

## Capítulo 5

# 5. Coordenação de Agentes Cooperativos

Nos capítulos anteriores foram discutidos os conceitos de Agente Autónomo e Sistema Multi-Agente e analisadas as principais metodologias de coordenação de agentes competitivos (“*self-interested*”). No entanto, embora tenha sido analisado como colocar agentes a comunicar de forma compreensível, resolver conflitos e chegar a acordos com outros agentes, não foi ainda discutida a forma como se podem coordenar conjuntos de agentes para realizarem trabalho cooperativo, em equipa.

Embora a negociação seja uma metodologia útil também na coordenação de agentes cooperativos, diversas metodologias mais adequadas à coordenação deste tipo de agentes foram desenvolvidas pelos investigadores da área. Neste capítulo são descritos modelos de coordenação com o objectivo de permitir a agentes cooperativos trabalhar em conjunto, de forma harmoniosa, em ambientes complexos. Ao longo da discussão será dado ênfase particular às metodologias adequadas à coordenação de equipas de agentes que operam em ambientes abertos e multi-objectivo.

Inicialmente são distinguidas as áreas da coordenação de agentes cooperativos e trabalho em equipa (“*teamwork*”). Em seguida é apresentada a investigação realizada em resolução distribuída e cooperativa de problemas. Diversos tipos de coordenação propostos na literatura da especialidade são descritos e comparados, incluindo: coordenação por troca de informação e resultados, coordenação por planeamento multi-agente, coordenação por modelização mútua e coordenação por organização estrutural. São também analisados modelos de coordenação mais específicos propostos por diversos autores, incluindo as intenções conjuntas, planos partilhados, *Locker Room Agreement*, o esquema *TAEMS* e o modelo *STEAM*. Propõem-se ainda tipos de coordenação distintos dos usuais, incluindo a coordenação por percepção inteligente, controlo parcialmente hierárquico e coordenação estratégica. O capítulo conclui-se com uma análise crítica da investigação realizada na área e com alguns apontadores para a forma como alguns dos conceitos apresentados são utilizados e estendidos no âmbito do trabalho prático realizado no contexto desta tese.

## 5.1 Objectivos da Coordenação de Agentes Cooperativos

No âmbito de uma comunidade de agentes cooperativos, coordenação pode ser definida como o processo pelo qual os agentes raciocinam acerca das suas acções locais e antecipam o efeito das acções dos outros de modo a assegurar que a comunidade actue de maneira coerente [Jennings, 1996].

Sem coordenação, os benefícios da resolução distribuída de problemas ou execução distribuída de tarefas desaparecem e a comunidade de agentes pode degenerar numa colecção caótica e incoerente de agentes individuais.

Lesser e Corkill afirmam que os objectivos da coordenação de agentes são [Lesser e Corkill, 1987]:

- Garantir que todas as partes necessárias do problema são resolvidas por pelo menos um agente ou que todas as partes da tarefa cooperativa são executadas;
- Garantir que todos os agentes interagem de modo a permitir que as suas actividades sejam executadas como parte da execução da tarefa cooperativa e desta forma integradas na solução global;
- Garantir que os membros da equipa agem de maneira a atingir os objectivos globais e de forma globalmente consistente;
- Garantir que os três objectivos anteriores são alcançados dentro dos limites computacionais e dos recursos disponíveis.

Um modelo de coordenação providencia um esquema formal, pelo qual as formas de interacção entre os agentes podem ser expressas. Assim, este modelo irá lidar com a criação e destruição de agentes, actividades de comunicação dos agentes, distribuição e mobilidade espacial dos agentes, sincronização, distribuição e monitorização das acções dos agentes ao longo do tempo (figura 27).

Um modelo de coordenação pode ser visto como consistindo em três elementos [Ciancarini, 1996]:

- **Coordenáveis.** As entidades cujas interacções mútuas vão ser regidas pelo modelo de coordenação, i.e., os agentes no Sistema Multi-Agente;
- **Meios de Coordenação.** As abstrações utilizadas que permitem as interacções entre os agentes e o núcleo em torno do qual os agentes se encontram organizados. Isto inclui meios de interacção físicos, canais de comunicação, etc;
- **Leis de Coordenação.** Definem o modo de utilização dos meios de coordenação nos eventos de interacção. Estas leis podem ser definidas de diversas formas como por exemplo através de uma linguagem de comunicação (que define a sintaxe utilizada para troca de dados) e uma linguagem de coordenação (que

define as primitivas de interacção e a sua semântica).

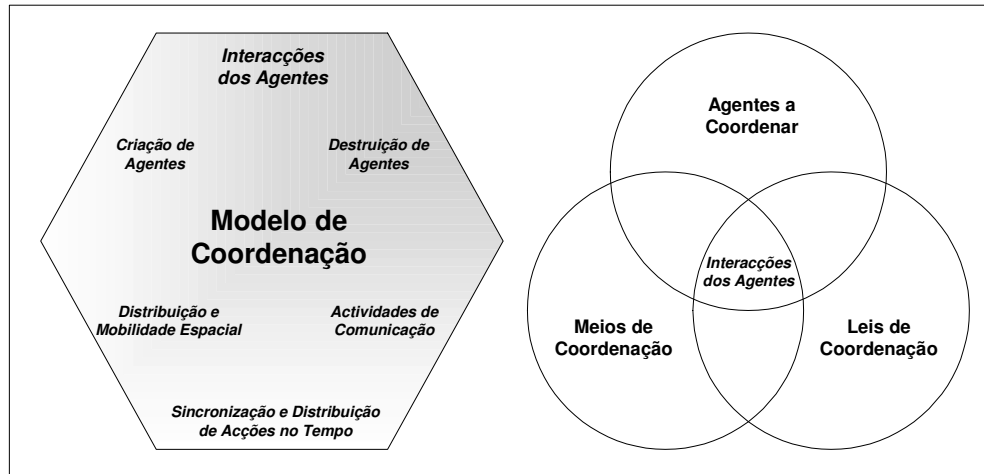


Figura 27: Modelo de Coordenação

## 5.2 Formação de Equipas de Agentes

Uma outra designação frequente para a coordenação de equipas de agentes cooperativos é a denominação de *trabalho de equipa* (“*teamwork*”). *Trabalho de equipa* pode ser definido como um esforço cooperativo dos membros de uma equipa para atingir um objectivo comum [AHD, 2000].

Uma *equipa* pode ser definida como um conjunto distinguível de dois ou mais indivíduos que interagem de forma dinâmica, interdependente e adaptativa de modo a atingirem objectivos comuns, partilhados e especificados.

Tambe [Tambe, 1997] adopta a designação – *trabalho de equipa* – no seu trabalho relacionado com a coordenação de equipas de agentes e afirma que o *trabalho de equipa* é cada vez mais crítico em ambientes multi-agente, tais como: treino virtual [Tambe, 1995] [Rao et al., 1993], educação interactiva, integração de informação na Internet [Williamson et al., 1996], futebol robótico simulado [Kitano et al., 1997], entretenimento interactivo [Hayes-Roth et al., 1995] e missões multi-robô.

Embora a coordenação e o trabalho de equipa estejam relacionados de forma muito próxima, pode-se afirmar que o trabalho de equipa é uma subárea da coordenação no sentido de que algumas técnicas de coordenação não podem ser consideradas trabalho de equipa. Por exemplo, o trânsito normal de veículos, embora coordenado não pode ser considerado trabalho de equipa. Por oposição, conduzir em caravana de veículos é claramente trabalho de equipa. A diferença entre as duas situações é que embora em ambos os casos exista coordenação, o trabalho de equipa envolve objectivos comuns e cooperação entre os membros de equipa, o que se verifica na condução em caravana, mas

não no trânsito normal, onde existem objectivos globais que excedem os objectivos próprios ou comuns da equipa [Tambe, 1997].

### 5.3 Resolução Distribuída e Cooperativa de Problemas

A investigação em resolução distribuída de problemas iniciou-se com os trabalhos de Smith e Davis [Smith e Davis, 1980] e mais tarde de Durfee e Lesser [Durfee e Lesser, 1987]. Durfee e Lesser [Durfee e Lesser, 1987], estudaram sistemas compostos por múltiplas entidades, cada qual possuindo conhecimento distinto mas no entanto interrelacionado com o das restantes que, em conjunto, pudessem resolver problemas complexos. A resolução distribuída e cooperativa de problemas (RDCP), estuda o modo como um conjunto de entidades computacionais, ligadas em rede, pode trabalhar em conjunto de maneira a resolver problemas que são demasiado complexos para resolver com as suas capacidades individuais [Durfee et al., 1989]. Cada entidade computacional possui capacidade de efectuar a resolução de problemas complexos dentro do seu domínio de especialidade e é capaz de operação autónoma e independente. No entanto, o problema global a ser resolvido por este conjunto de entidades, não é passível de ser resolvido completamente sem cooperação. A cooperação é necessária devido ao facto de nenhuma entidade computacional ter conhecimento e recursos suficientes para resolver o problema completo. No entanto, cada entidade computacional, possui conhecimento e capacidades para resolver partes do problema global [Durfee et al., 1989].

A resolução distribuída de problemas é composta por três fases [Smith e Davis, 1980] que podem ocorrer iterativamente:

- **Decomposição do Problema.** O problema original é decomposto em diversos subproblemas de dimensão e complexidade menor. Cada um dos subproblemas é alocado a um ou mais agentes para efectuar a sua resolução;
- **Resolução dos Subproblemas.** Os subproblemas são resolvidos pelos diversos agentes envolvidos no processo;
- **Síntese da Solução.** A solução final é obtida através da fusão das respostas obtidas pelos diferentes agentes para cada um dos subproblemas.

No trabalho de Durfee e Lesser, as entidades computacionais ou agentes são consideradas benevolentes, no sentido em que todos os agentes do sistema supostamente partilham um objectivo global, e como tal não existe a necessidade de resolver conflitos entre eles. Os agentes são totalmente cooperativos e nesse sentido procuram auxiliar os outros agentes do sistema se tal for benéfico para o conjunto, mesmo que tal implique custos individuais. Esta assunção de benevolência e de que os agentes estão unicamente preocupados com a utilidade do sistema só poderá ser válida se os agentes forem todos projectados pelo

mesmo indivíduo ou organização [Wooldridge, 2002]. Ao contrário, em Sistemas Multi-Agente que contêm agentes competitivos, não pode ser assumido que todos os agentes partilham o mesmo objectivo pois muitas vezes eles são projectados e implementados por diferentes indivíduos ou organizações de forma a os representarem nesse mesmo sistema. Os conflitos irão naturalmente emergir neste tipo de sociedade, tal como emergem em sociedades humanas, sem que, no entanto, isto signifique que a cooperação não seja útil [Wooldridge, 2002]. Aliás, a criação de sociedades de agentes e consequente definição de metodologias de coordenação e cooperação, que permitam a interacção desses agentes na sociedade assumem-se como algumas das áreas de investigação com maior crescimento nos últimos anos, no âmbito da área dos Sistemas Multi-Agente.

A implementação de uma sociedade de agentes capaz de resolver problemas complexos, coloca a questão de como avaliar a solução obtida e quais os critérios a considerar para avaliar o sucesso da implementação. Uma possibilidade consiste na utilização da coerência como medida desse sucesso. Neste contexto, Wooldridge, propõe que a coerência pode ser medida em termos da qualidade, eficiência, utilização de recursos, clareza e tolerância a incerteza e/ou falhas [Wooldridge, 1994].

A Resolução Distribuída Coerente de Problemas, realizada de maneira satisfatória através de um SMA, implica a resposta a múltiplas questões. Wooldridge afirma que as principais preocupações e tópicos de investigação na RDCP são [Wooldridge, 2002]:

- Como pode um problema ser decomposto em tarefas menos complexas?
- Como podem essas tarefas ser distribuídas entre os agentes do sistema?
- Como pode a solução global do problema ser sintetizada a partir das soluções parciais dos vários subproblemas?
- Como podem as actividades de resolução de problemas dos agentes ser optimizadas de forma a produzir uma solução que optimize a coerência?
- Que metodologias devem ser utilizadas de modo a coordenar a actividade dos agentes, evitar interacções destrutivas e maximizar a eficiência das interacções positivas?

Diversos autores prosseguiram o trabalho de Durfee e Lesser e procuraram desenvolver metodologias para responder a estas questões. As secções seguintes apresentam algumas das metodologias mais relevantes desenvolvidas neste contexto.

### **5.3.1 Coordenação por Partilha de Tarefas e de Resultados**

Uma das primeiras metodologias de coordenação propostas para agentes autónomos foi sugerida por Smith e Davis [Smith e Davis, 1980]. No seu trabalho sugeriram a separação do problema de resolução distribuída cooperativa de problemas nas três fases apresentadas

na secção anterior: decomposição do problema, resolução dos subproblemas e síntese da solução.

Na primeira fase, o problema global é decomposto em problemas de dimensão inferior. Esta decomposição é tipicamente hierárquica para que os subproblemas possam por sua vez ser decompostos em problemas ainda menores e assim sucessivamente. A decomposição sucessiva continua até se atingirem problemas de uma dimensão tratável por agentes individuais. No entanto, é importante ter em consideração que os subproblemas gerados devem ter o mínimo de interdependências possível para que não seja complexa a sua resolução separada e a integração das suas soluções individuais. A decomposição do problema deve, idealmente, ter em consideração o conhecimento sobre os agentes que irão resolver os subproblemas gerados.

Na segunda fase do processo, os subproblemas identificados na primeira fase são resolvidos individualmente. Esta fase envolve uma alocação prévia dos problemas aos agentes e a troca de informação entre os agentes durante a resolução. Quanto maior for o número de interdependências entre os subproblemas maior será a necessidade de comunicação e troca de informação entre os agentes durante a sua resolução. Esta troca de informação pode ter lugar de forma reactiva ou pró-activa e consiste, usualmente, no envio de informação que um dado agente considere útil para a(s) tarefa(s) que um outro agente esteja a executar.

A fase final consiste na integração das soluções dos subproblemas individuais numa solução global. Tal como na primeira fase, esta fase pode ser realizada de uma forma hierárquica. A principal dificuldade deste processo resulta usualmente da possibilidade de existência de soluções incompatíveis geradas por diferentes agentes.

A resolução distribuída e cooperativa de problemas (RDCP) apresenta dois cenários possíveis (figura 28):

- **Partilha de Tarefas.** A partilha de tarefas ocorre quando um dado problema é decomposto e as suas diferentes partes alocadas a agentes distintos. A principal dificuldade consiste na definição do método de alocação dos problemas aos agentes. Se os agentes possuírem todas as capacidades, conhecimentos e recursos idênticos, i.e. se forem homogéneos, então a tarefa é simples. No entanto, se os agentes tiverem capacidades distintas e forem autónomos podendo inclusivamente recusar a execução de tarefas, o problema torna-se muito mais complexo. Em domínios que incluam agentes competitivos, as metodologias de coordenação discutidas no capítulo anterior (resolução de conflitos, negociação, leilões, etc.) são de grande importância na partilha de tarefas;
- **Partilha de Resultados.** A partilha de resultados implica a troca de informação entre os agentes que seja relevante para a resolução do problema global. Esta informação pode ser trocada de forma pró-activa (um agente decide autonomamente enviar informação a outros agentes que pensa lhes poder ser útil)

ou reactiva (o envio de informação é realizado como resposta a pedido de um dado agente).

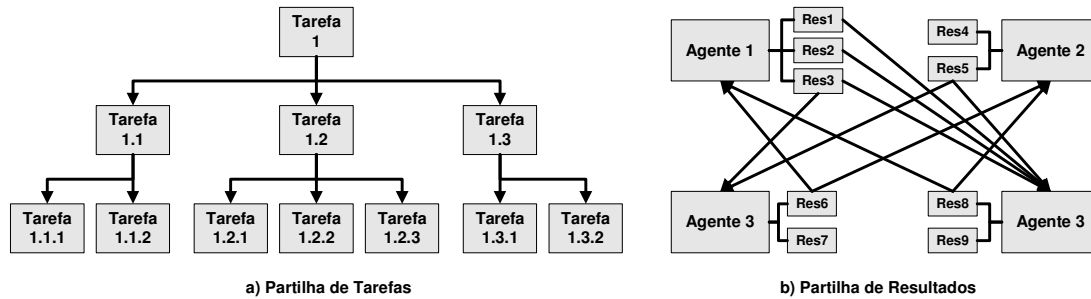


Figura 28: Tarefas Cooperativas na RDPC: a) Partilha de Tarefas e b) Partilha de Resultados

### 5.3.2 Coordenação por Partilha de Tarefas – Protocolo da Rede Contratual

O protocolo da rede contratual (“*Contract-Net*”) destina-se a permitir a coordenação através da partilha de tarefas entre agentes capazes de efectuar a resolução de problemas [Smith, 1977] [Smith, 1980a] [Smith, 1980b] [Smith e Davis, 1980]. É essencialmente um protocolo de alto-nível que se baseia, tal como o nome indica, em efectuar a contratação de tarefas. Para efectuar a definição deste protocolo, Smith inspirou-se no modo de executar a contratação usada em empresas reais.

O protocolo *Contract-Net* pode ser considerado como um processo de contratação iniciado por um dado agente  $A_i$ , que pretende ver realizada uma dada tarefa  $T_i$ . Através do conhecimento sobre os outros agentes, esse agente  $A_i$  verifica que existe mais do que um agente com capacidade para realizar a tarefa  $T_i$ . Este processo baseia-se num protocolo específico que consiste na troca de um conjunto de mensagens entre o agente  $A_i$  e os outros agentes com capacidade de realização de  $T_i$ , com vista à incumbência de um desses agentes para a realização dessa tarefa  $T_i$ . O resultado da negociação pode ser a incumbência de um dado agente para a realização da tarefa pretendida  $T_i$ , mas pode também ser a verificação de que nenhum agente consegue ou está disposto a realizar a tarefa  $T_i$ , dentro das restrições pretendidas. Neste último caso, o agente organizador da negociação ( $A_i$ ), conclui que não consegue obter ajuda para a realização dessa tarefa  $T_i$  dentro das restrições impostas, e tem de tomar uma decisão sobre a alteração da sua actividade (por exemplo, tentar um plano alternativo para a obtenção da acção pretendida ou relaxar as restrições impostas para a realização da tarefa).

O protocolo é extremamente simples (figura 29). Inicia-se pelo envio, por parte do agente organizador, de um anúncio geral da tarefa a executar ou, caso o organizador possua conhecimento das capacidades dos outros agentes, de um anúncio limitado destinado ao conjunto de agentes que ele pensa poderem executar essa tarefa (obedecendo a um

conjunto de restrições pré-especificado). Os agentes receptores (ou respondentes) após receberem e interpretarem o anúncio, realizarão uma avaliação do mesmo no que diz respeito às suas possibilidades de execução da tarefa solicitada. Se considerarem que conseguem e estão dispostos a realizar a tarefa, enviam uma proposta de execução ao agente organizador. O organizador pode receber diversas propostas de execução e, como tal, deverá seleccionar o agente mais apropriado à execução da tarefa com base na informação dessas mesmas propostas. A selecção é comunicada a esse agente e a rejeição das respectivas propostas é comunicada aos restantes agentes. O protocolo pode ainda incluir a confirmação por parte do agente vencedor de que assume o compromisso de realmente executar a tarefa.

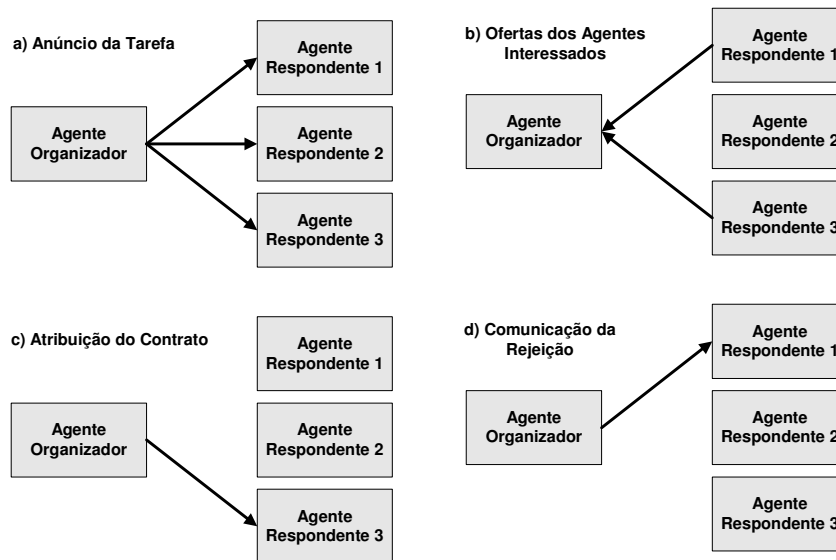


Figura 29: Protocolo Contract-Net – Rede de Contratual

O protocolo rede contratual destina-se a determinar a possibilidade de realização ou não de cooperação e em caso afirmativo a forma concreta de como a cooperação se vai realizar (qual o agente ao qual vai ser pedido para efectuar a tarefa). Apesar de ser muito simples (e eventualmente por isso mesmo), a rede contratual tornou-se no mais implementado e mais estudado método de coordenação por partilha de tarefas.

### 5.3.3 Coordenação por Comunicação – Partilha de Resultados

A partilha de resultados, e mais genericamente a partilha de informação e conhecimento, é essencialmente um método de coordenação por comunicação. Na literatura da especialidade, este tipo de coordenação é usualmente apresentado em conjunto com a partilha de tarefas, no âmbito da descrição de agentes que efectuem a resolução distribuída de problemas. Nesta perspectiva, os resultados partilhados correspondem a soluções de problemas menores que são progressivamente compostas de modo a formarem a solução



global do problema completo. Durfee [Durfee, 1999] sugere que os agentes podem melhorar o seu desempenho através da partilha de resultados das seguintes formas:

- **Confiança.** As soluções calculadas por diferentes agentes de modo independente podem ser analisadas em conjunto, verificando a existência de erros e aumentando a confiança na solução global;
- **Completo.** Os agentes podem comunicar as suas visões locais do problema de modo a atingir uma visão global melhor;
- **Precisão.** Os agentes podem trocar resultados de modo a aumentar a precisão da solução global;
- **Tempo.** O tempo necessário para atingir a solução pode diminuir pois, mesmo que cada agente possa resolver as suas tarefas sozinho, a disponibilidade de informação adicional pode acelerar o seu próprio processo de resolução.

Habitualmente, a partilha de resultados é combinada com a partilha de tarefas. Os agentes partilham de forma reactiva e/ou pró-activa informação parcial que possuam, de forma a auxiliar os restantes agentes na resolução dos seus problemas individuais.

Um dos principais problemas na resolução distribuída de problemas está relacionado com o aparecimento de inconsistências entre os diversos agentes presentes no sistema. Os agentes podem apresentar inconsistências quanto a:

- **Crenças (informação sobre o estado do mundo).** Este tipo de incoerência surge devido à inacessibilidade do ambiente (e conseqüente visão parcial do mundo disponível a cada agente), ao dinamismo do ambiente e aos eventuais erros na percepção dos agentes;
- **Objectivos (intenções que desejam atingir).** A incoerência relativa aos objectivos surge devido à autonomia dos agentes, que não partilham exactamente o mesmo conjunto de objectivos.

Quando o sistema possui uma dimensão razoável, os agentes são autónomos e o ambiente é inacessível e dinâmico, as inconsistências são inevitáveis. Para lidar com este problema, diversos autores propuseram soluções distintas incluindo:

- Ignorar as inconsistências [Durfee et al., 1989];
- Metodologias de revisão de crenças para inconsistências sobre crenças [de Kleer, 1986] [Malheiro, 1999] [Malheiro e Oliveira, 2000],
- Tratar as inconsistências como conflitos e resolvê-las através de negociação; e
- Construir sistemas suficientemente robustos capazes de raciocinar na presença de inconsistências [Lesser e Corkill, 1981].

Esta última abordagem é a mais adequada em domínios dinâmicos e inacessíveis pois será evidente que o estado do mundo dos agentes será sempre incompleto, sujeito a erros e

desatualizado. Neste contexto, Lesser e Corkill sugeriram as seguintes características para um sistema tolerante a informação inconsistente e/ou incorrecta [Lesser e Corkill, 1981]:

- **Independência Relativa aos Eventos.** Resolução de problemas não depende directamente da sequência de eventos. A resolução de problemas é executada de forma oportunística e incremental, de acordo com a disponibilidade de informação e não numa ordem pré-especificada.
- **Troca de Informação de Alto-Nível.** Os agentes trocam informação de alto-nível relacionada com os resultados intermédios e não dados em bruto. Isto permite uma muito maior autonomia e independência no comportamento dos agentes.
- **Resolução Contínua de Inconsistências.** As incertezas, incorrecções e inconsistências vão sendo resolvidas ao longo do processo de resolução de problemas e não no início e no final do mesmo.
- **Metodologia de Resolução Flexível.** A metodologia de cálculo da solução deve ser flexível e não deve estar restringida a um único caminho. A disponibilidade de múltiplos planos para atingir a solução aumenta consideravelmente a robustez do sistema, eliminando possíveis estrangulamentos nesta resolução.

A coordenação por comunicação pode também ser tratada a mais alto-nível, como no trabalho de Gasser, que propõe a troca de informação de controlo de meta-nível acerca das prioridades e acções actuais de cada agente entre os agentes do sistema [Gasser, 1992].

## 5.4 Coordenação por Planeamento Multi-Agente

Um tema sujeito a grande investigação na área dos Sistemas Multi-Agente é o planeamento multi-agente (planeamento das actividades de um conjunto de agentes). Neste tipo de planeamento, é necessário ter em consideração que as actividades dos diferentes agentes presentes no sistema podem interferir umas com as outras. Desta forma, é necessário coordenar tais actividades. Existem essencialmente três possibilidades para o planeamento multi-agente [Durfee, 1999]:

- **Planeamento Centralizado de Planos Distribuídos.** Um sistema centralizado de planeamento desenvolve planos para um conjunto de agentes em que a divisão e alocação de tarefas se encontra especificada. O agente central distribui os planos parciais aos restantes agentes que funcionam num nível hierarquicamente inferior (como escravos) e têm a responsabilidade da sua execução;
- **Planeamento Distribuído de um Plano Global.** Um grupo de agentes coopera de forma a gerar um plano global de actividades. Tipicamente, os agentes componentes do sistema vão ser especialistas em diferentes aspectos necessários

para o desenvolvimento do plano global. É usual que os agentes que geram o plano não sejam os mesmos que são responsáveis pela sua execução;

- **Planeamento Distribuído de Planos Distribuídos.** Um grupo de agentes coopera de forma a gerar planos individuais de acção, coordenando dinamicamente as suas actividades ao longo desse planeamento. Os agentes podem ser egoístas e como tal, os conflitos resultantes podem ser resolvidos através das metodologias de negociação analisadas no capítulo anterior.

Claro que também será possível o planeamento centralizado de um plano global, mas neste caso não estaríamos perante um sistema multi-agente. Em geral, o planeamento centralizado é mais simples do que o planeamento distribuído, pois o agente central terá uma visão global do problema e pode definir as relações de coordenação que necessitar. No entanto, este planeamento global nem sempre é possível e muitas vezes não é desejável, seja devido à elevada dimensão do problema, à necessidade de especialistas distintos, à distribuição geográfica dos agentes, ou à necessidade de manutenção de privacidade da informação. O caso mais complexo é o terceiro, em que um plano global pode nunca existir. Neste caso, os agentes produzirão em conjunto, dinamicamente, os planos parciais que serão executados por cada um dos agentes.

### 5.4.1 Planeamento Global Parcial

O *Planeamento Global Parcial* – *PGP* está intimamente ligado com a coordenação por partilha de tarefas e resultados e assenta no princípio que agentes cooperativos realizam troca de informação de forma a chegar a uma solução global para um dado problema. O planeamento para atingir a solução é *parcial* no sentido em que nenhum agente é capaz de gerar um plano completo que permita resolver o problema. É no entanto *global*, no sentido em que os agentes formam planos não-locais através da partilha de planos locais de forma a atingir a resolução do problema global. Este planeamento divide-se em três fases distintas [Durfee e Lesser, 1987] [Durfee, 1988] [Durfee, 1996]:

- **Geração de Objectivos.** Cada agente decide quais os seus objectivos e define planos de curto-prazo que lhe permitam atingir esses objectivos;
- **Troca de Informação.** Os agentes trocam informação relativamente a planos, objectivos e soluções. A troca de informação é essencial para determinar os pontos onde os planos locais dos agentes interactuam com os de outros agentes;
- **Alteração de Planos Locais.** De forma a coordenarem as suas actividades, os agentes alteram os seus planos locais de acordo com a informação disponível.

De forma a evitar a incoerência nos estados locais dos agentes, o *PGP* propõe a utilização de uma estrutura de meta-informação que define quais os agentes que devem trocar informação, qual a informação trocada, quais as pré-condições para esta troca, etc.

O *Planeamento Global Parcial* baseia-se na estrutura designada por *Plano Parcial Global*<sup>19</sup>. Esta é uma meta-estrutura que é gerada cooperativamente por todos os agentes e que contém:

- **Objectivos.** Os objectivos partilhados pela comunidade de agentes e que o plano gerado pelo sistema deve resolver;
- **Mapas de Actividades.** Representando as actividades actuais de cada agente e os resultados esperados dessas actividades;
- **Grafo de Construção da Solução.** Representando a forma como os agentes devem interagir e a informação que devem trocar de forma a gerar a solução final.

O *PGP* foi utilizado num dos primeiros simuladores para teste de Sistemas Multi-Agente: a Bancada de Monitorização Distribuída de Veículos<sup>20</sup>. Este simulador foi desenvolvido com o objectivo de permitir comparar diferentes abordagens à resolução distribuída de problemas. Permitia o teste de agentes de resolução distribuída de problemas, utilizando como problema *standard* o domínio da detecção e monitorização distribuída de veículos. O objectivo consistia em detectar e seguir um conjunto de veículos que passava por uma dada região, monitorizada por um conjunto de sensores distribuídos espacialmente. O domínio de aplicação era essencialmente apropriado para agentes reactivos, pois sempre que um novo veículo aparecia no sistema despoletava um processo de detecção e seguimento. A rapidez de processamento era essencial, uma vez que o domínio era dinâmico e exigia que os agentes rapidamente determinassem as trajectórias dos veículos presentes. Este domínio conduziu à criação do *PGP* que Durfee e Lesser propuseram, de forma a coordenar as actividades dos seus agentes de resolução distribuída de problemas [Durfee e Lesser, 1987] [Durfee, 1988] [Durfee, 1996].

### 5.4.2 Planeamento Global Parcial Generalizado

O *Planeamento Global Parcial* foi posteriormente estendido por Keith Decker que propôs o mecanismo designado por *Planeamento Global Parcial Generalizado*. Este mecanismo utiliza cinco novas metodologias na coordenação das actividades dos agentes [Decker, 1995]:

- **Comunicação de Informação.** A comunicação de informação é realizada com o objectivo de actualizar perspectivas não-locais. Como os agentes possuem unicamente perspectivas locais em ambientes inacessíveis, a partilha de informação pode auxiliá-los a atingir uma visão mais completa do ambiente. A

---

<sup>19</sup> Do inglês *Partial Global Plan*.

<sup>20</sup> Do inglês *Distributed Vehicle Monitoring Testbed*.

quantidade de informação que é comunicada com este fim pode variar de acordo com a política de comunicação definida. Desta forma, é possível comunicar: toda a informação disponível em cada instante (o que dependendo do domínio pode sobrecarregar a rede ou mesmo ser impossível); comunicar uma parte seleccionada da informação (colocando-se a questão de qual o mecanismo a utilizar na sua selecção); ou não comunicar qualquer tipo de informação.

- **Comunicação de Resultados.** Os agentes podem comunicar resultados de vários modos, similares aos modos de comunicação de informação: todos os resultados obtidos; resultados que o agente acredite interessarem a outros agentes; ou unicamente os resultados essenciais para o planeamento;
- **Tratamento da Redundância.** A redundância verifica-se quando dois ou mais agentes resolvem o mesmo problema ou subproblema. No entanto a redundância pode ser deliberada, ou seja, pode ser desejável colocar mais do que um agente a resolver um determinado problema. Este facto é útil para incrementar a fiabilidade e a qualidade da solução obtida. Em geral, a redundância conduz a um desperdício de recursos e, como tal, deve ser limitada. Decker e Lesser [Decker e Lesser, 1995] adoptam um esquema bastante simples no tratamento de redundâncias, baseado em selecção aleatória para efectuar a sua alocação, sendo esta decisão comunicada aos restantes agentes que devem cancelar a execução da actividade em causa;
- **Tratamento de Relações Rígidas de Coordenação.** As relações rígidas de coordenação ocorrem quando a execução de uma dada acção por parte de um agente interfere com a execução de outra acção por parte de outro agente. Um exemplo de uma relação deste tipo poderá ser  $enables(T_1, T_2)$  que indica que o final de uma tarefa  $T_1$  é necessário para que  $T_2$  possa ser executada [Decker, 1995]. Este tipo de relações é evitado através do reescalonamento de acções conflituosas.
- **Tratamento de Relações Flexíveis de Coordenação.** As relações flexíveis de coordenação ocorrem quando a interferência entre acções conflituosas não é crítica para o sucesso das acções (embora possa alterar significativamente a eficiência ou qualidade de execução). O reescalonamento não é aqui obrigatório embora possa ser altamente desejável, dependendo do grau de interferência entre as acções.

Em comparação com o *PGP*, o *Planeamento Parcial Global Generalizado*, acrescenta ainda o escalonamento de tarefas com "*deadlines*", heterogeneidade nos agentes e a comunicação a múltiplos níveis de abstracção. Estas extensões tornam este mecanismo muito mais flexível e utilizável na prática. O mecanismo foi implementado completamente no simulador *TAEMS* [Decker, 1996] analisado na secção 5.5.4.

## 5.5 Modelos de Coordenação

### 5.5.1 Intenções Conjuntas (“*Joint Intentions Framework*”)

A *Teoria das Intenções Conjuntas (Joint Intentions Framework)* foi proposta por Cohen et al. [Cohen et al., 1990] como uma metodologia para a cooperação em Sistemas Multi-Agente. O trabalho relacionado com as intenções conjuntas iniciou-se com a formalização lógica do que são *Intenções Individuais* realizada por Cohen e Levesque [Cohen e Levesque, 1990] baseada na definição de *Intenção* dada por Bratman [Bratman, 1990]. Esta formalização foi designada *Objectivos Persistentes (“Persistent Goals”)* e descreve a forma como as *intenções* de um agente se relacionam com as suas *crenças, compromissos e acções*.

A *Teoria das Intenções Conjuntas* está focada no estado mental conjunto de uma equipa de agentes, designado por *Intenção Conjunta* [Cohen e Levesque, 1991]. Uma equipa  $T$  deseja conjuntamente uma determinada acção de equipa, se todos os seus membros estiverem comprometidos a completar essa acção e simultaneamente acreditam que a estão a realizar. Um compromisso conjunto é definido neste contexto como um *objectivo conjunto persistente (OCP)*. Um dado *OCP* para executar uma dada acção para atingir o objectivo  $p$ , é denotado por  $OCP(p)$ . O *OCP* da equipa para atingir  $p$ , pode ser denotado por  $OCP(T,p,q)$  onde  $q$  é uma condição de irrelevância que permite à equipa abandonar a execução do *OCP* se acreditar que  $q$  é falso. O objectivo conjunto *OCP* permanecerá em execução se todos os membros da equipa acreditarem que existe uma motivação comum  $M$  para realizar  $p$ , esse objectivo  $p$  ainda não foi atingido e  $p$  ainda é realizável.

Um *OCP* é então um compromisso colectivo para realizar a execução de um determinado objectivo. O estado mental de uma equipa de agentes que possui um dado *OCP* pode ser descrito como:

- Inicialmente todos os agentes acreditam que:
  - É possível realizar o objectivo  $p$ ;
  - O objectivo  $p$  ainda não foi realizado;
  - A motivação (justificação)  $M$  para a realização de  $p$  encontra-se presente.
- Todos os agentes da equipa possuem o objectivo  $p$  até que uma condição de terminação  $Z$  seja verdadeira.
- A condição de terminação  $Z$  consiste em que seja mutuamente acreditado que uma das seguintes condições se verifica:
  - O objectivo  $p$  está satisfeito;
  - O objectivo  $p$  é impossível de satisfazer;

- A motivação  $M$  para realizar  $p$  já não se encontra presente.
- Até que a condição  $Z$  seja satisfeita, cada agente:
  - Se acreditar que  $p$  foi atingido, então terá o objectivo de que isto se torne mutuamente acreditado e manterá este objectivo até que  $Z$  se verifique;
  - Se acreditar que  $p$  é impossível, então terá o objectivo de que isto se torne mutuamente acreditado e manterá este objectivo até que  $Z$  se verifique;
  - Se acreditar que a motivação  $M$  já não é válida, então terá o objectivo de que isto se torne mutuamente acreditado e manterá este objectivo até que  $Z$  se verifique;

A *Teoria das Intenções Conjuntas* baseia-se essencialmente no comportamento de equipas humanas. Quando os humanos trabalham em equipa, os estados mentais semelhantes a intenções desempenham um papel importante no comportamento da equipa [Levesque et al., 1990] [Cohen e Levesque, 1991]. Neste contexto, Levesque estudou a distinção entre acções coordenadas cooperativas e acções coordenadas não-cooperativas [Levesque et al., 1990]. Do seu estudo surgiu o conceito de responsabilidade para com os outros membros da equipa. Para além do objectivo global da equipa, partilhado por todos os agentes, surgem os objectivos de cooperação com os outros agentes da equipa. Estes objectivos consistem em informar os restantes elementos: do atingir dos objectivos globais, da impossibilidade de realizar os objectivos globais ou da não validade das justificações para conseguir atingir os objectivos globais.

Jennings estendeu o trabalho de Levesque et al. e distinguiu *compromissos* de *convenções* [Jennings, 1993] [Jennings, 1995]. *Compromissos* são promessas para realizar objectivos enquanto *convenções* são meios de monitorizar o compromisso. As *convenções* especificam as circunstâncias em que os *compromissos* podem ser abandonados e o modo como os agentes se devem comportar se tal se verificar (localmente e relativamente aos restantes membros da equipa).

Quando um grupo de agentes se comporta como uma equipa, deve possuir um *compromisso conjunto* para o objectivo global e *compromissos individuais* para as suas tarefas individuais. Quer o *compromisso conjunto*, quer os *compromissos individuais* devem ser persistentes. O *compromisso conjunto* difere dos individuais, no sentido em que é distribuído por todos os membros da equipa. Uma convenção social (partilhada por todos os agentes) identifica as condições nas quais o *compromisso conjunto* pode ser abandonado e como os agentes se devem comportar para com os seus companheiros de equipa [Jennings, 1993]. A existência de uma convenção social partilhada por todos, permite aos agentes possuir um modelo de referência relativamente ao comportamento cooperativo dos colegas de equipa, que pode ser de extrema utilidade para a definição do seu próprio comportamento.

### 5.5.2 Planos Partilhados (“*Shared Plans*”)

O modelo dos *Planos Partilhados (Shared Plans)* [Grosz e Kraus, 1996] [Grosz e Sidner, 1990], baseia-se numa atitude mental distinta do modelo das *intenções conjuntas*: ter a intenção de realizar uma dada acção [Bratman, 1992] [Grosz, 1996]. Esta intenção é muito similar à intenção de um agente individual realizar uma acção. No entanto, é uma intenção individual que é dirigida para as acções dos restantes elementos da equipa ou para uma acção conjunta global da equipa. A intenção é definida através de um conjunto de axiomas que guia os indivíduos na selecção e execução de acções, incluindo acções de comunicação que facilitem ou permitam aos seus colegas a realização de um conjunto de tarefas [Grosz e Kraus, 1996].

Um plano partilhado pode consistir num *plano completo partilhado (PCP)* ou num *plano parcial partilhado (PPP)*. Um *plano completo partilhado* para realizar uma dada tarefa conjunta  $T$ , consiste numa representação em que todos os aspectos da actividade conjunta  $T$  estão especificados. Isto inclui uma crença e acordo mútuo numa receita  $R_T$  para realizar  $T$ . A receita  $R_T$  especifica um conjunto de acções  $A$ , que quando executadas tendo em conta restrições específicas, constituem a realização de  $T$ .  $PCP(P, G, T, t_p, t_T, R_T)$  denota um plano conjunto  $P$  de um grupo  $G$ , no instante de tempo  $t_p$  para fazer uma acção conjunta  $T$ , até ao tempo  $t_T$ , utilizando a receita  $R_T$ . O *plano completo partilhado*  $PCP(P, G, T, t_p, t_T, R_T)$  será executado se:

- Todos os agentes que pertencem ao grupo  $G$  acreditam que  $R_T$  é uma receita válida para executar  $T$ ;
- Todos os agentes que pertencem ao grupo  $G$  acreditam que todos desejam que o grupo execute  $T$  até ao instante de tempo  $t_T$ ;
- Para cada acção  $A_i$  pertencente ao conjunto  $A$  de acções da receita  $R_T$ :
  - Existe um subgrupo  $G_i$  que possui um *PCP* para  $A_i$  utilizando uma receita  $R_{A_i}$  ou existe um único agente que possui um plano completo individual para realizar essa acção;
  - Os restantes membros do grupo  $G$  acreditam que existe uma receita disponível ao grupo  $G_i$  que permita a este grupo executar  $A_i$  utilizando um dado plano;
  - Os restantes membros do grupo  $G$  desejam que o grupo  $G_i$  consiga executar  $A_i$  utilizando um qualquer plano;

A teoria dos planos partilhados procura deste modo descrever a rede de intenções de toda a equipa no decurso da execução da tarefa cooperativa. Habitualmente, os grupos só possuem planos parciais, o que torna necessário a comunicação e o planeamento, de modo a obter um *PCP*. A diferença principal entre os *PCP* e os *PPP* é que nos segundos as receitas podem não estar completamente especificadas. Tal facto torna-se relevante em



ambientes dinâmicos, como é o caso do futebol robótico, onde a equipa tem de ser reactiva às novas situações que lhe aparecem ao longo do tempo, implicando também a necessidade de alterar estas receitas de execução.

### 5.5.3 Acordo de Balneário (“*Locker Room Agreement*”)

Um dos principais problemas das intenções conjuntas e dos planos partilhados é que a equipa é vista como um conjunto de agentes que negocia ou contrata um plano conjunto a ser executado. A equipa forma-se dinamicamente e comunica livremente até que a execução do seu plano esteja concluída [Stone e Veloso, 1999]. Diversos domínios exigem um esforço de equipa persistente no sentido de atingir objectivos comuns num ambiente com comunicação limitada.

Stone e Veloso [Stone e Veloso, 1999] [Stone, 1998] introduziram o conceito de *locker-room agreement* (*acordo de balneário*) como mecanismo de coordenação de alto-nível útil em domínios com reduzida comunicação. Embora alguns autores [Tambe, 1997] afirmem que a definição de acções pre-determinadas não é suficientemente flexível e robusta a falhas em domínios dinâmicos, o sucesso do *locker-room agreement* num domínio tão dinâmico como os das competições da liga de simulação do futebol robótico veio provar exactamente o contrário<sup>21</sup>.

O mecanismo baseia-se na definição de uma estrutura flexível de equipa baseada em [Stone, 1998]:

- Papéis (*roles*) que especificam o comportamento de um agente individual e mecanismos para realizar a sua troca entre agentes;
- Formações compostas por colecções de papéis e condições para a activação destas formações;
- Planos multi-agente (*set-plays*) para execução em situações específicas.

Esta estrutura, partilhada à partida por todos os membros da equipa, permite-lhes actuar em domínios dinâmicos e com comunicação restringida ou mesmo inexistente. Os papéis especificam o comportamento de um agente individual de modo flexível. As formações decompõem o espaço de tarefas num conjunto de papéis que são posteriormente atribuídos aos vários agentes. Numa equipa de  $n$  agentes,  $T = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ , onde  $a_i$  representa o agente  $i$ , uma formação assume a forma:

$$F = \{R, \{U_1, U_2, \dots, U_k\}\}$$

---

<sup>21</sup> A equipa CMUnited, baseada no *locker-room agreement*, venceu os campeonatos do mundo de futebol robótico simulado de 1998 e 1999, marcando um total de 176 golos, sem sofrer nenhum, nessas duas competições.

Onde  $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_n\}$  tal que  $i \neq j \Rightarrow r_i \neq r_j$  representa um conjunto de papéis.

No *locker-room agreement*, o número de papéis é igual ao número de agentes que compõem a equipa, sendo no entanto possível definir papéis redundantes. Cada unidade  $U_i$  é um subconjunto de  $R$ :  $U_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ik}\}$  tal que  $r_{ia} \in R$ ,  $a \neq b \Rightarrow r_{ia} \neq r_{ib}$  e  $r_{i1}$  é o capitão ou líder da unidade. O mapeamento dos agentes nos papéis,  $T \rightarrow R$ , não é fixo, ou seja, os papéis podem ser preenchidos por diferentes agentes homogéneos. Cada papel pode fazer parte de qualquer formação ou unidade. As unidades são utilizadas para lidar com a resolução de problemas locais, em vez de utilizar toda a equipa num dado subproblema. Os capitães são elementos da equipa com capacidades especiais e são responsáveis por dirigir os membros de uma dada unidade.

O *locker-room agreement* especifica uma formação inicial, um mapeamento inicial dos agentes aos papéis e condições para a realização da mudança automática de formação. Cada agente mantém em memória qual a formação actual da equipa e qual o mapeamento dos agentes aos papéis nessa formação. Como os agentes podem dispor de mapeamentos inexactos  $T \rightarrow R$  os autores desenvolveram comportamentos individuais robustos, que não dependem da exactidão da informação relativa ao mapeamento dos papéis aos agentes [Stone, 1998]. Quando a comunicação não for possível ou for bastante restringida, os agentes procuram utilizar a largura de banda disponível para informar os restantes agentes dos seus papéis, de forma a sincronizar a equipa. Em situações em que seja possível comunicar sem restrições, a equipa sincroniza-se facilmente sendo partilhada a informação relativa a quais os agentes que executam cada um dos papéis [Stone e Veloso, 1999].

Como parte do *locker-room agreement*, a equipa pode definir planos multi-agente compostos por vários passos que serão executados em momentos apropriados. Quando ocorrem frequentemente situações repetitivas, é útil possuir planos pré-definidos para lidar com tais situações. A definição de um plano multi-agente (*set-play*) neste contexto é composta por: uma condição que indica quando o plano deve ser activado; um conjunto de papéis do plano,  $R_p = \{p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{rm}\}$   $m \leq n$ , que define as acções a serem executadas pelos participantes no plano. Cada papel do plano,  $p_{ri}$ , inclui o comportamento a ser executado pelo agente e uma condição de término que indica o estado em que o agente deverá cessar a execução do papel do plano e regressar ao seu comportamento normal. Os planos são definidos como parte do *locker-room agreement* de modo a serem conhecidos *a priori* por todos os agentes da equipa.

O *locker-room agreement* foi aplicado com amplo sucesso por Stone et al. ao futebol robótico simulado [Stone et al., 2000a]. Na aplicação prática deste método de coordenação a um domínio tão complexo como o futebol robótico, foi visível que parte dos conceitos teóricos não foi utilizada na prática. Por exemplo, a troca dinâmica de papéis, embora

constitua um método de coordenação potencialmente útil no futebol robótico simulado, não foi aplicada na prática no âmbito da equipa CMUnited<sup>22</sup>.

Uma das principais limitações do *locker-room agreement* está relacionada com a definição de um número de papéis idêntico ao número de agentes. Este facto, não permite definir papéis reutilizáveis por diversos membros da equipa. Por outro lado, no trabalho de Stone e Veloso [Stone e Veloso, 1999], a formação é definida como um mapeamento de agentes a papéis, não correspondendo ao conceito tradicional de formação, encontrada nos desportos colectivos ou aplicações militares, isto é, uma distribuição espacial dos agentes. Se por um lado, este facto permite a utilização deste conceito em domínios que não impliquem a distribuição espacial dos agentes, por outro lado a flexibilidade do conceito original é perdida. Torna-se impossível definir formações sem associar a cada posição espacial um comportamento predefinido. Em domínios que impliquem a utilização de um elevado número de agentes, como por exemplo cenários de guerra, a definição de uma formação implica a especificação de centenas ou milhares de papéis, cada um dos quais definindo completamente o comportamento do agente (incluindo o seu posicionamento espacial).

#### 5.5.4 TAEMS Framework

O *TAEMS – Task Analysis, Environment Modeling and Simulation*, é um esquema para modelizar ambientes com tarefas computacionais complexas nas quais podem ser utilizadas abordagens baseadas em agentes [Decker, 1996]. O esquema permite representar, de modo independente do domínio, problemas complexos de coordenação de agentes [Prasad e Lesser, 1999]. Permite analisar e simular quantitativamente o comportamento de um Sistema Multi-Agente no que diz respeito a características relevantes do ambiente computacional de que fazem parte. O *TAEMS* é deste modo, não só uma linguagem que permite especificar as características de um SMA mas também um sistema de simulação que permite demonstrar graficamente as tarefas, acções dos agentes e dados estatísticos.

O *TAEMS* suporta uma descrição em camadas das características do ambiente e da tarefa [Decker, 1995] [Decker, 1996], sendo estas camadas as seguintes:

- **Nível Objectivo.** A parte objectiva ou real descreve o essencial da estrutura de tarefas e ambiente. É essencialmente uma descrição formal da tarefa sem informação sobre os agentes em particular;

---

<sup>22</sup> De facto, no trabalho de Stone e Veloso, não foram especificados protocolos que permitam a troca ou atribuição dinâmica de papéis aos agentes. Acresce a este facto que este método não foi utilizado em competições oficiais ou incluído nos binários da equipa CMUnited disponibilizados pelos autores [Stone et al., 1999].

- **Nível Subjectivo.** Descreve a forma como os agentes vêem e interagem com a tarefa a executar ao longo do tempo. Inclui o modo como os agentes se apercebem do estado do mundo.
- **Nível Generativo.** Descreve as características estatísticas necessárias para gerar a informação objectiva e subjectiva num dado domínio. Este nível permite gerar diferentes problemas com as mesmas características evitando instâncias únicas.

O nível subjectivo é essencial para a avaliação do raciocínio dos agentes, pois estes realizam as suas decisões baseados unicamente em informação subjectiva. O desempenho do sistema em geral e dos agentes em particular pode ser aferido, tendo como base informação objectiva. O nível objectivo descreve a estrutura essencial de um dado problema ao longo do tempo. Está centrado na forma como as relações e dependências entre as tarefas afectam dinamicamente a qualidade e duração de cada tarefa.

Um problema de coordenação é representado no *TAEMS*, como um conjunto de grupos de tarefas. Cada grupo de tarefas *GT* representa um conjunto de acções interrelacionadas e possui um tempo de chegada  $Ar(T)$  e um tempo limite (*deadline*)  $D(T)$ . A estrutura de um grupo de tarefas é representada como uma árvore em que cada nó corresponde a uma tarefa  $T$ . A figura 30, representa um exemplo de uma estrutura de tarefas *TAEMS*. A árvore de tarefas é composta por uma tarefa inicial (tarefa raiz) que se decompõe sucessivamente em subtarefas. As tarefas que se encontram nas folhas da árvore são os métodos executáveis  $M$ . Embora a estrutura de tarefas seja semelhante a uma árvore, devido à possível existência de relações arbitrárias entre as tarefas, esta estrutura é na realidade um grafo.

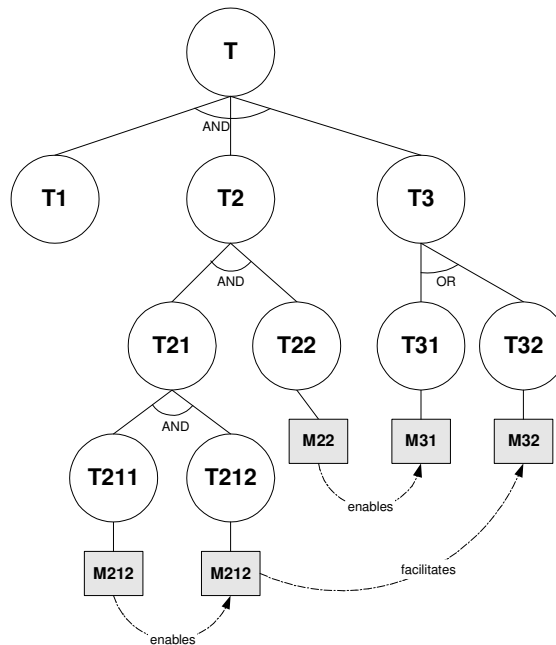


Figura 30: Exemplo de uma Estrutura de Tarefas *TAEMS*

A utilização do esquema *TAEMS* na modelização de ambientes com tarefas complexas, inicia-se através da construção de um modelo do ambiente. Decker [Decker, 1995] [Decker, 1996] sugere a construção inicial de uma instância do problema utilizando os níveis objectivo e subjectivo, utilizando-a então como base para a construção do nível generativo. O esquema *TAEMS* providencia diversas funções (*max*, *min*, *mean* e *sum*), efeitos predefinidos para tarefas (*enables*, *precedes*, *facilitates* e *hinders*) e recursos (*uses* e *limits*). No entanto, podem ser definidas novas funções, efeitos e recursos, estendendo este conjunto. De seguida, as acções dos agentes devem ser especificadas de modo formal. O *TAEMS* disponibiliza uma meta-estrutura para as transições de estado dos agentes, dividida em quatro partes: controlo, recolha de informação, comunicação e execução de métodos. A parte do controlo define o modo como as outras partes (recolha, comunicação execução) são executadas ao longo do tempo. Diversas acções predefinidas de recolha de informação e comunicação são disponibilizadas. Por exemplo, as acções de comunicação predefinidas incluem a transmissão do resultado corrente de um método ou tarefa, partes da estrutura de uma tarefa e comunicações de meta-nível. Relativamente à execução dos métodos, o *TAEMS* suporta execução sequencial simples, execução com monitorização, suspensão, interrupção temporária, etc.

A avaliação do desempenho no âmbito do *TAEMS* é baseada no tempo de execução das tarefas e na qualidade dos resultados dessa execução [Decker, 1995]. A qualidade dos resultados é definida propositadamente de forma vaga, de maneira a que possa ser utilizada na avaliação de qualquer ambiente, utilizando critérios distintos [Decker, 1995]. Consiste num valor escalar que define a completude, utilidade, precisão ou exactidão de um dado resultado, ou outro aspecto desejável para efectuar a avaliação de uma tarefa.

### 5.5.5 *STEAM – simply a Shell for Teamwork*

O modelo de coordenação, ou trabalho de equipa como os autores [Tambe, 1997] preferem chamar-lhe, *STEAM (simply, a Shell for Teamwork)* é baseado na teoria das intenções conjuntas [Levesque et al., 1990] [Cohen e Levesque, 1991] e na teoria dos planos conjuntos [Grosz, 1996, Grosz e Kraus, 1996]. Utiliza como blocos básicos do trabalho em equipa as intenções conjuntas. Tal como na teoria dos planos partilhados, os agentes possuem uma descrição hierárquica, multi-resolução e complexa, de intenções conjuntas, intenções individuais e crenças acerca das intenções dos outros [Tambe, 1997].

Uma das características relevantes do modelo *STEAM* consiste no vasto e complexo conjunto de capacidades de trabalho de equipa em que se baseia e no tipo de domínios em que foi aplicado com sucesso. Os domínios analisados, ao contrário da grande maioria em que as metodologias anteriores foram aplicadas, possuem como principais características:

- Equipas numerosas, compostas por um vasto conjunto de agentes;
- Domínios abertos (dinâmicos, inacessíveis, não-determinísticos e contínuos);

- Organizações de equipa complexas e hierárquicas;
- Distribuição espacial dos agentes;
- Comunicação restringida e com reduzida largura de banda entre os agentes.

Muito bons resultados foram relatados pelos autores desta metodologia em diversos domínios, de entre os quais se destacam: cenários de batalha, transporte multi-robô e futebol robótico simulado. Relativamente ao domínio do futebol robótico simulado, verifica-se que o modelo obteve resultados dignos de registo unicamente em 1997, numa altura em que os jogos se disputavam ainda sem cooperação visível entre os elementos das equipas. Na competição RoboCup, de 1997 até 1999, verificou-se que todas as equipas, incluindo as equipas vencedoras, desenvolviam as suas acções de ataque através de investidas individuais dos seus agentes sem que se verificassem passes ou outro tipo de movimentos colectivos. Pode-se argumentar que os resultados obtidos pela equipa baseada no modelo *STEAM*<sup>23</sup> tiveram como causa fundamental as capacidades individuais dos seus agentes e não a adequação do modelo de coordenação e trabalho de equipa ao domínio do futebol robótico simulado<sup>24</sup>.

## 5.6 Coordenação sem Comunicação

### 5.6.1 Coordenação por Modelização Mútua

Uma outra abordagem à coordenação de agentes baseada em técnicas de coordenação de humanos corresponde à coordenação por modelização mútua. Cada agente cria um modelo de cada um dos outros agentes da sua equipa. Este modelo permite que o agente se coloque no lugar de um outro agente e possa prever quais serão as suas acções em determinada circunstância. Do modelo devem constar as crenças, intenções, desejos, capacidades, e qualquer outra informação relevante sobre cada um dos outros agentes a modelar.

A coordenação por modelização mútua foi sugerida inicialmente por Genesereth et al., e é baseada em modelos derivados da teoria dos jogos, no seu trabalho sob o tema “cooperação sem comunicação”<sup>25</sup> [Genesereth et al., 1986]. No seu trabalho, cada agente

---

<sup>23</sup> A equipa *ISIS*, baseada no modelo *STEAM*, obteve o terceiro lugar em 1997 e o quarto lugar em 1998 na competição RoboCup.

<sup>24</sup> No entanto, os autores argumentam o contrário baseados exactamente nestes mesmos resultados [Marsella et al., 2001] mas ocultando o facto de não existir real cooperação entre os seus agentes no desenvolvimento dos movimentos ofensivos da equipa.

<sup>25</sup> “Cooperation without Communication”

dispunha da informação relativa às preferências dos outros agentes, e como tal podia estimar qual a acção racional que estes deveriam executar em cada instante.

Les Gasser utilizou também um tipo de cooperação semelhante, no âmbito do seu sistema *MACE* [Gasser et al., 1987]. O sistema *MACE* foi um dos primeiros ambientes de teste desenvolvidos para Sistema Multi-Agente. Contém cinco componentes principais:

- Agentes de aplicação;
- Agentes de sistema predefinidos (por exemplo interfaces com o utilizador);
- Serviços disponíveis a todos os agentes;
- Base de dados (com descrições dos agentes); e
- Conjunto de *kernels* que tratam das comunicações físicas em cada máquina a executar o sistema.

No seu estudo, Gasser identificou três aspectos essenciais dos agentes: contêm conhecimento; têm percepção do ambiente; e possuem capacidade para executar acções nesse ambiente. Dividiu também o conhecimento de cada agente em dois tipos [Gasser et al., 1987]: conhecimento local e especializado do domínio; e conhecimento sobre os outros agentes (*acquaintance knowledge*). Este conhecimento dos outros agentes permite a execução de cooperação por modelização mútua e inclui os seguintes tópicos:

- **Classe.** Os agentes *MACE* encontram-se organizados em grupos designados por classes;
- **Nome.** Cada agente possui um nome único na classe. O par (classe, nome) identifica cada um dos agentes;
- **Papéis.** Descrevem as funções dos agentes no interior de cada classe;
- **Capacidades (*Skills*).** Capacidades dos outros agentes, em termos das funções e tarefas que são capazes de executar ou recursos que são capazes de providenciar;
- **Objectivos (*Goals*).** Objectivos dos outros agentes;
- **Planos.** Perspectiva do agente sobre a forma como os outros agentes irão atingir os seus objectivos. É descrita como uma lista de capacidades (*skills*) e operações, que o agente irá executar para conseguir os seus objectivos.

A utilização de modelos dos outros agentes na construção de um SMA foi também utilizada no âmbito do projecto *ARCHON* (*ARchitecture for Cooperative Heterogeneous ON-line systems*) [Wittig et al., 1994] [Oliveira et al., 1992]. O projecto *ARCHON* foi o maior projecto europeu que se realizou na área da Inteligência Artificial Distribuída. No seu âmbito foi definida uma arquitectura genérica de agentes (figura 31) e uma metodologia adequada à definição de sistemas baseados em IAD para um elevado número de problemas industriais reais. Duas destas aplicações (gestão da distribuição de energia eléctrica e controlo de um acelerador de partículas) foram aplicadas com sucesso nas

organizações reais para que foram desenvolvidas (respectivamente Iberdrola no norte de Espanha e CERN – Centro Europeu para a Investigação em Física de Alta-Energia em Genebra).

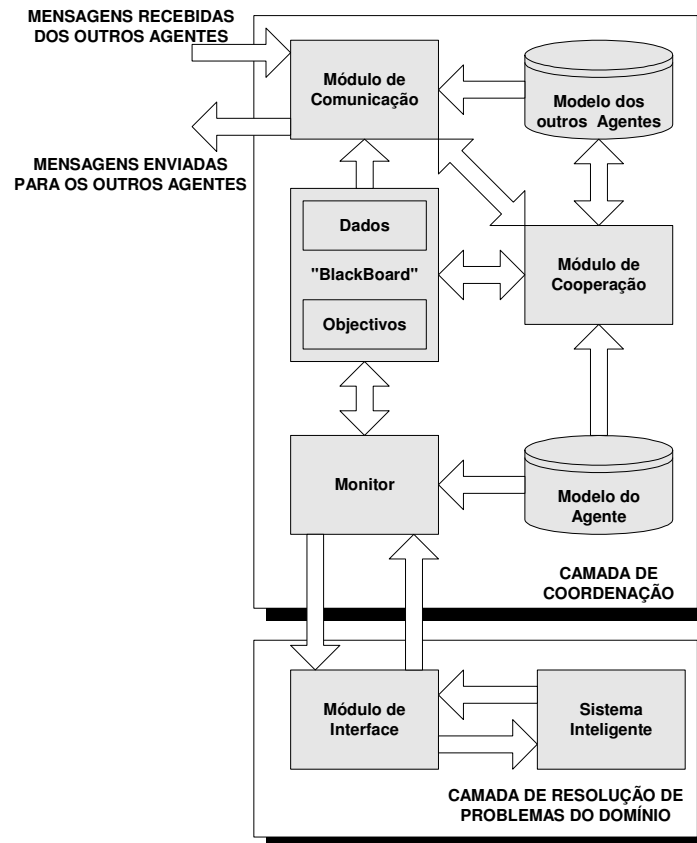


Figura 31: Arquitectura dos Agentes ARCHON

Uma das características mais interessantes do projecto ARCHON foi o desenvolvimento de uma arquitectura genérica para agentes semi-autónomos de *software* [Wittig et al., 1994]. Uma comunidade de agentes ARCHON não possuía deste modo qualquer tipo de controlo centralizado e cada agente era responsável por decidir a sua própria agenda e gerir as interacções com os outros agentes da comunidade. Para o fazer, a arquitectura possuía os componentes necessários para realizar coordenação por modelização mútua. De facto, cada agente, para além de possuir informação e conhecimento de resolução de problemas num dado domínio, possuía também um modelo próprio e um modelo de todos os outros agentes presentes na comunidade (*acquaintance models*) [Wittig et al., 1994] [Mouta, 1996]. O módulo de planeamento e coordenação dos agentes era então responsável por utilizar esta informação e decidir as acções e comunicações a executar em cada instante.



## 5.6.2 Coordenação por Percepção Inteligente

Diversas metodologias de utilização inteligente dos sensores de um agente foram propostas por investigadores da área. Por exemplo, os conceitos de visão activa e percepção activa existem já desde a década de 80 [Bajcsy, 1988] [Aloimonos et al., 1998]. Outros autores introduziram metodologias distintas com o objectivo de efectuar uma utilização inteligente dos sensores de um agente, como é o caso das metodologias de fusão sensorial (em que informações provenientes de diferentes tipos de sensores são fundidas de forma inteligente).

A utilização de percepção para a coordenação de equipas de agentes é uma metodologia relativamente recente. Baseia-se numa extensão dos trabalhos de coordenação sem comunicação de Balch e Arkin [Balch e Arkin, 1994]. No seu trabalho, Balch e Arkin analisam situações em que a comunicação pode não ser particularmente útil para a cooperação entre agentes e investigam três tipos de tarefas multi-agente:

- *Foraging*, em que os agentes procuram resgatar objectos de uma arena;
- *Consuming*, onde os agentes encontram objectos e utilizam-nos no local onde foram encontrados; e
- *Grazing*, em que as trajectórias seguidas pelos agentes têm de cobrir completamente a área da arena.

Neste estudo foram usados três níveis de comunicação: nenhuma comunicação; comunicação do estado interno; comunicação dos objectivos. Uma das conclusões obtidas é que o tipo de tarefa cooperativa a realizar afecta consideravelmente o desempenho dos diversos esquemas de comunicação. Nomeadamente na tarefa de *grazing*, a comunicação do estado interno ou dos objectivos não melhora significativamente o desempenho da equipa. Este resultado é atribuído ao facto de existir uma *comunicação implícita*, que é provocada pela mudança do estado do mundo, gerada pelas acções dos agentes. Como neste domínio os agentes deixavam um rasto nos locais onde passavam, existe uma comunicação implícita na geração deste rasto e na sua visualização pelos outros agentes [Balch e Arkin, 1994].

Estendendo o trabalho de Balch e Arkin, é possível incrementar a coordenação através da utilização inteligente dos sensores. Os sensores podem ser utilizados no seguimento das acções realizadas por outros agentes sobre o mundo. A coordenação por percepção inteligente baseia-se exactamente neste princípio. Consiste na utilização de acções de controlo dos sensores do agente de forma a analisar melhor as acções realizadas pelos outros agentes e facilitar a execução de acções cooperativas. Este tipo de coordenação foi sugerido por Reis e Lau [Reis e Lau, 2001a] e aplicado no contexto do controle inteligente dos sensores de um agente do futebol robótico simulado. O objectivo consiste em utilizar as acções de percepção do agente de forma a aumentar a coordenação da equipa, maximizando as hipóteses de cooperação com os restantes elementos da equipa. No seu

trabalho, Reis [Reis, 2001] [Reis, 2001c] [Reis, 2002f] concluiu que a utilização deste mecanismo em conjunto com a coordenação por modelização mútua e com alguns mecanismos seleccionados de coordenação por organização estrutural, permite coordenar uma equipa de agentes sem utilizar qualquer mecanismo de comunicação. Reis propõe ainda uma arquitectura de agente capaz de suportar a coordenação por percepção inteligente e uma implementação deste mecanismo adequada ao controlo de um pescoço flexível no futebol robótico simulado, designada por *SLM – Strategic Looking Mechanism* [Reis e Lau, 2001a] [Reis, 2002f]. No capítulo nove, este mecanismo de coordenação e a sua aplicação ao futebol robótico será descrito com maior detalhe e resultados experimentais, do seu impacto no desempenho de uma equipa, serão analisados.

## 5.7 Coordenação por Organização Estrutural

No contexto de Sistemas Multi-Agente uma estrutura organizacional pode ser vista como a definição do fluxo de informação e das relações de controlo entre os diversos agentes. Estas relações de controlo, independentemente do seu tipo, são responsáveis por definir a autoridade relativa dos agentes e formatar os tipos de interacção social que possam ocorrer [Jennings, 1996]. Por exemplo, na modelização de uma determinada empresa de distribuição utilizando um Sistema Multi-Agente, o projectista pode optar por atribuir a distribuição de diferentes produtos a diferentes agentes ou pode optar por atribuir diferentes regiões espaciais de distribuição a diferentes agentes. O tipo de interacções entre os agentes resultantes das duas opções é completamente distinto. As relações especificadas pelas estruturas organizacionais fornecem informação de longo-prazo sobre a comunidade de agentes e a sua forma de operação como um sistema. Assim, define-se uma coordenação por organização estrutural especificando que, acções são executadas pelos diferentes agentes e que tipo de comunicação existe entre eles.

Diversos autores utilizam uma terminologia distinta, nomeadamente através da utilização do termo *estratégias* para designar a especificação do comportamento global de um agente ou grupo de agentes [Reis et al., 2001] [Singh, 1990] e do termo *papéis* para designar o comportamento de um agente individual [Werner, 1989] [Stone e Veloso, 1999] [Reis e Lau, 2001a] [Reis et al., 2000]. Por vezes, estes conceitos encontram-se interrelacionados como no trabalho de Reis [Reis, 2002f] que define *estratégias* compostas por *táticas* que por sua vez são compostas por *formações* que atribuem a cada agente um *posicionamento* e um *papel*.

Shoham e Tennenholtz [Shoham e Tennenholtz, 1992] utilizam uma forma de organização distinta que designam por *lei social*. Na sua abordagem, a sociedade adopta um conjunto de leis (por exemplo, leis de trânsito) que especificam como é que os diferentes agentes se devem comportar. Os agentes são projectados de modo a obedecerem a essas leis sociais.

O processo de projecto dos agentes é simplificado uma vez que é assumido que todos irão respeitar essas leis sociais.

Embora as organizações estruturais sejam assumidas como estruturas de longo-prazo, por vezes é necessário alterá-las frequentemente. Malone [Malone, 1987] demonstrou que diferentes organizações estruturais são adequadas a diferentes situações, o que torna importante o conceito de situação e a alteração da organização estrutural em face da situação. A situação tem de envolver toda a comunidade e, como tal, tem de ser reavaliada frequentemente, bem como, tem de ser acreditada por todos os elementos da comunidade. De acordo com a situação, a comunidade pode rearranjar a sua estrutura de forma a melhor se adaptar à execução da sua tarefa cooperativa na nova situação. Trabalhos relacionados com a reorganização estrutural dinâmica de sociedades ou equipas de agentes incluem face de novas situações incluem [Ishida et al., 1990] e [Reis et al., 2001].

### 5.7.1 Coordenação por Normas e Leis Sociais

A coordenação por normas e leis sociais inspira-se em modelos humanos e deriva da disciplina da sociologia. Uma *norma* corresponde a um padrão de comportamento preestabelecido. Uma *lei social* tem um significado semelhante mas inclui em si própria uma noção de autoridade. Na sociedade, os exemplos de normas e leis sociais são abundantes. Por exemplo, uma *norma* consiste na regra assumida por todos de que: “numa paragem de autocarro, quem chega primeiro será o primeiro a entrar no autocarro” [Wooldridge, 2002]. Não existe qualquer autoridade que verifique esta norma pelo que são os próprios agentes a regularem os seus comportamentos de modo a obedecerem à norma. Uma *lei social* pode, por exemplo, corresponder à necessidade de pagar a conta no final de um jantar no restaurante. Existe uma autoridade, no caso a polícia, que tem o poder de verificar se a lei é obedecida e aplicar sanções ao agente em caso contrário. Neste mesmo exemplo, uma *norma* poderá consistir em dar uma gorjeta ao empregado (habitual em vários países, incluindo Portugal).

As *normas e leis sociais* providenciam aos agentes um modo de coordenarem as suas acções, através da estruturação dessas mesmas acções, fornecida pelo modelo da norma ou lei. Representam restrições de comportamento que podem limitar a liberdade dos agentes na escolha das suas acções. Implicam um balanceamento entre a execução de acções, de modo a atingir os seus objectivos, e execução de acções de modo a respeitar as leis sociais. Como todas as restrições, as leis sociais permitem ao agente limitar o número de cursos de acção possível, simplificando o seu processo de decisão.

As normas e leis sociais podem existir dentro de um Sistema Multi-Agente de duas formas:

- **Projectadas *off-line*.** Nesta abordagem as leis sociais são definidas à-priori e implantadas no interior dos agentes;

- **Emergentes *on-line*.** Nesta abordagem as leis sociais emergem do funcionamento do próprio sistema e são adquiridas no decurso da sua operação pelos agentes;

Evidentemente que a primeira abordagem é mais fácil de implementar e permite ao projectista do sistema possuir um maior controlo sobre o seu modo de operação. A aquisição de leis sociais *on-line* possui a grande vantagem de permitir adquirir leis sociais desconhecidas ou inexistentes à partida, sendo deste modo adequada para a utilização em ambientes abertos tais como a Internet ou ambientes derivados do mundo-real.

### 5.7.2 Coordenação por Conhecimento à-Priori

A coordenação por conhecimento à-priori engloba grande parte da investigação realizada no âmbito da coordenação por normas e leis sociais projectadas *off-line*. O conceito de coordenação por conhecimento à-priori é mais abrangente pois este conhecimento não se limita a normas e leis sociais, podendo incluir estruturas mais complexas como sejam tácticas, formações espaciais, modelos de outros agentes (colegas e/ou agentes hostis), planos flexíveis, etc.

Neste contexto, Stone e Veloso [Stone, 1998] [Stone e Veloso, 1999] propuseram a utilização de um esquema de coordenação designado por *acordo de balneário* (*locker-room agreement*) descrito anteriormente na secção 5.5.3.

Reis et al. [Reis et al., 2001] [Reis e Lau, 2001] propõem a utilização de conhecimento à-priori para definir a estratégia de uma equipa de futebol (robótico) e baseiam a coordenação da equipa FC Portugal de futebol robótico neste princípio. No seu trabalho, Reis define que o conhecimento necessário para uma equipa disputar uma partida de futebol inclui [Reis, 2002f]:

- **Regiões.** Tendo em conta que o futebol implica a movimentação espacial dos agentes é importante que estes possuam uma definição comum das diversas regiões do campo;
- **Situações.** Contendo a definição lógica de situações que possa implicar uma mudança de comportamento dos agentes;
- **Formações.** Contendo distribuições espaciais e formas de movimentação de todos os agentes que compõe a equipa;
- **Modelos dos Colegas.** Modelos dos colegas de equipa de forma a permitir a realização de coordenação por modelização mútua;
- **Modelos dos Adversários.** Modelos dos jogadores adversários de forma a permitir a realização de coordenação por modelização mútua;
- **Modelo da Equipa Adversária.** Este modelo permite uma definição do comportamento esperado da equipa oponente que é utilizada na definição da

estratégia da equipa e no decurso do jogo na alteração da tática em utilização;

- **Planos Flexíveis.** Utilizados em situações de jogo e que permitem a execução de uma determinada tarefa colectiva;
- **Estratégias de Comunicação.** Utilizadas para permitir diferentes tipos de comunicação entre os agentes que compõem a equipa;
- **Papéis.** Contendo comportamentos individuais de cada agente. Cada agente possui uma biblioteca de papéis e em cada instante desempenha um único papel;
- **Táticas.** Contendo a definição do comportamento global da equipa e a utilização das formações, papéis, planos e estratégias de comunicação no seu âmbito. Cada tática possui determinadas condições de activação e implica a utilização de formações distintas para situações distintas.

Reis e Lau [Reis e Lau, 2001] aplicaram com sucesso este tipo de coordenação no futebol robótico no âmbito da equipa FC Portugal e estenderam o conceito para aquilo que designaram de coordenação estratégica. Uma descrição mais detalhada deste trabalho pode ser encontrada no capítulo 9.

Outros trabalhos, relacionados com a coordenação por conhecimento *a priori*, incluem a definição de linguagens que permitam descrever informação e conhecimento que serão partilhados inicialmente por um conjunto de agentes e que serão úteis ao longo da execução da tarefa cooperativa para coordenar esses mesmos agentes. No âmbito do futebol robótico, Reis e Lau definiram uma linguagem COACH UNILANG que permite a definição de uma estratégia para uma equipa que vai disputar um jogo de futebol [Reis e Lau, 2002]. Esta linguagem para além de permitir definir táticas de futebol, permite também a coordenação por controlo parcialmente hierárquico, como será analisado na secção seguinte e no capítulo nove.

No domínio do escalonamento na gestão universitária, Reis e Oliveira [Reis e Oliveira, 2001] desenvolveram uma linguagem, SCHEDULING UNILANG que permite a definição de problemas de escalonamento, incluindo não só os seus dados mas também restrições, funções de avaliação e soluções. Esta linguagem foi aplicada com sucesso no âmbito do sistema UNIPS – *University Planning and Scheduling System* na definição de problemas de horários e problemas associados no âmbito de um Sistema Multi-Agente [Reis, 1999].

## 5.8 Coordenação por Controlo Parcialmente Hierárquico

As metodologias de coordenação definidas anteriormente pressupõem que os agentes envolvidos são completamente autónomos, no sentido da inexistência de uma hierarquia

entre eles. No entanto, em grande parte dos sistemas sociais humanos tal não se verifica. Estes sistemas são normalmente compostos por agentes a diferentes níveis de hierarquia, que possuem uma dose considerável de autonomia. Suponha-se um exemplo de uma sociedade humana em que um empregado de uma determinada organização recebe uma ordem do seu patrão para escrever um determinado relatório. Provavelmente, a sua reacção será aceitar a ordem e escrever tal relatório desde que possua capacidade, tempo e recursos suficientes para o fazer. Suponha-se um outro exemplo em que o mesmo empregado recebe uma ordem do patrão para incendiar o edifício onde se encontram. Provavelmente, embora possua capacidade, tempo e recursos suficientes para o fazer, o empregado não o realizará. Este facto deve-se a que este agente possui autonomia suficiente para tomar as suas próprias decisões e a ordem recebida provavelmente não conduzirá ao cumprimento dos seus objectivos individuais na empresa (salário elevado, promoções, etc.) nem dos objectivos globais da empresa (crescimento da companhia, lucro, etc.).

Para não violar a noção de autonomia, as ordens recebidas de agentes hierarquicamente superiores não podem ser tomadas como ordens absolutas por parte de agentes autónomos. Sobretudo, se estas ordens ou instruções estão em conflito com as intenções do agente, coloca-se a questão de como pode ser integrada a informação enviada pelo agente hierarquicamente superior, de modo consistente, no conjunto de crenças e intenções do agente.

A ideia da coordenação parcialmente hierárquica não é em si inovadora. McCarthy sugeriu há mais de 40 anos a ideia de integração de instruções provenientes de uma fonte externa [McCarthy, 1958]. No entanto, poucas metodologias foram desenvolvidas para permitir este tipo de coordenação entre agentes com posições hierarquicamente distintas. De entre os trabalhos relevantes na área destacam-se [Grosf, 1995] e [Carpenter et al., 2003]. Grosf analisou o processo de gestão de instruções conflituosas e definiu quatro critérios para determinar a forma de resolução do conflito [Grosf, 1995]:

- **Especificidade.** As instruções mais restritivas são seguidas com maior prioridade;
- **Novidade.** As instruções mais recentes são seguidas com maior prioridade;
- **Autoridade.** As instruções de agentes hierarquicamente superiores são seguidas com maior prioridade;
- **Fiabilidade.** As instruções que conduzem a uma probabilidade de sucesso são seguidas com maior prioridade.

Carpenter et al. [Carpenter et al., 2003] estenderam o trabalho de Grosf e propuseram uma metodologia para integrar instruções de um treinador numa arquitectura de selecção de acções e aplicam esta metodologia experimentalmente no contexto do seu treinador (*OWL*) e da sua equipa (*ChaMeleons2001*) de futebol robótico simulado. Esta equipa

utiliza uma arquitectura hierárquica de comportamentos que contém três componentes principais na selecção de acções: comportamentos individuais de baixo-nível; gestor de comportamentos; e árbitro de comportamentos. No seu trabalho, utilizam um conjunto de comportamentos organizados hierarquicamente, em que cada comportamento possui um conjunto de condições de aplicabilidade e uma probabilidade de sucesso. O gestor de comportamentos, sempre que recebe instruções de uma fonte externa, integra essas instruções no local apropriado da árvore de comportamentos. O árbitro de comportamentos é uma função que selecciona em cada instante um único comportamento, de entre os possíveis, para execução.

Embora os resultados experimentais publicados em [Carpenter et al., 2003] tenham sido impossíveis de comprovar experimentalmente no nosso laboratório<sup>26</sup>, este trabalho não deixa por isso de ser relevante na definição de metodologias de controlo parcialmente hierárquico, nomeadamente na perspectiva de como um agente deve lidar com instruções pouco fiáveis provenientes de diversas fontes.

A um nível de abstracção mais elevado, Reis definiu um modo de coordenação por controlo parcialmente hierárquico, no âmbito da utilização do treinador *on-line* no futebol robótico [Reis e Lau, 2001] [Reis e Lau, 2002]. No âmbito do seu trabalho definiu uma linguagem que permite a esse treinador de futebol robótico simulado coordenar uma equipa de agentes autónomos, através de um controlo parcialmente hierárquico realizado através do envio de instruções aos jogadores [Reis e Lau, 2001] [Reis e Lau, 2002]. As instruções referem-se a táticas, formações e outras definições de alto-nível do comportamento individual de um jogador ou colectivo da equipa.

## 5.9 Coordenação Estratégica

A coordenação estratégica é baseada na coordenação por conhecimento *a priori*, podendo ser considerada uma instanciação desta. Baseia-se na definição de uma estratégia que é composta por um conjunto de táticas, que implicam diferentes formas de actuação da equipa como um todo. Cada tática utiliza um conjunto de formações. Dependendo da situação global, a formação mais adequada é seleccionada em cada instante. Cada formação atribui a cada agente um papel e, no caso de domínios espaciais, um esquema de posicionamento dinâmico.

Na aplicação da coordenação estratégica torna-se essencial:

- A criação de uma biblioteca de táticas e, no caso de domínios espaciais,

---

<sup>26</sup> Ao contrário do que os autores afirmam em [Carpenter et al., 2003], as experiências realizadas no nosso laboratório provaram que o treinador *OWL* piora o comportamento de todas as equipas referidas em [Carpenter et al., 2003].

formações adequadas ao domínio;

- O conceito de situação e a definição de situações facilmente identificáveis pelos agentes que permitam efectuar a troca dinâmica de táticas e formações;
- O conceito de papel como forma de definição do comportamento individual de um jogador como parte da equipa;
- A definição de papéis adequados à tarefa cooperativa a realizar, e de mecanismos que permitam aos agentes uma troca dinâmica de papéis.
- A definição de mecanismos que permitam a degradação suave de táticas e formações, no caso de as perspectivas distintas dos agentes os levarem a identificações distintas da situação;
- A definição de mecanismos de posicionamento flexíveis, dinâmicos e adequados ao domínio;

Podem ser enumerados três tipos de coordenação essenciais à aplicação da coordenação estratégica a domínios dinâmicos:

- Coordenação Situacional (Temporal);
- Coordenação Espacial por Posicionamento Estratégico;
- Coordenação por Definição e Troca de Papéis.

Claro que a coordenação espacial por posicionamento estratégico só faz sentido em domínios em que os agentes possuem uma distribuição espacial ou geográfica tais como o futebol robótico (simulado ou não), o resgate e salvamento, cenários de guerra, limpeza de minas, etc. Uma análise mais detalhada da coordenação estratégica, seus domínios de aplicação e sua aplicação prática ao futebol robótico simulado, encontra-se no capítulo nove.

### **5.9.1 Coordenação Situacional (Temporal)**

A coordenação situacional consiste na definição de situações que podem facilmente ser identificadas através do estado do mundo incompleto de agentes que operam em ambientes inacessíveis, dinâmicos e com comunicação limitada e insegura. Estas situações podem posteriormente ser utilizadas como eventos de coordenação, nomeadamente, no âmbito de um esquema de coordenação estratégica para realizar a transição entre táticas e formações. Exemplos de situações no domínio do futebol são o ataque, defesa, marcação de um livre ou pontapé de baliza.

Reis [Reis, 2002f] propõe uma metodologia para definir situações no âmbito do futebol robótico simulado e uma forma simples de degradação da situação de forma a evitar transições bruscas nas táticas e formações utilizadas pelos agentes constituintes de uma dada equipa.



## 5.9.2 Coordenação Espacial por Posicionamento Estratégico

Uma das principais carências da maioria dos tipos e modelos de coordenação analisados, consiste no facto de não tratarem convenientemente a coordenação espacial de agentes, que possuem capacidades de movimentação no espaço. A movimentação de agentes surge em muitos domínios, como sejam, a maioria dos domínios que incluem robôs móveis, domínios de guerra (ou simulação de batalhas), futebol robótico (real e simulado), resgate e salvamento, etc.

A coordenação espacial por posicionamento consiste em definir um esquema flexível de movimentação de uma equipa de agentes no espaço que lhes permita executar a sua tarefa cooperativa com facilidade. Este esquema implica, no entanto, a necessidade de balancear as acções dos agentes destinadas a manter o seu posicionamento estratégico com as acções destinadas a executar as outras tarefas cooperativas.

Reis et al. [Reis et al., 2001] propõem a distinção entre situações activas e estratégicas como forma de permitir a uma equipa utilizar uma metodologia de coordenação estratégica, sem que tal signifique a perda de capacidade de decisão individual ou perda de reactividade. Com base nesta distinção, é usado um esquema de posicionamento designado por *Posicionamento Estratégico Baseado em Situações (SBSP – Situation Based Strategic Positioning)* como forma de coordenar espacialmente uma equipa de futebol robótico simulado. O esquema *SBSP* tornou-se o esquema de posicionamento mais utilizado na competição RoboCup nos dois anos seguintes à sua proposta<sup>27</sup>.

## 5.9.3 Coordenação por Definição e Troca de Papéis

A coordenação por definição e troca de papéis é uma extensão do conceito de coordenação por decomposição e alocação de tarefas. Baseia-se igualmente no princípio de efectuar a decisão de quem faz o quê. No entanto, é realizada a um nível bastante mais elevado. Em vez de alocar uma ou mais tarefas a cada agente, aloca papéis aos agentes. Esses papéis definem completamente o comportamento individual de cada agente. Para além da definição de papéis para cada um dos agentes que compõem a equipa, é útil realizar a troca de papéis entre esses agentes em determinadas circunstâncias. Nomeadamente, a troca de papéis entre dois agentes  $A_i$  e  $A_j$  deverá claramente ser realizada se num determinado instante:

- Um determinado agente  $A_i$  tem atribuído o papel  $P_i$  e um agente  $A_j$  tem atribuído um papel  $P_j$ ;

---

<sup>27</sup> Em 2001, 6 dos 8 finalistas da liga de simulação do RoboCup utilizaram o *SBSP* ou um esquema de posicionamento directamente baseado neste.

- O agente  $A_i$  é capaz de desempenhar o papel  $P_j$  melhor do que o agente  $A_j$ ;
- O agente  $A_j$  é capaz de desempenhar o papel  $P_i$  melhor do que o agente  $A_i$ .

Este esquema de troca de papéis é, no entanto, muito rígido e diversas metodologias foram propostas por diferentes autores para permitir uma troca mais flexível e dinâmica de papéis dentro de uma dada equipa de agentes. Stone e Veloso. [Stone e Veloso, 1999] sugeriram efectuar a troca de papéis sempre que tal fosse útil para a equipa, embora não tenham especificado o modo de definir este conceito de utilidade.

Reis et al. [Reis e Lau, 2001] [Reis et al., 2001] estenderam o trabalho de Stone e Veloso e propuseram a realização de trocas de papéis e posicionamentos para agentes heterogéneos, baseadas em utilidades no contexto do futebol robótico simulado. Na sua metodologia, a troca de papéis de dois agentes  $A_i$  e  $A_j$  é realizada baseada em:

- Distâncias relativas das posições  $Pos(A_i)$  e  $Pos(A_j)$  dos agentes  $A_i$  e  $A_j$  às posições estratégicas  $PosEst(P_i)$  e  $PosEst(P_j)$  dos papéis  $P_i$  e  $P_j$ ;
- Adequação dos agentes  $A_i$  e  $A_j$  aos papéis  $P_i$  e  $P_j$ , ou seja:  $Adeq(A_i, P_i)$ ,  $Adeq(A_i, P_j)$ ,  $Adeq(A_j, P_i)$  e  $Adeq(A_j, P_j)$ ;
- Importâncias  $Imp(P_i)$  e  $Imp(P_j)$  dos papéis  $P_i$  e  $P_j$  para a equipa.

O seu mecanismo de troca dinâmica de posições, designado por *DPRE – Dynamic Positioning and Role Exchange*, ao contrário do mecanismo de Stone e Veloso, define completamente o conceito de utilidade da troca de posicionamento e papel de dois agentes e foi utilizado com sucesso em competições RoboCup. Os resultados experimentais obtidos em competições oficiais e no laboratório, confirmaram que o *DPRE* melhora significativamente o comportamento global de uma equipa de agentes para o futebol robótico simulado. No capítulo nove, os princípios básicos do *DPRE*, a sua implementação no futebol robótico simulado e resultados, demonstrando a sua influência no desempenho de uma equipa, serão analisados com maior detalhe.

## 5.10 Conclusões

O campo dos Sistemas Multi-Agente enfrenta nos nossos dias um elevado número de desafios, destacando-se o de criar metodologias que permitam a equipas de agentes operarem harmoniosamente em conjunto (que permitam coordenar os diversos agentes de modo eficiente).

Um número crescente de investigadores na área dos agentes procura construir equipas de agentes para domínios complexos e dinâmicos tais como a educação, integração de informação, gestão fabril, cenários de guerra, futebol simulado ou robótica cooperativa. Infelizmente, a incerteza nestes domínios dinâmicos e complexos, impede um trabalho de

equipa coerente, em particular devido ao facto de os diferentes membros da equipa possuírem visões parciais e frequentemente inconsistentes do seu ambiente.

Mecanismos de coordenação e comunicação flexíveis e de alto-nível, são a chave para fazer face ao dinamismo, incerteza e complexidade dos domínios. É necessário avaliar o desempenho da equipa e ter capacidade para reorganizar a equipa dinamicamente de acordo com as contingências. No entanto, a maioria dos Sistemas Multi-Agente implementados não são capazes de providenciar esta flexibilidade nos mecanismos de coordenação. Por outro lado, a maioria das metodologias de coordenação de agentes cooperativos propostas na literatura, não estão preocupadas com a mobilidade espacial dos agentes e, como tal, não são aplicáveis a tarefas cooperativas realizadas por equipas de agentes robóticos em ambientes do mundo-real ou simulações destes.

Neste capítulo foram analisadas as principais metodologias de coordenação de agentes cooperativos propostas pelos investigadores da área, foram sugeridas extensões de algumas dessas metodologias e propostas novas metodologias de coordenação de alto-nível de equipas que permitam fazer face ambientes complexos dinâmicos e inacessíveis. A coordenação estratégica proposta, permite coordenar uma equipa de forma dinâmica e flexível e inclui metodologias de análise situacional, posicionamento espacial dinâmico através de formações e alocação e troca dinâmica de papéis. A definição formal da coordenação estratégica e das restantes metodologias de coordenação propostas e a sua aplicação a domínios multi-agente que impliquem a realização de tarefas complexas através de equipas de agentes, serão analisadas em maior detalhe nos capítulos seguinte deste trabalho.