

Ferramenta de Auxílio a Tomada de Decisão em Sistemas Hidrotérmicos Baseada em Algoritmos Cooperativos

D. F. Guedes

CHESF - Sistema Eletrobras
daltonf@chesf.gov.br

B. de Souza

Universidade Federal de Campina Grande
benemar@ieee.org

Resumo – Este trabalho versa sobre a possibilidade da aplicação de Ant Colony Optimization na elaboração de uma ferramenta de auxílio a tomada de decisão nos estudos de expansão do setor elétrico. São apresentados resultados referentes a um sistema hidrotérmico simplificado. Tais resultados se mostram bastante consistentes e satisfatórios.

Palavras-chave – otimização; hidroelétrica; termoeétrica; custo de operação; colônia de formigas; planejamento.

Abstract – This paper discusses the possibility of applying Ant Colony Optimization in developing a tool to help decision-making in studies of electrical system expansion. The results presented refer to a hydrothermal system (hydroelectric and thermoelectric power plant) simplified. These results appear quite consistent and satisfactory.

Keywords – optimization; hydroelectric, thermoelectric, cost of operation; ant colony; planning.

1 Introdução

A operação de sistemas elétricos hidrotérmicos de grandes dimensões e elevada capacidade de regularização exige um esforço elevado por parte dos agentes de planejamento no sentido de explorar de forma ótima o uso dos recursos naturais disponíveis com vistas ao atendimento da demanda, com segurança energética e modicidade tarifária. Do ponto de vista da expansão do setor de energia, considerando-se as características pertinentes a cada fonte primária, faz-se mister elaborar um programa de expansão da oferta de energia que maximize o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis, gerando uma matriz energética eficiente.

Várias ferramentas computacionais são aplicadas no setor elétrico com o objetivo de elaborar subsídios para tomada de decisões nos planejamentos da operação e da expansão. Nesse sentido, é apresentado neste trabalho uma técnica, baseada no comportamento das colônias de formigas, capaz de fornecer elementos para os processos de tomadas de decisão. Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos a partir de um estudo de caso com um sistema hidrotérmico simplificado, tais resultados evidenciam a possibilidade de aplicação de Ant Colony Optimization na otimização de despacho de geração cuja função objetivo é a minimização do custo de operação do parque de geração.

2 Sistema Hidrotérmico

Um sistema hidrotérmico é composto preponderantemente por usinas hidroelétricas e centrais termoeétricas. O problema da operação de sistemas hidrotérmicos está relacionado às decisões periódicas que precisam ser tomadas quanto aos montantes de geração hidroelétrica e termoeétricas que devem ser despachados para atendimento da carga a cada instante e que minimize o custo esperado total de operação durante o horizonte em estudo.

A função de custo é composta pela função de custo imediato referente ao despacho atual somada à função de custo futuro, relacionada às decisões operativas anteriores associadas a despachos hídricos e térmicos nas diferentes regiões elétricas do sistema. Ou seja, é preciso encontrar um equilíbrio entre o benefício presente do uso da água e o benefício futuro de seu armazenamento, medido em termos da economia esperada dos combustíveis das usinas termoeétricas.

Nos sistemas hidrotérmicos onde as centrais termoeétricas são fontes complementares, o gerenciamento do custo de operação do sistema é feito através do despacho das usinas hidroelétricas, decidindo estágio a estágio o valor do turbinamento na usina.

2.1 Usinas hidroelétricas

Em (1) é apresentada a equação que fornece a potência de uma usina hidroelétrica.

$$P_e = \kappa \eta_{tg} q h_l (TEIF) (IP) \quad (1)$$

Onde:

- $TEIF$ é a Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada;
- IP é a Taxa de Indisponibilidade Programada;
- κ é o produto da densidade específica da água e a aceleração da gravidade;
- η_{tg} é o rendimento do conjunto turbina-gerador;
- q é a vazão turbinada na usina (engolimento);
- h_l é a queda líquida, isto é, a queda bruta descontadas as perdas hidráulicas.

2.2 Usinas termoeletricas

O custo de operação das centrais termoeletricas está fortemente relacionado ao custo do combustível empregado no processo como fonte primária de energia. Dessa forma, quanto maior o custo do combustível maior será o custo de operação da planta.

Neste trabalho foi aplicada a função de custo térmico apresentada em (2).

$$Custo(t) = 0,00002 (MWh)^2 \quad (2)$$

3 Comportamento real das formigas

Durante a exploração do menor caminho entre o ninho e a fonte de alimento, as formigas depositam ao longo do seu caminho uma substância química chamada feromônio. Esta substância evapora-se com o tempo, necessitando ser reforçada constantemente para evitar que o caminho seja abandonado, pois as decisões sobre o percurso a ser feito é tomada com base nas informações de nível de feromônio associado a cada alternativa. Essa estratégia de comunicação permite sinalizar, para o conjunto de formigas, a melhor alternativa em termos de distância entre o ninho e a fonte de alimento. Isto acontece porque as formigas que percorrem o caminho mais curto realizando as trajetórias de ida e volta em um tempo menor, reforçando o nível de feromônio referente à sua trajetória e tornando-a mais atrativa para outros agentes da sua colônia. Em percursos mais longos, o tempo de conclusão da trajetória é maior e conseqüentemente o nível de feromônio torna-se menos atrativo frente a outras soluções, essa característica faz com que os agentes da colônia de formigas abandonem as alternativas mais longas.

3.1 Relação com Sistemas Hidrotérmicos

Conforme comentado, os agentes de uma colônia de formigas trabalham em cooperação para otimizar o percurso entre o ninho e a fonte de alimento. Para isso, eles precisam tomar uma série de decisões durante o processo de construção da melhor solução.

Da mesma forma, os estudos de planejamento de sistemas hidrotérmicos precisam encontrar uma série de valores de turbinamento nas usinas hidroelétricas que implicam em um baixo custo de operação do sistema durante o horizonte de estudo. Ou seja, é necessário encontrar uma trajetória ótima de decisões de despacho de geração hidroelétrica que corresponde ao menor custo de complementação termoeletrica.

3.2 Ant System

O Ant System [1, 2] é um método de otimização baseado no comportamento das colônias de formigas. Neste método, as formigas selecionam aleatoriamente um ponto de partida para então seguirem suas trajetórias tomando novas decisões de destino em cada estágio alcançado. Durante ou no fim do percurso de cada etapa, elas depositam feromônio de forma indiscriminada ou proporcionalmente à qualidade de sua solução dependendo da abordagem adotada. Dessa forma, haverá níveis diferenciados de feromônio relacionados a cada opção disponível cuja probabilidade de escolha é dada por (3).

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i^k(t)} [\tau_{il}(t)]^\alpha \eta_{il}^\beta} & \text{se } j \in N_i^k \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases} \quad (3)$$

Considerando que este método foi aplicado inicialmente no problema do caixeiro viajante - TSP (travelling salesman problem), temos:

- $N_i^k(t)$ é o conjunto de cidades ainda não visitadas pela formiga k , localizada na cidade i , no instante t ;
- η_{ij} é a visibilidade, informação heurística que maximiza a probabilidade de escolha de cidades mais próximas, do trecho entre as cidades i e j ;
- $\tau_{ij}(t)$ o nível de feromônio associado ao trecho i, j no instante t ;
- α e β são coeficientes que influenciam as decisões das formigas virtuais alterando a importância do nível de feromônio ou da visibilidade em cada trecho quando do cálculo da probabilidade de escolha;

A atualização dos níveis de feromônio é feita aplicando-se (4), onde $\rho \in [0, 1[$ é a taxa de evaporação, $\tau_{ij}(t)$ é o nível de feromônio no trecho ij no instante t , n é o número total de cidades e $\Delta\tau_{ij}$ é o incremento a ser realizado nesse mesmo trecho no instante $t + n$, dado por (5).

$$\tau_{ij}(t + n) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (5)$$

Em (5) m é o número total de formigas e $\Delta\tau_{ij}^k$ é calculado aplicando-se (6).

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{se } k \text{ percorre o trecho } ij \text{ em sua solução} \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases} \quad (6)$$

Na expressão (6) Q é uma constante e L_k é a distância percorrida pela formiga k após percorrer todas as n cidades.

4 Modelo proposto: Sistema de Formigas Dinâmico - SFD

A expressão (7) é empregada no cálculo da meta M imposta a cada agente k da colônia de formigas após decisão tomada em cada estágio t . Isto é, a decisão D tomada por cada agente k gera, em cada estágio do problema, uma meta M , inversamente proporcional à tendência da solução global (Γ), que deve ser atendida por esse agente para alcançar o próximo estágio e tomar nova decisão. Essa regra permite que os agentes com melhores resultados encontre menores obstáculos nas suas expedições. Com isso, estabelece-se uma ordem de mérito nas conclusões de expedições e consequentemente na sinalização para os demais agentes sobre a atratividade de uma determinada rota ou conjunto de decisões.

$$M_D^k(t) = \exp\left(\frac{1}{\Gamma}\right) \quad (7)$$

A cada estágio t do problema está associado um vetor $F(t)$ que registra o nível de *feromônio* relacionado a cada alternativa de decisão do estágio t . Este vetor sofre evaporação a uma taxa (ρ) sempre que um agente completa uma expedição. Isto é, aplica-se (8) sempre que um agente alcança o último estágio da solução global.

$$F(t) = (1 - \rho) F(t) \quad (8)$$

Os níveis de *feromônio* são inicializados com um valor Q e atualizados após cada agente concluir sua expedição (solução global). Esta atualização é realizada por todos os agentes da colônia de formigas conforme regra de atualização mostrada em (9), onde T_k é o conjunto de decisões tomadas pelo agente k durante a construção da sua solução e Ω é um parâmetro que indica a qualidade da solução global. Ou seja, quanto melhor a qualidade da solução global alcançada maior será a quantidade de *feromônio* atribuída ao conjunto de decisões que geraram essa solução.

$$\tau_i(t) = \tau_i(t) + \begin{cases} \exp(\Omega) & \text{se } i \in T_k \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases} \quad (9)$$

A decisão D tomada em cada estágio t segue a regra de decisão apresentada em (10). Onde $p_i^k(t)$ é a probabilidade do agente k decidir pela opção $i \in I$, sendo I o conjunto de alternativas de decisões que podem ser tomadas. $\tau_i(t)$ é o nível de *feromônio* associada à opção i no instante t . Nesta regra de decisão, apenas o nível de *feromônio* é levado em consideração no cálculo do vetor de probabilidades, não há, portanto, nenhuma outra informação envolvida que justifique a aplicação dos parâmetros α e β abordados nas formulações tradicionais de ACO.

Os valores do vetor de probabilidades são alterados constantemente pelos diversos agentes em virtude de mudanças nos vetores de *feromônio*. Por isso, sempre que um agente precisa tomar uma decisão, é necessário calcular o vetor de probabilidades para alimentar uma roleta com as diversas opções de decisão onde é realizado um sorteio. A opção com maior probabilidade terá maiores chances de ser escolhida, porém é possível que uma opção com baixa probabilidade seja contemplada, tendo em vista o caráter aleatório.

$$p_i^k(t) = \frac{\tau_i(t)}{\sum_{i=1}^I \tau_i(t)} \quad (10)$$

Após concluir sua expedição o agente retorna ao ponto de partida e reinicia o cálculo de nova solução (inicia nova expedição) levando em consideração a experiência acumulada por toda a coletividade. Dessa forma, os vetores *feromônio* apresentarão distribuições diferentes durante a evolução do algoritmo de otimização, tendendo para a trajetória de solução ótima.

4.1 Aplicação a sistemas hidrotérmicos

No modelo SFD, os agentes da colônia de formigas devem decidir sobre os percentuais de vazão a ser turbinada em cada estágio do horizonte de análise. A partir das decisões periódicas, são calculados e atualizados periodicamente todos os estados do sistema. Ou seja, partindo-se de um volume inicial informado no início do primeiro estágio, decide-se com base na regra de decisão adotada, o valor percentual do engolimento máximo q_{max} a ser turbinado em cada estágio, observando-se a restrição de vazão defluente mínima.

Deve ser observado que o percentual de turbinamento empregado em um determinado estágio poderá estar relacionado a um valor de potência diferente daquele observado quando se emprega esse mesmo percentual em outros estágios com estados sistêmicos diferentes. Pois à medida que o sistema é operado, o volume do reservatório sofre alterações em cada estágio. Consequentemente, a queda líquida h_l varia constantemente influenciando diretamente a potência da usina hidroelétrica para uma mesma vazão.

Na formulação SFD, a variável Γ aplicada em (7) é função da complementação termoelétrica média referentes aos estágios 1 a t , conforme (11), onde K_Γ é uma constante. Assim, atribui-se a cada agente da colônia de formigas, após decisão tomada, uma meta a ser cumprida antes de tomar nova decisão (chegar a novo estágio). Essa meta, pode ser interpretada como uma distância a ser percorrida para chegar a um novo estágio de decisão. Como todas as formigas apresentam um valor fixo de passo, aquela que apresentar uma complementação térmica média menor, frente às demais, durante a evolução da sua solução, conseguirá concluir sua expedição em menor tempo. Cria-se com isso, uma ordem de mérito na etapa de atualização de *feromônio*, visto que os agentes praticam essa atualização no término das suas expedições, o que permite que as melhores formigas sinalizem para os demais agentes da colônia a atratividade da sua solução.

$$\Gamma(t) = \left(\frac{K_\Gamma}{GT_{med}(1 a t)} \right)^3 \quad (11)$$

A estratégia de atualização do nível de *feromônio* relacionado a cada uma das alternativas de turbinamento é uma característica importante em ACO. Na abordagem SFD, os níveis de *feromônio* são atualizados aplicando-se (8) e (9). O parâmetro Ω em (9) é calculado aplicando-se (12), onde K_Ω é uma constante e CT_k é o custo térmico total referente à solução global proposta pelo agente k .

$$\Omega = \left(\frac{K_\Omega}{CT_k} \right)^3 \quad (12)$$

O percentual ξ do engolimento máximo q_{max} turbinado em cada estágio t segue a regra de decisão apresentada em (10). Onde $\tau_i(t)$ representa o nível de *feromônio* relacionado ao percentual de turbinamento i no estágio t .

Aplicando-se (13) encontra-se o turbinamento que deve ser realizado pelo agente k em cada estágio t do problema, sendo q_{min} o turbinamento mínimo.

$$q_k(t) = \xi_k(t) (q_{max} - q_{min}) + q_{min}, \quad 0 < \xi_k \leq 100\% \quad (13)$$

5 Estudo de Caso

Os dados da usina hidroelétrica aplicada neste estudo de caso são apresentados na Tabela 1.

Potência máxima:	1050MW
Engolimento máximo:	3833m ³ /s
Defluência mínima:	1300m ³ /s
Volume máximo operacional:	34116hm ³
Volume mínimo operacional:	5447hm ³
NA montante máximo operativo:	392,5m
NA montante mínimo operativo:	380,5m
Produtibilidade específica [MW/m ³ /s/m]:	0,0101
IP - Taxa de Indisponibilidade Programada:	0,08091
TEIF - Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada:	0,02533

O polinômio cota-volume que fornece a cota de montante (cota do reservatório) em função do volume no reservatório é apresentado em (14).

$$\phi(x) = -9,545989^{-18} x^4 + 1,155989^{-12} x^3 - 5,35159^{-8} x^2 + 0,00139669 x + 374,179 \quad (14)$$

A cota no canal de fuga é calculada a partir do polinômio cota-vazão em (15), que fornece o valor da cota de jusante em função da vazão defluente, isto é, vazão turbinada somada ao vertimento, se houver.

$$\theta(u) = -7,702299^{-16} u^4 + 2,50828^{-11} u - 2,96873^{-7} u^2 + 0,00196401 u + 359,6538 \quad (15)$$

5.1 Parâmetros do modelo de otimização

Os valores dos parâmetros referentes ao processo de otimização são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do algoritmo de otimização

Volume inicial do reservatório:	70%
Passo da formiga:	0,005
Taxa de evaporação:	1%
Critério de parada: (desvio padrão entre soluções)	0,1
Segundo critério de parada: (nº máximo de passos)	900000
K_{ts} :	igual ao mercado [MW]
K_{QSG} :	maior custo verificado nas expedições aleatórias

Foram adotadas as seguintes premissas:

- Mercado (carga) constante e igual a 1050MW;
- Engolimento máximo da usina constante e igual ao engolimento efetivo;
- Perdas hidráulicas: $P_h = c q^2$, onde $c = 4,20856E - 08$;
- Taxa de desconto igual a 12% a.a.

A vazão afluyente aplicada é a média de longo termo (MLT), apresentada na Figura 1.

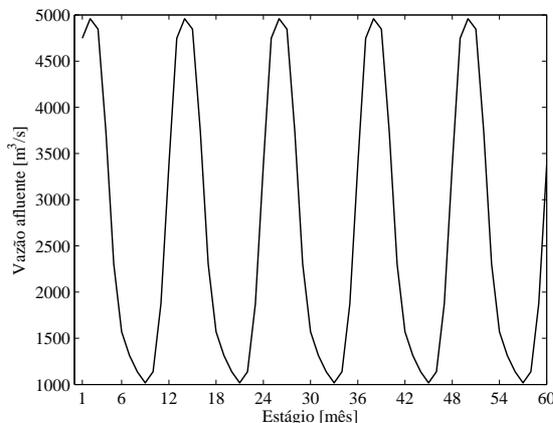


Figura 1: Vazão afluyente média.

5.2 Resultados

O desempenho do modelo¹ em função do número de formigas é apresentado na Figura 2. Observa-se na Figura 2(a), em escala logarítmica, que o algoritmo proposto converge para um patamar de aproximadamente $669MW_{médio}$ e que o tempo computacional apresenta característica crescente em função do número de agentes empregados. Na Figura 2(b) é apresentada a evolução do valor presente do custo de operação do sistema em função do número de agentes da colônia de formigas.

Na Figura 3 são apresentadas as trajetórias apontadas como solução ótima em simulações com o emprego de 700, 20000, 30000 e 50000 agentes. Observa-se nas Figuras 3(a) e 3(b) que o emprego de 700 agentes leva o algoritmo a uma resposta próxima daquelas apresentadas pelas colônias de formigas com um número maior de agentes. No entanto, em alguns períodos do horizonte de estudo, os resultados se apresentam relativamente distantes, principalmente nos últimos estágios. É importante observar que as simulações com 20, 30 e 50 mil agentes apresentam um desvio padrão menor entre suas trajetórias de soluções quando comparadas com as trajetórias obtidas nas três simulações realizadas com 700 agentes.

¹Foi utilizado um computador desktop: processador Intel Core Duo 3GHz de frequência e 2GBytes de memória RAM

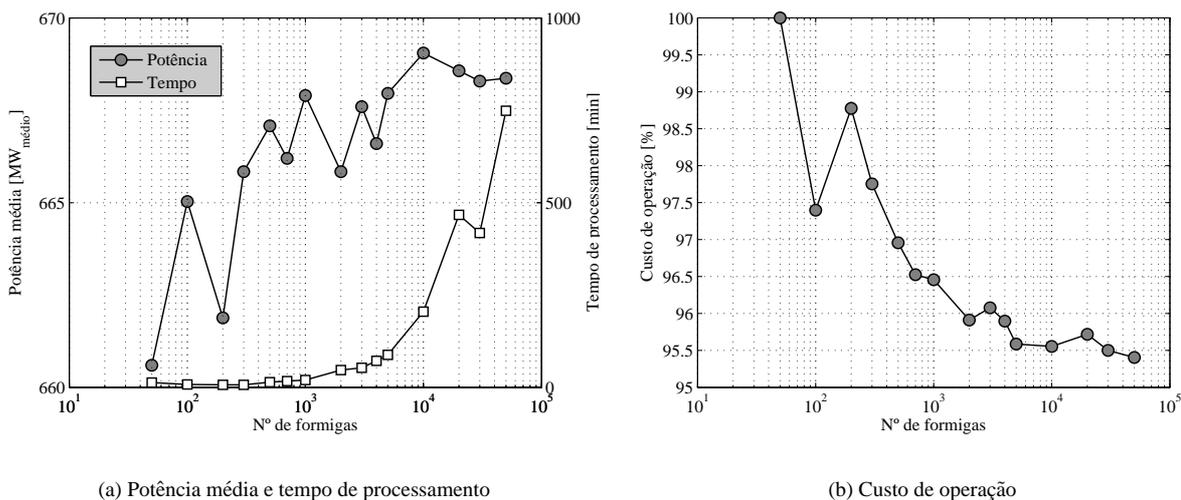


Figura 2: Desempenho do modelo em função do número de formigas, considerando algumas melhorias.

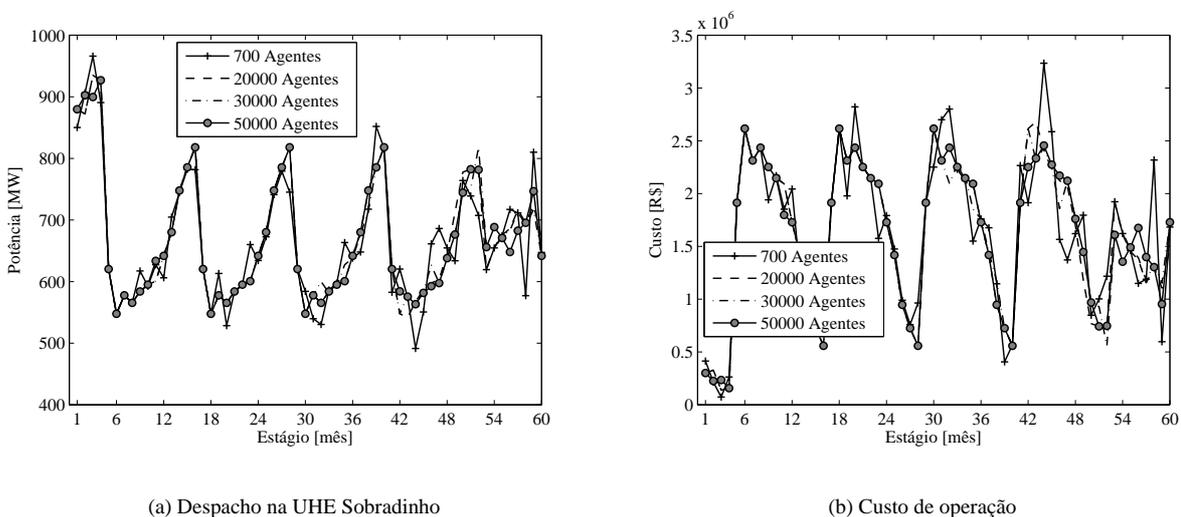


Figura 3: Desempenho do modelo em função do número de formigas, considerando algumas melhorias.

6 Conclusão

O modelo Sistema de Formigas Dinâmico - SFD apresentou desempenho satisfatório em termos de solução do Problema da Operação de Sistemas Hidrotérmicos, neste caso composto pela UHE Sobradinho e um parque termoeletrico fictício. Nesta configuração, o despacho da UHE supracitada convergiu para um patamar de potência média entre 668 e 669 $MW_{médio}$ a partir da aplicação de colônias de formigas com números de agentes superiores a 5000. No entanto, o esforço computacional tem característica exponencial em função do número de agentes da colônia de formigas.

A aplicação de um número crescente de agentes não produz benefícios significativos em termos de potência média despachada, mas estabiliza o algoritmo em uma trajetória de turbinamento mais suave e sempre coincidentes. Esta característica evita picos de complementação térmica e consequentemente de custo operacional, melhorando a resposta em termos de valor esperado do custo de operação.

Este trabalho mostrou a possibilidade de aplicação da meta-heurística construtiva baseada no comportamento das colônias de formiga na elaboração de ferramentas de apoio à decisão na seara do planejamento energético. Contudo, muitas melhorias podem ser feitas para ajustar os diversos parâmetros do modelo afim de sintonizar uma resposta mais rápida e incorporar novas plantas hidroelétricas.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Dorigo, *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, PhD Thesis. Politecnico di Milano, 1992.

- [2] A. Coloni and M. Dorigo and V. Maniezzo, *Distributed Optimization by Ant Colonies*, Towards a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life. MIT Press, 1992.