOS---345”.

Sistema Sul – Sudeste / Abril 1997		
Opções de Controle	Configuração Original	Controle de Tensão em “CAMPOS---345”
BPSI QLIM *		
Margem de Carregamento da Área Rio	2,37 % (143 MW)	6,45 % (389 MW)
Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo	Módulo da Tensão de “CACH---11.4”	Módulo da Tensão de “S LOURENCO69”
Aumento da Margem de Carregamento		246 MW
Potência Reativa Injetada em “CAMPOS---345” no Ponto de Carregamento Máximo		423 Mvar

* Incremento maior de potência reativa

Como mostrado na Figura 17e na Tabela 17, a injeção de potência reativa na barra “CAMPOS---345” aumentou consideravelmente a margem de

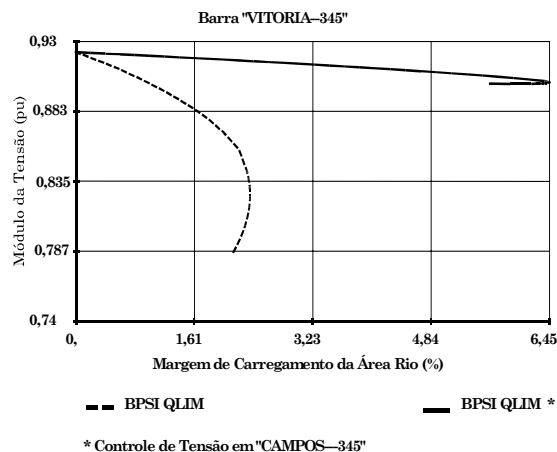
carregamento da área Rio dos 143 MW originais para 389 MW. Isto é obtido através da injeção de 423 Mvar de potência reativa na barra “CAMPOS---345”. Na Figura 18 nota-se que o perfil de tensão numa barra da área Rio apresenta melhoria sensível após a adição de suporte de tensão em “CAMPOS---345”.



(1) Margem de Carregamento Original – Vide Figura 18

(2) Margem de Carregamento com Suporte de Tensão Adicional

Figura 17 – Influência da injeção de potência reativa na barra “CAMPOS---345” sobre a margem de carregamento da área Rio.



* Controle de Tensão em “CAMPOS---345”

Figura 18 – Perfil de tensão na barra “VITORIA--345”.

3.3 Estudo da CEEE

Esta seção apresenta o estudo do Rio Grande do Sul através da análise modal realizada no ponto de carregamento máximo obtido com o aumento da carga da CEEE. Na Tabela 18 temos a participação carga/geração da CEEE no sistema S-SE/Abril 1997.

Tabela 18 – Participação da CEEE no sistema S-SE / Abril 1997.

CEEE em Relação ao Total do Sistema S-SE / Abril 1997				
Empresa	Carga		Geração	
	P	Q	P	Q
CEEE	9,30 % (2751 MW)	7,02 % (924 Mvar)	1,95 % (613 MW)	5,58 % (269 Mvar)

3.3.1 Obtenção do Carregamento Máximo

O ponto de carregamento máximo foi obtido através da utilização do método de continuação para a situação onde não há controles atuando mas são respeitados

limites de geração de potência reativa. A potência ativa necessária para suprir a carga excedente foi dividida entre os geradores da CEEE e alguns da ELETROSUL (J.Lacerda, Charqueadas, Passo Fundo e Alegrete). A Tabela 19 mostra a margem de carregamento obtida.

Tabela 19 – Margem de carregamento da CEEE.

Sistema Sul – Sudeste / Abril 1997			
Opções de Controle	Margem de Carregamento da CEEE	Margem de Carregamento do Sistema	Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo
BPSI QLIM	9,85 % (271 MW)	0,92 %	Módulo da Tensão de “OSORIO-2-69”

3.3.2 Análise Modal

De maneira análoga a realizada nas seções 3.1.3 e 3.2.3, foi feita a análise modal do sistema S-SE/Abril 1997, no ponto de carregamento máximo. A Tabela 20 mostra o modo dominante calculado.

Tabela 20 – Determinação do modo crítico da área CEEE.

Opções de Controle	Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo	Margem de Carregamento da CEEE
BPSI QLIM	Módulo da Tensão de “OSORIO-2-69”	9,85 % (271 MW)
Modo Crítico		0,0027

A Figura 19 apresenta o histograma dos fatores de observabilidade de variação de tensão associados ao modo crítico. As barras da CEEE possuem os maiores valores. O modo crítico não é observável nas áreas Rio e São Paulo.

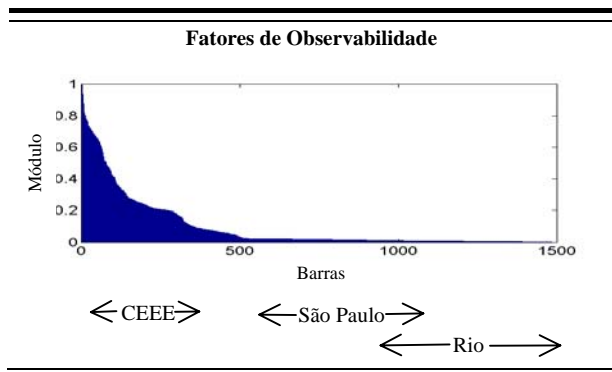


Figura 19 – Histograma dos fatores de observabilidade de ΔV e associados ao modo crítico da CEEE ($\lambda=0,0027$).

A Figura 20 mostra parte das listas de resíduos (original e ponderada) das funções de transferência $\Delta V^i/\Delta Q^i$, associada ao modo crítico. Na Tabela 21 (baseada na lista ponderada de resíduos) e na Tabela 22 (baseada na lista original de resíduos) são apresentados os resultados da análise para determinação das melhores barras candidatas à instalação de um equipamento para suporte de tensão.

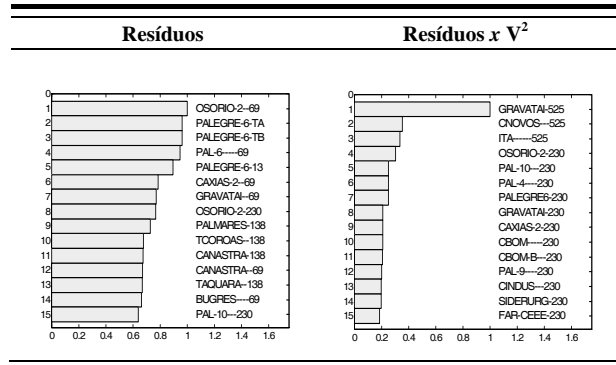


Figura 20 – Resíduos de $\Delta V^i/\Delta Q^i$ associados ao modo crítico da CEEE ($\lambda=0,0027$).

Tabela 21 – Análise de localização do equipamento de suporte de tensão (modo original $\lambda=0,0027$).

Barra PQ Convertida em Barra PV	Margem de Carregamento Adicional (MW)	Pot. Reativa Gerada (Mvar)	Novo Modo Crítico
GRAVATAI-230	626	870	0,1043
GRAVATAI-525	582	820	0,1051
PALEGRE6-230	476	613	0,1002
PAL-10---230	444	574	0,0989
PAL-4----230	441	570	0,0987
CBOM----230	434	605	0,0986
CNOVOS---525	341	803	0,1089
ITA-----525	316	777	0,1040
CAXIAS-2-230	247	382	0,0833
OSORIO-2-230	192	254	0,0761

Tabela 22 – Análise de localização do equipamento de suporte de tensão (modo original $\lambda=0,0027$).

Barra PQ Convertida em Barra PV	Margem de Carregamento Adicional (MW)	Pot. Reativa Gerada (Mvar)	Novo Modo Crítico
GRAVATAI---69	240	314	0,0816
OSORIO-2-230	192	254	0,0761
PALEGRE-6-TA	178	205	0,0717
PALEGRE-6-TB	177	205	0,0717
PAL-6-----69	177	205	0,0716
PALEGRE-6-13	118	161	0,0559
OSORIO-2---69	111	122	0,0540
CAXIAS-2---69	83	99	0,0427
TCOROAS---138	59	90	0,0418
PALMARES-138	30	40	0,0028

3.3.3 Adição de Suporte de Tensão

A barra “GRAVATAI-230” foi a escolhida para ter a sua tensão controlada, em função dos resultados descritos na seção anterior.

Tabela 23 – Aumento da margem de carregamento da CEEE com o controle da tensão de “GRAVATAI-230”.

Sistema Sul – Sudeste / Abril 1997		
Opções de Controle	Configuração Original	Controle de Tensão em “GRAVATAI-230”
BPSI QLIM *		
Margem de Carregamento da CEEE	9,85 % (271 MW)	32,61 % (897 MW)
Parâmetro de Continuação no Ponto Máximo	Módulo da Tensão de “OSORIO-2-69”	Módulo da Tensão de “SANGELO--69”
Aumento da Margem de Carregamento		626 MW
Potência Reativa Injetada em “GRAVATAI-230” no Ponto de Carregamento Máximo		870 Mvar

* Incremento maior de potência reativa

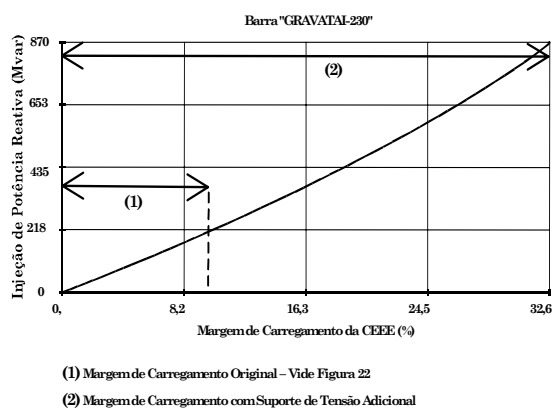


Figura 21 – Influência da injeção de potência reativa na barra “GRAVATAI-230” sobre a margem de carregamento da CEEE.

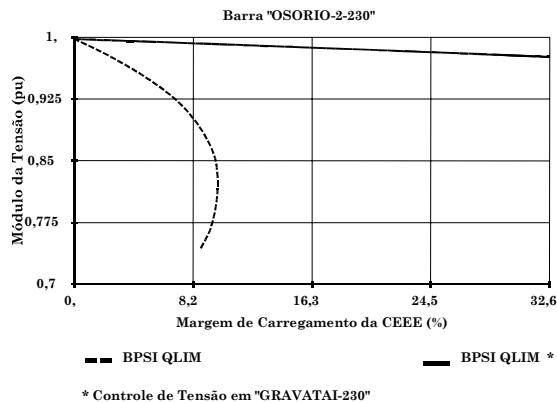


Figura 22 – Perfil de tensão na barra “OSORIO-2-230”.

Como mostrado na Tabela 23 e na Figura 21, a injeção de potência reativa na barra “GRAVATAI-230” aumentou consideravelmente a margem de carregamento da CEEE dos 271 MW originais para 897 MW. Isto é obtido através da injeção de 870 Mvar de potência reativa na barra “GRAVATAI-230”. Na Figura 22 e na Figura 23 são apresentados os perfis de tensão em duas barras da CEEE, onde pode ser observada a melhoria sensível conseguida após a adição de controle de tensão em “GRAVATAI-230”.

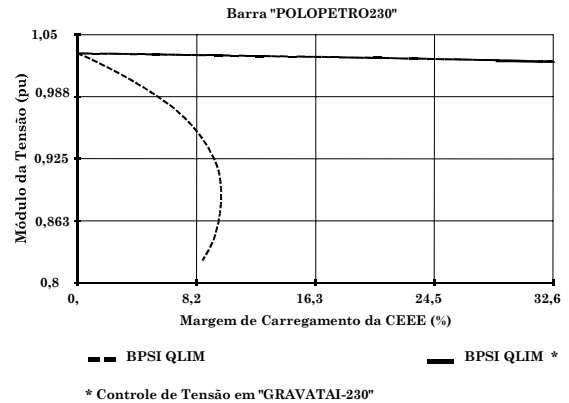


Figura 23 – Perfil de tensão na barra “POLOPETRO230”.

4. CONCLUSÕES

A implementação do método de continuação e de técnicas para análise modal tornou o programa ANAREDE uma ferramenta versátil para análise estática da estabilidade de tensão de sistemas de grande porte.

O método de continuação permite a obtenção de pontos de carregamento máximo do sistema. Os recursos disponíveis no ANAREDE podem ser utilizados, flexibilizando as simulações de acordo com o estudo a ser realizado. É permitida a atuação de controles, consideração dos limites de geração de potência reativa nos geradores, distribuição do balanço de potência ativa por diferentes geradores do sistema, escolha das barras que terão o carregamento aumentado, a utilização de incremento diferenciado de potência ativa e potência reativa e a modelagem de motores de indução.

A maneira mais eficiente de utilização do método de continuação é feita estipulando-se o fator de carregamento do sistema como parâmetro de continuação até que não haja convergência. A partir daí, o módulo da tensão de uma das barras (o que possuir maior variação) é escolhido como parâmetro de continuação sendo, então, dado prosseguimento ao processo.

Apenas após a inclusão das equações referentes aos controles na matriz jacobiana, tornou-se viável a utilização do método de continuação, visto que nas proximidades do ponto de carregamento máximo, a implementação anterior gerava problemas de convergência [10].

No ponto de carregamento máximo, a análise modal fornece informações para determinação de medidas mais efetivas para reforço do sistema. A utilização da análise modal em sistemas de grande porte é viabilizada pelo uso de algoritmos de solução parcial do problema de autovalores. Foi verificado, em sistemas de grande porte, que o monitoramento de modos críticos associados a áreas de interesse deve ser feito utilizando o algoritmo de obtenção de pólos dominantes.

O escalonamento da lista de resíduos através da ponderação dos valores obtidos pelo quadrado da tensão

base da barra permitiu uma maior utilização prática desta informação. Desta forma barras de níveis de tensão superiores têm possibilidade de se destacarem na lista de resíduos. Nos resultados apresentados, as listas ponderadas de resíduos forneceram informações substancialmente melhores que a lista original. Isto pôde ser observado através da verificação das margens de carregamento adicionais obtidas ao incluir controle de tensão de tensão nas barras priorizadas pelas duas listas de resíduos.

Nota-se também que há correlação entre a margem de carregamento adicional obtida quando uma determinada barra tem sua tensão fixada no valor base e a posição estimada do novo modo crítico do sistema. As medidas de reforço indicadas pela análise modal proporcionaram aumento efetivo na margem de carregamento do sistema, demonstrando o valor prático da metodologia proposta.

O método de continuação indica quais as barras que sofrem maior variação no módulo da tensão nas proximidades do colapso. Estas barras são, normalmente, aquelas de nível de tensão baixo. Neste aspecto, a análise modal apresentada neste artigo complementa a informação das barras mais indicadas para suporte de tensão. Outra vantagem da análise modal, não mostrada neste trabalho, é a identificação de mais de um modo de colapso numa mesma área do sistema. Isto permite um melhor entendimento do problema e determinação mais acurada de múltiplos reforços no sistema.

Os resultados deste trabalho se restringiram à adição de um único equipamento, tipo compensador síncrono, para suporte de tensão em uma área do sistema. No caso mais geral, múltiplos pontos de suporte de tensão podem ser definidos resultando numa melhor relação custo/benefício para esta opção de reforço do sistema. Outro fato a ser considerado é que o suporte contínuo de tensão, utilizado neste trabalho, pode ser aproximado por um banco de capacitores em três estágios, por exemplo. Estes aspectos, entre outros, estão sendo investigados pelos autores.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AJJARAPU, V., CHRISTY, C., "The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", *IEEE Power Industry Computer Applications Conference Proceedings*, pp. 304-311, May 1991.
- 2 ALVARADO, F.L., "Voltage Stability, Bifurcation Parameters and Continuation Methods", *Proceedings of the IV SEPOPE*, IP 27, Foz do Iguaçu, Brasil, May 1994.
- 3 CAÑIZARES, C. A., ALVARADO, F. L., "Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-8, February 1993.
- 4 CAÑIZARES, C.A., "On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modeling", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 512-523, February 1995.
- 5 GAO, B., MORISON, G.K., KUNDUR, P., "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 1529-1542, November 1992.
- 6 KUNDUR, P., GAO, B., "Practical Considerations in Voltage Stability Assessment", *Proceedings of the IV SEPOPE*, IP 14, Foz do Iguaçu, Brasil, May 1994.
- 7 MARTINS, N., "The Dominant Pole Spectrum Eigensolver", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 245-254, February 1997.
- 8 PINTO, H.J.C.P., MARTINS, N., VIEIRA Fº, X., BIANCO, A., et al, "Modal Analysis for Voltage Stability Applications at Base Case and Point of Collapse", *Proceedings of Bulk Power Systems Voltage Phenomena III : Voltage Stability Security and Control*, pp. 215-228, Davos, Switzerland, August 1994.
- 9 CEPTEL, *Programa de Análise de Redes / ANAREDE – Manual do Usuário Versão 07-10/99*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
- 10 PINTO, H.J.C.P., PEREIRA, J.L.R., MARTINS, N., PASSOS Fº, J.A., GOMES Jr, S., ALVES, F.R.M., FERRAZ, J.C.R., HENRIQUES, R.M. and COSTA, V.M., "Needs and Improvements in Power Flow Analysis", *Proceedings of the VII SEPOPE*, Curitiba, PR, May 2000.
- 11 KUNDUR, P., *Power System Control and Stability*. 1 ed. USA, McGraw-Hill Inc, 1994.
- 12 IEEE Publication 93TH0620-5PWR, *Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis*. IEEE Power Engineering Society, 1993.
- 13 PAL, M.K., "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 243-249, February 1992.
- 14 TAYLOR, C.W., *Power System Voltage Stability/EPRI-Power System Engineering Series*. 1 ed. USA, McGraw-Hill Inc, 1994.
- 15 IEEE Special Publication TP-138-0, *Techniques for Power System Stability Limit Search*. IEEE Power Engineering Society, 1999.