

CONTROLE ÓTIMO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA UTILIZANDO NUVEM DE PARTÍCULAS

M. GROETAERS DOS SANTOS, L. S. OCHI, M. TH. SCHILLING, M. B. DO COUTTO F^O, J. C. STACCHINI DE SOUZA

*Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco E, sala 350 - CEP 24210-240, Niterói, RJ*

C-els: marcel@ons.org.br, satoru@ic.uff.br, schilling@ic.uff.br, mbrown@ic.uff.br, julio@ic.uff.br

Abstract— This paper describes an application of the *particle swarm* optimization technique to the reactive-voltage control problem, bearing in mind voltage security assessment. Thus, one can formulate a mixed-integer nonlinear optimization problem, which is tackled by an extension of the original particle swarm optimization technique. A convenient real-time control strategy is established taking into account discrete and continuous control variables, such as: automatic voltage regulator settings; generator power reactive limits; transformer tap positions; number of voltage control equipment at each bar. The method considers the voltage security assessment by means of successive power flow solutions for consecutive incremental load increase from the basic operating point. The method feasibility is demonstrated by its application to practical power systems with encouraging results.

Keywords— particle swarm optimization, voltage control; power systems.

Resumo— Este artigo apresenta uma aplicação da técnica de otimização conhecida por *nuvem de partículas* ao problema de controle de potência reativa-tensão, tendo em vista a avaliação da segurança de tensão de sistemas de potência. Assim, formula-se um problema de otimização inteira mista não-linear, tratado por uma extensão da técnica de *nuvem de partículas*. Para tal, determina-se uma estratégia de controle para tempo real, com variáveis discretas e contínuas, envolvendo: regulador automático de tensão, limites operacionais de geradores, posições de tapetes de comutadores; número de equipamentos de compensação reativa de cada barra. O método avalia a segurança de tensão, valendo-se do cálculo de um fluxo de potência para sucessivos incrementos de carga a partir do caso base. A viabilidade do método é demonstrada para modelos de sistemas de potência práticos, com resultados promissores.

Palavras-chave— nuvem de partículas, controle ótimo de tensão; sistemas de potência

1 Introdução

O controle de tensão é um aspecto importante a ser considerado na operação de um sistema de potência, bem como na avaliação da qualidade do fornecimento de energia elétrica. Cargas elétricas de um sistema variam hora a hora e as tensões das barras acompanham tais variações. Nos centros de controle, operadores do sistema gerenciam equipamentos (e.g., geradores, transformadores, capacitores/reatores) que injetam ou absorvem potência reativa necessária ao controle das tensões nas diversas partes do sistema, segundo uma estratégia conhecida por controle de potência reativa-tensão (CQV).

Os CQV existentes na prática freqüentemente são estabelecidos com base na análise de sensibilidade do fluxo de potência [1] devendo ser suficientemente eficientes para o ambiente de tempo real onde atuam.

A redução dos custos de geração é um dos objetivos correntes das empresas de energia elétrica. Portanto, um controle ótimo para minimizar as perdas de transmissão é requerido para uma estratégia de CQV, em lugar de uma simples análise de sensibilidade do fluxo de potência.

Já que muitas ocorrências de colapso de tensão foram observadas durante as últimas três décadas, os problemas de segurança de tensão ganharam importância sendo também incorporados às estratégias de CQV.

Duas avaliações devem ser realizadas no que concerne à segurança de tensão. Primeiramente, avalia-se a que distância se encontra o estado de

operação corrente do ponto de colapso. Isto pode ser feito através de uma curva $P-V$, usando-se um fluxo de potência continuado [2]. No presente artigo, sem perda de generalidade, adotou-se um fluxo de potência desacoplado rápido [3]. A ocorrência de várias contingências no ponto de operação corrente, calculando-se a distância entre os pontos de operação pós-defeito e os pontos de colapso para cada contingência, pode ser considerada na definição da estratégia de controle. Este cálculo é chamado de análise de contingência de tensão. Se uma distância adequada puder ser obtida para as duas situações, o novo ponto de operação calculado pelo CQV pode ser estabelecido como seguro. Assim, o CQV avançado requer estratégias de controle ótimo considerando a minimização de perdas ativas e a segurança de tensão.

O CQV pode ser formulado como um problema de otimização com variáveis de estado contínuas, tais como valores operativos dos reguladores automáticos de tensão, e discretas, tais como posições de tapetes de transformadores e o número de equipamentos de compensação reativa em operação. A função-objetivo pode variar de acordo com a condição de operação do sistema. Por exemplo, a função pode ser a minimização das perdas de transmissão para as condições normais de operação. Convencionalmente, os métodos para o problema de CQV se valem de técnicas como conjuntos difusos, sistemas especialistas, programação matemática, e análise de sensibilidade [4,5,6,7].

Entretanto, um método prático para um problema de CQV, formulado como um problema de programação inteira mista não-linear (PINL), com

variáveis de estado discretas e contínuas, tem se apresentado como uma meta a ser atingida.

A nuvem de partículas é uma das técnicas da computação evolutiva [8] que permite originalmente tratar variáveis de estado contínuas com facilidade. Além disso, tal técnica pode ser expandida para tratar conjuntamente variáveis de estado contínuas e discretas. Portanto, o método pode ser aplicável ao CQV formulado como um PINL. Vários métodos, e.g. decomposição de Benders generalizada, foram desenvolvidos para a solução de um PINL. Para utilização dos métodos convencionais, o problema principal é usualmente dividido em subproblemas com solução individualizada. A nuvem de partículas, ao contrário, pode abordar o PINL por ínteiro, de forma fácil e natural, sendo de aplicação mais ampla do que métodos convencionais [9]. O CQV apresenta várias restrições de difícil abordagem matemática. A técnica da nuvem de partículas pode ser adequada para o CQV por ser capaz de abordar tais restrições facilmente.

A seguir, apresenta-se a técnica de nuvem de partículas aplicada ao problema de CQV formulado como um PINL, considerando a segurança de tensão, abordada através do uso de um fluxo de carga convencional, não continuado.

2 Formulação do Problema

Para uma condição de operação normal, o CQV pode ser formulado como:

$$\text{minimize } f_c(x, y) = \sum_{i=1}^n \text{Perda}_i \quad (1)$$

onde: n = número de ramos; x = variáveis contínuas; y = variáveis discretas; Perda_i - perda ativa no ramo i , sujeito a:

- Restrição de tensão: O módulo da tensão em cada barra deve estar dentro dos limites permitidos para manutenção da qualidade de energia;
- Restrição de carregamento: O fluxo de potência em cada ramo deve estar dentro dos limites permitidos de carregamento;
- Segurança de tensão: A estratégia de CQV determinada deve assegurar a segurança de tensão para o sistema de potência considerado.

As perdas ativas do sistema são calculadas para uma certa estratégia de CQV, usando a solução de um fluxo de carga com variáveis contínuas (valores do controle automático de tensão) e discretas (posições de tapes dos transformadores e o número de equipamentos de compensação reativa). As restrições de tensão e de carregamento são verificadas durante os cálculos do fluxo de potência, com a adição de penalidades no caso de violação de alguma restrição.

As curvas $P-V$, para a estratégia de CQV considerada são geradas verificando se o CQV candidato pode manter margens de segurança de tensão suficientes. Considera-se a carga modelada como potência constante, sendo esta a modelagem mais conservativa para problemas de segurança de

tensão. Os seguintes aspectos são considerados no problema de CQV:

- Valores de tensões terminais determinados pelos reguladores automáticos de tensão (variável contínua);
- Posições de tapes de transformadores (variável discreta);
- O número de equipamentos de compensação de potência reativa (variável discreta)

Os valores operacionais dos controles automáticos de tensão são considerados como tensões especificadas. Posições de tapes são tratadas como razões de tape para cada posição de tape, enquanto o número de equipamentos de compensação reativa é modelado por um valor correspondente de susceptância.

3 Otimização por Nuvem de Partículas

A técnica de otimização por nuvem de partículas [8] foi desenvolvida para a construção de modelos sociais simplificados. As características do método são as seguintes:

- Baseia-se na pesquisa do comportamento de grupos coletivos de animais, tais como: enxames, cardumes e bandos de pássaros;
- Utiliza conceitos simples que envolvem baixos requisitos computacionais;
- Concepção originalmente desenvolvida para tratar problemas de otimização não-linear com variáveis contínuas. Entretanto, pode ser facilmente expandido para abordar problemas com variáveis discretas, tais como o CQV.

Destaca-se na característica (c) a sua adaptação ao problema de CQV, visto que métodos práticos eficientes não foram desenvolvidos para o problema considerando variáveis contínuas e discretas. As características acima permitem à nuvem de partículas abordar o problema de CQV, requerendo tempos de computação reduzidos.

As pesquisas do comportamento de bandos de pássaros mostraram que os pássaros acham alimento por meio de esforço conjunto, não individualmente. As observações conduzem à suposição que cada informação é compartilhada dentro do bando. Além disso, de acordo com a observação do comportamento de grupos humanos, a atuação de cada indivíduo (partícula) é, também, baseada em outros padrões de comportamento de acordo com a experiência individual. Essas suposições formam a base conceitual da técnica que desenvolve-se basicamente através da simulação do comportamento de um bando de pássaros (nuvem de partículas) no espaço bi-dimensional. A posição de cada partícula é representada em relação aos eixos coordenados XY e a velocidade (vetor deslocamento) é expressa por suas componentes v_x (velocidade no eixo X) e v_y (velocidade no eixo Y). A modificação da posição de uma partícula é feita pelo uso da informação de posição e velocidade atuais da partícula.

Procedimentos de busca através desta técnica com os conceitos anteriores podem ser descritos

assim: uma nuvem de partículas otimiza uma certa função objetivo, cada partícula conhece seu melhor valor obtido até o momento ($pbest$) e sua posição XY . Além disso, cada partícula conhece o melhor valor do grupo ($gbest$) entre os $pbest$, precisamente o melhor valor do grupo até o momento. A velocidade modificada de cada partícula pode ser calculada usando-se a velocidade corrente e a distância entre $pbest$ e $gbest$ como mostrado a seguir:

$$v_i^{k+1} = w_i v_i^k + c_1 rand \times (pbest_i - s_i^k) + c_2 rand \times (gbest - s_i^k) \quad (2)$$

onde:

- v_i^k velocidade corrente da partícula i na iteração k ;
- v_i^{k+1} velocidade modificada da partícula i ;
- $rand$ número aleatório entre 0 e 1;
- s_i^k posição corrente da partícula i na iteração k ;
- $pbest_i$ melhor valor da partícula i ;
- $gbest_i$ melhor valor do grupo;
- w_i função de ponderação da velocidade da partícula i ;
- c_i coeficientes de ponderação.

O uso da equação (2) permite o cálculo de uma velocidade que se aproxima gradualmente de $pbest$. A posição corrente (ponto de busca no espaço de soluções) pode ser modificada através da seguinte equação:

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (3)$$

A Figura 1 mostra o conceito acima apresentado para modificação dos pontos de busca. Variáveis discretas podem ser manipuladas por (2) e (3) com pequenas modificações. Números inteiros podem ser utilizados para expressar a posição e a velocidade correntes. Se um número aleatório inteiro for utilizado em (2) e todo o cálculo do lado direito de (2) for discretizado para o número inteiro presente, é possível tratar números contínuos ou discretos sem nenhuma inconsistência.

As características deste procedimento de busca são sumarizadas a seguir:

- a) A nuvem de partículas utiliza vários pontos de busca da mesma forma que um algoritmo genético e os pontos de busca aproximam-se gradualmente do ponto ótimo utilizando seus $pbest$ e $gbest$;
- b) O primeiro termo do lado direito de (2) corresponde à diversificação no procedimento de busca. O segundo e o terceiro termos correspondem a uma intensificação. Isto é, o método possui um mecanismo bem balanceado para uso de diversificação e intensificação de forma eficiente durante o procedimento de busca;

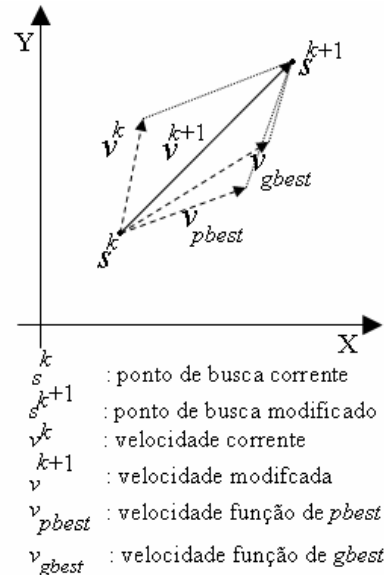


Fig. 1: Conceito de evolução do ponto de busca

c) A forma original da técnica de otimização por nuvem de partículas só pode ser aplicada a problemas contínuos. Entretanto, o método pode ser facilmente expandido para o problema discreto usando números inteiros para determinação da posição XY e da velocidade;

- d) Não se gera inconsistência nos procedimentos de busca mesmo que variáveis de estado contínuas e discretas sejam utilizadas com eixos com gradações contínuas e pontos coordenados discretos para representação da posição XY e da velocidade. Isto é, o método pode ser aplicado a um problema de programação inteira não-linear, com variáveis de estado contínuas e discretas de forma fácil e natural;
- e) O conceito foi explicado a partir do caso bi-dimensional. Entretanto, o método pode ser aplicado facilmente a problemas n -dimensionais.

A característica (b) pode ser explicada como segue. O lado direito de (2) consiste de três termos. O primeiro termo corresponde à velocidade prévia da partícula. O segundo e o terceiro termos são utilizados para mudar a velocidade da partícula. Sem esses termos a partícula continuará se deslocando na mesma direção até atingir a fronteira. Isto corresponde a explorar novas regiões, com o primeiro termo sendo responsável pela diversificação no processo de busca. Por outro lado, sem o primeiro termo, a velocidade da partícula em deslocamento é determinada somente pelo uso da posição corrente e de suas melhores posições históricas. Isto é, as partículas tenderão a convergir para seus melhores $pbest$ e/ou $gbest$, com o segundo e terceiro termos correspondendo a uma intensificação no processo de busca. O conceito da nuvem de partículas estendida para um PINL é mostrado na Figura 2.

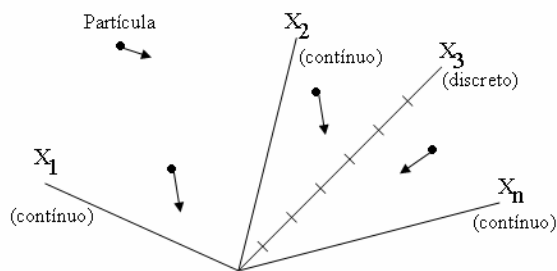


Fig. 2: Extensão do conceito da nuvem de partículas para representação de um PINL.

4 Avaliação da Segurança de Tensão

A curva $P-V$ estática representa a relação entre o crescimento de carga e a variação de tensão. Ela pode ser calculada através da aplicação de um crescimento gradual das cargas do sistema em estudo, registrando-se graficamente, para cada passo de crescimento de carga, o valor da tensão obtida na(s) barra(s) de interesse. Várias são as metodologias que podem ser utilizadas nesse cálculo, estando seu detalhamento fora do escopo desse trabalho. Por simplicidade, porém sem perda de generalidade, será utilizado um cálculo convencional de fluxo de carga através de um método de Newton-Raphson completo (não continuado).

Através da geração da curva $P-V$, calcula-se uma margem de carga (MW), a qual define uma distância entre o ponto operativo presente e o ponto de colapso de tensão para uma estratégia de controle definida. Nessa etapa, é desejável proceder-se uma análise de contingências a cada passo de incremento de carga até que se atinja uma condição e colapso. A margem obtida é comparada com um valor estipulado para determinar se o sistema é ou não seguro no que concerne à estabilidade de tensão. Em resumo, o procedimento para avaliação da segurança de tensão pode ser descrito como:

Passo 1: Avaliação da estratégia de controle: Verifica-se se a nova condição operativa do sistema após a aplicação dos controles resulta ou não em margem de carga (MW) suficiente.

Passo 2: Análise de contingências: Uma lista pré-definida de contingências é percorrida com o cálculo da margem de carga do sistema para a estratégia de controle corrente.

Se as margens de carga para a estratégia de controle corrente e para a lista de contingências considerada forem suficientemente seguras, a estratégia de controle corrente será selecionada. Caso contrário será desconsiderada. Com esse procedimento, o método é capaz de verificar se o sistema em estudo pode ou não manter a segurança de tensão via controle.

5 Formulação do Controle QV

Cada variável é tratada pela nuvem de partículas da seguinte forma: pontos iniciais de operação dos reguladores automáticos de tensão são gerados aleatoriamente na faixa definida pelas

tensões máximas e mínimas de operação. Durante o processo de busca esses valores também variam respeitando essa faixa. As posições iniciais dos tapes dos transformadores são também geradas aleatoriamente no interior da faixa de excursão dos tapes. Durante a busca, tais posições são variadas respeitando-se as posições de tape existentes. O número de equipamentos de controle de tensão inicialmente em operação também é gerado aleatoriamente, entre 0 e o número de equipamentos existente em cada subestação (barra). Durante a busca, a variação desse número se dá respeitando a quantidade de equipamentos de controle existente em cada subestação.

O algoritmo empregado neste trabalho pode ser descrito como se segue:

Passo 1: Os pontos iniciais de busca e velocidades das partículas são gerados aleatoriamente usando-se as variáveis de estado anteriormente citadas;

Passo 2: As perdas ativas ($perda_i$) associadas a cada partícula são calculadas para cada ponto de busca através de um cálculo de fluxo de potência. Se as restrições forem violadas, uma penalidade será adicionada às perdas (valor de avaliação da partícula);

Passo 3: $pbest$ é determinado para cada ponto inicial de busca. O melhor valor inicial calculado (perdas com penalidade) entre os $pbests$ é tomado como $gbest$;

Passo 4: Novas velocidades são calculadas usando (2);

Passo 5: Novos pontos de busca são calculados usando (3);

Passo 6: Calcula-se, para os novos pontos de busca, $perda_i$ e os valores de avaliação para cada partícula;

Passo 7: Se o valor de avaliação de cada partícula for melhor que seu $pbest$ anterior, o novo valor é igualado a $pbest$. Se o melhor $pbest$ for melhor que o $gbest$ corrente, seu valor é igualado a $gbest$. Todos os $gbests$ são armazenados como candidatos para a estratégia final de controle de tensão;

Passo 8: Se o número máximo de iterações for atingido, vá para o **Passo 9**. Se não, vá para o **Passo 4**;

Passo 9: São geradas curvas $P-V$ e, quando for o caso, realizadas as análises de contingências para os candidatos selecionados (lista de $gbests$), usando os melhores $gbest$ entre os armazenados. Se a margem de carga (MW) for maior que um valor pré-determinado, o controle correspondente é escolhido como solução final. Caso contrário, é selecionado o próximo $gbest$ e repetido o cálculo da margem de carga.

Caso as restrições de tensão ou de fluxos de potência sejam violadas, o valor absoluto do valor violado entre os limites máximo e mínimo é fortemente ponderado e adicionado à função objetivo (1). O número máximo de iterações deve ser determinado por uma pré-simulação. Resultados da literatura apontam que a PSO requer menos que 100

iterações, mesmo para problemas de larga escala. Existem muitas formas de se formular o CQV considerando a avaliação de segurança de tensão. Uma opção é a maximização da margem de carga (MW) em lugar da minimização de perdas. Deve-se destacar que a realização dos cálculos de margem de carga durante o procedimento de otimização é muito lento. No estudo a ser apresentado utilizou-se apenas minimização de perdas como função objetivo, verificando-se se a estratégia de controle apresenta margem de carga suficiente, ou não, após a minimização de perdas. Considerando-se o compromisso entre o controle ótimo e o tempo de execução, a análise de contingências só deve ser feita ao final da obtenção dos candidatos a controle ótimo. Se a maximização da margem de carga for a função objetivo, um método aproximado de cálculo deve ser utilizado em conjunto com computação paralela durante o procedimento de busca via nuvem de partículas.

6 Exemplo Numérico

O sistema utilizado para ilustrar a aplicação aqui tratada foi extraído de [10]. Trata-se de um sistema de nove barras, três geradores e três cargas. Adicionalmente ao sistema original, considerou-se a existência de equipamentos de compensação reativa nas barras 5, 6 e 8 e de transformadores com comutação sob carga entre as barras 1 e 4, 2 e 7 e 3 e 9. Isso foi feito para uma conveniente demonstração dos resultados da técnica de otimização por nuvem de partículas, considerando a presença de equipamentos que dão origem a variáveis discretas. O sistema teste e dados correspondentes são apresentados na Figura 3.

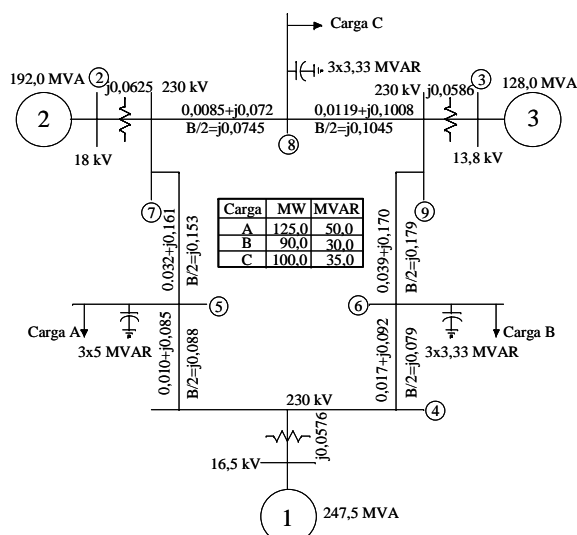


Fig. 3: Sistema Teste (impedâncias em pu na base 100 MVA)

Para a análise efetuada foram consideradas as seguintes premissas:

a) Tensões de geração podem variar na faixa de 0,9 pu a 1,1 pu;

b) Tensões nas barras de carga devem respeitar os limites entre 0,95 pu e 1,05 pu;

c) Os taps dos transformadores foram fixados na posição 1,0 pu;

d) Os capacitores variam entre 1/3 pu e 1 pu de seu valor nominal;

e) A nuvem considerada é composta por 20 partículas;

f) O limite de gerações sucessivas de nuvens foi considerado igual a 100;

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos para esse sistema.

Otimização por nuvem de partículas para minimização de perdas: A técnica foi aplicada ao sistema anteriormente descrito tendo como função objetivo a minimização das perdas em função das tensões de geração e da variação da compensação capacitiva existente nas barras 5, 6 e 8. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4. Os resultados apresentados correspondem ao melhor valor obtido para cada nuvem avaliada.

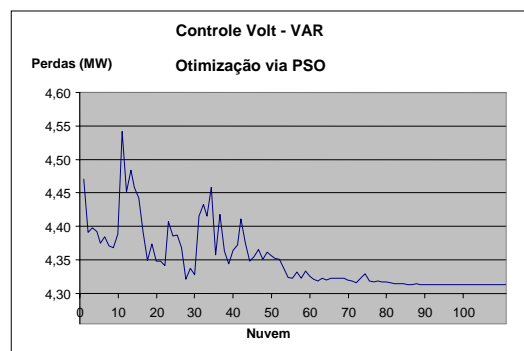


Fig. 4: Otimização por perdas ativas.

Verificação da segurança de tensão: Para cada uma das melhores partículas de cada nuvem gerada foi analisado o comportamento do sistema no que concerne a segurança de tensão. Essa avaliação foi realizada através do cálculo sucessivo de vários fluxos de potência em função da variação incremental da carga da barra 5. Considerou-se que o sistema atinge o limite de estabilidade de tensão quando o cálculo do fluxo de potência não mais converge. Tal suposição não implica em perda de generalidade na aplicação do método e, na verdade, é utilizada como suficiente para determinação do ponto de colapso por algumas ferramentas de uso comercial [11]. Na Figura 5 e na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos para essa avaliação.

Estratégia adotada para o CQV: Para a melhor partícula da nuvem 32, o carregamento máximo atingido na barra 5 foi de 423,75 MW, correspondendo a uma margem de 298,75 MW. Para a melhor partícula da nuvem 100 esses valores são 420 MW e 295 MW, respectivamente. A diferença de margem entre os melhores da nuvem 32 e da nuvem 100 é de apenas 3,75 MW, ou 3% da carga inicial da barra 5. Para a melhor partícula da nuvem 1, a qual correspondem as maiores perdas e a menor

margem, esses valores são, respectivamente, 403,5 MW e 278,5 MW. A diferença de margem entre o melhor e a pior partícula é de 20,25 MW, correspondendo a um ganho de 16,2 % na margem de segurança do sistema.

Tabela 1: Avaliação da segurança de tensão

NUVEM (MELHOR PARTÍCULA)		1	32	100
TENSÕES DE GERAÇÃO (PU)	1	1,040	1,054	1,041
	2	1,046	1,041	1,046
	3	1,035	1,031	1,036
COMPENSAÇÃO REATIVA (MVAR)*	5	15,0	15,0	15,0
	6	10,0	10,0	10,0
	8	6,66	10,0	6,66
PERDAS (MW)		4,48	4,38	4,34
CARREGAMENTO MÁXIMO BARRA 5 (MW)		403,5	423,75	420,0
MARGEM (MW)		278,5	298,75	295,0

* Referido à tensão nominal

Tendo em vista os resultados descritos, e apresentados graficamente na Figura 5, a melhor estratégia a ser adotada para o CQV corresponde à configuração relativa a melhor partícula da nuvem 32.

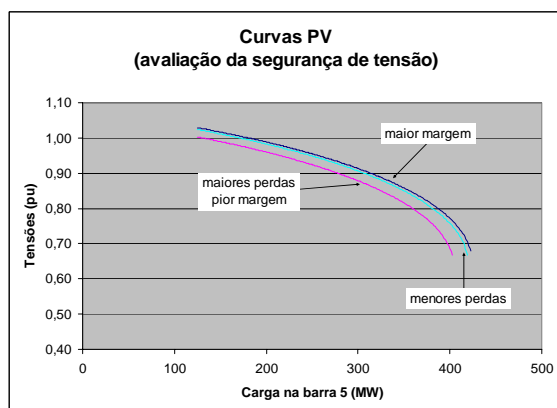


Fig. 5: Curvas PV para: (a) melhor da nuvem 32 (maior margem); (b) melhor da nuvem 100 (menores perdas); e (c) melhor da nuvem 1 (maiores perdas e pior margem).

Conclusões

Os resultados apresentados permitem concluir que:

- A nuvem de partículas aplicada ao sistema teste foi capaz de otimizar as perdas através da combinação ótima das tensões de geração (valores de referência do controle automático de tensão) e dos níveis de compensação capacitiva para as barras 5, 6 e 8;
- Na avaliação da segurança de tensão, a melhor margem de carregamento foi obtida para a melhor partícula da nuvem 32, a qual não corresponde a melhor partícula global do ponto de vista das perdas, sendo esta a melhor da nuvem 100. Todavia, a diferença entre elas, do ponto de vista da margem de carregamento obtida, é muito pequena;

c) A técnica utilizada tem potencial de aplicação em problemas relacionados à determinação do ponto de operação mais robusto, sob o ponto de vista de indicadores de confiabilidade que refletem a segurança do sistema de potência, sob a influência de incertezas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPERJ, CNPq e CAPES (CT-Energ, Pronex-Rio).

Referências Bibliográficas

- [1] A. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1983.
- [2] V. Ajjarapu and C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool to Study Steady State Voltage Stability," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, February 1992, pp. 416-423.
- [3] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transactions PAS, vol. 93, pp 859-869, 1974.
- [4] K.H. Abdul-Rahman,; S.M. Shahidehpour, "Application of fuzzy sets to optimal reactive power planning with security constraints", Power Systems, IEEE Transactions on , Volume: 9 , Issue: 2 , May 1994, Pages:589 – 597
- [5] R. Yokoyama, T. Niimura; Y. Nakanishi, "A coordinated control of voltage and reactive power by heuristic modeling and approximate reasoning", Power Systems, IEEE Transactions on , Volume: 8 , Issue: 2 , May 1993, Pages:636 – 645
- [6] W.D. Rosehart, C.A. Canizares, V.H. Quintana, "Multiobjective optimal power flows to evaluate voltage security costs in power networks", Power Systems, IEEE Transactions on , Volume: 18 , Issue: 2 , May 2003, Pages:578 – 587
- [7] Fangxing Li; R.E. Brown, L.A.A. Freeman, "A linear contribution factor model of distribution reliability indices and its applications in Monte Carlo simulation and sensitivity analysis", Power Systems, IEEE Transactions on , Volume: 18 , Issue: 3 , Aug. 2003, Pages:1213 - 1215
- [8] James Kennedy, Russell C. Eberhart, Yuhui Shi, Swarm Intelligence, Morgan Kaufman Publishers, 2001.
- [9] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, Y. Nakanishi, "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 15, no. 4, pp. 1232-1239, Nov. 2000.
- [10] P. M. Anderson and A. A. Fouad, Power System Control and Stability, Vol I: The Iowa State University Press, 1977.
- [11] E. Vaahedi, C. Fuchs, W. Xu, Y. Mansour, H. Hamadanizadeh, and G. K. Morrison, "Voltage Stability Contingency Screening and Ranking", IEEE Trans. Power Systems, vol. 14, pp. 256-263, Feb. 1999.