UMA NOVA PROPOSTA DE REDUÇÃO DE PERDAS REATIVAS NA TRANSMISSÃO BASEADA NAS CURVAS DE PERDAS VERSUS TENSÃO

Estelio S. Amorim[1], Dilson Amancio Alves[2]

Abstract *— The objective of the proposed paper is the allocation of shunt capacitor and the setting of voltage magnitude of generation buses seeking to the reactive power losses reduction in the transmission lines. Both, the value of shunt reactive compensation to be allocated and the voltage magnitude values of the generation buses to be adjusted are determined based on the curve of total transmission line reactive power losses versus bus voltage magnitude. The individual effects that each one of these procedures brings for the system are also investigated. Among the investigated effects are: the reduction in the total reactive power losses, the changes in the static voltage stability margin, and the improvement of voltage profile. The results obtained for the system IEEE 14 bus show that the procedures lead to a sensible reduction of reactive power losses in the transmission lines and simultaneously, an improvement in the voltage profile.*

Index Terms — Modal Analysis, Voltage Collapse, Loss Reduction, Maximum Loading Point.

INTRODUÇÃO

Os estudos relacionados com a análise de estabilidade estática de tensão têm sido realizados com o objetivo de se identificar a proximidade do ponto de operação em relação ao seu limite operacional. Uma vez calculada a margem de estabilidade de tensão, ou seja, o máximo acréscimo de carga que o sistema pode atender a partir do caso base [1,2], deve-se observar se ela atende os valores recomendados pelas empresas do setor elétrico nacional [2] e internacional [3]. Caso as recomendações não sejam atendidas deve-se procurar identificar os tipos, a localização e o tamanho de medidas de reforço adequadas para se evitar a instabilidade de tensão. A análise modal tem sido empregada nesses casos porque ela não só nos permite inferir se o sistema elétrico de potência está operando próximo do ponto de colapso de tensão, mas também identificar quais áreas são mais sensíveis à instabilidade de tensão para que medidas corretivas sejam tomadas. A utilização de compensação reativa *shunt* tem sido uma das formas mais utilizadas em virtude dos vários benefícios que ela proporciona tais como o aumento da margem de carregamento e a diminuição das perdas ativas e reativas na transmissão.

A técnica de análise modal e fatores de participação são aplicados na prática para ajudar a resolver o problema de alocação de fontes de reativos na rede de alta tensão. Os valores dos fatores de participação indicam as melhores áreas para compensação de potência reativa, como alocação de bancos de capacitores, uma vez que associam variação de potência reativa com variação de tensão. Assim, a utilização em conjunto de métodos estáticos, baseados em cálculos de curvas P-V e Q-V, com a análise modal da matriz Jacobiana reduzida têm se mostrado como uma opção simples e confiável para a identificação de tipos, localização e tamanho de medidas de reforço adequadas contra a instabilidade de tensão em sistemas de energia [4,5]. O ponto de máximo carregamento (PMC) do sistema define a fronteira entre as regiões de operação estável e instável. Assim, a sua determinação é importante tanto para o cálculo de margens de estabilidade quanto para a realização da análise modal estática, uma vez que é neste ponto que ela fornece informações para a determinação de medidas efetivas para o reforço do sistema.

O objetivo do trabalho é apresentar uma metodologia alternativa para a alocação de bancos de capacitores *shunt* e o ajuste de tensão das barras de geração (PV) visando à redução das perdas de potência reativa nas linhas de transmissão. Ambos, a definição do montante de compensação reativa *shunt* a ser alocada e o valor das magnitudes de tensão das barras PV a serem ajustados, são determinados com base nas curvas de perda total de potência reativa na transmissão versus magnitude de tensão da barra. Também são investigados os efeitos individuais que cada um destes procedimentos traz para o sistema. Entre os efeitos investigados estão: a redução das perdas reativas, a variação na margem de estabilidade estática de tensão, e a melhoria do perfil de tensão. Os resultados obtidos para o sistema IEEE 14 barras do IEEE [6] mostram que os procedimentos conduzem a uma sensível redução das perdas de potência reativa nas linhas de transmissão e simultaneamente, uma melhoria no perfil da tensão.

MÉTODO PROPOSTO

No método de análise proposto o traçado da curva de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão da barra é realizado de forma similar ao traçado da curva Q-V. A curva Q-V é um método simples e rápido de análise estática da estabilidade de tensão, sendo usado para se determinar à margem de reativo nas barras críticas do sistema. Através da curva Q-V determina-se a compensação de potência reativa

1 Estelio S. Amorim , UNESP - Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Brasil, 56, Cx. P. 31, 15385-000, Ilha Solteira – Brasil, estelioamorim@yahoo.com.br
2 Dilson Amancio Alves, UNESP - Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Brasil, 56, Cx. P. 31, 15385-000, Ilha Solteira – Brasil, dalves@dee.feis.unesp.br

necessário para levar o sistema para um ponto de operação considerado seguro (estável). A curva Q-V apresenta a variação da magnitude da tensão numa determinada barra (originalmente uma barra de carga ou barra QV) em função da injeção de potência reativa. O traçado da curva Q-V é realizado através da adição de um condensador síncrono fictício à barra em análise, convertendo-a de uma barra PQ para uma barra PV, sem limites de reativo [1]. A seguir, a partir de um caso base, o valor da magnitude de tensão da barra escolhida é fixado e a injeção de reativos é determinada através da solução de um fluxo de potência. Assim, são especificados sucessivos valores para a magnitude de tensão e os correspondentes valores da injeção de reativo são obtidos. Os valores de magnitude de tensão são representados no eixo das abscissas e os da potência reativa injetada no eixo das ordenadas, conforme mostrado na Figura 1. O ponto de operação corresponde à intersecção da curva com o eixo das abscissas, onde a potência reativa injetada é nula. A margem de reativos disponível na barra é a diferença entre a potência reativa de saída nula do condensador síncrono (ponto de operação) e a potência do mesmo na base da curva Q-V. A fronteira de estabilidade de tensão é representada pelo ponto onde dQ/dV=0, o qual define o mínimo de potência reativa necessária para a operação estável. Ao contrário dos pontos localizados à direita do ponto de mínimo, os pontos localizados à esquerda são considerados instáveis porque um acréscimo de potência reativa leva a uma diminuição do valor da magnitude da tensão. Conforme mostrado na Figura 2, a curva Q-V se desloca para cima à medida que há um aumento do carregamento (potência ativa). No caso da curva 1, o sistema ainda pode aumentar sua potência ativa sem a necessidade de compensação local de potência reativa. No caso da curva 2, ocorre uma única intersecção com o eixo de tensão, isto significa que não há margem de potência reativa na barra, este caso representa a condição de máxima transferência de potência ativa sem compensação de reativos, o sistema encontra-se no limite de estabilidade de tensão. Para o caso da curva 3, todos os pontos encontram-se acima do eixo das abscissas, ou seja, o sistema não possui nenhum ponto de operação factível para este nível de

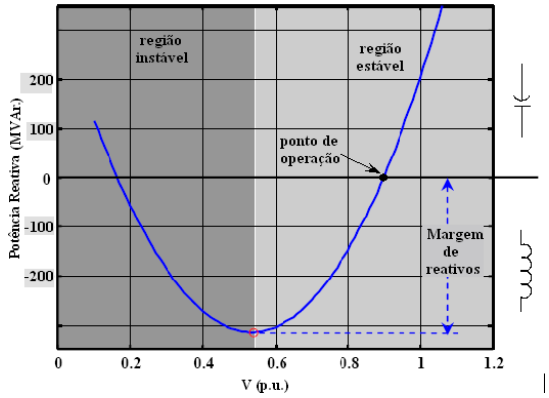


FIGURA 1
CURVA Q-V.

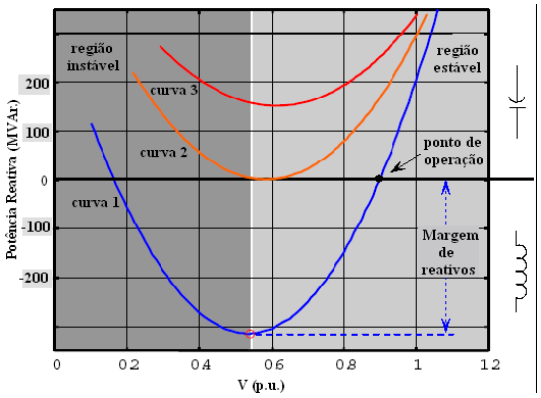


FIGURA 2
CURVAS Q-V PARA DIFERENTES CARREGAMENTOS.

carregamento. Neste caso, a operação só poderá ser restabelecida se alguma forma de compensação de reativos for providenciada. Assim, o sistema só poderá suprir o nível de carregamento solicitado mediante o emprego de compensação de reativo, ou seja, com a instalação, por exemplo, de um banco de capacitor *shunt*. O valor de compensação de reativo é obtido diretamente da curva e corresponderá para cada valor de magnitude de tensão desejada, à distância entre a curva (no caso da curva 3) e o eixo das abscissas.

De forma similar pode-se traçar a curva de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão da barra, conforme apresentado na Figura 3. Assim, seguindo o mesmo procedimento realizado para a curva Q-V, após transformar a barra de PQ para PV, especificam-se sucessivos valores para a magnitude de tensão e os correspondentes valores da perda total de potência reativa e os da potência reativa injetada são obtidos. Podem-se traçar duas curvas conforme apresentado nas Figuras 3 e 4. Os valores de magnitude de tensão, ou o da potência reativa injetada (Q_{gerado}), são representados no eixo das abscissas e os da perda total de potência reativa no eixo das ordenadas. O ponto de operação do caso base (ponto O) corresponde à intersecção da curva com o eixo das abscissas, onde a potência reativa injetada é nula, conforme apresentado na Figura 4. Em ambas as figuras, apresenta-se uma reta tracejada que passa pelo ponto O que corresponde à perda total de potência reativa do caso base (31,2162 MVAr). O ponto M corresponde a menor perda obtida (30,9954 MVAr) por compensação nessa barra. Na Figura 3 pode-se ver a margem de redução de perdas (31,2162-30,9954=0,2208 MVAr), e que corresponde à distância do ponto M à essa reta. Assim, através da instalação de um banco de capacitor *shunt* é possível obter uma redução de 0,7073% do valor do caso base. Na Figura 4 pode-se ver a potência do banco (Q_{banco}), que é de 9,478 MVAr na correspondente magnitude de tensão de 1.047 p.u. A potência reativa fornecida pelo banco de capacitores não é uma quantia fixa, na verdade ela varia com o quadrado da tensão ($Q=BV^2$). Assim, o valor da potência reativa a ser especificada para o banco de dados é de 8,6461 MVAr para uma magnitude de tensão de 1.0 p.u.

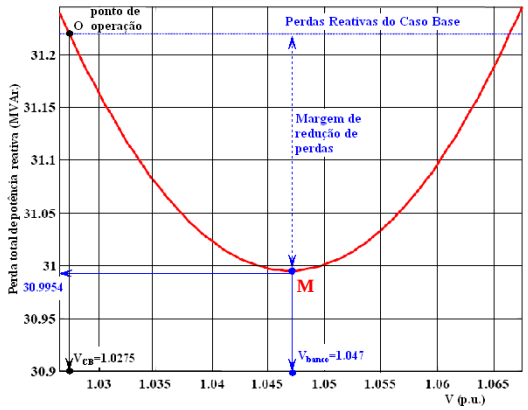


FIGURA 3

CURVA PERDA TOTAL DE POTÊNCIA REATIVA VERSUS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA A BARRA 14 DO SISTEMA IEEE-14.

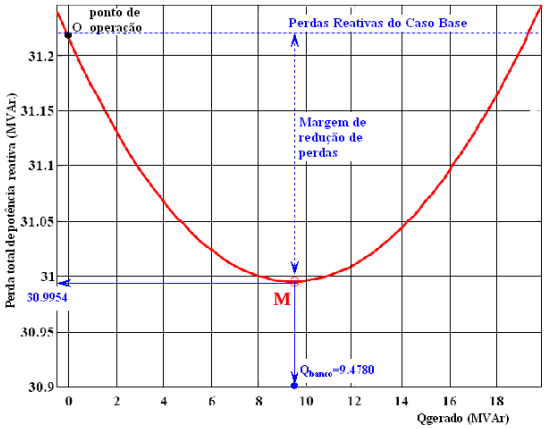


FIGURA 4

CURVA PERDA TOTAL DE POTÊNCIA REATIVA VERSUS POTÊNCIA REATIVA DO BANCO PARA A BARRA 14 DO SISTEMA IEEE-14.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para os desbalanços de potência foi de 10^{-5} p.u. O ponto de operação inicial de cada curva é obtido com um fluxo de carga. Os *taps* foram mantidos fixos e os limites de potência reativa nas barras PV's foram liberados. A Figura 5 mostra o diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras, o qual será usado nas análises que se seguem. Os dados das barras e das linhas de transmissão (LT) encontram-se em [6].

A Figura 6 apresenta as curvas de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para cada uma das barras de carga do sistema IEEE 14 barras. As colunas da Tabela I apresentam respectivamente os valores de simulação obtidos para a perda total de potência reativa, a potência reativa do banco *shunt*, a magnitude de tensão para a qual ocorre a menor perda, e a margem de carregamento (MC) após a inclusão do banco *shunt*.

De acordo com o apresentado na Figura 6 e na coluna 1 da tabela I, a maior redução (31,2162-30,9954=0,2208 MVAr ou 0,7073% em relação à do caso base (31,2162 MVAr)) na perda total de potência reativa ocorre com a inclusão do banco de 22,3231 MVAr junto à barra 5.

As Figuras 7 e 8 apresentam os respectivos valores percentuais de redução da perda total de potência reativa e do aumento da margem de carregamento conseqüentes da inclusão individual de cada um dos bancos apresentados na coluna 2 da Tabela I. Observe que apesar da redução da perda total de potência reativa seguir, como já era esperada, a ordem decrescente (5, 14, 10, 9, 4, 13, 7, 11, e 12) apresentada na Figura 7, o mesmo não ocorre para o aumento da margem de carregamento em relação à do caso

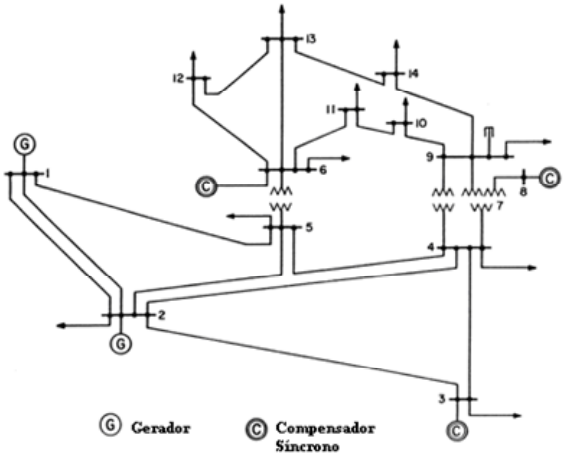


FIGURA 5

SISTEMA IEEE 14 BARRAS.

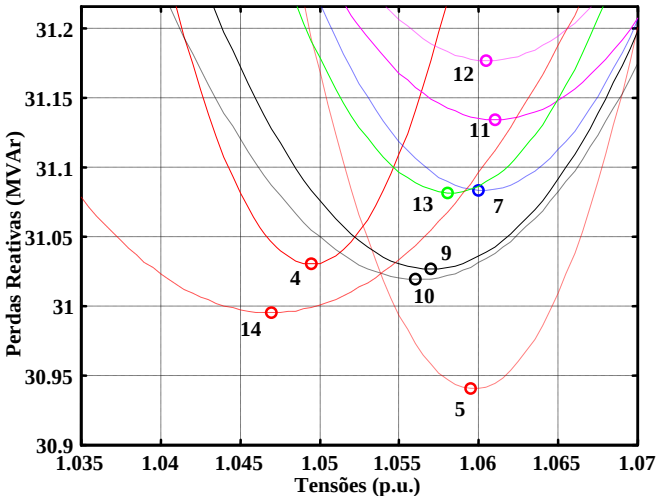


FIGURA 6

CURVAS DE PERDA TOTAL DE POTÊNCIA REATIVA VERSUS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA TODAS AS BARRAS DO SISTEMA IEEE 14.

TABLE I

VALORES OBTIDOS PELO MÉTODO PARA O SISTEMA IEEE 14.

Barras	Perda total (MVAr)	Potência do Banco (MVAr)	Tensão (p.u.)	MC (p.u.)
5	30,9405	22,3231	1,0595	4,0439
14	30,9954	8,6461	1,0470	4,0332
10	31,0192	9,9482	1,0560	4,0351
9	31,0267	11,5037	1,0570	4,0385
4	31,0304	19,1375	1,0495	4,0393
13	31,0821	9,8385	1,0580	4,0267
7	31,0837	11,3978	1,0600	4,0342
11	31,1345	6,4787	1,0610	4,0267
12	31,1772	4,1141	1,0605	4,0218

base (4,0208 p.u.), que conforme apresentado na Figura 8 segue a ordem (5, 4, 9, 10, 7, 14, 11, 13 e 12). Entretanto, cabe observar que do ponto de vista de eficiência da compensação *shunt*, fica difícil efetuar uma comparação, visto que os valores das potências utilizadas para os bancos são diferentes. Assim, com o intuito de se possibilitar a identificação de quais locais (barras) são mais eficientes para se efetuar a compensação *shunt* visando à redução das perdas e o aumento da margem de carregamento, apresentam-se respectivamente nas Figuras 9 e 10, os valores da redução das perdas reativas e do aumento da margem de carregamento por unidade de MVAr do banco. Das Figuras 9 e 10 se verifica que as barras 14, 10 e 9, nessa ordem, são as mais apropriadas para se obter uma redução na perda total de potência reativa, enquanto que para o aumento na margem de carregamento são as mesmas barras, porém naordem inversa 9, 10 e 14. Na Figura 5 verifica-se que já existe instalado na barra 9 um banco de 19 MVAr, confirmando assim os resultados da análise. Um banco dessa quantia localizado na barra 14 ao invés da 9, levaria à uma perda total de potência reativa da ordem de 31,7952 MVAr ao invés de 31,2162 MVAr, e à uma margem de carregamento de 4,0177 p.u. ao invés de 4,0208 p.u. As Figuras 11 e 12, e a Tabela II, retiradas da referência [7], foram obtidas a partir da aplicação da análise modal. Nota-se dos valores obtidos para os fatores de participação, correspondentes ao menor autovalor ou ao modo mais crítico, que as barras 9, 14, 5 e 10 são as que têm maior influência no modo mais crítico quando o sistema está operando próximo ao PMC. Sendo assim, estas barras são as que mais participam no colapso de tensão. As Figuras 12(a) e (b) apresentam em valor percentual, as respectivas variação na perda total de potência reativa e aumento na margem de carregamento (MC) em relação aos do caso base, quando um banco de capacitores *shunt* de 5MVAr é aplicado separadamente em cada uma das barras indicadas. Comparando respectivamente as Figuras 12(a) e (b) com as 9 e 10 constatam-se o mesmo padrão de variação na perda total de potência reativa e aumento na margem de carregamento, comprovando o resultado apresentado pela análise proposta. Assim, em termos de eficiência as barras mais indicadas tanto para redução na perda total de potência

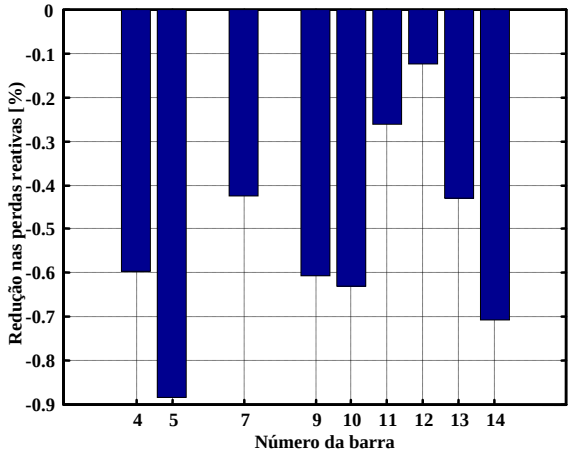


FIGURA 7

REDUÇÃO NA PERDA TOTAL DE POTÊNCIA REATIVA.

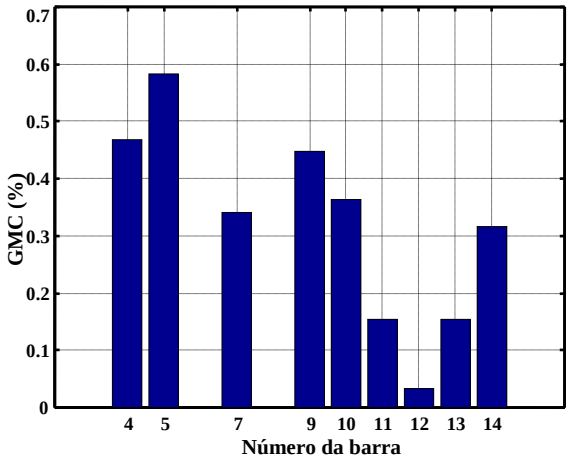


FIGURA 8

AUMENTO NA MARGEM DE CARREGAMENTO APÓS A INSTALAÇÃO DO BANCO *SHUNT*.

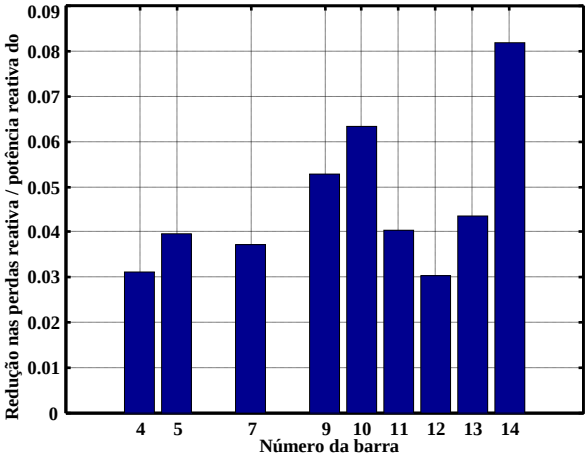


FIGURA 9

REDUÇÃO NA PERDA TOTAL DE POTÊNCIA REATIVA EM RELAÇÃO À POTÊNCIA DO BANCO DE CAPACITOR.

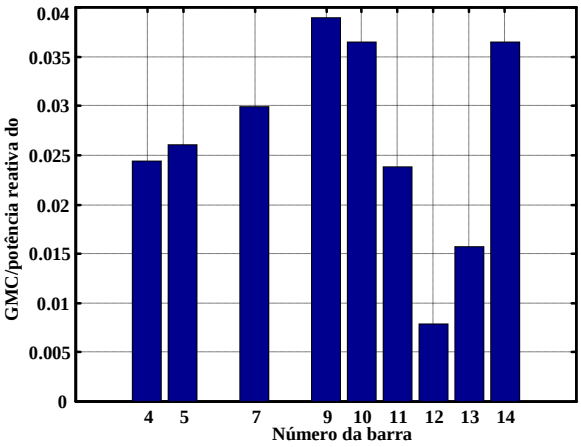


FIGURA 10

AUMENTO NA MARGEM DE CARREGAMENTO APÓS A INSTALAÇÃO DO BANCO *SHUNT* EM RELAÇÃO À POTÊNCIA DO BANCO DE CAPACITOR.

reativa, quanto para o aumento na margem de carregamento são as barras 9, 10 e 14.

A Tabela III apresenta os resultados da aplicação do método proposto para o ajuste do valor das magnitudes de tensão das barras PV. Esse ajuste é efetuado separadamente em cada uma das barras de acordo com a seqüência indicada pelas colunas SNB (colunas 1, 4 e 7). O valor da magnitude de tensão de cada barra (colunas 3, 6 e 9) é determinado com base na curva de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão da barra. Observe que à medida que os ajustes são efetuados a perda total de potência reativa vai diminuindo, conforme apresentado nas colunas 2, 5 e 8 da tabela. As correspondentes margens de carregamento para cada um dos casos analisados encontram-se apresentado na

TABLE II

AUTOVALORES OBTIDOS PARA O IEEE 14 OPERANDO NO PMC (λ=4,02086)

Autovalores					
1	43,4681	4	9,4116	7	15,1093
2	26,4835	5	3,3854	8	16,3693
3	0,0506	6	4,2309	9	6,2135

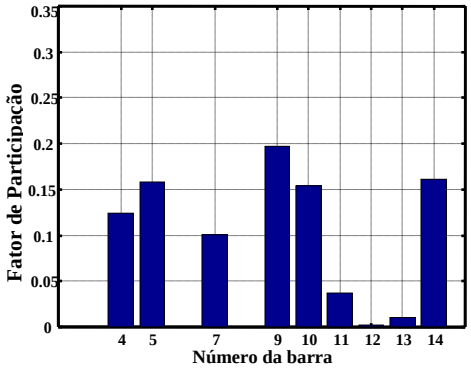
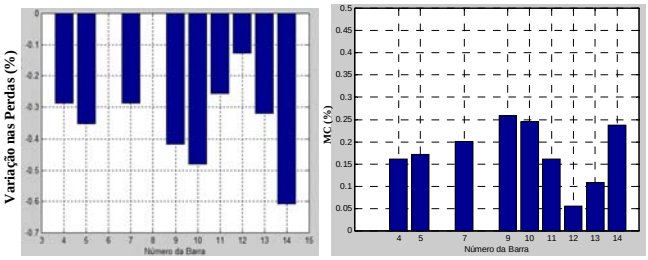


FIGURA 11

FATORES DE PARTICIPAÇÃO NO PMC (λ=4,02086).



(a) **(b)**

FIGURA 12

(a) VARIAÇÃO NA PERDA TOTAL DE POTÊNCIA REATIVA E (b) AUMENTO NA MARGEM DE CARREGAMENTO APÓS A INSTALAÇÃO DE UM BANCO *SHUNT* DE 5 MVAR.

TABLE III

APLICAÇÃO DO MÉTODO PARA O AJUSTE DAS TENSÕES DAS BARRAS PV´S.

CASO 1			CASO 2			CASO 3		
SNB	Perdas Reativas (MVAr)	Tensão (p.u.)	SNB	Perdas Reativas (MVAr)	Tensão (p.u.)	SNB	Perdas Reativas (MVAr)	Tensão (p.u.)
2	30,5390	1,0600	6	29,3003	1,0115	8	30,3562	1,0380
3	29,0775	1,0480	8	27,4516	1,0140	6	27,5559	0,9995
6	27,8821	1,0240	3	27,1968	1,0260	3	27,2936	1,0260
8	26,7512	1,0305	2	26,6888	1,0580	2	26,7932	1,0580
MC	3,9715		**MC**	3,9095		**MC**	3,9128	

última linha da tabela. Observe que em todos os 3 casos há uma redução sensível do valor das perdas, sendo o maior valor igual a 14,5% do valor do caso base (31,2162 MVAr). Entretanto, isso ocorre à custa de uma pequena redução da margem de carregamento, sendo o maior valor igual a 2,8% do valor do caso base (4,0208).

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a aplicação de um método alternativo para se determinar as melhores localidades do sistema para a instalação de bancos de capacitores *shunt* e do valor das magnitudes de tensão a serem ajustadas nas barras PV, visando à redução da perda total de potência reativa e a melhoria da margem de estabilidade de tensão. As análises foram realizadas utilizando o sistema de 14 barras do IEEE. Os resultados obtidos constataram os mesmos padrões de variação na perda total de potência reativa e aumento na margem de carregamento que os fornecidos pela análise modal, quando da alocação dos bancos *shunt* de capacitores. Observou-se uma redução sensível do valor das perdas no caso dos ajustes das magnitudes de tensão das barras PV´s, entretanto isso ocorre à custa de uma pequena redução da margem de carregamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq e da CAPES.

REFERÊNCIAS

[1] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, Mc Graw - Hill, 1993, 1176p.

[2] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), "Diretrizes e Critérios Para Estudos Elétricos, Procedimento de Rede, Submódulo 23.3", Julho, 2001, disponível em www.ons.org.br.

[3] WSCC, "Final Report, Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology", Reactive Power Reserve Work Group (RRWG), 1998, 154p.

[4] Gao, B., "Voltage Stability Analysis of Large Power Systems", 1992, Tese de doutorado, University of Toronto, Canada.

[5] Da Silva, L.C.P., "Uma Expansão dos Métodos de Curvas PV e de Análise Modal Estática para o Estudo da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica". Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas-SP, 2001.

[6] Freris, L. L; Sasson, A. M., "Investigation of the Load-Flow Problem", In: *Proceedings of IEE*, v. 115, no 10, 1968, pp. 1459-1470.

[7] Amorim S. E. e Alves D. A., "Redução de Perdas em Sistemas Elétricos Através da Aplicação da Análise Modal", *Proceedings of* International Conference on Engineering and Computer Education–ICECE'2009. Buenos Aires (AR), 2009, pp.511-515.