APLICAÇÃO DO FLUXO DE CARGA CONTINUADO NA AVALIAÇÃO DO BALANÇO DE REATIVOS DURANTE A REDUÇÃO DAS PERDAS ATIVAS NA TRANSMISSÃO

Francisco C. V. Malange[1], Dilson A. Alves[2]

Abstract — *An alternative method to reduce real power losses in the transmission of electric power systems was presented in reference [1]. The results show that this procedure generally leads to an increase in the maximum loading point and therefore improving the static voltage stability margin and, simultaneously, the voltage profile. From a strictly didactic point of view, the proposed paper aims to show the effects of the re-dispatch of control variables on the reduction of the real power losses in the transmission lines. Moreover, it also investigates the effects caused by this reduction in the voltage stability margin. So, the goal is to use the IEEE 14 bus system to clear how the reactive power balance occurs, and how the bus voltage magnitudes variations are processed, during the reduction procedure of system real power loss.*

Index Terms — Voltage stability, Continuation power flow, transmission losses, Reactive power balance. Estabilidade de tensão, Fluxo de carga continuado, Perdas na transmissão, balanço de reativos.

INTRODUÇÃO

A reestruturação do setor elétrico define uma interconexão industrial onde as atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia são desconectadas umas das outras, o que implica na implementação de ações comerciais e também operativas que determinem a cooperação entre os inúmeros agentes da indústria, tendo como objetivo uma operação confiável e com custos aceitáveis para a sociedade.

A previsão de potência reativa tem considerável significância técnica e econômica, pois o balanço de reativos em um sistema elétrico de potência (SEP) muitas vezes exige a instalação de equipamento adicional exclusivamente para mantê-lo.

Manter o perfil de tensão de um SEP tornou-se uma atividade complexa e concomitantemente dispendiosa. Além de que, a utilização mais acirrada dos atuais sistemas de transmissão juntamente com os baixos níveis de compensação reativa dos sistemas de distribuição tem levado o sistema a operar com baixa flexibilidade.

Uma das questões importantes em tempo-real relacionada ao controle da potência reativa é a escolha das variáveis de controle. Nesta situação os ajustes de controle devem: ser possíveis de serem executados num intervalo de tempo razoável, uma vez que o ciclo de tempo do controle de reativo pode ser muito pequeno, 15/30 minutos, e o operador poderá não ter tempo suficiente para ajustar todos os controles; não deve causar uma sobrecarga excessiva de trabalho ao operador; não devem, no caso de controles discretos, ser chaveados muito freqüentemente. Por estas razões, os controles discretos e contínuos são tratados separadamente. Além do mais, ao contrário dos controles discretos que na maioria dos casos são ajustados no valor mais próximo, as variáveis contínuas podem, em geral, ser ajustadas nos valores calculados fornecidos através de programas computacionais [2]. Estas questões tornam a implementação de tais controles uma tarefa difícil e pode levar a necessidade de diferentes estratégias de ajustes, por exemplo, primeiro se ajusta os bancos em derivação (*shunt*) chaveados, então os geradores e finalmente os transformadores.

Os bancos de capacitores em derivação apresentam valores fixos e discretos de capacitância, e o número de operação é normalmente restrito de duas a quatro operações diárias, porque essas ações podem causar o desgaste e a redução da vida do equipamento [2].

Uma característica desejável para um dado sistema é que a tensão crítica, no limite de estabilidade, seja mantida tão baixa quanta esta possa ser em relação à tensão normal de operação sem comprometer, conseqüentemente, o perfil geral de tensão [3]. Nesse sentido, os bancos de capacitores em derivação têm uma característica desfavorável, que é a de prover um baixo suporte de potência reativa quando este é mais necessário, isto é, próximo ao limite de carregamento.

Ao contrário dos bancos de capacitores em derivação, os geradores produzem seu pleno fornecimento de potência reativa próximo ao limite de estabilidade de tensão, e efetivamente expande a capacidade de transferência de potência e reduz a magnitude da tensão crítica [4].

Então, num sistema de potência, de todos os controles, os geradores (barras *PV*) são de longe os mais eficientes no controle das tensões das barras quando comparados aos *tap's* e bancos em derivação. Portanto, para prevenir ou postergar o colapso de tensão deve-se manter uma reserva de reativos utilizando tanto quanto forem possíveis os bancos de capacitores em derivação e/ou reduzindo as perdas na transmissão a fim de permitir que os geradores existentes

1 Francisco C. V. Malange, Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Elétrica – FEIS – UNESP, Cx. P. 31, Ilha Solteira, SP, CEP 15385-000, Brasil, malange@dee.feis.unesp.br
2 Dilson A. Alves, Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Elétrica – FEIS – UNESP, Cx. P. 31, Ilha Solteira, SP, CEP 15385-000, Brasil,dalves@dee.feis.unesp.br

mantenham-se operando com o máximo possível de margem de reativo [3].

Assim, a escolha no método proposto dos controles de potência reativa dos geradores e condensadores síncronos, para obtenção da redução das perdas e conseqüente aumento da margem de reativos, é baseado no fato de que nos geradores, o fornecimento de potência reativa é controlado numa faixa contínua e o número de operações é ilimitado.

Na referencia [1] foi apresentada uma abordagem alternativa para redução das perdas ativas da transmissão baseada no Fluxo de Carga Continuado (FCC). Os resultados para dois sistemas testes mostraram que este procedimento aumenta a margem de estabilidade de tensão. Além disso, a redução das perdas obtidas não só melhoraram o perfil de tensão, mas também produziram uma significativa redução dos custos operacionais. Com caráter estritamente didático, o trabalho proposto tem como objetivo mostrar os efeitos do redespacho das variáveis de controle nas reduções da perda total de potência ativa na transmissão. Pretende-se, portanto, através do sistema IEEE 14 barras, esclarecer como se dá o balanço de reativos e também como se processam as variações das magnitudes de tensão das barras durante o processo de redução da perda ativa total do sistema utilizando para tanto a mesma metodologia apresentada na referência [1].

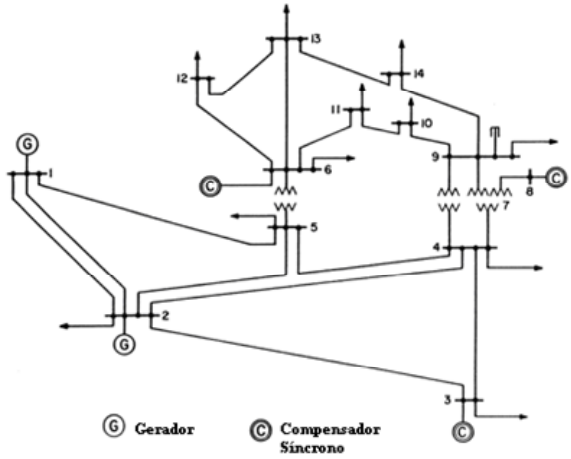

FIGURA **1**
SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS

BALANÇO DE POTÊNCIA REATIVA DURANTE O PROCEDIMENTO DE REDUÇÃO DA PERDA TOTAL DE POTÊNCIA ATIVA NA TRANSMISSÃO

O objetivo deste item é o de esclarecer como se dá o balanço de reativo do sistema elétrico de potência durante o processo de redução da perda ativa total. Para isso, será utilizado o sistema IEEE 14 barras.

Na metodologia apresentada em [1], propôs-se o uso do método da continuação para a redução da perda total de potência ativa na transmissão. Para isso, ao sistema de equações do fluxo de carga, $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta},\mathbf{V})$, acrescenta-se, além da equação da perda ativa total na transmissão (Pa), a equação da potência reativa injetada (Q_{PVk}) em cada uma das barras de controle de tensão (barras PV), escolhidas para participar do procedimento de redução de perdas. As gerações de potência ativa, nas barras de controle de tensão, são mantidas constantes nos seus respectivos valores do caso base, enquanto que a geração de potência ativa da barra de folga variará a fim de acomodar a redução das perdas ativas na transmissão. Conforme apresentado em (1), o valor da perda total de potência ativa, é pré-ajustado através do parâmetro μ.

$$\begin{aligned} &\mathrm{G}(\boldsymbol{\theta},\mathrm{V}) = 0 \\ &Q_{PVk}(\boldsymbol{\theta},\mathrm{V},V_k,\lambda_\mathrm{q}) = \left(\lambda_\mathrm{q} Q_{gk}^0 - Q_{ck}^{esp}\right) - Q_k(\boldsymbol{\theta},\mathrm{V},V_k) = 0 \\ &W(\boldsymbol{\theta},\mathrm{V},V_k,\mu) = (\mu+1)Pa^0 - Pa(\boldsymbol{\theta},\mathrm{V},V_k) = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

sendo $\boldsymbol{\theta}$ o vetor dos ângulos de fase nodais das barras de carga (PQ) e de geração (PV), $\mathbf{V}$ o vetor das magnitudes das tensões nodais das barras de carga (PQ) e $\mathbf{G}$ o vetor que contém as equações dos balanços de potências ativa e reativa nodais. A potência reativa gerada na barra k de controle de tensão escolhida, Q_{gk}, e sua respectiva tensão terminal, V_k, são consideradas, respectivamente, como variáveis dependente e de controle. As respectivas mudanças nos valores de Q_{gk} e Pa serão consideradas através das variáveis λ_q e μ. Assim, as mudanças são proporcionais aos seus respectivos valores do caso base case, Q_{gk}^0 e Pa^0. Q_{ck}^{esp} é a demanda de potência reativa especificada na barra k. Considerando V_k, λ_q e μ como variáveis, o número de incógnitas em (1) é maior do que o número de equações. Contudo, se μ é considerado como uma variável independente será escolhida como parâmetro da continuação, isto é, seu valor é pré-ajustado, e V_k e λ_q são tratadas como variáveis dependente, o número de incógnitas é igual ao número de equações, isto é, a condição necessária para que o novo sistema tenha solução é atendida, desde que a nova matriz Jacobiana tenha posto máximo, isto é, seja não-singular. Após se obter a solução do caso base ($\boldsymbol{\theta}^0$, $\mathbf{V}^0$) por meio de um fluxo de carga convencional e se ter definido um passo em μ, o fluxo de carga continuado proposto é usado para calcular as demais soluções até que seja atingido um ponto de operação, aqui denominado como ponto mínima perda (PMP). Assim, através do uso de (1), é possível se especificar o valor desejado de variação em Pa, e a sua solução provê o ponto de operação para o qual as perdas ocorrem. A variável μ sendo igual a zero, corresponde a solução do caso base, onde V_k igual a V_k^{esp}, isto é, a tensão especificada no caso base e $\lambda_\mathrm{q} = 1$.

A barra de folga, conforme [5], também conhecida como barra oscilante, é usada com uma dupla função:

- Para atuar como referência angular, embora qualquer barra possa ser referência angular;
- Para fechar o balanço de potência do sistema;
- É necessária para estabelecer uma referência angular para a resolução das equações do fluxo carga.

A necessidade da referência angular se dá porque, conforme apresentado em (2), os fluxos de potência são expressos como diferenças angulares (θk-θm), isto é, o problema de fluxo de carga é indeterminado nas variáveis θ de cada barra.

$$\begin{aligned} P_k(\theta, V) &= V_k \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} \operatorname{sen}\theta_{km}) \\ Q_k(\theta, V) &= V_k \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \operatorname{sen}\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}) \end{aligned} \quad (2)$$

Assim, adotando a barra 1 como sendo a barra de folga, a sua geração de potência ativa (Pg_1) é reprogramada para fechar o balanço de potência ativa do sistema. Assim, o seu valor variará a fim de acomodar, além da diferença entre a potência ativa gerada (ΣPg_i) e a consumida (ΣPc_i) de todo o sistema, a redução das perdas ativas na transmissão, sendo o seu valor calculado por meio da equação:

$$Pg_1 = \sum_{j=1}^{NC} Pc_j - \sum_{i=2}^{NG} Pg_i + \sum_{k,m \in \Omega} g_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}) \quad (3)$$

sendo *NB* é o número de barras da rede, e *NG* e *NC* são os respectivos conjuntos de barras de geração e de demanda (carga), e Ω é o conjunto de todas as barras.

Com relação à geração de potência reativa (Qg_1) da barra de folga, esta é calculada por meio da seguinte equação:

$$Qg_1 = \sum_{j=1}^{NC} Qc_j - \lambda_q \sum_{i=2}^{NG} Qg_i + \sum_{k,m \in \Omega} \left[-b_{km}^{sh}\left(V_k^2 + V_m^2\right) - b_{km}\left(V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}\right) \right] \ldots - \sum_{n=1}^{NB} b_n^{sh} V_n^2 \quad (4)$$

Observe em (4) que a parcela $-b_{km}\left(V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}\right)$ é a perda reativa no elemento série da linha de transmissão localizada entre as barras *k* e *m*, enquanto que $-b_{km}^{sh}\left(V_k^2 + V_m^2\right)$ e $b_n^{sh} V_n^2$ correspondem respectivamente, à geração de potência reativa nos *shunts* da linha de transmissão localizada entre as barras *k* e *m*, e nos *shunts* de barra, tais como banco de capacitores e/ou reatores, localizados na barra *n*. Observe que para as linhas de transmissão reais, $b_{km} \langle 0$ e $b_{km}^{sh} \rangle 0$.

As equações (3) e (4) mostram que a barra de folga deve gerar a diferença entre a carga ativa (reativa) total do sistema de potência mais as perdas ativa (reativa no elemento série mais a geração de potência reativa nos elementos *shunts*), e a soma de potência ativa (reativa) especificada, isto é calculada, nas barras de geração. Essas diferenças são conhecidas como desbalanço, ou seja, *mismatch* de potência do sistema.

Na convenção de sinais utilizada as injeções líquidas de potência são positivas quando entram na barra (geração) e negativas quando saem da barra (carga); os fluxos de potência são positivos quando saem da barra e negativos quando entram na barra. No caso dos elementos *shunt*, a convenção é a mesma utilizada para as injeções de potência [5].

RESULTADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS

A tolerância adotada para os *mismatches* foi de 10^{-6} p.u. O valor inicial adotado para μ é –0,1 MW, isto é, *Pa* é reduzido em 10%. O próximo ponto atual é computado por (3). Este procedimento é repetido até o fluxo de carga continuado não convergir. Adotou-se um número máximo de iterações igual a 10.

Durante o processo de redução da perda ativa total, o *tap* nos transformadores com comutação de *tap's* sob carga foram mantidos fixos no valor de 1,0 p.u.

Os valores limites adotados para as magnitudes de tensão da barra de folga e das barras de geração foram: $V_{min} \leq V \leq V_{máx}$, onde : $V_{min} = 0{,}95$ e $V_{máx} = 1{,}1$ p.u.

Na Figura 2 encontram-se as variações das tensões da barra de folga, barra 1, e das barras de controle de tensão (*PV*), barras 2, 3, 6 e 8, em função da perda total de potência ativa (*Pa*). Da figura observa-se que ocorre um aumento da magnitude de tensão de todas as barras *PV*, bem como da de folga.

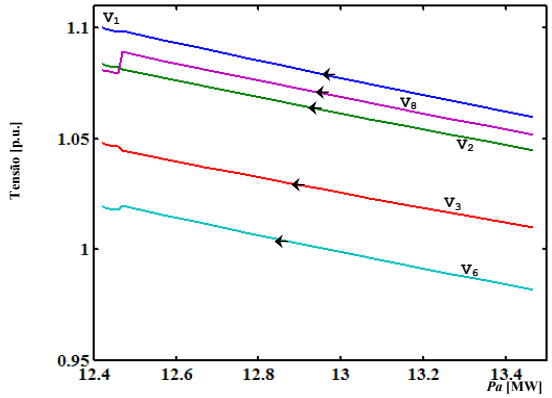

FIGURA **2**

VARIAÇÕES DAS TENSÕES DA BARRA DE FOLGA E DAS BARRAS DE CONTROLE DE TENSÃO (*PV*) EM FUNÇÃO DE *Pa*, PARA O SISTEMA IEEE-14 BARRAS.

Na Figura 3 apresentam-se as variações das potências reativa geradas pelas barras de folga e de controle de tensão em função de *Pa*. Pode-se verificar que há uma redução das potências reativas geradas pelas barras *PV* de números 2, 3 e 8, enquanto que a da barra 6 permanece constante no seu valor máximo de 24 MVAr. Com relação a barra de folga, pode-se afirmar que ocorre uma redução da potência reativa gerada.

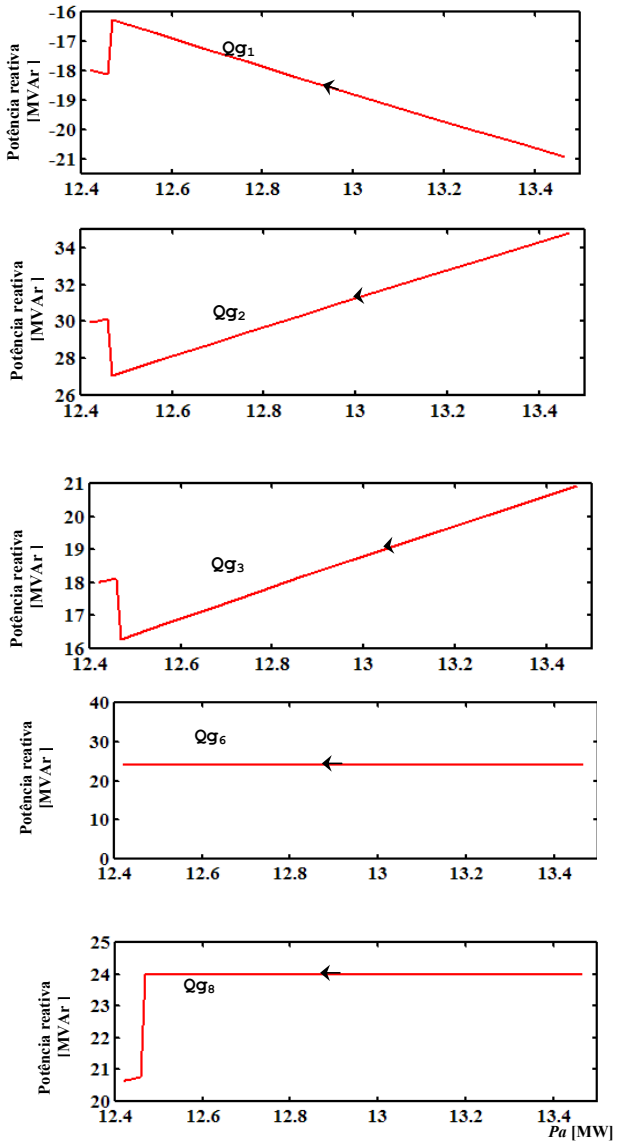

FIGURA **3**

VARIAÇÕES DAS POTÊNCIA REATIVA GERADAS PELAS BARRAS DE FOLGA E DE CONTROLE DE TENSÃO (*PV*) EM FUNÇÃO DE *Pa*, PARA O SISTEMA IEEE-14 BARRAS.

Na Figura 4 são apresentados as variações das potências reativa em função de *Pa*, dos termos que compõem a Equação (5). Da Figura 4(a) pode-se verificar que a potências reativa gerada pelas barras de controle de tensão (*PV*) diminuem com a diminuição das perdas.

Conforme já comentado, manter os geradores existentes operando com o máximo possível de margem de reativo é benéfico para prevenir ou postergar o colapso de tensão [3].

Essa redução de geração de potência reativa nos geradores se deve ao aumento da potência reativa fornecida pelos shunts das linhas de transmissão e pelo banco de capacitor localizado na barra 9, Figura 4(b) e (c) respectivamente, e a redução da perda de potência reativa nos elementos série das linhas de transmissão, ver Figura 4(d).

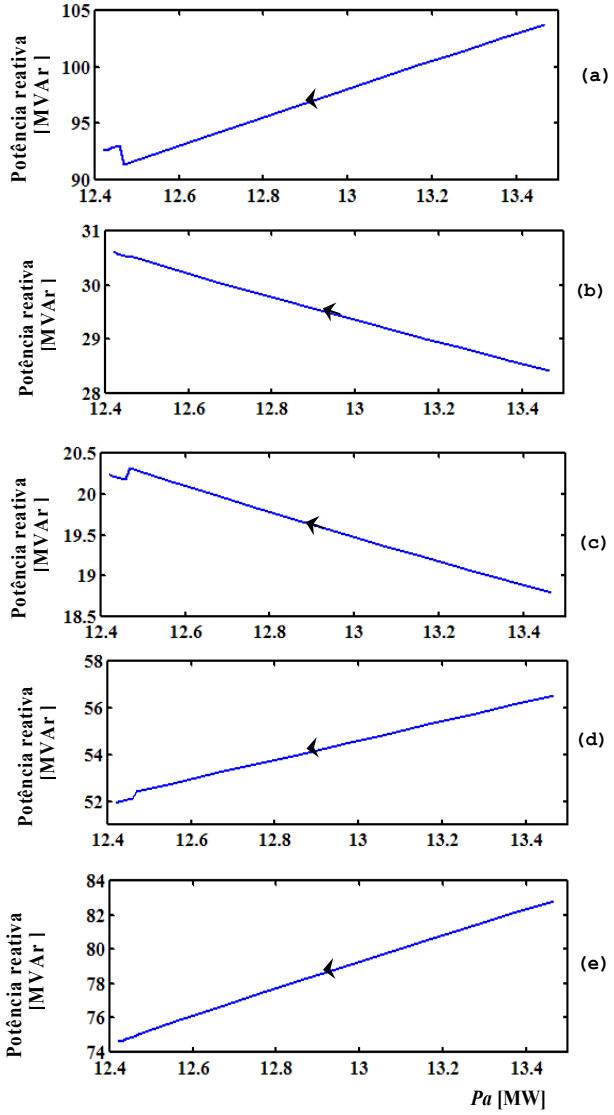

FIGURA 4

VARIAÇÕES DAS POTÊNCIAS REATIVA EM FUNÇÃO DE *Pa* PARA O SISTEMA IEEE-14 BARRAS: (A) SOMATÓRIO DAS VARIAÇÕES DAS POTÊNCIAS REATIVA GERADAS PELAS BARRAS DE CONTROLE DE TENSÃO (*PV*); (B) SOMATÓRIO DAS VARIAÇÕES DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA NOS *SHUNTS* DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO; (C) SOMATÓRIO DAS VARIAÇÕES DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA NOS *SHUNTS* DE BARRA (BANCO DE CAPACITORES E/OU REATORES); (D) SOMATÓRIO DAS VARIAÇÕES DE PERDA DE POTÊNCIA REATIVA NOS ELEMENTOS SÉRIE DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO E (E) SOMATÓRIO DAS VARIAÇÕES DAS POTÊNCIAS REATIVA GERADAS PELAS BARRAS DE CONTROLE DE TENSÃO *PV'S* MAIS A BARRA DE FOLGA

O aumento da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e pelo banco de capacitor é conseqüência direta do aumento das magnitudes de tensão nas barras do sistema, ver Figura 5. A redução das perdas pode ser atribuída ao suprimento local de potência reativa efetuada por meio desses elementos *shunts*.

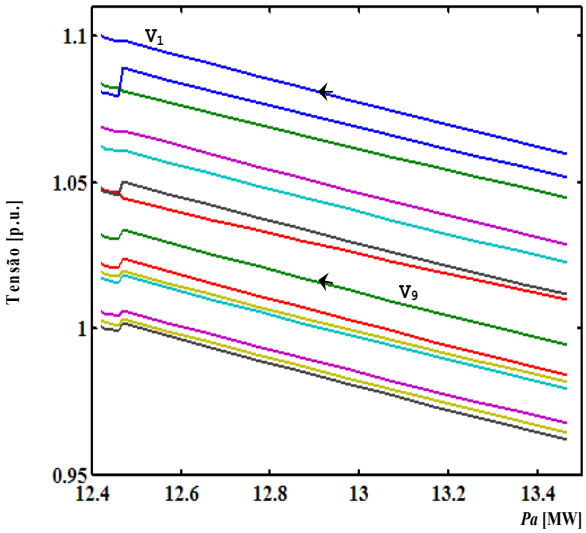

FIGURA **5**
VARIAÇÕES DAS MAGNITUDES DE TENSÃO DAS BARRAS DO SISTEMA IEEE-14 EM FUNÇÃO DE *Pa*

CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se os efeitos do redespacho das variáveis de controle nas reduções da perda total de potência ativa na transmissão do sistema.

Através do sistema IEEE 14 barras é analisado como se dá o balanço de reativo do sistema elétrico de potência durante o processo de redução da perda ativa total.

Na metodologia proposta, é possível se especificar o valor desejado de variação na perda ativa total na transmissão, e a sua solução provê o ponto de operação para o qual a perda ocorre. A geração de potência ativa da barra adotada como barra de folga é reprogramada para fechar o balanço de potência ativa do sistema, ou seja, o seu valor variará a fim de acomodar, além da diferença entre a potência ativa gerada e a consumida de todo o sistema, a redução da perda total de potência ativa na transmissão.

O procedimento nos leva, em geral, a um aumento das magnitudes de tensão nas barras do sistema que por sua vez produzem um aumento da potência reativa fornecida pelos elementos *shunts* das linhas de transmissão e bancos de capacitores, e em consequência disto há uma redução na potencia reativa fornecida pelos geradores, provendo assim uma reserva de reativos o que contribui para a redução na perda ativa total na transmissão.

AGRADECIMENTOS

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

REFERENCIAS

[1] MALANGE F. C. V., ALVES D. A. E DA COSTA G. R. M, "Redução de Perdas de Transmissão Através do Método da Continuação", World Congress on Engineering and Technology Education WCETE 2004, Guarujá (SP), Março de 2004, (Editoração Eletrônica – CD).

[2] SHARIF S. S.; TAYLOR J. H.; HILL E. F.; SCOTT B. ; DALEY D. Real – time implementation of reactive power flow. IEEE Power Engineering Review, New York, p. 47-51, 2000.

[3] CIGRE WORKING GROUP TASK FORCE Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena. Technical report of task force, 1992.

[4] (ALVES et al. 2002-II) ALVES, D. A.; DA COSTA, G. R. M. A ALVES, D. A.; DA COSTA, G. R. M. A Geometric interpretation for transmission real losses minimization through the optimal power flow and its influence on voltage collapse. Electric Power Systems Research, Lausanne, v. 62, p. 111-116, 2002.

[5] MONTICELLI A. J., "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", *Editora Edgard Blücher Ltda*, S. Paulo – SP, Brasil, 1983.