

IX SEPOPE
23 a 27 de maio de 2004
May, 23th to 27th - 2004
Rio de Janeiro (RJ) - Brasil

**IX SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO
DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA**

**IX SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC
OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING**

SP-168

SIMULAÇÃO DA CURVA DE CARGA SEMANAL E DE DISPOSITIVOS DISCRETOS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONTROLE DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE GRANDE PORTE

JOÃO A. PASSOS FILHO¹
CEPEL

LUIZ CLÁUDIO DE A. FERREIRA²
ONS

NELSON MARTINS
CEPEL

DJALMA M. FALCÃO
COPPE

ADRIANO DE A. BARBOSA
ONS

SUMÁRIO

Em estudos de desempenho de controle de tensão, a análise do sistema a longo termo é prejudicada pela dificuldade de representação da atuação de recursos de controle discretos e das variações de carga, prejudicando o estudo do desempenho de controles lentos de tensão.

A representação do chaveamento automático e discreto de recursos de controle de tensão provoca impacto significativo na operação do sistema. Neste trabalho esta modelagem é feita atendendo tanto a uma lógica de controle baseada na escolha de uma barra de tensão controlada, quanto a uma faixa operativa de tensão.

A proposta principal deste artigo é simular uma curva de carga semanal em um programa de fluxo de potência, utilizando um caso real do sistema elétrico brasileiro para a avaliação do desempenho dos recursos de controle de tensão em uma grande área do sistema elétrico brasileiro.

Keywords: Curva de Carga, Chaveamento Automático de Bancos de Capacitores / Reatores, Fluxo de Potência

1. INTRODUÇÃO

Em determinados estudos de operação de sistemas de potência, a avaliação do desempenho da rede envolve a representação da evolução do sistema ao longo do período avaliado. Essa representação pode envolver alterações na configuração de rede, nas capacidades de geração e transmissão, nos despachos de usinas, nas

condições climáticas em base semanal e sazonal e, particularmente para este trabalho, no comportamento das cargas do sistema.

Os tempos envolvidos nas rampas de carga também dificultam esta análise de desempenho em programas de simulação no tempo, prejudicando o estudo da interação de controles lentos de tensão. Desta maneira, os estudos tendem a ser pontuais, ou seja, particularizados para uma condição de carga, com pouca ou nenhuma informação relativa ao desempenho do controle de tensão do sistema na transição entre os períodos de carga.

A referência [1] enfatiza a importância da representação adequada do chaveamento automático e discreto de bancos de capacitores e/ou reatores para avaliação da segurança de tensão de um sistema. Nesta referência a modelagem destes equipamentos foi feita atendendo tanto a uma lógica de controle baseada em uma estratégia previamente definida (escolha da barra controlada), como também respeitando uma faixa de tensão especificada.

A lógica de controle adotada em [1] para o chaveamento dos bancos *shunt* diferenciou-se daquelas baseadas em um valor específico de tensão, como são usualmente representados estes equipamentos na simulação convencional. Todavia, aquela referência se restringiu ao estudo de uma direção específica de crescimento de carga (fluxo de potência continuado), como nas mudanças de carga leve para média, ou de média para a pesada.

¹ Av. Um s/r² - 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)

O trabalho descrito neste artigo envolveu a avaliação, em diferentes direções de crescimento de carga, do desempenho do controle de tensão de um sistema. Este objetivo é alcançado a partir da simulação de uma curva de carga do sistema e da representação do chaveamento automático e discreto de bancos *shunt*.

O artigo apresenta resultados de simulação da curva de carga semanal para dois sistemas. O primeiro sistema analisado é o IEEE-14 barras, onde os resultados são apresentados de forma tutorial. No segundo conjunto de resultados, os modelos e ajustes são testados em um caso real e atual do Sistema Elétrico Interligado Brasileiro relativo ao mês de abril de 2003, mostrando a efetividade, robustez e a relevância da ferramenta desenvolvida.

2. REPRESENTAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE CONTROLE NO FLUXO DE POTÊNCIA

A representação de dispositivos de controle no fluxo de potência é obtida incorporando-se ao problema clássico, equações que descrevem a ação de cada equipamento de controle e uma variável de controle associada [2].

O modelo matemático adotado para representação dos dispositivos de controle, abordados neste trabalho, consiste na adição de uma equação de controle para cada equipamento representado ao sistema de equações original [1, 3, 4, 5]. Este sistema de equações aumentado é descrito em (1):

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

Desta forma, a nova matriz Jacobiana tem maior dimensão do que a matriz Jacobiana original, conforme destacado na equação (1).

Para a representação do controle de tensão da barra através da variação da compensação *shunt*, a susceptância *shunt* do equipamento é considerada uma nova variável do problema [1, 4].

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

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

A equação adicional incorporada ao problema é relativa à barra onde a tensão é controlada. Esta barra é normalmente do tipo PQ, passando a ser considerada como uma barra do tipo PQV, após a inclusão da equação (3), e tendo suas potências ativa e reativa especificadas.

$$\Delta y = V_k^{esp} - V_k \quad (3)$$

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 k

É importante destacar que na modelagem adotada, a tensão controlada deve permanecer dentro de uma faixa de operação permitida, e não necessita ser mantida em um valor fixo. Desta forma, a estrutura de controle adicional à matriz Jacobiana, mostrada em (1), somente fará parte do processo iterativo 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 [6]. Como no modelo matemático a variação é feita de forma contínua, após a convergência do processo iterativo, há necessidade de se ajustar o número de bancos chaveados. 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 os resultados obtidos são bastante satisfatórios.

3. METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DA CURVA DE CARGA

Para simulação da curva de carga, o programa de fluxo de potência do CEPEL, ANAREDE, foi modificado de forma a obter automaticamente a solução do fluxo de potência em cada patamar de carregamento da área de interesse. O fluxograma da Figura 1 mostra a estrutura básica desenvolvida para esta simulação, que é feita através de um novo código de execução incorporado ao programa.

A convergência do método de Newton-Raphson é fortemente dependente das condições iniciais fornecidas para o problema, que no caso de fluxo de potência corresponde às tensões e ângulos em barras de carga. Por este motivo, antes de se considerar que não existe solução para um determinado patamar de carregamento, durante a simulação da curva de carga, as seguintes condições iniciais são sucessivamente utilizadas na busca de solução de cada patamar de carregamento:

- i) O patamar anterior da curva de carga
- ii) Caso base fornecido
- iii) Caso base fornecido, com a solução do fluxo de potência linearizado com distribuição de perdas para melhor adequação dos ângulos das barras

antes da solução completa do método de Newton-Raphson

Os passos preditor e corretor, utilizados no método da continuação, ainda não foram testados na simulação da curva de carga. Entretanto, não espera-se, através da consideração destas etapas no fluxo de potência continuado, melhora no desempenho do método proposto, em virtude da natureza essencialmente descontínua da solução do problema, provocada pelo chaveamento discreto e automático de bancos de compensação *shunt*.

Caso, a metodologia de sugestão para as condições iniciais não seja suficiente para a obtenção de uma solução para um dado carregamento, este caso é automaticamente excluído da curva de carga, sendo registrado em arquivo específico para casos não convergentes, continuando-se com a simulação a partir do próximo ponto.

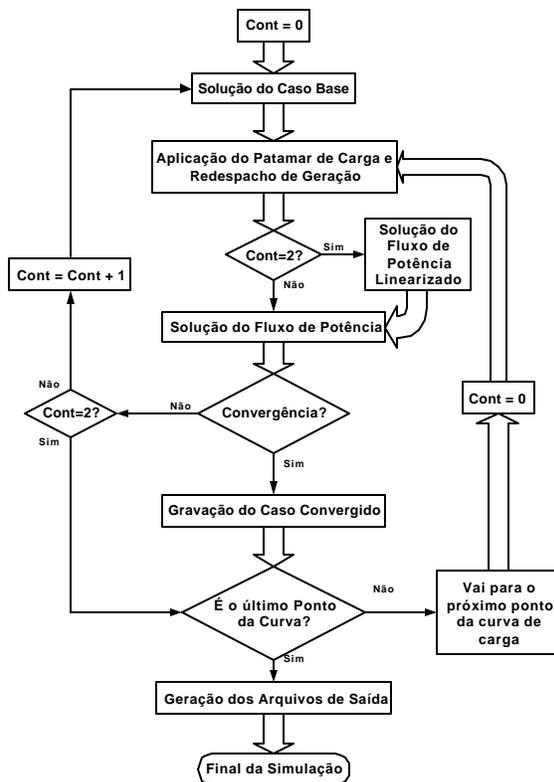


Figura 1 – Estrutura básica da simulação da curva de carga

4. RESULTADOS

4.1 IEEE 14 Barras

A metodologia proposta para simulação da curva de carga é ilustrada nesta seção através da simulação do sistema IEEE de 14 barras. O carregamento original deste sistema teste foi elevado através de um programa de fluxo de potência ótimo, com a função objetivo definida como máximo carregamento e mínima

compensação *shunt*, de tal forma que seu carregamento é máximo sem que nenhuma tensão seja violada.

A Figura 2 apresenta a topologia deste sistema e outros dados relevantes são mostrados na Tabela 1.

De forma a melhor explorar os resultados, considera-se que os bancos de capacitores são divididos em blocos de 20 Mvar, cada um destes manobráveis sob carga independentemente. Considera-se ainda que as barras de tensão controlada são as mesmas onde estão localizados os equipamentos.

Tabela 1– Dados do sistema IEEE – 14 barras

Barras PV	5
Circuitos	20
Carga Ativa	497 MW
Geração Ativa	560 MW

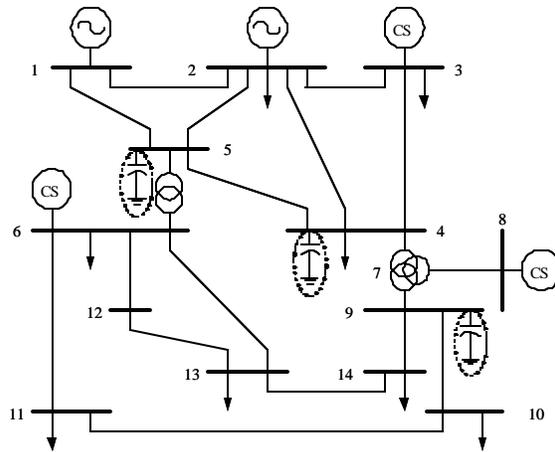


Figura 2 – Topologia do sistema IEEE – 14 barras

A configuração (número de blocos independentes) destes bancos de capacitores, bem como a faixa de tensão adotada para o controle de tensão, utilizada para o chaveamento automático dos bancos de capacitores, são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Configuração dos bancos de capacitores do sistema IEEE – 14 barras

Barra	Faixa de Tensão		Configuração dos Bancos
	Mínima	Máxima	
4	0,950 p.u.	1,050 p.u.	5 x 20 Mvar
5	0,950 p.u.	1,050 p.u.	5 x 20 Mvar
9	0,950 p.u.	1,050 p.u.	1 x 19 Mvar

A curva de carga da Figura 3, apresentada em valores percentuais do carregamento máximo, é aplicada a todas as barras de carga deste sistema. Esta curva é composta de 168 pontos, o que corresponde a uma semana completa com patamares de 1 hora, e tem por objetivo representar uma semana típica de verão com início em um domingo [7].

A carga ativa e reativa do sistema é considerada do tipo potência constante, sendo o fator de potência mantido fixo durante toda a simulação. A variação da carga ativa e das perdas é compensada na barra de referência do sistema.

Na primeira simulação da curva de carga os bancos de capacitores foram considerados fixos em seus valores máximos, definidos na Tabela 2. Numa segunda simulação da curva de carga, considera-se o chaveamento automático e discreto dos bancos de capacitores. Para melhor comparação dos resultados obtidos, as duas curvas são traçadas em um mesmo gráfico.

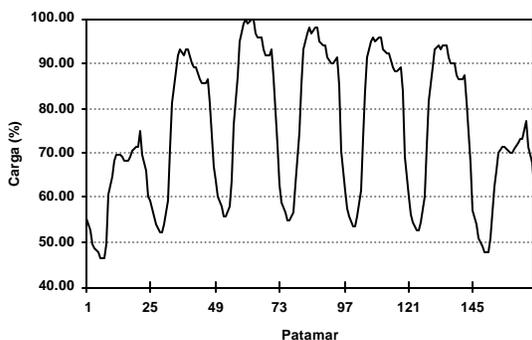


Figura 3 – Curva de carga aplicada ao sistema IEEE-14

As Figuras 4, 5 e 6 mostram o perfil de tensão das barras 4, 5 e 9, respectivamente.

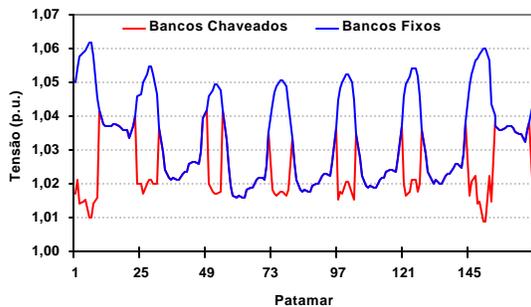


Figura 4 – Perfil de tensão da barra 4

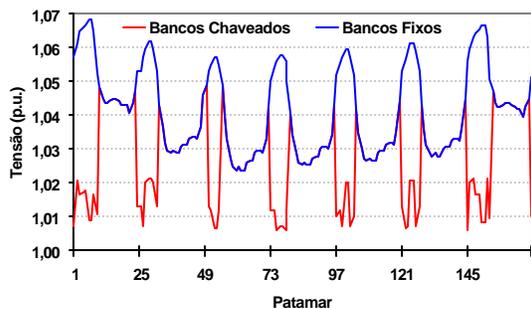


Figura 5 – Perfil de tensão da barra 5

Os resultados das Figuras 4, 5 e 6 mostram que as tensões das barras são mantidas dentro dos limites,

através do chaveamento automático dos bancos de capacitores, em todos os períodos de carga. Este fato indica que a estratégia de controle adotada está correta, visto que os bancos de capacitores foram retirados de operação em períodos de carga leve, evitando assim sobretensões no sistema.

A Figura 7 mostra a evolução do chaveamento dos bancos de capacitores, por unidade manobrada, durante a simulação. É também importante destacar que, neste sistema tutorial o programa obteve convergência para 100 % dos patamares de carga para as duas simulações efetuadas.

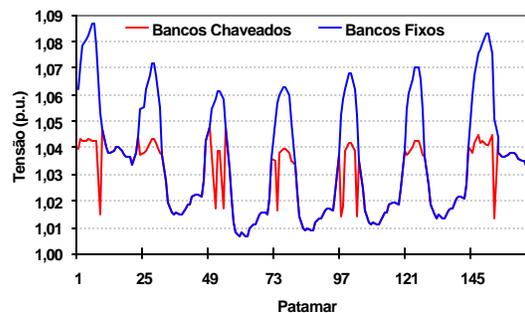


Figura 6 – Perfil de tensão da barra 9

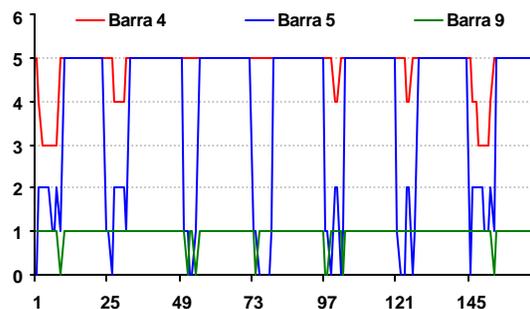


Figura 7 – Evolução do chaveamento dos bancos de capacitores durante a simulação da curva de carga

4.2 Sistema Brasileiro

O método proposto foi implementado no programa ANAREDE, para a simulação em uma grande área do sistema elétrico brasileiro – a área Rio de Janeiro / Espírito Santo. Esta área foi escolhida para teste por ter seu desempenho de tensão 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.

A topologia básica desta área é mostrada na Figura 8. As siglas de duas letras dentro dos círculos identificam algumas das principais subestações da área, com maior influência no seu desempenho.

A definição das estratégias de controle dos recursos de potência reativa, caracterizada pela escolha das barras

A Figura 9 apresenta a curva de carga utilizada como dado de entrada desta simulação em valores percentuais do carregamento do caso base. A curva é composta por 336 pontos que representam valores médios em intervalos de 30 minutos. Ela representa o perfil de carregamento de uma semana típica do mês de abril de 2003 para o sistema brasileiro, com início em uma sexta-feira [8].

A Tabela 5 reproduz os limites de tensão gerais para os três níveis de tensão da transmissão. Como um subconjunto das faixas gerais da Tabela 5, considerou-se outros limites mais restritivos, assim como faixas de tensão específicas para as barras de carga, atendendo as recomendações operativas vigentes para a operação do sistema.

A Tabela 6 apresenta alguns limites para barras de carga e de interligação, considerados no estudo, como subconjunto dos limites gerais informados na Tabela 5.

Tabela 5 – Níveis de tensão para estudos elétricos

Nível de Tensão	Faixa de Tensão	
	Mínima	Máxima
345 kV	0,950 p.u.	1,050 p.u.
500 kV	0,950 p.u.	1,100 p.u.
765 kV	0,960 p.u.	1,046 p.u.

Tabela 6 – Faixas de tensão para barras de carga e de interligação consideradas em estudos elétricos

Barra	Faixa de Tensão	
	Mínima	Máxima
Ivaiporã 500 kV	1,000 p.u.	1,030 p.u.
T. Preto 345 kV	1,025 p.u.	1,043 p.u.
São José 138 kV	0,974 p.u.	1,030 p.u.
Adriano 138 kV	1,020 p.u.	1,050 p.u.
Campos 138 kV	1,014 p.u.	1,050 p.u.
Vitória 138 kV	1,007 p.u.	1,043 p.u.
Jacaré 138 kV	0,990 p.u.	1,010 p.u.
Angra 138 kV	1,007 p.u.	1,043 p.u.
C. Paulista 138 kV	1,029 p.u.	1,050 p.u.
Barras de Carga	0,980 p.u.	1,050 p.u.

As Figuras 10 a 13 apresentam o perfil das tensões obtido na simulação do ANAREDE para algumas barras representativas do controle de tensão da área Rio de Janeiro / Espírito Santo.

É importante observar que, mesmo com variações de carga da ordem de até 40% (carga mínima, na Figura 9), a estratégia e os recursos de controle de tensão respeitam os limites operativos descritos nas Tabelas 5 e 6.

A robustez da metodologia proposta é atestada pela taxa de 100% de convergência, obtida para os 336 patamares da curva de carga simulada.

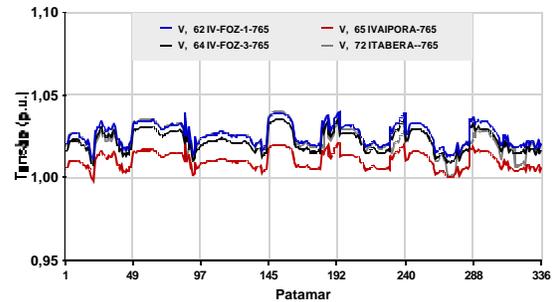


Figura 10 – Perfil de tensão da malha de 765 kV

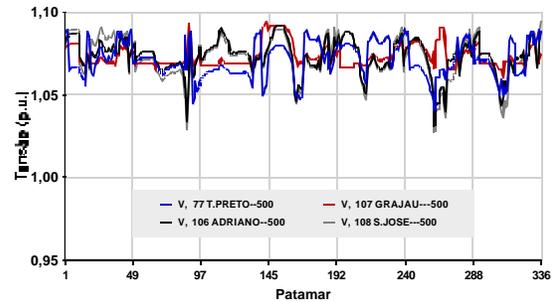


Figura 11 – Perfil de tensão da malha de 500 kV

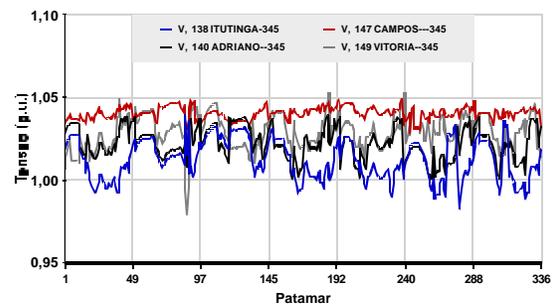


Figura 12 – Perfil de tensão da malha de 345 kV

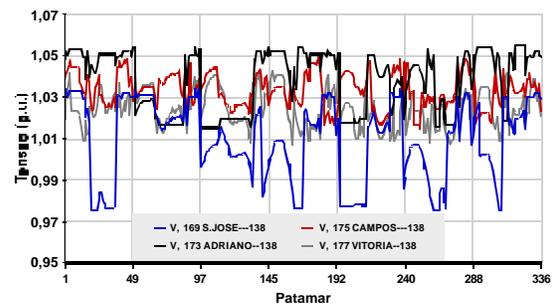


Figura 13 – Perfil de tensão da malha de 138 kV

As Figuras 15 e 16 mostram a evolução do chaveamento dos bancos de capacitores/reatores como recurso de controle de tensão da Área Rio de Janeiro / Espírito Santo. Nestas figuras pode-se observar a coerente coordenação dos recursos shunt de controle de tensão, de forma a atender a curva de carga apresentada na Figura 9.

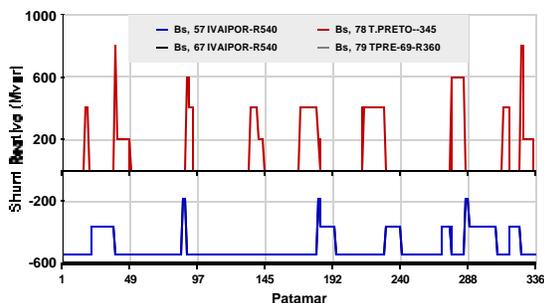


Figura 14 – Evolução do chaveamento de bancos shunt para controle de tensão da malha de 765 kV

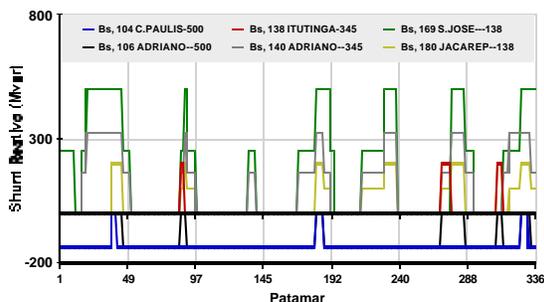


Figura 15 – Evolução do chaveamento de bancos shunt para controle de tensão da malha de transmissão da área Rio de Janeiro / Espírito Santo

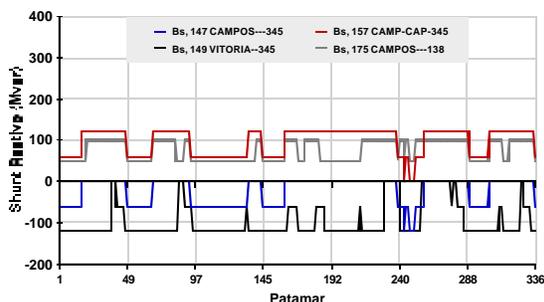


Figura 16 – Evolução do chaveamento de bancos shunt para controle de tensão da malha de transmissão de suprimento da área Espírito Santo

5. CONCLUSÕES

Este artigo propõe a simulação automática da curva de carga em um programa de fluxo de potência, incorporando a representação do chaveamento automático de bancos *shunt* durante a variação do carregamento do sistema. Os resultados apresentados mostram que o método é efetivo e suficientemente robusto para analisar o desempenho coordenado de uma grande quantidade de recursos de controle de tensão em um período semanal de estudo, com variações significativas de carga.

Simulações considerando curvas de carga para outras regiões (respeitando-se ainda condições realistas de disponibilidade energética nas diversas regiões do

sistema e limites de intercâmbio entre áreas), sistemas e recursos em áreas ainda mais amplas, em conjunto com a análise da influência da modelagem da carga, serão objeto de estudo futuro.

Estas futuras simulações serão realizadas considerando-se que a natureza da carga agregada varia ao longo do dia, visto que a participação da carga tipo motor de indução aumenta em dias quentes, por exemplo, em função da maior utilização de aparelhos de ar condicionado. Resultados desta natureza utilizando o fluxo de potência continuado indicaram impacto significativo no perfil de tensão da área Rio de Janeiro / Espírito Santo quando se modela adequadamente estas cargas [9].

6. REFERÊNCIAS

- [1] J. A. Passos Filho, L. C. A. Ferreira, N. Martins e A. C. Z. Souza, “Benefícios da Representação do Controle Automático e Discreto de Bancos de Capacitores/Reatores e de LTC Sistêmicos em Estudos de Segurança de Tensão”, XVII SNPTEE, Uberlândia, MG, Brasil, outubro de 2003.
- [2] A. J. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.
- [3] H. J. C. P. Pinto, J. L. R. Pereira, N. Martins, J. A. Passos Filho, S. G. Junior, F. R. M. Alves, J. C. R. Ferraz, R. M. Henriques and V. M. Costa, “Needs and Improvements in Power Flow Analysis”, VII SEPOPE, Curitiba, PR, Brasil, Maio de 2000.
- [4] J. A. Passos Filho, N. Martins, J. C. R. Ferraz, D. Falcão, H. J. C. P. Pinto, “Modelagem de Chaveamento Automático de Banco de Capacitores/Reatores para Estudos com Fluxo de Potência Continuado”, VIII SEPOPE, Brasília, DF, Brasil, Maio de 2002.
- [5] V. M. da Costa, N. Martins e J. L. R. Pereira, “Representation of User Defined Controls in the Power Flow Problem”, VI SEPOPE, Salvador, BA, Brasil, Maio de 1998.
- [6] Wen-Hsiung E. Liu, Alex D. Papalexopoulos and William F. Tinney, “Discrete Shunt Controls in a Newton Optimal Power Flow”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 4, November 1992.
- [7] IEEE, “IEEE Reliability Test System”, IEEE Transmission on Power Apparatus and Systems, PAS-98, 1979.
- [8] Página oficial do ONS, disponível no endereço eletrônico <http://www.ons.com.br/ons/>.
- [9] N. Martins, Ricardo M. Henriques, Adriano A. Barbosa, Sérgio G. Júnior, Camilo B. Gomes, A. C. Barbosa Martins, “Impact of Induction Motor Loads in System Loadability Margins and Damping of Inter-Area Modes”, IEEE/PES, Power System Dynamic Performance Committee, Toronto, 2003.