
PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS TERMOELÉTRICOS DE GERAÇÃO UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO BIO-INSPIRADA EM COLÔNIA DE FORMIGAS

Ivo Chaves Silva Junior*

ivo.junior@ufjf.edu.br

Edimar José de Oliveira*

edimar.oliveira@ufjf.edu.br

Flávia Rodrigues do Nascimento*

flavia.nascimento@engenharia.ufjf.br

André Luis Marques Marcato*

andre.marcato@ufjf.edu.br

Bruno Henrique Dias*

bdias@ieee.org

*Universidade Federal de Juiz de Fora-MG

ABSTRACT

Daily Schedule of Thermoelectric Generators Operation Using Bio-inspired Ant Colony Optimization

This paper presents a methodology based on Ant Colony Optimization (ACO) aiming at minimizing the costs of the thermoelectric generators daily operation. The proposed model makes use of a Sensibility Matrix (SM) based on information from the Lagrange Multipliers in order to improve the ACO search process. In this way, a percentage of individuals uses this information in the colony's evolutionary process. Simulations show that the use of the SM presents results with better solutions even when considering a reduced number of individuals.

KEYWORDS: Lagrange Coefficients, Sensibility Matrix, Thermal Unit Commitment, Thermal Dispatch, Ant Colony Optimization (ACO).

RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia baseada em Algoritmo de Colônia de Formiga (ACF) para a minimização do custo da programação diária de operação de unidades termo-

elétricas. O modelo proposto utiliza uma Matriz de Sensibilidade (MS) baseada nas informações fornecidas pelos multiplicadores de Lagrange a fim de melhorar o processo de busca bio-inspirado em ACF. Desta forma um percentual dos indivíduos usa estas informações no processo evolutivo da colônia. Os resultados alcançados através das simulações indicam que a utilização da MS resulta em soluções de qualidade com um número reduzido de indivíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Multiplicadores de Lagrange, Matriz de Sensibilidade, Operação de Unidades Termoeletricas, Despacho Térmico, Algoritmo de Colônia de Formigas (ACF).

1 INTRODUÇÃO

A programação diária da operação de sistemas termoeletricos de geração consiste em determinar uma estratégia de despacho das unidades geradoras para atender a demanda de energia, satisfazendo as restrições operacionais e funcionais do sistema elétrico de potência (Padhy, 2004).

O problema pode ser dividido em dois subproblemas: (i) referente à determinação das unidades que devem estar em operação mediante a demanda solicitada, “*Thermal Unit Commitment*” e (ii) referente à determinação da potência gerada por cada uma das unidades colocadas em serviço, “*Despacho*”

Artigo submetido em 03/03/2011 (Id.: 1286)

Revisado em 27/06/2011, 19/08/2011

Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Jês de Jesus Fiais Cerqueira

Econômico". Devido a variação de carga ao longo do tempo, a programação da operação envolve decisões do sistema de geração a cada hora, dentro do horizonte de um dia a duas semanas (Wood and Wollenberg, 1996).

A representação de custos e de restrições operativas aumenta a complexidade do problema através do acoplamento temporal das decisões de parada e partida das unidades geradoras, resultando em um problema de programação não linear inteira mista com as seguintes particularidades (Momoh, 2005): (i) Região de solução não convexa; (ii) Elevado tempo computacional devido a natureza combinatória do problema; (iii) Processo dinâmico de decisão. Portanto, verifica-se que estes aspectos impõem aperfeiçoamentos constantes dos algoritmos existentes.

O método proposto por (Burns and Gibson, 1975) utiliza uma lista de prioridade de operação baseada nas características econômicas das unidades. Outros trabalhos utilizam desta técnica para mitigar a inviabilidade da obtenção da enumeração de todas as soluções possíveis (Lee, 1991; Lee and Feng, 1992).

A programação dinâmica foi o primeiro método baseado em otimização aplicado ao problema (Lowery, 1966), apresentando vantagens por tratar problemas não convexos e não lineares. No entanto, necessita trabalhar em um espaço discreto exigindo grande capacidade de memória e elevado tempo computacional (Pang et al., 1981; Li et al., 1997).

A relaxação Lagrangeana (Aoki et al., 1987; Ma and Shahidehpour, 1999; Ongsakul and Petcharak, 2004) separa as restrições do problema permitindo a solução através de subproblemas resolvidos por programação dinâmica. Entretanto, devido a não convexidade do problema, não há garantia de que a otimalidade da solução dual encontrada conduza a uma solução primal viável.

O trabalho de (Belede et al., 2009) apresentou um estudo relacionado às técnicas de otimização bio-inspiradas utilizadas na resolução da programação diária da operação de sistemas termoeletricos de geração, onde destacam-se: otimização por colônia de formigas, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos e a otimização por enxame de partículas. As análises apontam que a combinação entre os métodos computacionais biologicamente inspirados (Serapio, 2009) com outras técnicas de otimização tem papel importante na obtenção de melhores soluções em um menor tempo de processamento.

Seguindo esta linha de pesquisa, o objetivo deste artigo é apresentar uma melhoria no processo evolutivo do ACF para aplicação ao problema do planejamento diário da operação de unidades de geração termoeletrica. Serão avaliados os resultados obtidos através da simulação de sistemas amplamente difundidos na literatura.

2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de otimização referente à programação diária da operação de unidades termoeletricas de geração pode ser formulado como (Silva Junior et al., 2006):

$$\min \text{FOB} = A + B \quad (1)$$

onde:

$$A = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [CO_i(Pg_i(t))] \cdot FDO_i^t \quad (2)$$

$$B = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N SC_i(t) \cdot FDO_i^t \cdot (1 - FDO_i^{t-1}) \quad (3)$$

$$CO_i = a_i + b_i \cdot Pg_i(t) + c_i \cdot Pg_i^2(t) \quad (4)$$

s.a.

$$FDO_i^t \times Pg_i(t) - Pl(t) = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N (FDO_i^t \times Pg_i^{\max}) \geq Pl(t) + rg(t) \quad (6)$$

$$X_i^{\text{on}}(t) \geq T_i^{\text{on}} \quad (7)$$

$$X_i^{\text{off}}(t) \geq T_i^{\text{off}} \quad (8)$$

$$Pg_i^{\min} \leq Pg_i(t) \leq Pg_i^{\max} \quad (9)$$

onde:

N Número total de unidades térmicas de geração;

T Período total de operação;

i Índice da unidade térmica;

t Índice de hora;

FDO_i^t Variável discreta [0,1] de decisão "ON/OFF" referente à unidade i na hora t ;

$Pg_i(t)$ Potência ativa gerada (MW) pela unidade térmica i na hora t ;

Pg_i^{\max} Limite máximo de potência ativa gerada (MW) pela unidade térmica i ;

Pg_i^{\min} Limite mínimo de potência ativa gerada (MW) pela unidade térmica i ;

- $Pl(t)$ Demanda solicitada (MW) na hora t ;
- $rg(t)$ Reserva girante solicitada (MW) na hora t ;
- T_i^{on} Tempo mínimo de partida (h) da unidade térmica i ;
- T_i^{off} Tempo mínimo de parada (h) da unidade térmica i ;
- $X_i^{on}(t)$ Tempo (h) em que a unidade térmica i está ligada;
- $X_i^{off}(t)$ Tempo (h) em que a unidade térmica i está desligada;
- $SC_i(t)$ Custo de partida (\$) da unidade térmica i na hora t ;
- a_i, b_i, c_i Coeficientes referentes aos custos do combustível da unidade térmica i (\$/h, \$/MWh e \$/MW²h, respectivamente);

A função objetivo (FOB), equação (1), consiste na minimização da soma do custo total de operação (A) e dos custos de partida (B) das unidades geradoras, durante o período de operação.

A restrição de balanço de potência ativa, equação (5), representa o estado de equilíbrio carga/geração do sistema em todo instante de tempo. Já a equação (6) é a reserva girante do sistema para suprir aumentos inesperados de carga ou desvios de previsão.

Em relação às unidades geradoras são consideradas as seguintes restrições: (i) tempos mínimos de partida e parada, equações (7) e (8), respectivamente; (ii) limites máximos e mínimos de produção, equação (9).

Para a modelagem da variável discreta (FDO_i^t) adotou-se a função sigmóide, assim como em (de Oliveira et al., 2005), já que a mesma possui similaridade com a função degrau unitário representando bem os dois estados de decisão “ON-OFF” inerente às unidades de geração.

As Equações (10) e (11) são referentes à função sigmóide adotada e a canalização do argumento, respectivamente.

$$FDO_i(x_i^t) = \frac{e^{x_i^t} - 1}{e^{x_i^t} + 1} \quad (10)$$

$$x^{\min} \leq x_i^t \leq x^{\max} \dots \pi_{xi}(t) \quad (11)$$

onde:

- x_i^t Argumento da função sigmóide da unidade térmica i na hora t ;
- x^{\min}, x^{\max} Limite mínimo e máximo do argumento da função sigmóide;
- $\pi_{xi}(t)$ Multiplicador de Lagrange associado ao argumento da função sigmóide da unidade i na hora t .

A formulação aqui apresentada tem como objetivo possibilitar a comparação do método proposto com sistemas termoeletrônicos amplamente difundidos na literatura, os quais fazem uso da mesma modelagem. Entretanto, é importante mencionar, que existem outras restrições significativas como os limites de rampa (Pereira-Neto et al., 2005), as zonas operacionais proibidas (Adhinarayanan and Sydulu, 2008; Pereira-Neto et al., 2005) e o efeito dos “pontos de válvula”, (Chiang, 2005; Chen and Yeh, 2006), inerentes às unidades geradoras. Estas restrições aumentam a complexidade do subproblema referente ao despacho econômico, tornando-o não convexo.

3 PROCESSO DE BUSCA PROPOSTO

Formigas reais, em busca de alimento, deixam trilhas de uma substância denominada feromônio. Este comportamento é uma estratégia eficiente para que outras formigas encontrem o caminho de forma mais rápida à fonte de alimento (Dorigo and Stutzle, 2004). Com base neste aspecto biológico, o processo de busca do ACF baseia-se em quatro passos:

(ii) Obter o valor numérico da função objetivo para cada solução associando-se um mérito chamado feromônio. Portanto, ao final do processo de busca, a melhor solução terá a maior quantidade de feromônio;

(iii) Sortear uma nova colônia baseada na quantidade total de feromônio existente;

(iv) Voltar ao passo (ii). O processo termina até que um determinado pré-requisito seja alcançado.

Na literatura existem diversas maneiras de executar os passos anteriores de forma a obter uma adequação ao problema em estudo. Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma modificação nesta estrutura básica a fim de aumentar a eficiência de busca da colônia para o problema (1). O fluxograma da Figura 1 apresenta os passos do algoritmo proposto.

No passo-1 é calculado o Limite Inferior do Custo (LIC). Para tanto, o problema (1) é relaxado, onde as restrições relativas aos tempos de partida e parada são negligenciadas e as variáveis discretas são consideradas contínuas. O objetivo do LIC é obter uma sensibilidade do processo de busca da colônia, ou seja, avaliar a distância entre soluções obtidas pela colônia em relação ao LIC. Destaca-se que a solução procurada sempre apresenta custo superior ao LIC (Goldberg and Luna, 2000), no entanto, deve ser a mais próximo possível.

No passo-2 é determinada a Matriz de Sensibilidade das unidades geradoras (MS), a qual é formada pelos multiplicadores de Lagrange (πx_i^t), equação (11). O objetivo da MS é identificar as unidades de maior relevância em relação ao

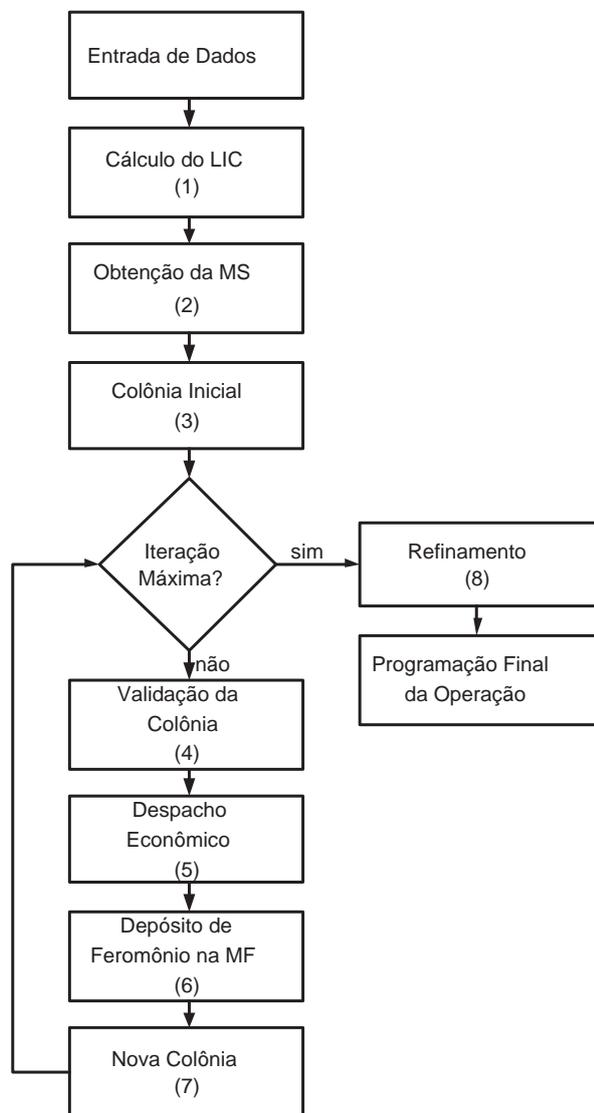


Figura 1: Fluxograma do Processo de Busca Proposto.

custo total a fim de auxiliar na decisão de quais unidades devem ser colocadas em operação.

Os valores de (πx_i^t) são obtidos através da solução relaxada do problema (1) considerando: (i) um intervalo rígido para (x_i^t) , ou seja, $0 \leq x_i^t \leq 0.0001$ para todas as unidades em todo o período analisado; (ii) uma unidade de geração de alto custo, representativa do corte de carga, necessária para convergência do problema nestas condições de simulação.

Diante das considerações anteriores, a solução de (1) apresentará a tendência de colocar as unidades geradoras mais econômicas em serviço. Com a imposição $0 \leq x_i^t \leq 0.0001$, as restrições de balanço de potência e reserva girante, Equações 5 e 6, só poderão ser atendidas através da unidade repre-

sentativa do corte de carga. Desta forma, tem-se como solução do problema de otimização os valores dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites superiores da função decisão de operação de cada uma das unidades geradoras para todo o período de operação.

A partir daí é possível obter uma Matriz de Sensibilidade (MS), equação 12, formada pelos multiplicadores de Lagrange associados às FDO's. Esta matriz traduz a sensibilidade da função objetivo em relação à tendência de acionamento de cada uma das termoeletricas em relação à demanda horária solicitada ao longo do período de operação. A matriz de sensibilidade é, portanto, utilizada para orientar a colônia na direção dos multiplicadores de Lagrange aumentando a eficiência do processo evolutivo.

$$MS = \begin{bmatrix} \pi x_1^t & \pi x_2^t & \dots & \pi x_N^t \\ \pi x_1^{t+1} & \pi x_2^{t+1} & \dots & \pi x_N^{t+1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \pi x_1^T & \pi x_2^T & \dots & \pi x_N^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

No passo-3 é obtida a população inicial da colônia através de sorteio. Cada indivíduo é representado por uma matriz cuja dimensão é dada pelo número de horas de operação (linhas da matriz) e pelo número de Unidades Termoeletricas (UTES) existentes (colunas da matriz). Os elementos desta matriz representam as decisões horárias de operação (0-1) de todas as unidades térmicas de geração durante todo o período de operação. A Figura 2 mostra um indivíduo representando uma solução de operação para quatro unidades geradoras e três horas de operação.

	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4
h=1	0-1	0-1	0-1	0-1
h=2	0-1	0-1	0-1	0-1
h=3	0-1	0-1	0-1	0-1

Figura 2: Representação de um indivíduo da colônia.

O passo-4 tem como objetivo garantir a viabilidade de cada solução gerada. Desta forma, o processo de análise de viabilidade é feito de hora em hora, de modo que a soma horária das capacidades máximas de geração das unidades termoeletricas, colocadas em operação, seja maior do que a demanda e a reserva previstas em cada hora. Além disso, deve-se verificar ainda se há ou não violações dos tempos de parada e partida das unidades. Estas violações, caso existam, são

tratadas através de procedimentos heurísticos descritos em (Silva Junior et al., 2006). Estes procedimentos de correção garantem a viabilidade das soluções geradas durante todo o processo iterativo.

No passo-5, o problema de despacho econômico é resolvido para cada uma das soluções geradas (indivíduos). Ou seja, após as decisões de operação (0-1) das unidades termoeletricas definidas para todo o período de operação, determinam-se as potências ativas (MW) geradas em cada unidade termoeletrica.

Destaca-se que neste caso o problema de despacho é linear e desacoplado tendo em vista que a solução foi validada na etapa anterior. Este tipo de problema é simples e requer baixo esforço computacional.

O passo-6 consiste em avaliar os resultados obtidos no passo-5. Essa avaliação é feita com base no valor numérico da função objetivo, Equação 1, associada a cada indivíduo existente na colônia. Esta informação é essencial na determinação da intensidade de feromônio a ser depositada por cada indivíduo. Assim, as melhores soluções terão maior valor de feromônio depositado na Matriz de Feromônio.

A Matriz de Feromônio (MF) apresenta, neste caso, a mesma estrutura utilizada na representação de cada indivíduo da colônia sendo atualizada a cada iteração da seguinte forma: (a) soluções cujos custos operacionais forem próximos do LIC, contribuem de forma mais contundente na MF; (b) soluções cujos custos operacionais forem distantes do LIC, contribuem de forma superficial. Desta forma, o feromônio depositado na MF pelo indivíduo m na iteração i é expresso pela Equação 13.

$$\Delta MF^i(m) = \frac{1}{|FOB^i(m) - LIC|} \times \beta \quad (13)$$

Na Equação 13, β é uma constante usada para enfatizar a proximidade da solução com o LIC. Esse fator multiplicativo é empírico e adotado igual a 1000.

O depósito do feromônio tem como objetivo registrar as informações das soluções encontradas por todos os indivíduos da colônia. É a chamada inteligência coletiva. O depósito é acumulativo tornando a quantidade de feromônio mais acentuada nas melhores soluções encontradas pela colônia.

A MF é atualizada pela adição do depósito de feromônio de toda a colônia na iteração i , conforme Equação 14.

$$MF^i = MF^{i-1} + \sum_{k=1}^{nf} \Delta MF^i(m) \quad (14)$$

onde:

MF^i	Quantidade total de feromônio depositado, na MF, na iteração i .
$MF^{i-1}(m)$	Quantidade total de feromônio depositado, na MF, na iteração $i - 1$.
nf	Número de formigas existentes na colônia.

O fenômeno da evaporação de feromônio é representado pelo coeficiente de evaporação ρ , que pode variar entre zero e o valor unitário e é dado pela Equação 15 (Bonabeau et al., 1997).

$$MF^i(m) = (1 - \rho) \cdot MF^{i-1}(m) + \Delta MF^i(m) \quad (15)$$

O algoritmo proposto utiliza uma taxa de evaporação diferenciada, onde soluções que estão próximas ao LIC apresentam uma taxa de evaporação menos acentuada do que as soluções mais distantes. Assim, adotou-se: (i) Taxa de evaporação de 25% para a melhor solução encontrada; (ii) Taxa de evaporação de 75% para a pior solução encontrada; (iii) Taxa de evaporação de 50% para as demais soluções. Desta forma, evita-se que a busca fique estagnada em ótimos locais de pior qualidade.

O passo-7 é dedicado a obtenção da nova colônia. Para tanto, o processo evolutivo proposto é composto por quatro tipos de indivíduos: (a) Soldados – Estes indivíduos percorrem a região de solução de forma completamente aleatória e correspondem a 10% da composição da colônia; (b) Obreiras – Sorteadas com base nas informações horárias dos multiplicadores de Lagrange (MS) correspondendo de 10% a 30% da composição da colônia; (c) Operárias – Percorrem a região de solução com base nas informações da MF e variam de 60% a 80%; (d) Rainha – Este indivíduo, único na colônia, representa a melhor solução durante o processo evolutivo.

O sorteio das novas operárias, ponderado pela quantidade de feromônio, é realizado por meio de uma regra de transição, que fornece a probabilidade de cada formiga escolher a solução m , Equação 16 (Dorigo et al., 1999; Dorigo and Di Caro, 1999).

$$P(m) = \frac{[MF(m)]^\phi}{\sum ([MF]^\phi)} \quad (16)$$

onde:

- φ Parâmetro de controle que determina o peso relativo da influência da concentração de feromônio. Adotou-se $\varphi = 1$;

Definida a nova colônia, o próximo passo é avaliar as novas soluções obtidas (valor numérico da FOB). Antes, porém, deve-se verificar o critério de convergência do processo de busca. Neste trabalho, adotou-se o número máximo de iterações como critério de convergência.

O passo-8, refinamento da solução, é uma etapa adicional ao processo de busca tendo como objetivo melhorar a solução final encontrada. Para tanto, verifica-se a viabilidade de desligamento de algumas unidades geradoras. A tentativa de desligamento é realizada para duas situações: (i) existência de unidades termoeletricas com tempos de partida e parada unitários, pois estas unidades podem ser desligadas a qualquer momento sem a violação das restrições de tempos operativos mínimos; (ii) existência de reserva girante excessiva em determinados horários possibilitando o desligamento de algumas unidades sem violar outras restrições do problema. Nesta situação, a MS é utilizada como critério de escolha das unidades a serem desligadas.

Após a etapa de refinamento da solução final encontrada, resolve-se o problema de despacho linear desacoplado tendo em vista que a solução foi validada na etapa anterior. Desta forma, tem-se a programação diária da operação de sistemas termoeletricos de geração.

4 RESULTADOS

As simulações computacionais foram realizadas utilizando-se quatro sistemas termoeletricos de geração amplamente difundidos na literatura (Kazarlis et al., 1996; Senjyu et al., 2003) compostos, respectivamente, por dez, vinte, quarenta e cem Unidades Termoeletricas (UTES).

A Tabela 1 apresenta o número total de combinações de soluções para cada um dos sistemas em análise onde pode-se verificar a dificuldade de se obter a solução ótima global.

Para os casos simulados foram considerados um período de operação de vinte e quatro horas e uma colônia formada por 50 indivíduos, sendo composta por 10% de formigas obreiras, 10% de soldados e 80% de operárias. O processo de busca é encerrado com um número máximo de 50 iterações.

As Tabelas 2 e 3 resumem os principais resultados obtidos através da metodologia proposta considerando-se as seguintes condições de simulação:

Tabela 1: Número de combinações.

Número de Unidades Termoeletricas	Combinações
10 UTES	$(2^{10} - 1)^{24} \cong 10^{72}$
20 UTES	$(2^{20} - 1)^{24} \cong 10^{144}$
40 UTES	$(2^{40} - 1)^{24} \cong 10^{288}$
100 UTES	$(2^{100} - 1)^{24} \cong \infty$

- (a) Caso base: **SEM** a utilização da Matriz de Sensibilidade e **SEM** a etapa de refinamento;
- (b) Caso B: **SEM** a utilização da Matriz de Sensibilidade e **COM** a etapa de refinamento;
- (c) Caso C: **COM** a utilização da Matriz de Sensibilidade e **SEM** a etapa de refinamento;
- (d) Caso D: **COM** a utilização Matriz de Sensibilidade e **COM** a etapa de refinamento.

A Tabela 2 mostra o custo operacional para cada caso. Comparando os resultados do caso (b) com o caso (c), verifica-se que a utilização da técnica de MS é muito mais eficiente que a etapa de refinamento. No entanto, a combinação das duas técnicas, apresentada no caso (d), resultou em ganhos operacionais para os sistema 40 UTES e 100 UTES. Conforme esperado, as contribuições da MS aumentam com o número de geradores do sistema tendo em vista o maior grau de liberdade para escolha do gerador que deve entrar em operação.

Tabela 2: Simulações Realizadas - Custo Operacional.

Simulações	Sistemas			
	10 UTES	20 UTES	40 UTES	100 UTES
(a)	\$569.131	\$1.144.961	\$2.312.717	\$5.896.666
(b)	\$568.742	\$1.139.950	\$2.287.360	\$5.800.525
(c)	\$563.937	\$1.122.543	\$2.242.985	\$5.602.741
(d)	\$563.937	\$1.122.543	\$2.242.084	\$5.601.156

A Tabela 3 mostra os tempos computacionais para cada simulação. Pode-se verificar que a inclusão da etapa de refinamento não aumenta o tempo de forma significativa justificando a inclusão desta etapa na metodologia.

A Figura 3 apresenta a evolução do custo operacional durante o processo iterativo, referente ao sistema 10 UTES, para a simulação dos casos (a) e (c). Percebe-se que a inserção das informações dos multiplicadores de Lagrange, simulação (c),

Tabela 3: Tempo Computacional - Segundos.

Simulações	Sistemas			
	10 UTEs	20 UTEs	40 UTEs	100 UTEs
(a)	180	240	252	420
(b)	183	245	290	510
(c)	180	240	252	420
(d)	183	245	290	510

possibilita encontrar uma solução de melhor qualidade com um número reduzido de iterações.

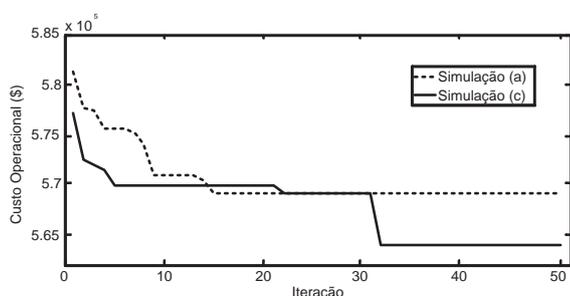


Figura 3: Convergência do Sistema 10 UTEs.

A Tabela 4 mostra uma sensibilidade em relação ao número de obreiras e operarias, sendo mantido em 10% o número de soldados. Pode-se verificar na tabela que uma colônia composta por pelo menos 10% de formigas obreiras, orientadas pela MS, é suficiente para garantir a eficiência do processo de busca proposto. Para colônias com um número de obreiras maior do que 40%, o processo começa a ficar muito tenso e o processo de busca fica comprometido.

A robustez do método proposto é verificada devido a estabilidade dos resultados para uma grande faixa de influência da MS. Destaca-se, neste caso, que o tempo computacional não é influenciado com a variação do percentual de obreiras.

Tabela 4: Análise de Sensibilidade - Percentual de Obreiras.

Obreiras	Sistemas Analisados			
	10 UTEs	20 UTEs	40 UTEs	100 UTEs
> 40%	\$563.999	\$1.125.219	\$2.246.928	\$5.612.953
20%	\$563.937	\$1.122.543	\$2.242.084	\$5.601.156
15%	\$563.937	\$1.122.543	\$2.242.084	\$5.601.156
10%	\$563.937	\$1.122.543	\$2.242.084	\$5.601.156
0%	\$569.131	\$1.144.961	\$2.312.717	\$5.896.666

Os resultados obtidos pela metodologia proposta foram comparados com os resultados obtidos de metodologias que também fazem uso do processo de busca inspirado em Colônias de Formigas (CF), tais como: (i) ACSA (*Ant Colony Search Algorithm*) (Sum-im and Ongsakul, 2003); (ii) DACO (*Diversity Ant Colony Optimization*) (Nualhong et al., 2004); (iii) RACO (*Relative Pheromone Updating Strategic Ant Colony Optimization*) (Chusanapiputt et al., 2006); (iv) SSACO (*Selective Self Ant Colony Optimization*) (Chusanapiputt et al., 2007). A Tabela 5 apresenta esta comparação, onde é possível verificar que o processo de busca proposto mostra-se competitivo em relação aos aprimoramentos apresentados na literatura especializada.

Tabela 5: Comparação entre Técnicas Bio-Inspiradas em ACF.

Métodos	Sistemas Analisados			
	10 UTEs	20 UTEs	40 UTEs	100 UTEs
ACSA	\$564.049	-	-	-
DACO	\$563.977	\$1.123.988	\$2.245.692	\$5.608.630
RACO	\$563.977	\$1.123.297	\$2.243.648	\$5.603.330
SSACO	\$563.977	\$1.123.297	\$2.243.372	\$5.602.411
PROPOSTO	\$563.937	\$1.122.543	\$2.242.084	\$5.601.156

A Tabela 6 mostra a comparação da metodologia proposta com outros métodos empregados na resolução do problema, tais como: (i) PSO (*Particle Swarm Optimization*) (Logenthiran and Srinivasan, 2010); (ii) ELR (*Enhanced Lagrangian Relaxation*) (Ongsakul and Petcharak, 2004); (iii) FGA (*Fast Genetic Algorithm*) (Senjyu et al., 2003); (iv) ICGA (*Integer Coded Genetic Algorithm*) (Damousis et al., 2004).

Tabela 6: Comparação com outras Técnicas Utilizadas.

Métodos	Sistemas Analisados			
	10 UTEs	20 UTEs	40 UTEs	100 UTEs
PSO	\$563.999	\$1.125.100	\$2.247.168	\$5.609.098
ELR	\$563.977	\$1.123.297	\$2.244.237	\$5.605.678
FGA	-	-	\$2.247.336	\$5.610.855
ICGA	\$566.404	\$1.127.244	\$2.254.123	\$5.630.838
PROPOSTO	\$563.937	\$1.122.543	\$2.242.084	\$5.601.156

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6, verifica-se que a metodologia proposta apresenta resultados promissores, encontrando soluções mais econômicas.

4.1 Aspectos Computacionais

Considerando a natureza combinatória do problema em estudo, o tempo de processamento passa a ser um parâmetro importante para comparação de resultados. Entretanto, as diferenças computacionais encontradas na execução das metodologias existentes na literatura fazem com que comparações diretas entre os tempos de processamento não sejam corretos.

Para tornar estas comparações coerentes, adotou-se 100 segundos como valor base para o tempo de execução e 2 GHz como valor base da frequência de CPU. Assim, convertem-se os tempos de processamento obtidos pelas diversas metodologias para as bases adotadas (Dieu and Ongsakul, 2008).

Diante das considerações adotadas, a Figura 4 apresenta as comparações entre os tempos de processamento referente a metodologia proposta, DACO e ELR.

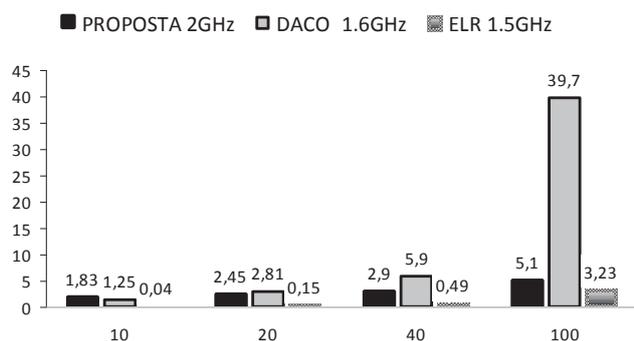


Figura 4: Tempo Computacional - em pu-segundos

Verifica-se para o maior sistema em estudo, 100 UTEs, que a metodologia proposta é aproximadamente 8 vezes mais rápida que a metodologia DACO e 1,6 vezes mais lenta que a metodologia ELR. Entretanto, destaca-se que a metodologia proposta foi convenientemente arranjada para implementação em uma arquitetura de processamento paralelo, o que viabilizaria a diminuição do tempo computacional gasto para sistemas de maior porte (JunYong et al., 2009).

5 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como desenvolvimentos futuros pode-se mencionar: (i) Inclusão da rede de transmissão no problema permitindo a avaliação da influência das perdas ativas; (ii) A modelagem das restrições de rampa e zonas proibitivas inerentes as unidades geradoras; (iii) consideração probabilística da reserva girante (Shi et al., 2004; Aminifar et al., 2009).

6 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados, para o problema referente à programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos, apontam para um aumento da eficiência do processo de busca através das informações dos multiplicadores de Lagrange.

O processo de busca proposto mostrou-se competitivo em relação as demais técnicas de otimização, conciliando soluções de melhor qualidade com um número reduzido de indivíduos.

A etapa de refinamento associada a matriz de sensibilidade tende a melhorar a solução encontrada principalmente para sistemas de maior porte sem, no entanto, aumentar de forma significativa o tempo de processamento.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge FINEP, CAPES, CNPq, FAPESP, and Fundação Araucária for scholarships and funding.

REFERÊNCIAS

- Adhinarayanan, T. and Sydulu, M. (2008). A directional search genetic algorithm to the economic dispatch problem with prohibited operating zones, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D.*, pp. 1–5.
- Aminifar, F., Fotuhi-Firuzabad, M. and Shahidehpour, M. (2009). Unit commitment with probabilistic spinning reserve and interruptible load considerations, *IEEE Transactions on Power Systems* **24**(1): 388–397.
- Aoki, K., Satoh, T., Itoh, M., Ichimori, T. and Masegi, K. (1987). Unit commitment in a large-scale power system including fuel constrained thermal and pumped-storage hydro, *IEEE Transactions on Power Systems* **2**(4): 1077–1084.
- Belede, L., Jain, A. and Gaddam, R. (2009). Unit commitment with nature and biologically inspired computing, *World Congress on Nature Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009.*, pp. 824–829.
- Bonabeau, E., Theraulaz, G., Deneubourg, J.-L., Aron, S. and Camazine, S. (1997). Self-organization in social insects, *Trends in Ecology & Evolution* **12**(5): 188–193.
- Burns, R. and Gibson, C. (1975). Optimization of priority list for a unit commitment problem, *IEEE PES Summer Meeting*, number A75, pp. 453–1.
- Chen, C. and Yeh, S. (2006). Particle swarm optimization for economic power dispatch with valve-point effects,

IEEE/PES Transmission Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06., pp. 1–5.

- Chiang, C.-L. (2005). Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels, *IEEE Transactions on Power Systems* **20**(4): 1690–1699.
- Chusanapiputt, S., Nualhong, D., Jantarang, S. and Phomvuthisarn, S. (2006). Relativity pheromone updating strategy in ant colony optimization for constrained unit commitment problem, *International Conference on Power System Technology, 2006. PowerCon 2006.*, pp. 1–8.
- Chusanapiputt, S., Nualhong, D., Jantarang, S. and Phomvuthisarn, S. (2007). Unit commitment by selective self-adaptive aco with relativity pheromone updating approach, *International Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007.*, pp. 36–41.
- Damousis, I., Bakirtzis, A. and Dokopoulos, P. (2004). A solution to the unit-commitment problem using integer-coded genetic algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems* **19**(2): 1165–1172.
- de Oliveira, E., da Silva, I.C., J., Pereira, J. and Carneiro, S., J. (2005). Transmission system expansion planning using a sigmoid function to handle integer investment variables, *IEEE Transactions on Power Systems* **20**(3): 1616–1621.
- Dieu, V. N. and Ongsakul, W. (2008). Enhanced merit order and augmented lagrange hopfield network for hydrothermal scheduling, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **30**(2): 93–101.
- Dorigo, M. and Di Caro, G. (1999). New ideas in optimization, McGraw-Hill Ltd., UK, Maidenhead, UK, England, chapter The ant colony optimization meta-heuristic, pp. 11–32.
- Dorigo, M., Di Caro, G. and Gambardella, L. (1999). Ant algorithms for discrete optimization, *Artificial Life* **5**(2): 137–172.
- Dorigo, M. and Stutzle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Goldbarg, M. and Luna, H. (2000). *Otimizacao Combinatoria e Programao Linear*, 2 edn, Editora Campus, Rio de Janeiro.
- JunYong, X., Xiang, H., CaiYun, L. and Zhong, C. (2009). A novel parallel ant colony optimization algorithm with dynamic transition probability, *International Forum on Computer Science-Technology and Applications, 2009. IFCSTA '09.*, Vol. 2, pp. 191–194.
- Kazarlis, S., Bakirtzis, A. and Petridis, V. (1996). A genetic algorithm solution to the unit commitment problem, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**(1): 83–92.
- Lee, F. (1991). The application of commitment utilization factor (cuf) to thermal unit commitment, *IEEE Transactions on Power Systems* **6**(2): 691–698.
- Lee, F. and Feng, Q. (1992). Multi-area unit commitment, *IEEE Transactions on Power Systems* **7**(2): 591–599.
- Li, C.-A., Johnson, R. and Svoboda, A. (1997). A new unit commitment method, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**(1): 113–119.
- Logenthiran, T. and Srinivasan, D. (2010). Particle swarm optimization for unit commitment problem, *IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010*, pp. 642–647.
- Lowery, P. (1966). Generating unit commitment by dynamic programming, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-85**(5): 422–426.
- Ma, H. and Shahidehpour, S. (1999). Unit commitment with transmission security and voltage constraints, *IEEE Transactions on Power Systems* **14**(2): 757–764.
- Momoh, J. (2005). *Electric Power System Applications of Optimization*, Marcel Dekker.
- Nualhong, D., Chusanapiputt, S., Phomvuthisarn, S., Saengsuwan, T. and Jantarang, S. (2004). Diversity control approach to ant colony optimization for unit commitment problem, *IEEE Region 10 Conference TENCN 2004.*, Vol. 3, pp. 488–491.
- Ongsakul, W. and Petcharak, N. (2004). Unit commitment by enhanced adaptive lagrangian relaxation, *IEEE Transactions on Power Systems* **19**(1): 620–628.
- Padhy, N. (2004). Unit commitment—a bibliographical survey, *IEEE Transactions on Power Systems* **19**(2): 1196–1205.
- Pang, C., Sheble, G. and Albuyeh, F. (1981). Evaluation of dynamic programming based methods and multiple area representation for thermal unit commitments, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-100**(3): 1212–1218.
- Pereira-Neto, A., Unsihuay, C. and Saavedra, O. (2005). Efficient evolutionary strategy optimisation procedure to solve the nonconvex economic dispatch problem with generator constraints, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution* **152**(5): 653–660.

- Senjyu, T., Shimabukuro, K., Uezato, K. and Funabashi, T. (2003). A fast technique for unit commitment problem by extended priority list, *IEEE Transactions on Power Systems* **18**(2): 882–888.
- Serapio, A. B. d. S. (2009). Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral, *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática* **20**(3): 271–304.
- Shi, L., Hao, J., Zhou, J. and Xu, G. (2004). Short-term generation scheduling with reliability constraint using ant colony optimization algorithm, *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004.*, Vol. 6, pp. 5102–5106.
- Silva Junior, I. C. d., Carneiro Junior, S., Oliveira, E. J. d., Pereira, J. L. R., Garcia, P. A. N. and Marcato, A. L. (2006). Determinação da operação de unidades térmicas para o estudo de unit commitment através de uma análise de sensibilidade, *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática* **17**(3): 300–311.
- Sum-im, T. and Ongsakul, W. (2003). Ant colony search algorithm for unit commitment, *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003*, Vol. 1, pp. 72–77.
- Wood, A. and Wollenberg, B. (1996). *Power Generation, Operation and Control*, 1 edn, John Wiley & Sons.