

Capítulo 3

3. Sistemas Multi-Agente

Os Sistemas Multi-Agente (SMA) são sistemas compostos por múltiplos agentes, que exibem um comportamento autónomo mas ao mesmo tempo interagem com os outros agentes presentes no sistema. Estes agentes exibem duas características fundamentais: serem capazes de agir de forma autónoma tomando decisões levando à satisfação dos seus objectivos; serem capazes de interagir com outros agentes utilizando protocolos de interacção social inspirados nos humanos e incluindo pelo menos algumas das seguintes funcionalidades: coordenação, cooperação, competição e negociação.

Os SMA constituem um campo relativamente novo nas ciências da computação. Embora o início da investigação neste campo se tenha dado nos anos 80, só em meados dos anos 90 esta ganhou uma notoriedade digna de destaque [Wooldridge, 2002]. Ao longo dos últimos anos a investigação no campo dos Sistemas Multi-Agente tem sofrido um acentuado crescimento. Este crescimento levou ao aparecimento de revistas, livros e conferências internacionais sobre o assunto. Conduziu também ao aparecimento de uma rede europeia de excelência para computação baseada em agentes – *AgentLink*¹² - com o objectivo de promover e coordenar a investigação realizada na Europa nesta área. Outra demonstração do crescimento da área está relacionado com o aparecimento e sucesso de diversas competições internacionais de investigação na área tais como o *RoboCup - Futebol Robótico* (e mais especificamente a liga de simulação) em 1997 [Kitano, 1997] e o *TAC – Trading Agent Competition* em 2000 [TAC, 2001]. Na primeira destas competições, equipas de agentes autónomos disputam um torneio de futebol. Na segunda, agentes individuais ou equipas de agentes competem de forma a adquirirem e fornecerem os melhores pacotes de viagens aos seus clientes. Em ambas as competições, através da utilização de um problema standard, é possível testar e comparar a investigação realizada pelos melhores grupos de investigação mundiais em diversas sub-áreas dos agentes autónomos e Sistemas Multi-Agente e áreas relacionadas.

¹² <http://www.agentlink.org>

Neste capítulo são discutidos os Sistema Multi-Agente e analisadas as principais perspectivas relacionadas com a comunicação entre agentes, aprendizagem em SMA e coordenação de agentes. Inicialmente é analisado o conceito de SMA, a área de investigação em inteligência artificial distribuída e a motivação para os Sistemas Multi-Agente. Em seguida são analisadas as formas de comunicação entre agentes, sendo dado particular destaque às linguagens propostas para efectuar esta comunicação e ao conceito de ontologia como forma de partilhar o significado das mensagens enviadas. Depois é analisada a aprendizagem em SMA, distinguindo as suas particularidades da aprendizagem individual. Finalmente é discutida a necessidade de coordenar agentes como forma de os colocar a trabalhar em conjunto. A investigação realizada na área da coordenação de agentes é dividida em duas áreas: coordenação de agentes competitivos, nomeadamente no que diz respeito à resolução de conflitos, negociação e leilões; coordenação de agentes cooperativos, em que é dado particular destaque à área da formação de equipas e trabalho em equipa (“*teamwork*”). 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.

3.1 O Conceito de Sistema Multi-Agente

Um Sistema Multi-Agente é um sistema computacional em que dois ou mais agentes interagem ou trabalham em conjunto de forma a desempenhar determinadas tarefas ou satisfazer um conjunto de objectivos. A investigação científica e a implementação prática de Sistemas Multi-Agente está focalizada na construção de *standards*, princípios e modelos que permitam a criação de pequenas e grandes sociedades de agentes semi-autónomos, capazes de interagir convenientemente de forma a atingirem os seus objectivos [Lesser, 1999].

Um dos pontos essenciais para permitir a construção de sociedades de agentes, consiste em conseguir gerir as interações e as dependências das actividades dos diferentes agentes no contexto do Sistema Multi-Agente, i.e., coordenar esses agentes. Desta forma, a coordenação desempenha um papel essencial nos SMA porque estes sistemas são inerentemente distribuídos. Aliás, o tema designado genericamente por coordenação constitui um dos maiores domínios científicos da informática e ciências da computação. Trabalhos científicos abrangidos por este domínio frequentemente incluem aspectos conceptuais e metodológicos, mas também implementacionais, de forma a conseguirem expressar e implementar aplicações informáticas distribuídas.

Diversas metodologias de coordenação foram propostas por diferentes autores dividindo-se em dois grupos principais: metodologias aplicáveis em domínios contendo agentes competitivos (“*self-interested*”), i.e. agentes preocupados com o seu bem próprio, e

metodologias aplicáveis a domínios contendo agentes cooperativos, i.e., agentes que incluem uma noção de preocupação pelo bem do conjunto. No primeiro caso a coordenação por negociação é a metodologia mais estudada na comunidade internacional. Nesta metodologia, assumem particular relevância os mercados electrónicos e os leilões. Relativamente à coordenação de agentes cooperativos interessa estudar metodologias que permitam construir equipas de agentes. Neste contexto assumem particular relevância as metodologias que permitem definir uma organização estrutural da sociedade de agentes, a definição e troca de papéis, a definição e alocação de tarefas aos diversos agentes e o planeamento conjunto multi-agente.

Os Sistemas Multi-Agente incluem diversos agentes que interagem ou trabalham em conjunto, podendo compreender agentes homogéneos ou heterogéneos. Cada agente é basicamente um elemento capaz de resolução autónoma de problemas e opera assincronamente, com respeito aos outros agentes. Para que um agente possa operar como parte do sistema, é necessária a existência de uma infra-estrutura que permita a comunicação e/ou interacção entre os agentes que compõe o SMA (figura 12).

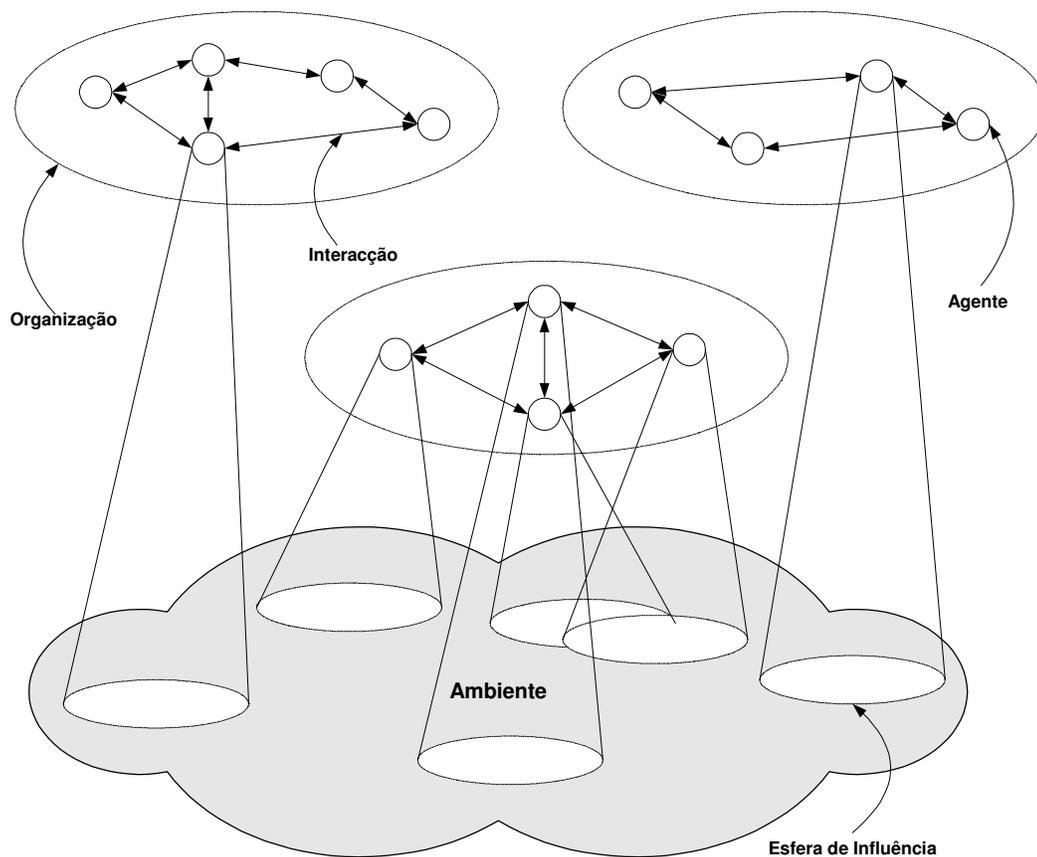


Figura 12: Estrutura de um Sistema Multi-Agente

O Sistema Multi-Agente vai conter múltiplos agentes, cada qual com diferentes capacidades de percepção e acção no mundo. Cada agente terá uma esfera de influência distinta sobre o ambiente, ou seja, será capaz de influenciar diferentes partes do ambiente

[Jennings, 2000]. Estas esferas de influência podem coincidir dependendo das relações existentes entre os agentes. Por exemplo, na geração de horários de dois departamentos, os agentes responsáveis pela geração de cada horário terão como esfera de influência os horários dos docentes que leccionam no seu departamento, das turmas dos cursos desse departamento e das salas alocadas a esse departamento. Esses agentes irão interagir no caso de efectuarem alocações em docentes, turmas ou salas que lhes sejam comuns. Interações entre agentes que se encontram no mesmo ambiente podem ocorrer de diversas formas e como tal interessa estudar os tipos e características de cada possível interação.

A investigação em Sistemas Multi-Agente está focada no desenvolvimento de princípios e modelos computacionais para construir, descrever, implementar e analisar as formas de interação e coordenação de agentes em sociedades de reduzida ou elevada dimensão [Lesser, 1999]. O campo dos Sistemas Multi-Agente derivou do campo originalmente designado por Inteligência Artificial Distribuída, constituindo actualmente o núcleo deste campo. Inclui a investigação realizada em diversas áreas científicas e como tal é extremamente abrangente, sendo muito difícil expor todas as suas particularidades, num trabalho desta dimensão.

3.2 Inteligência Artificial Distribuída vs. SMA

A Inteligência Artificial é tradicionalmente apresentada como a parte da ciência da computação cujo ênfase está no estudo de sistemas inteligentes, ou seja, sistemas que exibam características associadas à inteligência no comportamento humano – compreensão de linguagem, aprendizagem, raciocínio, resolução de problemas [Barr e Feigenbaum, 1981]. Um estudo mais aprofundado e actual nesta área pode ser encontrado em [Russel e Norvig, 1995], [Nilsson, 1998] e [Coelho, 1994].

O paradigma de decompor sistemas complexos em diferentes entidades, na tentativa de obter maior eficiência, não é uma abordagem recente nas ciências da computação. Durante muitos anos, os investigadores da área da Inteligência Artificial (IA) procuraram construir agentes isolados com algum comportamento inteligente. No entanto, o crescente interesse por paralelismo e distribuição na IA marcou a última década. O desenvolvimento de computadores mais poderosos, a proliferação das redes de computadores e a constatação da utilidade do uso de grupos de indivíduos para resolver problemas, fizeram com que a Inteligência Artificial Distribuída (IAD) se tornasse uma das áreas emergentes com um maior crescimento [Bond e Gasser, 1988b].

Nwana [Nwana, 1996] também enfatiza o crescimento da IAD e separa a investigação realizada nesta área em duas linhas distintas: a primeira do período de 1977 até aos dias actuais, e a segunda a partir de 1990. A primeira linha trabalha com agentes

essencialmente deliberativos que possuem modelos simbólicos internos. Um agente deliberativo possui uma representação explícita, um modelo simbólico do mundo, e as suas decisões (acções a executar) são realizadas através de um raciocínio simbólico [Wooldridge e Jennings, 1994]. A segunda linha de investigação, em rápido desenvolvimento, enfatiza a diversificação das tipologias ou classes de agentes, onde os agentes apresentam uma evolução relativamente à sua inteligência e autonomia. Bradshaw [Bradshaw, 1997] afirma que esta linha demonstra a evolução da deliberação para a execução e do raciocínio para a acção remota.

A Inteligência Artificial Distribuída não está preocupada com assuntos relacionados com a coordenação de processos concorrentes ao nível da resolução de problemas ou representação, mas sim a um nível superior. Não está também preocupada com arquiteturas de computadores paralelos, linguagens de programação paralela ou sistemas operativos distribuídos. Outros assuntos estudados no âmbito dos sistemas distribuídos tais como semáforos, monitores e “*threads*” não são também preocupações da IAD. A IAD está preocupada essencialmente com a resolução de problemas onde diversos agentes resolvem sub-tarefas e comunicam numa linguagem de alto-nível.

Durante vários anos, a investigação realizada na área da computação distribuída situou-se num nível estritamente relacionado com a ligação física de diferentes processadores, com a transmissão de dados e seus consequentes problemas. Estas questões dominaram as discussões de tal modo que o termo “processamento distribuído” era utilizado essencialmente para designar apenas este conjunto de problemas [Chandrasekaran, 1981].

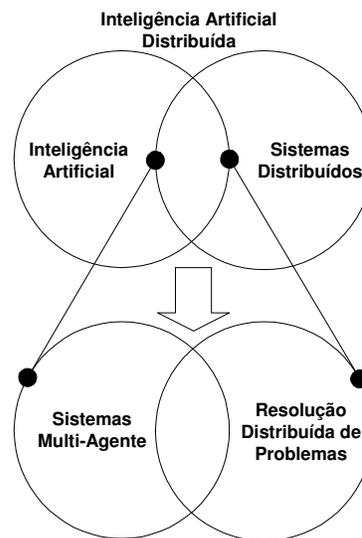


Figura 13: Inteligência Artificial Distribuída

A partir das últimas duas décadas as questões relativas ao processamento distribuído começaram a ser tratadas a um nível mais elevado de abstracção. Nesta abordagem, a atenção volta-se para as estratégias pelas quais a decomposição e coordenação do

processamento num sistema distribuído seriam conjugadas com os requisitos estruturais do domínio das tarefas. Este nível de abstracção passou a ser designado por Resolução Distribuída de Problemas (RDP) [Chandrasekaran, 1981]. Paralelamente a este desenvolvimento, a investigação efectuada em IA, inspirada em conceitos clássicos de organizações e sociedades, começava a romper com as soluções típicas até então adoptadas na construção de sistemas inteligentes.

A Inteligência Artificial Distribuída está preocupada essencialmente com a resolução de problemas onde diversos agentes resolvem sub-tarefas (macro-nível). A resolução de problemas abordados pela IAD, como foi analisado anteriormente, encontra-se dividida em dois grupos principais [Bond e Gasser, 1988a]:

- **RDP – Resolução Distribuída de Problemas.** O trabalho de resolver um problema particular pode ser dividido entre um número de módulos que cooperam e compartilham conhecimento sobre o problema e sobre o desenvolvimento da solução [Bond e Gasser, 1988a]. Sendo assim, o planeamento das acções a desenvolver é o resultado da decomposição do problema em vários subproblemas que são distribuídos aos diversos agentes envolvidos. Como resultado desta partilha, os agentes cooperam apenas na divisão do esforço e na partilha de conhecimentos e resultados;
- **SMA – Sistemas Multi-Agente.** Nesta segunda linha, contrariamente à RDP, não se parte de um problema específico, mas pretende-se coordenar um comportamento inteligente de um conjunto de agentes autónomos. Procura-se definir formas de coordenação dos seus conhecimentos, objectivos, habilidades e planos de forma a que conjuntamente possam realizar acções ou resolver problemas [Bond e Gasser, 1988a]. Assim, os agentes podem estar a trabalhar em direcção a um único objectivo global ou rumo a objectivos individuais separados que podem interagir, sendo então a autonomia dos agentes relacionada com a existência de cada agente independentemente da existência dos demais [Demazeau e Muller, 1990].

Por fim, verifica-se ainda uma terceira linha de trabalhos relacionada com a IAD, denominada *IA Paralela* [Bond e Gasser, 1988a] que trata do desenvolvimento de arquitecturas paralelas, linguagens e algoritmos para IA. Contudo, estes assuntos referem-se mais directamente aos problemas de desempenho de sistemas de IA e não a aspectos conceptuais sobre a compreensão da natureza do raciocínio e comportamento inteligente entre múltiplos agentes. Assim, e apesar dos seus desenvolvimentos certamente contribuirão para esta área, a IA Paralela não faz parte da IAD.

Pode afirmar-se que a Inteligência Artificial Distribuída está preocupada essencialmente com quatro assuntos:

- Granularidade dos agentes;

- Heterogeneidade dos agentes;
- Métodos para a distribuição do controlo (entre os agentes);
- Possibilidades de comunicação entre os agentes.

O campo dos Sistemas Multi-Agente estuda essencialmente os agentes de “*grão-grosso*”, normalmente heterogéneos que se agrupam em comunidades sem controlo centralizado e que comunicam utilizando uma linguagem de alto-nível. Este campo, ganhou larga preponderância ao longo dos últimos anos, sendo neste momento claramente responsável pela maioria da investigação científica realizada no âmbito da IAD.

3.3 Motivação dos SMA

A motivação principal dos SMA encontra-se relacionada com o facto de grande parte dos problemas mais frequentemente encontrados, serem inerentemente distribuídos de uma ou várias formas. Outras motivações estão relacionadas com:

- A dimensão do problema ser demasiado elevada para poder ser resolvido por um único agente monolítico;
- Permitir a interconexão e interoperação de múltiplos sistemas legados (“*legacy*”), i.e. sistemas de gerações anteriores cuja manutenção do código já não é possível;
- Providenciar uma solução natural para problemas geográfica e/ou funcionalmente distribuídos;
- Fornecer soluções para problemas em que os peritos, os conhecimentos ou as informações necessárias para a sua resolução, se encontram distribuídos;
- Permitir uma interface cooperativa homem-máquina mais natural em que ambos funcionam como agentes no sistema;
- Oferecer uma maior clareza e simplicidade conceptual de projecto.

Num SMA, os agentes que o compõem, podem estar a trabalhar em conjunto para atingir um só objectivo geral, ou rumo a objectivos individuais separados que podem no entanto estar relacionados, sendo desta forma necessária a interacção entre os diferentes agentes no sentido de atingirem os seus próprios objectivos.

Os SMA oferecem potencialmente uma maior rentabilidade de recursos para problemas onde o conhecimento ou actividade é distribuído. Existem desta forma, várias razões adicionais para a utilização de um SMA [Stone e Veloso, 1996]:

- O próprio domínio do problema o exige, por exemplo devido à distribuição espacial dos intervenientes;
- O paralelismo, atribuindo diferentes tarefas a diferentes agentes de forma a que a

execução seja mais rápida;

- A robustez, pois utilizam-se diferentes agentes não existindo desta forma um ponto único de falha no sistema;
- A escalabilidade, permitindo o aumento dos agentes intervenientes num determinado sistema aberto;
- A simplificação das tarefas individuais de programação, dividindo o problema global em vários subproblemas;
- O estudo da inteligência individual e do comportamento social, pois os SMA permitem a interoperacionalidade entre os agentes;
- A manutenção da privacidade da informação e conhecimentos individuais de cada agente.

Em algumas circunstâncias a própria natureza do problema necessita de um SMA, como o caso da marcação distribuída de reuniões, onde os agentes autónomos se encontram realmente geograficamente distribuídos. Neste exemplo, a utilização de um SMA tem ainda como vantagem o facto de manter a privacidade da informação dos vários agentes envolvidos.

A utilização de Sistemas Multi-Agente na resolução de problemas de Inteligência Artificial apresenta diversos benefícios, nomeadamente uma maior rentabilidade de recursos para problemas onde o conhecimento ou actividade é distribuído:

- Resolução mais rápida de problemas devido ao processamento concorrente;
- Diminuição da comunicação devido ao processamento estar localizado junto à fonte de informação e a comunicação ser realizada a alto-nível;
- Aumento da flexibilidade e escalabilidade resultantes da possibilidade de interconexão de múltiplos sistemas com arquitecturas distintas;
- Aumento da fiabilidade devido à inexistência de um ponto singular de falha;
- Aumento da capacidade de resposta devido aos sensores, sistemas de processamento e actuadores estarem localizados em conjunto, no interior dos agentes;
- Facilidade acrescida de desenvolvimento de sistemas devido à modularidade resultante da decomposição dos problemas e da decomposição dos sistemas em agentes semi-autónomos.

3.4 Comunicação em SMA

A comunicação entre entidades computacionais foi desde sempre considerada um dos problemas mais importantes das ciências da computação. No entanto, na área dos Sistemas Multi-Agente, a comunicação é tratada a um nível muito mais elevado do que nas outras áreas das ciências da computação. Aqui estamos interessados na comunicação de alto-nível, utilizando linguagens de comunicação próximas das linguagens utilizadas por humanos.

Como foi analisado anteriormente, um agente para ser considerado como tal, possui capacidades de percepção, processamento e actuação num dado ambiente. Para além disso, um agente deliberativo (ou híbrido) possui uma representação interna do seu ambiente, conhecimento e capacidade de raciocinar baseado no seu conhecimento, de forma a decidir em cada instante qual a melhor acção a executar. Da mesma forma, na nossa definição de agente é assumido que um agente tem a capacidade de comunicar e habilidade social, ou seja, capacidade para interagir com outros agentes e/ou humanos presentes no seu ambiente.

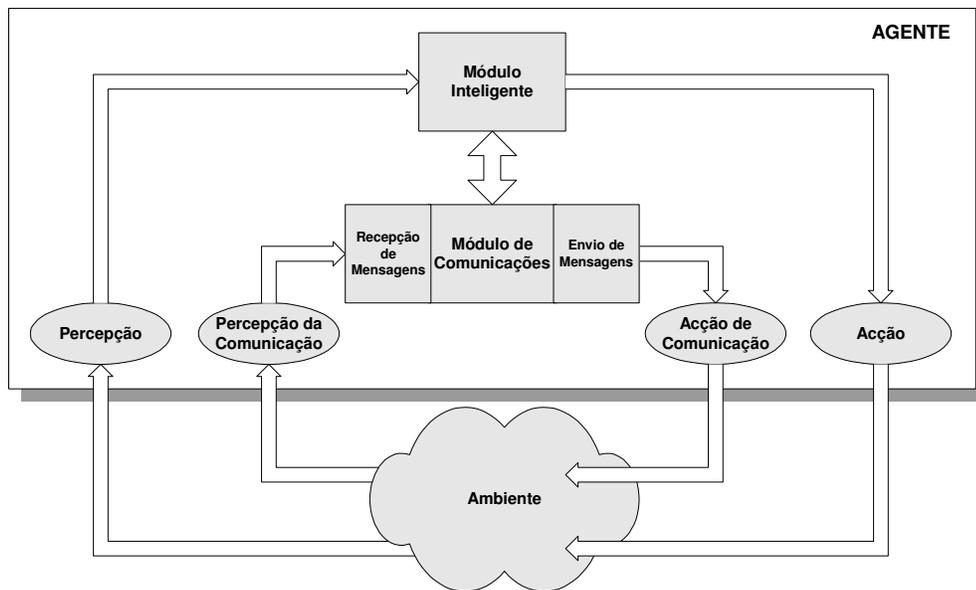


Figura 14: Agente com capacidade de comunicação

De forma a incluir a capacidade de comunicação num agente, é usual incluir um módulo de comunicações na sua arquitectura que se subdivide nas componentes de percepção (recepção de mensagens) e de acção (envio de mensagens). Este módulo de comunicações está directamente ligado ao módulo central do agente (módulo inteligente) permitindo desta forma ao módulo inteligente ter acesso às mensagens recebidas e definir quais as mensagens a enviar. Na figura 14 é representado o esquema genérico de um agente com capacidade de comunicação.

3.4.1 Arquitecturas do Sub-Sistema de Comunicação

Huhns e Stephens denotam que o sub-sistema de comunicação entre os agentes pode assumir uma de duas arquitecturas básicas [Huhns e Stephens, 1999], representadas esquematicamente na figura 15:

- Comunicação Directa.** Os agentes tratam da sua própria comunicação sem intervenção de qualquer outro agente. Para tal, partilham especificações, enviando aos outros agentes as suas capacidades e/ou necessidades de forma a cada agente poder tomar individualmente as suas decisões relativas à comunicação. Neste tipo de arquitectura cada agente comunica directamente com qualquer outro agente, sem qualquer intermediário. Um dos principais problemas que se coloca nesta arquitectura está relacionado com a inexistência de um elemento coordenador da comunicação, o que pode originar o bloqueio do sistema se, por exemplo, todos os agentes decidirem enviar mensagens ao mesmo tempo.
- Comunicação Assistida.** Os agentes apoiam-se em agentes especiais designados “*agentes facilitadores*”, de forma a efectuarem a comunicação com os outros agentes. Nesta arquitectura a organização de agentes é do tipo sistema federado. Nestes casos, se um dado *agente i* desejar enviar uma mensagem a um outro *agente j*, terá primeiro de a enviar para o “*agente facilitador*”, que se encarregará de a reencaminhar ao seu destinatário. Esta arquitectura resolve parcialmente o problema da coordenação da comunicação e diminui consideravelmente a complexidade necessária aos agentes individuais na realização de comunicação. Os agentes não necessitam de armazenar informações detalhadas sobre todos os outros agentes e nem sequer necessitam de saber o seu endereço de forma a comunicarem com eles. Basta comunicar com o “*agente facilitador*”. No entanto, a existência do “*agente facilitador*” pode introduzir uma certa centralização no sistema e um estrangulamento (*bottleneck*) no sistema de comunicações. Se este agente deixar de funcionar, o sistema de comunicações deixa também de funcionar.

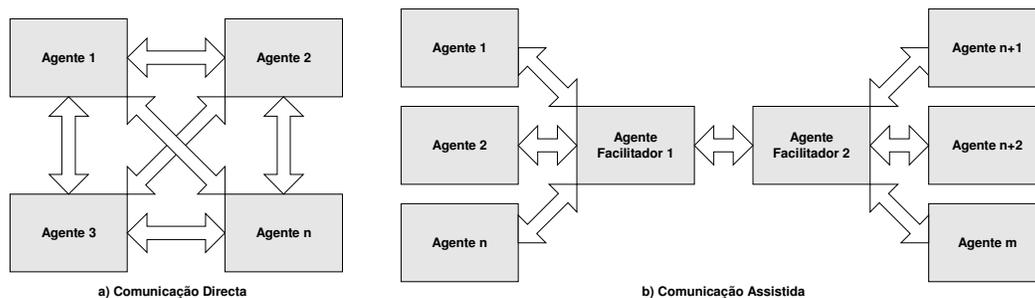


Figura 15: Arquitecturas de comunicação de agentes a) directa e b) assistida

A comunicação entre agentes está directamente relacionada com o nível de implementação das comunicações. Dependendo de vários factores, ter-se-á de considerar o modo de comunicar entre agentes. Esta comunicação pode ser implementada de duas maneiras:

- Memória partilhada (quadro-negro) por todos os agentes da comunidade;
- Passagem de mensagens entre agentes ou módulos destes.

De uma forma geral, a passagem de mensagens entre agentes é o modo de comunicação mais utilizado. A privacidade e rapidez com que a mensagem é transmitida, asseguram ao sistema uma eficácia, que de outra forma poderia ser comprometida. As soluções de memória partilhada são em geral mais difíceis de distribuir e obrigam a metodologias adicionais para a sincronização dos agentes, enquanto que a passagem de mensagens pode facilmente ser usada para sincronização. No entanto, na passagem de mensagens entre agentes devemos considerar a arquitectura do sistema de comunicação a implementar. Se implementarmos uma arquitectura de comunicação directa, deveremos assegurar que os agentes podem receber mensagens constantemente e inversamente prever a possibilidade de uma mensagem enviada não ser recebida pelo agente destinatário. A implementação de uma arquitectura de comunicação assistida pode resolver os problemas levantados pela arquitectura anterior, nomeadamente, se o agente “facilitador” for munido da capacidade de manter as mensagens ainda não recebidas pelos destinatários e reenviá-las periodicamente até que o agente destinatário a receba. No entanto, a implementação desta arquitectura implica geralmente uma menor eficiência ao nível da rapidez de transmissão.

Optar por um modo de comunicação com recurso a memória partilhada, resolve os problemas suscitados nas implementações referidas anteriormente. No entanto, a privacidade da informação e a rapidez, podem ser comprometidas se a implementação do próprio sistema não prever mecanismos muito eficientes de controlo de acesso à informação que se encontra na memória partilhada.

3.4.2 Características da Comunicação

A comunicação tem dois fins principais: partilha do conhecimento, informação, crenças ou planos com outros agentes; e coordenação de actividades entre agentes. No entanto a realização de comunicação que permita atingir estas duas metas, requer a definição de uma linguagem comum ou partilhada, caracterizada por:

- **Sintaxe.** Estrutura da ligação dos símbolos que compõem o discurso, ou seja, a parte da estrutura gramatical da linguagem que contém as regras relativas à combinação das palavras em unidades maiores, e as relações existentes entre as palavras dentro dessas unidades;
- **Semântica.** Significado dos símbolos e das suas combinações. É o estudo da linguagem do ponto de vista do significado das palavras e dos enunciados;

- **Vocabulário.** Conjunto de símbolos usados. Lista dos vocábulos da linguagem, em geral desacompanhados da respectiva definição ou com uma explicação muito sucinta;
- **Pragmática.** Conjunto de regras de acção e fórmulas de interpretação dos símbolos utilizados na comunicação;
- **Modelo do domínio do discurso.** Significado que um conjunto de símbolos assume quando interpretado num determinado contexto de conversação.

Na decisão do acto de comunicação, é importante ter em consideração quatro pontos essenciais [Reis, 2002c]:

- **O que comunicar?** Independentemente do fim a que se destina (por exemplo realizar partilha de conhecimento ou reforçar a coordenação entre agentes), as mensagens enviadas não podem conter toda a informação que o agente emissor possui. Este agente, tendo em consideração as características do canal de comunicação e o fim a que se destina a comunicação, tem de raciocinar sobre qual a informação mais importante a incluir nas suas mensagens.
- **Quando comunicar?** Sobretudo em domínios com reduzida largura de banda disponível para operações de comunicação¹³, é muito importante decidir correctamente o momento temporal em que é efectuada a comunicação. Por vezes, se a informação a comunicar não for muito importante, será preferível não realizar qualquer comunicação, deixando desta forma, a largura de banda do canal de comunicação, disponível para os outros agentes presentes no sistema.
- **A quem comunicar?** Como será analisado mais à frente, as mensagens podem ser enviadas para um, vários ou todos os agentes. A decisão do receptor da mensagem assume particular importância nos casos de comunicação directa entre dois agentes.
- **Como comunicar?** No caso de existirem diversos meios de comunicação disponíveis ao agente é necessário seleccionar, para cada comunicação, qual o meio mais adequado para a executar.

Um agente comunica uma dada mensagem num dado momento e de acordo com um dado contexto. Neste sentido, é importante que as mensagens sejam interpretadas de acordo com o contexto em que são enviadas ou recebidas. Por exemplo, em situações que envolvam a troca sucessiva de mensagens entre dois agentes (diálogo) é importante garantir que a sequência das mensagens não se altera e que nenhuma mensagem foi

¹³ Nos capítulos oito e nove será analisado um domínio (futebol robótico simulado) em que, devido a possuir uma muito reduzida largura de banda para comunicação, a decisão de quando comunicar é muito importante.

perdida ao longo do diálogo. Caso contrário, uma mensagem pode ser interpretada de forma totalmente errada.

3.4.2.1 Caracterização do Significado das Mensagens

Genericamente podemos caracterizar o significado das mensagens trocadas por agentes inteligentes, segundo as características [Singh, 1997]:

- **Descritiva vs. Prescritiva.** Descrição de fenómenos ou prescrição de comportamentos. As descrições, embora muito importantes no comportamento humano, são complexas de entender para os agentes. Desta forma, os agentes comunicam informação acerca de actividades e comportamentos.
- **Significado Personalizado vs. Convencional.** A interpretação que um agente possui de uma mensagem pode não ser a mesma que os restantes agentes lhe conferem (significado convencional). Nos sistemas Multi-Agente, nomeadamente nos sistemas abertos é aconselhável a utilização de significados convencionais, pois a qualquer momento são adicionados novos agentes.
- **Subjectiva vs. Objectiva.** O significado é objectivo quando este é interpretado externamente ao agente e tem um efeito explícito no ambiente.
- **Perspectiva do Remetente vs. Destinatário vs. Sociedade.** Independentemente do significado convencional ou objectivo da mensagem, esta pode ser expressa segundo o ponto de vista do remetente, destinatário ou dos restantes agentes presentes no ambiente.
- **Semântica vs. Pragmática.** A pragmática de uma comunicação está focada em como os agentes usam a comunicação, isto é, como agem em função da comunicação. Esta tem em consideração o estado dos agentes, o meio envolvente, a sintaxe e a semântica da comunicação.
- **Contextualidade.** As mensagens não devem ser entendidas isoladamente. A sua interpretação deve levar em consideração o estado do agente, o estado do meio e a história do meio. A interpretação deve ser directamente influenciada pelo contexto da comunicação.
- **Cobertura.** As linguagens com uma dimensão reduzida podem ser mais flexíveis e mais facilmente utilizáveis. No entanto, têm de ser suficientemente abrangentes para que os agentes possam expressar todos os significados que necessitem para comunicar com os outros agentes.
- **Identidade.** O sentido de uma mensagem depende da identidade dos interlocutores e do papel que cada um desempenha no sistema.
- **Cardinalidade.** Uma mensagem enviada a um agente em particular, deve ser entendida de forma diferente de uma mensagem pública, enviada a todos os

agentes do sistema.

3.4.2.2 Tipo de Mensagens

Todos os agentes têm de possuir a capacidade de comunicar independentemente do conjunto de capacidades funcionais que os caracterizam. De acordo com as características do agente e papel a desempenhar no sistema, podemos distinguir diversos níveis de capacidades de comunicação. É assumido que um agente pode enviar e receber mensagens, existindo dois tipos de mensagens básicas: as asserções e as perguntas [Huhns e Stephens, 1999].

Podemos considerar quatro tipos de agentes (tabela 2), de acordo com as capacidades de comunicação que apresentam:

- **Agente Básico.** Capaz de aceitar informação do exterior sob a forma de asserções mas incapaz de efectuar outras formas de comunicação;
- **Agente Passivo.** Capaz de um diálogo sendo, além de aceitar asserções, capaz de aceitar perguntas do exterior e responder-lhes na forma de asserções;
- **Agente Activo.** Capaz de realizar um diálogo em que assume um papel activo. Além de aceitar asserções, tem a capacidade de realizar perguntas e asserções;
- **Agente Interlocutor.** Capaz de realizar um diálogo em que assume um papel interlocutor entre os outros agentes. Para além de aceitar asserções, é capaz de fazer e receber perguntas e realizar asserções.

	Agente Básico	Agente Passivo	Agente Activo	Agente Interlocutor
Receber Asserções	Sim	Sim	Sim	Sim
Receber Perguntas	Não	Sim	Não	Sim
Enviar Asserções	Não	Sim	Sim	Sim
Enviar Perguntas	Não	Não	Sim	Sim

Tabela 2: Capacidades de comunicação de diferentes agentes [Huhns e Stephens, 1999]

3.4.2.3 Protocolos e Níveis de Comunicação

Os protocolos de comunicação são usualmente definidos a vários níveis [Huhns e Stephens, 1999]. Os níveis inferiores definem o método de interligação dos agentes. Os níveis intermédios definem o formato (sintaxe) da informação transmitida. Nos níveis superiores encontram-se as especificações do sentido (semântica) da informação.

No que diz respeito à aridade, os protocolos de comunicação subdividem-se em protocolos de aridade binária e aridade n . Enquanto um protocolo binário, envolve apenas um emissor e um receptor, um protocolo de aridade n implica a existência de um emissor e múltiplos receptores. Genericamente podemos definir que um protocolo contém a seguinte estrutura de dados [Huhns e Stephens, 1999]:

- Emissor;

- Receptor(es);
- Linguagem utilizada;
- Funções de codificação e decodificação da linguagem;
- Acções que o receptor deve executar.

3.4.2.4 Actos de Discurso

A Teoria dos Actos de Discurso iniciou-se com o trabalho do filósofo John Austin [Austin, 1962] e foi mais tarde estendida por John Searle [Searle, 1969]. Esta teoria resulta da análise do discurso humano relativa às acções, pedidos, sugestões, compromissos e respostas. Este é usado como modelo de comunicação aplicado à comunicação dos agentes.

O princípio básico da teoria dos actos de discurso é a assunção de que as acções de discurso são executadas pelos agentes da mesma forma que quaisquer outras acções e de acordo com o cumprimento dos seus objectivos. No seu estudo, John Austin [Austin, 1962] concluiu que os actos de discurso tinham características semelhantes às acções, no sentido em que estes actos poderiam mudar o estado do mundo de forma análoga às acções físicas. Austin distinguiu ainda três aspectos essenciais dos actos de discurso [Austin, 1962]:

- **A Locução.** Acto físico de discurso;
- **A Elocução.** Sentido atribuído à locução;
- **A “Perlocução”.** Efeito da acção resultante da locução.

John Searle estendeu o trabalho de Austin [Searle, 1969] e identificou diversas propriedades necessárias para o sucesso de actos de discurso. De entre estas condições destacam-se as condições normais de transmissão (*input/output*), condições preparatórias e condições de sinceridade. Searle identificou ainda um conjunto de classes para os actos de discurso, incluindo [Searle, 1969]: directivas (pedidos), promessas, expressivas, representativas (informações) e declarativas.

A Teoria do Acto de Discurso utiliza o termo “performativa” para identificar a elocução (tabela 3). As “performativas” podem ser verbos como: prometer, convencer, insistir, dizer, pedir, oferecer, requerer, etc. A utilização das performativas destina-se exclusivamente a definir inequivocamente a elocução desejada. Assim, definem o sentido com que deve ser interpretado o conteúdo da mensagem. O resultado reflecte a acção esperada do outro interveniente face ao primeiro acto de discurso.

Acto de Comunicação	Elocução	Resultado
Assertão	Informativo	Aceitação
Pergunta	Questionar	Resposta
Resposta	Informativo	Aceitação
Pedido	Pedido	
Explicação	Informativo	Acordo
Comando	Pedido	
Permissão	Informativo	Aceitação
Recusa	Informativo	Aceitação
Oferta/Factura	Informativo	Aceitação
Aceitação		
Concordância		
Proposta	Informativo	Oferta
Confirmação		
Retracção		
Negação		

Tabela 3: Tipos de mensagens inter-agentes derivadas da Teoria do Acto de Discurso

3.4.3 Linguagens de Comunicação

No início dos anos 90, foi fundado nos Estados Unidos da América, o *Knowledge Sharing Effort (KSE)* financiado pelo *DARPA*¹⁴, com o objectivo de desenvolver protocolos para a troca e representação de informação entre sistemas de informação autónomos. O *KSE* gerou dois produtos finais principais [Finin et al., 1993]:

- **A Linguagem *KQML (Knowledge and Query Manipulation Language)*.** *KQML* é uma linguagem externa para comunicações entre agentes. Define um invólucro para formatar mensagens que determina o significado locutório da mensagem. O *KQML* não está preocupado com o conteúdo da mensagem mas sim com a caracterização da informação necessária à compreensão desse conteúdo.
- **O Formato *KIF (Knowledge Interchange Format)*.** A *KIF* é uma linguagem que se destina explicitamente a representar o conhecimento sobre um domínio de discurso específico. Foi desenvolvido primariamente como forma de definir o conteúdo de mensagens expressas em *KQML*.

Para além do *KQML* e *KIF*, existem várias linguagens definidas no âmbito da comunicação em Sistemas Multi-Agente. De entre as mais utilizadas destaca-se o *FIPA ACL (Agent Communication Language)*. Em 1995, a *FIPA – Foundation for Intelligent Physical Agents* iniciou o desenvolvimento de *standards* para Sistemas Multi-Agente. A parte fulcral desta iniciativa situava-se ao nível do desenvolvimento de uma linguagem de comunicação para agentes [FIPA, 1999]. A *ACL* resultante é semelhante ao *KQML*, sendo primariamente uma linguagem de comunicação externa e não obriga à utilização de qualquer linguagem específica para o conteúdo.

¹⁴ DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency, E.U.A.

Para além da preocupação com a definição de uma linguagem de comunicação, é óbvio que para os agentes interagirem num sistema terão, todos, não só que falar a mesma linguagem mas atribuir significados idênticos aos conceitos em discussão. Só assim serão capazes de entender e serem entendidos pelos outros agentes. Torna-se assim necessário a existência de uma Ontologia que especifique o significado dos objectos e conceitos em discussão.

Comum a todas as linguagens é o facto de estas não terem ou não especificarem uma infra-estrutura própria de comunicação. As especificações das linguagens e das plataformas de comunicação são totalmente independentes. Nesta secção é apresentada uma breve descrição das linguagens *KQML*, *KIF* e *FIPA ACL* e analisado o conceito de Ontologia e a sua utilidade no âmbito dos Sistemas Multi-Agente.

3.4.3.1 *KIF – Knowledge Interchange Format*

O *KIF* [Genesereth e Fikes, 1992] foi desenvolvido originalmente como uma linguagem comum para representar propriedades de um determinado domínio. Foi proposto como uma linguagem normalizada para a descrição de entidades em sistemas periciais, bases de dados, agentes inteligentes, etc. O *KIF* não foi desenvolvido como um formato para expressar mensagens completas mas sim como um formato para expressar o conteúdo das mensagens. De facto, o *KIF* é baseado em lógica de primeira ordem e tem uma aparência muito semelhante a esta lógica, utilizando uma notação prefixa semelhante à linguagem *LISP*. A linguagem não é difícil de ser interpretada quer por pessoas quer por sistemas computacionais. O *KIF* foi também definido para servir de “interlingua”, isto é, para servir, nos processos de tradução entre linguagens, de linguagem intermédia entre as linguagens inicial e final.

O *KIF* permite descrever, de forma simples, propriedades de um dado domínio, relações entre os objectos presentes nesse domínio e propriedades gerais desse domínio. De forma a permitir a expressão destes conceitos, o *KIF* providencia operadores comuns em lógica de primeira-ordem: operadores *booleanos* e lógicos (*and*, *or*, *not*, etc.), quantificadores universal e existencial, etc. Providencia também estruturas de dados típicas tais como números, caracteres, *strings* ou listas e relações sobre esses tipos de dados.

O *KIF* é uma linguagem prefixa da lógica de predicados de primeira ordem com extensões para o suporte de raciocínio não monótono e de definições. A descrição da linguagem inclui a especificação da sintaxe e da semântica. Além da descrição de entidades, factos e conhecimento, o *KIF* permite ainda a descrição de procedimentos, isto é, a descrição de sequências de acções para que os agentes as executem. Excluindo as especificidades próprias da linguagem, realmente o *KIF* baseia-se fundamentalmente na lógica de primeira ordem e destina-se à expressão do conteúdo de mensagens *KQML*.

3.4.3.2 KQML - Knowledge and Query Manipulation Language

O *KQML* é uma linguagem para troca de informação e conhecimento baseada em troca de mensagens. É caracterizada por especificar toda a informação necessária à compreensão do conteúdo da mensagem. Cada mensagem *KQML* é composta por uma performativa (que pode ser interpretada como a classe de mensagem) e por um determinado número de parâmetros (cada qual especificando um atributo e seu respectivo valor). Na figura 16 é apresentado um exemplo de uma mensagem *KQML*.

```
(ask-one
  :content (SCHEDULE LPR)
  :sender ECO
  :receiver TIMETABLE_AGENT
  :reply-with SCH_LPR1
  :language SCHEDULE_UNILANG
  :ontology TIMETABLING
)
```

Figura 16: Exemplo de uma mensagem *KQML*

No exemplo representado no figura 16, o agente *ECO* envia ao agente *TIMETABLE_AGENT*, o pedido de informação relativo ao horário do agente *LPR*. A mensagem especifica ainda a linguagem e ontologia utilizadas. A performativa *ask-one* utilizada destina-se a realizar uma questão a um dado agente em que exactamente uma resposta é esperada. A resposta a esta mensagem deve ser dada contendo o identificador enviado no parâmetro *:reply-with*. A linguagem utilizada é definida no parâmetro *:language* e o parâmetro *:ontology* define a terminologia utilizada nesta comunicação. A tabela 4, apresenta os principais parâmetros utilizados em mensagens *KQML*.

Parâmetro	Significado
:content	Conteúdo da mensagem
:sender	Emissor da mensagem
:receiver	Receptor da mensagem
:language	Linguagem do conteúdo da mensagem
:ontology	Ontologia utilizada no conteúdo da mensagem
:force	Especifica se o conteúdo da mensagem é definitivo ou o emissor o poderá alterar no futuro.
:reply-with	Definição se o emissor da mensagem aguarda por uma resposta e se tal for verdadeiro, qual o identificador para essa resposta
:in-reply-to	Referência ao identificador de resposta fornecido por um reply-with prévio

Tabela 4: Parâmetros de uma mensagem *KQML*

Diversas versões do *KQML* foram propostas ao longo dos últimos anos com um conjunto diferente de performativas. Em [Finin et al., 1993], o número de performativas incluídas na linguagem, ascendia a 41, contendo, entre outras: *advertise*, *ask-all*, *ask-one*, *broadcast*, *discard*, *evaluate*, *forward*, *recommend-all*, *recommend-one*, *reply*, *tell*, *untell*, etc. Para um estudo mais alargado sobre a linguagem *KQML* recomenda-se a leitura de [Finin et al., 1993] ou [Labrou e Finin 1994].

As principais vantagens da utilização da linguagem *KQML*, residem no facto de esta ser uma linguagem *standard* e de efectuar a separação entre o domínio da “performativa” *KQML* e a semântica da mensagem. No entanto, diversos investigadores apontaram

também diversas críticas a esta linguagem: o conjunto de performativas alterou-se significativamente ao longo dos tempos (implicando dificuldades de comunicação entre sistemas *KQML* desenvolvidos em instantes temporais distintos); a semântica do *KQML* nunca foi definida com precisão (as definições são dadas em inglês corrente); a linguagem não continha performativas para efectuar compromissos entre agentes; o conjunto de performativas era demasiado extenso e desenvolvido de forma muito “*ad hoc*”.

No entanto, *KQML* é uma linguagem em desenvolvimento contínuo, onde a sua sintaxe e semânticas vão sendo progressivamente melhoradas [Labrou e Finin, 1994]. *Labrou* e *Finin* propuseram uma nova especificação que refina a original [Labrou e Finin, 1997] e que foi uma das bases da *ACL* suportada pela *FIPA* (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) [FIPA, 1999].

3.4.3.3 *FIPA ACL – Agent Communication Language*

A *FIPA ACL* é semelhante no formato à linguagem *KQML*. Define essencialmente a estrutura exterior da mensagem. No entanto, o número de performativas *ACL* é bastante inferior ao número de performativas *KQML*. A linguagem *ACL* define unicamente 20 performativas (tabela 5) para definir a interpretação desejada para cada tipo de mensagem.

Performativa	Significado
accept-proposal	Aceitação de proposta numa negociação
agree	Aceitação de desempenhar uma dada acção
cancel	Cancelamento da execução de uma dada acção
cfp	“ <i>Call for proposals</i> ”. Utilizada para iniciar uma dada negociação
confirm	Confirmação da veracidade de uma dada mensagem
disconfirm	Inverso da mensagem anterior
failure	Uma tentativa de executar uma dada acção (usualmente requisitada por outro agente) que falhou
inform	Uma das performativas mais importantes da <i>FIPA ACL</i> . Permite comunicar informação aos outros agentes
inform-if	Informação sobre a veracidade de determinada informação
inform-ref	Informação sobre um dado valor
not-understood	Indicação de que uma dada mensagem não foi percebida
propagate	Pedido de propagação a um conjunto de agentes de uma dada mensagem
propose	Envio de proposta, por exemplo, como resposta a uma mensagem cfp
proxy	Permite enviar uma mensagem que vai ser reenviada a um conjunto de agentes
query-if	Pedido de informação sobre a veracidade de determinada informação
query-ref	Pedido de informação sobre um dado valor
refuse	Recusa de executar determinada acção
reject-proposal	Recusa de uma proposta efectuada no contexto de uma dada negociação
request	Uma das performativas mais importantes da <i>FIPA ACL</i> . Consiste num pedido a um dado agente para executar determinada acção
request-when	Pedido para executar uma dada acção quando uma determinada condição for verdadeira.
request-whenever	Pedido para executar uma dada acção sempre que uma determinada condição seja verdadeira.
Subscribe	Pedido para ser informado acerca das alterações relacionadas com determinado facto ou informação

Tabela 5: Performativas providenciadas pela linguagem *FIPA ACL*.

Como é visível analisando a tabela 5, a diferença principal entre a *FIPA ACL* e o *KQML* está relacionada com as performativas providenciadas por cada linguagem. A linguagem *FIPA ACL* procura providenciar uma semântica mais compreensível do que a linguagem *KQML*. Uma das vantagens mais significativas da *FIPA ACL* relativamente ao *KQML* consiste na disponibilização de performativas mais adequadas à execução de processos de negociação.

3.4.3.4 Ontologias

Como foi analisado anteriormente, para que seja possível a interacção entre os agentes que compõem um Sistema Multi-Agente (SMA) é necessário que exista uma plataforma de comunicação, uma linguagem de comunicação e que os agentes possuam um vocabulário comum bem definido. No entanto, é usual que diferentes agentes possuam diferentes terminologias para o mesmo significado, ou idêntica terminologia para significados diferentes. Este problema pode ser resolvido se eles partilharem uma ontologia comum. Uma ontologia não é mais do que: “a representação do conhecimento de um dado domínio, disponibilizada a todos os outros componentes de um sistema de informação” [Huhns e Singh, 1997b]. A utilização de uma ontologia comum garante a consistência (uma mesma expressão tem o mesmo significado para qualquer agente) e compatibilidade (um conceito qualquer é designado, pela mesma expressão, por qualquer agente) da informação presente no sistema [Macedo, 2001].

Existem diversas definições de ontologia propostas pelos investigadores da área. Jim Hendler define uma ontologia como uma definição formal de um corpo de conhecimento [Hendler, 2001]. Grüninger e Fox [Grüninger e Fox, 1995] definem uma ontologia como uma descrição formal de entidades, propriedades, relacionamentos, restrições, comportamentos. Weiss [Weiss, 1999] define ontologia como uma especificação dos objectos, conceitos e relacionamentos de uma dada área de interesse. Na sua definição, uma ontologia vai além de especificar uma taxonomia de classes (ou tipos), pois deve também descrever os relacionamentos. Segundo Gruber [Gruber, 1993], uma ontologia é uma especificação da conceitualização, ou seja, dos conceitos e relacionamentos que podem existir para um agente ou para uma comunidade de agentes. Noy e McGuinness afirmam que uma ontologia é uma descrição explícita formal de conceitos de um domínio do discurso (classes), propriedades desses conceitos descrevendo as suas características (*slots*), atributos desses conceitos (designados por papéis ou propriedades), e restrições sobre esses atributos (nomeadamente restrições aos valores que podem tomar) [Noy e McGuinness, 2001]. Para estes autores, o desenvolvimento de uma ontologia inclui [Noy e McGuinness, 2001]: definir um conjunto de classes; organizar as classes numa hierarquia taxonómica; definir as propriedades (*slots*); descrever os valores permitidos para estas propriedades; preencher os valores das propriedades com instâncias.

No contexto de um Sistema Multi-Agente, uma ontologia é uma representação formal de conceitos, características e relacionamentos num dado domínio específico, permitindo o

entendimento comum da área de conhecimento entre pessoas e agentes de *software*. Isto permite a uma máquina usar o conhecimento disponibilizado por humanos ou por outras máquinas, múltiplas máquinas compartilharem o seu conhecimento e ainda, a reutilização de conhecimento [Malucelli, 2002]. Uma ontologia é então uma especificação dos objectos, conceitos e relacionamentos de uma área de interesse. Os conceitos poderão ser representados por predicados unários de lógica de primeira ordem. Os relacionamentos serão representados por predicados de aridade superior.

As ontologias, para além do campo dos Sistemas Multi-Agente, são aplicadas em muitos campos de investigação, dos quais se destaca o desenvolvimento de bases de dados, na componente da sua especificação, com a utilização de modelos como o Relacional ou Entidade-Associação ou ainda o UML (*Unified Modelling Language*).

Existem diversos tipos de ontologias, entre os quais de destacam:

- **Ontologias genéricas.** Definem termos suficientemente genéricos e frequentemente usados como base para permitir a definição de outros termos compostos. Podem ser consideradas como meta-ontologias;
- **Ontologias de domínio.** Ontologias baseadas nas genéricas mas especializadas para uma determinada área. Os termos e conceitos definidos nestas ontologias dizem respeito à área seleccionada;
- **Ontologias de modelização e representação.** Disponibilizam as primitivas que são utilizadas nas ontologias genéricas e de domínio;
- **Ontologias de aplicação.** Contêm as definições necessárias à modelização do conhecimento numa área específica.

O grau de formalização de uma ontologia permite também efectuar a sua classificação em *ontologias informais* (expressas em linguagem natural), *ontologias semi-informais* (expressas numa forma restrita e controlada da linguagem natural), *ontologias semi-formais* (expressas numa linguagem formal, artificialmente definida para o efeito) e *ontologias formais* (expressas numa linguagem lógica com uma semântica definida formalmente).

Existem diversas linguagens de representação do conhecimento utilizadas para modelização de ontologias. De entre estas destacam-se a *XML (eXtensible Markup Language)* [XML, 2001], *UML (Unified Modelling Language)* que é uma linguagem padrão para especificar, visualizar, documentar e construir sistemas computacionais, o *KIF* (abordado na secção 3.4.3.1), o *DAML (DARPA Agent Markup Language)* [DAML, 2001] que foi desenvolvido como uma extensão do *XML*, o *OIL (Ontology Inference Layer)* e o *CycL* (baseado na lógica de primeira ordem).

As ontologias são cada vez mais essenciais para o desenvolvimento e utilização de sistemas inteligentes assim como para a interoperação de sistemas heterogéneos. Permitem comunicar aos agentes presentes num sistema (pessoas ou agentes de *software*), o

vocabulário que está disponível sobre um dado domínio importante para o funcionamento do sistema. Acrescentam a este vocabulário, o significado que é atribuído no âmbito desse mesmo sistema para os diversos termos desse vocabulário. Com a generalização da sua utilização e o alargamento dos Sistemas Multi-Agente, contendo agentes desenvolvidos por diferentes pessoas ou organizações, as necessidades de comunicação com vocabulários comuns entre estes agentes será cada vez mais relevante. Desta forma, as ontologias vão desempenhar num futuro próximo um papel central no desenvolvimento de Sistemas Multi-Agente.

3.5 Aprendizagem em SMA

Embora neste trabalho não sejam utilizadas metodologias de aprendizagem, tendo em conta a importância que a aprendizagem em geral possui nos Agentes e Sistemas Multi-Agente, nesta secção será realizada uma breve análise deste tema. Será dada particular relevância à distinção entre aprendizagem individual e aprendizagem multi-agente e às metodologias de aprendizagem utilizadas especificamente em SMA.

A aprendizagem em Sistemas Multi-Agente é um campo de investigação bastante recente mas, no entanto, muito importante dentro da IAD. Embora este tema tenha sido negligenciado durante bastante tempo, preferindo os investigadores da área analisar tópicos tais como arquitecturas, comunicação, coordenação, cooperação ou negociação multi-agente¹⁵, é hoje uma convicção geral que este tema merece particular atenção. Duas motivações podem ser apontadas para este facto:

- Providenciar a Sistemas Multi-Agente heterogéneos, compostos por múltiplas unidades com conhecimentos e capacidades distintas, a capacidade para aprender e ajustar o seu comportamento individual e de grupo, automaticamente;
- Perceber melhor os mecanismos e processos naturais de aprendizagem em grupos ou equipas (por exemplo um grupo de agentes cooperando entre si e com humanos).

Os SMA possuem habitualmente uma complexidade estrutural e de funcionamento considerável, sendo usualmente impossível determinar à partida, o conjunto de comportamentos e as actividades concretas que irão ser executadas pelo sistema. Desta forma assume particular importância o desenvolvimento de agentes capazes de aprenderem e se adaptarem de forma a melhorarem o seu funcionamento no contexto do SMA.

¹⁵ O autor deste trabalho não escapa incólume a esta afirmação pois, nesta tese, o tema da aprendizagem em SMA não é abordado numa perspectiva prática.

3.5.1 Tipos de Aprendizagem em SMA

A aprendizagem em SMA é mais do que uma mera magnificação da aprendizagem de agentes individuais. Engloba todas as complexidades da aprendizagem de agentes isolados e é possível construir agentes no contexto de um SMA, que aprendam isoladamente, de forma completamente independente dos outros agentes. No entanto, a aprendizagem em SMA vai mais além e pressupõe que os agentes aprendam em conjunto e que a sua aprendizagem seja influenciada pela troca de informações, assunções partilhadas, pontos de vista comuns sobre o ambiente, convenções sociais, normas, etc. [Weiss, 1996]

Podem ser considerados dois tipos principais de aprendizagem multi-agente [Weiss, 1996]:

- **Aprendizagem Interactiva.** Situações em que os agentes de forma colectiva procuram atingir os seus objectivos de aprendizagem comuns;
- **Aprendizagem Individual.** Situações em que cada agente procura atingir os seus próprios objectivos de aprendizagem mas em que a sua aprendizagem é afectada por outros agentes, os seus conhecimentos, crenças, intenções, etc.

3.5.2 Determinação do Crédito ou Culpa

Um problema sempre presente na aprendizagem multi-agente é a determinação e atribuição do crédito ou culpa pela mudança (positiva ou negativa) no comportamento global do sistema. É necessário decompor este crédito pelos vários agentes que contribuíram para essa mudança global no comportamento. Este problema pode ser decomposto em dois subproblemas [Weiss, 1996]:

- A atribuição do crédito ou culpa pela mudança global do comportamento às acções externas de cada agente. Na aprendizagem em SMA este problema é complexo pois as acções de vários agentes podem, simultaneamente contribuir para a alteração do comportamento global do sistema.
- A atribuição do crédito ou culpa da execução de uma acção às decisões internas correspondentes. Este problema é praticamente idêntico em aprendizagem individual e aprendizagem SMA. Consiste na determinação das decisões que levaram à execução da acção ou acções relevantes na mudança de comportamento do sistema.

Esta decomposição conceptual não é no entanto clara em grande parte dos problemas [Sen e Weiss, 1999]. Grande parte das abordagens à aprendizagem em SMA não diferenciam explicitamente os dois subproblemas e focam-se unicamente num deles, simplificando consideravelmente o outro [Sen e Weiss, 1999].

3.5.3 Características Importantes na Aprendizagem

As duas categorias de aprendizagem descritas (i.e. aprendizagem interactiva e individual) cobrem um largo espectro de tipos de aprendizagem mais específicos que podem ocorrer no contexto de um SMA. Na figura 17, é apresentado um diagrama que resume os principais tópicos de investigação no âmbito da aprendizagem em SMA.

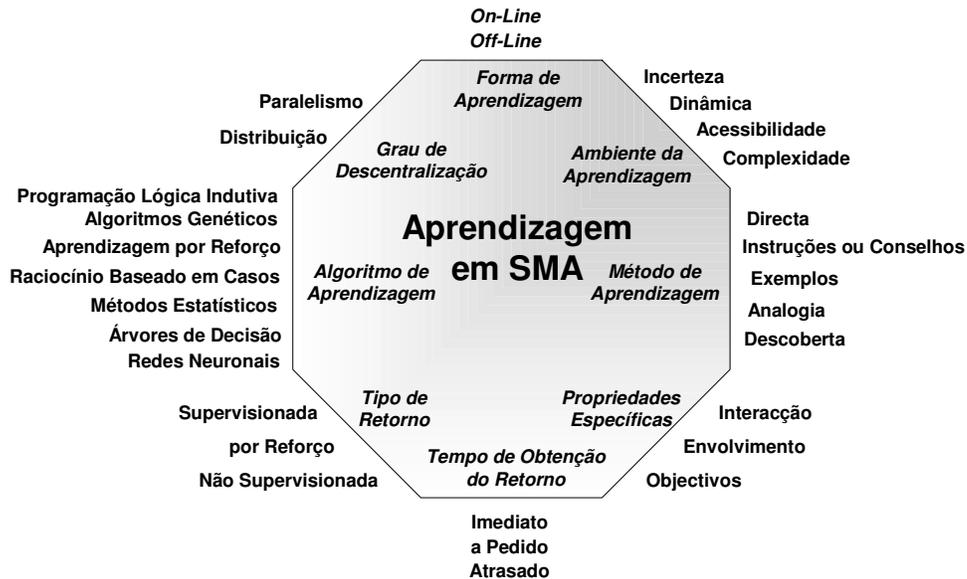


Figura 17: Características da Aprendizagem em SMA

As abordagens à aprendizagem em SMA podem ser classificadas com maior precisão utilizando um conjunto de características auxiliares [Sen e Weiss, 1999]:

- **Grau de Descentralização.** Nomeadamente no que diz respeito ao grau de distribuição e paralelismo do processo de aprendizagem;
- **Forma de Aprendizagem.** De acordo com a disponibilidade dos dados necessários para o processo de aprendizagem, podem classificar-se os métodos de aprendizagem como “em-linha” (“*online*”) (aprendizagem realizada durante a operação normal do agente) e “*off-line*” (aprendizagem realizada posteriormente analisando dados guardados durante a operação normal do agente).
- **Ambiente de Aprendizagem.** O ambiente pode possuir todas as características definidas na secção 2.2. Desta forma é necessário ter em consideração a dinâmica, incerteza, acessibilidade, determinismo e complexidade do ambiente. A aprendizagem será mais complexa em ambientes multi-agente dinâmicos, contínuos, não determinísticos e inacessíveis.
- **Propriedades Específicas da Interação.** Estas propriedades incluem o nível da interação (observação, argumentação, negociação, etc.), persistência da interação (curto prazo a longo prazo), frequência da interação, estruturação da

interacção (hierárquica, sem qualquer estruturação, etc.), variabilidade da interacção, etc. Desta forma podem existir situações em que o processo de aprendizagem seja extremamente rápido e simples (por exemplo observando um outro agente durante um curto espaço de tempo) e situações em que este processo seja demorado e extremamente complexo (por exemplo negociação utilizando um protocolo elaborado com um elevado número de agentes);

- **Propriedades Específicas do Envolvimento.** Este envolvimento pode ser caracterizado pela sua relevância (essencial ou dispensável no processo de aprendizagem colectiva) e pelo papel desempenhado pelo agente (generalista ou especialista numa dada actividade);
- **Propriedades Específicas dos Objectivos.** Estas propriedades podem incluir o tipo de melhoria esperada pela utilização do processo de aprendizagem (individual ou colectiva) e a compatibilidade dos objectivos de aprendizagem dos vários agentes (complementares ou conflituosos).
- **Método de Aprendizagem.** Os métodos de aprendizagem são uma das áreas mais importantes e com maior volume de investigação realizada dentro da aprendizagem em SMA. De entre os métodos mais relevantes destacam-se:
 - **Aprendizagem Directa.** Implantação directa do conhecimento ou capacidades sem qualquer tipo de inferência complementar por parte do agente;
 - **Aprendizagem por Instruções ou Conselhos.** Fusão do conhecimento ou capacidades adquiridas com conhecimento e capacidades prévias do agente;
 - **Aprendizagem por Exemplos.** Extracção e refinamento de conhecimento e capacidades tais como padrões ou conceitos gerais, a partir de exemplos positivos e negativos;
 - **Aprendizagem por Analogia.** Transformação de conhecimento utilizado na resolução de um problema semelhante de forma a resolver um novo problema análogo;
 - **Aprendizagem por Descoberta.** Recolha de novo conhecimento e capacidades através da realização de observações, experiências, teste de hipóteses e teorias e análise de resultados experimentais.
- **Tipo de Retorno da Aprendizagem.** O retorno da aprendizagem indica a melhoria obtida até um dado momento. Pode ser fornecido pelo ambiente, calculado pelo próprio agente ou fornecido por um outro agente. É usual a decomposição dos métodos de aprendizagem relativamente ao retorno, em três classes:
 - **Aprendizagem Supervisionada.** O retorno especifica a actividade

desejada do agente aprendiz e o objectivo final da aprendizagem é obter um resultado o mais próximo possível deste retorno;

- **Aprendizagem por Reforço.** O retorno especifica unicamente a utilidade da acção ou actividade actual do agente aprendiz. O objectivo consiste em maximizar esta utilidade;
- **Aprendizagem Não Supervisionada.** Neste tipo de aprendizagem não existe retorno. Desta forma, o objectivo consiste em encontrar acções e actividades úteis, tendo como base um sistema de tentativa e erro.
- **Tempo de Obtenção do Retorno.** No caso de existência de retorno, a forma de obtenção desse retorno da aprendizagem pode ser:
 - **Imediata.** Todas as acções têm um “*feedback*” imediato que permite ao agente avaliar a qualidade dessas acções;
 - **A Pedido.** O agente aprendiz pode requisitar em qualquer instante o retorno de uma dada acção ou conjunto de acções passado.
 - **Atrasada.** O retorno é enviado ao agente mas não de uma forma imediata e/ou constante. Os instantes de tempo em que o retorno é enviado não são controlados pelo agente aprendiz.

Utilizando estas características é possível caracterizar o processo de aprendizagem a diversos níveis. Tendo em conta o elevado número de combinações possível, é fácil concluir que a determinação da metodologia de aprendizagem mais adequada a cada caso específico é, em si, também um problema significativo neste contexto.

Por vezes a aprendizagem “*off-line*” não é possível devido a restrições impostas, como por exemplo a impossibilidade de guardar informação suficiente que a permita efectuar. Este problema pode ainda ser mais grave no caso de as acções necessárias para efectuar a aprendizagem afectarem directamente, de forma destrutiva, o ambiente ou os seus outros utilizadores. Neste caso, será muito difícil a um agente realizar um processo de aprendizagem, pois esse processo de aprendizagem afecta o próprio comportamento do sistema. Desta forma, o agente estará a aprender a adaptar-se a um ambiente adulterado, o que poderá não ser útil no ambiente real.

3.5.4 Algoritmos de Aprendizagem

Um elevado número de algoritmos foi proposto na literatura da especialidade para permitir realizar a aprendizagem em agentes ou outras entidades computacionais. De entre os mais estudados e utilizados destacam-se:

- Métodos Estatísticos (aprendizagem não supervisionada);
- Raciocínio Baseado em Casos (“*Case Based Reasoning*”);

- Árvores de Decisão;
- Redes Neurais (e outros algoritmos conexionistas);
- Aprendizagem por Reforço;
- Programação Lógica Indutiva;
- Algoritmos Genéticos (e outros algoritmos evolucionários).

Devido a limitações de espaço e ao facto deste trabalho não utilizar metodologias de aprendizagem na sua componente mais prática, não apresentamos aqui uma descrição mais detalhada destes algoritmos. Para uma análise mais detalhada dos algoritmos de aprendizagem referidos, sugere-se a leitura de [Mitchell, 1997] ou [Silva, 2000b]. No que diz respeito à análise da aprendizagem no contexto de um Sistema Multi-Agente, estudos mais aprofundados podem ser encontrados em [Sen e Weiss, 1999], [Weiss, 1996], [Stone e Veloso, 1996] e [Nunes e Oliveira, 2002].

3.5.5 Dificuldades Específicas da Aprendizagem em SMA

Embora a aprendizagem em Sistemas Multi-Agente, como foi analisado ao longo desta secção, possua algumas características distintivas relativamente à aprendizagem individual, de facto, a utilização de aprendizagem em SMA é realizada na maioria dos casos utilizando a forma tradicional de aprendizagem individual. Desta forma, a interacção entre os agentes durante o processo de aprendizagem e os benefícios que esta interacção pode trazer para o processo de aprendizagem colectiva não são usualmente explorados.

3.6 Coordenação em SMA

O conceito de coordenação é intuitivo e é muito simples possuir uma noção do que significa a palavra coordenação. Por exemplo, quando se participa numa conferência bem organizada, se analisa uma linha de montagem que funciona suavemente, se lecciona numa faculdade bem gerida, ou se assiste a um jogo de futebol entre duas equipas capazes de realizar excelentes jogadas colectivas, é fácil perceber que existem acções de grupo bem coordenadas. No entanto, em grande parte dos casos, a boa coordenação é quase invisível e é mais fácil perceber o que é coordenação quando esta falha [Malone e Crowston, 1994]. Exemplos de ausência de coordenação verificam-se quando: se espera horas para embarcar num avião porque não existe uma porta para realizar o embarque, se chega a um hotel onde se tinha uma reserva e o hotel está cheio, se chega a uma sala para leccionar uma aula e esta se encontra ocupada ou, se assiste a um jogo de futebol com muitos passes errados e jogadores mal posicionados no campo.

A coordenação pode ser definida como “o acto de trabalhar em grupo de forma harmoniosa” [Malone e Crowston., 1991]. No entanto, tal como acontece com a definição do conceito de agente, também a definição do conceito de coordenação não é partilhada por todos os investigadores da área. Desta forma, diversos autores propuseram definições distintas mas interrelacionadas do termo coordenação.

3.6.1 Definição de Coordenação

Diversos autores propuseram definições distintas para o conceito de coordenação, destacando-se:

- “Ajustamento ou interacção harmoniosa” [AHD, 2000]
- “O acto de trabalhar em grupo de forma harmoniosa” [Malone et al., 1990]
- “Processo pelo qual um agente raciocina acerca das suas acções locais e das acções (antecipadas) dos outros para tentar assegurar que a comunidade actue de maneira coerente” [Jennings, 1996]
- “Processo de gestão das interdependências entre actividades” [Malone e Crowston, 1994]
- “A operação de sistemas complexos compostos de componentes” [NSF-IRIS, 1989]
- “O esforço conjunto de actores independentes no sentido de atingirem objectivos mutuamente definidos” [NSF-IRIS, 1989]
- “A integração e ajustamento harmonioso dos esforços individuais no sentido de alcançar um objectivo mais amplo” [Singh, 1992]
- “O acto de trabalhar em conjunto” [Malone e Crowston, 1991]

Na maioria destas definições destaca-se a noção de grupo, trabalho conjunto, harmonia e objectivo comum. Desta forma, a definição de coordenação que adoptámos neste trabalho é a seguinte:

“O acto de trabalhar em conjunto de forma harmoniosa no sentido de atingir um acordo ou objectivo comum” [Reis, 2002e]

Nas secções anteriores analisamos a forma como agentes podem partilhar o mesmo ambiente e comunicar entre si. No entanto, de forma a que os agentes possam trabalhar em conjunto de forma harmoniosa é necessário mais do que a capacidade de comunicarem entre si. Duas dificuldades principais surgem neste contexto [Wooldridge, 2002]:

- Num Sistema Multi-Agente os agentes são muitas vezes implementados por projectistas distintos com objectivos distintos. Desta forma podem não partilhar objectivos comuns e como tal podem ter de negociar ou argumentar com os outros agentes de forma a persuadi-los a efectuarem a coordenação;

- Devido aos agentes serem autónomos, efectuando as suas decisões dinamicamente em “*run-time*”, têm de ser capazes de coordenar, também dinamicamente, as suas actividades, com os outros agentes presentes no ambiente.

Estas duas dificuldades levaram à proposta de muitas metodologias de coordenação distintas por parte de diversos investigadores da comunidade dos SMA. No entanto, existe uma grande dificuldade em estabelecer uma teoria da coordenação unanimemente aceite por todos os investigadores da área. De forma a efectuar a coordenação é, no entanto, nítido que os agentes têm de ser capazes de partilhar informação e tarefas dinamicamente (i.e. em “*run-time*”) coordenando as suas actividades no contexto do Sistema Multi-Agente.

A definição de boas estratégias de coordenação permite que grupos de agentes executem tarefas cooperativas de forma eficiente através de decisões conjuntas sobre que agentes devem executar uma determinada tarefa e quando e a quem devem comunicar os seus resultados e conhecimento em cada instante.

3.6.2 A Necessidade de Coordenar Agentes

Sichman e Demazeau [Sichman, 1994] [Sichman e Demazeau, 1995] afirmam que a necessidade de coordenação resulta da existência de relações de dependência que estão relacionadas com o facto de um agente necessitar do outro de forma a poder satisfazer os seus objectivos. Definem quatro relações de dependência básicas:

- **Independência.** Não existe qualquer tipo de dependência entre os agentes;
- **Unilateral.** Um agente depende do outro mas a relação inversa não se verifica;
- **Mútua.** Ambos os agentes dependem do outro para atingirem os seus próprios objectivos;
- **Dependência recíproca.** Um agente depende do outro para um dado objectivo e o outro agente depende do primeiro para um outro objectivo (não necessariamente o mesmo).

Wooldridge [Wooldridge, 2002] denota que estas relações podem ser qualificadas como localmente ou mutuamente “acreditadas”. Uma relação é localmente acreditada se um agente acredita que a relação existe mas não acredita que o outro agente acredita que ela existe. Uma relação mutualmente acreditada existe quando um agente acredita que a relação existe e acredita também que o outro agente a reconhece.

Malone e Crowston [Malone e Crowston, 1994] analisaram as relações de dependência numa outra perspectiva e identificaram nove tipos de dependência entre actividades. Para cada tipo de dependência sugeriram processos para as gerir como demonstra a tabela 6.

<i>Dependência</i>	<i>Processos de Coordenação para Gerir a Dependência</i>
<i>Recursos Partilhados</i>	<i>“First come/First serve”, Ordenação por Prioridades, Orçamentos, Decisão da Gestão, Negociação e Ofertas</i>
<i>Alocação de Tarefas</i>	<i>“First come/First serve”, Ordenação por Prioridades, Orçamentos, Decisão da Gestão, Negociação e Ofertas</i>
<i>Relações Produtor/Consumidor</i>	<i>Notificação, Sequenciamento, Seguimento, Gestão de Stocks, Just in Time, Quantidade Económica de Encomenda, Normalização, Projecto Participatório, Interação com os Utilizadores</i>
<i>Restrições de Pré-Requisitos</i>	<i>Notificação, Sequenciamento, Seguimento</i>
<i>Transferência</i>	<i>Gestão de Stocks, Just in Time, Quantidade Económica de Encomenda</i>
<i>Usabilidade</i>	<i>Normalização, Projecto Participatório, Interação com os Utilizadores</i>
<i>Projecto para produção</i>	<i>Engenharia Concorrente</i>
<i>Restrições de Simultaneidade</i>	<i>Escalonamento, Sincronização</i>
<i>Tarefas e Sub-Tarefas</i>	<i>Seleção de Objectivos, Decomposição de Tarefas</i>

Tabela 6: Tipos de Dependência entre Actividades [Malone e Crowston, 1994]

Jennings [Jennings, 1996] afirma que existem três razões principais para a necessidade de coordenar as acções de múltiplos agentes:

- **Existem dependências nas acções dos agentes.** Interdependência ocorre quando as acções necessárias para atingir os objectivos dos agentes individuais estão relacionadas. Isto pode acontecer devido a decisões locais de agentes terem impacto nas decisões de outros agentes ou devido à possibilidade de existência de interacções destrutivas entre os vários agentes;
- **Existe a necessidade que o conjunto de agentes respeite restrições globais.** Estas restrições podem situar-se a nível de custos, tempo, recursos, etc. Se os agentes agissem individualmente não conseguiriam respeitar estas restrições. Unicamente se coordenarem as suas actividades podem respeitá-las;
- **Nenhum agente individualmente tem recursos, informação ou capacidade suficiente para executar a tarefa ou resolver o problema completo.** Grande parte dos problemas necessitam de conhecimentos distintos para serem resolvidos, que só podem ser conseguidos por diferentes agentes. No entanto, os conhecimentos distintos dos vários agentes têm de ser combinados de forma a produzir o resultado desejado. Os diversos agentes podem também ter recursos distintos (capacidade de processamento, memória, etc.) que têm de ser utilizados de forma coordenada para resolver o problema. Os agentes podem também possuir informação distinta, por exemplo, devido a possuírem sensores distintos ou estarem geograficamente em locais distintos. Podem ainda ter as capacidades

de posicionamento diferentes, podendo posicionar-se em zonas distintas. Desta forma as suas capacidades de percepção e acção sobre o meio serão distintas.

Mesmo quando os agentes individuais possam trabalhar independentemente dos restantes, a coordenação pode aumentar a eficiência do sistema. Desta forma, Nwana et al. [Nwana, et al., 1996], adicionam duas razões para a necessidade de coordenar agentes num sistema:

- **Eficiência.** Através da troca de informação ou divisão de tarefas, a coordenação pode aumentar a eficiência do sistema. Mesmo sendo ambos capazes de executar as tarefas que lhes estão atribuídas, dois agentes poderão trocar as suas tarefas se ambos forem capazes de executar de forma mais eficiente a nova tarefa. Um outro exemplo, poderá ser um agente enviar informação ou permitir a utilização dos seus recursos computacionais de forma a aumentar a eficiência de uma tarefa executada por outro agente;
- **Prevenir a anarquia e o caos.** A coordenação é necessária ou desejável porque, devido à descentralização dos sistemas multi-agente, a anarquia pode-se estabelecer facilmente. Em sistemas com uma dimensão ou complexidade razoáveis, os agentes possuem unicamente uma visão parcial do mundo e conhecimento e objectivos locais que podem entrar em conflito com os dos outros agentes. No entanto, estão habilitados a interagir com os outros agentes do sistema e, tal como em qualquer sociedade, estas interacções podem provocar grande confusão, desordem e desorganização, conduzindo à anarquia. Nenhum agente possui uma visão global e autoridade sobre o sistema pelo que será necessário que os agentes coordenem as suas actividades voluntariamente com os restantes agentes do sistema.

A coordenação por seu lado, pode requerer cooperação. No entanto, é importante destacar que a coordenação pode ser atingida por outros meios não cooperativos. A competição ou negociação são processos de coordenação para agentes antagonistas. Para que os agentes se coordenem, usualmente têm de comunicar. No entanto, é possível a coordenação sem comunicação, nomeadamente nos casos em que os agentes possuem modelos do comportamento dos restantes agentes. Outra possibilidade, consiste em definir previamente uma estrutura organizacional, atribuindo papéis, responsabilidades, cadeias de comando ou hierarquias entre os agentes.

Neste contexto, uma conclusão importante é que nem sempre é útil realizar acções de coordenação pois isto pode implicar o dispêndio de recursos úteis na realização de outras tarefas. Lesser [Lesser, 1998], afirma que de forma a desenvolver estratégias eficientes de coordenação que funcionem numa grande variedade de ambientes, os agentes devem explicitamente medir os benefícios e custos da coordenação na situação corrente, de forma quantificável. A situação corrente inclui os objectivos (e a sua importância) que um agente possui a curto-prazo, os métodos ou acções disponíveis a esse agente e aos outros agentes, os requisitos que a aplicação desses métodos coloca ao agente e aos outros agentes, o

estado do ambiente do agente e outras restrições que sejam impostas à actividade do agente. Lesser denota ainda que efectuar decisões de coordenação é um problema complexo, multi-nível de optimização [Lesser, 1999] que se baseia em verificar (usualmente numa perspectiva estatística) em que medida as acções de coordenação contribuem a alto-nível para o atingir da execução das acções que conduzem ao objectivo do agente.

3.6.3 SMA Cooperativos vs. Competitivos

Podemos distinguir duas abordagens na construção de Sistemas Multi-Agente: sistemas compostos por agentes cooperativos e sistemas compostos por agentes competitivos, muitas vezes designados por egoístas (“*self-interested*”).

Os Sistemas Multi-Agente cooperativos são usualmente projectados por uma única, ou eventualmente por múltiplas, mas no entanto interdependentes, entidades ou pessoas. Neste tipo de sistema, os agentes comportam-se de forma a incrementar a utilidade global do sistema e não a sua utilidade pessoal. Desta forma existe uma preocupação com o aumento do desempenho global do sistema e não do desempenho individual dos agentes.

Nos Sistemas Multi-Agente compostos por agentes competitivos, cada agente é projectado por um projectista distinto. Cada agente tem a sua própria agenda e motivação. Os agentes não estão usualmente interessados no bem da comunidade mas sim, em obter a sua satisfação pessoal. Em cenários que envolvam aquisição de bens ou serviços, tais como o comércio electrónico na Internet, este tipo de Sistema Multi-Agente é muito mais realista.

3.6.4 Coordenação de Agentes Competitivos

Um problema óbvio na coordenação e cooperação de agentes está relacionado com o atingir de acordos em sociedades de agentes competitivos. Este tipo de sociedade competitiva é bastante comum entre os humanos. Todos os dias interagimos com agentes com quem não partilhamos objectivos comuns e em casos mais extremos a única forma de lucrarmos pode ser à custa dos nossos oponentes¹⁶. No entanto, em cenários mais realistas é típico que os agentes partilhem pelo menos alguns objectivos, e existe geralmente alguma margem para que se possam atingir acordos que sejam mutuamente benéficos. Aliás, em geral, a capacidade para atingir acordos sem que exista uma terceira parte a ditar os termos, é essencial em grande parte das aplicações de agentes inteligentes autónomos. Desta forma, capacidades de negociação e argumentação são centrais na criação de agentes autónomos capazes de funcionar em sociedades de agentes que não partilhem necessariamente objectivos comuns. Sendo a negociação uma forma de coordenação por

¹⁶ Este tipo de encontro designa-se por encontro de soma-zero.

excelência para atingir acordos entre agentes competitivos, o capítulo seguinte irá referir com maior detalhe a investigação realizada nesta área.

Embora a negociação desempenhe um papel primordial na coordenação em Sistemas Multi-Agente compostos por agentes competitivos, nas situações em que um conjunto de agentes partilham objectivos comuns, a negociação não é o mecanismo de coordenação mais aconselhável. Nestes casos, a coordenação dos agentes pode ser realizada em grande parte por metodologias de cooperação uma vez que o conjunto de agentes partilha os mesmos objectivos e existem vantagens mútuas em cooperarem para os atingirem.

3.6.5 Coordenação de Agentes Cooperativos

O interesse em aplicações de agentes em que agentes cooperativos trabalham em conjunto como equipas tem crescido significativamente nos últimos anos. Cada vez mais agentes são construídos com o fim específico de trabalharem como membros de equipas, em domínios tais como o treino virtual [Tambe, 1995], ambientes interactivos ou o futebol robótico [Kitano et al., 1997].

Diversas metodologias foram propostas na literatura da especialidade de forma a permitirem efectuar a coordenação de agentes cooperativos que realizam uma determinada tarefa em conjunto. De entre estas, destacam-se a resolução distribuída e cooperativa de problemas [Durfee e Lesser, 1987], a coordenação por partilha de tarefas e resultados, coordenação por contratação [Smith e Davis, 1980], planeamento global parcial [Durfee, 1988] [Decker, 1995], intenções conjuntas [Cohen et al., 1990], planos partilhados [Grosz e Kraus, 1996] e *locker-room agreement* [Stone e Veloso, 1999]. Outras metodologias de coordenação mais gerais foram desenvolvidas e aplicadas em diversos domínios por diferentes autores. Exemplo disto são a coordenação por organização estrutural, normas e leis sociais, conhecimento *a priori* e modelização mútua.

Um dos principais problemas da maioria das metodologias de coordenação propostas é que a sua aplicação só é possível em domínios relativamente simples. De facto, poucas são as metodologias aplicadas com sucesso em domínios inacessíveis, dinâmicos, não determinísticos e contínuos. Estes tipos de domínios abertos tornam-se ainda mais complexos quando existe uma necessidade de coordenação espacial dos agentes envolvidos, ou seja, quando estes possuem capacidades de mobilidade, tal como em cenários de guerra ou no futebol robótico. Desta forma, a criação de novas metodologias de coordenação de alto-nível de equipas de agentes é um tópico ainda pouco explorado dentro da investigação em coordenação em SMA.

3.7 Conclusões

Independentemente de serem colaboradores ou competidores, os agentes que formam um Sistema Multi-Agente irão interagir uns com os outros. Esta interacção não é indesejada mas sim intrínseco ao próprio conceito de agente que pressupõe a sociabilidade como forma de um agente atingir os seus próprios objectivos. As interacções pressupõem que os agentes conheçam os outros agentes presentes no ambiente ou, pelo menos, que estejam a par da sua existência, ou seja, que os agentes sejam projectados como membros de uma sociedade multi-agente. No entanto, estas interacções têm de ser convenientemente coordenadas pois caso contrário a sociedade de agentes pode degenerar numa sociedade completamente descoordenada e caótica.

Os dois capítulos seguintes analisam as metodologias de coordenação, separando a coordenação de agentes competitivos das restantes metodologias de coordenação aplicáveis essencialmente a agentes cooperativos. Esta divisão prende-se com o facto de a negociação em SMA ser uma metodologia aplicável essencialmente em SMA compostos por agentes competitivos (egoístas), sendo assim bastante diferente das restantes metodologias de coordenação aplicáveis a agentes cooperativos.