

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

DENISE DE OLIVEIRA
LICURGO BENEMANN DE ALMEIDA
PAULO ROBERTO FERREIRA JR.

**Estudo de insetos sociais e sua aplicação
para organização de Sistemas Multiagentes**

Relatório de Pesquisa
RP-340

Prof^ª. Dra. Ana Lucia Cetertich Bazzan
Orientador

Porto Alegre, agosto de 2003

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	3
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABELAS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO	8
2 INSETOS SOCIAIS	10
2.1 Características dos insetos sociais	10
2.2 Evolução dos insetos sociais	12
2.3 Organização das sociedades de insetos	12
2.3.1 Especialização das castas operárias	13
2.3.2 Mecanismos de regulação da divisão de trabalho	14
2.3.3 Comunicação	16
2.4 Modelos Teóricos	16
3 APLICAÇÕES	20
3.1 Problema de sincronização de semáforos	20
3.1.1 Descrição do problema	20
3.1.2 Polimorfismo	20
3.1.3 Tendências	20
3.1.4 Próximo Passo	22
3.2 Problema do Escalonamento em TÆMS	23
3.2.1 TÆMS	23
3.2.2 Escalonamento	24
3.2.3 Próximo Passo	29
4 CONCLUSÃO	30
REFERÊNCIAS	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DTC	<i>Design-to-Criteria</i>
JH	<i>Juvenile Hormone</i>
QAF	<i>Quality Accumulation Function</i>
TG	<i>Task Group</i>
TS	<i>Task Structure</i>
TSP	<i>Travel Salesman Problem</i>
SMA	Sistemas Multiagentes

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1:	Decrescimento linear	22
Figura 3.2:	Decrescimento exponencial	23
Figura 3.3:	Exemplo de um <i>task structure</i> em TÆMS	23
Figura 3.4:	Exemplo de um <i>task structure</i> com três métodos	24
Figura 3.5:	Exemplo de um <i>task structure</i> tratada pela abordagem apresentada . .	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Diferentes níveis de organização social encontrados entre os insetos. . .	11
Tabela 2.2:	Diferentes níveis de organização subsocial encontrados entre os insetos.	11
Tabela 3.1:	Funções que determinam o cálculo da qualidade da tarefa - QAF. . . .	25
Tabela 3.2:	Relacionamentos entre tarefas e/ou métodos.	26

RESUMO

Um dos principais fatores responsável pelo sucesso ecológico dos insetos sociais é a sua capacidade de alocar dinamicamente as tarefas entre os membros da colônia. Essa divisão de trabalho adaptativa é uma abordagem interessante que pode ser aplicada aos Sistemas Multiagentes (SMA).

Este trabalho traz um estudo sobre as características das colônias de insetos sociais e considera os aspectos mais significativos da sua organização. Além disso, aborda um modelo teórico genérico para a divisão de trabalho nas colônias. Por fim, são apresentados dois estudos de problemas em SMA que foram tratados por uma abordagem baseada na organização do insetos sociais.

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Insetos Sociais, Sistemas Multiagentes, TÆMS, Controle de Semáforos.

A study about Social Insects and their application in Multi-Agents System organization

ABSTRACT

Dynamic task division between individuals in a insect colony is one of the main factors of insect societies ecological success. This adaptative division of labor is an interesting approach to Multi-Agents Systems organization (MAS).

This work presents a study about social insects and the most important aspects of their organization. A study about generic theoretical models for division of labor is also presented. Finally, two case studies are presented where organization problems in MAS are addressed by social insects approach.

Keywords: Artificial Intelligence, Social Insects, Multi-Agents System, TÆMS, Traffic Lights Control.

1 INTRODUÇÃO

A despeito da simplicidade dos indivíduos, as colônias de insetos são bem sucedidas em realizar objetivos relativamente complexos como construir e manter o ninho, reproduzir e criar a prole, alimentar todos os membros da colônia, entre outros, sem nenhum tipo de coordenação explícita. Ao contrário do que pode parecer a figura da rainha não tem nenhum papel centralizador na organização da colônia.

Um dos principais fatores responsável pelo sucesso ecológico dos insetos sociais é a sua capacidade de alocar dinamicamente as tarefas entre os membros da colônia. Essa divisão de trabalho adaptativa é uma abordagem interessante que pode ser aplicada aos Sistemas Multiagentes (SMA).

Por se tratarem de entidades biológicas dinâmicas, as colônias sofrem mudanças constantes durante sua vida em relação ao seu tamanho, a quantidade de comida disponível, a época do ano, a ação de predadores e a condições do clima.

As colônias respondem a estas mudanças de condições externas e internas ajustando a quantidade de operários envolvidos em cada tarefa. Esta flexibilidade no comportamento dos operários contribui decisivamente para o sucesso reprodutivo da colônia, permitindo o crescimento, desenvolvimento e o nascimento de novas gerações reprodutivas independente da variação nas condições da colônia.

A pesquisa relacionada aos mecanismos que regulam a divisão de trabalho nas sociedades de insetos tem reportado avanços no entendimento deste processo e modelos heurísticos foram propostos baseados em comportamento orientado a níveis de resposta a estímulos (ROBISON, 1992; GORDON, 1996; GORDON; PEREIRA, 2001; BONABEAU et al., 1997; THERAULAZ; BONABEAU; DENEUBOURG, 1998; ANDERSON; AL., 1999; SCHULZ; HUANG; ROBINSON, 1998).

O estudo do conhecimento obtido pelos pesquisadores da biologia teórica e entomologia sobre a organização dos insetos sociais, e mais especificamente sobre os modelos comportamentais por eles propostos, têm trazido avanços para a pesquisa em organização dos SMA (CAMPOS et al., 2001).

Muitas pesquisas na área de Sistemas Multiagentes já estão se valendo desse conhecimento para desenvolver novas abordagens para questões que permanecem em aberto (BONABEAU; DORIGO; THERAULAZ, 2000; BONABEAU; THERAULAZ; DORIGO, 1999; DORIGO; GAMBARDELLA, 1997; DORIGO; CARO; GAMBARDELLA, 1999; PARPINELLI; LOPES; FREITAS, 2001; PARUNAK; BRUECKNER, 2000). Tais abordagens não será discutidas neste trabalho, apenas o modelo teórico utilizado na construção de algumas delas será relacionado.

Na primeira parte deste trabalho será apresentado um estudo realizado sobre as características dos insetos sociais e os aspectos que envolvem sua organização, considerando também os modelos teóricos da organização das colônias. Na segunda parte serão discu-

tidos dois problemas que envolvem SMA e que foram tratados segundo uma abordagem baseada na organização dos insetos sociais.

2 INSETOS SOCIAIS

Os insetos sociais possuem uma das estratégias de sobrevivência mais bem sucedidas da natureza, por isso, há uma imensa quantidade e variedade destes. Segundo (WILSON, 2000), existem mais espécies de formigas em 1 quilômetro quadrado de uma floresta brasileira do que todas as espécies de primatas existentes no mundo, e uma simples colônia de formigas possui mais habitantes do que todos os elefantes e leões da África somados.

A organização social desses insetos se apresenta aos biólogos como um tópico instigante de estudo e comparação. Entretanto, a riqueza e diversidade dos insetos sociais são tão grandes que, apesar do grande estudo sobre estas criaturas, ainda há muitas espécies pouco investigadas ou completamente desconhecidas. Existem cerca de 8.000 espécies de formigas descritas atualmente, mas acredita-se que ainda haja mais 4.000 espécies desconhecidas. Entretanto, destas 12.000 espécies de formigas, apenas 1% foi estudada com algum detalhamento por pesquisadores.

Mesmo assim já existiam em 1973 aproximadamente 35.000 publicações sobre formigas, 3.000 publicações sobre vespas, 12.000 sobre cupins e 50.000 sobre abelhas. Todos esses números indicam que ainda há muito que explorar sobre o assunto. Toda a pesquisa realizada até agora fez com que os entomologistas definissem algumas questões fundamentais sobre o assunto, sendo elas:

- Quais são os passos evolucionários que levam a formas mais elevadas de organização social?
- Quais são os principais motivadores da evolução social?
- Quais são as qualidades únicas da vida social nos insetos? Isto é, quais são as características que diferenciam os insetos sociais dos demais insetos?
- Como as sociedades de insetos são organizadas?

2.1 Características dos insetos sociais

Para que um inseto seja considerado social, pelos entomologistas, ele deve possuir três qualidades fundamentais:

- Indivíduos da mesma espécie cooperam nos cuidados dos mais jovens;
- Divisão reprodutiva do trabalho, com indivíduos mais ou menos estéreis;
- Sobreposição de pelo menos duas gerações no trabalho da colônia.

Tabela 2.1: Diferentes níveis de organização social encontrados entre os insetos.

Nível da sociedade	Cuidado cooperativo da prole	Castas reprodutivas	Sobreposição de gerações
Solitário	-	-	-
Comunal	-	-	-
Quasisocial	+	-	-
Semi-social	+	+	-
Social	+	+	+

Tabela 2.2: Diferentes níveis de organização subsocial encontrados entre os insetos.

Nível da sociedade	Cuidado cooperativo da prole	Castas reprodutivas	Sobreposição de gerações
Solitário	-	-	-
Sub-social Primitivo	-	-	-
Subsocial Intermediário I	-	-	+
Subsocial Intermediário II	+	-	+
Social	+	+	+

Qualquer inseto que não possua as três características poderá ser classificado como pré-social. O termo pré-social é usado para caracterizar qualquer espécie com um comportamento social maior que apenas o sexual, mas ainda assim, menor que o dos insetos sociais. A tabela 2.1 apresenta uma série de estágios intermediários dentro do espectro definido pelas características dos insetos sociais em uma seqüência parasocial, que avalia o grau de assistência mútua entre adultos de uma mesma geração. Os solitários não apresentam nenhuma das características fundamentais dos insetos sociais; os comunais se juntam para criar um ninho, mas cada fêmea cria sua prole separadamente; no caso dos quasisociais a prole é criada junto, mas as fêmeas ainda geram seus próprios filhotes; nos semi-sociais já existem castas que geram a prole enquanto outros trabalham.

Uma seqüência alternativa é a que considera o nível subsocial dos insetos, que avalia o grau de associação entre a mãe e a prole, conforme mostra a tabela 2.2. Alguns pesquisadores acreditam que esta rota tenha sido seguida por formigas, cupins, vespas e alguns poucos grupos de abelhas.

Contudo, é difícil encontrar insetos nos níveis sociais intermediários, pois normalmente essas sociedades primitivas são superadas por seus primos mais evoluídos socialmente. (WILSON, 2000) afirma que apenas as abelhas e vespas possuem espécies em níveis pré-sociais de organização que competem com espécies sociais.

Um grupo de insetos sociais pode ser imaginado como um organismo difuso. E podem se apresentar em diversos tamanhos diferentes, por exemplo, uma típica colônia de *Tetramorium caespitum* tem cerca de 10.000 formigas, 6,5 gramas e controla 40m² de solo enquanto uma colônia de *Dorylus wilverthi* é formada por 22.000.000 de formigas, pesa mais de 20 kg e controla até 50.000 m² de extensão.

2.2 Evolução dos insetos sociais

Wilson afirma, (WILSON, 2000), que quase a totalidade das espécies de insetos sociais pertencem à ordem das *Himenópteras*. Isso se deve principalmente a algumas características inerentes que contribuíram muito para a vida em sociedade, como o formato da mandíbula, particularmente propício para a manipulação de objetos, ou a relação estreita entre mãe e prole. Estas e outras características biológicas são pré-requisitos para a evolução dos insetos sociais. No entanto, elas são compartilhadas por diversos grupos de artrópodes, como aranhas e besouros, mas nenhum deles atingiu um nível tão elevado de sociabilidade.

A chave para o desenvolvimento social das *Himenópteras* está no seu modo de determinação sexual conhecido como haplodiplóide, onde ovos não fertilizados tipicamente se desenvolvem como machos e os fertilizados se desenvolvem como fêmeas. Poucos grupos de artrópodes além das *Himenópteras* possuem essa forma de determinação sexual.

Baseado nestes fatos Hamilton (WILSON, 2000) desenvolveu uma teoria genética para o comportamento dos insetos sociais. Trabalhando com tradicionais axiomas de populações genéticas, ele primeiro deduziu o princípio de que o comportamento altruísta de um indivíduo para com um grupo indivíduos está diretamente ligado ao seu coeficiente de relacionamento (r) com estes indivíduos. O coeficiente de relacionamento é equivalente à fração média de genes compartilhada com indivíduos com algum parentesco. Desta forma, o r entre irmãos é $1/2$, entre meio irmãos é $1/4$, entre primos é $1/8$ e assim por diante. Por exemplo, se um indivíduo sacrifica sua vida ou se torna estéril por algum motivo, para que este motivo seja corrigido na evolução ele deve resultar numa taxa de reprodução de irmãos maior que o dobro, ou maior que o quádruplo para meios irmãos e assim por diante.

Hamilton concluiu através de cálculos que a relação genética entre a mãe e sua prole é de $1/2$ e a entre as irmãs é de $3/4$, devido ao modo de determinação sexual das *Himenópteras*, pois a formiga fêmea recebe todos os genes de seu pai (posto que seus pais são homo-zigoto) e metade dos genes da mãe. Portanto, é geneticamente mais vantajoso a cada formiga que sua mãe (no caso a rainha) tenha filhos do que cada uma delas individualmente.

A teoria de Hamilton se aplica bem para himenópteras, como formigas, abelhas e vespas. No entanto, os cupims, que pertencem ao mesmo grupo que as baratas, não possuem o modo haplodiplóide de determinação sexual, mas se igualaram às himenópteras em termos de evolução social. Uma característica importante dos cupims é de serem os únicos insetos comedores de madeira a depender de uma relação de simbiose com um protozoário intestinal. Esses protozoários são passados dos velhos para os jovens através de alimentação anal, um comportamento que exige alguma organização social. Desta forma, os cupims iniciaram sua organização social devido a necessidade de alimentação e troca de protozoários entre indivíduos e somente depois passaram a cuidar da prole cooperativamente.

2.3 Organização das sociedades de insetos

De acordo com (WILSON, 2000), assim que uma espécie chega até o nível “social” a organização da colônia pode avançar em dois sentidos: no aumento do grau de especialização das castas operárias, de forma física e/ou temporal – o polimorfismo e o polietismo temporal, respectivamente – e no alargamento do código de comunicação por

onde os membros da colônia coordenam suas atividades. Com relação ao grau de especialização das classes operárias, vale comentar que [Robinson1992] acrescenta ainda uma terceira característica, as diferenças individuais na especialização das classes.

2.3.1 Especialização das castas operárias

Como já dito no parágrafo anterior, as castas podem ser de dois tipos: físicas e temporais. As formigas fêmeas se dividem em três castas: operárias, soldados e rainha. Já os machos não se dividem em castas, mas podem, num sentido mais abstrato, serem considerados como uma quarta casta. Em poucas espécies existe uma clara definição das três castas de fêmeas em todas as espécies de formigas. Em muitos casos não existem formigas soldado, por isso, na maioria das espécies, as mudanças fisiológicas e de comportamento mudam com a idade do indivíduo. Essas mudanças representam saltos de uma casta temporal para outra. De acordo com Gordon (GORDON, 1996), operárias jovens primeiro desempenham tarefas dentro da toca, como armazenar alimento e cuidar da prole, enquanto operárias mais velhas desempenham tarefas externas, como forragear. As formigas que cuidam da manutenção do formigueiro estão em transição entre o interior e o exterior, porque esse trabalho é feito em parte dentro do formigueiro, quando as formigas amontoam areia proveniente de túneis escavados, e em parte no exterior, quando a areia é levada para fora da boca do formigueiro. Até as larvas podem ser consideradas uma sub-casta temporal, em muitas espécies as larvas possuem uma glândula capaz de liberar um material líquido rico em nutrientes que é muito importante na “economia” da colônia.

Os cupims apresentam uma organização similar às formigas, mas as castas se apresentam em ambos os sexos. Um aspecto interessante dos cupims é que enquanto as larvas de formigas são praticamente inúteis, as dos cupims colaboram no trabalho da colônia. Os cupims também possuem “reprodutores suplementares” e não apenas a rainha e o rei. Os reprodutores suplementares tornam as colônias praticamente imortais, pois se o reprodutor principal é removido, os outros podem substituí-lo.

Com abelhas e vespas, a divisão de castas é definida totalmente pelo polietismo temporal. Isto ocorre, segundo (WILSON, 2000) por que abelhas e vespas tomaram um caminho evolucionário diferente, por isso não há entre vespas e abelhas, diferenças físicas. Exceção para a rainha e as operárias. A principal diferença morfológica existente nessas espécies é o tamanho das operárias. Operárias grandes tendem a forragear enquanto as pequenas tendem a trabalhar dentro da colméia. Dentro dessas espécies, a rainha pode ter um comportamento passivo (máquina de botar ovos) ou um comportamento agressivo com suas irmãs operárias.

De acordo com (ROBISON, 1992) o polietismo temporal das abelhas está relacionado com a taxa de *Juvenile Hormon*(JH) existente no sangue, portanto, este hormônio está envolvido na regulação do desenvolvimento comportamental de adultos trabalhadores em colméias de abelhas. Os níveis de JH no sangue tipicamente aumentam com o passar do tempo; eles são baixos em abelhas que trabalham dentro da colméia e alto em abelhas encarregadas em forragear ou engajadas em defender a colônia. Além disso, forrageadoras precoces possuem um aumento precoce nos seus níveis de JH, abelhas “enfermeiras”, possuem um nível baixo e abelhas que passaram de forrageadoras a enfermeiras apresentaram uma redução no seu JH.

(SCHULZ; HUANG; ROBINSON, 1998) relata experiências em que um grupo de forrageadoras transportado para uma colônia acabava por inibir o desenvolvimento de novas abelhas para esta tarefa, e se o contrário ocorresse (fossem eliminadas abelhas for-

rageadoras, simulando a atividade de predadores), abelhas novas acabavam por se desenvolver mais depressa que o normal. A natureza desses processos inibitórios, segundo os próprios autores do artigo, ainda é desconhecida. No entanto, os resultados obtidos reforçam a idéia de que o nível de JH no sangue está diretamente relacionado com a mudança de comportamento da abelha.

2.3.2 Mecanismos de regulação da divisão de trabalho

Como os insetos regulam a divisão de trabalho para adaptarem-se as mudanças no ambiente é uma questão que está sendo amplamente estudada. Modelos que descrevem os mecanismos que controlam o comportamento de cada indivíduo membro da colônia são os mais usualmente utilizados. Destes modelos, destacam-se, segundo (ROBISON, 1992) : modelo de divisão do trabalho baseada em diferenças de limiares de resposta, modelo de regulação hormonal na divisão do trabalho em colônias de abelhas e modelo baseado em diferenças genéticas.

2.3.2.1 *Modelo de divisão do trabalho baseado em diferenças de limiares de resposta*

Insetos altamente sociais vivem em colônias com um grande número de indivíduos e diversos estímulos diferentes podem ser associados às diferentes tarefas que podem ser executadas. Provavelmente, as atividades que os indivíduos executam durante um determinado momento devem estar ligadas à quantidade de estímulo associado a essa tarefa específica e a sensibilidade a este estímulo deve estar associada a casta específica a que o indivíduo pertence. Diferentes respostas a estímulo foram observadas em diferentes castas físicas em formigas e cupims. Diferenças nos limiares de resposta de acordo com a idade foram observadas em abelhas, as abelhas mais velhas tendem a ter um comportamento mais defensivo do que trabalhadoras mais jovens. A probabilidade de um indivíduo executar uma tarefa está relacionada com dois fatores:

- a) magnitude do estímulo associado à tarefa;
- b) limiar de execução da tarefa pelo indivíduo.

A flexibilidade na execução de tarefas é uma consequência dos fatores ambientais atuando no indivíduo. Os limiares de resposta a uma determinada tarefa podem mudar de acordo com o tempo que o indivíduo executa a tarefa ou de acordo com as mudanças no ambiente. Em abelhas, o JH tem sido considerado um dos fatores para as mudanças nos limiares de execução de tarefas específicas.

2.3.2.2 *Regulação hormonal na divisão do trabalho em colônias de abelhas*

JH são sintetizados e liberados pelas *Corpora allata* (CA) e pode ser considerado um dos fatores principais que determinam o comportamento dos insetos. JH III é o homólogo ao JH encontrado em abelhas operárias e a sua titulação aumenta na medida que a abelha envelhece.

Controle hormonal do polietismo temporal O JH está ligado ao polietismo temporal em abelhas, já que o sua baixa titulação está associada a tarefas dentro da colméia e quanto maior a sua titulação maior chance do indivíduo executar tarefas fora da colméia. Forrageamento precóce foi induzido em abelhas administrando-se oralmente esse hormônio e hormônios similares ao JH. A causa aparente da troca de atividade é a degeneração das glândulas hipofaríngeas, que estão naturalmente associadas as mudanças no desenvolvimento comportamental da CA.

Controle hormonal da plasticidade no polietismo temporal Os estímulos ambientais sobre a colônia estão associados as mudanças nas densidades demográficas de indivíduos da mesma atividade dentro da colônia e modulam o aumento normal do JH, isso resulta na plasticidade do polietismo temporal. Estudos mostram que se há falta de forrageadoras, a titulação do JH aumenta e leva indivíduos mais jovens a executarem tarefas externas, como forragear, que estão normalmente associadas a indivíduos mais velhos. Similarmente, a falta de indivíduos jovens para a execução de tarefas internas faz com que o JH aumente de modo mais lento, deixando os indivíduos jovens durante um tempo mais longo que o normal em suas tarefas internas.

A modulação que o ambiente provoca nas titulações do JH fornece o mecanismo de regulação de recursos de trabalho dentro da colônia para adaptar-se às mudanças das necessidades da colônia. Trabalhos sugerem que o JH pode ter papel similar em outras espécies de insetos sociais, principalmente onde há forte polietismo temporal.

2.3.2.3 *Modelo baseado em diferenças genéticas*

Para explicar a evolução comportamental e física entre operárias não reprodutivas, o modelo de seleção a nível de colônia necessita que as seguintes características estejam presentes:

- a) variação no comportamento da operária dentro da colônia resultante do seu próprio genótipo e/ou do genótipo da rainha;
- b) variação no sucesso reprodutivo entre colônias devido a diferentes distribuições das características herdadas pelas operárias;
- c) mudanças na distribuição das características herdadas pelas operárias como uma consequência da seleção a nível de colônia.

Embora as diferenças comportamentais entre os indivíduos de uma mesma colônia sejam na maioria das vezes vistas como consequências dos estímulos hormonais e do ambiente, diversos estudos sugerem que o comportamento também está relacionado as variabilidades genéticas entre os indivíduos.

Variabilidade genética e taxa de desenvolvimento comportamental Cada colônia de abelhas tem diversas sub-famílias, já que a mesma rainha tem seus ovos fertilizados por zangões diferentes. Experimentos mostram que cada sub-família de chamadas “super-irmãs” (abelhas resultantes de ovos fecundados pelo mesmo zangão) apresentaram tendências iguais a execução das mesmas tarefas e que indivíduos com idade similar mas de sub-famílias diferentes desempenham tarefas diferentes de acordo com o seu genótipo.

Estudos comprovam os fatores genéticos sobre a divisão do trabalho Estudos genéticos foram utilizados para encontrar diferentes formas de divisão do trabalho, até então desconhecidas. O estudo com abelhas e formigas mostram as diferenças nas tendências em forragear, patrulhar e na manutenção do ninho em indivíduos com a mesma idade, mas como traços genéticos diferentes. A variabilidade genética pode ser um dos fatores chave para a divisão do trabalho não apenas em abelhas, mas como em outros insetos sociais, como foi observado nas formigas.

Variabilidade genética e integração a nível de colônia do comportamento individual

A variabilidade genética também está relacionada as diferenças nos limiares de execução de certas tarefas e sensibilidade a estímulos externos. Indivíduos altamente especializados geneticamente a execução de uma tarefa, tendem a ter limiares muito altos para a execução de outras tarefas, tornando-se praticamente fixos a alguma tarefa em particular.

2.3.3 Comunicação

As formas de comunicação entre os insetos sociais são variadas, inclui pequenas pancadas, sons, toques de antenas, liberação de substâncias químicas entre muitos outros. Devido a grande variedade de formas de comunicação torna-se muito complicado estudar todos os detalhes das interações entre os indivíduos de uma colônia, por isso, a comunicação dos insetos sociais respeita três generalizações:

A maior parte da comunicação é química, através de feromônios. O conhecimento de sinais visuais e esparso é muito simples. Em alguns grupos, particularmente os cupims e formigas subterrâneas, esta forma de comunicação não possui nenhum papel no dia-a-dia da colônia. Os sons também são pouco identificáveis pelos insetos sociais e não são definidos em nenhum sistema de comunicação importante. Os toques são amplamente utilizados nas colônias de insetos, mas também não foi identificada nenhuma espécie de código capaz de carregar grandes quantidades de informação. Por outro lado, os sinais químicos se apresentam em praticamente todas as categorias de comunicação, principalmente através de feromônios, capazes de estimular ou inibir diversas características fisiológicas nos membros de uma colônia.

Qualquer forma de comunicação sempre encontra paralelo em espécies pré-sociais.

Por exemplo, as hierarquias de dominância que possuem papel chave nas sociedades de abelhas e vespas possuem um precedente no comportamento territorial de muitas espécies solitárias e substâncias de alarme são em muitos casos simples modificações de secreções defensivas.

O comportamento complexo da colônia emerge da integração de simples padrões individuais através da comunicação. (WILSON, 2000) apresenta nove categorias de resposta nos insetos sociais. São elas:

alarme; atração simples ou múltipla; recrutamento (para um novo ponto de coleta de comida ou um ponto específico do ninho); assistência; *trophallaxis* (troca de líquido oral e anal); troca de partículas de comida; efeitos de grupo através do estímulo ou inibição de uma atividade específica; reconhecimento de membros da mesma colônia ou membros de castas diferentes; determinação de casta, por inibição ou estimulação.

2.4 Modelos Teóricos

Baseado nos estudos e observações realizadas pelos entomologistas a respeito das colônias de insetos sociais, foram concebidos modelos teóricos e matemáticos sobre sua organização.

Tais modelos, construídos em sua maioria com o objetivo de simular o funcionamento das colônias para, em paralelo com o estudo de campo e o trabalho empírico, tentar compreender a organização dos insetos reais.

Em (GORDON, 2002), capítulo 8, são apresentados alguns modelos da linha comentada acima. Uma característica comum a estes modelos é que, em sua maioria, estes consideram a alocação de tarefas orientada pelo padrão de iterações que cada indivíduo experimenta.

Os modelos apresentados até então produzem resultados que se assemelham ao comportamento observado de colônias reais, mas não demonstram o modo como os insetos operam. Assim, estes modelos ainda não puderam ser utilizados para o objetivo a que foram concebidos, pois não se sabe se os detalhes empíricos modelados são suficientes.

Um dos modelos apresentados mais recentemente em (BONABEAU; THRAULAZ; DORIGO, 1999)¹, capítulo 3, já por pesquisadores da computação, pretende ser um modelo genérico que cobre todos os aspectos que envolvem a divisão do trabalho nas colônias.

Não se conhece referência na literatura da aplicação do modelo citado acima para simular colônias reais. Tal modelo tem sido aplicado diretamente em aplicações de Inteligência Artificial.

Neste modelo cada indivíduo da colônia tem um limiar de resposta a estímulos para realizar determinada tarefa. Um indivíduo passa a executar uma tarefa quando o estímulo para executar esta tarefa ultrapassa seu limiar associado.

Seja s a intensidade de um estímulo associado a uma atividade em particular, onde s pode ser o número de encontros com outros indivíduos, uma concentração química ou qualquer outro fator quantitativo que possa ser sentido por um indivíduo. O limiar de resposta θ , expresso em unidades de intensidade de estímulo, é uma variável interna que determina a tendência de um indivíduo, respondendo ao estímulo s , realizar a tarefa associada.

Segue uma possível função para a probabilidade de um indivíduo atender a resposta a um estímulo. Outras funções podem levar ao mesmo padrão de resultados esperado pelo modelo. Qualquer número inteiro maior que 1 pode ser usado com expoente de s , que determina o índice de crescimento de θ , porém o autor utiliza em todos seus exemplos $n = 2$.

$$T_{\theta}(s) = \frac{s^2}{s^2 + \theta^2} \quad (2.1)$$

Desta forma, se o valor de θ for muito pequeno a probabilidade do indivíduo atender ao estímulo tende a 0 e se o valor de θ for muito grande tal probabilidade irá tender a 1. Com $s = \theta$ a probabilidade é exatamente 1/2.

Segue outro exemplo de função para a probabilidade de um indivíduo atender a resposta a um estímulo.

$$T_{\theta}(s) = 1 - e^{-\frac{s}{\theta}} \quad (2.2)$$

O comportamento das funções apresentadas acima é equivalente, variando apenas a curva de resposta aos estímulos.

Considerando o estímulo associado a tarefa de recolher um objeto como o número de encontros do indivíduo com objetos daquele tipo, como grãos que precisam ser carregados para o ninho ou cadáveres para o cemitério. Se, a cada encontro com um novo item, o indivíduo tiver uma probabilidade ρ de recolher aquele objeto, então a probabilidade do indivíduo não responder aos primeiros N encontros é $(1 - \rho)^N$.

¹Em (THRAULAZ; BONABEAU; DENEUBOURG, 1998) são apresentados outros modelos nesta linha e são discutidas as diferenças entre tais modelos e o modelo do autor.

Com isso, a probabilidade $P(N)$ de um indivíduo responder a N encontros é $P(N) = 1 - (1 - \rho)^N = 1 - e^{N \ln(1 - \rho)}$, que é a equação 2.2 com $s = N$ e $\theta = \frac{-1}{\ln(1 - \rho)}$.

O limiar de resposta a um estímulo, valor de θ nas funções acima, pode variar para cada indivíduo para refletir o polimorfismo e o polietismo temporal dos insetos sociais. Indivíduos fisicamente diferentes ou de diferentes idades podem ter tendências diferentes a executar determinadas tarefas.

Conforme o número de indivíduos i que realizam a tarefa j aumenta, menor será o limiar θ_{ij} deste indivíduo em relação a esta tarefa. Em um modelo incremental em relação ao tempo, um indivíduo i fica mais sensível ao estímulo associado a tarefa j , que está executando durante o intervalo Δt , uma quantidade $\xi \Delta t$. Da mesma forma, um indivíduo i fica menos sensível a um estímulo associada a tarefa j , durante o intervalo Δt que não ficou envolvido com a tarefa j , uma quantidade $\varphi \Delta t$. Onde ξ e φ são coeficientes que determinam o aprendizado e o esquecimento dos indivíduos.

Um indivíduo i realiza uma tarefa j durante o intervalo de tempo $x_{ij} \Delta t$, e realiza outras tarefas em $(1 - x_{ij}) \Delta t$. Em (BONABEAU; THRAULAZ; DORIGO, 1999), capítulo 3, o autor discute a análise a dinâmica de x_{ij} em detalhes para modelos com uma ou mais tarefas.

A alteração no limiar θ_{ij} em Δt é dada pela seguinte equação:

$$\theta_{ij} = \theta_{ij} - x_{ij} \xi \Delta t + (1 - x_{ij}) \varphi \Delta t \quad (2.3)$$

θ_{ij} limiar do indivíduo i em relação a tarefa j .

ξ coeficiente associado ao aprendizado.

φ coeficiente associado ao esquecimento.

Δt intervalo de tempo considerado.

O estímulo s associado a uma tarefa deve variar conforme sua execução é satisfatória ou não. Uma tarefa pode ser executada de forma ineficiente, seja por um ou mais indivíduos, o que deve aumentar seu estímulo associado para fazer com que outros indivíduos se engajem na sua execução.

A variação da intensidade de um estímulo associado a execução de uma tarefa, que reduz a intensidade do estímulo, e associado ao crescimento natural da demanda é dada pela seguinte equação.

$$s(t + 1) = s(t) + \delta - \frac{\alpha N_{act}}{N} \quad (2.4)$$

$s(t + 1)$ estímulo associado a tarefa no tempo $t + 1j$.

$s(t)$ estímulo associado a tarefa no tempo tj .

δ crescimento da intensidade em função do tempo.

α fator de escala associado a eficiência da realização da tarefa.

N_{act} número de indivíduos ativos.

N número de indivíduos que podem ser tornar ativos na colônia.

Todo indivíduo tem a mesma probabilidade fixa de deixar de executar uma tarefa e pode retomar sua execução imediatamente se o estímulo que este indivíduo tem para executar a tarefa que acabou de abandonar for superior ao seu limiar.

O modelo em questão será utilizado no próximo capítulo para a aplicação da abordagem dos insetos sociais em problemas de organização de SMA.

3 APLICAÇÕES

3.1 Problema de sincronização de semáforos

3.1.1 Descrição do problema

Sincronizar semáforos em uma via, para garantir um fluxo de veículos distribuído proporcionalmente nas vias que são controladas por estes semáforos, é um problema estudado pela área de SMA. Usualmente semáforos são representados por agentes que utilizam técnicas de coordenação para garantir seu sincronismo (BAZZAN, 1997).

Cada semáforo possui um conjunto de planos pré-definidos, incluindo planos para sincronização com semáforos adjacentes, denominados planos semafóricos. Um semáforo pode adotar diferentes planos durante um dia e existe um tempo de transição na troca entre planos que varia em relação a hora do dia. O seguinte conjunto de planos é um bom exemplo: prioriza o sentido norte/sul; prioriza o sentido leste/oeste; e não prioriza.

Na abordagem proposta um semáforo será representado por um indivíduo de uma colônia de insetos sociais, tendo as características que classificam este grupo de insetos. Os planos semafóricos são representados pelas diferentes tarefas que um inseto social é capaz de realizar.

A habilidade que os insetos sociais possuem de trocar de tarefa para melhor atender as necessidades da colônia serão modeladas a seguir com o objetivo de tratar do problema da sincronização de semáforos.

3.1.2 Polimorfismo

Alguns semáforos possuem tendências definidas em tempo de projeto a executar determinado plano semafórico. Estes semáforos, usualmente instalados em ruas e avenidas de movimento intenso, buscam por definição priorizar o tráfego de veículos em um determinado sentido. Outros semáforos tem a mesma tendência a executar qualquer um de seus planos, não priorizando nenhum sentido. Esta diferença na configuração inicial dos semáforos caracteriza seu *polimorfismo* e define diferentes tipos de semáforos.

Independente do polimorfismo, os semáforos precisam sincronizar seus planos semafóricos para atender as variações da intensidade do tráfego. A medida que o semáforo percebe tais variações sua tendência original se altera. Esta modificação da tendência original que se dá ao passar do tempo determina a sincronização de grupos de semáforos.

3.1.3 Tendências

A tendência de um semáforo, ou indivíduo, a executar uma plano semafórico, ou tarefa, depende da densidade hormonal de cada via e do tipo de semáforo que deve fazer a escolha em mudar de plano.

Os veículos que transitam pelas vias deixam rastros de feromônio, ou simplesmente hormônio, que são sensíveis aos semáforos. O feromônio depositado por um veículo se dissipa com o passar do tempo e sua intensidade indica o fluxo de veículos que está transitando em determinado sentido.

Pode-se considerar tal rastro de feromônio como um meio de comunicação primitivo entre os semáforos. O aumento da intensidade de feromônios em uma via pode indicar que um semáforo disposto em uma posição anterior, em relação ao fluxo, adotou um plano que favorece aquela direção daquela via.

Assim, a densidade hormonal δ_n aumenta na medida que passam veículos pela via n , eles liberam um rastro hormonal que se dissipa com o tempo. Enquanto os veículos estão parados na via, aguardando a abertura do semáforo, estão liberando hormônio. O estímulo baseado na média ponderada, que emula a dissipação do feromônio, terá valores altos para este caso pois a densidade hormonal é alta para os últimos instantes de tempo.

O estímulo s_j é a média ponderada das densidades hormonais instantâneas na direção j em $t - 1$ instantes de tempo consecutivos:

$$s_j = \frac{\sum_{i=0}^t \frac{1}{2^i} (\delta_{n_i})}{t - 1} \quad (3.1)$$

onde δ_{n_i} é a densidade hormonal da via n no instante de tempo i

Através do estímulo causado pela intensidade do feromônio o semáforo pode se interessar em trocar de plano. A diferença entre um semáforo interessar-se em trocar de tarefa e de realmente fazê-lo é definida por um limiar caracterizado pela variação da tendência que determinado tipo de semáforo possui de adotar um determinado plano.

A Equação (BONABEAU; THRAULAZ; DORIGO, 1999), define a função de tendência, ou probabilidade, $T_{\theta_{ij}}(s_j)$, do indivíduo do tipo i executar a tarefa j .

$$T_{\theta_{ij}}(s_j) = \frac{s_j^2}{s_j^2 + \theta_{ij}^2} \quad (3.2)$$

s_j estímulo associado a tarefa j .

θ_{ij} limiar de resposta do indivíduo do tipo i para a execução da tarefa j .

A medida que um indivíduo se considera mal sucedido, ou seja, a medida que o tráfego em uma via gera uma densidade hormonal alta, sua tendência a mudar de plano semaforico tende a aumentar. Uma vez que esta tendência se torne maior que o limiar naquele momento para a adoção daquele plano, o semáforo vai adotar um novo plano semaforico.

Quando o estímulo gerado pela intensidade de tráfego diminuir os semáforos tenderão a mudar para outro plano, o qual poderá ser inclusive o plano que não prioriza via alguma.

O θ_{ij} é o limiar do indivíduo do tipo i para executar a tarefa j , o qual varia em função ao tempo que o indivíduo i executa a tarefa j .

$$\theta_{ij} = \theta_{ij} - \xi \Delta t \quad (3.3)$$

onde ξ é o grau de sucesso, ou taxa de aprendizagem, do indivíduo e Δt é o intervalo de tempo discreto

O grau de sucesso (ξ) do indivíduo (no caso, o semáforo) é dado pela Equação 3.5, na qual quanto menor o desvio padrão das densidades (Equação 3.6, onde n é o número de

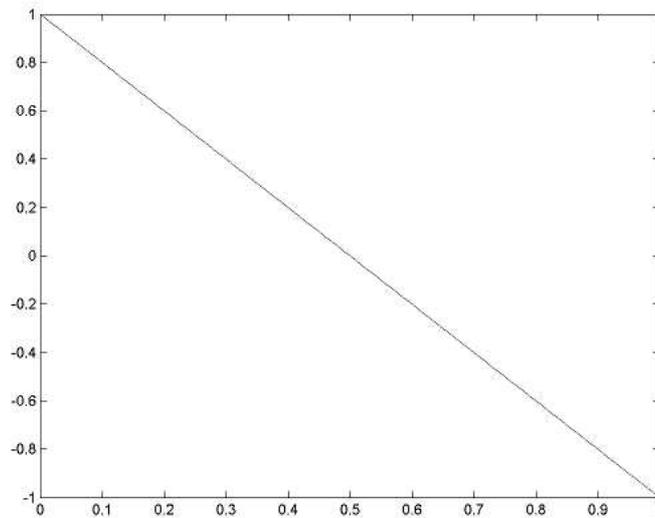


Figura 3.1: Decréscimo linear

vias) maior o sucesso, ou seja, o indivíduo considera-se bem sucedido quando a densidade de todas as vias é semelhante, mostrado graficamente na Figura 3.1 e na Figura 3.2.

$$\xi = 1 - 2\sigma \quad (3.4)$$

$$\xi = 2e^{(-5\sigma)} - 1 \quad (3.5)$$

onde σ é o desvio padrão das densidades hormonais das vias

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2} \quad (3.6)$$

onde:

n é número de vias, δ_i é a densidade hormonal da via i e $\bar{\delta}$ é a densidade hormonal média das n vias

O sistema formado pelo conjunto de semáforos tenderá a se manter estável e atendendo a demanda de tráfego nas vias. Semáforos que pertencem a uma mesma via de fluxo intenso em uma direção tenderão a sincronizar seus planos e priorizar tal fluxo.

3.1.4 Próximo Passo

Não foi definido como escopo deste trabalho a realização de experimentações para medir a qualidade do modelo proposto.

Um próximo passo seria implementar este modelo em um ambiente de simulação e medir sua qualidade, comparando os resultados obtidos com o mesmo cenário sem nenhum método de auto-organização, onde a sincronização depende de um projeto realizado por um especialista.

Alguns detalhes precisam ser refinados com os resultados obtidos pelas simulações. Por exemplo, é importante experimentar qual a função de densidade de tráfego é a mais adequada, exponencial ou linear.

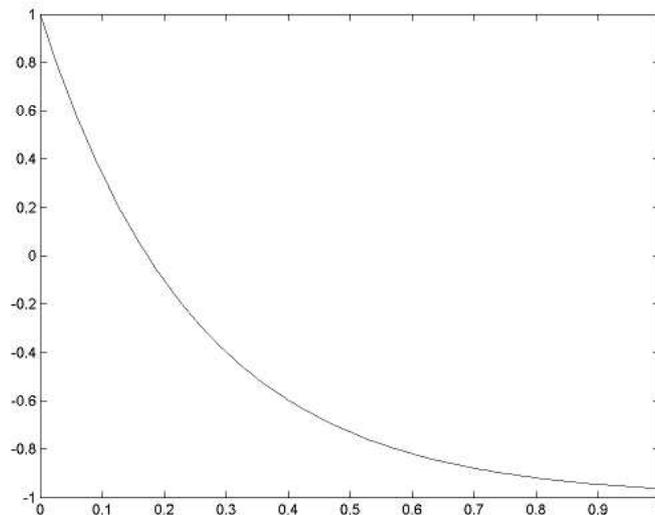


Figura 3.2: Decrescimento exponencial

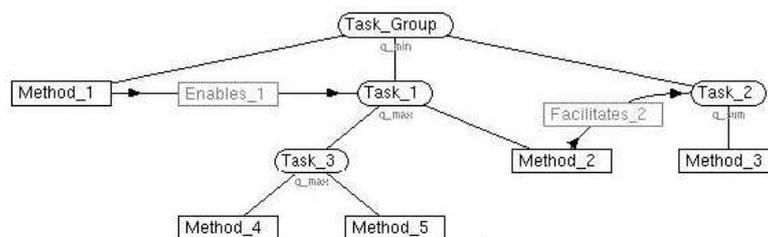


Figura 3.3: Exemplo de um *task structure* em TÆMS

3.2 Problema do Escalonamento em TÆMS

3.2.1 TÆMS

TÆMS é uma linguagem concebida para descrever a estrutura de tarefas, ou *task structure* (TS), dos agentes (DECKER, 1996). O objetivo dos agentes é maximizar a soma das qualidades, ou minimizar a soma dos custos, obtidos em cada *task group* (TG) antes de atingir o tempo limite. Um TG consiste em um conjunto de tarefas relacionadas entre si formando uma árvore. As tarefas que são folhas representam métodos executáveis, ou seja, ações que o agente pode executar com determinada qualidade.

Essencialmente uma TS é uma forma de representação da decomposição de tarefas em uma árvore. O nível mais alto de uma árvore é denominado TG e representa o objetivo do agente. Um TG então é uma seqüência de métodos e tarefas que descrevem como aquele conjunto de tarefas será executado. Os métodos são terminais e representam as ações primitivas que os agentes podem executar.

A figura 3.3 traz uma TS com várias tarefas relacionadas a um TG, representadas por elipses, e indicam precisamente qual será a qualidade obtida dependendo de quando e qual método, representado por um retângulo, for executado. Os arcos entre métodos ou tarefas indicam relacionamentos entre tarefas, onde a execução de um método terá um efeito, positivo ou negativo dependendo da qualidade e duração de sua execução, no outro método. A tabela 3.2 traz os diferentes relacionamentos que podem existir entre métodos

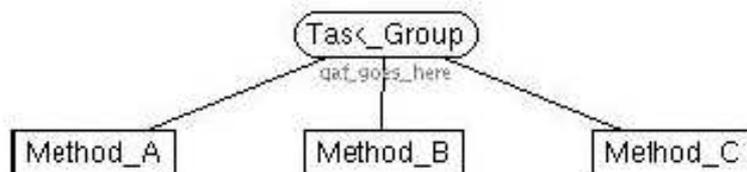


Figura 3.4: Exemplo de um *task structure* com três métodos

e tarefas, destacando os dois tipos em que podem se enquadrar, rígido e leve.

As anotações imediatamente abaixo dos círculos, intituladas *Quality Accumulation Function* - QAF, representam a forma como a qualidade da resolução das sub-tarefas ou métodos é usada para compor a qualidade ou o custo da tarefa. Pode-se dizer com isso que as QAFs determinam a semântica correta para as diferentes combinações e ordenações possíveis de resolução de cada método. A tabela 3.1 traz as diferentes QAFs que podem ser utilizadas em TÆMS.

Por exemplo, uma tarefa com três métodos, A, B e C, figura 3.4, pode ser executada com várias possibilidades de combinação e ordenação destes três métodos. Considerando que os métodos A,B e C sejam respectivamente limpar o banheiro, limpar a cozinha e limpar o quarto, a ordem não terá nenhuma implicância no resultado, e quantos mais métodos puderem ser realizados no prazo melhor a qualidade final. Contudo, considerando o cozimento de um bolo como a mesma tarefa, A, B e C podem ser respectivamente utilizar o forno a gás, utilizar o microondas e utilizar o forno elétrico, e apenas um método deve ser utilizado. A qualidade neste caso pode estar relacionada ao sabor, aparência ou a apenas o tempo de cozimento.

Os inter-relacionamentos entre tarefas e métodos indicam a existência de uma relação entre tarefas que independe de sua organização hierárquica. Desta forma, por exemplo, métodos de tarefas diferentes podem estar associados.

O TÆMS é capaz de lidar com os recursos envolvidos na realização de cada método. A utilização de recursos não foi considerada neste trabalho.

3.2.2 Escalonamento

O TÆMS oferece recursos para representar os meios necessários para os agentes atingirem seus objetivos. Realizar a análise deste processo e determinar um curso apropriado para as ações dos agentes dadas restrições temporais é o papel do escalonador.

O escalonador utilizado pela plataforma de desenvolvimento e simulação de agentes que incorpora o TÆMS é denominado *Design-to-Criteria* (DTC) (WAGNER; LESSER, 2001). O DTC recebe como entrada um TS TÆMS e:

1. Decide qual o conjunto de tarefas realizar;
2. Decide em que seqüência as tarefas devem ser executadas;
3. Realiza as duas primeiras funções considerando as restrições e as QAFs; e
4. Faz seu trabalho de computação em tempo real.

Atingir os objetivos enumerados acima não é um problema trivial. Em geral o número de escalonamentos possíveis para qualquer TS significante é muito grande e é intratável

Tabela 3.1: Funções que determinam o cálculo da qualidade da tarefa - QAF.

QAF	Descrição
min	A qualidade da tarefa é a menor qualidade das subtarefas ou métodos, e todas as subtarefas ou métodos devem ser escalonados obrigatoriamente (AND lógico entre elas).
max	A qualidade da tarefa é a maior qualidade das subtarefas ou métodos, e as subtarefas ou métodos podem ser escalonados em qualquer uma de suas combinações (OR lógico entre elas).
sum	A qualidade da tarefa é a soma da qualidade das subtarefas ou métodos, e as subtarefas ou métodos podem ser escalonados em qualquer uma de suas combinações, quanto mais métodos ou subtarefas escalonados maior será a qualidade da tarefa.
all	A qualidade da tarefa é a soma da qualidade das subtarefas ou métodos, e todas as subtarefas ou métodos devem ser escalonados.
seq min	A qualidade da tarefa é a menor qualidade das subtarefas ou métodos, e todas as subtarefas ou métodos devem ser escalonados obrigatoriamente (AND lógico entre elas) em uma determinada ordem.
seq max	A qualidade da tarefa é a maior qualidade das subtarefas ou métodos, e as subtarefas ou métodos podem ser escalonados em qualquer uma de suas combinações (OR lógico entre elas) que respeitem uma determinada ordem.
seq sum	A qualidade da tarefa é a soma da qualidade das subtarefas ou métodos, e as subtarefas ou métodos podem ser escalonados em qualquer uma de suas combinações que respeitem uma determinada ordem, quanto mais métodos ou subtarefas escalonados maior será a qualidade da tarefa.
seq last	A qualidade da tarefa é a qualidade da sub tarefa ou método terminado por último, e as subtarefas ou métodos devem ser todos escalonados e respeitarem uma determinada ordem.
exactly one	A qualidade da tarefa é a maior qualidade das subtarefas ou métodos, e somente uma dessas subtarefas ou métodos podem ser escalonados (XOR lógico entre elas).
last	A qualidade da tarefa é a soma da qualidade das subtarefas ou métodos, A qualidade da tarefa é a soma da qualidade das subtarefas ou métodos, e as subtarefas ou métodos podem ser escalonados em qualquer uma de suas combinações.

Tabela 3.2: Relacionamentos entre tarefas e/ou métodos.

Relacionamento	Descrição
enable	Relacionamento com comportamento rígido. O método ou tarefa só poderá ser escalonado se o método ou tarefa relacionada for escalonado.
disable	Relacionamento com comportamento rígido. O método ou tarefa não poderá ser escalonado se o método ou tarefa relacionada for escalonado.
facilitate	Relacionamento com comportamento leve. O método ou tarefa será escalonado com uma qualidade maior se o método ou tarefa relacionada for escalonado.
hinders	Relacionamento com comportamento leve. O método ou tarefa será escalonado com uma qualidade menor se o método ou tarefa relacionada for escalonado.

computacionalmente determinar cada um deles. O conjunto de restrições determinado pelas QAFs e pelas inter-relações entre as tarefas impede a adoção de uma abordagem convencional de determinação da melhor solução. O DTC utiliza uma bateria de técnicas para lidar com estas características (WAGNER; LESSER, 2001).

Neste capítulo propõe-se uma abordagem para a realização de escalonamentos de TS TÆMS utilizando uma abordagem baseada na organização de colônias de insetos sociais. Em poucas palavras, foi elaborado um modelo para que uma colônia de agentes ¹ com o comportamento de insetos sociais realizem o trabalho do DTC. Para a construção desta abordagem foi realizada uma aproximação do problema do escalonamento em TÆMS com o problema do Caixeiro Viajante (TSP) discutido em (DORIGO; GAMBARDELLA, 1997). Uma aproximação semelhante foi adotada por (ZWAAN; MARQUES, 1999) para o tratamento do problema do escalonamento de tarefas para máquinas em uma fábrica.

Esta abordagem foi concebida utilizando TS TÆMS com um TG composto de um conjunto de tarefas, cada uma com um número determinado de métodos. Não foram considerados mais de um nível na hierarquia de tarefas na abordagem atual. A QAF de TG foi fixada como *sum*. A qualidade de execução de todos os métodos foi considerada a mesma e somente foram tratados os relacionamentos rígidos, Tabela 3.2. A figura 3.5 é um bom exemplo de uma TS TÆMS que foi considerando na construção desta abordagem, onde os números relacionados com os métodos representam sua duração.

Os métodos de uma TS TÆMS devem ser dispostos como nós em um grafo completamente conexo, onde a partir de cada nó pode-se chegar a outro nó qualquer. Um nó inicial e um final é colocado adicionalmente no grafo. Um conjunto de agentes, com o comportamento de insetos sociais, é posicionado no nó inicial e deve percorrer todos os nós do grafo, até o nó final. Um escalonamento é o resultado da ordenação dos métodos em função do percurso realizado pelo agente. Ao fim de um número determinado de interações sucessivas todos os agentes tenderão a realizar o melhor escalonamento que será considerado o escalonamento para aquela TS TÆMS.

Antes que se possa mostrar como este comportamento se dará é preciso definir o mapeamento das QAFs e dos relacionamentos para um conjunto de nós e sua influência na qualidade do escalonamento.

¹Os agentes utilizados neste modelo teórico não correspondem aos agentes referidos no TÆMS e são aplicados apenas para a realização do escalonamento.

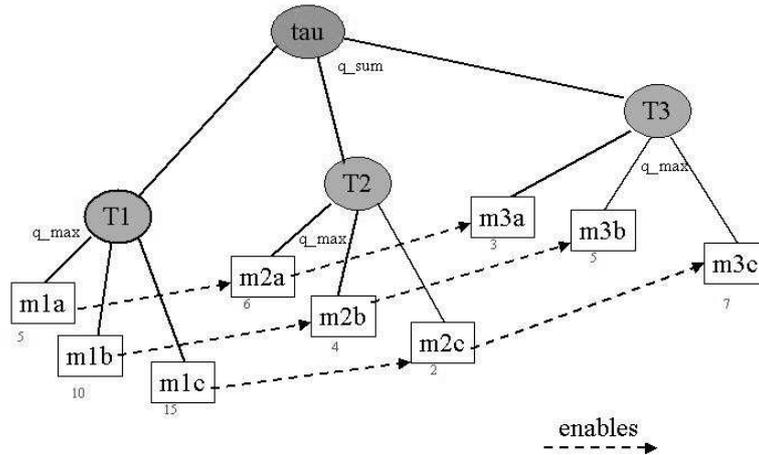


Figura 3.5: Exemplo de um *task structure* tratada pela abordagem apresentada

QAF Para todo o método m_i , representado por um nó no grafo, que pertence ao conjunto dos métodos de uma mesma tarefa $\Phi(m_i)$ existe uma QAF associada tal que (somente as QAFs *min*, *max*, *sum*, *all* e *exactly one* são consideradas nesta abordagem): seja m_i um nó qualquer do grafo, Π o conjunto de nós que devem ser visitados, Λ o conjunto dos nós que não podem ser visitados e q a qualidade total do escalonamento

se QAF = **min** então $\Pi = \Pi \cup \Phi(m_i)$, $\Lambda = \Lambda$ e $q = \text{MIN}(\Phi(m_i))$;

se QAF = **max** então $\Pi = \Pi$, $\Lambda = \Lambda$ e $q = \text{MAX}(\Phi(m_i))$;

se QAF = **sum** então $\Pi = \Pi$, $\Lambda = \Lambda$ e $q = \text{SOMA}(\Phi(m_i))$;

se QAF = **all** então $\Pi = \Pi \cup \Phi(m_i)$, $\Lambda = \Lambda$ e $q = \text{SOMA}(\Phi(m_i))$; e

se QAF = **exactly one** então $\Pi = \Pi$, $\Lambda = \Lambda \cup \Phi(m_i)$ e $q = Q(m_i)$.

onde $\text{MIN}()$ é a qualidade do método de menor qualidade, $\text{MAX}()$ é a qualidade do método de maior qualidade, $\text{SUM}()$ é a soma da qualidade de cada método do conjunto e $Q()$ é a qualidade do método.

Relacionamentos Para todo o método m_i relacionado com outro método m_j (representados por um nós no grafo) existe um relacionamento tal que:

seja m_i um nó qualquer do grafo, Π' o conjunto de nós que devem ser visitados na próxima iteração e Λ' o conjunto do nós que não podem ser visitados na próxima iteração

se m_j **enable** m_i então $\Pi' = \Pi \cup \{m_j\}$, $\Lambda' = \Lambda$; e

se m_i **disable** m_j então $\Pi' = \Pi$, $\Lambda' = \Lambda \cup \{m_j\}$.

Com isso, quando cada nó m_i for visitado existirá um conjunto de nós Λ' que não poderão ser visitados a partir deste na próxima iteração e um conjunto de nós Π' que deverão ser visitados a partir deste.

Definidos os mapeamentos, tem-se que a tendência T_{ij} de um agente visitar o nó m_j a partir do nó m_i é dada por, inspirado por (DORIGO; GAMBARDELLA, 1997):

$$T_{ij} = \begin{cases} \frac{(t_{ij})^\alpha (\frac{1}{d_i})^\beta}{\sum_{h \in \Omega} (t_{ih})^\alpha (\frac{1}{d_i})^\beta} & \text{se } m_i \in \omega, m_i \notin \Pi' \text{ e } \notin \Lambda' \\ \infty & \text{se } m_i \in \Pi' \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.7)$$

onde:

T_{ij} tendência de um agente visitar o nó m_j a partir do nó m_i

t_{ij} intensidade hormonal do arco que liga m_i a m_j

α parâmetro que regula a influência de t_{ij}

d_i duração do método representado pelo nó m_i

β parâmetro que regula a influência de d_i

Ω conjunto dos nós ainda não visitados

Π' conjunto dos nós que devem ser visitados na próxima iteração

Λ' conjunto dos nós que não podem ser visitados na próxima iteração

Em um primeiro passo, um número n de agentes está concentrado no nó inicial, que não representa um método e que foi adicionado para efeito teórico, e tem uma tendência T_{ij} a visitar qualquer um dos nós do grafo. Este nó inicial tem duração d_i igual a 0.

Cada agente então percorre os nós do grafo até o nó final, também inserido para fins teóricos. A cada iteração o conjunto de nós ainda não visitados diminui de um nó e um percurso é considerado completo se o conjunto de nós ainda não visitados Ω for igual ao conjunto dos nós que não podem ser visitados Λ . A tendência de uma agente ir para o nó final quando ele é o nó restante, sendo que este nunca aparece em Λ , é 1.

Em cada uma das iterações mencionadas um nó é visitado e um arco é percorrido. Quando um arco é percorrido o agente deixa uma trilha de feromônios que sinaliza sua passagem por aquele ponto. A quantidade de feromônio depositada em cada arco é atualizada da seguinte forma, inspirado por (DORIGO; GAMBARDELLA, 1997):

$$\begin{aligned} t_{ij}(\tau + 1) &= t_{ij}(\tau) + \Delta t_{ij} \\ \Delta t_{ij} &= \sum_{k=1}^n t_{ij}^k \\ t_{ij}^k &= \frac{Q}{L_k} \end{aligned} \quad (3.8)$$

onde:

t_{ij} intensidade hormonal do arco que liga m_i a m_j

τ contador da iteração

Δt_{ij} aumento da intensidade hormonal no arco que liga m_i a m_j

n número de agentes

Δt_{ij}^k aumento da intensidade hormonal no arco que liga m_i a m_j causado pelo agente k

Q constante que representa a intensidade de hormônio deixado por agente por percurso L_k tamanho, em nós, do percurso já realizado pelo agente k

Ao final de um número x de rodadas, onde grupos de agentes realizam o percurso do grafo, haverá uma tendência de todos, ou a imensa maioria, a seguir o mesmo caminho o que indicará que o sistema convergiu para uma solução. Este caminho representa o melhor escalonamento encontrado para a TS TÆMS avaliada.

Este modelo teórico foi concebido para realizar algumas atribuições do DTC, sendo completamente independente do *framework* onde o DTC está implementado. Com isso, é preciso construir um módulo completo que interprete uma TS TÆMS, converta esta TS para a estrutura de grafo utilizada no modelo e coordene os agentes durante o processo de escalonamento detalhado acima.

3.2.3 Próximo Passo

Não foi definido como escopo deste trabalho a realização de experimentações para medir a eficiência do modelo proposto. Muitos aspectos que o DTC trata ainda não foram considerados por esta abordagem uma vez que o modelo proposto não foi aplicado em muitos cenários diferentes.

Adequações e refinamentos se fazem necessários para garantir que, ao menos para o cenário discutido neste trabalho, a abordagem é bem sucedida. Alguns fatores precisam ser avaliados, como por exemplo: a quantidade de agentes ótima para a convergência na solução; o grau de influência do tempo de duração do método e da intensidade de hormônios na determinação da tendência; o número de rodadas ideal para a convergência na solução; etc.

Um próximo passo seria implementar este modelo em um ambiente de simulação e comparar seus resultados com escalonamentos realizados pelo DTC. Para isso, primeiramente, o módulo que implementa o escalonador baseado no modelo teórico apresentado neste trabalho deve ser implementado. Este módulo e o DTC deverão ser executados para um mesmo conjunto de TSs. Em um primeiro momento seria suficiente saber se este novo modelo consegue determinar um escalonamento igual ou próximo ao escalonamento determinado pelo DTC.

As limitações deste modelo precisam ser bem avaliadas uma vez que não foram tratados algumas QAFs e os relacionamentos leves. Acredita-se que dando continuidade ao desenvolvimento desta abordagem ela será capaz de tratar todos os aspectos tratados pelo DTC, com exceção da alocação de recursos para a realização das tarefas que ainda não foi sequer considerada.

4 CONCLUSÃO

O estudo realizado sobre as colônias de insetos sociais revelou sua interessante capacidade de adaptação às condições do meio em que vivem. Tal capacidade, garantia de seu sucesso ecológico, mostra como um comportamento sofisticado emerge da iteração de seres bastante simples.

Conhecer os aspectos biológicos dos insetos sociais é fundamental para entender seu comportamento e, por consequência, melhor compreender os modelos teóricos elaborados com base na organização de sua colônia. Muitos autores apresentaram modelos neste sentido e alguns destes modelos foram amplamente utilizados na construção de diferentes abordagens para a solução de muitos problemas envolvendo Sistemas Multiagentes.

O emprego da inspiração biológica para as aplicações abordadas neste trabalho mostrou bastante promissor. Tais aplicações ainda não haviam sido tratadas através de uma abordagem com esta.

O problema do sincronismo dos semáforos deve ser simulado e experimentado, comparando seus resultados com soluções apresentadas em outros trabalhos. Seu modelo aparenta estar completo necessitando apenas de ajustes em alguns detalhes que devem ser determinados pelos resultados das simulações.

A abordagem construída para o problema do escalonamento em TÆMS é mais incipiente que a citada anteriormente. Muitos aspectos ainda estão descobertos e não se tem comprovação de sua eficiência. Mais exemplos precisam ser trabalhados e o modelo precisa ser estendido para cobrir todos os aspectos tratados pelo escalonador utilizado convencionalmente. Não se considera para essa extensão o tratamento de recursos utilizados pelos métodos até que o modelo esteja estável e tenha sido bastante simulado e experimentado.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, C.; AL. et. Task partitioning in insect societies (I): effect of colony size on queueing delay and colony ergonomic efficiency. **The American Naturalist**, [S.l.], v.154, n.6, p.521–535, November 1999.

BAZZAN, A. **An Evolutionary Game-Theoretic Approach for Coordination of Traffic Signal Agents**. 1997. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Universität Karlsruhe.

BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. Inspiration for optimization from social insect behaviour. **Nature**, [S.l.], p.39–42, Jul 2000.

BONABEAU, E.; SOBKOWSKI, A.; THERAULAZ, G.; DENEUBOURG, J.-L. Adaptive Task Allocation Inspired by a Model of Division of Labor in Social Insects. In: **BI-COMPUTING AND EMERGENT COMPUTATION**, 1997. **Anais...** World Scientific, 1997. p.36–45.

BONABEAU, E.; THERAULAZ, G.; DORIGO, M. **Swarm Intelligence: from natural to artificial systems**. [S.l.]: Oxford Univ Press, 1999.

CAMPOS, M.; BONABEAU, E.; THERAULAZ, G.; DENEUBOURG, J.-L. Dynamic Scheduling and Division of Labor in Social Insects. In: **ADAPTIVE BEHAVIOR**, 2001. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2001. v.8-2, p.83–96.

DECKER, K. **Task environment centered simulation**. 1996.

DORIGO, M.; CARO, G. D.; GAMBARDELLA, L. Ant Colony Optimization: A new meta-heuristic. In: **CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION**, 1999, Mayflower Hotel, Washington D.C., USA. **Proceedings...** IEEE Press, 1999. v.2, p.1470–1477.

DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. Ant Colony System: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, [S.l.], v.1, n.1, p.53–66, April 1997.

GORDON, D. M. The Organization of Work in Social Insect Colonies. **Nature**, [S.l.], v.308, p.121–124, 1996.

GORDON, D. M. **Formigas em ação: como se organiza uma sociedade de insetos**. [S.l.]: Jorge Zahar Editor, 2002.

GORDON, D. M.; PEREIRA, H. M. A trade-off in task allocation between sensitivity to the environment and response time. **Journal of Theoretical Biology**, [S.l.], v.208, p.165–184, 2001.

PARPINELLI, R. S.; LOPES, H. S.; FREITAS, A. A. An Ant Colony Based System for Data Mining: applications to medical data. In: GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO-2001), 2001, San Francisco, California, USA. **Proceedings...** Morgan Kaufmann, 2001. p.791–797.

PARUNAK, H. V. D.; BRUECKNER, S. Ant-Like Missionaries and Cannibals: synthetic pheromones for distributed motion control. In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTONOMOUS AGENTS, 2000, Barcelona, Catalonia, Spain. **Proceedings...** ACM Press, 2000. p.467–474.

ROBISON, G. E. Regulation of Division of Labor in Insect Societies. **Annual Review of Entomology**, [S.l.], v.37, p.637–665, 1992.

SCHULZ, D. J.; HUANG, Z.-Y.; ROBINSON, G. E. Effects of colony food shortage on behavioral development in honey bees. **Behavioral Ecological Sociobiology**, [S.l.], n.42, p.295–303, 1998.

THERAULAZ, G.; BONABEAU, E.; DENEUBOURG, J. **Response threshold reinforcement and division of labour in insect societies**. 1998.

WAGNER, T.; LESSER, V. Design-to-Criteria Scheduling: real-time agent control. **Lecture Notes in Computer Science**, [S.l.], v.1887, p.128–??, 2001.

WILSON, E. O. **Sociobiology: the new synthesis**. [S.l.]: Harvard Univ Press, 2000.

ZWAAN, S. van der; MARQUES, C. **Ant Colony Optimisation for Job Shop Scheduling**. 1999.