PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Isabela Miranda de Mendonça
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
isabela.mendonca@engenharia.ufjf.br

Tamiris Gomes Moreira
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
tamiris.moreira@engenharia.ufjf.br

Ivo Chaves da Silva Junior
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
ivo.junior@ufjf.edu.br

André L. M. Marcato
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
andre.marcato@ufjf.edu.br

Bruno H. Dias
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
bdias@ieee.org

Edimar José de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Campus da UFJF, Plataforma do Setor de Tecnologia, 36036-330, Juiz de Fora, MG.
edimar.oliveira@ufjf.edu. br

RESUMO

O artigo apresenta o estudo do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica via otimização por enxame de partículas. Este é um problema de programação não linear inteira mista que possui as seguintes características: *(i)* inúmeras soluções, o que leva a grande parte dos algoritmos a convergirem em direção de uma solução ótima local; *(ii)* natureza combinatória que normalmente conduz ao fenômeno da explosão combinatória referente às alternativas de investimento. De modo a evitar estas dificuldades é proposta a utilização da otimização por enxame de partículas com uma etapa inicial adicional. Nesta etapa é permitido a variável discreta de decisão assumir valores contínuos. Como resultado, tem-se um Limite Inferior (LI) para o custo da expansão. O objetivo do LI é oferecer uma sensibilidade ao processo de busca, ou seja, permitir a avaliação da distância entre soluções discretas obtidas pelo enxame em relação à solução contínua.

PALAVRAS CHAVES. Expansão de sistemas de transmissão, otimização por enxame de partículas, otimização combinatória.

ABSTRACT

The present paper deals with the static expansion planning of power transmission systems using particle swarm optimization (PSO). This is a hard solution mixed-integer nonlinear programming problem with the following characteristics: (i) the problem presents multiple solutions, so many algorithms converge to a local optimum solution; (ii) the combinatorial nature of the decision process generally implies in a combinatorial explosion when the alternatives of investments are considered. So, to avoid the difficulties inherent of the problem this paper proposes the use of PSO with an initial additional step. The step consists of simulating the relaxed problem, letting the integer decision variables to assume continuous values within a discrete limit. As a result, there will be lower limit to the expansion cost, which allows the evaluation of the distance between the solution obtained by the PSO (discrete) and the continuous solution.

KEYWORDS. Transmission expansion planning, particle swarm optimization, combinatorial optimization.

1. Introdução

As características do sistema elétrico brasileiro, tais como: o rápido crescimento da demanda, a falta de recursos financeiros, a grande dimensão territorial e o transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias, contribuem para que o problema de planejamento do sistema elétrico, de um modo geral, se torne uma tarefa extremamente difícil (Borenstein e Camargo, 1997). Além disso, em nível mundial, o sistema elétrico vem atravessando uma grande transformação, passando a ter uma estrutura descentralizada, com o objetivo de aumentar a eficiência dos agentes de geração, transmissão e distribuição. Sendo assim, estes agentes decidirão individualmente quando (visão dinâmica) e onde (visão estática) investir de modo a garantir a otimização dos recursos financeiros disponíveis e o funcionamento confiável do sistema elétrico. Estas decisões estão fortemente associadas à seleção das principais unidades geradoras e das melhores rotas de transmissão e distribuição de energia. Portanto, estratégias devem ser desenvolvidas de modo a garantir que as decisões adotadas durante o processo de planejamento sejam ótimas ou estejam, economicamente, bem perto desta. O processo de decisão, mencionado acima, dá origem a um problema de otimização complexo e de grande porte, como é o caso do planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão.

O planejamento estático da expansão do sistema de transmissão consiste em determinar entre um conjunto pré-definido de circuitos candidatos à expansão, quais devem ser construídos de modo a minimizar os custos de operação e de investimento no sistema elétrico, suprindo a demanda prevista para um horizonte de planejamento (*Latorre et al.,2003*). O problema de otimização aqui abordado é classificado como um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM) de difícil solução, especialmente para sistemas de grande porte. Dentre as principais dificuldades, podem-se destacar: (i) a existência de vários pontos de mínimo local, conduzindo grande parte dos algoritmos a convergirem em uma solução ótima local; (ii) o elevado número de possíveis soluções do processo de planejamento normalmente conduz ao fenômeno da explosão combinatória referente às alternativas de investimento.

Enquanto certos problemas contínuos encontram em vários algoritmos uma forma eficiente de resolução, os problemas discretos não compartilham de tais algoritmos. Em virtude dessa realidade, surgiram várias técnicas e algoritmos computacionalmente muito eficientes, mas que não garantem a solução ótima de problemas de programação inteira (*Goldbarg e Luna, 2000*). Esses algoritmos são denominados de heurísticos ou aproximados.

Heurística refere-se a um método de busca de soluções em que não existe garantia de sucesso. Assim, heurística pode ser definida como sendo uma técnica de solução com baixo esforço computacional que é capaz de garantir a viabilidade ou a otimalidade das soluções encontradas ou até mesmo ambas, especialmente nas ocasiões em que se parte de soluções viáveis próximas do ponto ótimo.

De acordo com a definição apresentada, enquadram-se as técnicas de otimização bio-inspiradas (*Fogel et al., 1996*), as quais são baseadas em fenômenos comportamentais individuais e coletivos de determinados seres vivos na incansável busca pela sobrevivência. O emprego destas técnicas de otimização só se justificam para problemas discretos de grande porte, onde a complexidade da obtenção da melhor solução possível inibe, devido ao alto tempo de processamento e memória, a utilização de técnicas clássicas de otimização inteira, sendo o planejamento da expansão de sistemas de transmissão um destes problemas.

Seguindo esta linha, o objetivo deste artigo é melhorar a eficiência do enxame no que diz respeito à busca pela melhor solução através da inserção de uma etapa adicional. Tal etapa inicial é baseada na resolução do problema relaxado, ao processo de busca do enxame de partículas para aplicação ao problema do planejamento da expansão estática de sistemas de transmissão de energia elétrica. A combinação entre os métodos bio-inspirados com outras técnicas de otimização ou novas heurísticas pode ter um papel importante na obtenção de melhores soluções.

2. Formulação do Problema de Otimização

Tradicionalmente, o problema de expansão da transmissão é simplificado usando-se o modelo de fluxo de carga linearizado. No modelo linear, o fluxo de potência ativa através da linha i-j (fij) é dado pela seguinte expressão:

$$f_{ij} = \gamma_{ij} \times \theta_{ij} \tag{1}$$

onde:

γ_{ij} é a susceptância do circuito *i-j*;

θ_{ij} é a diferença angular referente as tensões das barras *i-j*.

Na formulação utilizada, o fluxo de potência ativa através do circuito i-j é modificado para acomodar a decisão de construir ou não um determinado circuito candidato. Ou seja:

$$f_{ij} = PE_{ij}.\gamma_{ij}.\theta_{ij} \tag{2}$$

onde:

PE_{ij} Representa a variável discreta de decisão referente à construção ou não do circuito candidato entre as barras *i-j*.

A decisão de construir ou não uma determinada linha de transmissão é representada pelo parâmetro de expansão, onde um valor nulo deste parâmetro significa a não construção de um determinado circuito e o valor unitário significa que o circuito deve ser construído. Assim, o parâmetro de expansão corresponde a uma variável discreta no problema de otimização do planejamento da expansão.

Representando por "E" o conjunto de circuitos existentes na topologia base de um sistema elétrico e "C" o conjunto de circuitos candidatos à expansão, o problema relaxado de otimização referente ao planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão pode ser formulado como:

$$Min \sum_{n=1}^{n_g} c_n.G_n + \sum_{(i,j)\in C} c_{ij}.PE_{ij} \tag{3}$$

s.a

$$G_i - \sum_{j \in \Omega i} f_{ij} = d_i \tag{3.1}$$

$$\left| f_{ij} \right| \leq \bar{f}_{ij} \qquad \forall (i,j) \in E,C \tag{3.2}$$

$$0 \leq G_i \leq G_{max} \tag{3.3}$$

$$0 \leq PE_{ij} \leq NE \qquad \forall (i,j) \in C \tag{3.4}$$

onde:

n_g Número de geradores;

c_n Componente de custo linear de geração (US$/MW-ano);

c_{ij} Componente de custo da construção do circuito candidato entre as barras *i-j* (US$/ano);

G_i Potência fornecida pela unidade geradora localizada na barra *i*;

$G_{\max}$ Limite máximo de potência fornecida pela unidade geradora;

d_i Demanda futura prevista, na barra *i*, para o horizonte de planejamento em estudo. O não atendimento a demanda é representado por geradores fictícios com alto custo de geração representando o custo do déficit.

NE Número máximo de expansões entre as barras *i-j*.

A Função Objetivo (FOB), equação (3), representa a minimização dos custos de operação do sistema elétrico e dos custos de investimentos referentes à expansão do sistema de transmissão. A equação (3.1) corresponde à equação de balanço de potência ativa do modelo de fluxo de carga linear modificado, onde foram incorporadas as expansões. A restrição (3.2) corresponde aos limites de fluxo de potência ativa nos circuitos existentes e nos circuitos candidatos a expansão. As expressões (3.3) e (3.4) representam as restrições de canalização das variáveis de otimização.

3. Otimização por Enxame de Partículas

A otimização por enxame de partículas, desenvolvida por Kennedy e Eberhart (1995) é um processo de busca estocástico baseado em uma população, o qual faz uso de uma metáfora do comportamento social entre indivíduos (partículas) de um grupo (enxame). Esta metáfora foi concebida a partir da observação do comportamento de bando de pássaros e cardumes de peixes em busca de alimento. Observou-se que o comportamento é influenciado pela experiência individual acumulada por cada indivíduo e a acumulada pelo grupo. No processo de otimização, baseado neste comportamento, cada indivíduo corresponde a um ponto (solução) no espaço de busca. A partir disso, cria-se um grupo (população) de partículas que são inseridas no espaço de solução. As partículas interagem através dos valores numéricos da função objetivo, Equação (4). Cada movimento é baseado em três parâmetros: (i) sociabilidade; (ii) individualidade; (iii) velocidade da partícula. Além destes três fatores, têm-se ainda que determinar, o número de partículas que compõem o enxame e o critério de convergência. A seguir serão apresentados os passos utilizados neste trabalho visando à minimização do custo da expansão de sistemas de transmissão. A Figura 1 apresenta os passos do algoritmo proposto.

No passo-1 é realizada a simulação relaxada do problema, via metodologia primal dual de pontos interiores. Ou seja, é permitido a variável discreta de decisão assumir valores contínuos. Assim, o problema originalmente de natureza discreta é transformado em um

problema de programação contínua. Desta forma, tem-se o Limite Inferior do custo da expansão (LI). O objetivo do LI é oferecer uma sensibilidade maior ao processo de busca, ou seja, avaliar a distância entre soluções obtidas pelo enxame de partículas (solução discreta) em relação ao LI (solução contínua). Destaca-se que a solução final do enxame sempre apresentará custo superior ao LI (*Loesch e Hein, 2009*), no entanto, deve ser o mais próximo possível do mesmo.

No passo-2 são definidas, de forma aleatória, as trajetórias iniciais de todas as partículas do enxame. Cada partícula é representada por um vetor linha cujo número de colunas é dado pelo número de caminhos candidatos à expansão. Os elementos deste vetor representam as decisões de expansão de todas as rotas candidatas à expansão da transmissão. A Figura 2 apresenta o modelo de uma partícula representando uma possível solução para quatro caminhos candidatos à expansão, onde somente o quarto circuito candidato, entre as barras *s* e *t*, foi construído.

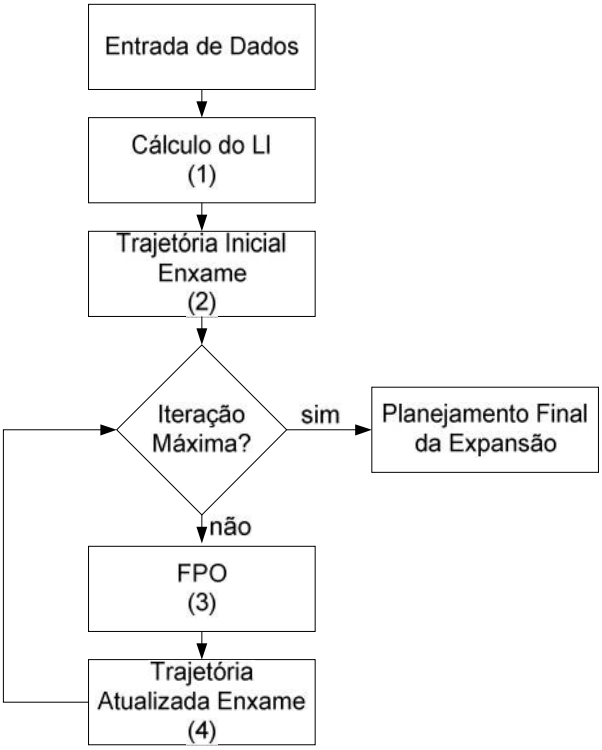

Figura 1- Fluxograma do Algoritmo.

PE_{i-j}	PE_{i-k}	PE_{m-i}	PE_{s-t}
0	0	0	1

Figura 2- Representação da Partícula.

No passo-3, com base na trajetória inerente a cada partícula do enxame, é realizada a simulação de um Fluxo de Potência Ótimo (FPO), via metodologia primal dual de pontos interiores, com o objetivo de se obter o valor numérico da função objetivo do problema discreto, Equação (3). Este valor é importante, pois, como já mencionado anteriormente, as partículas se comunicam através dos valores da função objetivo. Entretanto, no processo de busca proposto, a partícula *k*, na iteração *i*, se comunica através da função de aptidão dada pela Equação (4).

$$Fapt_{k,i} = FOB_{k,i} - LI \tag{4}$$

Cada novo movimento da partícula, passo-4, é baseado na: (i) sociabilidade: determina a atração das partículas para a melhor posição descoberta por qualquer elemento do enxame; (ii) individualidade: determina a atração da partícula em relação a melhor posição já encontrada; (iii) velocidade da partícula: delimita o movimento, uma vez que esse é direcional e determinado. As Equações (5) e (6) modelam o deslocamento das partículas pela região de solução.

$$V_k = W\left[V_k + c_1.rand\ ().(MTP_k - TP_{k,i}) + c_2.rand\ ().(MTE - TP_{k,i})\right] \quad (5)$$

$$TP_{k,i} = round\ (TP_{k,i} + V_k) \quad (6)$$

$$TP_{k,i} = round\ (TP_{k,i} + V_k) \quad (7)$$

onde:

V_k	Velocidade da partícula *k*;
W	Peso de Inércia. Adotou-se W=0.7;
c_1, c_2	São duas constantes positivas que correspondem às componentes cognitivas e sociais. Adotou-se c1=c2=2;
rand()	Função de números aleatórios no intervalo [0,1];
MTP_k	Melhor trajetória da partícula k;
$TP_{k,i}$	Trajetória da partícula k, na iteração i;
MTE	Melhor trajetória do enxame.

A Equação (5) representa a nova velocidade da partícula de acordo com sua velocidade anterior e as distâncias entre sua posição atual, sua melhor posição e a melhor posição do enxame. Assim, a partícula se desloca para uma nova posição de acordo com a Equação (6). O desempenho de cada partícula é aferido de acordo com a função de aptidão, Equação (4).

O peso de inércia W é utilizado para controlar o impacto da velocidade anterior na velocidade atual, assim influenciando as habilidades de exploração global e local das partículas. Um peso de inércia maior facilita a exploração global (procurando novas áreas), enquanto um peso de inércia menor tende a facilitar a exploração local para refinar a área de procura atual. A seleção satisfatória do peso de inércia W pode prover um equilíbrio entre as habilidades de exploração global e local, e assim pode requerer menos repetições, em média, para encontrar o valor ótimo. Neste trabalho foi adotado como critério de convergência um número máximo de iterações.

4. Estudo de Casos

O algoritmo proposto é aplicado ao sistema Garver (*Garver,1970*) e ao sistema equivalente da região sul do Brasil. A Tabela 1 apresenta o número total de combinações possíveis de expansão para os sistemas em análise, onde se pode perceber o problema referente à explosão combinatória referente às alternativas de investimento, o que impede a enumeração completa da todas as soluções possíveis a fim de garantir a obtenção da solução ótima global.

Tabela 1- Número de Combinações.

Sistema	Caminhos Candidatos	Número Expansões	Combinações
Garver	15	3	$4^{15} \cong 10^{9}$
Sul	79	2	$3^{79} \cong 10^{37}$

4.1 Sistema Garver

O sistema Garver é bastante conhecido na literatura, sendo constituído por seis barras, seis linhas de transmissão existentes na topologia base, quinze caminhos candidatos à expansão, uma demanda de 760MW e um número máximo de três expansões por caminho candidato.

Em relação ao processo de busca bio-inspirado adotou-se os seguintes parâmetros: (i) número máximo de 50 iterações; (ii) enxame composto por 1000 partículas. Assim, serão resolvidos 50.000 problemas de otimização na busca pela solução ótima global.

A Tabela 2 resume os principais resultados obtidos através do algoritmo bio-inspirado para o sistema Garver considerando-se as seguintes condições de simulação: (a) Caso A: SEM a utilização do Limite Inferior de Custo; (b) Caso B: COM a utilização do Limite Inferior de Custo.

Tabela 2- Simulações Realizadas – Custo Total de Expansão - Sistema Garver.

Simulação	Custo Total de Investimento	Circuitos Construídos
Caso A	$ 332.000,00	2-4, 4-6 (3), 3-5, 2-6(2) e 5-6(2)
Caso B	$ 110.000,00	4-6 (3) e 3-5

Comparando os resultados apresentados, verifica-se que a utilização do Limite Inferior (LI) conduz o enxame a uma melhor solução, para um mesmo número de partículas. Assim, foram realizadas novas simulações para o Caso A, variando o número de partículas. Os resultados são apresentados pela Tabela 3.

Tabela 3- Simulações Realizadas – Custo Total de Expansão – Caso A.

Número de Partículas	Custo Total de Investimento	Problemas Resolvidos
1000	$ 332.000,00	50.000
1200	$ 262.000,00	60.000
1400	$ 130.000,00	70.000
1600	$ 110.000,00	80.000

Pela Tabela 3 é possível concluir que quanto maior o número de partículas maior o sucesso do enxame, porém o tempo computacional aumenta (maior número de problemas a serem resolvidos) podendo, dependendo do tamanho do problema em análise, tornar-se proibitivo. A Figura 2 ilustra o planejamento final do sistema de expansão obtido para o sistema de Garver, pelo algoritmo proposto, onde as linhas tracejadas representam as expansões realizadas.

A Tabela 4 apresenta a comparação entre o resultado obtido pelo algoritmo proposto e os custos de investimento na transmissão obtidos por alguns algoritmos existentes na literatura:

Mínimo Corte de Carga (*Pereira et al.,1985*), GRASP (*Binato et al.,2001*), Hybrid Simulated Annealing (HSA) (*Cormona et al.,2009*), Scatter Search (SS) (*Mori e Shimomugi,2007*) e Branch-and-Bound (B&B) (*Rider et al.,2007*).

Tabela 4- Comparação – Custo Total de Investimento – Sistema Garver.

Algoritmos de Solução	Custo Total de Investimento
Mínimo Corte de Carga	$ 130.000,00
GRASP	$ 110.000,00
HSA	$ 110.000,00
SS	$ 110.000,00
B&B	$ 110.000,00
Proposto	$ 110.000,00

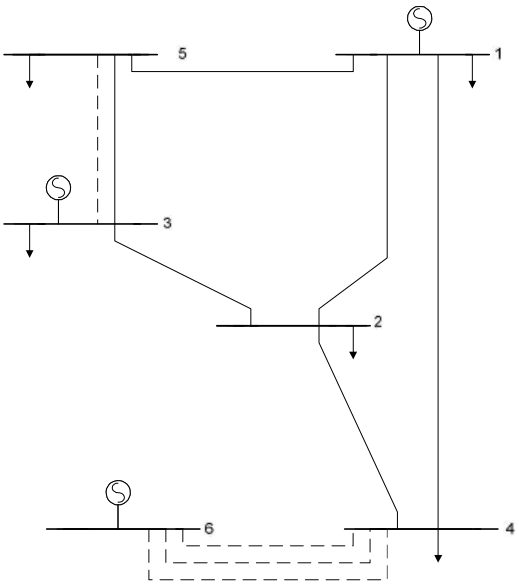

Figura 2- Solução Sistema Garver via Otimização por Enxame.

Pode-se verificar que o resultado obtido pelo algoritmo proposto corresponde ao mesmo custo de investimento alcançado por outras metodologias existentes na literatura, sendo esta a solução ótima global para o sistema em análise.

4.2 Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil

Este sistema foi proposto inicialmente em (*Monticelli et al.,1982*) e vem sendo bastante utilizado para validar os resultados de novos métodos e algoritmos para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. O sistema sul equivalente apresenta quarenta e seis barras, sessenta e seis circuitos existentes na topologia base, setenta e nove caminhos candidatos à expansão e uma demanda prevista pelo horizonte de planejamento de 6880 MW. Os dados referentes a este sistema podem ser encontrados em (*Romero et al.,2002*) e (*Binato, 2000*).

Em relação ao processo de busca bio-inspirado, para este caso, adotou-se os seguintes parâmetros: (i) número máximo de 80 iterações; (ii) enxame composto por 1000 partículas. Assim, serão resolvidos 80.000 problemas de otimização na busca pela solução ótima global.

A Tabela 5 resume os principais resultados obtidos através do algoritmo bio-inspirado para o sistema Sul equivalente considerando-se as seguintes condições de simulação: (a) Caso A: SEM a utilização do Limite Inferior de Custo; (b) Caso B: COM a utilização do Limite Inferior de Custo.

Tabela 5- Simulações Realizadas – Custo Total de Expansão – Sistema Sul Equivalente.

Simulação	Custo Total de Investimento
Caso A	$ 95.800.000,00
Caso B	$ 70.289.000,00

Comparando os resultados apresentados, verifica-se que a utilização do Limite Inferior (LI) novamente conduziu o enxame a uma melhor solução. A Tabela 6 apresenta o planejamento final de expansão obtido pelo enxame de partículas com a utilização da etapa adicional proposta.

Tabela 6- Planejamento da Expansão da Transmissão – Sistema Sul Equivalente.

Caminhos Selecionados	Circuitos Construídos
46-06	1
20-21	2
05-06	2
42-43	1
20-23	1
13-20	1

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre o resultado obtido pelo algoritmo proposto e os custos de investimento na transmissão obtidos por alguns algoritmos existentes na literatura especializada. São estes: (i) Mínimo Corte de Carga (*Pereira et al.,1985*); (ii) Decomposição (*Binato,2000*); (iii) Metaheuristicas(*Romero et al.,2007*).

Tabela 7- Comparação – Custo Total de Investimento – Sistema Sul Equivalente.

Algoritmos de Solução	Custo Total de Investimento
Mínimo Corte de Carga	$ 102.300.000,00
Metaheuristicas	$ 72.870.000,00
Decomposição	$ 70.289.000,00
Proposto	$ 70.289.000,00

Os resultados obtidos pelo algoritmo proposto, Tabelas 6 e 7, ilustram a qualidade da solução obtida, uma vez que o plano de expansão proposto corresponde à solução ótima global do problema em análise.

5. Conclusões

Os resultados iniciais apresentados, para o problema referente ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica, apontam para um aumento da eficiência do processo de busca do enxame de partículas através da etapa adicional proposta. Esta etapa tem como objetivo oferecer uma sensibilidade maior ao processo de busca, ou seja, permitir que o enxame possa mensurar as distâncias obtidas pelas partículas (soluções discretas) em relação à solução relaxada (solução contínua). Diante dos resultados obtidos, os seguintes aspectos podem ser enfatizados:

- A garantia de obtenção do ponto de mínimo global só pode ser obtida através da enumeração de todas as combinações possíveis de operação, o que nem sempre é possível devido ao elevado tempo de processamento e ao armazenamento de memória;
- O aumento do número de partículas tende a melhorar a qualidade das soluções obtidas. No entanto, o esforço computacional torna-se fator preocupante, principalmente para sistemas de maior porte;
- Uma opção de redução do tempo computacional seria a utilização de processamento paralelo (Roosta, 2000). O processamento paralelo permite que um algoritmo, que exija um elevado tempo computacional, tenha sua execução distribuída entre vários processadores e memórias, permitindo uma considerável redução no tempo de simulação.

6. Trabalhos Futuros

Pretende-se avaliar através da resolução do problema relaxado, as informações dos fluxos de potência ativa e/ou dos multiplicadores de Lagrange associados as variáveis discretas de decisão a fim de tentar reduzir o espaço de busca através da redução dos caminhos candidatos à expansão e consequentemente diminuir o número de partículas e o tempo de processamento.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Referências

Binato S., Oliveira G.C., Araújo J.L., (2001) "*A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning*", IEEE Trans.on Power Systems, Vol. 16, No 2, May 2001, pp.247-253.

Binato. S., (2000) *Expansão Ótima de Sistemas de Transmissão através de Decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes*. (2000) Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.

Borenstein C.R., Camargo C.C.B.,(1997) *O Setor Elétrico no Brasil - Dos Desafios do Passado às Alternativas do Futuro*. 1.ed. Porto Alegre. Editora Sagra Luzzato, 1997.

Carmona, M.; Behnke, P, Moya, O., (2009) "*Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm*", Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP'09. 15th International Conference on, pp 1-7, 2009.

Garver L. L., (1970) "*Transmission Network Estimation Using Linear Programming*", IEEE trans. on PAS, Vol. 89, Nº 7, September, 1970., pp.1688-1697.

Goldbarg M.C., Luna H.P.(2000), *Otimização Combinatoria e Programação Linear*. 5.ed. Rio de Janeiro. Editora Campus, 2000.

J. Kennedy and R.C. Eberhart, (1995) "*Particle Swarm Optimization*".Proceedings of the International Conference on Neural Networks", Perth, Australia, 1995.

L. J. Fogel, A. J. Owens, and M. J. Walsh. (1996) *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1966.

Latorre G, Cruz R.D., Areiza J.M, Villegas A.,(2003) "*Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning*", IEEE Trans.on Power Systems, Vol. 18, No 2, May 2003, pp.938-946.

Loesch .C., Hein N. (2009) *Pesquisa Operacional : Fundamentos e Modelos*. São Paulo. Editora Saraiva, 2009.

Monticelli A., Junior, A. S., Pereira, M. V. F., Cunha, S. H., Parker, B. J., Praca, J. C. G. (1982), "*Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion*", IEEE trans. on PS, Vol. 101, Nº 10, October, 1982, pp. 3919-3925.

Mori. H, Shimomugi. K, (2007) "*Transmission Network Expansion Planning with Scatter Search*". Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference on, pp 3749 - 3754, ISBN: 978-1-4244-0991-4.

Pereira M. V. F., Pinto L. M. V. G., (1985) "*Application of Sensitivity Analysis of Local Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning*", IEEE trans on PS, Vol 104, No 2, February, 1985, pp.381-389.

Rider M.J., Garcia A.V. and Romero R. (2008) "*Transmission system expansion planning by a branch-and-bound algorithm*". IET Gener. Transm. Distrib. Vol 2, pp. 90–99, 2008.

Romero R, Monticelli A., Garcia A., Haffner S.. (2002) "*Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning*", IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, No 1, January 2002, pp. 27-36.

Romero, R.; Rider, M.J.; Silva, I. de J. (2007) "*A Metaheuristic to Solve the Transmission Expansion Planning*". Power Systems, IEEE Transactions on. Vol. 22, Issue 4, pp 2289 – 2291, ISSN: 0885-8950.

Roosta, Seyed H.,(2000) "*Parallel processing and parallel algorithms: theory and computation*". Springer, p. 114, 2000. ISBN 0387987169.