

Estrutura Organizacional Emergente em Sistemas Multiagentes: Agentes Cooperando como os Insetos Sociais

Paulo R. Ferreira Jr.* and Ana L. C. Bazzan

Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Porto Alegre – RS – Brazil
{prferreira,j,bazzan}@inf.ufrgs.br

*doutorando, conclusão em setembro de 2007

Resumo Agentes atuando em comunidade devem agir de maneira coerente para atingir um objetivo comum. A coordenação pode ser baseada na estrutura organizacional, onde a comunidade de agentes atua a favor de um objetivo comum através da forma como estão organizados. Em ambientes dinâmicos a organização dos agentes deve se adaptar a mudanças nos objetivos do sistema, na disponibilidade de recursos, nos relacionamentos entre os agentes, e assim por diante. Esta flexibilidade é um problema chave nos sistemas multiagentes e está relacionada à modelos de aprendizagem e adaptação como os observados nos insetos sociais. O presente trabalho propõe uma abordagem para a geração e adaptação da organização de um sistema multiagente de larga escala, em tempo de execução, utilizando como base os modelos teóricos de organização das colônias de insetos sociais. Pretende-se que este trabalho contribua para o avanço do estado-da-arte em sistemas multiagentes uma vez que a abordagem proposta compõe uma abordagem para a especificação e resolução de problemas, através destes sistemas, focada em ambientes dinâmicos e de larga escala.

Palavras-chave Organização em SAM, Comportamento Coletivo e Emergente, Alocação de Recursos e Tarefas em MAS.

1 Introdução

O paradigma baseado nos sistemas multiagentes tem a coordenação como ponto central. A coordenação é o processo no qual os agentes se engajam para garantir que o conjunto deles que compõe o sistema irá atuar de uma maneira coerente. Quando agentes distribuídos trabalham para cumprir determinado objetivo, eles devem agir como uma unidade, coordenando suas ações, minimizando esforços redundantes, compartilhando recursos, etc.

A principal questão abordada por este trabalho é como coordenar um grande número de agentes em um sistema multiagentes para atuar em ambientes dinâmicos e de larga escala na busca de um objetivo comum.

A coordenação de um sistema multiagentes, atuando em ambientes com as características descritas acima, pode ser obtida através de sua estrutura organizacional. A dimensão funcional desta organização define os objetivos do sistema,

as tarefas necessárias para atingir estes objetivos, como estas tarefas se dividem em sub-tarefas e como estas se relacionam entre si. A dimensão estrutural desta organização define que agentes atuam em quais tarefas e em que tempo isto deve ocorrer.

Desta forma, a dimensão funcional descreve o ambiente em que o sistema está inserido e quais os passos necessários para que os objetivos deste sistema sejam atingidos. Tal dimensão pode ser especificada utilizando uma linguagem independente de domínio como o TÆMS [4]. A principal dificuldade com relação ao problema em questão está na definição da dimensão estrutural da organização.

Este trabalho parte do pré-suposto de que é possível conseguir a emergência da dimensão estrutural da organização através da utilização de modelos de divisão de trabalho em colônias de insetos sociais.

As colônias de insetos sociais têm uma das estratégias de sobrevivência mais bem sucedidas da natureza. Esta estratégia é centrada na organização das colônias, cujas principais características são a divisão do trabalho e a especialização. As necessidades das colônias se modificam durante o passar do tempo. Estas modificações estão associadas com a fase de desenvolvimento da colônia, a época do ano, a disponibilidade de alimentos, a pressão de predadores e as condições climáticas. A despeito dessas drásticas variações nas condições da colônia os insetos sociais têm notório sucesso ecológico.

Uma colônia de insetos sociais opera sem coordenação explícita. Um inseto pertencente a casta operária individualmente não conhece as necessidades da colônia como um todo; este tem apenas informações locais simples, capacidade de comunicação extremamente limitada e ninguém é encarregado de coordenar as ações. Através da agregação destes trabalhadores, o comportamento da colônia emerge sem qualquer tipo de planejamento ou coordenação explícita. A chave para este comportamento emergente está na plasticidade da divisão de trabalho nas colônias. Estas colônias respondem à variação nas condições do ambiente através do ajuste das taxas de trabalhadores engajados nas diversas tarefas que precisam ser executadas.

Este trabalho propõe uma abordagem para gerar e adaptar a dimensão estrutural da organização dos sistemas multiagentes, através da alocação e re-alocação de tarefas entre os agentes, utilizando como base os modelos teóricos de divisão do trabalho dos insetos sociais.

O problema em questão pode ser redefinido como um problema de alocação / escalonamento dinâmico distribuído de tarefas em larga escala entre agentes com diferentes competências. Por alocação entende-se o processo de atribuir agentes a tarefas em tempo real, onde não é possível despende tempo planejando, ou não se tem informação suficiente, e os agentes devem aprender com as experiências passadas. Por escalonamento entende-se o processo de determinar que agentes realizam quais tarefas e organizar a execução das tarefas com relação ao tempo. Neste último, os agentes dispõem de tempo e informação suficientes para planejar a alocação das tarefas e sua disposição no tempo deve ser feita de maneira a minimizar o tempo total necessário para a realização das mesmas.

Dois problemas da área de pesquisa operacional modelam partes diferentes, porém complementares, do problema descrito acima. O *Generalized Assignment Problem* (GAP) [19] e o *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) [13]. Ambos são NP-difíceis. Estes problemas não são originalmente dinâmicos nem distribuídos. O número de tarefas e agentes (ou recursos) são fixos. Contudo, podem ser facilmente estendidos para lidar com essas características.

O GAP busca maximizar o ganho ao atribuir n tarefas a m agentes, sendo que cada tarefa é associada a um agente apenas de acordo com restrições de competência destes agentes. No RCPSP tarefas devem ser escalonadas considerando um conjunto limitado de agentes (recursos na definição original) necessários para a realização de cada tarefa. As tarefas são relacionadas por restrições de interdependência de execução, ou seja, determinadas tarefas devem ser executadas antes de outras. O objetivo é buscar um escalonamento de todas as tarefas no menor tempo possível.

Estes problemas compõem dois cenários para a experimentação da abordagem proposta neste trabalho. Além de modelar vários aspectos de aplicações reais, estes problemas foram largamente estudados e existem conjuntos de dados disponíveis que podem ser usados para comparação. Pretende-se ainda estender os dois cenários, ou a combinação deles, para lidar com outros aspectos que envolvem a relação entre tarefas que não são levados em conta nestes problemas.

Dentre as contribuições esperadas com este trabalho, destacam-se: A abordagem proposta é a única abordagem para coordenação de agentes para cenários dinâmicos e de larga escala que oferece simultaneamente os mecanismos necessários para a alocação (em tempo real) e o escalonamento (com planejamento) de tarefas de forma distribuída; Pretende-se resolver de forma aproximada o GAP (e suas extensões). O GAP vêm sendo utilizado para modelar muitos problemas de alocação de tarefas, incluindo cenários de coordenação de equipes de resgate e salvamento, onde um número muito restrito de soluções distribuídas foram propostas; Pretende-se resolver de forma aproximada o RCPSP. Este problema modela inúmeras aplicações reais, principalmente relacionadas ao escalonamento de tarefas em manufaturas. Uma abordagem distribuída, como a que está sendo proposta, junta-se ao esforço de outras soluções para tentar resolver este problema crítico no estilo moderno de produção;

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na seção 2 serão apresentados os trabalhos relacionados envolvendo as áreas de SMA e de Inteligência Coletiva; Na seção 3 serão discutidas as idéias principais da abordagem proposta; Os resultados preliminares obtidos, e outros que se pretende obter, serão mostrados na seção 4; e, finalmente, na seção 5 serão apresentadas algumas considerações acerca das primeiras conclusões e as atividades que serão realizadas no futuro.

2 Trabalhos Relacionados

A adaptação da organização de um MAS, para melhorar sua eficiência quando o ambiente no qual este está inserido é dinâmico, foi previamente proposta na

literatura. Essa adaptação foi originalmente denominada de auto-organização. Os primeiros trabalhos em auto-organização de MAS enfocavam o balanço de carga adaptativo [20] ou a re-alocação de tarefas de acordo com a eficiência geral do sistema [21], sendo específicos para determinados cenários ou oferecendo uma visão global para os agentes. Em [10], os autores propõem uma abordagem que pretende ser mais genérica, baseada em TÆMS e composta de um método para auto-diagnóstico. Esta abordagem mostrou bons resultados no cenário experimentado, mas segundo os próprios autores algumas questões sobre sua eficiência em termos mais gerais continuam em aberto.

Recentemente, as pesquisas tem se voltado para um aspecto da organização em sistemas multiagentes: a alocação distribuída de tarefas. O *Distributed Constraint Optimization Problem* (DCOP) é um formalismo para modelar um grande conjunto de problemas que envolvem a alocação de tarefas e têm sido tema de muitos avanços nos últimos anos [14,12,17]. Nestas abordagens, a alocação de tarefas pode ser realizada *on-line* permitindo que o sistema se adapte a dinamicidade do ambiente.

Uma questão importante também sobre as abordagens para a solução de DCOPs é se estas têm desempenho suficiente para serem aplicadas em problemas reais. A grande maioria das abordagens para DCOP apresentam bons resultados em cenários simples mas alguns trabalhos destacam sua ineficiência em cenários mais complexos [6]. Além disso, são limitados os experimentos encontrados na literatura sobre o desempenho destes algoritmos em cenários dinâmicos [11,15].

Neste sentido, [19] propõem um algoritmo para DCOP especificamente para ambientes dinâmicos e em larga escala, denominado LA-DCOP (*Low-communication Approximation DCOP*). Os autores destacam que este algoritmo superou todas as outras abordagens de alocação distribuída de tarefas usando um número menor de mensagens e obtendo um melhor desempenho em cenários de larga escala. Os resultados da abordagem que está sendo proposta poderão ser comparados com os resultados obtidos pelo LA-DCOP. Porém, o LA-DCOP apresenta várias limitações em relação a abordagem que está sendo proposta por ter sido elaborado especificamente para resolver o GAP.

Os modelos teóricos de divisão de trabalho dos insetos sociais, que serviram como base desse trabalho, também foram utilizados previamente na literatura para a coordenação de agentes em ambientes dinâmicos [2]. Neste artigo os autores apresentam uma abordagem que é aplicada ao *Dynamic Flow Shop Scheduling Problem*. [3] apresentam uma extensão desta abordagem para o mesmo problema de [2]. Os resultados mostraram que a utilização dos modelos teóricos dos insetos sociais é competitivo, e em alguns casos até superior, a outros sistemas baseados em agentes apresentados anteriormente. Contudo, não está claro se estas abordagens são capazes de lidar com outros problemas de escalonamento e alocação de tarefas.

A maneira como as formigas forrageiam também inspirou a concepção de abordagens para solucionar problemas de otimização, criando uma área de pesquisa conhecida como ACO (*Ant Colony Optimization*). As abordagens nessa área, apesar da mesma origem e de tratar problemas e cenários semelhantes,

não considera que as soluções precisam ser estabelecidas de maneira distribuída entre os agentes.

Muitas abordagens baseadas em ACO têm sido propostas para problemas de escalonamento. Em [13] os autores apresentam uma abordagem para o Resource Constraint Project Scheduling Problem (RCPSP), conhecido com um problema geral de escalonamento. Foram realizados experimentos comparando esta abordagem com outras baseadas em diferentes tecnologias, onde a abordagem baseada em ACO apresentou melhores resultados. O RCPSP será utilizado como um dos cenários para experimentar a abordagem que está sendo proposta neste trabalho.

[22] propõem a aplicação de ACO em CSPs (problemas relacionados aos DCOPs, mencionados anteriormente nesta seção), apresentando um algoritmo básico e discutindo as diversas abordagens para se obter a solução do referido problema usando este algoritmo. Não se tem conhecimento ainda da diferença de desempenho entre ACO e as outras soluções propostas para CSPs, bem como não se sabe a diferença desta solução especificamente se comparada a outras também baseadas em ACO para problemas que possam ser representados como CSPs.

3 Abordagem Proposta

O embasamento da abordagem proposta, como já mencionado, é a plasticidade na divisão do trabalho nas colônias de insetos sociais. Esta plasticidade emerge da interação entre os indivíduos e deles com o ambiente, utilizando padrões simples de comunicação e sem coordenação explícita. Centenas, e até milhares, de indivíduos compõem uma colônia que se auto-organiza para atender suas necessidades em um ambiente dinâmico. A alocação de tarefas entre os indivíduos que compõem uma colônia deve ser tal que as variações do ambiente sejam absorvidas e que a energia gasta pela colônia seja a menor possível.

Agentes podem decidir quais tarefas realizar e quando realizá-las inspirados na forma como os insetos sociais tomam este tipo de decisão, sem utilizar processos explícitos de coordenação e buscando a maior eficiência possível. Este comportamento é adequado para agentes que compõem sistemas multiagentes engajados em problemas dinâmicos e em larga escala.

Para representar as tarefas necessárias para que o SMA atinja seu objetivo, além da especificação da organização hierárquica destas tarefas e sua interdependência, a abordagem proposta utiliza a linguagem TÆMS [4]. Esta linguagem permite especificar de uma forma bastante rica essa estrutura de tarefas. Os agentes determinam de forma probabilística se devem se engajar na realização de uma tarefa utilizando como base o modelo teórico do limiar de resposta apresentado em [1]. As tarefas, representadas em TÆMS, produzem estímulos para os agentes de acordo com suas características e relacionamentos.

Cada tarefa em TÆMS é dividida em sub-tarefas de maneira recursiva, compondo uma estrutura em forma de árvore, a partir da TG (nodo raiz) até sua forma indivisível, os métodos (nodos folha). Somente os métodos são de fato

executados pelos agentes. Cada método j possui qualidade q_j , custo c_j e duração d_j como atributos. As sub-tarefas de uma mesma tarefa pai na árvore são relacionadas por funções denominadas *Quality Accumulation Functions* (QAFs).

A tendência do agente i se engajar no método j é determinada pela relação entre o estímulo do método, o limiar interno do agente e a demanda produzida pelas QAFs relacionadas a tarefa j , como mostra a equação 1.

$$T_{\theta_{ij}}(s_j) = \sigma \frac{s_j^2}{s_j^2 + \theta_{ij}^2} + (1 - \sigma)X(j) \quad (1)$$

onde:

s_j estímulo associado com a tarefa j

θ_{ij} limiar interno do agente i em relação a tarefa j

$X(j)$ demanda associada com as QAFs relacionadas ao método j , $0 \leq X(j) \leq 1$

σ constante para determinar o peso de $X(j)$ no cálculo da tendência

Deve-se considerar que os agentes atuam em ambientes dinâmicos, onde a estrutura de tarefas descrita em TÆMS pode ser modificada em tempo de execução: métodos podem aparecer e desaparecer; o número de agentes pode mudar; e podem variar os relacionamentos entre os métodos.

Pela questão de limite de espaço, os detalhes dos elementos que compõe a equação acima não serão discutidos. Pelo mesmo motivo, os outros aspectos da abordagem que serão apresentados a seguir não serão formalizados neste artigo. A abordagem proposta, formalizada e discutida em detalhes, pode ser encontrada em [5].

Em [1], os autores mostram que o sucesso emergente de tarefas pode ser obtida com o uso de limiares fixos mas com aplicabilidade limitada. A especialização dos indivíduos em conjuntos de tarefas é um aspecto do comportamento das colônias de insetos sociais que é importante e bastante estudado [18].

A especialização dos indivíduos de acordo com sua idade é denominado pelos biólogos de *polietismo temporal*. Nas abelhas esta é a principal forma de se obter a divisão de trabalho. Trabalhadores jovens realizam tarefas dentro da colméia e trabalhadores mais velhos realizam tarefas fora dela, como defender a colônia e forragear.

Propõe-se uma modificação no modelo de especialização dos insetos sociais, apresentado em [1]. Nesta modificação, o limiar interno dos agentes é atualizado de acordo com sua idade e a idade das tarefas. Por idade de um agente e de um método entende-se o tempo em que os agentes estão atuando no sistema e o tempo em que o método está disponível para execução, respectivamente.

Através desta modificação, os agentes têm limiares de resposta altos para métodos que estão aguardando a mais tempo para serem executados e baixos para métodos novos. Isso garante que as tarefas não permaneçam muito tempo aguardando para serem realizadas. Tarefas que foram percebidas a mais tempo pelo sistema estimulam mais intensamente os agentes, pois estes terão um limiar de resposta maior para estas tarefas. Além disso, agentes mais novos tem limiares mais baixos que agentes mais velhos com relação aos mesmos métodos. A

idéia por traz disso é especializar agentes mais velhos em um conjunto maior de métodos em relação aos agentes mais novos, como ocorre com os insetos sociais.

A especialização dos indivíduos de acordo com sua forma é denominada pelos biólogos de *polietismo morfológico*, ou simplesmente *polimorfismo*. Nas colônias de formigas o polimorfismo tem um papel de suma importância para a divisão do trabalho. O polimorfismo pode ser modelado através do limiar de interno. Para diferenciar os agentes e obter a especialização morfológica basta iniciar os limiares internos de cada agente de acordo com as tarefas as quais sua “forma” é mais adaptada. Agentes que partem com limiares altos para determinadas tarefas terão maior tendência a realizá-las.

Uma vez que no problema que está sendo considerado neste trabalho os agentes tem diferentes competências para realizar diferentes tarefas, o limiar interno do agente será iniciado para refletir esta competência. Esta inicialização só poderá ocorrer para as tarefas previamente conhecidas pelos agentes. Caso isso não ocorra, os agentes são iniciados com um limiar de nível intermediário para tais tarefas.

Como mencionado anteriormente, potencialmente cada inseto na colônia pode realizar todos os tipos de tarefas, mesmo quando sua morfologia é especialmente adaptada para alguma tarefa em específico e independentemente de sua idade. Assim, a despeito do polietismo temporal e do polimorfismo, os indivíduos de uma colônia de insetos sociais podem se engajar em tarefas que não estão associadas a sua forma ou idade para atender à demandas de acordo com as necessidades da colônia. Se o número de indivíduos engajados em uma tarefa não é suficiente ou se esses indivíduos não estão atendendo tal demanda a contento, outros indivíduos podem se engajar nesta tarefa.

Propõe-se condicionar a atualização dos limiares internos ao sucesso do agente em desempenhar uma tarefa. Assim, quanto mais eficiente é o agente na realização de uma tarefa, de acordo com sua competência, mais especializado nesta tarefa o agente será. A influência do polietismo temporal nesta especialização é importante para garantir que o sistema não gere agentes super-especializados que não atendam a novas tarefas.

4 Resultados Preliminares

Uma versão preliminar da abordagem em questão foi previamente proposta em [16,9]. Nesta versão, algumas idéias básicas da abordagem foram consideradas mas de forma ainda muito limitada. Alguns resultados obtidos com essa versão preliminar em um cenário de escalonamento de produção, mais especificamente o *Machine Sequencing Problem*, foram publicados em [7].

A abordagem proposta já está sendo experimentada em uma versão estendida do GAP (denominada E-GAP), onde os primeiros resultados foram publicados em [8]. Neste artigo foi proposto o Swarm-GAP, algoritmo que trata o E-GAP de maneira aproximada e distribuída. Pretende-se que o Swarm-GAP seja um algoritmo simples e eficiente.

Os resultados dos experimentos realizados mostraram que a decisão probabilística, baseada nos modelos teóricos já mencionados, permite aos agentes tomarem suas decisões de maneira razoavelmente coordenada. O Swarm-GAP teve um bom desempenho, na média, 20% pior que o obtido através de uma abordagem gulosa centralizada. A figura 1 mostra os resultados do Swarm-GAP comparados com uma abordagem gulosa, onde a qualidade da solução é determinada pela recompensa obtida (*reward*) e varia de acordo com a quantidade de agentes envolvidos (*number of agents*) na alocação de 2000 tarefas.

Pode-se comparar, ainda que de forma superficial, o desempenho do Swarm-GAP com relação ao LA-DCOP. Os experimentos realizados utilizaram o mesmo cenário, com os mesmos parâmetros de configuração. Um gráfico semelhante ao da figura 1 porém com os resultados do LA-DCOP, inclusive na mesma escala, pode ser encontrado em [19].

Atualmente estão sendo realizados experimentos neste cenário para determinar as características da organização emergente, analisando o comportamento dos agentes quanto a sua especialização. Concomitantemente, estão sendo implementados em uma ambiente de simulação mais completo (Robocup Rescue) o Swarm-GAP e o LA-DCOP para que uma comparação mais detalhada entre o desempenho dos dois algoritmos possa ser realizada. Pretende-se ainda experimentar falhas na simulação no que tange ao canais de comunicação entre os agentes, a percepção errada das tarefas e o conhecimento incompleto do cenário.

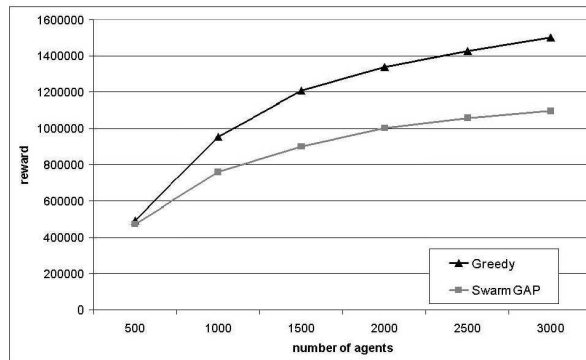


Figura 1. Comparação da qualidade do Swarm-GAP com relação a uma estratégia gulosa centralizada

5 Conclusões Preliminares e Atividades Futuras

No problema mencionado na seção anterior, os agentes se adaptaram bem para completar as tarefas, confirmando a idéia de que os sistemas multiagentes podem se auto-organizar como os insetos sociais, obtendo o mesmo sucesso que estes quando atuando cooperativamente para a resolução de problemas distribuídos.

Os problemas de pesquisa operacional mencionados estão servindo como cenários para a experimentação da abordagem. Tais problemas se complementam para cobrir o escopo de cenários em que a abordagem proposta pode atuar, permitindo que seu desempenho seja analisado detalhadamente e comparado com outras abordagens. Pretende-se mostrar que o paradigma dos insetos sociais pode ser utilizado para coordenar sistemas multiagentes quando atuando em ambientes dinâmicos e de larga escala.

Pretende-se ainda realizar as seguintes atividades: Comparar diretamente os resultados obtidos no cenário de E-GAP com os resultados apresentados em [19], como mencionado na seção anterior; Experimentar a abordagem proposta no cenário de RCPSP, analisando e comparando os resultados obtidos; Experimentar a abordagem proposta em uma combinação dos cenários anteriores para validá-la; e Estudar as características das organizações de agentes obtidas nos cenários experimentados.

Referências

1. E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz. Inspiration for optimization from social insect behaviour. *Nature*, pages 39–42, July 2000.
2. M. Campos, E. Bonabeau, G. Theraulaz, and J. Deneubourg. Dynamic scheduling and division of labor in social insects. In *Adaptive Behavior*, volume 8–2, pages 83–96, 2001.
3. V. Ciciello and S. Smith. Improved routing wasps for distributed factory control. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 8(3):237–266, May 2004.
4. K. S. Decker and V. R. Lesser. Quantitative modeling of complex computational task environments. In *Proceedings of the 12th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, pages 67–82, Hidden Valley, Pennsylvania, 1993.
5. P. R. Ferreira Jr. Estrutura organizacional emergente em sistemas multiagentes. Technical report, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Janeiro 2006. Proposta de Tese (<http://www.inf.ufrgs.br/maslab/pergamus/pubs/propostaFerreira.pdf.zip>).
6. P. R. Ferreira Jr. and A. L. C. Bazzan. Distributed meeting schedule through cooperative mediation: analysing optapo's performance in a complex scenario. In A. Meisels, editor, *Proceedings of the Sixth International Workshop on Distributed Constraint Reasoning (DCR2005) - Nineteenth International Conference on Artificial Intelligence (IJCAI2005)*, pages 101–113, July 2005.
7. P. R. Ferreira Jr. and A. L. C. Bazzan. Self-organization of agents to solve machine sequencing problems. In L. Panait, S. Sen, and E. Alonso, editors, *Workshop on Adaptation and Learning in Autonomous Agents and Multiagent Systems (ALAA-MAS 2006) - 5th International Joint Conference on Autonomous Agents And Multiagent Systems (AAMAS 2006)*, pages 70–75, May 2006.
8. P. R. Ferreira Jr. and A. L. C. Bazzan. Swarm-gap: A swarm based approximation algorithm for E-GAP. In N. R. Jennings, M. Tambe, T. Ishida, and S. D. Ramchurn, editors, *First International Workshop on Agent Technology for Disaster Management (ATDM 2006) - 5th International Joint Conference on Autonomous Agents And Multiagent Systems (AAMAS 2006)*, pages 49–55, May 2006.
9. P. R. Ferreira Jr., D. Oliveira, and A. C. Bazzan. A swarm based approach to adapt the structural dimension of agents' organizations. *Journal of Brazilian Computer Society - JBCS - Special Issue on Agents Organizations*, 11(1):63–73, July 2005.

10. B. Horling, B. Benyo, and V. Lesser. Using self-diagnosis to adapt organizational structures. In *Proceedings of the 5th International Conference on Autonomous Agents*, pages 529–536, Montreal, June 2001. New York, ACM Press.
11. R. T. Maheswaran, M. Tambe, E. Bowring, J. P. Pearce, and P. Varakantham. Taking DCOP to the real world: Efficient complete solutions for distributed multi-event scheduling. In *Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, volume 1, pages 310–317, Washington, DC, USA, July 2004. IEEE Computer Society.
12. R. Mailler and V. Lesser. Solving distributed constraint optimization problems using cooperative mediation. In *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 3.*, pages 438–445, New York, 2004. New York, IEEE Computer Society.
13. D. Merkle, M. Middendorf, and H. Schmeck. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(4):333–146, 2002.
14. P. J. Modi, W.-M. Shen, M. Tambe, and M. Yokoo. An asynchronous complete method for distributed constraint optimization. In *Second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 161–168, New York, NY, USA, 2003. ACM Press.
15. D. Oliveira, A. L. C. Bazzan, and V. Lesser. Using cooperative mediation to coordinate traffic lights: a case study. In *Proceedings of the 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems (AAMAS)*, pages 463–470. New York, IEEE Computer Society, July 2005.
16. D. Oliveira, P. R. Ferreira Jr., and A. L. C. Bazzan. A swarm based approach for task allocation in dynamic agents organizations. In *Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems, AAMAS*, volume 3, pages 1252–1253, New York, USA, July 2004. New York, IEEE Computer Society.
17. A. Petcu and B. Faltings. A scalable method for multiagent constraint optimization. In *Nineteenth International Conference on Artificial Intelligence*, Edinburgh, Scotland, Aug 2005.
18. G. E. Robison. Regulation of division of labor in insect societies. *Annual Review of Entomology*, 37:637–665, 1992.
19. P. Scerri, A. Farinelli, S. Okamoto, and M. Tambe. Allocating tasks in extreme teams. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 727–734, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.
20. O. Shehory, K. Sycara, P. Chalasani, and S. Jha. Agent cloning: an approach to agent mobility and resource allocation. *IEEE Communications Magazine*, 36(7):58–67, 1998.
21. Y. So and E. Durfee. An organizational self-design model for organizational change. In *Workshop on AI and Theories of Groups and Organizations: Conceptual and Empirical Research*, pages 8–15, july 1993.
22. F. Tarrant and D. Bridge. When ants attack: Comparing ant algorithms for constraint problems. In L. McGinty and B. Crean, editors, *Procs. of the Fifteenth Irish Conference on Artificial Intelligence and Cognitive Science*, pages 167–176, 2004.