

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O trabalho descrito nesta tese está relacionado com o estudo e proposta de metodologias de coordenação de Agentes computacionais¹ autónomos e sua aplicação em domínios que implicam a execução de tarefas complexas através de grupos de agentes, nomeadamente:

- Resolução de problemas de escalonamento na gestão universitária: distribuição de serviço docente, geração de horários, calendarização de exames, alocação de salas, etc.; e
- Execução de tarefas cooperativas através de equipas de agentes com mobilidade espacial, nomeadamente através da construção de uma equipa para a liga de simulação do futebol robótico – RoboCup.

Os dois domínios de teste seleccionados e as respectivas tarefas cooperativas a realizar, são ambos bastante complexos e debruçam-se sobre a coordenação de agentes, possuindo, no entanto, diversas características que os diferenciam significativamente. A resolução de problemas de escalonamento na gestão universitária é realizada por um número elevado de agentes heterogéneos que competem e cooperam uns com os outros nesta resolução. No futebol robótico, o grau de heterogeneidade dos agentes é reduzido e os agentes são totalmente cooperativos, formando aquilo que vulgarmente se designa por uma equipa. No entanto, o domínio introduz diversas complexidades adicionais como sejam o seu dinamismo, a distribuição espacial dos agentes, erros na percepção e acção dos mesmos e a complexidade da tarefa cooperativa a executar (jogar um desafio de futebol). Devido às diferenças nas suas características, os dois domínios implicam a utilização de metodologias de coordenação bastante distintas das actividades realizadas pelos agentes.

¹ Ao longo da tese, os termos agente e sistema multi-agente são utilizados referindo-se a sistemas computacionais.

1.1.1 Coordenação em Sistemas Multi-Agente

Um *Agente* pode ser definido como uma entidade computacional (vulgarmente *software*), situado num dado ambiente, que tem a percepção desse ambiente através de sensores, tem capacidade de raciocínio e age de forma autónoma nesse ambiente através de actuadores, de forma a desempenhar uma dada função para a qual foi projectado. Alguns investigadores afirmam que um agente para ser considerado como tal, deve também possuir capacidades de comunicação de alto-nível com outros agentes e/ou humanos. No entanto, a definição do conceito de agente não é consensual e é tão problemática para a comunidade de Inteligência Artificial Distribuída como a definição de inteligência para a comunidade de Inteligência Artificial.

Os *Sistemas Multi-Agente* 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 dos humanos e requerendo coordenação, cooperação e negociação.

A *Coordenação* pode ser definida como o acto de trabalhar em conjunto de forma harmoniosa no sentido de atingir um acordo ou objectivo comum. No entanto, o trabalhar em conjunto não implica necessariamente cooperação entre os agentes. No caso de agentes competitivos ou egoístas (i.e. agentes que estão unicamente interessados no seu bem pessoal), a coordenação estará centrada em processos adequados de resolução de conflitos, argumentação e negociação. Quando os agentes possuem uma noção de bem social e estão preocupados em atingir objectivos partilhados com outros agentes, ou seja, os agentes são cooperativos, então as metodologias de coordenação estão centradas na cooperação entre agentes e incluem essencialmente formas de resolver problemas globais de forma distribuída, criar equipas de agentes e realizar trabalho de grupo.

1.1.2 Escalonamento e Gestão Universitária

As Instituições de Ensino Superior têm periodicamente de resolver um vasto conjunto de problemas de escalonamento de forma a funcionarem correctamente. Estes problemas incluem a determinação de uma distribuição temporal admissível de recursos a tarefas, com o objectivo de garantir a execução dessas tarefas mas minimizar os custos e maximizar a eficiência da sua execução.

Os principais problemas de escalonamento que surgem no contexto do funcionamento usual de uma Universidade ou outra instituição de Ensino Superior incluem a Distribuição de Serviço Docente (DSD), as diversas variantes da Geração de Horários (GH), a Calendarização de Exames (CE) e a Alocação de Salas (AS). Normalmente, estes

problemas são resolvidos de forma separada ou pelo menos não totalmente interligada. É usual efectuar a distribuição de serviço docente completa e só depois começar a resolução do problema de geração de horários. No entanto, dadas as interligações profundas entre estes problemas, a sua resolução de forma integrada seria muito desejável.

No âmbito de uma Universidade são por vezes resolvidas várias instâncias de problemas semelhantes por órgãos de decisão distintos. Este caso verifica-se quando a Universidade se encontra dividida em faculdades, departamentos ou secções e a resolução dos problemas de DSD, GH ou CE é efectuada de forma distribuída por essas unidades. Esta resolução distribuída coloca problemas consideráveis devido ao facto de as unidades não serem totalmente autónomas, partilhando recursos tais como docentes ou salas. Inclusivamente são usuais as situações em que não existe uma definição clara dos limites das responsabilidades ou recursos alocados a cada departamento ou unidade. A complexidade na resolução distribuída do problema é ainda maior se pensarmos que grande parte dos recursos geridos (i.e. docentes, alunos, etc.), são também em si, unidades com um elevado grau de autonomia e com objectivos e vontades próprias. Isto implica que a resolução automática dos problemas de GH ou DSD seja muito complexa pois é virtualmente impossível especificar todos os objectivos e preferências de todos os recursos envolvidos.

Embora sendo desejável, a resolução distribuída, integrada e automática, dos problemas de escalonamento mencionados, a sua execução nesta forma é complexa. Por um lado, existe a necessidade de utilizar metodologias de resolução de problemas de escalonamento tais como métodos de optimização, meta-heurísticas ou programação lógica com restrições para resolver os problemas em cada unidade. Por outro lado é necessário coordenar a resolução dos problemas das diversas unidades e gerir as interacções entre a resolução de problemas que envolvem os mesmos recursos. Para o realizar é necessário efectuar processos de cooperação e negociação com outras unidades que partilhem os mesmos recursos. Torna-se também necessário gerir a alocação de tarefas a entidades com elevado grau de autonomia e, por vezes, encetar processos de negociação, com e entre essas entidades, de forma a obter uma solução aceitável para todas.

1.1.3 O Futebol Robótico e a Liga de Simulação

O futebol robótico – RoboCup – é um projecto internacional de investigação e educação, com o objectivo de promover a investigação em Inteligência Artificial (Distribuída) e Robótica Inteligente. O projecto baseia-se na utilização de um problema *standard* – o futebol – como forma de estimular a investigação científica em diversas áreas relacionadas com a Inteligência Artificial e Robótica e ao mesmo tempo permitir, todos os anos, comparar de diversos modos a investigação realizada pelos diferentes grupos de investigação participantes. Um elevado conjunto de tecnologias é necessário para ser capaz de construir uma equipa de robôs, reais ou virtuais, que seja capaz de participar num

jogo semelhante ao futebol, utilizando um conjunto de regras pré-especificado. Desta forma, a investigação em futebol robótico e a competição internacional associada – campeonato do mundo de RoboCup – atraíram a participação regular de algumas das melhores empresas, laboratórios de investigação e universidades mundiais, incluindo a Sony, Honda, SGI, Philips, GMD e as universidades de Carnegie Mellon, Cornell, Freiburg, Karlsruhe, UNSW, Tsinghua, entre outros.

O futebol robótico inclui diversas ligas que se dividem em dois tipos: ligas robóticas (robôs pequenos, médios, “cães” e humanóides) e a liga de simulação. Cada liga coloca um conjunto próprio de desafios de investigação e tem ênfase em determinados tópicos necessários para efectivamente colocar equipas de robôs a disputar uma partida de futebol. A liga de simulação é baseada no sistema de simulação “*soccerserver*” que permite a duas equipas de agentes autónomos disputar um jogo de futebol simulado. O “*soccerserver*” providencia um domínio muito realista no sentido em que inclui muitas complexidades do futebol real e dos sistemas robóticos, tais como: erros nos sensores, erros nos actuadores e energia limitada. Os desafios que o domínio do futebol robótico simulado coloca são muito superiores aos desafios colocados por alguns problemas *standard* da Inteligência Artificial, como o xadrez. No futebol robótico o mundo é dinâmico, parcialmente inacessível aos robôs virtuais, contínuo, não determinístico, multi-objectivo, parcialmente cooperativo e parcialmente adverso.

As diversas ligas do RoboCup foram projectadas de forma a contemplar em mundos limitados, um conjunto elevado de complexidades do mundo real, mantendo no entanto o custo, complexidade global e dimensão do problema, acessível aos grupos de investigação em Robótica e Inteligência Artificial. Os problemas de investigação colocados pelo RoboCup de uma forma integrada, cobrem uma vasta área dos domínios da IA e Robótica, incluindo coordenação, cooperação e comunicação multi-agente, arquitecturas de agentes inteligentes, aprendizagem, planeamento em tempo-real, decisão estratégica e tática, comportamento reactivo, visão, processamento e análise de imagem, controlo, sistemas de locomoção, sistemas sensoriais, fusão sensorial em tempo-real, navegação, controlo robótico, entre outros. O desafio inerente ao RoboCup é simultaneamente estimulante do ponto de vista científico, colocando um vasto conjunto de problemas aos investigadores das diversas áreas científicas mas, simultaneamente, atraente para o público em geral e para os meios de comunicação social².

O sucesso numa competição como o RoboCup, para além do desenvolvimento de robôs (reais ou virtuais) com boas qualidades individuais, reside fundamentalmente no desenvolvimento de metodologias de coordenação que lhes permitam trabalhar em

² Com esta vertente, pretende-se que o RoboCup seja capaz de chamar a atenção do público e comunicação social, não só para o evento como competição científica, mas sobretudo para a investigação realizada em Inteligência Artificial e Robótica Inteligente pelos diversos laboratórios e empresas participantes.

conjunto de forma harmoniosa no sentido de atingir os seus dois objectivos principais: marcar golos na baliza adversária e evitar sofrer golos na sua baliza. A coordenação é desta forma uma das áreas de investigação essenciais no contexto do RoboCup e um factor crucial para o sucesso de uma equipa nas competições internacionais realizadas neste âmbito.

1.2 Motivação

A motivação principal para a realização deste trabalho resulta da importância crescente do paradigma dos *Agentes* e *Sistemas Multi-Agente (SMA)* e das metodologias de *Coordenação em SMA*. De facto, sob a designação geral de coordenação assentam metodologias como a cooperação, a negociação, a resolução de conflitos e a alocação de recursos em SMA que constituem uma parcela muito relevante da investigação global realizada em Inteligência Artificial Distribuída.

A inexistência de uma abordagem global ao problema da geração de horários e problemas associados, no contexto da gestão universitária, foi outra motivação relevante. Este problema é usualmente analisado de forma isolada, quer a nível de trabalhos de investigação científica realizados sobre o assunto, quer a nível de pacotes de *software* comerciais. Neste trabalho o problema foi analisado como parte integrante de um contexto mais alargado de problemas de escalonamento na gestão universitária, incluindo a distribuição de serviço docente, constituição de turmas, alocação de salas, calendarização de exames, etc. Foi também analisado, utilizando diversas metodologias, desde uma abordagem essencialmente centralizada, em que um agente é responsável pela produção completa das soluções, até uma abordagem completamente distribuída em que metodologias de coordenação em Sistemas Multi-Agente são utilizadas de forma a possibilitar que um conjunto de agentes negocie e coopere com vista à resolução do problema.

A importância crescente do RoboCup como domínio de teste e problema *standard* para a Inteligência Artificial Distribuída e Robótica Inteligente constitui outra motivação evidente deste trabalho. O xadrez foi durante muitos anos um dos domínios por excelência da aplicação das metodologias de Inteligência Artificial. No entanto, após a vitória da máquina (Deep Blue) sobre o campeão do mundo humano (Gary Kasparov), novos domínios mais estimulantes e complexos tornaram-se necessários. É neste contexto que surge o futebol robótico. Este é um domínio bem mais complexo que o xadrez pois o ambiente é multi-objectivo, dinâmico, contínuo, inacessível e não determinístico. Para além disso o domínio é inerentemente distribuído, descentralizado, parcialmente cooperativo e parcialmente adverso. Os problemas de investigação colocados pelo futebol robótico cobrem uma área muito ampla, mas onde se destacam claramente os problemas da coordenação e cooperação entre agentes. Este domínio foi desta forma, devido às

características enunciadas, seleccionado como principal domínio de teste das metodologias de coordenação de agentes cooperativos desenvolvidas no âmbito desta tese.

Para além da natural motivação que resulta da definição de metodologias de resolução de problemas com que nos deparamos todos os dias na Universidade e da enorme motivação que resulta da participação em grandes competições envolvendo equipas de investigação científica, como o RoboCup, este trabalho teve ainda a motivação adicional de: desenvolver metodologias de coordenação em SMA, suficientemente genéricas para que possam ser aplicadas a curto-prazo em problemas socialmente relevantes envolvendo robôs: a limpeza de minas ou lixo radioactivo, resgate e salvamento em grandes catástrofes, exploração espacial, coordenação de transportes públicos, etc.

1.3 Objectivos

O objectivo deste trabalho consiste em estudar as metodologias de coordenação e cooperação em sistemas multi-agente e propor metodologias adequadas de coordenação para domínios relevantes de SMA. Como domínios de teste foram seleccionados os problemas de escalonamento na gestão universitária e a liga de simulação do futebol robótico.

Os objectivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Estudo dos conceitos de Agente, Sistemas Multi-Agente e de metodologias de coordenação, negociação e cooperação entre agentes inteligentes autónomos;
- Estudo de problemas específicos de escalonamento frequentes na gestão universitária, tais como a distribuição de serviço docente, geração de horários, calendarização de exames, calendarização de reuniões e a alocação de salas;
- Estudo do domínio do futebol robótico nas suas variadas vertentes, incluindo todas as ligas robóticas e desafios associados, mas com ênfase no futebol robótico simulado;
- Definição de linguagens que permitam a coordenação de agentes autónomos através de conhecimento *a priori*, nos domínios da gestão universitária e futebol robótico;
- Definição e implementação de estratégias de coordenação de agentes que possibilitem a resolução de problemas de escalonamento na gestão universitária;
- Definição e implementação de estratégias de coordenação de equipas de agentes que permitam a coordenação eficiente de agentes no futebol robótico;
- Implementação de uma equipa de futebol robótico capaz de participar na liga de simulação do RoboCup;

- Generalização, com a devida limitação, das estratégias de coordenação de forma a serem aplicáveis a outros domínios em que a coordenação de agentes seja essencial.

Para além destes objectivos específicos, este trabalho teve como objectivo demonstrar a validade das metodologias conceptualizadas em competições internacionais, através de comparação directa com trabalhos realizados noutras universidades e institutos de investigação de qualidade internacionalmente reconhecida.

1.4 Contribuições Científicas

É sempre complexo sintetizar as contribuições científicas de uma tese em alguns parágrafos. No entanto é minha convicção que algumas das contribuições científicas deste trabalho são facilmente reconhecidas e vou tentar sumariar nesta secção, aquelas que, na minha opinião, são as principais:

- Síntese e análise crítica das perspectivas dos autores mais relevantes da área sobre os conceitos de Agente, SMA e Coordenação em SMA;
- Definição de uma linguagem – *SCHEDULING UNILANG* – que permite através da especificação completa de problemas de geração de horários, coordenar um conjunto de agentes que representam as entidades numa Universidade através de conhecimento comum *a priori*. A linguagem é capaz de representar problemas globais de geração de horários, incluindo a representação de dados, restrições, medidas de avaliação e soluções deste tipo de problemas. Permite ainda coordenar dinamicamente o conjunto de agentes envolvidos na execução da tarefa cooperativa (geração de horários) no decurso da execução dessa tarefa;
- Definição de uma linguagem – *COACH UNILANG* – que permite a um treinador (artificial) de futebol coordenar a sua equipa através de conhecimento comum *a priori* (estratégia para um dado jogo de futebol simulado). A linguagem permite ainda coordenar dinamicamente a equipa no decurso da execução da sua tarefa cooperativa;
- Extensão do conceito de coordenação de SMA por *organização estrutural a priori* através da definição formal do conceito de estratégia para uma competição (baseada em tácticas, formações, situações e tipos de agentes com comportamentos distintos). Aplicação com sucesso deste conceito na criação de equipas flexíveis no domínio do futebol robótico simulado;
- Definição de metodologias de coordenação para SMA aplicáveis a diversos domínios, nomeadamente a coordenação estratégica, por definição e troca de papéis, por posicionamento estratégico baseado em situações, parcialmente hierárquica, por comunicação avançada, por modelização mútua e por percepção

inteligente.

Para além destas contribuições, o trabalho descrito nesta tese contribuiu cientificamente para o incremento do bom nome da ciência portuguesa através dos bons resultados que obteve nos campeonatos da Europa e do Mundo de Futebol Robótico – RoboCup.

1.5 Estrutura da Tese

Este trabalho encontra-se estruturado em dez capítulos dos quais, o primeiro é composto por esta introdução ao trabalho.

No segundo capítulo é apresentado o conceito de agente e são discutidas as definições apresentadas por diferentes autores para este conceito. São também analisadas as características dos ambientes em que operam os agentes, as áreas científicas que os inspiraram e as classificações propostas por diferentes autores para os diversos tipos de agentes. O capítulo concluiu-se com uma análise detalhada das arquitecturas mais comuns de agentes autónomos e uma breve descrição das áreas de aplicações desta nova tecnologia.

O terceiro capítulo analisa a criação de sociedades de agentes, designadas vulgarmente por Sistemas Multi-Agente. Nesta perspectiva, apresenta a distinção entre os SMA e a Inteligência Artificial Distribuída e descreve a motivação para os SMA. A parte central do capítulo analisa a forma como pode ser efectuada a comunicação a alto-nível entre agentes. É ainda apresentada, de forma resumida, a aprendizagem em SMA, essencialmente no que concerne à sua distinção relativamente à aprendizagem individual. O capítulo conclui-se com a justificação da necessidade de coordenar os agentes constituintes do sistema e com uma introdução às duas principais áreas de investigação em coordenação: coordenação de agentes competitivos (egoístas) e coordenação de agentes cooperativos.

O capítulo quatro analisa a coordenação de agentes competitivos. São introduzidos os conceitos de conflito e processo de resolução de conflitos entre agentes. A negociação como metodologia utilizada por excelência neste tipo de coordenação é analisada com particular detalhe. Desta forma são descritos os princípios da negociação computacional e as formas de projectar protocolos de negociação adequados. É dado algum destaque à descrição do conceito de leilão e dos tipos de leilão existentes. Refere-se ainda a negociação multi-atributo e exemplos de utilização prática de negociação.

No capítulo cinco é analisada a investigação realizada na área da coordenação de agentes cooperativos e formação de equipas de agentes. Inicialmente 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, planeamento multi-agente,

modelização mútua e organização estrutural. São também analisados modelos de coordenação mais específicos propostos por diversos autores. Propõem-se ainda tipos de coordenação distintos dos usuais, incluindo a coordenação por percepção inteligente, controlo parcialmente hierárquico e coordenação estratégica.

O sexto capítulo inclui uma análise dos problemas de escalonamento encontrados na gestão universitária e das metodologias vulgarmente utilizadas para os resolver. São descritos os problemas de *Distribuição de Serviço Docente*, *Geração de Horários* e *Calendarização de Exames* e outros problemas associados. O capítulo inclui também uma análise comparativa dos principais pacotes de *software* existentes no mercado para construção de horários e das metodologias utilizadas por diferentes investigadores da área para realizar a geração automática de horários e resolução dos problemas associados. São também analisadas e comparadas diversas linguagens e sistemas de representação de problemas de horários propostas por investigadores da área.

Da análise dos problemas de escalonamento apresentada no sexto capítulo resulta a definição de uma linguagem de descrição de problemas globais de escalonamento na gestão universitária – SCHEDULING UNILANG – que é objecto de descrição detalhada no sétimo capítulo. O capítulo inclui ainda a descrição de um SMA para geração de horários – UNIPS – *University Planning and Scheduling System* projectado no âmbito deste trabalho.

O capítulo oito analisa um domínio particularmente atraente e indicado para a aplicação de metodologias de coordenação: o futebol robótico. Na descrição, para além de uma análise da envolvente do futebol robótico e das competições internacionais RoboCup, é dada particular relevância à descrição da liga de simulação e do simulador de futebol robótico – *soccerserver*. Este simulador é descrito com detalhe de forma a facilitar a compreensão do capítulo seguinte da tese. Inclui-se ainda uma descrição mais abrangente da investigação realizada internacionalmente, utilizando o *soccerserver* e discute trabalho relacionado e aplicações práticas da investigação realizada no âmbito do futebol robótico simulado. O capítulo conclui-se com uma análise do RoboCup como competição científica.

O nono capítulo descreve o projecto e implementação de metodologias de coordenação aplicáveis ao futebol robótico simulado, bem como, a outros domínios complexos. Este capítulo contém a maioria das contribuições científicas originais da tese. A descrição é centrada na equipa FC Portugal desenvolvida num projecto associado a esta tese. É descrita a arquitectura dos agentes da equipa, assim como o seu estado no mundo, as suas capacidades individuais e os seus mecanismos de decisão. É também analisada a aplicação de diversos mecanismos de coordenação, incluindo a coordenação estratégica, por comunicação, modelização mútua, percepção inteligente e controlo parcialmente hierárquico. É dado particular destaque à linguagem *COACH UNILANG* que permite a um agente treinador coordenar a alto-nível uma equipa de futebol robótico simulado. Inclui-se

uma extensa análise de resultados obtidos quer em competições oficiais, quer em experiências controladas.

O décimo e último capítulo apresenta as conclusões gerais deste trabalho, analisa os seus principais resultados, originalidades e limitações e propõe algumas perspectivas de desenvolvimentos futuros.