

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA



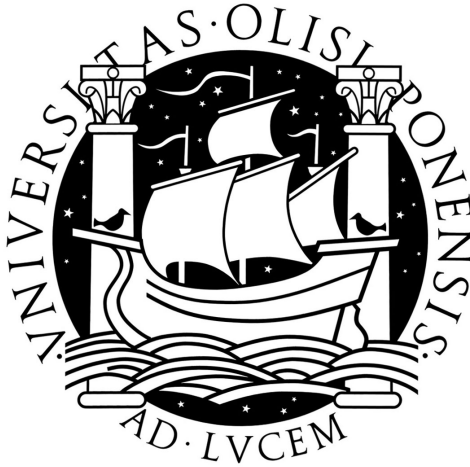
EMERGÊNCIA E COLAPSO DE PODER

Francisco Manuel Gonçalves Coelho

DOUTORAMENTO EM INFORMÁTICA

Setembro 2005

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA



EMERGÊNCIA E COLAPSO DE PODER

Francisco Manuel Gonçalves Coelho

DOUTORAMENTO EM INFORMÁTICA

Setembro 2005

Tese orientada pelo Prof. Doutor Helder Manuel Ferreira Coelho
e co-orientada pelo Prof. Doutor Augusto José Franco de Oliveira

Resumo

Esta tese defende o aprofundamento da investigação sobre as noções nucleares para os modelos de deliberação e controlo de agentes inteligentes: Primeiro, o poder individual, definido como *o conjunto de aptidões* do agente, no que diz respeito à acção, a vontade, a que compete *coordenar os empenhos* deste e também o conhecimento sobre o ambiente, construído autonomamente pelo agente.

A decisão, para ser efectiva, necessita de *processar e construir, em tempo útil, a possível informação relevante*. Ao agente inteligente exige-se a habilidade de interpretar o seu ambiente, que será dinâmico e imprevisível. Posteriormente este deve usar essa informação de forma a escolher, de entre as possibilidades consideradas, o curso de acção de que resultará a realização dos seus objectivos dominantes.

Assim, no trabalho aqui exposto, começou-se por observar as consequências que agentes com diferentes aptidões —isto é, diferindo no seu poder individual— provocam na dinâmica das sociedades em que se encontram. Embora as conclusões dessas observações preliminares sejam intuitivamente óbvias, atendeu-se à fundamentação experimental dessa intuição. Uma vez observada a importância (pelo menos causal) do poder individual, passou-se à investigação dos seus elementos constituintes, quando observados na arquitectura do agente.

Nesse ponto a investigação bifurcou-se, tendo-se tentado obter, na diversidade, uma perspectiva abrangente sobre o poder individual e a vontade, e de como estes dois temas poderão contribuir para a realização de melhores agentes inteligentes.

Procurou-se então compreender, por um lado, qual é a competência da vontade e de como esta se relaciona com o poder individual. Dessa tarefa resultou uma proto-arquitectura do processo de decisão que permite replicar controlos, quer reactivos quer deliberativos.

Por outro lado, considerou-se também que o *conhecimento* de que o agente dispõe é um dos elementos mais influentes no seu comportamento. Em particular, será importante que um agente saiba, dada uma determinada série temporal, qual a dificuldade em projectar possíveis valores futuros. Do estudo deste assunto resultou uma medida da qualidade predictiva de séries temporais. Adicionalmente, esta medida também pode ser aplicada pelo investigador, desta forma estendendo

as ferramentas de análise de dados.

Em terceiro lugar, olhando para a mente de um agente como um sistema dinâmico, em que diferentes estados mentais aparecem, evoluem e eventualmente desaparecem, prolongou-se essa identificação para a noção de meta agente, isto é, um agente cujo ambiente (que percebe e manipula) é, por sua vez, o espaço mental de um outro agente. Foi então conduzida uma experiência, baseada em controlos reactivos, onde um meta agente recupera a funcionalidade do seu agente contendor, supostamente danificado.

Por fim, integraram-se os percursos de investigação sobre o poder individual: a estruturação do controlo do agente pela meta agência, a gestão dos empenhos pela vontade e a construção de conhecimento pela qualidade predictiva. Para tal criou-se um cenário virtual em que duas equipas, uma de referência —com agentes de controlo reactivo— e outra de teste, competem pelo melhor desempenho. A equipa de teste dá corpo à pretendida integração: os seus agentes são controlados por meta agência, os respectivos empenhos são geridos pela vontade e a informação proveniente do ambiente é processada, com o contributo da qualidade predictiva, para a construção de conhecimento sobre este.

PALAVRAS-CHAVE: Poder Individual, Vontade, Arquitecturas de Agentes, Meta Agência, Qualidade Predictiva.

Abstract

This thesis proposes a deeper research about the nuclear ideas for intelligent agents deliberation and control models: First, individual power, defined as the agent's *set of capabilities* for action, the will, associated with the competency for the agent's *commitments coordination* and also the knowledge about the environment, built autonomously by the agent.

Decision must *process and build, in useful time, the possible relevant information*, in order to be effective. It is requested, to the intelligent agent, the ability to interpret his, possibly dynamic and unpredictable, environment. Later on, the agent should use that information to choose, among the considered possibilities, the course of action from which should result the realisation of his dominant objectives.

So, this work started by observing the consequences that agents with different skills —therefore differing in their individual power— cause in the dynamics of their societies. Although the conclusions of those preliminary observations are intuitively obvious, it was attended to get the experimental support of such intuition. Once observed the importance (at least causal) of individual power, the thesis continued with the research of its constituent elements.

Here the research splitted, trying to achieve, with diversity, a wider perspective about individual power, will and how these two themes could contribute to the making of intelligent agents.

One tried to understand, on one hand, what is will's competence and how is it related with individual power. From this task resulted a *proto-architecture* for the decision process, where it is possible the replication of both reactive and deliberative controls.

On the other hand, one also accounted that the knowledge available to the agent is one of the most influent elements in his behaviour. In particular, it should be important that an agent knows, given a time series, how hard it would be to project future values. From this subject study resulted a measure of the predictive quality of time series. Additionally, this measure can also be applied by the researcher, extending the data analysis toolset.

In third place, looking at the agent's mind as a dynamic system, where diffe-

rent mental states arise, evolve and, eventually vanish, one extended this identification to the notion of meta agent, i.e. an agent whose environment (perceived and acted upon) is, on his turn, the mental space of another agent. Then an experiment was conducted, based in reactive behaviours, where a meta agent recovers the functionality of his envelope-agent, supposedly damaged.

At last, the paths to individual power were joined: the agent's control structured by meta agency, the commitments processing by the will and the construction of knowledge by the predictive quality. To that, it was created a virtual scenario, where two teams, a reference one —with reactive control agents— and another, test, compete for the best performance. The test team embodies the goal integration: Their agents are controlled by meta agency, the respective commitments managed by the will and information from the environment is processed, with the contribute from the predictive quality, to the construction of knowledge about it.

KEY WORDS: Individual Power, Will, Agent Architectures, Meta Agency, Predictive Quality.

Agradecimentos

Sem o encorajamento e suporte generoso dos meus pais, entretanto falecidos, nunca teria tido a ocasião de iniciar esta tarefa.

Sem a paciência da minha mulher, assumindo a minha quota das tarefas domésticas, enquanto eu teclava furiosamente mais um artigo ou um programa, ainda agora estaria nos primeiros passos deste percurso.

Sem a infinita capacidade das minhas filhas para interromper, brincar e questionar, este tempo teria sido muito mais monótono.

Sem a curiosidade e crítica do meu amigo Júlio muito do que fiz teria feito pior. E sem a confiança do Rui, Zé Pedro e Luís este trabalho teria sido mais solitário.

Sem as conversas com o meu orientador não haveria ideias, trabalho, rumo e muito menos tese.

Sem a disponibilidade e vasta cultura do Franco, as minhas ideias seriam muito mais limitadas.

Outros contribuíram para esta teste. Muitos. Amigos, colegas e conhecidos, que por pura curiosidade, polida educação, inépcia ou maldade levantaram questões, apontaram erros ou fecharam portas.

A todas estas pessoas, «obrigado» é o que posso dizer, restando-me ficar, frustrado, no limite das palavras.

Finalmente, sem mim não existiriam os erros, as gralhas e os puros disparates que, aqui e ali, povoam este texto.

Lisboa, Setembro de 2005
Francisco Manuel Gonçalves Coelho

A todos aqueles que, rodeados de respostas, questionam.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivações	3
1.1.1 Vontade	3
1.1.2 Poder Individual	4
1.2 Contribuições	7
1.3 Organização	9
1.3.1 Contexto Histórico e Científico	9
1.3.2 Perfis Individuais e Dinâmicas Sociais	10
1.3.3 Qualidade Predictiva	10
1.3.4 Empenho e Vontade	11
1.3.5 Meta Agência	11
1.3.6 Meta Agência Desenvolvida	12
1.3.7 Conclusões	12
2 Contexto Histórico e Científico	13
2.1 1955 – 1969: Fundação	13
2.1.1 Objectivos	13
2.1.2 Primeiros Resultados	14
2.1.3 Desencanto	14
2.2 1966 – presente: Dispersão e Especialização	15
2.2.1 Sub-disciplinas	16
2.3 1994 – presente: agentes inteligentes	16
2.3.1 Sobre agentes inteligentes	17
2.3.2 Tendências e Estímulos	18
2.4 Estado da Arte	19

2.4.1	Decisão em Processos de Markov Parcialmente Observáveis (DPMPO)	20
2.4.2	Optimização com Restrições Distribuídas (ORD)	22
2.4.3	Arquitecturas de Estados Mentais (AEM)	23
2.4.4	Teoria de Jogos e Leilões (TJL)	24
2.4.5	Híbridos	25
2.4.6	Direcções	26
2.5	Poder individual e Poder Social	27
2.5.1	Vontade	30
3	Perfis Individuais e Dinâmicas Sociais	33
3.1	Introdução	33
3.2	Exemplo: Uma Economia Virtual	34
3.3	Uma conjectura sobre agentes conformistas	36
3.3.1	Agentes com Maior Idade	36
3.4	Comparações de Comportamentos	38
3.4.1	Agentes desertores	38
3.4.2	Agentes sedutores	39
3.4.3	Comparação	39
3.5	Discussão	45
3.6	Conclusão	46
3.6.1	Trabalho Futuro	47
4	Qualidade Predictiva	49
4.1	Introdução	49
4.1.1	Agentes ambiciosos	50
4.1.2	Observação e Motivação	51
4.1.3	Previsão e Predictabilidade	52
4.2	Qualidade Predictiva	55
4.2.1	Exemplos e Propriedades	55
4.2.2	Séries Reais	57
4.3	Aplicação	59
4.4	Conclusão	62
4.4.1	Trabalho Futuro	62
5	Empenho e Vontade	65
5.1	Motivação	65
5.2	Controlo Local e Global	68
5.3	Aplicações	72
5.3.1	Os <i>Exploradores de Marte</i> de Steels	72
5.3.2	O <i>Agente de Raciocínio Práctico</i>	75

5.4	Conclusão	77
5.4.1	Trabalho Futuro	78
6	Meta Agência	79
6.1	Introdução	79
6.2	Experimentação	81
6.2.1	Bases	81
6.2.2	Configuração	81
6.2.3	Observação	83
6.2.4	Inferência	85
6.3	Discussão	89
6.4	Conclusão	91
7	Meta Agência Desenvolvida	93
7.1	Introdução	94
7.2	A Arquitectura MAg	95
7.2.1	Estados Mentais e Espaço Mental	97
7.2.2	Percepções e Acções	99
7.2.3	Meta agentes	102
7.2.4	O controlo MAg/LG	103
7.3	Experimentação	107
7.3.1	Alterações ao cenário original	107
7.3.2	Objectivo e Plano	109
7.3.3	Comportamentos	110
7.3.4	Observação	112
7.4	Conclusão	114
7.4.1	Trabalho Futuro	115
8	Conclusões	117
8.1	Trabalho Futuro	119
	Bibliografia	125
A	As Economias Virtuais	135
A.1	Agentes conformistas	135
B	Os Exploradores de Marte	139
B.1	Contagem de programas a uma distância dada	140
C	O Agente de Raciocínio Prático	143
D	Fundamentos de Estatística	147

E Convenções para Pseudo-Código	151
Índice	153

Lista de Figuras

1.1	O conflito nas características dos Agentes Inteligentes.	2
1.2	Os modelos CDI (esquerda) e CDI+Vontade (direita).	3
1.3	Factores do poder individual.	5
1.4	A função Ag, de controlo de um agente.	6
1.5	Influências, Contribuições e Resultados.	7
3.1	Relação entre as variáveis dos modelos CC.	35
3.2	Relação nível versus idade em agentes conformistas.	37
3.3	Intervalos de confiança para o nível esperado.	44
4.1	A equação logística no regime periódico $a = 3,741$	58
4.2	A equação logística no regime caótico $a = 3,98$	58
4.3	Tamanho Médio de Liderança de Grupo e respectiva predictabilidade.	60
5.1	Controlo do <i>Agente de Raciocínio Prático (ARP)</i>	67
5.2	Inserção da vontade entre as crenças, desejos e intenções.	68
5.3	O <i>Controlo Local e Global</i>	71
5.4	Vontade do <i>Explorador de Marte</i>	74
5.5	Vontade do <i>Agente de Raciocínio Prático</i>	76
6.1	Controlo do meta agente do <i>Explorador de Marte</i>	82
6.2	Frequência esperada (vertical) da distância (horizontal).	87
6.3	Frequência (vertical) da distância (horizontal) na amostra <i>aleatória</i>	88
6.4	Frequência (vertical) da distância (horizontal) na amostra <i>teste</i>	89
7.1	Diagrama do controlo MAg.	96
7.2	Controlo MAg.	97
7.3	Dinâmica dos estados mentais.	97
7.4	Funções dos espaços mentais.	98
7.5	Processamento do Sistema Sensorial.	100

7.6	Representação de um controlo reactivo no espaço mental. . .	102
7.7	Processamento do Sistema Motor.	103
7.8	Integração do controlo MAg com a vontade.	104
7.9	Controlo MAg/LG.	105
7.10	Processo simples de planeamento.	106
7.11	Os <i>exploradores de Marte</i> , modificados.	109
7.12	Estados mentais para o modo reactivo dos veículos.	110
7.13	Fluxograma da vontade dos veículos teste.	111
7.14	Configuração inicial do cenário das experiências.	112
7.15	<i>Comparação de Desempenhos</i> . Médias de amostras recolhidas (vertical) durante 2000 instantes (horizontal).	113
7.16	Estruturas de dados do espaço mental: lista <i>versus</i> floresta. . .	115
8.1	Projecto estados mentais+redes neuronais.	121
8.2	Projecto Meta agência + Deliberação colectiva.	122
8.3	Projecto Carácter e Comportamentos padrão.	123
A.1	Estrutura do grafo subjacente a um grupo.	138
B.1	Controlo dos <i>Exploradores de Marte</i>	140
C.1	Pseudo-código do <i>Agente de Raciocínio Prático (ARP)</i>	145
E.1	Pseudo-código para a <i>iteração</i>	151
E.2	Pseudo-código para <i>iterações limitadas</i>	152
E.3	Pseudo-código para <i>condicionais</i>	152
E.4	Pseudo-código para <i>listas e argumentos opcionais</i>	152

Lista de Tabelas

3.1	Teste à igualdade de capacidade em CC e CC2.	41
3.2	Teste à igualdade de capacidade em CC1 e CC2.	41
3.3	Teste à igualdade de idades em CC e CC1.	42
3.4	Teste à igualdade de idades em CC1 e CC2.	42
3.5	Teste à igualdade de nível em CC e CC1.	43
3.6	Teste à igualdade de nível em CC1 e CC2.	43
3.7	Teste à igualdade de nível em CC e CC2.	44
3.8	Comparações entre os modelos CC, CC1 e CC2.	45
4.1	Exemplos simples de predictabilidade.	55
4.2	Predictabilidade amostral de TMLG.	60
4.3	Estatística Geral da Predictabilidade.	61
4.4	Predictabilidade de Grupos vs. Indivíduos.	62
5.1	Disposição Continuar.	72
5.2	Base de acções do <i>Explorador de Marte</i>	73
5.3	Construtor Disposição.	74
6.1	Teste à igualdade de Realização <i>teste</i> e <i>ótima</i>	85
6.2	Teste à igualdade de Realização <i>aleatória</i> e <i>teste</i>	86
6.3	Teste à igualdade de Eficácia <i>teste</i> e <i>ótima</i>	86
6.4	Teste à igualdade de Eficácia <i>aleatória</i> e <i>teste</i>	87
B.1	Número de programas em função de D.	141

1

Introdução

«Andávamos às cegas, de olhos abertos.»

Ursula K. Le Guin, em *A Mão Esquerda das Trevas*

Com o novo paradigma da computação como interacção, onde o termo agentes inteligentes é fundamental, a inteligência artificial regenera-se e adapta-se aos desafios, recentes e antigos, que procura compreender. Talvez a formulação mais interessante do que se pretende com este termo esteja no *Roadmap* da organização AgentLink (Rede de Excelência da Comunidade Europeia, www.AgentLink.org). Um agente inteligente será

«um sistema computacional capaz de agir flexivelmente e autonomamente em domínios dinâmicos, imprevisíveis. (...) (Este) deve operar efectivamente (...) e responder dinamicamente a circunstâncias em rápida mudança, enquanto procura realizar objectivos dominantes.»

em Luck *et al.* (2005)

Desta definição destacam-se, por um lado a *acção flexível, autónoma e efectiva* e, por outro, a *realização de objectivos dominantes*. Cada uma destas características está bem estudada isoladamente e conta com sofisticados métodos de resolução. O problema que se põe agora reside na *integração* desses sub-problemas. Nomeadamente a capacidade fundamental de *realizar objectivos em domínios dinâmicos, imprevisíveis* entra em conflito com a, igualmente fundamental, capacidade de *operar efectivamente* no mesmo tipo de ambiente.

Este conflito está esquematizado na figura 1.1. O ramo que contém o nó Agente Racional representa todas as áreas de investigação baseadas em algoritmos de pesquisa em grafos e noções de inspiração económica, como por exemplo a *utilidade* ou a *recompensa*. Entre estas estão a *Teoria de Jogos e Leilões*, a *Optimização com Restrições* e *Decisão em Processos de Markov*. O

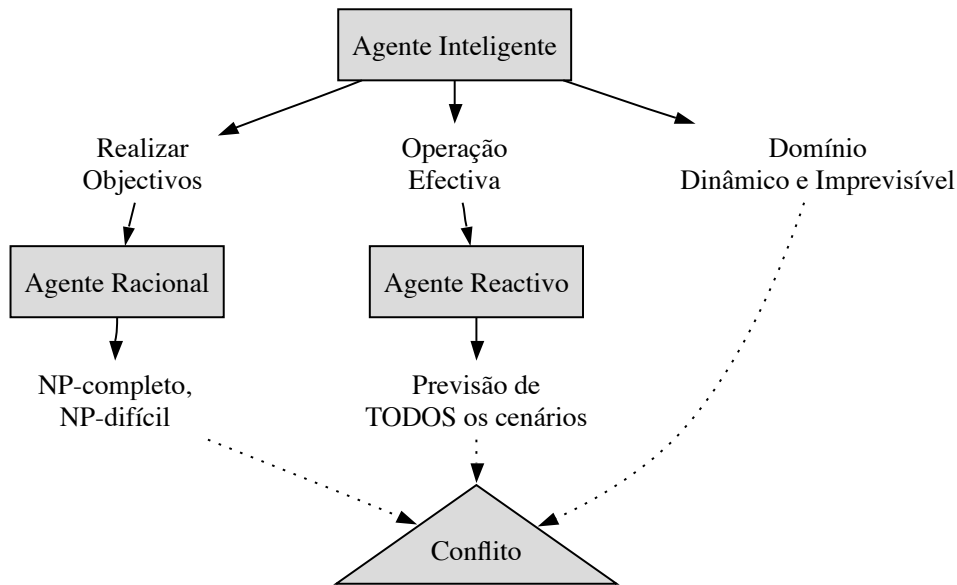


Figura 1.1: O conflito nas características dos Agentes Inteligentes.

ramo central, com o nó *Agente Reactivo*, representa a investigação derivada da *Robótica*, baseada em regras do tipo *estímulo*→*resposta*.

Cada um destes ramos tem as suas próprias limitações. No caso de um agente racional, o principal obstáculo deriva dos recursos computacionais necessários para determinar as soluções, tipicamente *óptimos globais*. Em geral, os problemas de pesquisa em grafos, mesmo com recurso a heurísticas, têm uma forte tendência para serem **NP-completos**, o que é largamente incompatível com a desejada *operação efectiva*.

Por outro lado, um agente reactivo está limitado às regras pré-programadas. Resulta daqui que a efectividade deste fica limitada a situações previstas. Será, portanto, necessário prescrever uma regra para cada possibilidade.

Além disso, estas limitações ficam ainda gravemente ampliadas no contexto de *domínios dinâmicos, imprevisíveis*, em que o ramo racional bloqueia na procura de soluções e o ramo reactivo bloqueia em situações não previstas.

1.1 Motivações

Procura-se, portanto, contribuir para a construção de um agente inteligente mais forte, de acordo com a definição anterior. Por exemplo, o jogador de futebol Eusébio representa o modelo de agente pretendido. A sua potência futebolística aliava qualidades de transformação do *status quo*, uma inconformidade com situações adversas e a geração de motivação para arrastar os seus companheiros. Assim, o percurso seguido nesta tese circula em torno das noções (ainda intuitivas) de poder individual e de vontade.

1.1.1 Vontade

Nos modelos correntes de agentes com *estados mentais* estes últimos encontram-se funcionalmente divididos entre crenças, desejos e intenções (CDI). Esta distinção será adequada para compreender a escolha de acções futuras. É, porém, insuficiente para descrever o comportamento presente, instantâneo, do agente pois há uma diferença significativa entre a intenção de fazer (no futuro) e a potência de intervir para mudar já (no presente): Falta indicar *como* os estados mentais evoluem e fluem entre as percepções e as acções do agente. Caberá à vontade *exercer a escolha das acções, interacções e objectivos individuais*, isto é, *coordenar os empenhos do agente*.

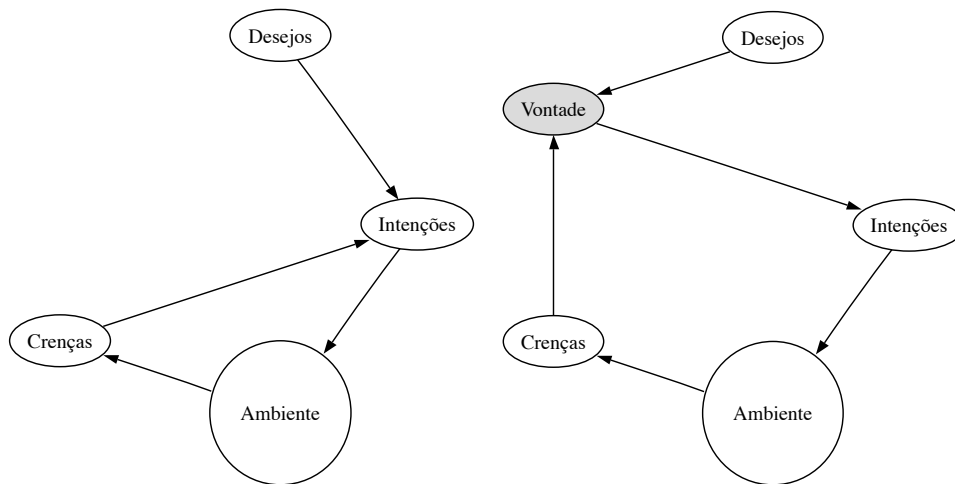


Figura 1.2: Os modelos CDI (esquerda) e CDI+Vontade (direita).

Assim, estendeu-se o modelo de comportamento CDI (no lado esquerdo da figura 1.2) —onde o agente, depois actualizar as suas crenças sobre

o estado do ambiente e, tendo em conta os seus desejos, determina as suas intenções— para um modelo CDI+Vontade (no lado direito da figura) em que a vontade tem por função filtrar os desejos e coordenar as intenções do agente. Dito de outro modo,

É a vontade que determina o comportamento do agente. Esta baseia-se nas crenças e nos desejos, que serão processados para definir as próximas intenções daquele.

Posicionando a vontade entre as crenças e as intenções será então possível isolar os processos que definem a *personalidade* do agente e, desta forma, *desenhá-la*. Um agente *teimoso* insiste nas suas intenções, se for *curioso* uma parte substancial das suas actividades serão exploratórias, etc.

Fica então em aberto saber:

- Como é que a vontade coordena o comportamento do agente?
- Qual o impacto do seu processamento no desempenho do agente?
 - Compromete ou auxilia a *operação efectiva* ou a *resolução de problemas*?
- Como é que o modelo CDI+Vontade se relaciona com outras arquitecturas conhecidas?
 - Será possível replicar um agente reactivo? E um agente racional?
 - Será possível definir um agente adaptável, que equilibre, em cada momento, o «raciocínio» com as «reacções»?
- Quando é que um agente deve ser mais ou menos *curioso*, *persistente*, *cauteloso*, etc?

1.1.2 Poder Individual

O poder individual (poder-de) de um agente é, *grosso modo*, o conjunto de aptidões que este tem. É do seu poder individual que surge a capacidade para a *acção flexível, autónoma e efectiva* e a habilidade para *realizar objectivos*. Distingue-se do poder social (poder-sobre) no sentido em que, sendo ignorados os factores sociais —as dependências, influências, compromissos, etc que, eventualmente, contribuirão para a posse ou perda dessas aptidões— o ênfase é dado aos aspectos constituintes do indivíduo.

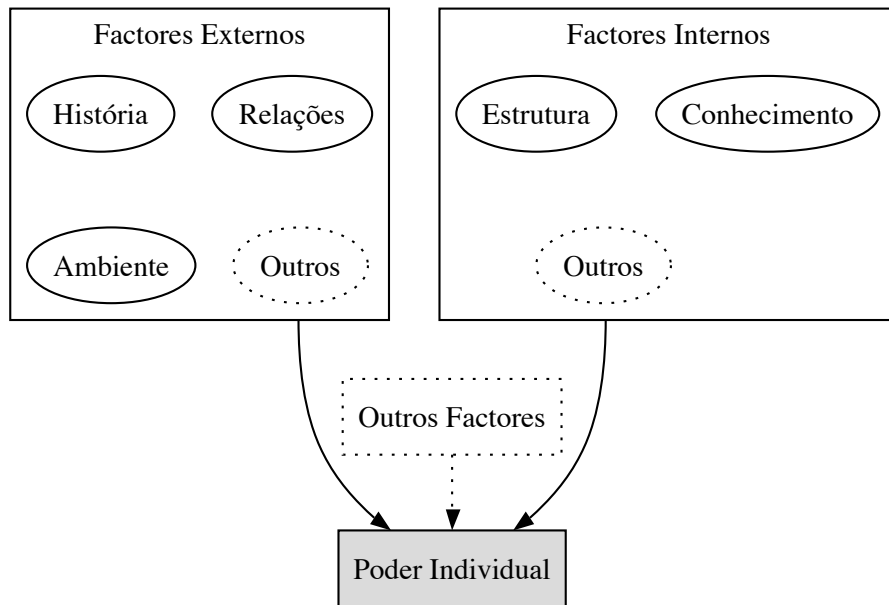


Figura 1.3: Factores do poder individual.

Interessa, portanto, conhecer os factores que influenciam o poder individual do agente, para se compreender e, eventualmente, controlar a sua *emergência* ou *colapso*.

A figura 1.3 propõe uma classificação rudimentar (e intencionalmente não exaustiva) desses factores. Implícita nesta divisão entre factores externos e internos está a descrição do agente como uma função

$$\begin{aligned} \text{Ag} : \text{Per} &\rightarrow \text{Ac} \\ p &\mapsto \text{Ag}(p) \end{aligned}$$

entre o conjunto Per de percepções e o conjunto Ac de acções (ver também a figura 1.4). Isto é, o agente é descrito como uma função que transforma estímulos provenientes do seu ambiente em acções sobre este.

A separação dos factores influentes no poder individual provém da distinção entre a *assinatura* $\text{Per} \rightarrow \text{Ac}$ da função Ag —associada aos factores externos— e a sua *regra* $p \mapsto \text{Ag}(p)$ de transformação de percepções em acções —associada aos factores internos—.

Desta forma, e a título de exemplo, a história do agente resulta das ite-

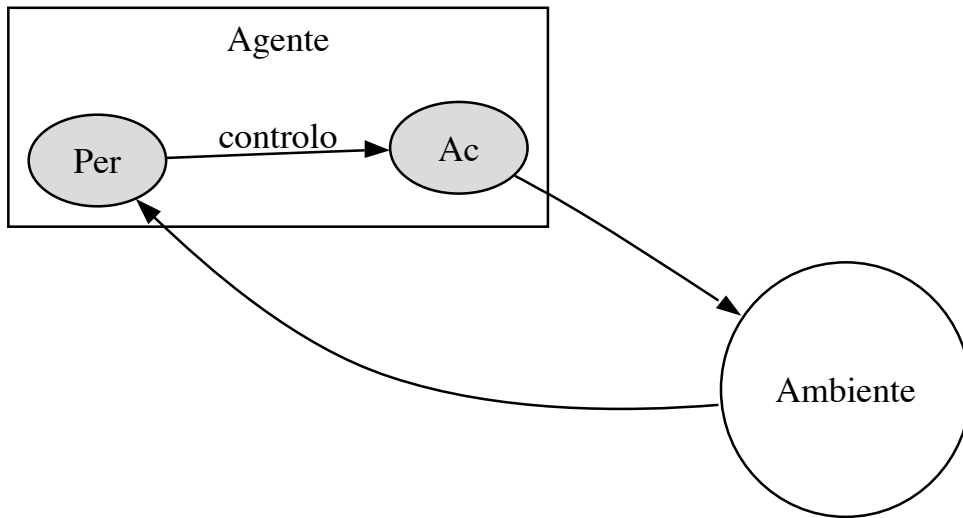


Figura 1.4: A função Ag , de controlo de um agente.

radar da função Ag . Isto é, para a *descrever* basta observar a sequência

$$(p_1, Ag(p_1)), \dots, (p_n, Ag(p_n))$$

de pares (percepção, acção). Isto é, a história H do agente existe enquanto sub-objecto da assinatura de Ag : $H \subset (Per \times Ac)^*$. Por outro lado, e ainda exemplificando, para descrever o que o agente *conhece* é necessário ter-se em conta a regra de transformação $p \mapsto Ag(p)$, não só por causa da sua *representação* de conhecimento (por exemplo, fórmulas clássicas, difusas ou modais, redes neuronais, etc.), mas principalmente pelo próprio conteúdo do conhecimento.

Esta tentativa de distinção (provisória e aproximada), entre os factores externos e internos do poder individual, sugere várias questões:

- Que outros tipos de factores serão importantes considerar?
 - Digamos, a *capacidade computacional* (memória disponível, velocidade de processamento);
 - ou os sistemas *sensorial e motor*;
- Que relações existem entre estes factores?
 - Claramente o ambiente tem grande influência sobre, por exemplo, a história e sobre o conhecimento;

- Também o conhecimento influencia as relações com outros agentes;
- Como é que cada factor contribui para o poder individual do agente?
 - O conhecimento permite ao agente raciocinar sobre os seus fins e meios para os atingir;
 - As suas relações permitem-lhe delegar certas tarefas noutros;
 - Sem «impulso», «intuição», ele levará demasiado tempo a decidir;

1.2 Contribuições

O percurso desta investigação circula em torno das questões levantadas pelo poder individual e pela vontade. Isto é, não seguiu um percurso vertical, com cada contributo assente sobre os anteriores.

Pelo contrário, foi inicialmente disperso por um leque de problemas que, pensa-se, constituem alguns dos factores centrais do entendimento da vontade e do poder individual: o conhecimento, a gestão dos empenhos e a estrutura de controlo. Este percurso disperso conflui, por fim, numa experiência de integração dos contributos anteriores.

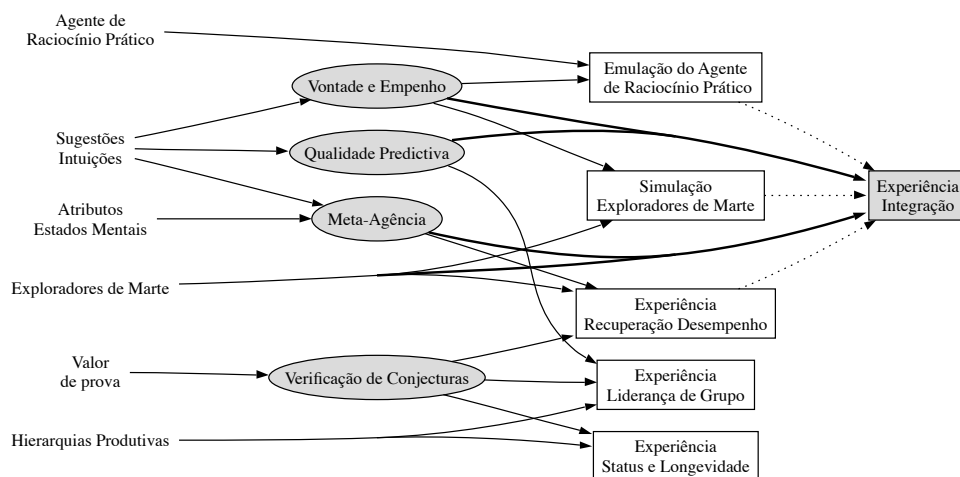


Figura 1.5: Influências, Contribuições e Resultados.

A figura 1.5 mostra um pequeno mapa das rotas de exploração e do percurso seguido. Os nós ovais sombreados representam as questões efec-

tivamente abordadas: Vontade e Empenho, Meta agência, Verificação de Conjecturas e Qualidade Predictiva. À esquerda destes estão as influências principais de outros autores: Os agentes de raciocínio prático de Woldridge (2002), os exploradores de Marte de Steels (1990), as hierarquias de produção de Caldas & Coelho (2000), os estados mentais com atributos de Corrêa & Coelho (1998) e as sugestões de Coelho (1995, 1999, 2004). O «Valor de prova» faz parte de qualquer curso de estatística, e mede a qualidade de um teste de hipóteses. À direita destes, os nós em caixas rectangulares mostram as experiências conduzidas e os resultados teóricos obtidos. Em destaque, o nó rectangular sombreado, «Experiência Integração», representa a confluência desses percursos.

Assim, lembrando as questões sobre a vontade e o poder individual, abertas na secção anterior, salientam-se as principais contribuições desta tese:

- Uma *metodologia de base estatística para a verificação de conjecturas*, a partir dos dados obtidos com uma simulação (em Coelho & Coelho (2005d,b,c, 2003, 2005e)).
 - Tendo sido sentida a necessidade de estabelecer um protocolo experimental com vista a assegurar a segurança possível às conclusões obtidas por via experimental, baseou-se essa segurança na «Qualidade de Testes de Hipóteses», que é uma técnica comum na análise estatística.
- *A verificação do impacto profundo de diferentes poderes individuais na dinâmica de sociedades fortemente normativas* (também em Coelho & Coelho (2003)).
 - pela alteração das trajectórias esperadas de variáveis, ao nível individual, como por exemplo a «longevidade» e
 - pela alteração de valores esperados de variáveis globais, por exemplo o «tamanho médio de lideranças»;
- *Para a estrutura de controlo como factor interno do poder individual e também para a relação com outras arquitecturas*: Definiu-se uma arquitectura de controlo individual (em Coelho & Coelho (2005a)), na qual o empenho do agente é centralmente gerido pela sua vontade.
 - Provou-se que essa arquitectura é suficientemente flexível para definir quer agentes reactivos, quer agentes de raciocínio prático;
 - A gestão dos empenhos integra, também, a «Experiência de Integração».

- Para o *conhecimento como factor interno do poder individual* e também, em geral, para a *análise de dados experimentais*:
 - Definiu-se (Coelho & Coelho (2005e)) uma medida do potencial predictivo de uma série temporal, baseada na identificação do «momento presente» e no seu tamanho em relação ao «passado»;
 - Demonstraram-se algumas propriedades dessa função e da sua dinâmica;
 - Ilustrou-se, com base nos dados obtidos por simulação, como essa função pode ser usada pelo observador para inferir as proveniências de amostras dadas, escolhidas ao acaso de entre duas populações possíveis;
 - A qualidade predictiva contribuiu para ilustrar, na «Experiência de Integração», a construção autónoma de conhecimento;
- Ainda para a *estrutura de controlo como factor interno do poder individual*: Considerou-se que a mente de um agente pode constituir um ambiente percebido e influenciado por outros agentes.
 - Foi conduzida (em Coelho & Coelho (2005d,b,c)), com sucesso, uma experiência com base nos exploradores de Marte, em que veículos reactivos danificados recuperam a sua funcionalidade graças a meta agentes, de forma a ilustrar uma aplicação *não trivial* da meta agência;
 - O controlo por meta agentes (e estados mentais) também contribuiu para a «Experiência de Integração»;

1.3 Organização

1.3.1 Contexto Histórico e Científico

Ainda antes de iniciar a exposição das contribuições faz-se, no capítulo 2, uma breve panorâmica, numa perspectiva histórica, da relação entre a inteligência artificial, o poder individual e a vontade. Aí traça-se um resumo da investigação desde 1955 até ao presente, referindo os (promissores) resultados iniciais, a dispersão/especialização por volta de 1966 e a entrada dos agentes inteligentes em cena, por volta de 1995.

Segue-se um breve estado-da-arte das principais abordagens ao problema do controlo dos agentes, onde se enquadra o poder individual e a vontade.

1.3.2 Perfis Individuais e Dinâmicas Sociais

A primeira contribuição desta tese, no capítulo 3, parte da tarefa de aferir a potencialidade dos comportamentos individuais. Aí pergunta-se se:

Será possível que comportamentos individuais, num contexto multi-agente, possam afectar a dinâmica social, mesmo que a sociedade tenha regras fortemente estruturantes?

Intuitivamente dir-se-ia que *sim*, mas o exercício de definir tais sociedades e uma colecção de perfis individuais, assim como ensaiar uma metodologia de verificação experimental marca o primeiro passo para o estudo do poder individual.

1.3.3 Qualidade Predictiva

Uma das componentes que, certamente, constituem o poder individual de um agente inteligente é o seu conhecimento (em particular sobre o ambiente em que se situa). Dados dois agentes, em tudo iguais, excepto no facto de um deles ter mais conhecimento do que o outro, provavelmente esse conseguirá ser mais efectivo na realização dos seu objectivos.

Assim, o domínio do conhecimento surge como um factor positivo para o poder individual e procura-se, no capítulo 4, fornecer uma ferramenta de construção de conhecimento: Uma função que mede a qualidade predictiva de uma série temporal, isto é, define-se:

Uma medida da predictabilidade de uma dada série temporal.

Com acesso a tal função um agente pode comportar-se com base em informação não explicitamente observada (por si) no seu ambiente. Por exemplo, um caçador pode procurar colocar armadilhas em locais previsivelmente frequentados por presas.

Dado que se espera que um agente inteligente tenha acesso apenas a uma quantidade limitada de recursos, a complexidade computacional da qualidade predictiva não poderá ser elevada. De facto, conforme está definida, para uma série temporal com n registos, a computação decorre (apenas) em tempo $O(n^3)$.

Cabe aqui uma pequena observação sobre a noção de «complexidade aceitável»: Mesmo $O(n^3)$ é inaceitável para séries temporais relativamente longas. Numa experiência efectuada com 2000 registos, num computador portátil recente (processador PowerPC G4 1,33 GHz com 1 GB de DDR SDRAM), o cálculo da qualidade predictiva *em cada registo de toda a série* demorou cerca de 24 horas.

1.3.4 Empenho e Vontade

De seguida entram em jogo dois actores principais na cena do comportamento, a vontade e o empenho: Dado que a racionalidade, pela metáfora da utilidade, mostra-se insuficiente para produzir os comportamentos necessários para os ambientes dinâmicos e imprevisíveis em que os agentes devem intervir e operar, segue que os modelos de comportamento individual baseados nessas noções devem ser reformulados. Entre esses modelos a reformular podemos certamente colocar as arquitecturas CDI. Mas, não pretendendo «deitar fora o bebé com a água do banho», tentam-se identificar que conceitos da via «utilitária» poderão ser reaplicados. Essa tarefa será descrita no capítulo 5. Aí propõe-se uma arquitectura de agente em que

O comportamento do agente é controlado pela sua vontade.

Esta faz a gestão do empenho do agente e determina a disposição adequada a um cálculo rápido mas efectivo das acções a serem executadas.

1.3.5 Meta Agência

Tal como nas arquitecturas CDI, o comportamento do agente é determinado por um conjunto de estados mentais: As suas crenças, intenções e disposições e também pela estrutura funcional que processa esses estados mentais. Ao nível mais abstracto fica definida uma função

$$\text{Ag} : \text{Per} \rightarrow \text{Ac}$$

entre um conjunto Per de percepções e um conjunto Ac de acções. De seguida supõe-se que o espaço mental do agente, no qual esta função é computada, tem suficiente diversidade e dinâmica para, por si, constituir um ambiente habitado por outros agentes. Isto é, no capítulo 6 investiga-se a situação em que

O espaço mental do agente é habitado por meta agentes que, ao perceber e agir sobre os estados mentais do primeiro, lhe determinam o comportamento.

A primeira questão que se põe neste cenário é de saber se desta ideia podem resultar benefícios em termos de poder individual para o agente «habitado».

1.3.6 Meta Agência Desenvolvida

No capítulo 7 faz-se uma integração dos percursos anteriores. Nomeadamente, define-se uma experiência desenvolvida com base no cenário dos exploradores de Marte, constituída por uma equipa de teste controlada por meta agência, que compete com outra equipa, de referência, reactiva. No controlo da primeira intervêm ainda a vontade, para gerir os empenhos dos veículos, e a qualidade predictiva, para a construção autónoma de conhecimento.

Assim, propõe-se uma arquitectura de controlo de agentes individuais cujos principais ingredientes são um espaço mental e um conjunto de meta agentes para habitar esse espaço. Com base nessa arquitectura desenham-se e implementam-se controlos dos veículos e da base que irão constituir uma equipa de teste.

Resultou dessa experiência que as equipas teste vencem regularmente (por recolherem, por larga margem, mais amostras) as equipas de referência. Essa diferença pode ser explicada por um lado, pelo facto da equipa testada manter, e processar, informação sobre o ambiente, o que lhe permite tirar maior proveito deste. Por outro lado, o controlo desta equipa, definido pela meta agência e dado forma à vontade, mostrou-se capaz de proporcionar agentes flexíveis, orientados por objectivos mas sensíveis a estímulos do ambiente, com *poder de* intervir.

1.3.7 Conclusões

No capítulo final da tese procura-se tecer uma perspectiva global da investigação que aqui se iniciou. São resumidas as diferentes contribuições de cada capítulo, agora numa visão mais orientada para a emergência e colapso do poder individual, mais solta dos factores localmente investigados.

Termina-se adivinhando futuros rumos de pesquisa, interacção multidisciplinar e rumos de aplicações.

2

Contexto Histórico e Científico

Aqui procura-se dar um enquadramento histórico para o tema desta investigação. Assim, as três primeiras secções resumem os intervalos históricos que terão dado os contributos mais determinantes para o presente momento:

1. 1955 – 1969: A fundação da Inteligência Artificial (IA) como disciplina definitivamente acessível à investigação e experimentação científica;
2. 1966 – presente: O amadurecimento da jovem IA, confrontada com a sua ingenuidade inicial e
3. 1995 – presente: O relançar dos objectivos fundadores, com o contributo dos Agentes Inteligentes (AI).

Nas quarta e quinta secções resume-se o estado da arte, dando natural relevo às áreas mais próximas do poder individual, nomeadamente onde se estuda o raciocínio, a decisão e o poder.

2.1 1955 – 1969: Fundação

2.1.1 Objectivos

O teste de Turing (artigo original: Turing (1950); argumentos com base na teoria de Gödel: Penrose (1994), argumento da sala chinesa: Searle (1980)) propõe uma definição funcional de inteligência —na perspectiva humana, dir-se-ia—: Resumidamente, um *computador C* e um *humano H* são questionados por um *interrogador I* (humano, também). Este, ao longo do interrogatório, desconhece a proveniência das respostas. Se não conseguir determinar as respectivas origens, então o computador *C* passa o teste.

Assim, *C* necessitará, pelo menos, das seguintes aptidões:

- processar a linguagem natural;
- representar e manter o seu conhecimento;
- raciocinar sobre esse conhecimento;
- aprender e compreender o seu ambiente;
- reconhecer o que o rodeia e
- manipular o seu ambiente

Uma forma simples de definir o objectivo da inteligência artificial (IA) poderá ser enunciada da seguinte forma:

Construir um *computador C* que passe no teste de Turing.

2.1.2 Primeiros Resultados

Os primeiros anos da IA inspiraram perspectivas ambiciosas: Com o GPS (*General Problem Solver*) de Newell & Simon (1975), a linguagem LisP (McCarthy (1978)) e a proposta de programas com *senso comum* de McCarthy (1958), o método da resolução de Robinson (1965) —que suporta a linguagem ProLog (Colmerauer & Roussel (1996))—, os micro-mundos de Minsky & Papert (1974), etc, vários artefactos computacionais realizaram proezas que, até então, se julgavam apenas dentro das competências humanas.

Ter sucesso no teste de Turing, e até ultrapassar o desempenho humano, parecia ser o próximo passo —lógico— no percurso entretanto realizado.

Foi, porém, um entusiasmo prematuro: A importância e alcance da complexidade computacional estava, então, ainda pouco compreendida.

2.1.3 Desencanto

«Não pretendo surpreender ou chocar-vos — porém, a forma mais simples em que posso resumir [o estado da arte] é dizendo que existem, no mundo, neste momento máquinas que pensam, aprendem e que criam. Além disso, a sua aptidão para tais tarefas irá desenvolver-se rapidamente até que —num futuro visível— o alcance dos problemas que manipulam seja co-extensivo com aquele a que a mente humana se tem aplicado.»

Herbert Simon (1957), citado em Russell & Norvig (2003)

A expectativa de Herbert Simon aguarda, quase já à 50 anos, por se tornar realidade. Por volta de 1966 era já claro que o optimismo inicial sobre a aplicabilidade das técnicas da IA tinha sido exagerada: Problemas aparentemente simples, como por exemplo, a tradução automática de línguas naturais, revelaram-se surpreendentemente difíceis e complexos, frequentemente ultrapassando as possibilidades técnicas de então (e de agora!).

Outra razão, talvez a mais importante, do desencanto para com a IA tem a ver com a dimensão a que determinados problemas são resolvidos. O facto de um algoritmo resolver pequenas instâncias de um problema, digamos provar teoremas em teorias com meia dúzia de dados, não significa que possa, de facto, ser aplicado para resolver instâncias significativamente maiores desse problema, mesmo que, em teoria, sem limitações físicas, o consiga resolver.

Esta situação não pode ser simplesmente resolvida com progresso tecnológico bruto, aumentando a velocidade dos processadores ou comprimindo mais e mais bits por mm^3 . O caso é que, conforme veremos, os problemas importantes e interessantes são frequentemente, pelo menos, NP-completos: Instâncias *ligeiramente* maiores do problema necessitarão, para serem resolvidas, de pesquisa em espaços *muito* maiores e, conseqüentemente, *muito* mais bits e *muito* mais tempo.

Desta forma, resolver um problema deixa de ser uma mera questão de encontrar um algoritmo pois também a complexidade computacional passa a determinar o sucesso da resolução. É necessário que o algoritmo-solução consiga resolver, usando apenas recursos dentro de limites físicos aceitáveis, instâncias suficientemente grandes do problema.

Nem sempre tal será possível. Ou porque falta o engenho para descobrir um algoritmo adequado, ou, mais frequentemente, pelas próprias características do problema. Os «resolvedores gerais de problemas», tipo GPS, desenvolvidos durante a primeira década da IA mostraram-se ineficazes para resolver problemas derivados de situações reais, não laboratoriais. A complexidade computacional é excessiva.

2.2 1966 – presente: Dispersão e Especialização

Resultando do desencanto quanto às elevadas expectativas iniciais, durante a época 60–70, a IA (enquanto ciência do conhecimento e do comportamento) dividiu-se em sub-disciplinas especializadas, orientadas para sub-problemas mais específicos —supostamente mais simples— do que o objectivo universal da inteligência geral.

Contrastando os métodos gerais de resolução, surgem os sistemas pe-

riciais. Aqui a abordagem é a do *especialista*: para cada domínio, será recolhidos conhecimentos (e práticas empíricas) que, apesar de não serem teoricamente dedutíveis a partir dos fundamentos teóricos, ainda assim sustentam os processos de decisão dos respectivos peritos: Um especialista poderá não saber *porque funciona* um determinado procedimento num determinado cenário. Basta-lhe saber *que funciona* e é esse saber específico (e empírico) que lhe proporciona o estatuto de *perito*. Foram, e continuam a ser, construídos vários sistemas periciais, entre os quais (por volta de 1970) o famoso Mycin, especialista no diagnóstico de infecções sanguíneas, com desempenho reconhecidamente melhor —não pretendendo difamar a respectiva classe— do que muitos médicos humanos.

2.2.1 Sub-disciplinas

Para além da divisão em domínios de conhecimento, implícita nos sistemas periciais, também as abordagens a diferentes problemas tecnológicos na IA seguiram percursos independentes. A partir da década de 1970 desceram várias sub-disciplinas, nomeadamente:

- processamento de língua natural;
- planeamento;
- reconhecimento visual, robótica e outras;

Em algumas destas sub-disciplinas os respectivos problemas específicos acabaram por ser resolvidos ou tiveram grande desenvolvimento para a resolução. Por exemplo, o processamento de linguagem natural é já uma tecnologia comum, com aplicações desde a marcação de números em telemóveis por comandos orais a edição de texto (foi comercializado, à uns anos, um microfone que transcrevia, para um processador de texto, o discurso ditado).

Um efeito colateral desta especialização no desenvolvimento da IA é o gradual crescimento desta enquanto disciplina científica, com bases teóricas assentes em formalismos matemáticos e, portanto, onde passa a ser possível a demonstração de teoremas, por exemplo sobre a complexidade computacional na resolução de certos problemas (e.g. Papadimitriou & Tsitsiklis (1987)).

2.3 1994 – presente: agentes inteligentes

Conforme se viu antes, um agente inteligente pode ser definido como

«um sistema computacional capaz de agir flexivelmente e autonomamente em domínios dinâmicos, imprevisíveis. (...) (Um agente) deve operar efectivamente (...) e responder dinamicamente a circunstâncias em rápida mudança, enquanto procura realizar objectivos dominantes.»

Dada esta definição, não será difícil contar os agentes inteligentes (AI) entre as sub-disciplinas da inteligência artificial. Mas, creio eu, estes têm um estatuto um pouco diferente das demais disciplinas na IA. É que, por um lado, para efectivamente construir um agente é de facto necessário crescer sobre os contributos de várias sub-áreas da IA e aplicar os respectivos métodos (por exemplo, de planeamento ou de representação do conhecimento).

Mas, mais importante, é a própria noção geral de agência que pode ser lida como uma reformulação de inteligência artificial:

«uma das consequências de se tentar construir agentes completos é a consciência de que as anteriores sub-disciplinas da IA necessitam de ser de alguma forma reorganizadas para que os seus resultados possam ser usados em conjunto.»

após Russell & Norvig (2003)

Isto é, para realizar completamente a visão da agência, não só as diferentes sub-disciplinas da IA deverão ser aplicadas e integradas como também, dessa visão realizada, resultará realizada a própria visão da IA.

A área dos agentes (Inteligência Artificial Distribuída, especialmente em torno da *coordenação, cooperação e resolução distribuída de problemas*) começa a desenvolver-se nos E. U. A. no início dos anos 80 e entra oficialmente na Europa em 1988, durante a Conferência Europeia de IA, em Munique. Em 1994, um número da revista *Communications of the ACM* dedicado à área mostra o reconhecimento da sua força tecnológica e uma importância crescente no entretenimento (cinema e jogos).

2.3.1 Sobre agentes inteligentes

Agentes como Metáfora de Desenho A noção de agência proporciona uma forma de estruturar aplicações em torno de componentes autónomas e comunicativas. É, portanto, necessário determinar técnicas e ferramentas adequadas. Por exemplo, são necessárias *metodologias* para guiar a análise e o desenho, *arquitecturas* de agentes para desenhar as componentes individuais e *abstracções* para que os programadores possam lidar com as complexidades dos sistemas e infra-estruturas implementadas.

Agentes como Fonte de Tecnologias As tecnologias de agentes implicam o domínio um vasto leque de técnicas e algoritmos para lidar com ambientes dinâmicos e abertos. Procuram-se resolver certos tipos de problemas como, por exemplo, equilibrar reacção e deliberação em arquitecturas de agentes individuais, aprendizagem de e sobre outros agentes no ambiente, deduzir e agir sobre as preferências do utilizador, procurar processos de negociar e cooperar com outros agentes, e desenvolver meios apropriados à formação e gestão de alianças.

Agentes como Simulação Os sistemas multi-agente proporcionam modelos fortes (pequenos mundos) para representar ambientes reais com um grau apropriado de complexidade e dinamismo. As aplicações típicas incluem a simulação de economias, sociedades ou eco-sistemas. O uso de sistemas multi-agente para simular domínios reais poderá proporcionar respostas a problemas físicos, sociais ou políticos que, de outra forma seriam inatingíveis, ou demasiado caras. Em particular, pode fazer-se a modelação do impacto de alterações climáticas em eco-sistemas (Castellaa *et al.* (2005)) ou de opiniões políticas no comportamento económico ou social (David *et al.* (2005)).

Assim, as simulações baseadas em agentes permitirão contribuir para desenvolver explicações e previsões plausíveis de fenómenos observados, para o desenho de estruturas organizacionais e para suportar decisões de políticos e gestores.

2.3.2 Tendências e Estímulos

A agência e os sistemas multi-agente já influenciam largamente algum do desenvolvimento contemporâneo: Nomeadamente, os *Web Services*, que proporcionam meios normalizados de inter-operação entre diferentes aplicações, desenvolvidas para diferentes plataformas. A interacção decorre via redes informáticas, sendo os interfaces descritos em formatos automaticamente processáveis. Ainda outra tendência actual é o *Grid Computing*, que visa proporcionar infra-estruturas computacionais de grande capacidade. Este desenvolvimento é particularmente importante para aplicações científicas como, por exemplo, em bio-informática e química combinatória, ou o «Large Hadron Collider» do CERN.

Por outro lado é também possível antecipar algumas possibilidades do desenvolvimento dos AI: Por um lado a *Ambient Intelligence* prevê cenários em que possivelmente milhares de aparelhos embebidos ou móveis interagem de forma a suportar os objectivos e actividades do utilizador,

enquanto que a *Autonomic Computing* prevê sistemas capazes de auto-configuração com o mínimo de intervenção humana (um exemplo recente é o automóvel *Stanley* que ganhou o prémio da DARPA por ter atravessado o deserto Mojave, sem condutor, em primeiro lugar). O objectivo é proporcionar aos utilizadores humanos o que estes necessitam, quando e onde necessitarem, sem que estes tenham um esforço consciente ou físico. Já a *Semantic Web* procura estender o formato actual da internet de modo que esta possa ser navegada e entendida por agentes autónomos.

Finalmente a construção e desenvolvimento de sistemas multi-agente permitirá uma nova abordagem a uma problemática especialmente relevante em termos científicos e humanos:

É de vital importância para as sociedades modernas compreender e antecipar a evolução dos sistemas complexos, quer estes tenham sido desenhados ou «apenas» evoluído.

Sistemas como a internet, a rede de comunicação de satélites, as metrópoles ou eco-sistemas, compostos por enormes quantidades de agentes individuais heterogéneos, interagindo, cooperando ou competindo, são altamente imprevisíveis. As tecnologias de agentes proporcionam meios de conceptualizar e simular tais sistemas, contribuindo para o conhecimento que temos destes. Em todos estes tipos de aplicação a ideia do agente inteligente pode ser materializada por uma arquitectura diversificada, que importa não só compreender mas também associar às características próprias de cada aplicação.

2.4 Estado da Arte

As tecnologias e conhecimentos que permitem estudar e construir sistemas multi-agente estão em franco crescimento e amadurecimento. Consequentemente, em grande medida, o foco da investigação tem-se deslocado das problemáticas relativas às infra-estruturas para assuntos relativos à coordenação de cooperação entre serviços.

De acordo com *AgentLink Roadmap* (Luck *et al.* (2005)), os desafios que se põem, quer de imediato, quer a curto, médio ou longo prazo para o desenvolvimento de sistemas multi-agentes podem ser classificados nas seguintes categorias (não necessariamente disjuntas):

1. Metodologias para desenvolver software robusto;
2. Standards para sistemas abertos;

3. Infra-estruturas para comunidades abertas de agentes;
4. Confiança e Reputação;
5. Adaptação e Aprendizagem e
6. Raciocínio em ambientes abertos.

A última categoria, em particular, está especialmente relacionada com este trabalho. As quatro principais abordagens associadas com as questões do planeamento e racionalidade, e fundamentais para compreender o raciocínio, a decisão e o poder, são:

1. Decisão em Processos de Markov Parcialmente Observáveis (DPMPO);
2. Optimização com Restrições Distribuídas (ORD);
3. Arquitecturas de Estados Mentais (AEM) e
4. Teoria de Jogos e Leilões (TJL).

Pretende-se dar uma pequena introdução (não exaustiva) a cada uma destes temas. Para os aspectos técnicos fundamentais recorreu-se, mais uma vez, ao livro de Russell & Norvig (2003) e, pontualmente a artigos de Actas de Conferências (entre outras, AAMAS, AAI, IJCAI, ICLP, ...) ou revistas (por exemplo, Constraints) mais relevantes.

2.4.1 Decisão em Processos de Markov Parcialmente Observáveis (DPMPO)

Um processo (ou cadeia) de Markov (discreto) é uma sucessão em que cada termo depende *apenas* do termo anterior (ou, equivalentemente, de um número finito de termos anteriores):

$$s_i = F(s_{i-1})$$

Um *problema de decisão num processo de Markov* (DPM) fica definido por um conjunto de estados S , um conjunto de acções A , uma função de recompensa $R : S \times A \rightarrow \mathbf{R}$ e uma função de transição $T : S \times A \rightarrow S$. A solução do problema é uma (qualquer) política $P : S \rightarrow A$ que maximize a recompensa ao longo de uma sucessão de estados e acções:

$$\sum_{i=1}^n R(s_i, a_i) : s_{i+1} = T(s_i, a_i), a_i = P(s_i)$$

Esta formulação serve para ambientes *completamente observáveis*, nos quais o agente tem acesso a toda a informação necessária para determinar o próximo estado, e *deterministas*, onde em cada estado, cada acção define univocamente o estado seguinte. Porém, naturalmente, poucos (se alguns) cenários reais serão compatíveis com tal suposição. Em geral, nem o ambiente será completamente observável, nem as acções deterministas.

É, portanto, necessário generalizar os DPM a situações caracterizadas pela incerteza. Um *problema de decisão num processo de Markov parcialmente observável* (DPMPO) é definido, tal como um DPM, por um conjunto de estados, um conjunto de acções, uma função de transição e uma função de recompensa. Adicionalmente, cada DPMPO especifica também um conjunto de observações O . Agora, o agente apenas obtém do ambiente, em vez de informação completa sobre estado $s \in S$, uma observação $o \in O$ relacionada com esse estado s por algum modelo adequado dos sensores do agente. Desta forma passa a ser apenas possível conhecer a probabilidade do sistema estar num determinado estado s , sendo dada uma observação o e uma acção a :

$$P(s|o, a)$$

Com base nestas probabilidades, o agente tem um *estado de crença* sobre o seu ambiente. Porém, dada uma acção $a \in A$ e uma observação resultante $o \in O$, o próximo estado de crença fica bem determinado. Isto é:

O processo de actualizar o estado de crença é markoviano. O próximo estado de crença depende apenas da crença actual, da acção escolhida e da observação consequente.

Desta forma converte-se um DPMPO sobre os estados do sistema num DPM sobre os estados de crença. No entanto, nesta conversão, o conjunto de estados perdeu a sua característica discreta: Os estados de crença, baseados em probabilidades, são contínuos.

Facilmente se adivinha que a complexidade computacional na resolução de problemas DPMPO é bastante elevada, o que é, de facto, confirmado pelo trabalho de Papadimitriou & Tsitsiklis (1987) e, mais recentemente, de Nair *et al.* (2003).

Resumindo, os processos de Markov proporcionam uma poderosa ferramenta de análise *antecipativa* (por oposição a *reactiva*), baseada na suposição de que a evolução para o próximo estado depende apenas do estado presente. A descrição do futuro ou do passado em termos da distribuições de probabilidades fornece importantes ferramentas de suporte à decisão nestes cenários.

Por outro lado, as computações envolvidas no cálculo de políticas torna os DPMPO potencialmente intratáveis e inadequados para definir, «em

tempo real» o comportamento do agente, sendo obrigatório tomar uma decisão, aceitavelmente sub-ótima, minimizando o consumo de recursos, especialmente o tempo necessário para definir essa escolha.

2.4.2 Optimização com Restrições Distribuídas (ORD)

Ao contrário da natureza dinâmica dos processos de Markov, num problema de *optimização com restrições distribuídas* (ORD) procura-se maximizar (ou minimizar) o valor de uma função alvo. No caso *não* distribuído, é dado um conjunto de variáveis

$$X = \{x_1, \dots, x_n\}$$

uma condição

$$c(x_1, \dots, x_n)$$

e uma função alvo

$$f(x_1, \dots, x_n).$$

A cada variável $x \in X$ está associado um domínio finito D_x . Além disso, a condição $c(x_1, \dots, x_n)$ é uma conjunção de subcondições binárias *lineares* (por exemplo: $(x_3 < 2x_1) \wedge (x_1 = x_2 - x_3) \wedge (x_2 \geq x_1 + 1)$).

O objectivo é determinar um máximo $S \in \prod_{x \in X} D_x$ da função alvo f que verifique a condição $c(S)$. Isto é, procura-se optimizar o alvo f respeitando a restrição c .

A decomposição da condição c em relações binárias não implica uma limitação importante pois é possível transformar qualquer condição linear c entre n variáveis numa conjugação de condições binárias, eventualmente recorrendo a variáveis auxiliares (um resultado devido ao lógico Charles Pierce). De facto, essa transformação (chamada filtragem) é parte importante nos actuais algoritmos de resolução de problemas de ORD, como por exemplo o ADOPT, descrito por Ali *et al.* (2005).

Já quanto à necessidade das relações entre as variáveis serem lineares e também dos domínios destas serem finitos são evidentes concessões à resolubilidade computacional do problema.

Este tipo de problemas descreve naturalmente situações de agendamento, distribuição de tarefas ou atribuição de recursos, entre outras. Com a variante *distribuída*, o problema ganha ainda mais aplicabilidade. Um pressuposto na versão *não* distribuída é que todas as variáveis x_1, \dots, x_n são observáveis pelo agente «resolvedor», mas nem sempre será esse o caso em sistemas multi-agente reais.

Por exemplo, num combate a um incêndio florestal uma corporação

de agentes-bombeiros está dividida por grupos diferentes, que têm percepções locais do progresso do fogo. No entanto, apesar das percepções serem localizadas, e, eventualmente, alguns objectivos também o serem, pode considerar-se como objectivo comum, a maximizar pela corporação, «extinguir o incêndio», o que só poderá ser realizado eficazmente pela co-operação e coordenação entre os vários grupos, o que raramente ocorre na vida real.

A dispersão do conhecimento sobre as variáveis pode ser ultrapassado com a comunicação entre os diferentes grupos para um «coordenador central» (a este propósito veja-se o artigo de Davin & Modi (2005)). Porém, esta abordagem tem várias desvantagens: Não só a centralização cria um problema de dependência em relação ao agente coordenador (que, no caso de falhar, pode comprometer toda a operação) como, além disso, há que considerar o custo associado à comunicação necessária, que pode vir a tornar-se proibitivo.

Desta forma o problema geral de optimização com restrições distribuídas é um dos assuntos que mais atenção atrai por parte dos investigadores da IA, estando normalmente presente nos fóruns gerais e que, além disso, conta com pelo menos uma revista científica (*Constraints*, editada pela Springer) e uma Conferência Internacional mais específica (a *International Conference on Logic Programming*).

Tal como com os processos de Markov, a computação das soluções de problemas ORD consome quantidades exponenciais de recursos, tornando-a impraticável para (ajudar a) definir agentes com comportamentos efectivos em ambientes dinâmicos.

2.4.3 Arquitecturas de Estados Mentais (AEM)

A atribuição de estados mentais a agentes artificiais assenta nas ideias defendidas por McCarthy (1958); Lifschitz & McCarthy (1980) e mais tarde trabalhadas pelo filósofo Michael Bratman (veja-se Bratman (1987)) sobre o raciocínio prático —isto é, sobre os processos mentais conducentes ao (futuro) agir— e sobre o insucesso dos modelos anteriores (dos sistemas periciais, baseados unicamente em crenças e objectivos) explicarem a conduta humana durante a elaboração e execução de planos de acção.

Bratman argumenta que um agente, ao definir uma intenção, limita o espaço das suas considerações, o que irá evitar (ou, pelo menos, aliviar) o ineficaz processamento de *todas* as alternativas possíveis sempre que o estado do mundo muda. As suas ideias foram mais tarde aplicadas e extendidas, por Cohen & Levesque (1990), ao domínio dos agentes artificiais,

com modelos formais descritos a partir de operadores modais.

Entretanto Georgeff & Lansky (1987) produzem a primeira implementação funcional, o *sistema de raciocínio procedimental* (*Procedural Reasoning System* ou *PRS*), segundo as linhas da teoria de Bratman das crenças, desejos e intenções (CDI).

Uma das noções centrais nas arquiteturas de estados mentais é a de plano, uma estrutura de dados que descreve as pré condições e efeitos de certas sequências de acções. Este constitui a base do *raciocínio procedimental* (do tipo *means-ends analysis*, por oposição ao *raciocínio declarativo*, como por exemplo ocorre nos sistemas ProLog): O agente procura realizar os seu objectivos compondo e avaliando sequências de acções. Para tal baseia-se numa biblioteca de planos, que lhe fornece critérios para filtrar que acções são aplicáveis em determinadas situações observadas e que acções produzem determinados efeitos pretendidos.

O trabalho recente de Walczak (2005) proporciona uma perspectiva extensa e actual sobre a enorme área de investigação que constitui o planeamento e o desenvolvimento de agentes com estados mentais.

2.4.4 Teoria de Jogos e Leilões (TJL)

A *teoria de jogos*, em que um agente/jogador deve competir com um ou vários adversários para realizar os seus objectivos, é, originalmente, uma disciplina matemática, o que a torna especialmente atraente para o estudo teórico de metodologias de controlo de agentes.

A principal diferença entre um jogo e um problema de planeamento reside no facto de que, num jogo, o adversário pode influenciar (e irá certamente fazê-lo) o estado que resulta da acção do próprio agente enquanto que nos problemas de planeamento, (como, por exemplo, as DPM) o estado (do ambiente) é apenas influenciado pelas acções do próprio agente.

Tradicionalmente a teoria de jogos debruça-se sobre jogos deterministas, com informação perfeita e entre dois jogadores que efectuem jogadas alternadas. Um jogo é definido por

1. um conjunto de jogadores;
2. uma função que determina, para cada estado, que acções pode um jogador efectuar;
3. uma matriz de retornos que define a utilidade para cada jogador, em função de cada combinação de jogadas de todos os jogadores.

É na teoria de jogos que têm origem termos, agora comuns, como, por exemplo, estratégia dominante (uma sequência de acções que garante a vitória de um jogador), óptimo de Pareto (um estado tal que, mudando para qualquer outro prejudicaria pelo menos um jogador) e equilíbrio de Nash (uma distribuição de acções tal que, para cada jogador, qualquer outra acção será menos vantajosa) assim como os bem conhecidos algoritmos minimax e alfa-beta.

O principal pressuposto (epistemológico) é que a cada estado do jogo está associado um certo valor numérico, relacionado com a utilidade dos estados terminais (isto é, que definem o fim do jogo). Desta forma o jogador *A* procura (recursivamente) que a acção imediata garantida, a longo prazo, um estado terminal com máxima utilidade, *supondo que o adversário B irá escolher, em cada uma das suas jogadas, a opção (óptima!) que minimize a utilidade que A poderá obter* (daí este tipo de jogos ser designado por jogos de soma zero: *B* ganha o que *A* perde e vice-versa). O algoritmo alfa-beta é uma optimização do minimax que permite, em certos casos, eliminar ramos inteiros na pesquisa da acção óptima (que é sempre uma pesquisa em profundidade primeiro).

No actual contexto do comércio electrónico, baseado na internet, há um interesse particular em leilões. Estes proporcionam um ambiente normalizado de comércio em que agentes compradores (e vendedores) automáticos negociam, em representação dos respectivos utilizadores, os bens em questão.

Desta forma um leilão pode ser descrito como um jogo em que os jogadores são os vários licitadores e cada jogada é uma oferta (ou a sua ausência). A utilidade no final do leilão pode ser definida com a diferença entre o valor (para o vencedor) do bem adquirido e o montante pago por este, enquanto que para os perdedores a utilidade (perdida) é simplesmente o valor atribuído ao bem leiloadado.

Porém os leilões podem ser usados para outro tipo de aplicações. Por exemplo, recentemente Matsubara (2005) propôs um protocolo baseado em leilões sequenciais para resolver problemas de alocação de recursos em ambientes dinâmicos.

2.4.5 Híbridos

Note-se que os problemas em cada uma das quatro áreas anteriores podem ser, *em abstracto*, resolvidos com alguma variante da «pesquisa de força bruta», considerando e explorando todas as possibilidades.

Claramente, uma das principais preocupações dos respectivos cientis-

tas é criar condições em que algoritmos mais eficazes possam ter o máximo de aplicação.

Uma boa estratégia para resolver o problema da «pesquisa de força bruta» consiste em efectuar *pesquisas informadas*, com base em *heurísticas* que permitam eliminar alguns ramos na árvore de pesquisa.

Recentemente Tambe *et al.* (2005) propôs que essas heurísticas poderão ser construídas integrando DPMPO, ORD, AEM e TJL. Desta forma as funcionalidades em que uma área é mais forte poderão ser empregues para auxiliar a resolução de problemas em outra. Por exemplo, os planos das AEM podem orientar a pesquisa num DPMPO.

2.4.6 Direcções

Porém, não se pode reduzir o desenvolvimento da IA aos progressos tecnológicos. Presentemente alguns actores destacados têm feito sentir o seu desconforto com o visível rumo actual em conferências e publicações dedicadas à IA e aos AI. Por exemplo, numa entrevista sobre o filme «2001», Marvin Minsky diz que

«(...) se o grupo do SRI não tem construído *Shakey*, o primeiro robô autónomo, teríamos progredido mais. Nunca deveriam ter construído o *Shakey*. Foi um erro no reconhecimento dos verdadeiros problemas da IA. (...) As pessoas que construíram robots aprenderam nada.

(...) Mas *poderíamos* ter aprendido! Apenas uma pequena comunidade se concentrou na inteligência geral.

O resultado é que não tivemos grandes progressos rumo a uma máquina realmente inteligente. Temos colecções de burros, especialistas em pequenos domínios; a verdadeira majestade da inteligência geral aguarda ainda o nosso ataque.»

Marvin Minsky em Stork (1996)

Também Scott Moss, numa recente conferência (Moss & Emma (2005)), observou que, actualmente, pouco esforço é dedicado aos objectivos originais da IA, sendo o panorama geral rico em pequenas variações de alguns grandes contributos anteriores.

Há muito que John McCarthy e Marvin Minsky lembram que o percurso para a realização da IA deve passar pela realização do *senso comum* (*commonsense reasoning*).

Ainda Pat Langley segue a crítica de Scott Moss e propõe uma arquitectura para definir o comportamento individual de agentes inteligentes (Langley (2005)).

Adicionalmente, outros autores (por exemplo, Antunes *et al.* (2003)) têm criticado a via racionalista, fortemente baseada na noção quantitativa de utilidade. Resumindo:

O relativo conforto tecnológico em que nos encontramos presentemente não satisfaz ainda o projecto da inteligência artificial nem a visão dos agentes inteligentes.

Embora em algumas áreas específicas os resultados sejam notórios (como, por exemplo, com o reconhecimento de linguagem natural), noutras áreas encontramos-nos, passados 50 anos desde o *Dartmouth College Summer AI Conference* em 1956, no mesmo ponto que então:

Não sabemos construir uma máquina que passe o teste de Turing (veja-se o concurso anual *Soebner*); não sabemos definir um artefacto com inteligência geral.

2.5 Poder individual e Poder Social

Será então a complexidade computacional um dos principais problemas recorrentes na inteligência artificial.

Em particular, quando se procura realizar a visão dos agentes inteligentes, certas noções fundadoras e essenciais tais como a autonomia, flexibilidade ou efectividade tornam-se fontes de potenciais explosões computacionais. É necessário saber quando, e como, evitar essas armadilhas.

Uma das abordagens possíveis para estruturar o comportamento de agentes inteligentes consiste em replicar aqueles que mostram o melhor desempenho. Em particular, pode tentar-se copiar a estrutura comportamental dos agentes humanos. Assim resultam processos de definir o comportamento de agentes em termos de estados mentais, eventualmente com as mesmas capacidades cognitivas de vulgo atribuídas aos seres humanos.

A distinção dos estados mentais entre crenças, desejos (ou opções) e intenções produziu já resultados funcionais, e em aplicação. No entanto, no presente momento, as designadas arquitecturas CDI, além de incompletas quanto aos processos instantâneos da acção do agente, também são excessivamente centradas em comportamentos racionais com óbvio prejuízo para o desempenho em cenários abertos (incertos, incompletos), de elevada complexidade, onde, à partida, qualquer tentativa de definir comportamentos óptimos está condenada ao insucesso funcional.

Como se viu (por exemplo, na teoria de jogos ou nos DPM), por comportamento racional entende-se, comumente, a ordenação pelo valor, em

cada momento, de todas as acções possíveis e a escolha da primeira dessas acções. Ora, apenas para a mera valorização numérica de cada acção possível são já necessárias capacidades cognitivas e computacionais de excepção: O valor de cada acção depende da atribuição de uma utilidade a cada estado possível (o que por si não é evidente se pode, e como deve, ser feito) e do conhecimento da probabilidade de observação desse estado. Isto é, para computar a utilidade de uma acção é necessário, *para cada estado possível*, conhecer:

- o respectivo valor;
- a probabilidade de ocorrência;
- cada acção possível;

Assim, a via do agente racional, por necessitar destas computações, não é capaz de produzir senão agentes *fracos*, inábeis e, portanto, incapazes de atingir os comportamentos necessários para concretizar a visão dos AI, citada acima: Um agente inteligente será competente para *operar efectivamente (...)* e responder dinamicamente a circunstâncias em rápida mudança, enquanto procura realizar objectivos dominantes. O problema que se põe agora é

saber como progredir a partir do modelo racionalista,

de modo a realizar esta visão. E é esse o problema que alimenta esta tese.

Assim surge o termo poder, denominador comum deste trabalho. De acordo com a «InfoPédia, Porto Editora»,

poder:

verbo transitivo ter a faculdade ou a possibilidade de; ter autorização para; ter o direito de; estar arriscado a; ter razões para; ter força, coragem para; ser capaz de; ter ocasião ou oportunidade de;

verbo intransitivo ter possibilidade, influência ou força; haver possibilidade; ser possível;

substantivo masculino facto de dispor de meios que possibilitam uma acção; faculdade; possibilidade; capacidade legal de fazer algo; direito; capacidade de agir sobre algo; autoridade; domínio; força; influência; recursos; meios; característica física de uma substância; potência; eficácia; força física ou moral; manifestação dessa força; situação dos que detêm autoridade; jurisdição; força política na sua relação com o cidadão; soberania;

exercício ou manifestação dessa força política; conjunto dos órgãos que asseguram a administração de um Estado; governo de um Estado; força militar;

Do lat. vulg. **potére*, do lat. cl. *posse*

Neste verbete é evidente que o termo poder tem duas interpretações diferentes: Há um poder social (poder-sobre), que diz respeito à relação entre dois ou mais agentes. Por exemplo, na acepção «ter autorização para», implicitamente alguém concede a outrem determinada permissão. Também «ter influência» implica a existência de uma relação entre duas partes: o influente e o influenciado. Esse poder social, que algum agente possui, poderá ter sido delegado por outro agente, ser inerente a um cargo ocupado (o que será um caso particular do anterior, considerando a sociedade, as suas normas e cultura como um super-agente), resultar de contingências do sistema ou ter sido conquistado pelo próprio agente individual.

De facto, o carácter social dos sistemas multi-agente tem servido como estímulo para uma quantidade significativa de investigação sobre o poder social, que poderá ser classificada em duas perspectivas diferentes: Primeiro, na linha de Cristiano Castelfranchi (por exemplo, Castelfranchi (2003, 2000b,a, 1989)), explica-se a relação de poder-sobre entre dois agentes: Se um agente *A* tiver por objectivo *x* e, para realizar esse objectivo, necessitar previamente de realizar *y*; Se, porém, a realização de *y* puder ser realizado por outro agente *B* mas estiver fora do alcance de *A*, então *A* depende-de *B* para *x*. Reciprocamente, *B* tem poder-sobre *A*, em relação ao objectivo *x*. Nesta perspectiva o poder social surge explicado pela necessidade que um agente tem em relação aos seus objectivos e pelo contexto social em que esse agente se encontra.

Numa segunda perspectiva, de acordo com, por exemplo, Maria Fasli (em Fasli (2005)) ou Fabiola López (López y López *et al.* (2003)), um agente *A* tem poder-sobre outro agente *B* em função do seu estatuto (do termo inglês «role») conferido pelo contexto social. Esta noção de poder social, ao contrário do que acontece com a perspectiva de Castelfranchi, não explica porque ocorre a relação de poder-sobre, mas é, sem dúvida, adequada ao estudo de organizações normativas e das relações individuais nesses (ubíquos) contextos particulares.

Mas também há uma outra interpretação de poder (poder-de), independente do contexto social e que diz respeito *apenas* ao indivíduo: quando se lê «poder» como «ter a faculdade de», «ser capaz de», «ter força para» ou «eficácia», o aspecto social passa a segundo plano e sobressai a *relação entre o agente, as suas acções e os seus objectivos*: Um agente poderá, ou não, efectuar determinada acção, atingir determinado objectivo.

É a esta noção de poder, relacionando o indivíduo com os seus desejos e acções que norteia esta investigação.

Lembrando agora que um agente deve «realizar objectivos dominantes e agir autonomamente», vemos, portanto, que é a própria noção de poder, do indivíduo, que sustenta a visão interventiva e transformadora de agente inteligente. Um agente inteligente será, necessariamente, um agente com poder individual.

Esse agente poderá encontrar-se numa sociedade que lhe proporcione outras formas de poder, eventualmente contribuindo positiva ou negativamente para o seu poder individual e vice-versa. Intuitivamente, um agente com elevado poder social terá também elevado poder individual: A sua capacidade de influenciar outros poderá ser utilizada em seu próprio proveito para realizar os seus objectivos, portanto contribuindo para aumentar o seu poder individual. Por outro lado, um agente uma vez inserido num contexto social (se este não for demasiado rígido) poderá aumentar o seu poder sobre os outros através do exercício do seu poder individual, por exemplo em sistemas que valorizem o mérito. Mas, na forma social e na forma individual, temos conceitos diferentes de poder, explicados por razões diferentes e diferentemente influentes no comportamento do agente.

2.5.1 Vontade

«Pode haver vontade sem desejo, mas nunca desejo sem vontade, que o precede sempre.»

Bento Espinoza, em *Oeuvres I, Court Traité*, Cap. XVI

A eficácia do comportamento implica que as acções que o descrevem devem ser coordenadas, coerentes, orientadas. É, portanto, necessário considerar os fins que o agente se propõe realizar e os meios que tenciona seguir para tal. Tendo-se abandonado o compromisso do comportamento óptimo, abre-se a perspectiva de cada agente ter um carácter: teimoso, curioso, corajoso, etc. Idealmente, a realização (sub-óptima) dos objectivos assumidos passará pela aplicação desse carácter aos empenhos do agente. Certas personalidades, em certos ambientes, para realizar certos objectivos, serão preferíveis a outras. Para tal se chegar a tais considerações será necessário primeiro que intervenha a vontade: o coordenador dos empenhos.

Assim, antes de considerações sobre as formas que a vontade poderá dar à realização de objectivos, importa saber que lugar esta ocupa num controlo baseados em estados mentais. Como se relaciona a vontade com as crenças, desejos e intenções? Para estudar esse assunto segue-se o moto

de Espinoza, dando primazia à vontade sobre a formação das intenções (derivadas dos desejos = objectivos) e cursos de acção.

3

Perfis Individuais e Dinâmicas Sociais

Neste capítulo procura-se realizar um duplo objectivo: Primeiro, motivar a investigação sobre o poder individual. Segundo, estabelecer as bases para uma metodologia de validação empírica.

Mostra-se, numa sociedade fortemente estruturante, como diferentes comportamentos individuais levam a diferentes dinâmicas sociais. Sendo tudo o resto igual, resta como única explicação para as diferenças observadas as diferenças nos comportamentos individuais.

As conjecturas sobre as dinâmicas sociais serão verificadas, ou não, com base nas técnicas de análise estatística, em particular nos testes de hipóteses, o que proporciona uma medida para o grau de confiança das conclusões.

3.1 Introdução

Embora muita investigação actual estude precisamente a relação entre o indivíduo e a sociedade, ocorre a seguinte observação:

Há a tendência, justificável por razões estéticas e analíticas, para, em simulações sociais, reduzir o indivíduo a um mínimo —infelizmente, em muitos casos, irrealista— de competências.

Resulta frequentemente deste minimalismo que o comportamento do agente seja, a menos de factores aleatórios, unicamente condicionado pelo seu ambiente.

Aqui, e em Coelho & Coelho (2003), a partir dos trabalhos de Caldas & Coelho (1999b,a, 2000), procura-se pensar em *instituições* e *mudança* não somente na perspectiva estática de estrutura e função social mas, também, introduzindo *motivações individuais*, o que é uma preocupação simultaneamente antiga (McCarthy, 1958) e contemporânea (Dennett, 2004).

Agora os agentes percebem o ambiente em que estão imersos e, de acordo com critérios individuais (a sua vontade), escolhem como agir. Ao se inserir tal capacidade no indivíduo muda-se a perspectiva do poder social para o poder individual. Estes agentes, em que se cruzam critérios próprios e critérios sociais, irão influenciar a sociedade, ilustrando uma forma de poder individual, na qual

o conhecimento do poder individual implica o reconhecimento dos processos individuais que guiam a escolha de acção.

Por outro lado, procura-se também neste capítulo estabelecer as bases para uma metodologia experimental de simulações multi-agente, exemplificando que

as simulações multi-agente, enquanto ferramenta científica, necessitam de ser continuadas com análises estatísticas dos registos.

Assim, descreve-se uma experiência construída de modo a sustentar que diferentes comportamentos individuais produzem diferentes dinâmicas sociais.

Procura-se, em particular, validar as conjecturas avançadas com base em evidência empírica, obtida por simulação multi-agente e sujeita a análise estatística (veja-se o apêndice D). Além disso, de forma a sublinhar o alcance da vontade e do poder individual, o modelo social simulado deverá ser fortemente hierárquico e estruturante.

3.2 Exemplo: Uma Economia Virtual

O modelo socio-económico em que se baseiam essas experiências é derivado do modelo económico de produção hierárquica (aqui baptizado) CC proposto por Caldas & Coelho (2000) e descrito em detalhe no apêndice A.

O modelo virtual de produção hierárquica CC procura simular, sinteticamente, uma sociedade de agentes inter-dependentes e produtores de um determinado bem. Nessa sociedade os agentes produtores estão divididos em grupos hierárquicos. Um tal grupo define um grafo conexo e orientado, onde os nós são os agentes e as arestas ficam definidas por uma relação de dependência: Cada agente depende de um único outro agente, e é essa dependência que orienta o grafo. Além da hierarquia assim definida, neste modelo intervém também a capacidade produtiva de cada

agente. Em cada iteração do modelo esta determina a produção individual. A produção global, de todos os agentes, define o preço de venda do bem e influencia os rendimentos individuais. Estes, por sua vez, também dependem do custo unitário de produção no grupo. Finalmente, o rendimento individual depende da capacidade (individual), do preço global e do custo unitário no grupo e determina a actualização da capacidade. A figura 3.1 pretende ilustrar como estas variáveis se relacionam.

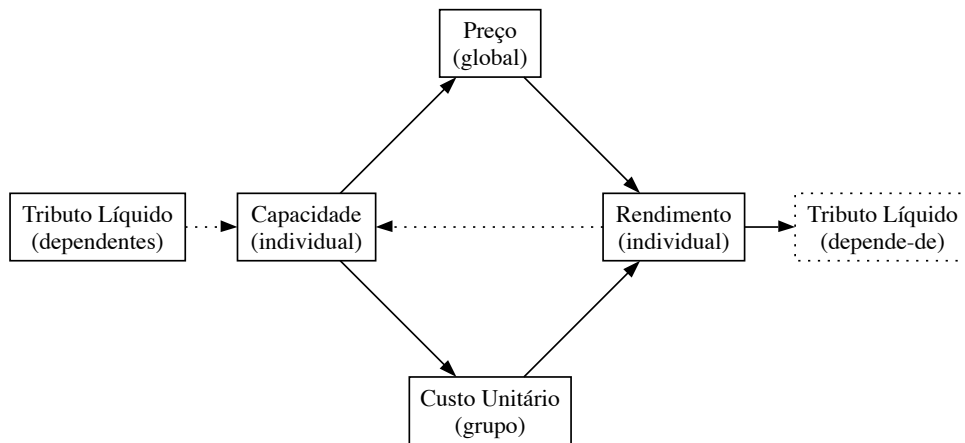


Figura 3.1: Relação entre as variáveis dos modelos CC.

O procedimento de decisão individual original em CC não contempla processos deliberativos envolvendo estados mentais: o comportamento do agente não depende da sua determinação. Daí designar-se esse perfil individual por conformista. No entanto, apesar de este ser um perfil passivo, verifica-se uma relação causal entre a história e o estado do agente.

Por outro lado, ao nível metodológico, procura-se a validação empírica de conjecturas, onde os dados colhidos das simulações são alvo de análise estatística. Desta forma tenta-se conferir o possível rigor científico à experimentação multi-agente.

No primeiro ensaio para tal metodologia empírica a simulação e consequente análise de dados mostrarão que, para os agentes conformistas,

- A expectativa de vida e a capacidade individual de produção estão relacionadas com o nível hierárquico;
- Se, sob certas circunstâncias críticas, os agentes poderem mudar de líderes –eventualmente tornando-se eles próprios líderes– a capacidade global de produção atinge valores maiores porém a expectativa de vida diminui.

3.3 Uma conjectura sobre agentes conformistas

Em Caldas & Coelho (2000), os autores do modelo CC conjecturaram que

agentes com maior idade tendem a encontrar-se no topo das hierarquias.

Esta observação foca uma propriedade de uma sociedade particular, moldada apenas pelo poder social. Os agentes, não dispondo de poder individual, nem sequer de vontade para o exercer, são arrastados nas dinâmicas dos grupos e da sociedade em que se encontram.

3.3.1 Agentes com Maior Idade

Os dados que sustentam aquela conjectura resultam de simulações com 16 agentes conformistas, obtidos no instante $T = 4000$. Procura-se conferir-lhe suporte empírico, não apenas com base na falível observação directa de amostras, mas procedendo de acordo com as técnicas normais de análise estatística, descritas no apêndice D.

Segue-se então o seguinte processo: Considerando as observações dos últimos 10 instantes antes de $T = 4000$, para cada agente i e para cada instante $t \in [3991, 4000]$, regista-se um par

$$(\text{nível}_{i,t}, \text{idade}_{i,t})$$

das variáveis nível e idade relevantes.

Tal registo proporciona, numa amostra particular, a figura 3.2 onde cada ponto mostra o estado parcial —definido pelo par $(\text{nível}_{i,t}, \text{idade}_{i,t})$ — de algum agente i , em algum instante t do intervalo considerado e a linha interpola as idades médias observadas em cada nível. Tendo sido medidos 10 instantes, cada agente i é responsável por 10 pontos. Esse conjunto de pontos descreve uma trajectória com uma componente vertical ascendente (uma vez que a idade de i vai aumentando) e uma componente horizontal, para os casos de agentes que mudam de nível.

Note-se que no canto superior direito da figura 3.2 não se registaram observações, o que indica que agentes com fraco nível social (portanto com valor $\text{nível}_{i,t}$ elevado) não sobrevivem por muitos ciclos. Opostamente, os agentes no topo da hierarquia social (com $\text{nível} \in \{0, 1, 2\}$) mostram potencial para sobreviver sem limites.

Esta figura sugere uma forte relação entre o nível e a idade dos agentes. Uma forma de medir essa relação será pela computação de um coeficiente de correlação (descrito no apêndice D).

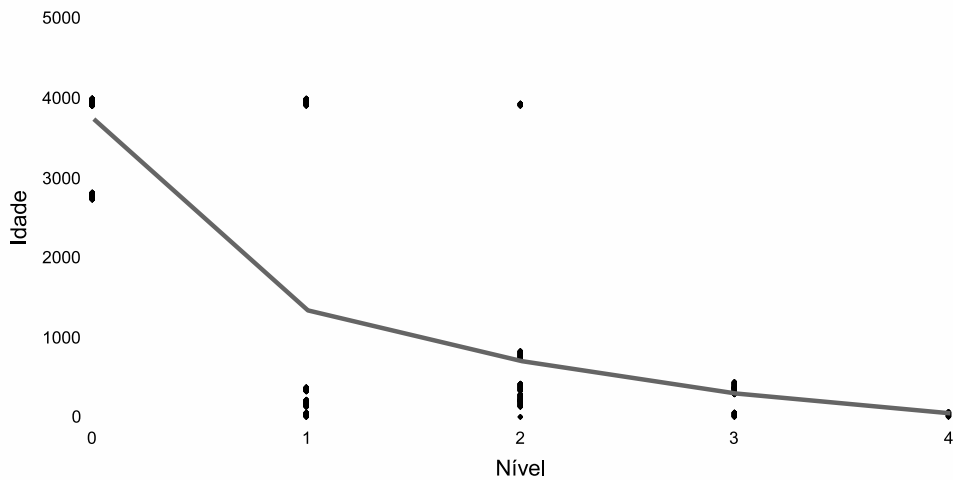


Figura 3.2: Relação nível versus idade em agentes conformistas.

Para esta amostra particular obteve-se

$$\text{cor}(\text{nível}, \text{idade}) = -0,76882$$

o que é um forte indicador que o nível e a idade estão inversamente relacionados: Os agentes no topo (com baixo valor de nível) vivem mais tempo (maior valor de idade).

No entanto, não é suficiente efectuar uma única vez este cálculo. A correlação numa única amostra proporciona fraco suporte a conjecturas com perspectivas gerais. Para fundamentar uma asserção generalista é necessário

1. aproximar, com base em várias amostras, o valor da correlação na população e, ainda,
2. verificar se o valor assim obtido não é fruto do acaso.

O teste standard para a localização e verificação do valor da correlação entre duas variáveis é o teste «Produto Momento de Pearson» (conforme Ihaka & Gentleman (1996) e o apêndice D).

Para as amostras observadas, esse teste proporciona os seguintes valores

variáveis aleatórias: nível e idade

valor de prova: valor-p = $2,2 \times 10^{-16}$

intervalo de confiança a 95%: $[-0,8231304, -0,7005716]$

cuja interpretação é

- Supondo que as amostras são independentes e seguem distribuições normais,
- a correlação das variáveis aleatórias testadas está, com probabilidade 0,95, no intervalo indicado.
- Além disso, a probabilidade de o nível e a idade *não* estarem correlacionados é menor do que o valor de prova resultante: $2,2 \times 10^{-16}$;

Deste teste é possível seguir duas linhas de conclusão

extra-cautelosa: Se as amostras forem *normais* e *independentes*, então os agentes com maior idade ocupam o topo da hierarquia;

normal: os agentes com maior idade ocupam o topo da hierarquia.

3.4 Comparações de Comportamentos

No modelo conformista, a partir do estado inicial, unicamente o contexto social define toda a história. Os agentes nascem, produzem, crescem ou morrem sem terem determinado uma única acção. Nas variantes destes agentes que, de seguida, se apresentam, os indivíduos intervêm, com maior ou menor amplitude. Isto é, não são apenas as normas institucionais que marcam o ritmo da dinâmica.

3.4.1 Agentes desertores

Um agente desertor é a variante mais simples do agente conformista. Os agentes continuam a ser descritos pelo tuplo

(nome, idade, capacidade, depende)

mas podem *reagir* a situações de fraca capacidade: Se capacidade $< \Theta_1$, em que Θ_1 é um certo limiar dado, comum a todos os agentes, o desertor muda para um novo líder, escolhido ao acaso. Esta acção traduz-se numa alteração do parâmetro individual depende e também na estrutura social, pois toda a sub-árvore de dependentes do agente que deserta migra com este. Serão designadas por CC1 as sociedades constituídas apenas por agentes desertores.

3.4.2 Agentes sedutores

A segunda variante, designada sedutor, incorpora duas acções, uma para «deserção» e outra para a equilibrar, potenciando a «fidelização». Nesta configuração, um agente, tal como um desertor, procurará mudar de líder sempre que se encontrar fraco. Porém, ao contrário do simples desertor, terá algum critério na escolha do novo líder. Por outro lado, se um agente se encontrar numa situação confortável, irá tentar tornar-se mais atractivo, diminuindo o esforço imposto aos seus subordinados, pela redução da taxa sobre os contributos recebidos. Assim, cada agente poderá

seduzir, reduzindo a taxa de imposto aos seus dependentes ou

desertar, escolhendo como novo líder aquele que tenha menor taxa, entre três agentes escolhidos ao acaso.

A estas acções correspondem diferentes activações. Para

seduzir, se a capacidade $> \Theta_2$ (um limiar dado), o agente baixará a taxa do seu imposto em 10% enquanto que para

desertar, quanto menor o nível hierárquico, maior a probabilidade de desertar. Desta forma agentes no topo da hierarquia (com nível = 0) permanecem estáticos com respeito a esta acção. Agentes com nível = 1 executam esta acção com probabilidade $p_1 > 0$, agentes com nível = 2 com probabilidade $p_2 > p_1$, etc.

Como a taxa de imposto passou a variar individualmente, é necessário um parâmetro extra na descrição dos agentes sedutores. Agora estes são descritos por tuplos

(nome, idade, capacidade, depende, taxa)

onde taxa indica o imposto que o agente impõe aos seus dependentes e os restantes parâmetros têm a leitura anterior. O valor inicial deste parâmetro é comum a todos os agentes, evoluindo então de acordo com as histórias individuais. As sociedades compostas apenas por agentes sedutores são designadas por sociedades CC2.

3.4.3 Comparação

Note-se que as leis sociais, que regem o cálculo do preço, a actualização das capacidades individuais, a constituição dos grupos, etc, são iguais nos

três modelos CC, CC1 e CC2. Esta é uma constatação importante pois neste capítulo procura-se observar o efeito do comportamento individual na dinâmica social. É portanto natural *não* mudar as regras sociais, limitando quaisquer alterações ao âmbito do indivíduo.

As diferenças dos três modelos estão limitadas ao controlo do comportamento dos indivíduos.

Com estas diferenças comportamentais, anteriormente descritas, os agentes agora poderão, potencialmente, incorporar reacções, observações, memórias e táticas. É portanto natural que se questione

como é que estas diferenças, que mudam os comportamentos individuais, afectam a dinâmica global da sociedade?

De forma a obter uma validação estatística (às respostas que se possam adivinhar) seguiu-se o seguinte procedimento:

1. Seja t um instante fixado após o período transiente de todos os modelos, digamos $t = 9900$;
2. Seja \mathcal{V} um conjunto de variáveis partilhadas pelos três modelos, digamos $\mathcal{V} = \{\text{Idade}, \text{Nível}, \text{Capacidade}\}$ em que
 - (a) Idade é a idade média (populacional) dos agentes de uma dada simulação, num dado instante t ;
 - (b) Nível é o nível médio dos agentes e
 - (c) Capacidade é a capacidade média.
3. Consideram-se os registos das variáveis de \mathcal{V} obtidos com n simulações (digamos $n = 30$) de cada uma dessas sociedades.

O resultado deste procedimento é, para cada sociedade (CC, CC1 e CC2), uma tabela com $|\mathcal{V}|$ colunas e n linhas. Tais tabelas contêm os dados empíricos que devem confrontar, via análise estatística, as questões derivadas dos modelos abstractos. Por exemplo:

Serão iguais os valores esperados da variável $X \in \mathcal{V}$ em dois modelos, digamos \mathcal{M}_1 e \mathcal{M}_2 ?

Variável: Capacidade	Populações: CC e CC2
Hipótese nula	$\mu\text{Capacidade (CC)} = \mu\text{Capacidade (CC2)}$
Hipótese alternativa	$\mu\text{Capacidade (CC)} < \mu\text{Capacidade (CC2)}$
Observação em CC	9,09577
Observação em CC2	9,43243
Observação da estatística de teste	$t = 4,35666$
Condição de rejeição	$t > 1,67203$
valor de prova	$2,78487 \times 10^{-5}$
Conclusão	<i>Rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 3.1: Teste à igualdade de capacidade em CC e CC2.

Esta questão pode ser estudada pelo «Teste t (de Welch)» para duas amostras não emparelhadas, descrito no apêndice D. Para estes testes, o nível de significância é $\alpha = 0,95$. Por exemplo, quando $X = \text{Capacidade}$, $\mathcal{M}_1 = \text{CC}$ e $\mathcal{M}_2 = \text{CC2}$, obtiveram-se os resultados da tabela 3.1.

Portanto há evidência estatística para validar empiricamente a seguinte afirmação:

Os agentes sedutores têm maior capacidade do que os agentes conformistas.

Variável: Capacidade	Populações: CC1 e CC2
Hipótese nula	$\mu\text{Capacidade (CC1)} = \mu\text{Capacidade (CC2)}$
Hipótese alternativa	$\mu\text{Capacidade (CC1)} > \mu\text{Capacidade (CC2)}$
Observação em CC1	9,57523
Observação em CC2	9,43243
Observ. da estatística de teste	$t = 2,10191$
Condição de rejeição	$t > 1,67252$
valor de prova	0,02003
Conclusão	<i>Rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 3.2: Teste à igualdade de capacidade em CC1 e CC2.

Seguindo o mesmo procedimento para as amostras de CC1 e CC2, obtém-se a tabela 3.2, donde se pode concluir que

Os agentes desertores têm maior capacidade do que os agentes sedutores.

Agora, por transitividade,

Os três comportamentos considerados levam os agentes a atingir capacidades diferentes.

Os agentes desertores atingem maiores valores desta variável, seguidos dos agentes sedutores e, por fim, com a menor capacidade, os agentes conformistas.

Variável: Idade	Populações: CC e CC1
Hipótese nula	$\mu_{\text{idade}}(\text{CC}) = \mu_{\text{idade}}(\text{CC1})$
Hipótese alternativa	$\mu_{\text{idade}}(\text{CC}) > \mu_{\text{idade}}(\text{CC1})$
Observação em CC	4492,76
Observação em CC1	3100,71
Observação da estatística de teste	$t = 9,08446$
Condição de rejeição	$t > 1,68957$
valor de prova	$4,91412 \times 10^{-11}$
Conclusão	<i>Rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 3.3: Teste à igualdade de idades em CC e CC1.

Variável: Idade	Populações: CC1 e CC2
Hipótese nula	$\mu_{\text{idade}}(\text{CC1}) = \mu_{\text{idade}}(\text{CC2})$
Hipótese alternativa	$\mu_{\text{idade}}(\text{CC1}) > \mu_{\text{idade}}(\text{CC2})$
Observação em CC1	3100,71
Observação em CC2	2871,65
Observação da estatística de teste	$t = 3,22459$
Condição de rejeição	$t > 1,67203$
valor de prova	0,00104
Conclusão	<i>Rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 3.4: Teste à igualdade de idades em CC1 e CC2.

No que diz respeito à comparação da idade média nas três sociedades, com base nas tabelas 3.3 e 3.4, conclui-se que

Os três comportamentos proporcionam longevidades diferentes aos agentes.

Os agentes conformistas têm maior longevidade, seguidos dos agentes desertores, sendo os sedutores aqueles que têm menor longevidade.

Variável: Nível	Populações: CC e CC1
Hipótese nula	$\mu_{\text{Nível}}(\text{CC}) = \mu_{\text{Nível}}(\text{CC1})$
Hipótese alternativa	$\mu_{\text{Nível}}(\text{CC}) > \mu_{\text{Nível}}(\text{CC1})$
Observação em CC	0,98125
Observação em CC1	1,03333
Observação da estatística de teste	$t = 0,51913$
Condição de rejeição	$t > 1,67202$
valor de prova	0,30283
Conclusão	<i>Não rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 3.5: Teste à igualdade de nível em CC e CC1.

Variável: Nível	Populações: CC1 e CC2
Hipótese nula	$\mu_{\text{Nível}}(\text{CC1}) = \mu_{\text{Nível}}(\text{CC2})$
Hipótese alternativa	$\mu_{\text{Nível}}(\text{CC2}) > \mu_{\text{Nível}}(\text{CC1})$
Observação em CC1	1,03333
Observação em CC2	1,14791
Observação da estatística de teste	$t = 1,24305$
Condição de rejeição	$t > 1,67252$
valor de prova	0,10951
Conclusão	<i>Não rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 3.6: Teste à igualdade de nível em CC1 e CC2.

No que diz respeito à comparação entre os níveis hierárquicos esperados nas três sociedades, as conclusões não são tão simples como nos casos anteriores. Tal ocorrência permite ilustrar a pertinência desta metodologia. As comparações dos níveis esperados nas sociedades conformista versus desertor e desertor versus sedutor são inconclusivas. Isto é, não há evidência estatística para rejeitar a hipótese nula, das igualdades de valores esperados, nessas comparações.

Se, ingenuamente, fossem apenas consideradas as médias observadas, a conclusão —inválida— seria que os agentes sedutores têm maior nível do que os agentes desertores e estes do que os agentes conformistas. No

Variável: Nível	Populações: CC e CC2
Hipótese nula	$\mu\text{Nível (CC)} = \mu\text{Nível (CC2)}$
Hipótese alternativa	$\mu\text{Nível (CC2)} > \mu\text{Nível (CC)}$
Observação em CC	0,98125
Observação em CC2	1,14791
Observação da estatística de teste	$t = 1,81055$
Condição de rejeição	$t > 1,67252$
valor de prova	0,03779
Conclusão	<i>Rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 3.7: Teste à igualdade de nível em CC e CC2.

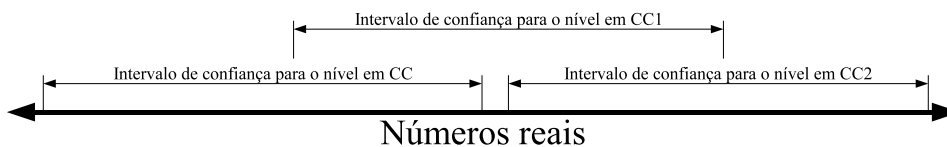


Figura 3.3: Intervalos de confiança para o nível esperado.

entanto, como se pode ver nas tabelas 3.5, 3.6 e 3.7, os dados recolhidos apenas permitem concluir que

os agentes sedutores atingem maior nível hierárquico do que os agentes conformistas.

sendo a comparação do nível médio dos agentes desertores *inconclusiva* quer com os conformistas quer com os sedutores.

Como pode isto ser? Como é possível que o nível esperado dos agentes sedutores seja empiricamente superior ao nível dos agentes conformistas e no entanto o nível os agentes desertores é indistinguível destes?

A explicação desta aparente contradição tem bases estatísticas: O valor esperado, neste caso do nível, não é conhecido. O melhor que se pode fazer é determinar um intervalo onde, com uma certa probabilidade (neste caso 0,95, herdado do nível de significância do teste), esse valor *deve* estar. Com esta alteração de foco, do «valor esperado» para o «intervalo de confiança» o fenómeno observado é facilmente explicado pela figura 3.3: A intersecção dos intervalos de confiança torna o teste inconclusivo.

Resumindo as comparações anteriores, na tabela 3.8, temos que, com respeito a CC tanto CC1 como CC2 têm ambos «vantagens» e «desvantagens»: Ambos atingem maiores valores de capacidade, ao custo de menor

Variável	Teste	valor de prova
Capacidade		
CC < CC1	conclusivo	inferência
CC2 < CC1	conclusivo	0,02003
CC < CC2	conclusivo	$2,78487 \times 10^{-5}$
Idade		
CC > CC1	conclusivo	$4,91412 \times 10^{-11}$
CC1 > CC2	conclusivo	0,00104
CC2 > CC	conclusivo	inferência
Nível		
CC ? CC1	não conclusivo	0,30283
CC1 ? CC2	não conclusivo	0,10951
CC < CC2	conclusivo	0,03779

Tabela 3.8: Comparações entre os modelos CC, CC1 e CC2.

esperança de vida. Os testes de comparação de nível com agentes desertores são inconclusivos, sugerindo que CC1 não se distingue pelos níveis dos seus agentes.

O valor de prova é também um indicador importante para a validação da conclusão pois pode ser interpretado como a probabilidade da conclusão (quando o teste é conclusivo) estar incorrecta; quanto mais próximo de 0 for este valor, mais segura será a conclusão do teste.

3.5 Discussão

Ficou uma questão metodológica por esclarecer. Os testes de igualdade de valores esperados pressupõem uma de duas condições: Ou as amostras são «grandes» ou provêm de populações normais (conforme o apêndice D). Uma vez que a população é inacessível (pois existe apenas em abstracto) é necessário supor ou verificar que as amostras são suficientemente «grandes». Daí ter tomado, nas comparações entre CC, CC1 e CC2, a dimensão de cada amostra $n = 30$, conforme indicado no apêndice D.

Pergunta: Qual a necessidade de efectuar tal quantidade de testes? Não haverá forma mais directa de assegurar as conjecturas?

Resposta: Não. No caso dos testes de igualdade de valores esperados poderiam ter sido calculados apenas os intervalos de confiança para os

valores esperados. Mas esse cálculo não proporciona o valor de prova que, conforme antes mencionado, indica um grau de confiança sobre a conclusão do teste.

- P.** As conclusões sobre a influência do comportamento individual na dinâmica social podem ser generalizados a outros modelos? Se sim, em que condições? Se não, qual a utilidade deste trabalho?
- R.** Depende das conclusões em questão. Neste trabalho não foram criadas bases que permitam generalizar as conclusões a outros modelos. Mas também não era esse o seu propósito. Procurou-se apenas sustentar, o mais rigorosamente possível, a intuição de que a evolução de uma sociedade depende profundamente dos comportamentos dos seus membros. Para isso usou-se um modelo normativo particular. Uma vez que noutros modelos não ocorrerão as relações nem as variáveis deste, algumas das conclusões estão claramente limitadas aos casos que aqui apresentados. Mas, por outro lado, esta abordagem pode, certamente, ser aplicada a outros casos que não os derivados do modelo CC. Aí outras variáveis substituirão aquelas aqui escolhidas (capacidade, idade, nível) e os testes serão também diferentes, mas o processo «simulação → observação → conjectura → teste-de-hipóteses» aqui delineado pode ser igualmente aplicado.
- P.** Qual a aplicabilidade dos testes descritos? Além do valor esperado, podem ser testados outros parâmetros?
- R.** Sim. A escolha das variáveis foi meramente ilustrativa, quer para a metodologia experimental, quer para ilustrar o poder individual. Os limites do cálculo dos intervalos de confiança e dos valores de prova dependem da normalidade das populações ou, alternativamente, da independência e dimensão das amostras. No caso de simulações obtidas informaticamente, será relativamente simples providenciar amostras suficientemente grandes para garantir a aplicabilidade dos testes.

3.6 Conclusão

Neste capítulo descreveu-se uma experiência que serviu como ensaio para uma metodologia de análise de dados. O contributo não está no estabelecimento dessa análise, mas antes no praticar dessa metodologia. Isto é,

na identificação dos processos que devem ser efectuados, que resultados procurar e em que medida as conclusões obtidas são fiáveis.

Dessa experiência conclui-se que o comportamento individual é suficiente para alterar a dinâmica da sociedade, mesmo na presença de fortes restrições normativas no que diz respeito às acções individuais, como é o caso das sociedades de tipo CC. De facto, tendo-se estabelecido o facto que, por exemplo, os agentes conformistas têm maior esperança de vida do que os agentes sedutores, como explicar essa diferença? Se os comportamentos individuais forem ignorados nada mais resta para justificar essa diferença. Portanto, essa diferenciação social depende apenas das diferenças comportamentais:

É o conhecimento das diferenças sobre o processamento interno dos agentes que permite explicar as diferenças observadas nas dinâmicas sociais.

Ora, lembrando a introdução deste capítulo,

O conhecimento do poder individual implica o reconhecimento dos processos individuais que guiam a escolha de acção.

acrescentar-se-ia que

o poder individual é um factor decisivo no estudo dos sistemas dinâmicos complexos.

3.6.1 Trabalho Futuro

Esta exploração no modelo económico CC não esgota todas as suas questões interessantes. Por exemplo: Os anéis parecem exibir uma distribuição equilibrada de capacidade. O que origina esse equilíbrio? Como pode ser perturbado? Como serão as dinâmicas de sociedades heterogéneas, compostas por agentes conformistas, desertores e sedutores?

4

Qualidade Predictiva

A prática da ciência empírica implica, pelo menos, duas fases:

1. recolha de dados;
2. análise dos dados recolhidos.

Frequentemente os dados recolhidos, em estado «bruto», são avaliados por funções que sumarizam propriedades a que se atribui importância. Por exemplo, a média e a variância são medidas deste tipo.

Neste capítulo, e em Coelho & Coelho (2005e), propõe-se atribuir um significado e medida ao conceito intuitivo de *predictabilidade*. Esta deverá ser uma medida *global e dependente do tempo* que, argumenta-se, indicará a *dificuldade em prever o valor seguinte* numa série temporal. Além disso, esta medida poderá ser computada em tempo $O(n^3)$, o que é uma performance aceitável para auxiliar decisões tomadas em tempo real.

4.1 Introdução

Esta investigação sobre uma medida de previsão começou com uma questão simples:

Como distinguir dois perfis de agentes, dado um conjunto de amostras?

Procurando responder a esta questão, surgiu a necessidade de uma definição e medida aplicável da noção intuitiva de *predictabilidade*. A partir de experiências com o modelo económico de Castro Caldas (descritas no apêndice A e também utilizadas no capítulo 3), consideram-se duas populações distintas, uma composta de agentes conformistas e outra população formada por agentes ambiciosos.

4.1.1 Agentes ambiciosos

Com este perfil procurou-se investigar agentes com comportamentos mais complexos do que os conformistas, desertores ou sedutores, anteriormente investigados. Inerente à maior complexidade do comportamento, estes agentes terão também maiores responsabilidades no seu desempenho.

O comportamento de um agente ambicioso é condicionado pelo objectivo de estar no topo da hierarquia: Ou tem nível ≤ 1 ou esse desejo está insatisfeito.

No entanto, cada agente só poderá realizar a sua ambição se a sua capacidade for superior a um determinado limiar.

Ao contrário dos agentes conformistas, a capacidade individual não é automaticamente incrementada. Em vez disso, usou-se um mecanismo de ordens e pagamentos.

Os agentes com nível = 0 geram, autonomamente, ordens de produção e os agentes com nível > 0 recebem, dos respectivos líderes, essas ordens. Cabe ao agente decidir o destino de cada ordem. As suas opções são:

transformar uma ordem num item de produção;

transferir uma ordem para algum dependente;

descartar uma ordem.

No caso de o agente optar por transformar a ordem, uma parte da sua capacidade será consumida nessa tarefa. Deste modo, a capacidade é, de facto, uma medida da capacidade de produção.

Por sua vez, cada item produzido (através da opção «transformar em produção») também não é automaticamente entregue ao líder respectivo. Em vez disso será armazenado num depósito temporário, por sua vez capaz das seguintes acções:

transferir item (para o líder);

manter item;

Assim, em cada ciclo, cada agente ambicioso gere os destinos das suas ordens e produções. Se optar por entregar ao seu líder uma produção, receberá deste, ao preço do momento, o respectivo pagamento em unidades monetárias.

É, por sua vez, a partir da reserva monetária que o agente pode decidir «investir» e aumentar a sua capacidade

Ora, para poder realizar a ambição, necessita que a sua capacidade esteja num limiar «confortável». Nesse caso poderá conquistar a sua independência.

Como se viu, para aumentar a capacidade, o agente terá de «investir» a sua reserva monetária, transformando-a em capacidade. Para esse efeito dispõe de um plano que será activado sempre que a reserva monetária ultrapasse um dado limiar e cujo efeito é

1. diminuir a reserva monetária e
2. aumentar a capacidade.

As sociedades formadas por agentes ambiciosos serão designadas por modelos CC3.

4.1.2 Observação e Motivação

Como um objectivo geral, em simulações multi-agente, o investigador deve procurar os efeitos das características individuais nas dinâmicas sociais (a este propósito veja-se, por exemplo, o trabalho de Grimm & Railsback (2005)). Em particular, o processo de simulação gera, frequentemente, vastas quantidades de dados dependentes do tempo, *i.e.* *séries temporais*. E nem sempre é simples extrair algum significado desses dados.

As simulações dos agentes conformistas e ambiciosos produziram, de facto, vastas quantidades de dados de um conjunto seleccionado de variáveis de observação.

Uma impressão intuitiva resultante da observação dos respectivos gráficos sugere que, para algumas dessas variáveis,

nas amostras conformistas, parece mais fácil fazerem-se predições —a curto prazo— do que nas amostras ambiciosos.

Esta impressão motivou a investigação de uma forma de definir e medir *predictabilidade*.

Assim, propõe-se uma semântica e uma medida de *predictabilidade*, ou *qualidade predictiva*, para séries temporais. Tal medida deverá ser global e dependente do tempo, exprimindo a facilidade —ou dificuldade— em prever o futuro imediato. Acontece que a medida proposta tem baixa complexidade computacional, o que sugere uma nova aplicação não planeada: Poderá ser usada para suportar as suas decisões de agentes operando com recursos limitados. Considere-se o caso de um agente perante um problema de decisão, por exemplo, um predador virtual que pode escolher

uma entre duas zonas de caça. A predictabilidade de cada entidade envolvida nesse problema, sendo rapidamente computável a partir de registos históricos, poderá ser com factor importante na decisão tomada. Nesse exemplo, o predador poderá decidir-se pela zona com fluxo mais previsível de presas (digamos, um lago). Assim,

propõe-se uma medida de predictabilidade que, dada a sua baixa complexidade computacional, poderá ser empregue por agentes autónomos operando com recursos limitados.

No entanto, neste capítulo, apenas será definida essa medida e ilustrada uma sua aplicação enquanto ferramenta de análise de dados.

Afirmou-se antes que uma medida de predictabilidade deve ser global e dependente do tempo. Por «global» entende-se que todas as observações são consideradas para a computação da predictabilidade. Esta condição é necessária pois faz pouco sentido (se algum) fazer-se uma previsão a partir de um conjunto insignificante de observações. Desta forma, supõe-se que os dados a serem medidos são «suficientemente representativos». Sobre a «dependência temporal», note-se que as quantidades estatísticas usuais, *e.g.* média, variância, etc, embora globais, são independentes do tempo: alterar a ordem dos termos de uma série temporal não afecta a sua média. Por outro lado, na noção intuitiva de predição, a ordem é importante: se os dados forem permutados, a predição será alterada.

4.1.3 Previsão e Predictabilidade

Há técnicas e procedimentos estatísticos sofisticados para lidar com séries temporais (veja-se o resumo de Shalizi (2003)), nomeadamente a *estacionaridade, ergodicidade, auto-correlação, auto-covariância, etc*). Além disso, é comum o uso das *transformadas de fourier* para se estudar a série resultante, no espaço de frequências, em vez da série original, no espaço de tempo. A técnica ARIMA, dada a sua complexidade, não é (por enquanto) de fácil aplicação e portanto não poderá ser considerada utilizável por agentes autónomos.

As técnicas baseadas em Modelos de Markov Escondidos (*Hidden Markov Models*) (MME's, veja-se Fraser & Dimitriadis (1993)) requerem um modelo (ou as probabilidades de transição e saída) ou a aplicação do algoritmo «Baum-Welsh» para o estimar. Além do mais, os MME's requerem a previsão de símbolos para computar, pelo algoritmo de Viterbi (conforme Viterbi (1967)), a sequência mais provável de estados escondidos. Resumindo, os MME's, embora possam ser implementados, não proporcionam

uma resposta directa à questão posta: Um algoritmo rápido para medir a predictabilidade de séries temporais.

Haverá espaço para uma abordagem mais simples.

Ainda outro percurso para a predictabilidade é através da complexidade temporal requerida para reconstruir a palavra observada. Seja $s = s_1 \cdots s_t$ uma palavra binária. A *Complexidade de Kolmogorov* de s (Vityanyi (2003)) é (um pouco incorrectamente) o número mínimo de estados necessários a um *autómato de estados finitos* (AEF) para reconstruir s . Um AEF binário

$$T = (E, \delta, A)$$

define-se (conforme Hopcroft & Ullman (1979)) por um conjunto finito de *estados* $E = \{0, \dots, n\}$, uma função de *transição de estado* $\delta : E \times \{0, 1\} \rightarrow E$ e um conjunto de *estados de aceitação* $A \subseteq E$. Dada uma palavra binária $s = s_1 \cdots s_t$, o *estado final* σ_t fica recursivamente definido por $\sigma_t = \delta(\sigma_{t-1}, s_t)$, sendo $\sigma_0 = 0$. Nesse caso escreve-se $Ts = \sigma_t$. Se $Ts \in A$ então a palavra s é *aceite* ou *reconhecida* por T . Se T for um AEF e s uma palavra, denota-se $[Ts] = 1$ se T aceita s e $[Ts] = 0$ caso contrário.

Desta forma os AEF podem ser empregues para (re)construir palavras: Dado um AEF T e $s = s_1 \cdots s_t$, seja $s^{(1)} = s[As]$. Se $S_k(w)$ for o sufixo (ver de seguida) de w de comprimento k e repetindo

$$s^{(i+1)} = s^{(i)} \left[TS_t \left(s^{(i)} \right) \right]$$

diremos que a palavra resultante após m iterações é *reconstruída* por T : É suficiente apenas uma semente de tamanho k e T para se recuperar a palavra reconstruída. Por outras palavras: *O futuro de s pode ser predito sabendo-se T e k valores consecutivos do passado*. Quanto mais estados no AEF forem necessários para efectuar essa previsão, mais *impredictível* (no sentido *difícil de prever*) a série temporal será.

O problema com esta abordagem está na dimensão do espaço dos AEF: Existem n^{2^n} AEF binários com n estados, o que torna impracticável uma pesquisa exaustiva —a melhor conhecida— por um AEF minimal que reconheça uma palavra dada.

A proposta aqui descrita segue uma abordagem diferente, um pouco combinatorial. No caso mais simples é dada uma palavra binária $s = s_1 \cdots s_t$ com t símbolos escolhidos do conjunto $\mathbf{2} = \{0, 1\}$. O objectivo é

medir a dificuldade em prever o próximo valor s_{t+1} , e não necessariamente prevê-lo.

Seguindo um procedimento ingénuo, considera-se a observação pre-

sente s_t e, olhando para o passado, procura-se repetir o que aconteceu quando esse valor foi observado. Isto é, se $s_\tau = s_t$ com $\tau < t$ propõe-se que $s_{t+1} = s_{\tau+1}$. É fácil de ver que este processo falha quase sempre. Mas pode ser substancialmente melhorado se, em vez de se considerar apenas o valor s_t observado mais recentemente, forem procuradas ocorrências anteriores do *passado recente*, digamos $v = s_{t-k} \cdots s_t$.

Supondo agora que este procedimento melhorado funciona para uma certa palavra s . Resulta que, para um determinado valor de k , para cada ocorrência da sub-palavra v em s , há apenas uma possibilidade para o símbolo que segue v . Esta é uma afirmação sobre a *predictabilidade* de s : Para prever o futuro s_{t+1} é então razoável procurar-se a sub-palavra formada pelas k observações mais recentes e esperar que o futuro imediata seja o valor que *sempre* ocorreu após essa sub-palavra.

Note-se que este procedimento funciona com (versões discretas de) qualquer função periódica, por exemplo \sin e \cos .

Inversamente, se houver apenas uma ocorrência da palavra v então s_{t+1} não poderá ser previsto —desta forma— a partir de $s_{t-k} \cdots s_t$.

Propõe-se, então, relacionar a medida de predictabilidade com o comprimento deste sufixo único. O princípio intuitivo aqui é o seguinte:

- Quanto mais raro for o momento presente, mais difícil será prever o próximo momento e
- Quanto mais comum for o passado recente, mais remoto o registo histórico que terá de ser considerado para tornar o presente único.

A título de exemplo, considere-se a palavra $c = 11111$ com 5 observações constantes. Este exemplo será «muito predictível»: a observação actual c_5 é idêntica a qualquer outra anterior, isto é, c_5 é «muito comum». Para que o «passado recente» $c_{5-k} \cdots c_5$ seja único em todo o registo de observações c é necessário tomar $k = 4$ uma vez que qualquer outro sufixo mais curto, com $k \in \{0, 1, 2, 3\}$, ocorre pelo menos duas vezes em c . Por exemplo, o sufixo $c_2c_3c_4c_5 = 1111$ ocorre também como $c_1c_2c_3c_4$. Por outro lado, a palavra com uma mudança abrupta na última observação $e = 00001$ é «muito pouco predictível»: A última observação $e_5 = 1$ nunca ocorreu antes, é «muito incomum», pelo que não há referências passadas para suportar uma previsão de qual será a próxima observação. O sufixo e_5 ocorre apenas uma vez em e , pelo que e_5 é suficiente para determinar a unicidade do momento presente.

De seguida formaliza-se a definição de predictabilidade para palavras binárias e demonstram-se algumas propriedades. Posteriormente investiga-se e ilustra-se um procedimento de aplicação a séries temporais reais.

	Palavra	Sufixo único	σ
Constante	111111	111111	1,0
Paridade	010101	10101	$5/6 \approx 0,84$
Metade	000111	111	0,5
Sinal	000100	100	0,5
Salto	011110	10	$1/3$
Fim	000001	1	$1/6$
Acaso1	101101	1101	$2/3$
Acaso2	010110	110	0,5

Tabela 4.1: Exemplos simples de predictabilidade.

4.2 Qualidade Predictiva

Seja s uma palavra binária com N símbolos, $s \in 2^N$. Uma palavra w é uma sub palavra de s se existirem palavras x e y tais que $s = xwy$. Se $y = \varepsilon$ (a palavra vazia) então w é um sufixo de s e, se $x = \varepsilon$, w é um prefixo de s . Denota-se o número de símbolos de s por $|s|$ e o número de ocorrências de w em s por $|s|_w$. Agora, sejam

$$v(s) = |w|$$

em que w é o menor sufixo único de s (isto é, tal que (1) $s = xw$ e (2) $|s|_w = 1$) e

$$\sigma(s) = \frac{v(s)}{|s|}.$$

A função σ definida pela última igualdade é a medida de predictabilidade (ou qualidade predictiva) de s .

4.2.1 Exemplos e Propriedades

Considerem-se, a título ilustrativo, os exemplos da tabela 4.1, com o sufixo único e a qualidade predictiva de algumas palavras de comprimento 6. Repare-se que a palavra Acaso1 tem predictabilidade relativamente elevada, consequência da sua estrutura repetitiva.

A predictabilidade tem algumas propriedades elementares facilmente demonstráveis:

Sejam $s \in 2^T$ e \bar{s} o complemento de s , a palavra obtida de s pela transformação $\bar{0} \mapsto 1$ e $\bar{1} \mapsto 0$. Então

1. $\sigma(s) = \sigma(\bar{s})$;

2. $\sigma(s) = 1$ se e só se $s = \text{Constante}$ ou $\bar{s} = \text{Constante}$;
3. $\sigma(s) = \frac{1}{n}$ se e só se $s = \text{Fim}$ ou $\bar{s} = \text{Fim}$;
4. $\frac{1}{n} = \sigma(\text{Fim}) \leq \sigma(s) \leq \sigma(\text{Constante}) = 1$.
5. Se s for uma sucessão periódica então
 - (a) a partir de certa ordem a sucessão $\sigma(s_1 \cdots s_n)$ é estritamente crescente;
 - (b) $\lim_{n \rightarrow \infty} \sigma(s_1 \cdots s_n) = 1^-$.

Menos evidente, é a seguinte propriedade, formulada em termos da função v :

Para cada símbolo $D \in \mathbf{2}$, se $v(sD) > v(s)$ então $v(sD) = 1 + v(s)$.

Demonstração Suponha-se que $s = xw$ e que w é o menor sufixo único de s .

Portanto $v(s) = |w|$.

Agora, $sD = xwD$ e seja $v(sD) = |w'|$, em que $sD = x'w'$ e w' é o menor sufixo único de sD .

Como, por hipótese, $|w'| > |w|$ então $w' = ywD$ para alguma palavra y , possivelmente vazia.

Note-se que a ocorrências diferentes de ywD em sD correspondem ocorrências diferentes de wD em sD , às quais correspondem diferentes ocorrências de w em s .

Mas há exactamente uma dessas ocorrências. Logo wD é o menor sufixo único de sD e, portanto, $v(sD) = |wD| = 1 + |w| = 1 + \sigma(s)$. QED.

Esta propriedade poderá ser enunciada como *o limite da velocidade da luz* ou *a memória do passado*: A qualidade predictiva de séries temporais não aumenta rapidamente conforme se aumenta o número de observações.

Com efeito, se, para um dado instante T , a qualidade predictiva da palavra s for $\sigma(s)$ e se, sendo $s_{T+1} = D$, resultar que $\sigma(sD) > \sigma(s)$, pela proposição anterior,

$$\begin{aligned}
 \sigma(sD) &= \\
 &= \frac{v(sD)}{|sD|} \\
 &= \frac{1 + v(s)}{1 + T}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\frac{1}{T} + \frac{v(s)}{T}}{\frac{1}{T} + 1} \\
&= \frac{T^{-1} + \sigma(s)}{T^{-1} + 1}.
\end{aligned}$$

Como $(T^{-1} + 1)^{-1} < 1$ então $\sigma(sD) < T^{-1} + \sigma(s)$, isto é,

Não há crescimentos ilimitados ou instantâneos na qualidade predictiva de uma série temporal.

Inversamente, é fácil de se ver que a qualidade predictiva de uma série pode decrescer abruptamente. Para tal, basta considerar a evolução da qualidade predictiva da palavra Constante $_T = 1^T$, com $\sigma = 1$, para $\overline{\text{Fim}}_{T+1} = 1^T 0$, em que $\sigma = \frac{1}{T+1}$.

Complexidade computacional

O custo computacional da computação de $v(s)$ e o cálculo da predictabilidade, se comparado com o custo da complexidade de Kolmogorov, é muito aceitável: Dada uma palavra s de comprimento $|s| = T$, no pior caso (Constante) será necessário considerar os T sufixos

$$w_1 = s_T, w_2 = s_{T-1}s_T, \dots, w_T = s_1 \cdots s_T.$$

Cada sufixo considerado, digamos $w_k = s_{T-k+1} \cdots s_T$, é sucessivamente comparado com cada uma das $T - k + 1$ sub palavras

$$s_1 \cdots s_k, s_2 \cdots s_{k+1}, s_{T-k+1} \cdots s_T.$$

Por fim, cada uma dessas comparações envolve k testes de igualdade de símbolos. Assim, para se computar $v(s)$ são necessários

$$\sum_{k=1}^T k(T - k + 1) = \frac{1}{6} (T^3 + 3T^2 + 2T) \in O(T^3)$$

testes de igualdade de símbolos.

4.2.2 Séries Reais

Considerem-se, a título de exemplo, dois gráficos da equação logística

$$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n).$$

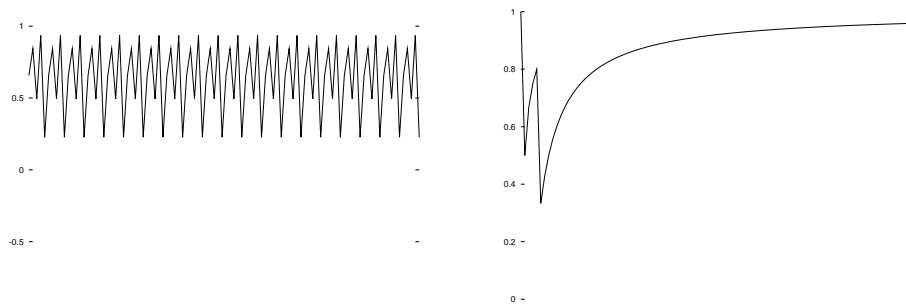


Figura 4.1: A equação logística no regime periódico $a = 3,741$.

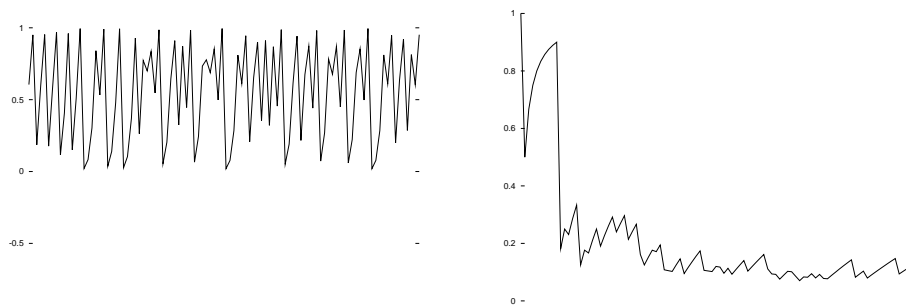


Figura 4.2: A equação logística no regime caótico $a = 3,98$.

O primeiro, na figura 4.1, mostra uma órbita periódica, com $a = 3,741$, enquanto que o segundo gráfico (figura 4.2), com $a = 3,98$, está uma órbita no regime caótico.

Em ambas as figuras, o lado direito mostra valores sucessivos de σ . Note-se que no regime periódico a qualidade predictiva aproxima-se de 1 enquanto que no regime caótico decresce para perto de 0.

O facto de se tratarem de séries de valores reais e não de símbolos discretos é simples de lidar: Pode-se sempre considerar uma representação binária dos valores, arredondados com uma precisão fixa.

O resultado desse processo é uma palavra binária $s = X_1 \cdots X_T$ em que cada X_i é uma palavra binária de comprimento fixo, digamos k .

Mas é necessário ter-se em conta o seguinte: Para as computações de v e de σ , não faz sentido considerarem-se palavras «intermédias». Se x_i, x_{i+1}

forem dois termos consecutivos na série real representados pela sub palavra $X_i X_{i+1}$ então, para a computação de v , seriam consideradas palavras xy em que x é um sufixo de X_i e y um prefixo de X_{i+1} , sem qualquer relação com os valores x_i, x_{i+1} .

Para se resolver este problema, considerem-se, em vez de símbolos de comprimento 1, palavras de comprimento k e proceda-se como antes: Supondo-se que $s \in \mathbf{2}^{kT}$, denote-se

$$|s|^{(k)} = T$$

e, se $w \in \mathbf{2}^{kn}$,

$$|s|_w^{(k)}$$

é o número de ocorrências de w em s , que começam em posições $\equiv 1 \pmod{k}$.

Agora, defina-se

$$v^{(k)}(s) = |w|^{(k)}$$

em que w é o menor sufixo único de s e a medida de k -predictabilidade por

$$\sigma^{(k)}(s) = \frac{v^{(k)}(s)}{|s|^{(k)}}.$$

As propriedades antes enunciadas valem trivialmente para $k = 1$ e facilmente se generalizam. Note-se que, para valores pares de k , a série Paridade é «constante» e, como tal, $\sigma^{(2n)}(\text{Paridade}) = 1$.

Será usada a notação, mais leve. σ em vez de $\sigma^{(k)}$ uma vez que será sempre evidente, pelo contexto, quando tratar de séries reais. Além disso, nos exemplos, será sempre usado o valor $k = 16$.

4.3 Aplicação

Conforme se afirmou antes, o desenvolvimento da medida de predictabilidade foi motivado pelo estudo dos efeitos dos perfis individuais na dinâmica social em sociedades do tipo CC, através da análise de uma simulação multi-agente (veja-se o apêndice A). Os aspectos salientes dos dados obtidos na simulação estão essencialmente resumidos na figura 4.3. O lado esquerdo do gráfico mostra a evolução do *Tamanho Médio da Liderança de Grupos* (TMLG) numa amostra do perfil ambiciosos e sugere que

enquanto que nas amostras conformistas é fácil aproximar os valores futuros, nas amostras ambiciosos tal previsão será muito mais difícil.

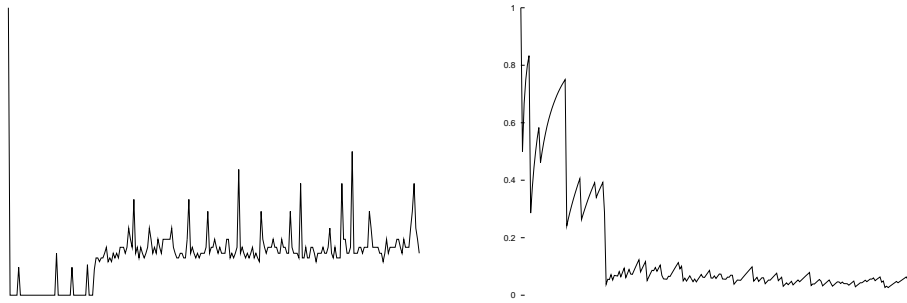


Figura 4.3: Tamanho Médio de Liderança de Grupo e respectiva predictabilidade.

A medida de predictabilidade providenciará suporte quantitativo a esta afirmação.

Considere-se o lado direito da figura 4.3. Para a amostra ambicioso, a predictabilidade decresce para valores próximos de 0,0, enquanto que na amostra conformista a predictabilidade é quase constante, perto de 1,0, razão pela qual não se mostra o respectivo gráfico. Esta observação indica, então, que será difícil aproximar o futuro nas amostras da população de agentes ambiciosos mas não nas de conformistas.

Agora é possível processarem-se todos os dados recolhidos e fornecer suporte estatístico à afirmação seguinte:

A variável global TMLG é previsível em sociedades conformistas e imprevisível em sociedades ambiciosos.

A tabela 4.2 resume os dados obtidos de 40 amostras conformistas e de 40 amostras ambiciosos.

σ (TMLG)	média	variação
conformista	0,99599	0
ambicioso	0,09606	0,04547

Tabela 4.2: Predictabilidade amostral de TMLG.

O procedimento seguido para a variável TMLG, do cálculo da média e da variação, pode ser repetido para outra qualquer variável observada e, da informação de predictabilidade de cada uma dessas variáveis pode-se obter então uma panorâmica geral, comparativa, dos dois perfis de agentes.

Mais precisamente, dados conjuntos $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ de variáveis e $S = \{s_1, \dots, s_m\}$ de amostras, seja $x_i(s_j)$ a série temporal definida pelas observações da variável x_i na amostra s_j e

$$\sigma_{ij} = \sigma(x_i(s_j))$$

a respectiva medida de predictabilidade. Se $S' \subseteq S, X' \subseteq X$, sejam

- $m_i(S')$ a média de $\{\sigma_{ij} : s_j \in S'\}$;
- $v_i(S')$ a respectiva variância;
- $M(S', X')$ a média de $\{m_i(S') : x_i \in X'\}$;
- $V(S', X')$ a média de $\{v_i(S') : x_i \in X'\}$

Todas as variáveis	M	V
conformista	0,30410	0,00002
ambicioso	0,06537	0,03428

Tabela 4.3: Estatística Geral da Predictabilidade.

A tabela 4.3 mostra os valores de M e V quando X' é o conjunto de todas as variáveis observadas e S' , na primeira linha, é o conjunto das amostras conformistas e, na segunda linha, é o conjunto das amostras ambiciosos. Esta tabela indicia que

As sociedades de agentes conformistas são mais predictíveis do que as sociedades de agentes ambiciosos.

Mudando o conjunto de variáveis X' pode obter-se informação mais refinada. Na tabela 4.4, as duas primeiras colunas dizem respeito a variáveis individuais (idade, nível social, produtividade, etc) e as terceira e quarta colunas são obtidas de variáveis de grupo (tamanho, profundidade, capacidade, etc).

Estes números ilustram dois contributos deste trabalho. Primeiro, que o poder individual, enquanto conjunto de aptidões de cada agente, como seria de esperar, condiciona a dinâmica social. Esta conclusão é clara a partir das estatísticas da predictabilidade nas duas populações.

Em segundo lugar, a distinção entre as amostras dos dois perfis posiciona a predictabilidade como um candidato para o estudo dos sistemas dinâmicos.

<i>Grupos vs. Individuos</i>	individual <i>M</i>	individual <i>V</i>	grupo <i>M</i>	grupo <i>V</i>
conformista	0,15808	0,00003	0,40631	0,00001
ambicioso	0,06155	0,03193	0,06805	0,03592

Tabela 4.4: Predictabilidade de Grupos vs. Indivíduos.

4.4 Conclusão

Mostrou-se que a função de predictabilidade σ proporciona uma medida de séries temporais que é simultaneamente *global* e *dependente do tempo*, como seria de esperar. Além disso, a predictabilidade de séries periódicas aproxima-se de 1,0 e, embora definida para a observação do presente, σ considera os efeitos de ocorrências passadas. Por fim, com a complexidade computacional limitada a $O(T^3)$, esta função proporciona uma ferramenta adequada para o suporte a tarefas de decisão autónoma, em cenários de recursos limitados.

4.4.1 Trabalho Futuro

A função σ não funciona bem quando os dados são polinomiais ou exponenciais. O primeiro caso terá uma resolução relativamente simples pois, supondo que uma sequência dada, s , resulta da transformação de uma fonte ϕ por um polinómio p de grau n , $s = p(\phi)$, então a sequência s' , obtida pelas *diferenças finitas* a partir de s (isto é: $s'_n = s_n - s_{n-k}$ para um k fixo), resultará de ϕ por um polinómio de grau $n - 1$. Desta forma, a partir de dados polinomiais s de ϕ será possível obter-se uma transformada afim $\psi = a\phi + b$, com a mesma predictabilidade de ϕ .

A função de predictabilidade baseia-se na igualdade *exacta* de palavras binárias. Porém, para séries reais é muito mais razoável considerarem-se *aproximações*. Considere-se a série temporal de valores reais $s = s_1, \dots, s_n$ e um sufixo $w = w_1, \dots, w_k = s_{n-k+1}, \dots, s_n$. Defindo w aproxima $y = y_1, \dots, y_k$ se $\|w - y\| < \varepsilon$ para um ε fixo e uma norma k -dimensional $\|\cdot\| : \mathbf{R}^k \rightarrow \mathbf{R}$, por exemplo $\|v_1, \dots, v_k\| = \sqrt{\sum_{i=1}^k v_i^2}$. Agora, se

$$v^{(\varepsilon)}(s) = k$$

em que k é a dimensão do menor sufixo w de s tal que o número de aproxi-

mações de w com as sub-palavras de dimensão k de s é 1 e

$$\sigma^{(\varepsilon)}(s) = \frac{v^{(\varepsilon)}(s)}{n}$$

obtém-se uma reformulação da função de predictabilidade para séries temporais de números reais.

Não é clara, ainda, qual a exacta relação entre as funções $v^{(\varepsilon)}$ e $\sigma^{(\varepsilon)}$ e as $v^{(k)}$ e $\sigma^{(k)}$ anteriores.

Talvez uma das aplicações mais interessantes das funções $\sigma^{(\cdot)}$ seja a séries multi-dimensionais. As séries temporais multi-dimensionais são particularmente importantes devido ao *Teorema do Mergulho de Takens* (em Takens (1981)) que proporciona informação crítica sobre a dinâmica do sistema observado.

Uma outra medida importante para estudar sistemas complexos é a entropia de Shannon (o artigo original é Shannon (1940))

$$H = - \sum_i p_i \log(p_i)$$

em que p_i é a probabilidade de se observar o estado i e a soma estende-se a todos os estados possíveis em que um sistema pode estar. Recentemente Parunak & Brueckner (2001) sugeriu que a entropia poderá ser um bom indicador da ocorrência de coordenação entre agentes. Numa perspectiva da transferência de poder individual para poder social, seria interessante investigar como as decisões individuais contribuem para comportamentos globais coerentes, como agentes com vontade e poder impõem estrutura e ordem e, também, como um grupo de agentes tenderá para a desordem. Citando Parunak,

«A coordenação [entre agentes] poderá ocorrer através da associação entre uma macro escala (da organização do agente, com entropia decrescente) com uma micro escala, de entropia crescente.»

Uma possível simbiose entre a entropia e a predictabilidade, por exemplo, será a definição de indicadores da ocorrência de fenómenos cíclicos de coordenação, como por exemplo, a migração de aves (que durante uma época não estão coordenados, no que resulta alta entropia, e noutra época simultaneamente todos se dirigem numa determinada direcção, o que diminui a entropia).

5

Empenho e Vontade

No capítulo anterior viu-se que, mesmo em sociedades fortemente estruturantes, o perfil dos agentes individuais tem potencial para condicionar a dinâmica social.

Aqui, tal como em Coelho & Coelho (2005a), procura-se organizar o funcionamento do agente individual, isto é, dar uma estrutura à função

Ag : Per → Ac

que guia o comportamento do agente individual.

5.1 Motivação

Para quê propor uma arquitectura para agentes individuais se já existem inúmeras propostas, algumas com assinalável sucesso, nesse sentido? Porque, em nenhuma dessas propostas, é considerado o papel da vontade. Mas, então, o que é a vontade, e porque será importante para a construção de agentes? De acordo com a «InfoPédia, Porto Editora»,

vontade:

substantivo feminino, forma plenamente consciente de actividade; actividade ou inibição precedida de reflexão e de decisão; capacidade de tomar uma decisão; poder de agir livremente; firmeza na decisão e constância na execução; desejo; intenção; determinação; deliberação; ânimo; coragem; empenho; interesse; zelo; dedicação; necessidade física ou moral; apetite; capricho; veleidade;

Do lat. *voluntáte-*

Considerem-se as noções envolvidas nesta definição: Textualmente, vontade é uma *capacidade*, ou um *poder*, de fazer alguma *coisa*. Essa *coisa*,

no caso da vontade, é uma *decisão, escolha autónoma (livremente, no texto)* sobre o *empenho* para com *acções (decisão e constância na execução)*. Então, numa reformulação um pouco mais reduzida do que este verbete, ter-se-á que

A vontade de um indivíduo é um processo autónomo que dirige o empenho deste para com os seus objectivos e condiciona as suas restantes actividades em função desse empenho.

É precisamente esta noção de vontade que se procura transpor para o controlo dos agentes. Porquê? Antes de prosseguir é necessário discutir o empenho. O *Problema do Empenho* aborda o seguinte dilema:

Quando deve um indivíduo manter os seus objectivos não realizados? Em que circunstâncias deve desistir?

Note-se que há dois âmbitos para a noção comum de empenho, e ambos implicados neste dilema: Um indivíduo pode ter empenho na realização de certos objectivos e, independentemente, no processo de os realizar. Isto é, o empenho tanto pode ser dirigido aos *fins* (objectivos) como aos *meios* (plano, curso de acção) para atingir esses fins.

Assim, um agente autónomo terá de decidir se mantém ou desiste de um objectivo ou de um plano, sendo essas decisões críticas para o seu desempenho. É agora claro que o empenho e as intenções (isto é, os objectivos para realização imediata) são interdependentes, o que se resume na equação

$$\text{Intenção} = \text{Escolha} + \text{Empenho}$$

de Cohen & Levesque (1990). A definição de vontade corresponde precisamente à gestão do empenho (isto é, ao processo que determina que objectivos passam a intenções) que, conforme se viu, é determinante para o desempenho do agente:

O problema do empenho deve ser resolvido pela vontade.

A gestão do empenho é já contemplada em algumas arquitecturas de agentes. Por exemplo, o *Agente de Raciocínio Prático (ARP)* (no apêndice C e na figura 5.1) usa uma função Seguro (linha 20) onde o plano em curso é analisado tendo em conta as crenças e intenções presentes e uma função Reconsiderados (linha 17) que decide o empenho para com as intenções, com base nos objectivos e crenças actuais.

Note-se como a gestão dos empenhos está dispersas no ciclo de controlo do agente: Ocorre nas linhas 7, 8, 9, 11, 17, 18,19 e 20.

```

1: procedimento ARP
2:    $A \leftarrow \text{AcçõesPossíveis}$ 
3:    $C \leftarrow \text{CrençasIniciais}$ 
4:    $O \leftarrow \text{ObjectivosIniciais}$ 
5:   enquanto verdade :
6:      $X \leftarrow \text{ObterPróximaPercepção} ()$ 
7:      $C \leftarrow \text{ReverCrenças} (C, X)$ 
8:      $E \leftarrow \text{ExplorarOpções} (C, O, A)$ 
9:      $I \leftarrow \text{FiltrarOpções} (C, E, A)$ 
10:     $P \leftarrow \text{ProcurarPlano} (C, I, A)$ 
11:    enquanto  $\neg (\text{Vazio} (P) \vee \text{Realizados} (I, C) \vee \text{Impossíveis} (I, C))$  :
12:       $a \leftarrow \text{ObterPrimeiro} (P)$ 
13:      Executar ( $a$ )
14:       $P \leftarrow \text{ObterRestantes} (P)$ 
15:       $X \leftarrow \text{ObterPróximaPercepção} ()$ 
16:       $C \leftarrow \text{ReverCrenças} (C, X)$ 
17:      se  $\text{Reconsiderados} (I, C)$  :
18:         $E \leftarrow \text{ExplorarOpções} (C, O, A)$ 
19:         $I \leftarrow \text{FiltrarOpções} (C, E, A)$ 
20:      se  $\neg \text{Seguro} (P, I, C)$  :
21:         $P \leftarrow \text{ProcurarPlano} (C, I, A)$ 

```

Figura 5.1: Controlo do *Agente de Raciocínio Prático* (ARP).

Isto é, apesar da importância da gestão do empenho, esta está pobremente definida, e só indirectamente é visível nas arquitecturas CDI conhecidas.

Por outro lado, outras arquitecturas bem conhecidas, quer reactivas (Maes, 1989; Brooks, 1991) quer híbridas (por exemplo as TouringMachines de Ferguson (1992)) produzem uma acção em resposta a um estímulo do ambiente e parecem não gerir o empenho, quer para com o planos quer para com os objectivos.

Portanto o estado actual das arquitecturas de controlo de agentes não proporciona à vontade o lugar central que, argumenta-se, deve ter, de forma a resolver o problema do empenho.

Por isso, propõe-se uma arquitectura para agentes que, de acordo com a figura 5.2, explicitamente contemple uma função *Vontade*, a que compete

1. administrar o empenho do agente, isto é, a função *Vontade determina* se os planos ou intenções previamente seleccionados deve ser abandonadas ou continuadas e

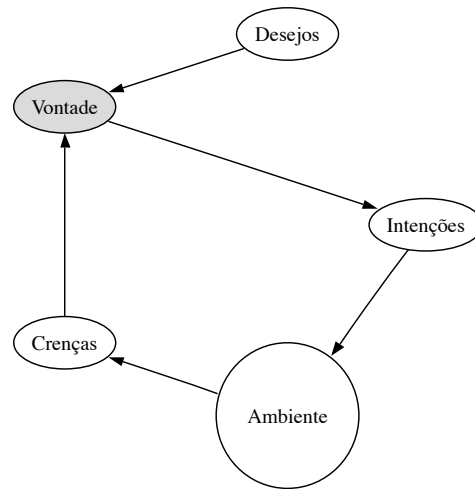


Figura 5.2: Inserção da vontade entre as crenças, desejos e intenções.

2. de acordo com essa escolha, *reunir* um subconjunto de estados mentais apropriados às restantes tarefas no processo de escolha de acção.

Com esta abordagem procura-se forçar e facilitar a resolução do problema do empenho pela vontade do agente. Assim, para o tipo de controlo pretendido,

Vontade é o processo que, após a actualização das crenças, define o espaço mental disponível para posterior processamento.

Disposição é o resultado da gestão efectuada pela vontade: Um conjunto de estados mentais dedicado a realizar as intenções em que o agente se empenhou.

5.2 Controlo Local e Global

Tal como no ARP, o ambiente do agente é lido pela função *ObterPróximaPercepção* que define uma cadeia arbitrária de bits: uma sequência de percepções. Essa cadeia poderá incluir o fluxo de uma câmara de vídeo, de um microfone, de um GPS, etc. As cadeias de percepções são convertidas para alguma forma interna de representação de crenças e incorporadas na respectiva base do agente pela função *ReverCrenças*.

Para a representação de conhecimento (crenças, acções, etc) é usualmente escolhida alguma linguagem da lógica de primeira ordem, eventualmente extendida com operadores modais ou a um modelo de probabilidade relacional, adequado a situações de conhecimento probabilístico ou incompleto (conforme Russell & Norvig (2003, p. 462–648)).

Aqui será apenas necessário alguma, geral, forma de representação de conhecimento, pelo que supõe que as crenças são descritas em alguma linguagem \mathcal{L} de primeira ordem.

Um agente age no seu ambiente através do seu sistema motor. Tal como o sistema sensorial, este será representado de forma abstracta: Cada acção atómica é descrita numa linguagem \mathcal{A} . A descrição canónica de uma acção α é equivalente ao triplo

$$\alpha = (s, r, \sigma)$$

em que s e r são fórmulas de \mathcal{L} e σ é uma sequência de fórmulas de \mathcal{A} . A semântica pretendida para a acção α é a seguinte:

Se s for válida num determinado estado do ambiente, então, após a execução da sequência (de acções) σ , o predicado r deverá ser válido no estado do ambiente resultante.

Por exemplo, para um agente que deve empilhar blocos, a acção

$$\left(\begin{array}{l} \text{segurando}(X) \wedge \text{descoberto}(Y), \\ \text{sobre}(X, Y) \wedge \text{mão livre} \wedge \text{descoberto}(X) \\ \wedge \neg \text{descoberto}(Y) \wedge \neg \text{segurando}(X), \\ [\text{empilhar}(X, Y)] \end{array} \right)$$

especifica que se o agente estiver a segurar um bloco X e se outro bloco Y estiver descoberto, então, empilhando X sobre Y , o bloco X deve ficar sobre Y , a mão livre, etc.

De forma a refinar o controlo do sistema motor, distinguem-se dois tipos de acções:

- as acções motoras controlam os motores *físicos* e dependem do *corpo* do agente e do seu ambiente enquanto que
- as acções de controlo dirigem-se ao sistema motor e controlam a sua actividade.

Deste modo o sistema motor abstracto fica representado por um objecto SistemaMotor para o qual os planos são transferidos pelo método Acrescentar. Considere-se o exemplo seguinte: Um agente jogador de xadrez pretende

mover um cavalo (n1). Poderá transferir para o seu sistema motor o plano motor

$$p = [\text{Norte}(n1), \text{Norte}(n1), \text{Este}(n1)].$$

No entanto as acções deste plano só serão executadas quando o plano de controlo

$$c = \text{executar}(p)$$

for transferido para o sistema motor. Ao contrário dos planos motores, os planos de controlo serão executados imediatamente após serem acrescentados ao sistema motor.

Supostamente, o sistema motor e as acções que suporta devem reflectir o ambiente e as capacidades *físicas* do agente. Porém, independentemente dos ambientes e problemas que o agente deverá enfrentar, pode definir-se um conjunto mínimo de acções de controlo: Se p for um plano,

- $\text{executar}(p)$ instrui o sistema motor para (tentar) executar, em sequência, todas as tarefas em p enquanto que com
- $\text{executar próxima}(p)$ o sistema motor (tenta) executar apenas a próxima tarefa em p .

O sistema de controlo proposto, o Controlo Local e Global (CLG), tal como qualquer outra arquitectura genérica de agentes, estrutura um conjunto de funções que deverão ser adaptadas pelo utilizador de acordo com os ambientes e problemas que o agente deverá encontrar. O CLG, após inicialização, é constituído por um ciclo em que o agente continuamente

1. Lê o ambiente;
2. Actualiza as crenças;
3. Gere os seus empenhos e determina uma disposição;
4. Procura um plano de acordo com a disposição e
5. Acrescenta o plano encontrado ao sistema motor.

O pseudo-código do CLG está definido na figura 5.3. A característica principal, motivadora, do CLG é a localização da computação do empenho, quer com os objectivos quer com os planos, na função Vontade. A estrutura de dados resultante desta função é uma disposição D constituída por um conjunto de crenças ($D.crenças$), objectivos ($D.objectivos$) e acções

```

1: procedimento LOCAL E GLOBAL
2:    $A \leftarrow \text{AcçõesPossíveis}$ 
3:    $C \leftarrow \text{CrençasIniciais}$ 
4:    $O \leftarrow \text{ObjectivosIniciais}$ 
5:   enquanto verdade :
6:      $X \leftarrow \text{ObterPróximaPercepção}()$ 
7:      $C \leftarrow \text{ReverCrenças}(X, C)$ 
8:      $D \leftarrow \text{Vontade}(C, O, A)$ 
9:      $P \leftarrow \text{ProcurarPlano}(D.\text{crenças}, D.\text{objectivos}, D.\text{acções})$ 
10:    SistemaMotor.Acrescenta( $P$ )

```

Figura 5.3: O *Controlo Local e Global*.

($D.\text{acções}$) isto é, o triplo (situação, objectivos, acções) que definem um *Problema de Planeamento* (conforme vária literatura, nomeadamente Russell & Norvig (2003); Wooldridge (2002); Fox & Long (2003)).

A disposição resultante da Vontade,

$$D = (D.\text{crenças}, D.\text{objectivos}, D.\text{acções}),$$

define os estados mentais necessários e suficientes para

continuar a execução de um plano, se o agente mantiver o empenho nos planos e nos objectivos;

replanear no caso de o agente perder o empenho num plano, mas mantiver os seus objectivos;

planear no caso do agente perder o empenho nos seus objectivos, necessitando, portanto, também de construir novos planos;

Considere-se primeiro o caso em que é necessário construir um novo plano, porque a vontade mudou o empenho para outros objectivos ou porque decidiu abandonar o anterior plano em curso. Neste caso a disposição resultante da vontade especificará uma intenção $D.\text{objectivos}$ a ser realizada pelas acções disponíveis em $D.\text{acções}$, a partir da situação, supostamente actual, $D.\text{crenças}$. De seguida a função *ProcurarPlano* irá elaborar um plano P que será transferido para o sistema motor através de *SistemaMotor.Acrescenta*(P).

Por outro lado, se *Vontade* determinar a continuação de um plano P (anteriormente transferido para o sistema motor) então a disposição D será simplesmente *Continuar*(P), definida na tabela 5.1 (note-se que *Continuar* é diferente de *continuar*). Se a *Vontade* seleccionar a continuação de um

$D = \text{Continuar}(X)$ se e só se
$D.\text{crenças} = \text{verdade}$
$D.\text{objectivos} = \text{continuar}(X)$
$D.\text{acções} = \{(\text{verdade}, \text{continuar}(X), [\text{executar próxima}(X)])\}$

Tabela 5.1: Disposição Continuar.

plano previamente definido, o esforço computacional na função Procurar-Plano é reduzido à (trivial) unificação de X com P e portanto (computacionalmente) negligenciável.

Ficou por responder ao seguinte: Em geral, como são computadas as componentes crenças, objectivos e acções de uma disposição D ? Claramente, não há um «melhor algoritmo» para esta questão geral. Para diferentes problemas, ambientes, situações, agentes existem diferentes algoritmos mais ou menos eficazes. O propósito do CLG não é *resolver* o problema do empenho mas somente proporcionar uma arquitectura orientada para a sua resolução.

5.3 Aplicações

A aplicabilidade do CLG é demonstrada relacionando-o com duas arquitecturas bem conhecidas: A arquitectura de subsunção de Brooks, através da implementação dos *Exploradores de Marte* (no apêndice B) e da simulação do *Agente de Raciocínio Prático* (no apêndice C).

Além disso, em ambas as aplicações vai considerar-se o *custo computacional* das respectivas simulações pelo CLG e mostrar que estas não o aumentam significativamente.

5.3.1 Os Exploradores de Marte de Steels

Os agentes definidos pela arquitectura reactiva de subsunção são facilmente implementados no CLG. Para exemplificar, considerem-se os *Exploradores de Marte*.

Suponha-se primeiro que o contra-domínio da função *ObterPróximaPer-*

cepção é constituído por vectores

$$\begin{pmatrix} \text{obstáculo detectado,} \\ \text{transporta amostra,} \\ \text{na base,} \\ \text{amostra detectada,} \\ \text{sinal detectado} \end{pmatrix} \in \{\text{verdade, falso}\}^5$$

de componentes booleanas —num total de $2^5 = 32$ percepções distintas— e que o sistema motor é capaz de efectuar as acções

mudar de direcção	subir gradiente	descer no gradiente
recolher amostra	largar amostras	deslocar ao acaso
largar dois sinais	recolher um sinal	

Supondo agora que na função *Vontade* do agente está definida a base de acções da tabela 5.2.

$a_1 = (\text{verdade, acção executada, [executar (mudar de direcção)])}$
 $a_2 = (\text{verdade, acção executada, [executar (largar amostras)])}$
 $a_3 = (\text{verdade, acção executada, [executar (largar dois sinais, subir grad.)])}$
 $a_4 = (\text{verdade, acção executada, [executar (recolher amostra)])}$
 $a_5 = (\text{verdade, acção executada, [executar (recolher um sinal, descer grad.)])}$
 $a_6 = (\text{verdade, acção executada, [executar (deslocar ao acaso)])}$

Tabela 5.2: Base de acções do *Explorador de Marte*.

Além disso, suponha-se falso o predicado *acção executada* no início de cada ciclo do CLG, isto é, na linha 5 da figura 5.3, a condição *acção executada não é válida*. A razão desta convenção tem a ver com os pressupostos (ou melhor, com a ausência de pressupostos) sobre o motor de planeamento contido na função *ProcurarPlano*. Se se desse o caso deste subsistema fazer uma verificação da validade dos objectivos antes de definir uma sequência de acções e se o predicado que descreve o objectivo fosse válido, poderia resultar uma sequência de acções vazia. Com este pequeno truque evita-se essa possibilidade, forçando-se a computação de um plano.

Os contentores *executar* são necessários por razões de consistência com a divisão entre acções motoras e acções de controlo. Como não há necessidade de rever crenças, o valor da função *ReverCrenças* é simplesmente igual ao da função *ObterPróximaPercepção*. O resultado do construtor au-

$D =$ Disposição (x, y, z) se e só se
$D.crenças = x$
$D.objectivos = y$
$D.acções = z$

Tabela 5.3: Construtor Disposição.

xiliar Disposição (x, y, z) é uma disposição D em que

$$\begin{aligned} D.crenças &= x, \\ D.objectivos &= y, \\ D.acções &= z, \end{aligned}$$

conforme a tabela 5.3.

O pseudo-código da função Vontade para implementar os *Exploradores de Marte* está definido na figura 5.4. A computação de ProcurarPlano fica reduzida à simples devolução da acção passada pela disposição, isto é, não é efectuado qualquer planeamento, de acordo com a motivação das arquitecturas reactivas.

```

1: função VONTADE( $C, O, A$ ) ▷ Explorador de Marte
2:   se obstáculo detectado  $\in C$  :
3:     resultado  $\leftarrow$  Disposição (verdade, acção executada,  $a_1$ )
4:   senão: se transporta amostras  $\in C \wedge$  na base  $\in C$  :
5:     resultado  $\leftarrow$  Disposição (verdade, acção executada,  $a_2$ )
6:   senão: se transporta amostras  $\in C$  :
7:     resultado  $\leftarrow$  Disposição (verdade, acção executada,  $a_3$ )
8:   senão: se amostra detectada  $\in C \wedge$  na base  $\in C$  :
9:     resultado  $\leftarrow$  Disposição (verdade, acção executada,  $a_4$ )
10:  senão: se sinal detectado  $\in C \wedge$  na base  $\in C$  :
11:    resultado  $\leftarrow$  Disposição (verdade, acção executada,  $a_5$ )
12:  senão:
13:    resultado  $\leftarrow$  Disposição (verdade, acção executada,  $a_6$ )

```

Figura 5.4: Vontade do *Explorador de Marte*.

É simples verificar que o agente CLG aqui descrito tem o mesmo comportamento que os Exploradores de Marte definidos no apêndice B.1: perante percepções iguais são escolhidas acções iguais. Além disso, como se viu, o custo computacional desta simulação não é substancial.

Para ver porque é que os comportamentos coincidem, seja Ag_1 um *Explorador de Marte* e Ag_2 um agente CLG definido de acordo com o esquema descrito. É necessário considerar apenas os estados do ambiente distinguidos pela função *ObterPróximaPercepção* (supostamente partilhada por Ag_1 e Ag_2). Além disso, para analisar o comportamento de Ag_2 é suficiente considerar as linhas 5–10 da figura 5.3.

Enquanto Ag_1 executa *ObterPróximaPercepção* (), Ag_2 necessita de executar essa função e, adicionalmente, *ReverCrenças*. Mas, da forma que esta última função está definida, este passo extra por Ag_2 é negligenciável.

Agora, sejam X uma percepção, Y uma acção e

$$Z = \text{Disposição} (\text{verdade,} \\ \text{acção executada,} \\ \{(\text{verdade, acção executada, executar}(Y))\} \\)$$

A acção escolhida por Ag_1 , quando $X = \text{ObterPróximaPercepção}()$ é Y se e só se a disposição definida pela função *Vontade* de Ag_2 é Z . Além disso a computação (adicional em relação a Ag_1) que Ag_2 tem de fazer para obter Z limita-se à execução do construtor *Disposição* e à consulta da base de acções na tabela 5.2. Assim, o sobre-custo da computação, por Ag_2 , de Z é insignificante em comparação com o custo, por Ag_1 , de computar Y .

Como, trivialmente, $\text{ProcurarPlano}(Z) = \text{executar}(Y)$, este passo extra também não traz custos computacionais significativos para o agente CLG. Por fim, Ag_1 e o sistema motor de Ag_2 executam Y .

5.3.2 O Agente de Raciocínio Prático

A simulação de uma arquitectura mais sofisticada constitui um desafio maior para o CLG. De facto, não se tentará replicar exactamente o comportamento de um agente ARP num agente CLG. Em vez disso, dado um agente ARP mostra-se como se pode construir um agente CLG que toma as decisões relativas ao empenho que o agente ARP tomaria em situações equivalentes, embora não se possa garantir que venha a executar as mesmas acções.

Assim, supondo dado Ag_1 , um agente implementado no esquema ARP, seja Ag_2 o agente CLG em que

1. as componentes *AcçõesPossíveis*, *CrençasPossíveis*, *ObjectivosIniciais*, *ObterPróximaPercepção* e *ReverCrenças* são as que estão disponíveis para o agente ARP;

```

1: função VONTADE( $C, O, A$ )                                ▷ Agente de Raciocínio Prático
2:   se ExistePlanoEmCurso  $\in C$  :
3:      $P \leftarrow$  ObterPlanoEmCurso ()
4:     se DeveReconsiderarObjectivos ( $O, C, P$ ) :
5:        $E \leftarrow$  ExplorarOpções ( $C, O, A$ )
6:        $O \leftarrow$  FiltrarOpções ( $C, E, A$ )
7:       resultado  $\leftarrow$  Disposição ( $C, O, A$ )
8:     senão: se  $\neg$ Seguro ( $P, O, C$ ) :
9:       resultado  $\leftarrow$  Disposição ( $C, O, A$ )
10:    senão:
11:      resultado  $\leftarrow$  Continuar ( $P$ )
12:  senão:
13:     $E \leftarrow$  ExplorarOpções ( $C, O, A$ )
14:     $O \leftarrow$  FiltrarOpções ( $C, E, A$ )
15:    resultado  $\leftarrow$  Disposição ( $C, O, A$ )

```

Figura 5.5: Vontade do *Agente de Raciocínio Prático*.

2. o sistema motor é baseado nas funções Executar, ObterPrimeiro e ObterRestantes e controla dois estados internos: a crença ExistePlanoEmCurso (verdade se e só se no sistema motor está presente algum plano) e PlanoEmCurso (o plano mais recentemente passado para o sistema motor e que é o resultado da função ObterPlanoEmCurso ());

3. está definida a condição DeveReconsiderarObjectivos (O, C, P), equivalente a

$$\text{Vazio}(P) \vee \text{Realizados}(O, C) \vee \text{Impossíveis}(O, C) \vee \text{Reconsid.}(O, C);$$

4. Continuar é a disposição definida na tabela 5.1;

5. a função Vontade é definida de acordo com a figura 5.5.

Afirma-se que o agente Ag_2 faz a mesma gestão de empenho do agente Ag_1 sem sobre-custo computacional significativo. Isto é: sendo tudo o resto igual, Ag_1 e Ag_2 efectuam as mesmas computações relativas ao empenho.

Para justificar esta afirmação, note-se que a inicialização de Ag_1 (figura C.1, linhas 2, 3 e 4) é igual à inicialização de Ag_2 (figura 5.3, linhas 2, 3 e 4). Enquanto o ciclo de controlo da Ag_1 corresponde às linhas 5–21 da figura C.1, no controlo de Ag_2 a função Vontade, na linha 8 da figura 5.3, está definida pela figura 5.5.

Suponha-se que em estados de ambiente equivalentes (sendo a *equivalência* dada pela igualdade de percepções da função *ObterPróximaPercepção*) Ag_1 e Ag_2 têm as mesmas crenças, acções em curso e objectivos. Além disso, suponha-se que acabaram de executar a mesma acção do plano P .

Se Ag_1 for reconsiderar os seus objectivos, alguma das condições

$$\text{Vazio}(P) \vee \text{Realizados}(O, C) \vee \text{Impossíveis}(O, C) \vee \text{Reconsiderados}(O, C)$$

é válida. Portanto, também a condição

$$\text{DeveReconsiderarObjectivos}(O, C, P)$$

será válida. E vice-versa. Logo, nesta situação, ambos os agentes irão executar $E \leftarrow \text{ExplorarOpções}(C, O, A)$ seguida de $O \leftarrow \text{FiltrarOpções}(C, E, A)$.

Se Ag_1 mantém o empenho para com as objectivos O mas $\text{Seguro}(P)$ deixa de ser válido, o seu controlo irá replanear (linhas 20 e 21, figura C.1). Mas também Ag_2 o fará (linhas 8 e 9 da figura 5.5 e linha 8 de 5.3).

Por fim, se nenhum empenho (para com objectivos ou planos) for quebrado, ambos os agentes continuam com a execução do plano P .

Conforme se viu, os testes e planeamentos envolvidos na gestão do empenho são iguais em Ag_1 e Ag_2 , pelo que na simulação do primeiro pelo segundo não haverão computações adicionais.

Note-se que os agentes Ag_1 e Ag_2 *não* executam todas as funções exactamente na mesma ordem. Por exemplo Ag_1 determina um plano P , verifica as condições *Vazio*, etc e inicia a execução de P enquanto que após Ag_2 determinar P , *actualiza as crenças*, eventualmente verifica *Vazio*, etc e produz a disposição *Continuar(P)*. Embora esta diferença atrase a execução de P , também proporciona maior sensibilidade a alterações no ambiente.

5.4 Conclusão

A arquitectura CLG centraliza na vontade a gestão do empenho. A assinatura da função *Vontade*, definindo uma disposição, juntamente com a distinção entre acções de controlo e acções motoras permite que a actualização de crenças, a gestão do empenho, o planeamento e o sistema motor estejam localizados em contentores distintos, independentes, no processo de escolha de acção.

Mostrou-se que a arquitectura CLG pode simular «em tempo real» arquitecturas reactivas e representativas. O comportamento de agentes reactivos pode ser fielmente replicado, incluindo a velocidade da tomada de

decisões. No caso da simulação de agentes ARP mostrou-se que, tudo o resto sendo igual, os agentes CLG podem fazer a mesma gestão de empenho que os agentes ARP.

5.4.1 Trabalho Futuro

Embora tenham sido feitas algumas simulações com a arquitectura CLG, o próximo desafio seria aplicá-la a um problema mais complexo, como o *RobotCup* ou o *RobotRescue* Polani & Browning (2004). Como o CLG claramente separa

- a percepção do ambiente;
- a actualização do conhecimento (crenças);
- a gestão do empenho;
- o planeamento e
- o sistema motor,

embora tenha sido desenvolvido com um modelo sequencial de execução em mente, eventualmente será possível adaptá-lo a um modo de processamento paralelo. Por exemplo a paralelização do ARP seria muito mais difícil, se possível, e é mesmo incompatível com a arquitectura de subsunção.

O CLG define uma estrutura geral e restringe muito pouco quer a gestão do conhecimento quer o planeamento. Seria interessante considerar o *planeamento contínuo* (ver o resumo de desJardins *et al.* (1999)) em que a função ProcurarPlano começa por proporcionar apenas um segmento inicial de um plano, refinado e expandido por sucessivas iterações, tendo em conta a actualização do conhecimento (em ReverCrenças).

6

Meta Agência

O espaço mental de um agente pode ser bastante complexo. Poderá constituir o ambiente para um outro agente, um meta agente? Este observaria e agiria sobre os estados mentais do primeiro, as suas crenças, objectivos, etc. Neste capítulo, e na série de artigos Coelho & Coelho (2005b), Coelho & Coelho (2005d) e Coelho & Coelho (2005c) inicia-se a investigação deste cenário. Procura-se mostrar que a meta agência é *útil*: permite construir soluções simples e intuitivas. Em particular, vai-se ilustrar um caso em que um meta agente repõe a funcionalidade de um agente reactivo simples.

6.1 Introdução

A arquitectura de cada agente individual especifica os seus estados mentais e espaço mental. Os valores específicos dos estados mentais e a estrutura do espaço mental guiam o comportamento do agente *i.e.* definem a função $Ag : Per \rightarrow Ac$ que transforma as percepções do conjunto *Per* em acções do conjunto *Ac*. Esta afirmação é válida para qualquer arquitectura de agentes. No caso de arquitecturas reactivas, os candidatos razoáveis para estados mentais serão as reacções estímulo \rightarrow resposta sendo, então, o espaço mental formado pelo conjunto de todos os estados mentais, ou reticulado, no caso dessas reacções se encontrarem ordenadas.

Procurando evitar ambiguidades, e independentemente da arquitectura específica de cada agente, serão referidos os agentes externos, interagindo num ambiente externo. O seu espaço mental será composto por estados mentais e constitui o ambiente percebido e manipulado por meta agentes.

Por outro lado, além de se considerar o espaço mental de um agente, é também importante medir o seu *desempenho*. Apenas com base na função $Ag : Per \rightarrow Ac$ é impossível obter-se tal medida. Para esse efeito define-se a função realização, com base na ideia de poder de um agente (conforme

a secção 1.1.2): o poder individual de um agente poderá ser medido através da contabilidade dos seus objectivos e as respectivas realizações. Tal função será designada por realização:

A realização descreve o sucesso do comportamento do agente na concretização dos seus objectivos dominantes.

Para agentes definidos por arquitecturas representativas os valores dessa medida de desempenho poderão fazer parte da sua base de crenças pois são calculáveis a partir das representações explícitas dos seus objectivos e dos estados dos processos em curso para as realizar. Porém, nos agentes definidos por arquitecturas reactivas, na interpretação mais pura, não terão acesso às representações internas dos estados mentais, pelo que o procedimento anterior, baseado no acesso a essas representações, não é aplicável.

Esta observação não implica que as arquitecturas reactivas sejam incompatíveis com medidas de desempenho. Implica sim, que um agente reactivo não poderá computar, a partir do seu estado interno, uma crença sobre a sua performance.

Tal como com a função Ag , embora os detalhes dependam de agentes específicos e dos seus propósitos, pode definir-se uma assinatura para a função realização $: \mathbf{N} \rightarrow [0, 1]$ em que \mathbf{N} é o conjunto dos números naturais (assumindo que o tempo é discreto) e realização (t) é a realização do agente no instante t . Se realização $(t) = 0$ então, no instante t o comportamento do agente não poderia ser pior —no modo representativo, realizou nenhum objectivo— e se realização $(t) = 1$ então, no instante t o comportamento do agente é o melhor possível —isto é, realizou todos os seus objectivos—. Valores intermédios de realização correspondem a performances de comportamento intermédias.

Neste capítulo pretende-se apenas mostrar que a aplicação de ideia da meta agência é útil. Isto é, que providencia soluções simples para problemas de outra forma complicados.

No problema-exemplo de seguida descrito os agentes são definidos na arquitectura de subsunção de Brooks e apenas serão usados agentes desse tipo. No entanto, sem meta agência, outra abordagem alternativa empregaria ou uma arquitectura ou agentes mais complexos do que aqueles aqui usados. A argumentação pela meta agência baseia-se numa comparação entre as realizações de agentes *óptimos* e agentes *aleatórios* com agentes equipados com meta agência.

Embora as observações principais sejam as realizações, também se consideram as dinâmicas dos espaços mentais do agentes.

6.2 Experimentação

Esta experiência é efectuada no contexto dos *Exploradores de Marte*, descritos no apêndice B. Em *Bases*, descrevem-se as populações de agentes que serão comparadas e em *Configuração* define-se a função realização do *Explorador de Marte* e o seu meta agente. Em *Observação* introduzem-se as variáveis a serem observadas e um sumário das estatísticas das respectivas observações. Por fim, em *Inferência* mostram-se algumas conclusões sobre as populações a partir das amostras obtidas por simulação.

6.2.1 Bases

Nesta experiência serão observados três tipos de amostras: Os veículos com o controlo de Steels (tabela B.1) definem a população *ótima* enquanto que agentes com o espaço mental aleatoriamente ordenado constituem a população *aleatória*. A população de *teste* é composta pelos agentes providos de meta agentes e cujo espaço mental inicial está aleatoriamente desordenado.

O objectivo experimental consiste em reunir indicações empíricas de que a realização da população de *teste* 1) se aproxima da realização da população *ótima* e 2) é superior à da população *aleatória*.

Se este objectivo for atingido então fica demonstrado um exemplo da utilidade da meta agência.

6.2.2 Configuração

Suponha-se que a narrativa inicial de Steels (veja-se o apêndice B) é alargada:

(...) Devido a possíveis tempestades solares, os programas dos veículos poderão ser danificados. Sendo demasiado caro proteger todas as componentes de software, escolheu-se proteger apenas as reacções estímulo → resposta e uma pequena componente de reconstrução: um meta agente. A responsabilidade deste consiste em reordenar apropriadamente as reacções no caso da ordem pré-estabelecida ser corrompida.

Põem-se então as seguintes questões:

- Será que o meta agente consegue restaurar o espaço mental a um nível em que o veículo recupere a capacidade operativa?
- Que operações poderá efectuar o meta agente no espaço mental do agente externo?

O sucesso de um agente externo *Explorador de Marte* depende directamente do número de amostras depositadas na base e inversamente do número de movimentos que terá efectuado. Deste modo, uma medida simples da sua realização será

$$\text{realização} = \frac{\text{amostras depositadas}}{\text{amostras depositadas} + \text{movimentos}}.$$

Adicionalmente, suponha-se que um *Explorador de Marte*, para além das capacidades de percepção e acção implicadas pelo controlo de Steels,

1. mantém um registo da última reacção activada e
2. pode calcular se o valor da realização cresceu ou diminuiu com a respectiva execução.

Note-se que para actualizar os valores das variáveis amostras depositadas e movimentos é suficiente contabilizar, na componente resposta da última reacção, as ocorrências das acções largar amostras, deslocar ao acaso, mudar de direcção, subir gradiente e descer gradiente. Isto é, não é necessária qualquer informação sobre o ambiente externo.

Desta observação decorre que, para o meta agente que se define de seguida, não serão necessárias considerações sobre percepções originadas no ambiente externo. Por outro lado, o meta agente deve ter a capacidade de agir no espaço mental do agente externo. Suponha-se que pode promover e despromover estados mentais no espaço mental do agente externo *i.e.* que pode trocar duas reacções consecutivas.

procedimento METAAGENTE(ζ , Δ realização, última reacção)

se Δ realização $> \zeta$:

promover (última reacção)

senão: se Δ realização $< -\zeta$:

despromover (última reacção)

Figura 6.1: Controlo do meta agente do *Explorador de Marte*.

O controlo do meta agente será definido com uma estratégia simples em mente: Se a acção da última reacção resultar num incremento da realização

então o meta agente irá promover esse par. Caso contrário, se o valor da realização diminuir, essa reacção deverá ser despromovida.

Porém, é necessário considerar que poderão ocorrer variações muito pequenas na realização. Sem uma filtragem dessas pequenas variações, uma alteração infinitesimal no valor da realização teria o mesmo efeito no espaço mental que uma variação astronómica. Assim as acções do meta agente serão efectuadas só no caso da variação de realização ser superior a um certo limiar dado, que passa a ser um parâmetro do meta agente. Desta forma, o controlo do meta agente fica definido na tabela 6.1, em que o parâmetro ζ é o limiar de «sensibilidade» à realização.

Agora, dada esta configuração, questionamos-nos:

- Qual será o valor esperado, a longo prazo, da realização do agente externo?
- Será este *eficaz* na realização dos seus objectivos?
- E o meta agente?
- Qual será a evolução do espaço mental do agente externo?

6.2.3 Observação

É necessário escolher um conjunto de variáveis que permitam responder empiricamente a essas questões. A observação do valor da realização é adequada à primeira questão. Sobre a eficácia do agente externo, lembre-se que o veículo deverá recolher amostras. Deste modo, uma medida da eficácia do agente externo será número do número de amostras depositadas por unidade de tempo:

$$\text{eficácia} = \frac{\text{amostras depositadas}}{\text{tempo}}.$$

Note-se que o meta agente será tão eficaz, assegurando a operabilidade do agente externo, quanto este o for. Portanto, ambas as questões poderão ser respondidas pela observação da variável eficácia do agente externo.

Sobre a evolução do espaço mental, pretende-se observar se a meta agência provoca alguma convergência do espaço mental do agente externo para o espaço mental definido pelo programa original de Steels. Para tal, não é suficiente uma simples contagem de «posições erradas» das reacções pois desta forma não se considera a ordem no espaço mental.

Oportunamente, o controlo de Steels é suficientemente simples para proporcionar uma medida baseada num questionário: A cada questão será

atribuída uma «penalização» e a soma de todas as penalizações definirá a distância a que um dado programa está do programa de Steels. Assim, considere-se M um espaço mental dado:

1. A reacção obstáculo detectado \rightarrow mudar de direcção deveria ser a primeira. Em M , cada reacção que ocorra antes desta define um ponto de penalização;
2. A reacção verdade \rightarrow deslocar ao acaso deveria ser a última. Em M , cada reacção que ocorra depois desta define um ponto de penalização;
3. A reacção sinal detectado \rightarrow (recolher um sinal, descer gradiente) deveria ocorrer após as reacções
 - transporta amostras \wedge na base \rightarrow largar amostras,
 - transporta amostra \rightarrow (largar 2 sinais, subir gradiente) e
 - amostra detectada \rightarrow recolher amostra.

Em M , cada um destas reacções que ocorra depois daquela define um ponto de penalização;

4. distância (M) é a soma dos pontos de penalização encontrados em M .

A experiência considera três populações: a população *ótima* é composta pelos agentes de Steels, inalterados. O perfil desta população constitui a referência a ser aproximada pela população de *teste*. Este segundo tipo de agente tem o espaço mental inicial reordenado ao acaso mas está equipado com um meta agentes definido pela tabela 6.1. Nas experiências efectuadas usou-se o limiar $\zeta = 10^{-5}$. Por fim, na população *aleatória* o espaço mental dos agentes é inicialmente reordenado ao acaso e assim permanece.

Para cada uma destas populações foi construída uma amostra de 800 agentes, executada durante 10^5 instantes, após os quais o valor de realização, eficácia e distância de cada agente foi registado. A mera observação das médias amostrais dos triplos

$$\begin{pmatrix} \overline{\text{realização}}_O, \overline{\text{eficácia}}_O, \overline{\text{distância}}_O \\ \overline{\text{realização}}_T, \overline{\text{eficácia}}_T, \overline{\text{distância}}_T \\ \overline{\text{realização}}_A, \overline{\text{eficácia}}_A, \overline{\text{distância}}_A \end{pmatrix} \text{ e}$$

respectivamente na amostra *ótima*, *teste* e *aleatória* não é suficiente para conferir validade empírica a alguma conclusão para as respectivas populações. Para tal é necessário proceder-se a testes de hipóteses adequados.

6.2.4 Inferência

O processo de inferência das observações para as populações segue os processos standard da estatística (veja-se o apêndice D). Nesta experiência particular é suficiente proceder a um teste unilateral de *igualdade das médias populacionais*. Designando, respectivamente, por

$$\mu_{\text{Realização}_O}, \mu_{\text{Realização}_T} \text{ e } \mu_{\text{Realização}_A}$$

as médias da realização nas populações *ótima*, *teste* e *aleatória*, procura-se saber

se o valor esperado da Realização das populações *teste* e *ótima* são iguais:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_{\text{Realização}_T} &= \mu_{\text{Realização}_O} \\ H_1 : \mu_{\text{Realização}_T} &< \mu_{\text{Realização}_O} \end{aligned}$$

e, se o valor esperado da Realização das populações *teste* e *aleatória* são iguais:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_{\text{Realização}_A} &= \mu_{\text{Realização}_T} \\ H_1 : \mu_{\text{Realização}_A} &< \mu_{\text{Realização}_T} \end{aligned}$$

Variável: Realização	Populações: <i>teste</i> e <i>ótima</i>
Hipótese nula	$\mu_{\text{Realização}_T} = \mu_{\text{Realização}_O}$
Hipótese alternativa	$\mu_{\text{Realização}_T} < \mu_{\text{Realização}_O}$
Observação em <i>teste</i>	0,015
Observação em <i>ótima</i>	0,056
Observação da estatística de teste	$t = 45,729$
Condição de rejeição	$t > 1,646$
Valor de prova	10^{-231}
Conclusão	<i>Rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 6.1: Teste à igualdade de Realização *teste* e *ótima*.

As tabelas 6.1 e 6.2 resumem os testes efectuados aos dados empíricos. Dado que os valores de prova de ambos os testes são significativamente pequenos, reuniu-se evidência estatística para validar

$$\mu_{\text{Realização}_O} > \mu_{\text{Realização}_T} > \mu_{\text{Realização}_A}.$$

Variável: Realização	Populações: <i>aleatória</i> e <i>teste</i>
Hipótese nula	$\mu\text{Realização}_A = \mu\text{Realização}_T$
Hipótese alternativa	$\mu\text{Realização}_A < \mu\text{Realização}_T$
Observação em <i>aleatória</i>	0,006
Observação em <i>teste</i>	0,015
Observação da estatística de teste	$t = 7,620$
Condição de rejeição	$t > 2,328$
Valor de prova	10^{-14}
Conclusão	<i>Rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 6.2: Teste à igualdade de Realização *aleatória* e *teste*.

No que diz respeito à variável Eficácia, o processo de inferência dos dados amostrais para as três populações é idêntico. De novo os dados amostrais (resumidos nas tabelas 6.3 e 6.4) proporcionam evidência estatística para validar

$$\mu\text{Eficácia}_O > \mu\text{Eficácia}_T > \mu\text{Eficácia}_A,$$

pelo que se pode concluir que

A meta agência permite uma recuperação parcial da funcionalidade dos agentes.

A performance dos agente munidos de meta agência é claramente superior à dos agentes aleatórios.

Variável: Eficácia	Populações: <i>teste</i> e <i>ótima</i>
Hipótese nula	$\mu\text{Eficácia}_T = \mu\text{Eficácia}_O$
Hipótese alternativa	$\mu\text{Eficácia}_T < \mu\text{Eficácia}_O$
Observação em <i>teste</i>	0,009
Observação em <i>ótima</i>	0,037
Observação da estatística de teste	$t = 45,262$
Condição de rejeição	$t > 1,647$
Valor de prova	$3,751^{-228}$
Conclusão	<i>Rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 6.3: Teste à igualdade de Eficácia *teste* e *ótima*.

No que diz respeito à dinâmica do espaço mental é necessária uma abordagem diferente. Quere-se saber como é que as distâncias das amostras

Variável: Eficácia	Populações: <i>aleatória</i> e <i>teste</i>
Hipótese nula	$\mu\text{Eficácia}_A = \mu\text{Eficácia}_T$
Hipótese alternativa	$\mu\text{Eficácia}_A < \mu\text{Eficácia}_T$
Observação em <i>aleatória</i>	0,004
Observação em <i>teste</i>	0,009
Observação da estatística de teste	$t = 7,183$
Condição de rejeição	$t > 1,646$
Valor de prova	$5,212^{-13}$
Conclusão	<i>Rejeitar a hipótese nula</i>

Tabela 6.4: Teste à igualdade de Eficácia *aleatória* e *teste*.

teste e *aleatória* se distribuem em relação ao valores teóricos esperados. Este tipo de questão responde-se com um teste de χ^2 . Para tal é necessário saber quantos programas existem para cada valor possível da distância e, a partir desses números, calcular as frequências relativas. A figura 6.2

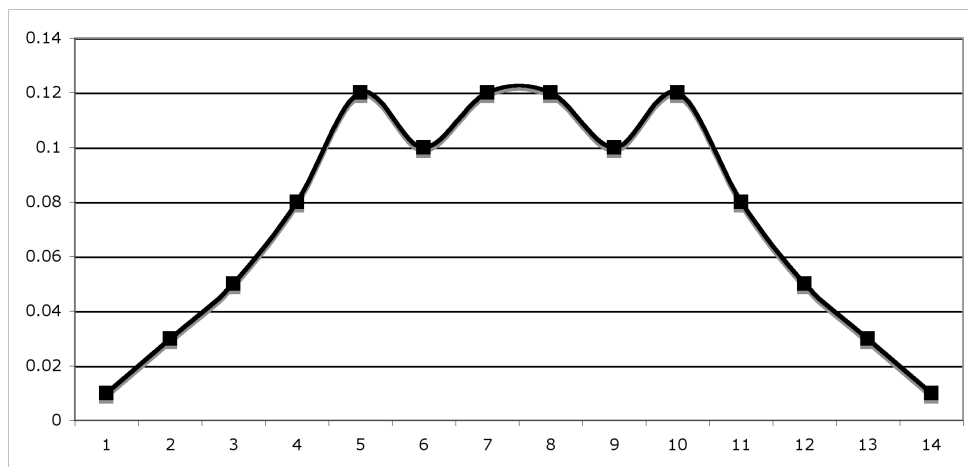


Figura 6.2: Frequência esperada (vertical) da distância (horizontal).

mostra o histograma dessas frequências (veja-se também B.1). Por exemplo, para distância = 4 existem 84 programas diferentes e, como o número total de programas é $6! = 720$, a frequência esperada para distância = 4 é $84/720 = 0,12$.

Agora, para a amostra *aleatória*, as frequências observadas, em função da distância estão representadas na figura 6.3 e, para a amostra *teste*, na figura 6.4.

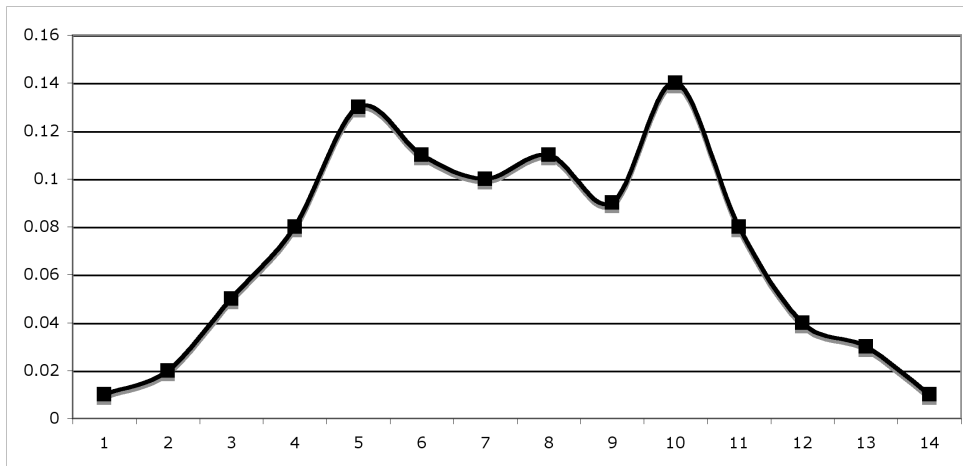


Figura 6.3: Frequência (vertical) da distância (horizontal) na amostra *aleatória*.

Para cada amostra, o *erro* em relação à figura 6.2 é dado pela fórmula

$$x^2 = \sum_{d=0}^{13} \frac{(S_d - E_d)^2}{E_d}$$

em que S_d é a frequência observada na amostra (nas figuras 6.3 e 6.4) quando distância = d e E_d é a frequência esperada (na figura 6.2) à mesma distância.

Por exemplo, na amostra *teste*, $S_0 = 0$, $S_1 = 0,02$, etc e, para ambas as amostras, $E_0 = 0,01$, $E_1 = 0,03$, etc.

A notação x^2 para o erro deve-se ao facto de a fórmula indicada seguir uma distribuição χ^2 .

Agora, tem-se

$$\begin{aligned} x_A^2 &= 0,017742, \\ x_T^2 &= 2,947325. \end{aligned}$$

O pequeno valor do erro de x_A^2 indica que a amostra *aleatória* tem uma distribuição próxima da uniforme (o que seria de esperar) e que, pelo contrário, a amostra *teste* está concentrada. Além disso, por observação directa da figura 6.4, esta amostra está restringida ao conjunto $\{1, 2, 3, 4, 5\}$.

Este efeito de convergência não é explicável apenas por causas aleatórias:

Com meta agência, o espaço mental do agente externo conver-

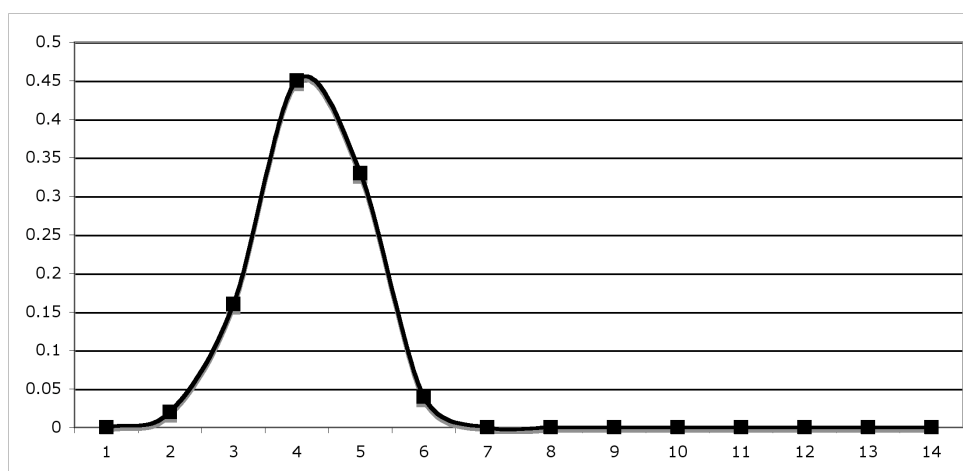


Figura 6.4: Frequência (vertical) da distância (horizontal) na amostra *teste*.

girá para um pequeno conjunto de espaços mentais, próximo da população óptima.

6.3 Discussão

Pergunta Não será a experiência escolhida demasiado artificial?

Resposta Possivelmente. O cenário experimental é muito simples e estilizado. Em desenvolvimentos futuros poder-se-á chegar à conclusão que a meta agência afinal é desnecessária para aplicações reais. Por enquanto estes resultados parecem promissores e motivadores de mais investigação.

P. O exemplo não poderia ter sido implementado sem meta agentes?

R. Não, sem quebrar o espírito da arquitectura de subsunção: As reacções estímulo → resposta, e a sua ordem, devem ser estáticas.

P. E se a subsunção fosse ampliada com reordenação de estados mentais?

R. Isso seria batota. Repare-se que quer o agente externo quer o meta agente são agentes estritamente reactivos. Embora o programa do agente externo mude, é apenas por efeito das acções do meta agente.

P. Como a realização não é um estado mental, a sua percepção pelo meta agente não está a violar a própria ideia da *meta agência*?

- R.** Um explorador de Marte real, além do seu programa, teria estados internos adicionais, por exemplo, *conta-quilômetros, número-de-amostras-colhidas, etc.* A função realização usada nesta experiência pode ser directamente computada a partir desses estados internos. Assim, embora a realização não seja uma reacção, não se encontra uma razão para que o seu valor não esteja presente num estado mental.
- P.** Não será a realização apenas uma reformulação da utilidade ou recompensa?
- R.** Não. As funções de utilidade medem o valor ganho uma possível situação futura enquanto que a realização mede o sucesso (ou falta de) do comportamento passado do agente. O que se afirma é que a diferença entre realização e utilidade ou recompensa está na forma como essas funções são usadas pela arquitectura do agente. Enquanto que estas últimas funções são geralmente usadas para guiar cortes em árvores de pesquisa, a realização resume a história do (comportamento do) agente.
- P.** A função realização não é apenas uma função de adaptação e todo o processo de promoção e despromoção uma variante dos algoritmos genéticos?
- R.** Não. Note-se que a realização mede a performance global do espaço mental (a população do algoritmo genético?). Além disso, não há qualquer suporte para informação do tipo *cromossoma* nem quaisquer operações genéticas. Assim, a metáfora genética não se aplica.
- P.** Não é a combinação realização+meta agência apenas uma reformulação, ou caso particular, da aprendizagem?
- R.** Embora sejam semelhantes, não são idênticas, pelo menos no sentido comum da aprendizagem. Embora seja verdade que a aprendizagem implica uma mudança no espaço mental, guiada por uma função crítica, está restringida a arquitecturas representativas e, nestas, às crenças dos agentes. Os agentes reactivos não aprendem. Por outro lado, a função crítica usada na aprendizagem pode depender (e normalmente depende) do estado do ambiente externo, enquanto que a realização depende exclusivamente do espaço mental.
- P.** A meta agência não poderá levar o agente a comportamentos incoerentes, por exemplo planear para objectivos obsoletos?

R. Sim. Esse é um problema potencial. No entanto, problemas desse tipo são muito comuns. Por exemplo, se não houver cuidado com referências à memória (apontadores), um programa pode quebrar ou inundar a memória do computador, etc.

P. Para que mais poderá ser usada a meta agência?

R1. Em geral, pode ser aplicada na gestão do espaço mental. Por exemplo, aprendizagem ou actualização de crenças: Um meta agente poderá observar a base de crenças e remover itens obsoletos, ou activar um alarme se forem detectadas inconsistências, etc.

R2. Uma aplicação mais ousada para a subsunção + meta agência poderá ser como segue: Dado um conjunto não ordenado de reacções, uma função de realização e operações dos estado mental adequadas, poderia não ser necessário definir a ordem no programa... O meta agente poderia evoluir o espaço mental do agente externo para uma ordem suficientemente boa. A experiência dos *Exploradores de Marte* ilustra, parcialmente, esta aplicação. Possivelmente, a maior dificuldade nesta aplicação será a definição da função realização, assim como, por exemplo, a maior dificuldade numa heurística de poda numa árvore de pesquisa está na definição da função heurística.

P. Quando *não* deve ser usada a meta agência?

R. *à priori*, para interagir com o ambiente externo. Por exemplo, não faz sentido usar um meta agente para uma tarefa de planeamento. No entanto, o planeador poderá ter um meta agente que, digamos, controla o consumo de recursos ou a relevância (actualizada) dos objectivos.

P. Qual é o custo computacional da meta agência?

R. Negligenciável. A aplicação da meta agência apenas ajuda na estruturação do agente, através da separação entre tarefas externas, provenientes ou dirigidas ao ambiente externo, e tarefas internas sobre o espaço mental.

6.4 Conclusão

Embora o *Explorador de Marte* e o seu meta agente sejam agentes estritamente reactivos, com a meta agência o agente resultante ganha propriedades ausentes nos agentes sem meta agência, em particular, como se demonstrou aqui, uma forma simples de adaptação ou aprendizagem.

Nesta experiência de simulação, a simbiose entre meta agência e poder individual, medido pela realização, provou ser capaz de restaurar a operabilidade de agentes danificados.

Este será o primeiro passo para uma teoria aplicável de meta agência e poder individual. Enquanto a lógica modal possa ser uma ferramenta adequada para descrever a meta agência, não é claro que deva ser usada pelos meta agentes, como, por exemplo, no caso em que os estados mentais são, eles próprios, fórmulas modais. No entanto, uma sintaxe própria, com semânticas finitas —a este propósito, vejam-se os trabalhos de Konolige (1984) e de Moore (1984)— poderão ser aplicadas pela meta agência.

7

Meta Agência Desenvolvida

Persegue-se o poder individual enquanto conjunto de aptidões do agente, tendo em vista o seu desempenho flexível em ambientes dinâmicos e imprevisíveis. Após uma fase analítica, do estudo isolado de algumas componentes deste, nomeadamente, a distinção em relação ao poder social em Coelho & Coelho (2003), o controlo (Coelho & Coelho (2005d,b,c)), a vontade (Coelho & Coelho (2005a)) e o conhecimento (Coelho & Coelho (2005e)), é, agora, possível (e necessário) fazer uma síntese desses contributos.

A meta agência propõe uma nova abordagem às arquitecturas de controlo individual de agentes, onde a mente, que controla o agente, é descrita como uma sociedade de sub agentes de segundo nível —os meta agentes— que habitam num espaço de dados dinâmico —o espaço mental—.

Anteriormente procurou-se aproximar o desempenho de agentes reactivos. Agora o objectivo é mostrar que a meta agência, a vontade e o conhecimento integrados permitem superar o desempenho destes. Isto é, procura-se primeiro integrar a componentes do poder individual antes consideradas isoladamente e, segundo, que dessa integração resultam agentes com desempenho superior.

Assim, desenvolve-se a meta agência de forma a desenhar comportamentos mais complexos e efectivos. Para esse efeito, nestes agentes, a vontade e o conhecimento desempenham um papel crítico. Por crescer, de forma integrada, o poder individual destes agentes, cresce também o seu desempenho.

De modo a recolher evidência empírica sobre esta integração, faz-se uma experiência, desenvolvida a partir do cenário dos exploradores de Marte, constituída por uma equipa de teste controlada por meta agência, que compete com outra equipa, de referência, reactiva.

Assim, propõe-se uma arquitectura de controlo de agentes individuais cujos principais ingredientes são um espaço mental e um conjunto de meta

agentes para habitar esse espaço. Com base nessa arquitectura, e em trabalho prévio sobre a vontade de um agente e análise de séries temporais, desenham-se e implementam-se controlos dos veículos e da base que irão constituir uma equipa de recolha de amostras.

Resultou dessa experiência que as equipas teste vencem regularmente (por recolherem, por larga margem, mais amostras) as equipas de referência. Essa diferença pode ser explicada pelo efeito da equipa testada manter, e processar, informação sobre o ambiente, o que lhe permite tirar maior proveito deste. O controlo desta equipa, definido pela meta agência e dado forma à vontade, mostrou-se capaz de proporcionar agentes flexíveis, orientados por objectivos mas sensíveis a estímulos do ambiente, com *poder de intervir*.

7.1 Introdução

Arquitecturas de Agentes. O controlo de agentes individuais é, por norma, estruturado segundo componentes especificadas por uma determinada arquitectura. Esta procura captar, nos seus elementos, algum paradigma de comportamento. Por exemplo, as arquitecturas reactivas (por exemplo, na figura 7.11) recolhem inspiração nos chamados «reflexos», associações entre um estímulo e uma resposta. Por outro lado, as designadas arquitecturas CDI (crenças, desejos e intenções) baseiam-se nas teorias de comportamento de Bratman (ver Bratman (1987, 1990)).

Aqui tenta-se aplicar (parcialmente) as propostas de Martin Minsky (Minsky (1985)) e de Corrêa & Coelho (1998, 2004), descrevendo a mente, e o controlo do agente, como uma sociedade de meta agentes e de estados mentais, sendo o comportamento do agente resultante das actividades daqueles.

Exploradores de Marte. Os exploradores de Marte, (em Steels (1990)) têm sido recorrentemente usados como exemplo dum controlo reactivo. O respectivo pseudo-código está na figura 7.11, mais à frente. De facto, aí, fez-se uma alteração na ordem das reacções. Com esta modificação a recolha de amostras tem prioridade sobre o transporte destas para a base. Na configuração anterior, o veículo, após recolher uma única amostra, seguiria para a base sem recolher mais alguma amostra. Com esta alteração, o veículo, após recolher uma amostra, ainda se dirige para a base, porém irá também recolhendo todas as amostras que for detectando nesse percurso.

Agentes CDI e ARP. As arquitecturas de *estados mentais* têm base na teoria do comportamento humano de Bratman. Esta postula que o raciocínio prático (dirigido para a escolha de acções) pode ser descrito com base nas

crenças sobre o presente estado do ambiente, nos *desejos* sobre estados futuros e nas *intenções* que o agente tem para realizar esses desejos. Um exemplo de agente de raciocínio prático é o ARP (no apêndice C).

Gestão de Empenhos. Enquanto que nas arquitecturas CDI o foco está na escolha de acções com vista a resolver situações futuras, importa, ainda assim, saber *como* é que o agente faz essas escolhas. Essa preocupação, em termos das componentes do controlo do agente pode ser expressa pela *gestão dos empenhos*, a ser processada pela vontade deste. Em Coelho & Coelho (2005a) (e também no capítulo 5) propõe-se uma arquitectura, o controlo local e global (CLG), cujo elemento principal é precisamente a computação, pela vontade, de uma disposição que orienta o planeamento de acções imediatas.

Qualidade Predictiva. Além da estrutura de controlo do agente, importa ainda que este disponha de ferramentas que lhe permitam extrair informação do meio em que se encontra. Para tal, será necessário analisar séries temporais. A simples estimativa de médias ou desvios padrões será suficiente em muitos casos, porém perde-se informação sobre a ordem das observações. Por outro lado, a capacidade de previsão tenderá a ser, sempre, uma vantagem. Com vista à aquisição desta mais valia, em Coelho & Coelho (2005e) e no capítulo 4 define-se uma função que mede a qualidade predictiva de séries temporais. Isto é, tal função proporciona um valor (no intervalo $[0, 1]$) que indica quanto ($0 = \text{nada}$, $1 = \text{muito}$) o comportamento da série se presta ao cálculo de previsões.

Antecedentes da Meta Agência. Em Coelho & Coelho (2005d,b,c) é descrita uma experiência, com base nos exploradores de Marte, onde veículos reactivos com o controlo danificado recuperam a sua funcionalidade, graças à intervenção de meta agentes. Esses meta agentes, sensíveis ao desempenho do veículo, alteram a ordem das reacções, que, por sua vez, determina e determinam o controlo deste: Uma reacção que tenha contribuído directamente para melhorar o desempenho será promovida na ordem das reacções enquanto que uma reacção que o tenha degradado será despromovida.

7.2 A Arquitectura MAg

Nesta secção descreve-se a arquitectura de controlo individual MAg (de Meta-Agentes). Posteriormente, na secção 7.3, será desenvolvida de modo a incorporar as ideias de gestão de empenhos da arquitectura CLG. Por enquanto, agora, vai-se determinar, de forma bastante geral, que elementos devem constituir uma arquitectura de controlo baseada em meta agentes,

como esta se relaciona com os sistemas sensorial e motor e como evoluem os estados mentais. A figura 7.1 descreve, resumidamente, o controlo MAg.

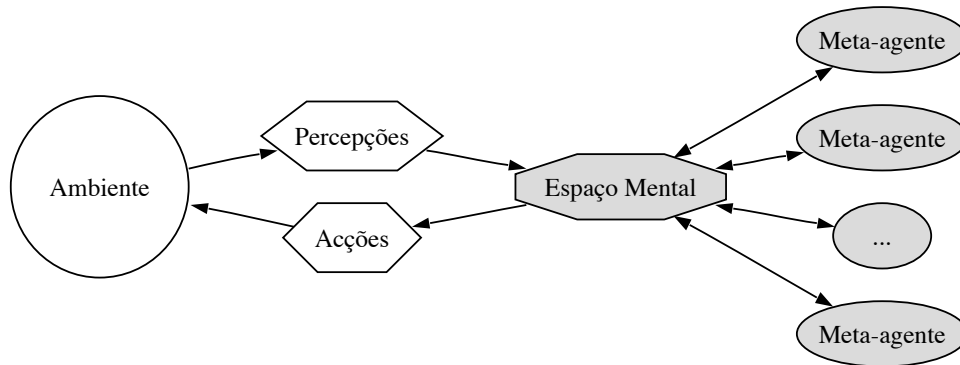


Figura 7.1: Diagrama do controlo MAg.

O controlo MAg é constituído pelas seguintes componentes:

- estados mentais;
- espaço mental;
- meta agentes;
- sistema sensorial e
- sistema motor

Todas estas componentes são dinâmicas, isto é, podem ser descritas por um estado interno que evolui com o tempo. A figura 7.2 ilustra o pseudo-código do controlo MAg. Este é definido por um ciclo interminável, cujos passos correspondem, respectivamente, às seguintes fases:

1. Percepção do ambiente;
2. Meta agência;
3. Acção sobre o ambiente;
4. Manutenção dos estados mentais;

As seguintes subsecções descrevem, em maior detalhe, cada uma destas componentes, também indicadas na figura 7.1, do controlo MAg.

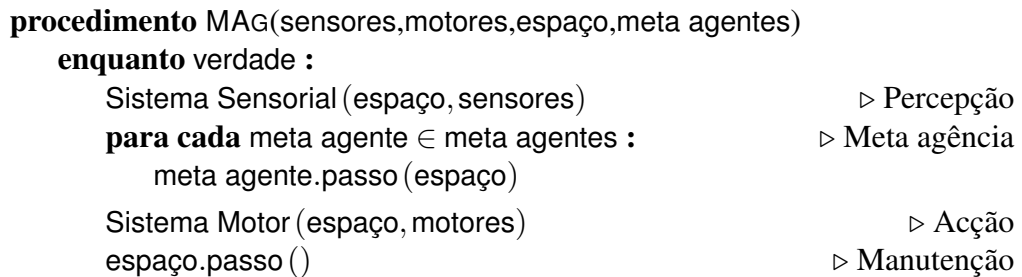


Figura 7.2: Controlo MAg.

7.2.1 Estados Mentais e Espaço Mental

Os elementos mais simples do controlo MAg são os estados mentais. Estes representam a informação que contribui para (o processamento de) o comportamento do agente.

Os estados mentais são divididos em três tipos de persistência, que determina a sua sobrevivência entre ciclos consecutivos:

permanente Um estado mental *permanente* permanece no espaço mental desde o ciclo em que é criado;

temporário Um estado mental *temporário* sobrevive a um ciclo do espaço mental. Isto é, se o estado mental temporário x for criado no momento t , então estará presente no espaço mental apenas durante os ciclos t e $t + 1$;

efémero Um estado mental *efémero* sobrevive apenas durante o ciclo em que é criado. Se o estado mental efémero x for criado no momento t , então no ciclo $t + 1$ já não estará presente.

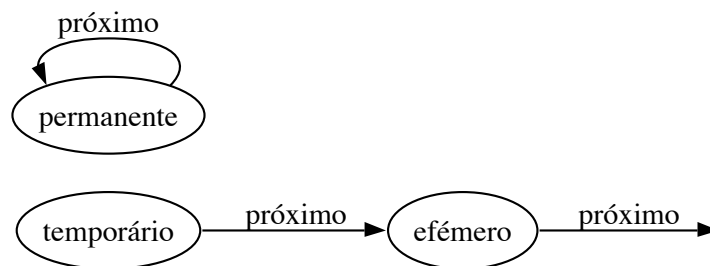


Figura 7.3: Dinâmica dos estados mentais.

A evolução do espaço mental activa a evolução dos seus estados mentais, de acordo com a figura 7.3. Assim, em cada ciclo deste, os estados

mentais efêmeros são eliminados, os temporários passam a efêmeros e os permanentes mantêm-se permanentes.

Esta divisão dos estados mentais não é arbitrária pois resulta da necessidade de criar um mecanismo que permita eliminar os estados mentais irrelevantes, mantendo, enquanto for caso disso, os relevantes.

Além da persistência, cada estado mental tem também um conteúdo. Este será uma *estrutura sintáctica com variáveis*, isto é uma expressão de uma determinada linguagem com vocabulário Σ cujos elementos poderão, arbitrariamente, ser substituídos por variáveis. Por exemplo, convencionando que os elementos de Σ começam por letras minúsculas e as variáveis por maiúsculas, se $\Sigma = \{\text{sobre, mesa, bola}\}$, serão estruturas sintácticas as expressões (tipo ProLog) *mesa, X, sobre(Objecto, bola)* assim como também *mesa(sobre), Relação(bola)* e *X(X)*. Todas estas expressões são, intencionalmente, desprovidas de semântica.

Espaço Mental
-Estados
+novoEfémero(f:Expressão)
+novoTemporário(f:Expressão)
+novoPermanente(f:Expressão)
+padrão(f:Expressão, (X):*Expressão): *Expressão
+padrãoVar(V:*Variáveis, f:Expressão, (X):*Expressão): *Substituição

Figura 7.4: Funções dos espaços mentais.

O espaço mental é o contentor dos estados mentais. Através deste, os meta agentes processam aqueles. Para tal, é necessário que o espaço mental forneça funções ou métodos de pesquisa e criação de estados mentais. Assim, de acordo com a figura 7.4, se ϕ for uma expressão sintáctica:

novoEfémero (ϕ) adiciona um estado mental efémero, com conteúdo ϕ , ao espaço mental;

novoTemporário (ϕ) adiciona um estado mental temporário, com conteúdo ϕ , ao espaço mental;

novoPermanente (ϕ) adiciona um estado mental permanente, com conteúdo ϕ , ao espaço mental;

padrão ($\phi, \langle X \rangle$) é uma cópia de todos os estados mentais que unificam com a expressão ϕ . Se o argumento opcional X for dado, a pesquisa será feita entre os elementos de X , em vez de ser feita, por defeito, entre todos os espaços mentais;

padrãoVar ($V, \phi, \langle X \rangle$) é a lista dos possíveis valores para as variáveis de V para que ϕ unifique com algum estado mental. Se o argumento opcional X for dado, a pesquisa será feita entre os elementos de X , em vez de ser feita, por defeito, entre todos os espaços mentais;

A noção de *unificação* provém da função com o mesmo nome na linguagem ProLog: Duas expressões ϕ e ψ unifica-se pela *atribuição* v se:

1. v é uma transformação de variáveis em expressões;
2. $v(\phi) = v(\psi)$

Por exemplo, expressões que unificam com «sobre (mesa, V1)» serão, entre outras, «sobre (mesa, bola)», «X (V1, mesa)» ou «sobre (V2, V3)» mas não «mesa», «sobre (V1, cadeira)» nem «sobre (mesa)».

O mecanismo de comunicação entre meta agentes baseia-se na estrutura dos estados mentais: Cada meta agente poderá ler, e definir, apenas um certo conjunto de estados mentais. Para que um determinado meta agente A transmita uma determinada informação x ao meta agente B , basta inserir x num estado mental adequado, por exemplo

mensagem_de_A_para_B(x),

efémero ou temporário, conforme B intervém, respectivamente, depois, ou antes de A no ciclo de controlo. Isto é, cada meta agente determina dois protocolos, um de leitura e outro de criação de estados mentais. Esses protocolos delimitam a acção de cada meta agente no espaço mental.

7.2.2 Percepções e Acções

As percepções e acções do agente definem a fronteira entre este e o seu ambiente. Na arquitectura MAG, o sistema sensorial e o sistema motor produzem e lêem certos estados mentais.

Percepções

Supondo que o agente tem um certo conjunto de sensores ligados ao seu ambiente, por exemplo, um GPS, uma câmara vídeo ou um microfone, pretende-se representar, e distinguir, os dados dos fluxos provenientes desses sensores em termos de estados mentais.

Assim, de acordo com o pseudo-código da figura 7.5, cada sentido tem um nome e um valor, podendo este último variar com o tempo. No início

procedimento SISTEMA SENSORIAL(espaço,sensores)

para cada sentido \in sensores :

$x \leftarrow$ sentido.valor ()

espaço.novoEfémero (estado (sentido.nome (x)))

Figura 7.5: Processamento do Sistema Sensorial.

de cada ciclo de controlo, será lido o valor nesse momento de cada sentido (uma posição, uma imagem, um som, *etc.*), que é adicionado ao espaço mental com um estado mental efémero apropriado,

estado (sentido.nome (sentido.valor ())).

Desta forma, se, posteriormente, durante esse ciclo, um meta agente depender do valor de um sentido específico basta-lhe evocar

espaço.padrãoVar ([X], estado (sentido.nome (X)))

e considerar o valor da variável X. Isto é, embora o Sistema Sensorial não seja um meta agente, ainda assim adere ao seguinte protocolo de criação de estados mentais:

{estado}.

Como os estados mentais «estado» são efémeros e criados no início de cada ciclo de controlo, os valores lidos estarão sempre actualizados, aproximando o estado do ambiente. Naturalmente este evoluirá durante o processamento do ciclo de controlo do agente que, se for excessivamente demorado, poderá ocasionar erros significativos.

Acções

O controlo do sistema motor é um pouco mais complexo, uma vez que poderá ser necessário que este forneça um registo do efeito das acções executadas (o que será exemplificado mais à frente). Além disso, também se pretende dotar o agente da capacidade de «acções reflexas», a terem lugar no caso da meta agência não determinar alguma acção.

Convencione-se então que as acções que o Sistema Motor deve executar serão representadas, no espaço mental, por estados mentais com a forma

executar (nome-da-acção ((argumentos-da-acção)))

em que ((argumentos-da-acção)) significa que a acção em causa pode ter,

opcionalmente, um ou vários argumentos. Por exemplo, se algum meta agente determinar que o agente deve deslocar-se para Norte, criará um estado mental efémero

executar(mover(norte)).

Com vista a representar os mecanismos das acções do agente sobre o seu ambiente, suponha-se definida uma função motor (acção) que activa os motores do agente de acordo com a acção indicada. Por exemplo,

motor(mover(norte))

deve deslocar o agente para Norte. Se essa acção for de facto executada, —resultando, neste exemplo, na alteração da posição do agente— o valor de motor(mover(norte)) será sucesso e esse facto ficará registado no estado mental

executado(mover(norte)).

Caso contrário o resultado será registado num estado mental apropriado, por exemplo,

falhou(mover(norte), obstáculo)

de forma a possibilitar uma possível consulta futura, por algum meta agente, sobre os (in)sucessos das acções determinadas no passado.

Por outro lado, o «comportamento reflexo» fica definido por estados mentais da forma

reacção(ordem, estímulo, resposta).

Com o parâmetro ordem é possível hierarquizar a aplicação das reacções. Por exemplo, o controlo dos *exploradores de Marte* ficaria representado pelo conjunto de estados mentais da figura 7.6.

Resumindo, o protocolo de leitura do Sistema Motor inclui

{executar, reacção}

e o de criação limita-se a

{executado, falhou}.

Como, de acordo com a figura 7.2, o processamento das acções pelo sistema motor será o último passo do ciclo de controlo do agente (seguido

reacção (1, obstáculo detectado, mudar de direcção)
 reacção (2, {transporta amostras, na base}, largar amostras)
 reacção (3, transporta amostras, {largar 2 sinais, subir gradiente})
 reacção (4, amostra detectada, recolher amostra)
 reacção (5, sinal detectado, {recolher um sinal, descer gradiente})
 reacção (6, verdade, deslocar ao acaso)

Figura 7.6: Representação de um controlo reactivo no espaço mental.

apenas pela actualização dos estados mentais), os registos que este efectuar no espaço mental devem permanecer até à iteração seguinte, pelo que os estados mentais criados no sistema motor deverão ser de tipo temporário. Na figura 7.7 apresenta-se o pseudo-código do Sistema Motor. Note-se, nessa figura, que o comportamento reactivo (processado nas linhas 10–18) tem em conta:

- a ordem das reacções ($o = \min\{\dots\}$);
- a presença dos estímulos no espaço mental ($E \subset \text{espaço}$);

7.2.3 Meta agentes

Os meta agentes do controlo MAg são, implicitamente, os produtores activos do comportamento do agente. São os meta agentes, através das funções do espaço mental da figura 7.4, que, procurando a existência de determinados estados mentais, introduzem outros.

Num único controlo MAg poderão co-existir vários meta agentes, interagindo no mesmo espaço mental. Por exemplo, um agente jogador de xadrez poderá ter um meta agente que procure situações de cheque, outro que procure duplos, etc.

Uma questão que importa decidir, caso a caso, é se os meta agentes são executados em paralelo ou sequencia. Para alguns casos será importante a ordem de execução: retomando o exemplo do agente jogador de xadrez, os meta agentes que verificam situações de cheque deverão intervir antes dos restantes. Mais importante, pode ainda dar-se o caso do processamento que um determinado meta agente efectua ser condicionado (dependente) pelo resultado de outro meta agente. Por exemplo, no controlo MAg/LG, apresentado a seguir na subsecção 7.2.4, um meta agente processa os estados mentais directamente provenientes do sistema sensorial. Os restantes

```

1: procedimento SISTEMA MOTOR(espaço,motores)
2:   acções ← espaço.padrãoVar ([A,X], executar (A(X)))
3:   se existem acções :           ▷ Comportamento derivado da meta agência
4:     para cada [a,x] ∈ acções :
5:       resultado ← motores (a(x))
6:       se resultado = sucesso :
7:         espaço.novoTemporário (executado (a(x)))
8:       senão:
9:         espaço.novoTemporário (falhou (a(x), resultado))
10:  senão:                               ▷ Comportamento reactivo
11:    reacções ← espaço.padrãoVar ([O,E,R], reacção (O,E,R))
12:    [o,e,r] ∈ reacções : o = min {O : [O,E,R] ∈ reacções ∧ E ⊂ espaço}
13:    para cada a ∈ r :
14:      resultado ← motores (a)
15:      se resultado = sucesso :
16:        espaço.novoTemporário (executado (a))
17:      senão:
18:        espaço.novoTemporário (falhou (a, resultado))

```

Figura 7.7: Processamento do Sistema Motor.

meta agentes dependem dessa intervenção, pelo que, nesse caso, se impõe o processamento sequencial dos meta agentes.

Convencione-se que os meta agentes têm um método,

passo (X),

cujo argumento será o espaço mental que habitam. Esse método define a actividade do meta agente no espaço mental.

7.2.4 O controlo MAg/LG

A arquitectura MAg determina uma estrutura geral para o controlo de agentes autónomos. Tal generalidade deixa ainda livre muitos detalhes sobre os meta agentes. Aqui procura-se construir um exemplo concreto desta arquitectura, inspirado no controlo LG (em Coelho & Coelho (2005a) e no capítulo 5). Resumidamente, o ciclo de controlo LG é constituído pelas seguintes fases:

1. Leitura do Ambiente;
2. Actualização das Crenças;

3. Gestão dos Empenhos;
4. Planeamento;
5. Acções sobre o Ambiente;

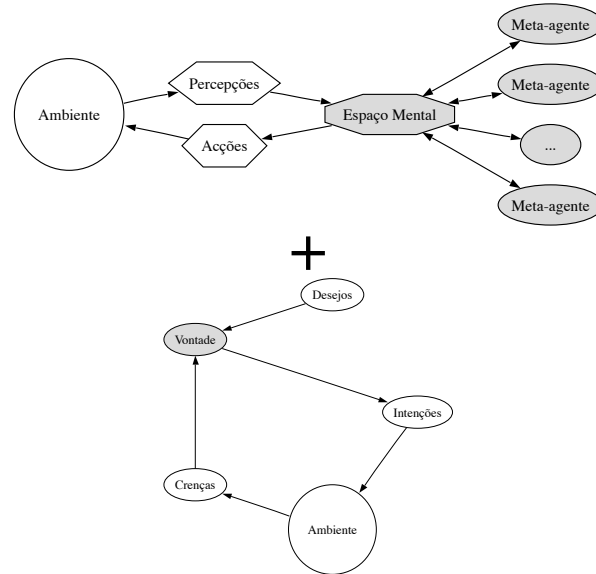


Figura 7.8: Integração do controlo MAG com a vontade.

No controlo MAG a leitura do ambiente é, já, efectuada pelo Sistema Sensorial e as acções sobre o ambiente pelo Sistema Motor. No controlo MAG/LG, as restantes fases serão efectuadas por meta agentes. O diagrama 7.9 é um caso particular de 7.1 quando, de acordo com a figura 7.8, se procura integrar a flexibilidade do controlo baseado em meta agentes com a gestão dos empenhos pela vontade.

Assim, no controlo MAG/LG existem (apenas) três meta agentes, cuja actividade no espaço mental é processada sequencialmente:

Revisor de Crenças Lê os estados mentais com o padrão estado(X) (isto é, o seu protocolo de leitura coincide com o protocolo de criação do Sistema Sensorial) e produz novos estados mentais efémeros, descrevendo apropriadamente o estado actual do ambiente. Por exemplo, se

estado (radar (norte, obstáculo)),

o Revisor de Crenças poderá criar o estado mental efémero

detectado obstáculo.

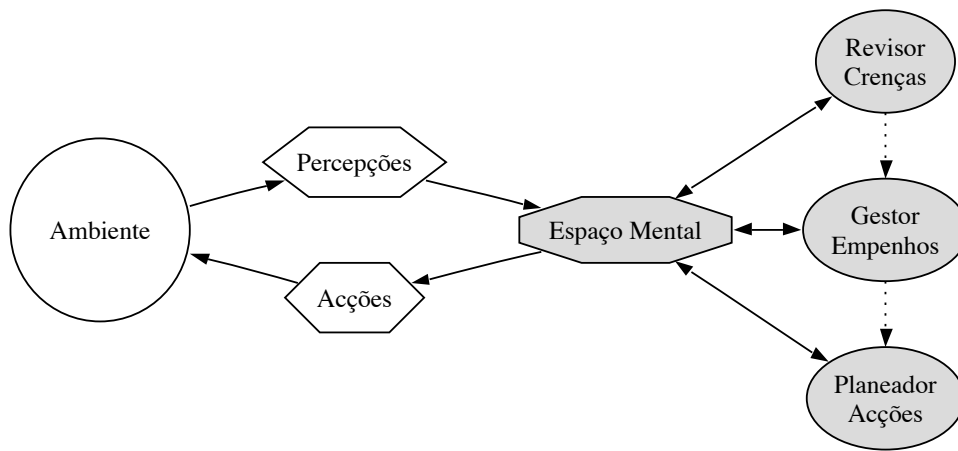


Figura 7.9: Controlo MAg/LG.

O protocolo de criação do Revisor de Crenças dependerá do ambiente do agente contentor e das funções que este último deverá desempenhar.

Gestor de Empenhos De acordo com a arquitectura LG, compete à vontade criar uma disposição adequada a posterior planeamento, com vista à execução de acções e realização de objectivos. Assim, da leitura do espaço mental, o meta agente Vontade criará novos estados mentais efémeros, com os padrões

- disposição crença (X),
- disposição efeito (X),
- disposição objectivo (X)

cujas respectivas funções serão explicadas de seguida, juntamente com o meta agente Planeador. Assim, o protocolo de criação da vontade é o conjunto

{disposição crença, disposição efeito, disposição objectivo}.

O protocolo de leitura da vontade dependerá da aplicação em vista. Poderá conter, por exemplo, o protocolo de criação do Revisor de Crenças, do Sistema Motor (eventualmente para reconsiderar um determinado curso de acção) e do Planeador (para replanear).

Planeador Limitado às disposições determinadas pela Vontade, deve produzir estados mentais com os seguintes padrões

executar ($A \langle (X) \rangle$) efémero

adiado (X) temporário

impossível (X) temporário

Portanto, o protocolo de leitura do Planeador é o protocolo de criação da vontade enquanto que o seu protocolo de criação é

{executar, adiado, impossível}.

Enquanto que os estados mentais do padrão executar ($A \langle (X) \rangle$) serão lidos, e processados, pelo sistema motor, os restantes, adiado (X) e impossível (X), serão, eventualmente, processados na próxima iteração do ciclo de controlo, pela Vontade. Para tal, é necessário que a respectiva persistência seja temporária.

O meta agente Planeador resolve um problema de planeamento típico:

Dada uma *situação inicial* pelas expressões do padrão disposição crença (X), como atingir a *situação final* de disposição objectivo (X) por meio das *acções* descritas por disposição efeito (X)?

procedimento PLANEAMENTO

Criar novas listas de Executáveis, Adiados e Impossíveis

Ler as Crenças, Efeitos e Objectivos da disposição actual

para cada objectivo \in Objectivos :

para cada efeito \in Efeitos :

se efeito.resultado \rightarrow objectivo :

se Crenças \rightarrow efeito.précondição :

Executáveis.acrescenta(efeito.acção)

senão:

Adiados.acrescenta(efeito)

senão:

Impossíveis.acrescenta(objectivo)

Figura 7.10: Processo simples de planeamento.

Sem se pretender resolver em toda a generalidade este tipo de problemas —ficando de fora, por exemplo, conflitos e acumulações de efeitos— é possível definir um agente Planeador simples, de acordo com a figura 7.10,

minimamente competente. Aqui pretende-se somente determinar que acções realizarão *imediatamente* os objectivos propostos. Se algum efeito descrever uma tal acção, então será considerada a sua *pré condição*. No caso das crenças a suportarem, a acção será executada, caso contrário será adiada. Os objectivos não realizáveis serão identificados como *impossíveis*.

7.3 Experimentação

Com a experiência aqui descrita pretende-se, principalmente, ilustrar uma possível integração das componentes controlo, vontade e conhecimento do poder individual anteriormente consideradas nesta tese. Em particular, mostra-se como o controlo do agente por meta agentes pode dar forma à gestão dos empenhos deste pela vontade. Além disso, a construção autónoma de conhecimento sobre o ambiente é, também, ilustrada por meio da qualidade predictiva.

7.3.1 Alterações ao cenário original

De forma a mais facilmente se ilustrar a integração pretendida, alterou-se um pouco o cenário dos *exploradores de Marte* conforme descrito no apêndice B. Aí,

«O objectivo é explorar um planeta distante, mais concretamente, coleccionar amostras de um tipo particular de rochas preciosas. A localização das amostras não é previamente conhecida, mas, tipicamente, encontram-se agrupadas. Está disponível um certo número de veículos autónomos que podem deslocar-se, coleccionando amostras e posteriormente voltar à base para regressar à Terra. Não existe um mapa detalhado embora se saiba que o terreno está coberto de obstáculos que impedem quaisquer comunicações entre os veículos.»

O problema consiste em construir um controlo dos agentes para cada veículo, de modo que estes cooperem na tarefa de recolha de amostras da maneira mais eficiente possível. [...] O controlo dos Exploradores de Marte é então construído da acordo com o algoritmo da tabela B.1 [e também representado na figura 7.6].

Este cenário é alterado nos seguintes aspectos:

1. As amostras têm um tempo de vida limitado;
2. As amostras são produzidas por fontes;

3. As fontes não são detectáveis pelos veículos;
4. A produção em cada fonte depende um parâmetro interno, actualizado pela função logística $x \leftarrow ax(1-x)$. O parâmetro a varia de fonte para fonte;
5. Os sinalizadores também têm vida limitada;
6. Cada veículo pode recolher um número ilimitado de amostras;
7. Os veículos são equipados com um sistema de posicionamento global. Podem registar a posição em que uma amostra é recolhida;
8. Os veículos e a base comunicam por meio de mensagens depositadas. Estas podem ser de dois tipos:
 - Um veículo pode depositar uma mensagem *informativa*, cujo conteúdo é, essencialmente, uma posição. A base pode recolher qualquer mensagem informativa que se encontre na sua vizinhança.
 - A base pode depositar, na sua vizinhança, um mensagem de *comando*, cujo conteúdo é uma *localização*. Um veículo pode recolher qualquer mensagem de comando que se encontre na sua vizinhança.
9. A recolha de amostras passa a ter prioridade sobre regressar à base. Para tal, no controlo dos veículos referência, basta alterar a ordem das reacções, das linhas 6–7 com 8–10, em relação ao pseudo-código apresentado em B.1, ou, alternativamente, na figura 7.6, trocar as ordens das reacções 3 e 4. O pseudo-código que daqui resulta está na figura 7.11.

Além disso, distingue-se *posição* de *localização*. O mapa está dividido numa grelha, digamos $n \times m$, sendo cada *posição* uma coordenada nessa grelha, enquanto que cada *localização* refere-se a um quadrado $k \times k$, k fixo, digamos $k = 8$. Por exemplo, uma grelha 40×32 tem 20 *localizações* de dimensão 8×8 .

Esta distinção é introduzida para, por um lado, compensar o factor aleatório das posições das amostras e, por outro, para diminuir a quantidade de locais em consideração (pela base).

- 1: **procedimento** EXPLORADOR DE MARTE
- 2: **se** obstáculo detectado :
- 3: mudar de direcção
- 4: **senão: se** transporta amostras \wedge na base :
- 5: largar amostras
- 6: **senão: se** amostra detectada :
- 7: recolher amostra
- 8: **senão: se** transporta amostras \wedge \neg na base :
- 9: largar 2 sinais
- 10: subir gradiente
- 11: **senão: se** sinal detectado :
- 12: recolher um sinal
- 13: descer gradiente
- 14: **senão:**
- 15: deslocar ao acaso

Figura 7.11: Os *exploradores de Marte*, modificados.

7.3.2 Objectivo e Plano

Procurou-se usar a meta agência para definir equipas teste que vençam sistematicamente as equipas de referência, estas constituídas pelos veículos reactivos de Steels. O plano para o comportamento da equipa de teste é simples:

1. Os veículos devem registar as posições das amostras recolhidas;
2. Os veículos devem informar a base sobre as posições registadas;
3. A base deve determinar a localização mais favorável;
4. A base deve informar os veículos sobre a localização determinada;

Equipas que sigam este plano deverão, em princípio, ter um desempenho *não pior* do que equipas reactivas, uma vez que, após o cálculo da localização mais favorável, cada veículo que siga o comando da base deverá encontrar mais rapidamente uma amostra do que um veículo de referência: supondo que as fontes renovam as amostras com a frequência suficiente, o desempenho dos veículos de teste deve ser superior ao dos veículos reactivos.

Esta vantagem ficará ainda aumentada em cenários com muitos obstáculos, uma vez que nestes é fácil um veículo reactivo «perder-se» na fase de procura de amostras. Dito de outro modo, em cenários com poucos

obstáculos o conhecimento da localização de amostras é pouco vantajoso, uma vez que o mecanismo dos rastros, empregue pelos veículos reactivos é «suficientemente» eficaz. Mas em cenários com muitos obstáculos, é notório que os veículos referência tendem a «perder-se» facilmente.

7.3.3 Comportamentos

Veículos

Cada veículo teste pode estar num de dois modos de comportamento, conforme a actividade da vontade. No modo *reactivo*, o comportamento é determinado pelo controlo (o mesmo dos veículos referência), da figura 7.11. Isto é, o espaço mental dos veículos contém os seguintes estados mentais permanentes:

- reação (1, obstáculo detectado, mudar de direcção)
- reação (2, {transporta amostras, na base}, largar amostras)
- reação (3, amostra detectada, recolher amostra)
- reação (4, transporta amostras, {largar 2 sinais, subir gradiente})
- reação (5, sinal detectado, {recolher um sinal, descer gradiente})
- reação (6, verdade, deslocar ao acaso)

Figura 7.12: Estados mentais para o modo reactivo dos veículos.

Porém, se um veículo recolher uma mensagem de comando, ou uma amostra, passará para o modo *objectivo*, que consiste, respectivamente, em tentar atingir uma posição dentro da localização especificada pela mensagem recolhida ou notificar a base sobre a posição da amostra recolhida.

É principalmente a vontade que determina a mudança do modo de comportamento. Se esta determinar uma disposição, e se, adicionalmente, o Planeador a resolver num conjunto de acções, então o Sistema Motor (tentará) executá-las, de forma a realizar os objectivos da disposição. Caso contrário, se a vontade não determinar uma disposição, ou o Planeador acções, então o Sistema Motor recorrerá às reacções.

A figura 7.13 ilustra o diagrama de controlo da vontade dos veículos teste. Note-se que

1. É possível não ser criada alguma disposição;
2. O processamento pode ser estendido por vários ciclos de controlo.

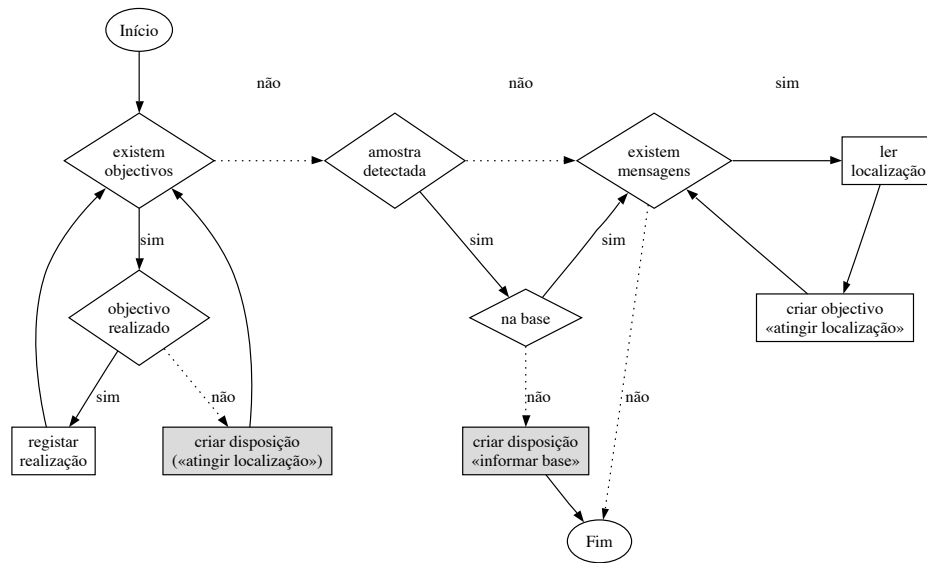


Figura 7.13: Fluxograma da vontade dos veículos teste.

Por exemplo, se for criado o objectivo «atingir localização (1, 1)» na iteração t , só em $t + 1$ é que esse objectivo dará início a uma disposição.

A parte reactiva do controlo dos veículos é definida pelas seguintes regras adicionais (em relação àquelas definidas na figura 7.12):

- quando uma amostra é recolhida, o veículo regista a sua posição presente e o tempo decorrido desde que realizou o seu último objectivo.
- quando está na base, além de depositar as amostras recolhidas, também deposita as mensagens informativas que entretanto formulou;
- ainda na base, recolhe eventuais mensagens de comando que estejam na sua vizinhança

Esta proposta de controlo visa ilustrar exemplos simples de:

1. como a vontade pode fazer a gestão dos empenhos;
2. integração, no controlo MAg/LG, entre comportamentos reactivos e deliberativos;
3. processamento da deliberação ao longo de vários ciclos;

Base

Por sua vez a base processa a informação recebida sobre a localização das amostras recolhidas pelos veículos. Das séries temporais derivadas dos intervalos de tempo (que cada veículo registou na mensagem informativa) selecciona a localização com maior *qualidade predictiva*. Então, sempre que detecta um veículo na sua vizinhança, antes de recolher as amostras e novas mensagens informativas, deposita uma mensagem de comando, indicando esta para que localização se deve dirigir esse veículo.

Para realizar este comportamento, é suficiente dotar a base de um esquema de controlo reactivo pois não há necessidade de considerações sobre objectivos, acções, condições ou efeitos.

7.3.4 Observação

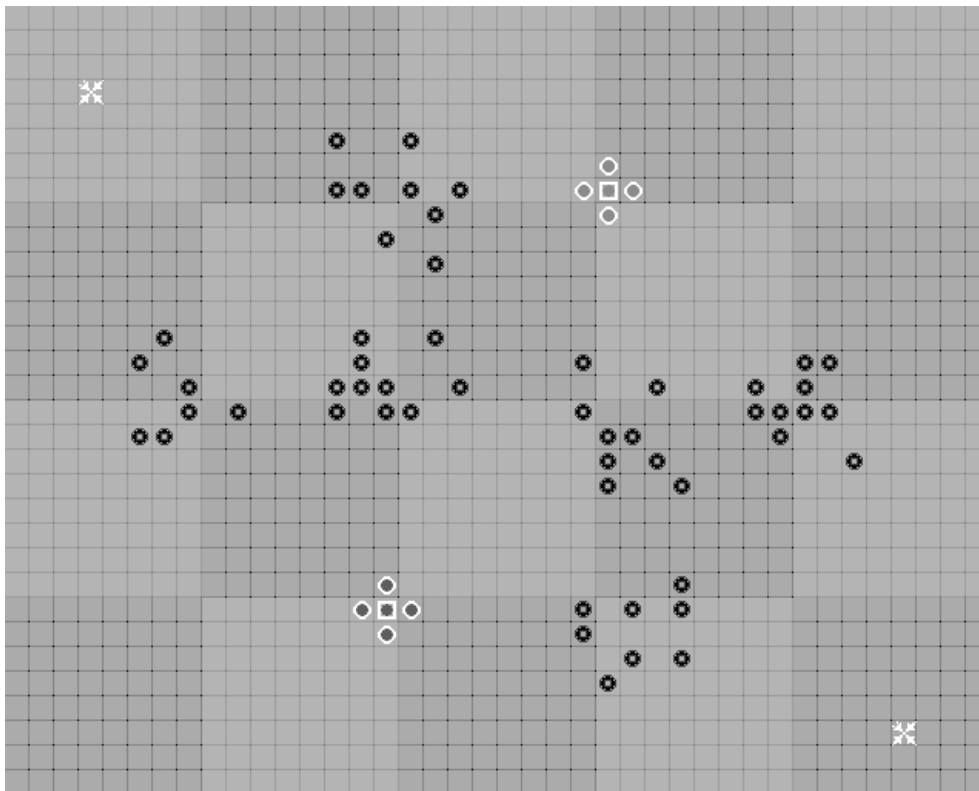


Figura 7.14: Configuração inicial do cenário das experiências.

Objectivo. Saber se as equipas teste têm melhor desempenho do que as referências. Isto é, se, em competição no mesmo cenário, recolhem mais

amostras.

Configuração da Experiência. Na figura 7.14 mostra-se o cenário das experiências, no instante inicial. Resumidamente, este é composto por uma grelha de 40×32 posições, duas fontes —de forma «X»— na vizinhança dos pontos (4, 4) e (37, 29), 60 obstáculos —os «O» escuros— colocados ao acaso nas vizinhanças das linhas medianas da grelha e duas equipas, uma de referência, cujo controlo dos veículos é definido pelo pseudo-código de B.1 e outra de teste, com os controlos da base —quadrados claros— e dos veículos —«O» claros— descritos na secção anterior. A posição da base referência é (16, 25) e da base teste (25, 8). Cada equipa tem 4 veículos, inicialmente numa vizinhança da respectiva base.

Observação. Este cenário foi simulado 30 vezes, cada vez durante 2000 ciclos. Registou-se apenas o «número de amostras recolhidas» de cada equipa. Finalmente, o gráfico da figura 7.15 é obtido computando as médias de cada população. Para cada instante, dos 2000 ciclos, (no eixo horizontal) é calculada a média, em cada equipa, do «número de amostras recolhidas».

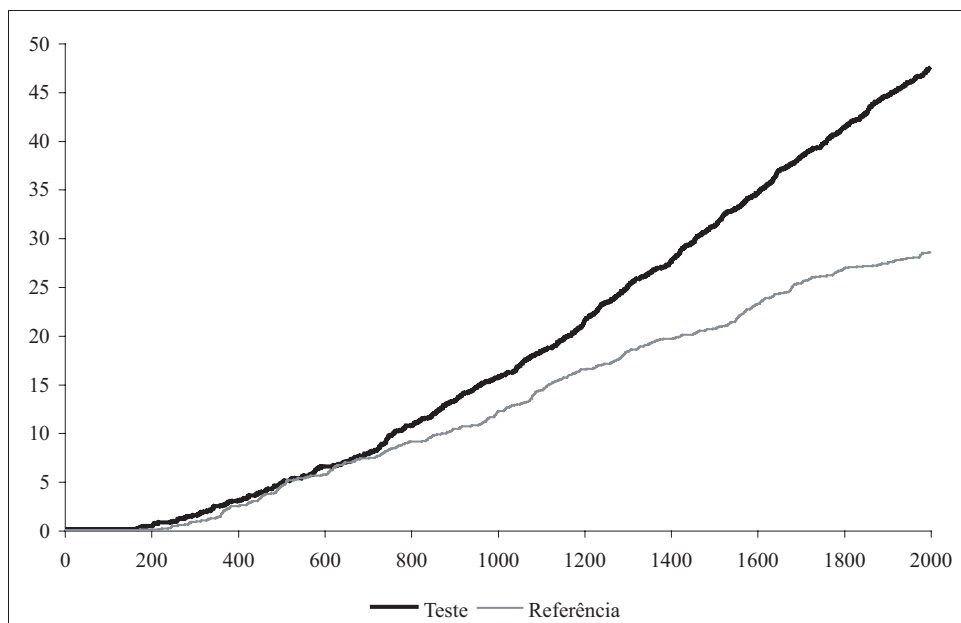


Figura 7.15: *Comparação de Desempenhos.* Médias de amostras recolhidas (vertical) durante 2000 instantes (horizontal).

Inferência. Claramente, de acordo com o gráfico 7.15, as equipas teste superam, em desempenho, as referências. Perto do instante 2000 o número

de amostras recolhidas pelas equipas teste é, sensivelmente, o dobro das amostras recolhidas pelas outras equipas.

No entanto, nesse gráfico, pode observar-se um outro fenómeno: Os desempenhos de ambas as equipas são aproximadamente iguais (num exercício de análise estatística, poder-se-ia fazer um teste à hipótese de serem iguais) até um pouco antes do instante 800. Só desse momento para o futuro é que os dois comportamentos levam a desempenhos diferentes. *Porquê?* A explicação pode ser dupla:

1. A computação da *localização* mais favorável, pela base, depende de esta ter recolhido um número mínimo de mensagens *informativas*, trazidas pelos veículos. Enquanto esse limiar não for atingido, os veículos não recebem mensagens de *comando*. Portanto, até aí, usam apenas os mesmos mecanismos de pesquisa de amostras que os veículos de referência. Porém, assim que a base teste determina uma *localização* favorável (das 20 possíveis), os respectivos veículos passam a dirigir-se para essa *localização* e, conseqüentemente, a encontrar mais facilmente as amostras;
2. Os agentes da equipa teste têm maior poder individual do que os da referência. Nos primeiros os empenhos são administrados pela vontade. Além disso, constroem autonomamente conhecimento sobre o ambiente em que se encontram, o que lhes permite (enquanto equipa) tirar maior proveito deste, numa sinergia de contributos

poder individual → cooperação → poder individual

em que o indivíduo beneficia do seu contributo para o grupo;

7.4 Conclusão

Esta experiência permitiu, sobretudo, ilustrar uma integração e aplicação (se bem que virtual) dos contributos anteriores. O controlo baseado em meta agentes e estados mentais provou ser capaz de produzir comportamentos minimamente eficazes e flexíveis. A vontade, por centralizar a gestão dos empenhos dos veículos teste, facilitou significativamente a implementação (e interpretação) desses comportamentos. Finalmente, com a qualidade predictiva foi possível identificar localizações favoráveis, o que permitiu a adaptação autónoma da equipa teste ao seu ambiente.

7.4.1 Trabalho Futuro

A tarefa de construir esta experiência permitiu identificar vários aspectos a melhorar, compreender melhor, ou a acrescentar.

Implementação. O espaço mental foi implementado como uma lista de estados mentais. Porém, no cerne dos controlos MAG será necessário considerar inúmeras vezes *todos* os estados mentais. Este será, então, um ponto a otimizar. Uma possibilidade para tal será em manter os estados mentais numa floresta de árvores sintácticas. Por exemplo, em vez da estrutura de dados do espaço mental ser, como no lado esquerdo da figura 7.16, uma lista de expressões sintácticas, pode ser, como no lado direito, uma lista de árvores. Desta forma, não só o espaço ocupado pelo espaço mental seria menor, como também mais rápida a pesquisa de certos padrões de estados mentais.

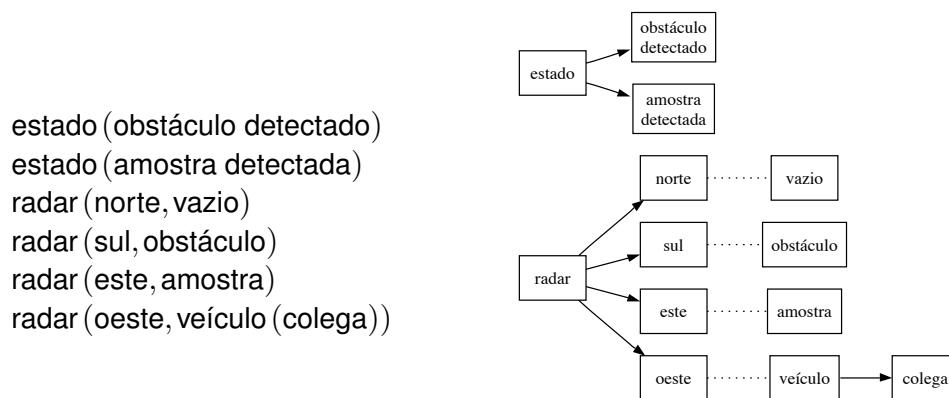


Figura 7.16: Estruturas de dados do espaço mental: lista *versus* floresta.

Atributos adicionais dos estados mentais. A definição de cada estado mental poderá ser complementada com parâmetros, como, por exemplo, intensidade, importância, urgência, *etc* (a este propósito veja-se o trabalho de Corrêa & Coelho (1998)). Estes influenciariam a dinâmica dos estados mentais, na figura 7.3 e, eventualmente, serviram de indicadores para as actividades dos meta agentes, incluindo, naturalmente, a vontade.

Vontade. Sobre a gestão dos objectivos, seria cómodo, para quem desenha gestão dos empenhos, poder usufruir de ferramentas que facilitassem:

activações para começar um comportamento tendo em vista a realização de um dado objectivo;

suspensões para interromper um comportamento associado a um objectivo, porém mantendo presente esse objectivo;

eliminações para interromper um comportamento associado a um objectivo, eliminando também esse objectivo.

Aprendizagem. A aprendizagem, e consequente adaptação autónoma do agente ao seu ambiente, será, certamente, uma das características que mais influenciará o poder individual deste. Sobre este assunto há já imenso trabalho realizado, sobre o qual se poderá consultar, por exemplo, a obra de Russell & Norvig (2003). A meta agência poderá suportar várias abordagens à aprendizagem. A título de exemplo, através de

- operações de estados mentais

abstracção Dado um conjunto de estados mentais, escolher definir um outro, que os generalize. Por exemplo, de radar (norte, alvo) e radar (sul, alvo) abstrair radar (X, alvo);

particularização O contrário da operação anterior. Continuando o exemplo dado, particularizar radar (X, alvo) em radar (oeste, alvo);

sequencialização Construir estados mentais que indiquem que outros estados mentais ocorreram (cronologicamente) em sequência, digamos

sequência (executar (largar caixa) , estado (caixa danificada)) ;

sincronização Construir estados mentais que indiquem que outros estados mentais ocorreram (cronologicamente) síncronos, digamos

síncronos (executar (largar caixa) , estado (segurando caixa)) ;

- e de meta agentes que executem essas operações

evidenciadores de estados mentais. Seriam meta agentes sensíveis a certas características dos estados mentais que, na presença destas características alterariam certos atributos daqueles. Por exemplo, um meta agente sensível a veículos adversários aumentaria o atributo importância do estado mental

radar (norte, veículo (adversário)) .

associadores seriam meta agentes que construiriam associações entre estados mentais. Por exemplo, um meta agente atento ao estado das caixas poderia usar as operações de sequencialização ou sincronização para construir conhecimento relativo a estas.

8

Conclusões

A motivação para estudar o poder individual, ou seja a capacidade de intervenção (acção directa) surge da constatação de que cada indivíduo tem um potencial para influenciar significativamente o futuro da sua sociedade, ainda que esta seja rigidamente estruturante.

A ideia do poder surge com frequência na Filosofia Política e na Psicologia Social, áreas disciplinares que foram invadidas com frequência ao longo da nossa investigação. A primeira referência (Negri (1993)) levou-nos para o terreno da Filosofia e para uma ideia de Espinoza, do desenvolvimento espontâneo das forças, ou seja para a não necessidade da mediação de um poder. Ora, a geração de força é quase sempre virtual na Informática, onde a maioria dos agentes opera sob comando e sem espontaneidade, obedecendo a uma espécie de contrato jurídico. Na Inteligência Artificial Distribuída o conhecimento e o pensamento surgem interligados, não sendo ainda popular olhar para a iniciativa e querer dos agentes, sob pena deles nos dominarem no futuro.

A sociedade política não é uma ordem imposta do exterior aos desejos individuais, mas a resultante quase mecânica das interacções entre as potências individuais que, ao se comporem, formam uma potência colectiva. E, aqui descortinamos imediatamente o enorme interesse desta problemática para abordar a complexidade das situações, nomeadamente na área da Simulação Social, com agentes artificiais capazes de possuírem uma mentalidade heterogénea, alguma autonomia, e um enorme querer (vontade) de transformarem o mundo que os rodeia, em contraponto com o estatuto actual da intervenção técnica e científica, marcada por agentes muito simples, reactivos, homogéneos e sem qualquer autonomia. Espinoza teve também o mérito de ter reflectido, no século XVII, sobre o papel da vontade no interior da mentalidade, algo que nos nossos dias parece ainda bizarro, pois mesmo no caso dos agentes deliberativos (tipo CDI) a sua intervenção apoia-se num raciocínio prático, construído com análises do tipo meios-fins, e virados apenas para o futuro. E, a acção directa,

imediate, do agente?

Na introdução argumenta-se que, presentemente, a única abordagem possível ao poder individual implica uma metodologia experimental, hoje também muito popular nas Ciências da Computação. De acordo com essa posição define-se e aplica-se uma metodologia de validação empírica, composta por três componentes essenciais:

- modelos virtuais,
- variáveis de observação e
- técnicas de análise estatística.

Essa metodologia experimental tem incidência central ao longo deste trabalho (excepto no 5º capítulo): Cada contribuição é ilustrada e sustentada por meio de uma ou várias experiências, cujos dados resultantes são observados e analisados para depois induzirem conjecturas empiricamente validadas.

A investigação sobre o poder individual seguiu um percurso disperso por várias possíveis abordagens ao tema. Outros percursos, mais dirigidos, seriam possíveis, se houvesse desde o início a informação e a perspectiva agora acumulada. Não foi esse o caso. Neste aspecto, poder-se-á afirmar que é um trabalho pioneiro, que nos levou a em becos sem saída, e à reformulação de definições, abordagens e técnicas. Dessas vias fracassadas não se faz aqui mais do que esta curta referência.

Os contributos aqui presentes estão, ainda, em estado bruto. Agora, a definir o tema, dir-se-ia que o estudo do poder individual será

a investigação dos processos e factores internos e métricas de desempenho, avaliadoras dos comportamentos individuais, de agentes que, com recursos limitados, autonomamente ultrapassam situações postas por ambientes dinâmicos e incertos.

De forma geral contribuiu-se com a identificação e exploração de alguns factores: o conhecimento, a vontade e o controlo, infelizmente articulados raramente na Informática e na Inteligência Artificial. E, talvez com outro alcance, os fundamentos para a distinção entre «factores externos» e «internos», foram esboçados distinguindo a assinatura da semântica na função $Ag : Per \rightarrow Ac$.

A ideia da vontade permite decompor e reconstruir o comportamento destes indivíduos. Recorrendo à noção de meta agência e ao espaço dos estados mentais concebemos um mecanismo de controlo flexível. Por fim,

a qualidade predictiva permite dotar os agentes de uma ferramenta de construção de conhecimento, para o apoio à decisão.

A «Experiência de Integração», no capítulo 7, articulou os cursos independentes desta investigação. Assim, mostrámos que podemos fazer agentes com comportamentos (minimamente) flexíveis, organizados a partir da sua vontade individual, confiantes no conhecimento autonomamente adquirido, sobre o seu ambiente, pela qualidade predictiva. Pelo menos, em cenários virtuais.

8.1 Trabalho Futuro

Identificámos localmente, no fim dos capítulos anteriores, possíveis desenvolvimentos importantes, ou interessantes, para o respectivo contributo. Pouco sentido faria repeti-los aqui, fora do contexto motivador. Agora abordamos o que ainda falta para atacar sistemas complexos, cujos componentes necessitam de manipular comportamentos não triviais. Os alvos deste género de aplicações têm características sociais e exigem agentes com atributos de actuação, onde as mentalidades desempenham um papel importante na geração de padrões específicos de comportamentos.

É preciso passar do laboratório virtual para as aplicações reais. Os programas informáticos desenvolvidos para esta investigação são simples «protótipos». Não prestam, portanto, as garantias mínimas de robustez e desempenho necessárias para os cenários «reais». Assim, um primeiro passo na direcção da aplicação do poder individual «ao mundo» será a construção dos controlos MAg e MAg/LG, e toda a infra-estrutura implícita, numa plataforma informática adequada. Destacam-se dois possíveis candidatos: O sistema Jade —*Java Agent DEvelopment Framework*— (ver, por exemplo, Chmiel *et al.* (2005)) conforme às especificação da FIPA, para aplicações «industriais», e o ambiente RePast —*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*—, (ver Tobias & Hofmann (2003)) desenvolvido a partir do pioneiro Swarm, vocacionado para a investigação das interacções em sociedades multi-agente.

Uma vez suportados por ambientes sólidos e apropriados, os agentes controlados por meta agentes e estados mentais, com vontade e capazes de interpretar o seu ambiente, poderão, eventualmente, assumir diversas tarefas. Algumas de carácter mais prático, como por exemplo: exploração (em geral, de territórios hostis à presença humana prolongada), vigilância (de recursos vitais), acompanhamento (de pessoas debilitadas). Outras tarefas serão de natureza virtual. A simulação computacional (social e política) é hoje em dia deveras importante para o apoio à decisão na área dos

negócios, sendo também uma arma privilegiada na construção de estratégias para as organizações em geral.

O nosso objectivo de pesquisa centrou-se em atributos dos agentes —menos frequentemente discutidos na literatura mas— relevantes para a feitura de (complexas) instalações computacionais. A nossa experiência ajudou-nos também a compreender que tais propriedades exigem um novo tipo de instrumentos, além das linguagens e dos ambientes de programação. A necessidade da experimentação obriga-nos a ser precisos na medição dos dados para justificar as nossas intuições, e a escolha acertada dos parâmetros é fundamental para que estas se destaquem do ruído de fundo e para convenceremos a comunidade científica sobre a validade das nossas escolhas e propostas com base nos dados obtidos nas experiências realizadas.

Modelar e construir agentes que apresentam comportamentos, parecidos com os dos actores numa peça de teatro, ajuda a desenhar cenários e guiões mais avançados, cujo objectivo é experimentar e testar conjecturas pertinentes na simulação social. A presente investigação revelou traços de carácter dos agentes-actores, difíceis de obter, e também capacidades (ferramentas) capazes de tornarem esses exercícios mais fáceis de engendrar.

Ao longo do texto não precisámos os ambientes de programação (oficinas) que fomos obrigados a desenvolver, nem o esforço que dedicámos a essa tarefa complementar, mas é justo, neste enquadramento sobre a continuação do trabalho, referir que há ainda muito a fazer para que este género de oficinas possa responder rapidamente a um espectro variado de desafios derivados dos problemas reais. Por exemplo, a implementação dos estados e espaços mentais obrigou-nos a desenvolver uma proto-linguagem para a lógica de primeira ordem, inspirada, por um lado, no ProLog para a unificação de variáveis e, por outro, no LisP para a representação de estruturas de dados. Foi também necessário fazer um sistema dedutivo rudimentar, capaz de processar algumas regras simples relativas, por exemplo, às conectivas \wedge (conjunção) e \vee (disjunção). Já a negação (\neg) levanta problemas extremamente difíceis de lidar. Os próprios sistemas de simulação e representação gráfica foram feitos (várias vezes) de raiz: a flexibilidade necessária para testar rapidamente uma ideia é, ainda, incompatível com as ferramentas disponíveis. Quase sempre, preferimos investir na implementação das ferramentas em vez de arriscar usar uma bancada existente para mais tarde descobrir que esta impõe severas limitações (como aconteceu, por exemplo, com a bancada NetLogo).

Porém, nem só das experiências e aplicações vive a investigação. Quere-se compreender mais e melhor, com explicações mais simples e/ou abrangentes. Assim sendo, tem de se perguntar em que é que a emergência e

colapso do poder individual contribui, ou poderá vir a contribuir, para uma compreensão mais aprofundada do comportamento e desempenho individual, num programa para a realização da inteligência geral.

Propomos que esta questão seja abordada com o desenvolvimento de *projectos de investigação* que criem nexos e mais valias entre elementos da investigação já feita sobre o poder individual e outros contributos na inteligência artificial e sistemas multi agente. Por exemplo:

1. Estados mentais + Redes neuronais: Procura-se trazer para o controlo MAG contributos do modelo conectivista (ver Marcus (2001), Hebb (1949), McCulloch & Pitts (1943)). Tal será possível se os estados mentais forem estendidos com atributos que representem as activações e pesos entre neurónios (figura 8.1). Levantam-se então algumas questões sobre a integração destes dois modos de representar informação: Como relacionar a informação representada na rede com os conteúdos dos estados mentais? Imagine-se uma rede que ligue (estados mentais com) os conteúdos verruga no nariz, gato preto e vassoura voadora. Deverá ser criado um estado mental que os junte numa representação conjunta? E, reciprocamente, se um estado mental tiver (digamos) o conteúdo (bruxa, vassoura, gato preto, verruga), em que circunstâncias as componentes deste deverão ser separadas em conteúdos ligados por uma rede?

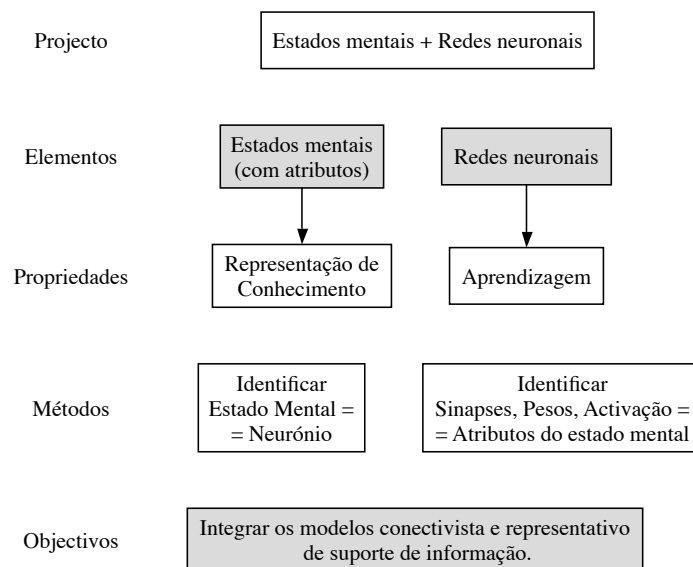


Figura 8.1: Projecto estados mentais+redes neuronais.

2. Meta agência + Deliberação colectiva: A meta agência postula uma sociedade de meta agentes com o fim de definir o comportamento do agente externo. Nas aplicações que mostrámos, a interacção entre os meta agentes é relativamente simples. Porém poderão ser consideradas relações mais sofisticadas: Os meta agentes podem competir ou cooperar entre si por uma determinada função (por exemplo, vários revisores parciais poderão formar equipas de actualização das crenças, cooperando dentro de cada equipa e competindo com revisores parciais de outras equipas). Procura-se desta forma que a sociedade dos meta agentes contribua para o poder individual do agente externo, adaptando a sua estrutura de grupo às situações enquanto estas decorrem. Este projecto (ver também a figura 8.2) leva-nos significativamente perto da sociedade da mente de Minsky (1985).

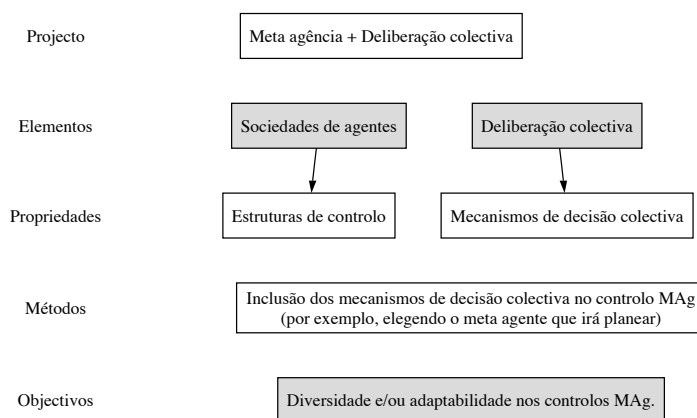


Figura 8.2: Projecto Meta agência + Deliberação colectiva.

3. Caracter e Comportamentos padrão: O modelo GDI descreve, parcialmente, o comportamento (do agente) com base nas crenças, desejos e intenções deste. Embora, conforme argumentámos, esta descrição seja incompleta, com a coordenação dos empenhos pela vontade será mais acessível determinar «traços de carácter». Estes seriam «modos padrão» de gerir os empenhos: teimosia, curiosidade, coragem, *etc.* (ver a figura 8.3). Uma das principais vantagens destes «comportamentos padrão» será a naturalidade que, com base neles, se poderão desenhar e depurar comportamentos de um nível de complexidade superior.

Outros projectos, para diferentes programas, poderiam ter sido propostos. Não considerámos, por exemplo, qualquer participação ex-

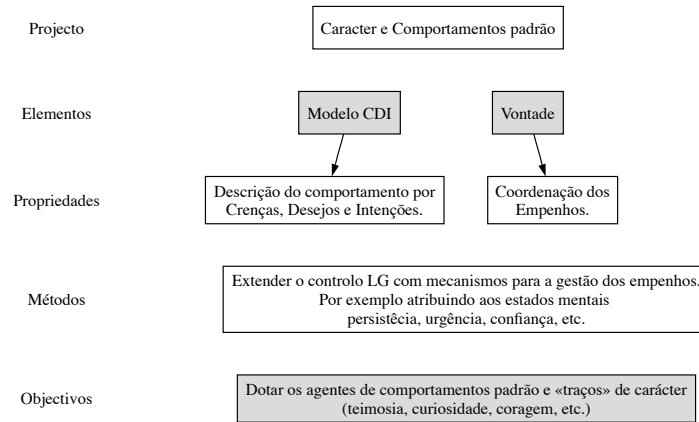


Figura 8.3: Projecto Carácter e Comportamentos padrão.

plícita da qualidade predictiva. Nem, tão pouco, considerámos outras orientações programáticas. Poderíamos, digamos, insistir numa vertente mais «aplicada», e perseguir um programa de construção de uma equipa para o Robot Soccer. Ou, então, tentar uma *matematização* com o objectivo de construir uma teoria dedutiva, onde as validações empíricas seriam substituídas por demonstrações. Enquanto que um percurso centrado nos aspectos «práticos» corre o risco de perder uma visão geral, abrangente e integrante, também, por outro lado, uma teorização «desligada do mundo» corre o risco de se referir apenas a nada.

Acreditamos que os projectos sugeridos, no quadro de um programa cujo prémio seria a feitura de uma inteligência geral em agentes com poder, se situam perto do meio termo virtuoso, entre as contingências do possível e o alcance do abstracto.

Bibliografia

- ALI, SYED MUHAMMAD, KOENING, SVEN, & TAMBE, MILIND. 2005. Pre-processing Techniques for Accelerating the DCOP Algorithm ADOPT. *Em: Autonomous Agents and Multiagent Systems*.
- ANTUNES, LUÍS, FARIA, JOÃO, & COELHO, HELDER. 2003. Utility in interacting markets, a position paper. *Em: Proceedings of RASTA'03*.
- AXELROD, ROBERT. 1984. *The Evolution of Cooperation*. New York: Basic Books, Inc.
- AXELROD, ROBERT. 1986. An Evolutionary Approach to Norms. *American Political Science Review* 80, no. 4, 1095–1111.
- BODDY, M. S. 2003. Imperfect Match: PDDL 2.1 and Real Applications. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 20, 133–137.
- BRATMAN, MICHAEL E. 1987. *Intention, Plans, and Practical Reason*. Cambridge: Harvard University Press.
- BRATMAN, MICHAEL E. 1990. What is Intention? *Em: COHEN, P. R., MORGAN, J. L., & POLLACK, M. (eds), Intentions in Communication*. The MIT Press.
- BROOKS, RODNEY A. 1991. Intelligence Without Representation. *Artificial Intelligence*, 47(1–3), 139–159.
- CALDAS, JOSÉ CASTRO, & COELHO, HELDER. 1999a. Choice and Institutions in Agent Societies. *Em: Lecture Notes in AI 1695*. Springer-Verlag.
- CALDAS, JOSÉ CASTRO, & COELHO, HELDER. 1999b. The Origin of Institutions: Socio-Economic Processes, Choice, Norms and Conventions. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2(2).

- CALDAS, JOSÉ CASTRO, & COELHO, HELDER. 2000. The Interplay of Power on the Horizon. *Em: Proceedings of the II International Conference on Computer Simulation and the Social Sciences*.
- CASTELFRANCHI, CRISTIANO. 1989. Social Power: A Point Missed in Multi-Agent, DAI and HCI. *Páginas 49–62 de: DEMAZEAU, YVES, & MÜLLER, JEAN-PIERRE (eds), Decentralized A.I.* North-Holland.
- CASTELFRANCHI, CRISTIANO. 2000a. All I Understand About Power (and Something More). *Em: Proceedings of the 2nd SARA workshop*.
- CASTELFRANCHI, CRISTIANO. 2000b. Engineering Social Order. *Páginas 1–18 de: OMICINI, A., TOLKSDORF, R., & ZAMBONELLI, F. (eds), Engineering Societies in the Agents World*. Springer.
- CASTELFRANCHI, CRISTIANO. 2003. The Micro-Macro Constitution of Power. *CNR Working Paper*.
- CASTELFRANCHI, CRISTIANO. (in press). *Realism in action - Essays in the Philosophy of Social Sciences*. Dordrecht: Kluwer. Cap. Grounding We - Intentions in Individual Social Attitudes.
- CASTELFRANCHI, CRISTIANO, DIGNUM, FRANK, JONKER, CATHOLIJN M., & TREUR, JAN. 2000. Deliberate Normative Agents: Principles and Architecture. *Páginas 364–378 de: JENNINGS, NICHOLAS R., & LESPÉRANCE, YVES (eds), ATAL. Lecture Notes in Computer Science, vol. Intelligent Agents VI, Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL), 6th International Workshop*. Springer.
- CASTELLAA, JEAN-CHRISTOPHE, BOISSAUA, STANISLAS, TRUNGC, TRAN NGOC, & QUANGC, DANG DINH. 2005. Agrarian transition and lowland–upland interactions in mountain areas in northern Vietnam: application of a multi-agent simulation model. *Agricultural Systems*, **86**(3), 312–332.
- CHMIEL, KRZYSZTOF, GAWINECKI, MACIEJ, KACZMAREK, PAWEL, SZYMCZAK, MICHAL, & PAPRZYCKI, MARCIN. 2005. Efficiency of JADE Agent Platform. *Em: Scientific Programming*.
- COELHO, FRANCISCO, & COELHO, HELDER. 2003. Towards Individual Power Design. *Páginas 366–378 de: MOURA PIRES, FERNANDO, & ABREU, SALVADOR (eds), Progress in Artificial Intelligence. Lecture Notes on AI, vol. 2902* Springer, para EPIA 2003.

- COELHO, FRANCISCO, & COELHO, HELDER. 2005a (October). An Agent Architecture to Handle Commitment. *Páginas 87–94 de: BRIANO, CHIARA, FRYDMAN, CLAUDIA, GUASCH, ANTONIO, & PIERA, MIQUEL ANGEL (eds), International Mediterranean Modeling Multiconference*, vol. European Modeling Simulation Symposium.
- COELHO, FRANCISCO, & COELHO, HELDER. 2005b (October). An Application of Meta-Agency and Individual-Power, recovering reactive agents. *Páginas 1–9 de: BARROS, FERNANDO, BRUZZONE, AGOSTINO, FRYDMAN, CLAUDIA, & GIAMBIASI, NORBERT (eds), International Mediterranean Multiconference*, vol. Conceptual Modeling and Simulation Conference.
- COELHO, FRANCISCO, & COELHO, HELDER. 2005c (December). Discussing Agent Power-Of by experimentation. *Em: Proceedings of MASTA/EPIA05*.
- COELHO, FRANCISCO, & COELHO, HELDER. 2005d (September). Meta-Agency and Individual-Power, an experimental approach. *Páginas 414–420 de: SKOWRON, ADRZEJ, BARTHES, JEAN-PAUL, & RON SUN, LAKHMI JAIN (eds), IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*.
- COELHO, FRANCISCO, & COELHO, HELDER. 2005e (July). Predictability for Autonomous Decision Support. *Páginas 79–89 de: ANTUNES, LUÍS, & SICHMAN, JAIME JOÃO (eds), Proceedings of the 6th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation*.
- COELHO, HELDER. 1995. *Inteligência Artificial em 25 Lições*. Série de Manuais Universitários. Fundação Calouste Gulbenkian.
- COELHO, HELDER. 1999. *Sonho e Razão, Ao Lado do Artificial, Reflexões Pessoais sobre os Agentes Inteligentes*. Relógio d'Água.
- COELHO, HELDER. 2004. *Explorações, Ligações e Reflexões (Rede de 30 anos de pesquisas em IA com sentido prático)*. Série de Manuais Universitários. Fundação Calouste Gulbenkian.
- COELHO, HELDER, & PAIVA, ANA. 1998. *Introdução à Inteligência Artificial*. Edição dos Autores.
- COHEN, P. R., & LEVESQUE, H. J. 1990. Intention is choice with commitment. *Artificial Intelligence*, **42**, 213–261.

- COLMERAUER, ALAIN, & ROUSSEL, PHILIPPE. 1996. The birth of Prolog. *Em: BERGIN, THOMAS J., & GIBSON, RICHARD G. (eds), History of Programming Languages*. ACM Press/Addison-Wesley.
- CONTE, ROSARIA. 2001. Emergent (info) Institutions. *Journal of Cognitive Systems Research*, **2**, 97–110.
- CONTE, ROSARIA, & CASTELFRANCHI, CRISTIANO. 1995. *Cognitive and Social Action*. University College of London Press.
- CORRÊA, MILTON, & COELHO, HELDER. 1998. From Mental States and Architectures to Agents Programming. *Páginas 64–75 de: Progress in Artificial Intelligence*. Lecture Notes on AI, vol. 1484Springer-Verlag Inc., para IBERAMIA98.
- CORRÊA, MILTON, & COELHO, HELDER. 2004. Collective Mental States in an Extended Mental States Framework. *Em: International Conference on Collective Intentionality IV*.
- DAVID, NUNO, SICHMAN, JAIME SIMÃO, & COELHO, HELDER. 2005. The Logic of the Method of Agent-Based Simulation in the Social Sciences: Empirical and Intentional Adequacy of Computer Programs. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, **8**(4).
- DAVIN, JOHN, & MODI, PRAGNESH JAY. 2005. Impact of Problem Centralization in Distributed Constraint Optimization Algorithms. *Em: Autonomous Agents and Multiagent Systems*, vol. 3.
- DENNETT, DANIEL. 2004. Can Machines Think? *Em: Alan Turing: Life and Legacy of a Great Thinker*. Springer.
- DENNING, P. 1980. What is Experimental Computer Science. *Communications of the ACM*, 543–544.
- DESJARDINS, MARIE E., DURFEE, EDMUND H., ORTIZ, JR., CHARLES L, & WOLVERTON, MICHAEL. 1999. A Survey of Research in Distributed, Continual Planning. *The AI Magazine*, **20**(4), 13–22.
- ELGESEM, DAG. 1993. *Action Theory and Modal Logic*. Ph.D. thesis, Institutt for filosofi – Det historisk-filosofiske fakultet – Universitetet i Oslo.
- FALCONE, RINO, & CASTELFRANCHI, CRISTIANO. 2001. Social Trust: A Cognitive Approach. *Páginas 55–90 de: CASTELFRANCHI, CRISTIANO, & TAN, YAO-HUA (eds), Trust and Deception in Virtual Societies*. Kluwer Academic Publishers.

- FASLI, MARIA. 2005. On the Interplay of Roles and Power. *Páginas 499–503 de: SKOWRON, ADRZEJ, BARTHES, JEAN-PAUL, & RON SUN, LAKHMI JAIN (eds), IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology.*
- FERGUSON, INNES A. 1992. TouringMachines: Autonomous agents with attitudes. *Computer*, **25**(5), 51–55.
- FOX, MARIA, & LONG, DEREK. 2003. PDDL2.1: An Extension to PDDL for Expressing Temporal Planning Domains. *Journal of Artificial Intelligence Research*, **20**, 61–124.
- FRANKLIN, STAN, & GRAESSER, ART. 1996. Is It an Agent, or Just a Program? A Taxonomy for Autonomous Agents. *Em: Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages.* Springer-Verlag.
- FRANKLIN, STANN. 1997. Autonomous Agents as Embodied AI. *Cybernetics and Systems*, **28:6**, 499–520.
- FRASER, A. M., & DIMITRIADIS, A. 1993. Forecasting Probability Densities by Using Hidden Markov Models with Mixed States. *Em: WEIGEND, A., & GERSHENFELD, N. (eds), Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past.* Addison Wesley.
- GEORGEFF, M. P., & LANSKY, A. L. 1987. Reactive reasoning and planning. *Páginas 677–682 de: Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87).*
- GRIMM, VOLKER, & RAILSBACK, STEVEN F. 2005. *Individual-based Modeling and Ecology.* Princeton University Press.
- GUIMARÃES, RUI CAMPOS, & CABRAL, JOSÉ A. SANSFIELD. 1999. *Estatística.* McGraw Hill.
- HEBB, D. O. 1949. *The Organization of Behaviour.* John Wiley & Sons, New York.
- HOPCROFT, J. E., & ULLMAN, J. D. 1979. *Introduction to Automata and Formal Languages.* Reading, MA: Addison-Wesley.
- IHAKA, ROSS, & GENTLEMAN, ROBERT. 1996. R: A Language for Data Analysis and Graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, **5**(3), 299–314.

- KONOLIGE, KURT. 1984. Belief and Incompleteness. *Em*: HOBBS, JERRY, & MOORE, ROBERT C. (eds), *Formal Theories of the Commonsense World*. Norwood, New Jersey: Ablex Publishing Corp.
- LANGLEY, PAT. 2005 (September). An Adaptive Architecture for Physical Agents. *Páginas 18–25 de*: SKOWRON, ANDRZEJ, BARTHES, JEAN-PAUL, JAIN, LAKHMI, SUN, RON, MORIZET-MAHOUDEAUX, PIERRE, LIU, JIMING, & ZHONG, NING (eds), *Intelligent Agent Technology*.
- LIFSCHIFZ, VLADIMIR, & MCCARTHY, JOHN (eds). 1980. *Formalizing Common Sense*. Intellect, Ltd. Cap. Ascribing mental qualities to machines.
- LÓPEZ Y LÓPEZ, FABIOLA, LUCK, MICHAEL, & D'INVERNO, MARK. 2003. Normative Agent Reasoning in Dynamic Societies. *Em*: *Proceedings of the Second International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*.
- LUCK, MICHAEL, MCBURNEY, PETER, SHEHORY, ONN, WILLMOTT, STEVE, & THE AGENTLINK COMMUNITY. 2005. *Agent Technology: Computing as Interaction –A Roadmap for Agent Based Computing–*. *Relat. Técn. AgentLink*.
- MAES, PATTIE. 1989. How to Do the Right Thing. *Connection Science Journal*, **1, 3**, 291–323.
- MARCUS, GARY F. 2001. *The Algebraic Mind: Integrating Connectionism and Cognitive Science (Learning, Development, and Conceptual Change)*. MIT Press.
- MATSUBARA, SHIGEO. 2005. Action in Dynamic Environments: Incorporating the Cost Caused by Re-Allocation. *Em*: *Autonomous Agents and Multiagent Systems*.
- MCCARTHY, JOHN. 1958. Programs with Common Sense. *Páginas 77–84 de*: *Proceedings of the Symposium on Mechanisation of Thought Processes*, vol. 1. London: Her Majesty's Stationery Office.
- MCCARTHY, JOHN. 1978. History of Lisp. *Em*: *ACM SIG-PLAN History of Programming Languages*. <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/lisp/lisp.html>.
- MCCARTHY, JOHN. 1990. *Formalizing Common Sense: Papers by John McCarthy*. Ablex Pub. Cap. Ascribing Mental Qualities to Machines.

- MCCULLOCH, W. S., & PITTS, W. 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, **5**, 115–133.
- MINSKY, MARVIN. 1985. *The Society of Mind*. Simon and Schuster.
- MINSKY, MARVIN, & PAPERT, SEYMOUR. 1974. *Artificial Intelligence*. Condon Lectures. University of Oregon Press.
- MOORE, ROBERT C. 1984. A Formal Theory of Knowledge and Action. *Em: Formal Theories of the Commonsense World*. Norwood, New Jersey: Ablex Publishing Corp.
- MOSS, SCOTT, & EMMA, NORLING. 2005. Having fun being useful: Extended Abstract. *Páginas 3 – 10 de: ANTUNES, LUÍS, & SICHMAN, JAIME SIMÃO (eds), Proceedings of the 6th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation (MABS'05)*.
- NAIR, RANJIT, PYNADATH, DAVID, YOKOO, MAKOTO, TAMBE, MILIND, & MARSELLA, STACY. 2003. Taming decentralized POMDPs: Towards efficient policy computation for multiagent Settings. *Em: Proceedings of the IJCAI Conference*.
- NEGRI, ANTONIO. 1993. *A anomalia selvagem, Poder e Potência em Spinoza*. primeira edição edn. Editora 34.
- NEWELL, ALLEN, & SIMON, HERBERT. 1975. Computer Science as empirical Inquiry: Symbols and Search. *Communications of the ACM*, **19**(3), 113–126.
- PAPADIMITRIOU, C.H., & TSITSIKLIS, J.N. 1987. The Complexity of Markov Decision Processes. *Mathematics of Operations Research*, **12**(3), 441–450.
- PARUNAK, H. VAN DYKE, & BRUECKNER, SVEN. 2001. Entropy and Self-Organization in Multi-Agent Systems. *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents (Agents 2001)*, 124–130.
- PARUNAK, H. VAN DYKE, *et al.* 2003. A Preliminary Taxonomy of Multi-Agent Interactions. *AAMAS'03*.
- PENROSE, R. 1994. *Shadows of the Mind*. Oxford University Press.

- POLANI, DANIEL, & BROWNING, BRETT ET AL (eds). 2004. *RoboCup 2003: Robot Soccer World Cup VII*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3020. New York, NY, USA: Springer-Verlag Inc.
- PÖRN, INGMAR. 1970. *The Logic of Power*. Oxford: Basil Blackwell.
- PÖRN, INGMAR. 1977a. *Action Theory and Social Science*. D. Reidel. Cap. 2. Intentions and Norms, páginas 21–25.
- PÖRN, INGMAR. 1977b. *Action Theory and Social Science*. D. Reidel. Cap. 4. Control, Influence and Interaction, páginas 65–82.
- PÖRN, INGMAR. 1989. On the Nature of Social Order. *Páginas 553–567 de: FENSTAD, J. E. ET AL. (ed), Logic, Metodology and Philosophy of Science VIII*. Elsevier Science Publishers B.V.
- RÉKA, ALBERT, & BARABÁSI, ALBERT-LÁZLÓ. 2002. Statistical Mechanics of Complex Networks. *Reviews of modern physics*, **74**, 47–97.
- ROBINSON, J. A. 1965. A Machine-Oriented Logic Based on the Resolution Principle. *Journal of the ACM*, **12**(1), 23–41.
- RUSSELL, STUART, & NORVIG, PETER. 2003. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 2 edn. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- SEARLE, J. R. 1980. Minds, brains and programs. *Behavioral and Brain Sciences*, **3**, 417–457.
- SHALIZI, COSMA ROHILLA. 2003. Methods and Techniques of Complex Systems Science: An Overview. www.arxiv.org/nlin.AO/0307015.
- SHANNON, CLAUDE. 1940. *A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits*. M.Phil. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering.
- SPINOZA, BENTO. 1964. *Oeuvres I, Court Traité*. Garnier-Flaummarion. Cap. XVI.
- STEELS, L. 1990. Cooperation Between Distributed Agents Through Self-Organization. *Páginas 175–196 de: DEMAZEAU, Y., & MÜLLER, J.-P. (eds), Decentralized A.I.* North-Holland.
- STORK, DAVID G. (ed). 1996. *HAL's Legacy 2001's Computer as Dream and Reality*. The MIT Press.

- TAKENS, FLORIS. 1981. Detecting Strange Attractors in Fluid Turbulence. *Páginas 366–381 de: RAND, D. A., & YOUNG, L. S. (eds), Symposium on Dynamical Systems and Turbulence*. Berlin: Springer-Verlag.
- TAMBE, MILIND, BOWRING, E., *et al.* 2005. Conflicts in teamwork: Hybrids to the rescue. *Páginas 3–10 de: DIGNUM, FRANK, DIGNUM, VIRGINIA, KOENING, SVEN, KRAUS, SARIT, SINGH, MUNINDAR P., & WOOLDRIDGE, MICHAEL (eds), Proceedings of the Autonomous Agents and Multi Agent Systems (AAMAS), vol. 1*.
- TOBIAS, R., & HOFMANN, C. 2003. Evaluation of Free Java-libraries for Social-scientific Agent Based Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7(1).
- TURING, ALAN. 1950. Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59, 433–460.
- VITANYI, PAUL. 2003. Algorithmic Chaos. *www.arxiv.org/nlin.CD/0303016*.
- VITERBI, ANDREW J. 1967. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm. *IEEE Transactions on Information Theory*, 13(2), 260–267.
- WALCZAK, ANDRZEJ. 2005. *Planning and the Belief-Desire-Intention Model of Agency*. Relat. Técn. University of Hamburg.
- WOOLDRIDGE, MICHAEL. 2002. *An Introduction to MultiAgent Systems*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.

A

As Economias Virtuais

A.1 Agentes conformistas

Resume-se aqui o modelo original do controlo individual conformista, conforme apresentado em Caldas & Coelho (2000) aí designado por «rede de dependência». De acordo com os autores:

« (...) Se o agente A depende do agente B , este terá um grau de poder sobre A mesmo que B dependa em menor grau de A . Na *rede de dependência* usada, esta relação é restringida, no sentido em que assume uma configuração institucional na qual um agente poderá depender de um único outro agente durante toda a sua existência. Um agente poderá depender de si próprio, sendo nesse caso independente. Além de recíproca, a relação de dependência poderá também ser transitiva. Se o agente A controlar o recurso a , e B controlar o recurso b , A depende de B para b e B depende de A para a . Os agentes A e B terão então algum grau de poder um sobre o outro. Também é possível que A dependa de B , B de C e C de A .

Se uma população e a relação de dependência forem representadas por um grafo em que os vértices representem os agentes e as arestas dependência, e se se definirem *grupos* pelas componentes conexas desse grafo, teremos uma partição da população em diferentes grupos.

Dependendo da escolha da configuração do ambiente esses grupos poderão iniciar actividades colectivas originando um benefício a ser distribuído por todos os membros do grupo segundo alguma regra. No entanto, dada uma relação de «dependência» ou «poder sobre», não é difícil assumir que a parcela de benefício individual dos agentes dependentes tenderá a ser transferida para aqueles que têm «poder sobre» eles. Tal como

em Axelrod, assumiremos que se A depende de B , A pagará um tributo a B .

A configuração do ambiente para a simulação com a rede de dependência envolve uma população com um número fixo de agentes económicos, recrutados para a produção de um bem durante uma sequência de instantes. Um agente é simplesmente um 4-uplo,

(nome, idade, capacidade, dependente)

em que idade representa o número de instantes que o agente viveu, capacidade é uma quantidade inicialmente aleatória e que determina as decisões de produção e fornecimento do agente (sendo actualizada em cada instante), e dependente é inicialmente escolhido ao acaso e fixo para toda a vida do agente.

A quantidade produzida e fornecida ao mercado em cada instante é dada pela capacidade produtiva total de todos os agentes. Dada esta quantidade, o preço do bem é computado por um mecanismo representado por uma função procura de declive negativo que atribui um preço único a todas as transacções:

$$\text{preço} = \frac{A}{\sum_i \text{capacidade}[i]}$$

O benefício individual de cada agente (o seu rendimento num dado instante) é uma função da sua capacidade (quantidade produzida e fornecida), preço e custo unitário:

$$\text{rendimento}[i] = \text{capacidade}[i] \times (\text{preço} - \text{custo unitário})$$

No entanto, o custo unitário para o agente i não é constante, dependendo da capacidade agregada do grupo J do qual i é membro. Isto poderá ser devido a efeitos externos da agregação, que economiza até uma certa capacidade de grupo, e deseconomiza para além desse limiar. O custo unitário para o grupo J será dado por:

$$\text{custo unitário}[J] = B + \left(\frac{C - \sum_{i \in J} \text{capacidade}[i]}{D} \right)^2$$

O tributo líquido de cada agente i é a soma dos tributos recebidos,

deduzido do tributo pago ao agente j de que i depende:

$$\text{tributo líquido } [i] = t \times \left(\sum_{k \in D} \text{rendimento } [k] - \text{rendimento } [i] \right),$$

em que D é o conjunto de todos os agentes que dependem de i e t é uma percentagem fixa ($t\%$) dos respectivos rendimentos (no caso dos rendimentos serem positivos).

Em cada instante a capacidade de cada agente é actualizada de acordo com as regras seguintes:

$$\begin{aligned} \text{capacidade}' [i, t + 1] &= \text{capacidade } [i, t] + \text{tributo líquido } [i] \\ \text{capacidade } [i, t + 1] &= (1 - a) \times \text{capacidade}' [i, t] + \\ &\quad + b \times \text{rendimento } [i, t] \end{aligned}$$

Desta forma assume-se que a capacidade diminui ao longo do tempo (em cada instante perde-se $a\%$) e que aumenta a uma taxa de $b\%$ do rendimento (quando o agente tem resultados positivos), diminuindo à mesma taxa caso contrário.

É definida uma condição de sobrevivência para todos os agentes: Se a capacidade for inferior a um dado limiar crítico c , o agente será substituído por um agente novo, com o mesmo nome, mas com idade zero e com novos valores para capacidade e depende (atribuídos aleatoriamente).

A simulação é inicializada com as definições aleatórias de dependência e capacidades. A dependência será um inteiro distribuído uniformemente entre 1 e dimpop (dimensão da população) e capacidade é um número real entre mincap e maxcap (capacidade mínima e máxima). Em cada período serão executados os seguintes passos: (a) computação do preço; (b) computação do custo unitário de cada grupo; (c) computação do rendimento de cada indivíduo; (d) computação e transferência dos tributos; (e) ajustamento das capacidades; (f) teste de sobrevivência com substituição de agentes; (g) actualização das idades. (...)»

O parâmetro depende de cada agente é o seu elo social e define os grupos de uma sociedade. A estrutura do grafo subjacente a um grupo é bastante limitada: forma sempre um ciclo de cujos nós descendem árvores (veja-se a figura A.1). Os agentes numa árvore formam uma hierarquia liderada pela raiz. Desta forma, cada grupo é uma unidade de produção hierárquica, liderada pelo ciclo no topo. Esta estrutura social pode ser me-

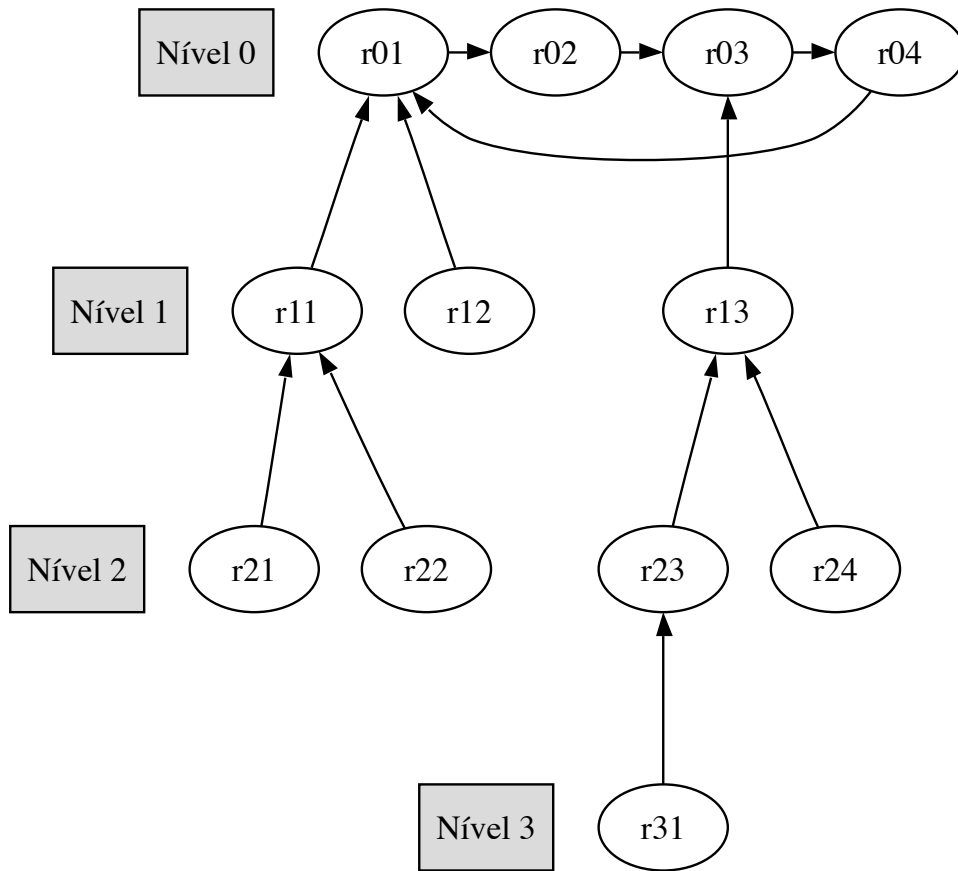


Figura A.1: Estrutura do grafo subjacente a um grupo.

dida pelo nível de cada agente: a distância a que cada agente se encontra do ciclo do seu grupo. Repare-se que os grupos são estruturas dinâmicas: No caso de colapso de um dado agente, toda a respectiva sub-árvore será transferida, eventualmente para outro grupo.

B

Os Exploradores de Marte

Os *Exploradores de Marte* ilustram como uma das mais simples arquitecturas de agentes pode ser empregue para lidar com cenários complexos.

O controlo destes agentes é definido pela arquitectura de subsunção de Brooks (em Brooks (1991)). A função de escolha de acção de um agente subsumptivo é definida por um conjunto de regras estímulo → resposta (ou pares reacção = (estímulo, resposta)). Dado que várias regras podem ser simultaneamente activadas (isto é, as respectivas componentes estímulo serem simultaneamente verdadeiras), estas são organizadas por *níveis*: Regras de níveis mais elevados, se activadas, inibem as regras dos níveis inferiores.

O cenário, retirado de Wooldridge (2002), é o seguinte:

«O objectivo é explorar um planeta distante, mais concretamente, coleccionar amostras de um tipo particular de rochas preciosas. A localização das amostras não é previamente conhecida, mas, tipicamente, encontram-se agrupadas.

Está disponível um certo número de veículos autónomos que podem deslocar-se, coleccionando amostras e posteriormente voltar à base para regressar à Terra. Não existe um mapa detalhado embora se saiba que o terreno está coberto de obstáculos que impedem quaisquer comunicações entre os veículos.»

O problema consiste em construir um controlo dos agentes para cada veículo, de modo que estes cooperem na tarefa de recolha de amostras da maneira mais eficiente possível.

Luc Steels (em Steels (1990)) propõe uma solução para este problema que usa dois mecanismos. O primeiro mecanismo é um gradiente. Para que os agentes possam saber em que direcção se encontra a base, esta emite um

- 1: **procedimento** EXPLORADOR DE MARTE
- 2: **se** obstáculo detectado :
- 3: mudar de direcção
- 4: **senão: se** transporta amostras \wedge na base :
- 5: largar amostras
- 6: **senão: se** transporta amostras $\wedge \neg$ na base :
- 7: largar 2 sinais
- 8: subir gradiente
- 9: **senão: se** amostra detectada :
- 10: recolher amostra
- 11: **senão: se** sinal detectado :
- 12: recolher um sinal
- 13: descer gradiente
- 14: **senão:**
- 15: deslocar ao acaso

Figura B.1: Controlo dos *Exploradores de Marte*.

sinal rádio. Como esse sinal fica mais fraco conforme aumenta a distância à base, para encontrar a direcção da base basta a um agente subir no gradiente. O sinal não transporta qualquer informação, apenas é necessário que exista.

O segundo mecanismo permite que os agentes comuniquem entre si. Como as características do terreno impedem comunicações directas, Steels propõe um método de comunicação indirecta. Cada agente transporta sinais radioactivos que podem ser largados, recolhidos e detectados por veículos que passem perto. Assim, se um agente largar um destes sinais numa localização particular, mais tarde outro agente que passe nesse local poderá detectá-lo.

O controlo dos *Exploradores de Marte* é então construído da acordo com o algoritmo da tabela B.1.

B.1 Contagem de programas a uma distância dada

No capítulo 6 é dado um histograma com as frequências esperadas em função da distância. Aqui indica-se como se obtém esse histograma.

Dado que o controlo dos *Exploradores de Marte* é constituído por 6 reacções estímulo \rightarrow resposta, cada programa possível é biunivocamente definido a partir do programa na figura B.1 por alguma permutação $\sigma \in S_6$. Assim, há $|S_6| = 6! = 720$ programas diferentes. Basta então calcular a dis-

tância de cada um desses 720 programas e contar quantos programas se encontram a cada distância observada. Essa informação está resumida na tabela B.1.

distância	0	1	2	3	4	5	6
n.º de programas	6	18	36	60	84	72	84
distância	7	8	9	10	11	12	13
n.º de programas	84	72	84	60	36	18	6

Tabela B.1: Número de programas em função de D .

Agora, cada coluna distância = d do histograma 6.2 é obtida dividindo o número de programas para distância = d pelo número total de programas, 720.

C

O Agente de Raciocínio Prático

O conteúdo deste apêndice baseia-se no texto de «An Introduction to Multi-Agent Systems» de Wooldridge (2002, p. 65–86). O *Agente de Raciocínio Prático* (ARP) é aqui usado como modelo do agente que delibera (raciocina) em termos das acções que procura efectuar. O processo de deliberação deve ter em conta

- Os objectivos do agente, isto é: os estados do ambiente que o agente procura realizar;
- As acções disponíveis;
- O estado actual do ambiente

Cada ARP é definido com base em certas funções, cujas semânticas são, de seguida, resumidas:

ObterPróximaPercepção () obtém, do ambiente (ou, indiferentemente, do sistema sensorial do agente) um conjunto de percepções descrevendo o estado actual deste;

ReverCrenças (X, C) constrói uma base de crenças (e implicitamente, descreve uma situação) com base nas crenças actuais C e no conjunto de percepções X ;

ExplorarOpções (C, O, A) determina *todos* os objectivos de O que podem ser realizados a partir da situação C por meio de acções de A ;

FiltrarOpções (C, E, O) selecciona que objectivos de E devem ser escolhidas, isto é, determina as intenções;

ProcurarPlano(C, I, A) constrói um plano, isto é, uma sequência de acções de A , aplicável na situação C e que realiza as intenções I ;

Vazio(P) testa se o plano P tem alguma acção;

Realizados(I, C) testa se as intenções I já se encontram realizadas na situação C ;

Impossível(I, C) testa se as intenções I (não) são realizáveis a partir da situação C ;

ObterPrimeiro(P) é a primeira acção do plano P ;

ObterRestantes(P) são todas as acções de P , excepto a primeira;

Executar(a) executa a acção a (eventualmente essa acção será uma instrução de um sistema motor);

Reconsiderados(I, C) avalia se, dada a situação C , o agente deve continuar a tentar realizar as intenções I ;

Seguro(P, I, C) avalia se P é um plano correcto com respeito às intenções I e às crenças C , isto é, se, dada a situação C , após a execução do plano P , as intenções I estão realizados;

O controlo de um ARP leva o agente a um ciclo contínuo em que este

- Observa o ambiente e actualiza as crenças: linhas 6, 7 e 15, 16;
- Delibera que objectivos devem passar a intenções, isto é, em que objectivos se deve empenhar: linhas 8, 9 e 18, 19;
- Constrói um plano para realizar esses objectivos: linhas 10 e 21;
- Executa esse plano: linhas 12 – 14;
- Gere os empenhos: linhas 11, 17 e 20;

O pseudo-código do ARP está dado na tabela C.1. Note-se que a gestão do empenho, o planeamento e o controlo da execução de acções então distribuídos e entrelaçados por todo o ciclo de controlo. O gestão do empenho e o pré-processamento para o planeamento são geridos nas linhas 7,8,9, 11, 17, 18, 19, 20. A opção de quebrar o empenho para com as intenções é tomada na função Reconsiderados enquanto que o empenho para com o plano escolhido é gerido pela função Seguro.

```

1: procedimento ARP
2:    $A \leftarrow$  AcçõesPossíveis
3:    $C \leftarrow$  CrençasIniciais
4:    $O \leftarrow$  ObjectivosIniciais
5:   enquanto verdade :
6:      $X \leftarrow$  ObterPróximaPercepção ()
7:      $C \leftarrow$  ReverCrenças ( $C, X$ )
8:      $E \leftarrow$  ExplorarOpções ( $C, O, A$ )
9:      $I \leftarrow$  FiltrarOpções ( $C, E, A$ )
10:     $P \leftarrow$  ProcurarPlano ( $C, I, A$ )
11:    enquanto  $\neg$ (Vazio ( $P$ )  $\vee$  Realizados ( $I, C$ )  $\vee$  Impossíveis ( $I, C$ )) :
12:       $a \leftarrow$  ObterPrimeiro ( $P$ )
13:      Executar ( $a$ )
14:       $P \leftarrow$  ObterRestantes ( $P$ )
15:       $X \leftarrow$  ObterPróximaPercepção ()
16:       $C \leftarrow$  ReverCrenças ( $C, X$ )
17:      se Reconsiderados ( $I, C$ ) :
18:         $E \leftarrow$  ExplorarOpções ( $C, O, A$ )
19:         $I \leftarrow$  FiltrarOpções ( $C, E, A$ )
20:      se  $\neg$ Seguro ( $P, I, C$ ) :
21:         $P \leftarrow$  ProcurarPlano ( $C, I, A$ )

```

Figura C.1: Pseudo-código do *Agente de Raciocínio Prático* (ARP).

D

Fundamentos de Estatística

Neste apêndice procurou-se juntar, de forma resumida, as noções da estatística que se aplicam ao longo da tese. As referências fundamentais são o livro «Estatística» de Guimarães & Cabral (1999) e o *help* do programa estatístico «R» Ihaka & Gentleman (1996), distribuído (em <http://www.r-project.org>) livremente sob a licença GNU-GPL. O objectivo deste apêndice não é explicar regras ou algoritmos de cálculo mas antes fornecer definições dos conceitos menos comuns envolvidos, de forma a tornar inteligíveis os contextos em que são empregues.

Na notação convencional uma variável aleatória (populacional) –ou estimador– tem sempre a primeira letra em maiúscula e as respectivas variáveis amostrais –ou estimativas– mantêm o nome, mudando a primeira letra para minúscula. Para referir um exemplo comum, a altura média da população portuguesa será representada por *Altura* e a altura média de uma amostra dessa população (digamos, 200 indivíduos observados na região de Lisboa) será representada por *altura*.

correlação A correlação entre duas amostras x e y é um número real

$$\text{cor}(x, y) \in [-1, 1]$$

a que é dada a seguinte interpretação:

- $\text{cor}(x, y) > 0$ se x e y estão *positivamente* relacionadas (i.e. directamente proporcionais);
- $\text{cor}(x, y) = 0$ se x e y não estão relacionadas;
- $\text{cor}(x, y) < 0$ se x e y estão *negativamente* relacionadas (i.e. inversamente proporcionais);

e pode ser calculada por vários métodos distintos. O método de cálculo adotado é devido a Pearson e segue uma distribuição t : Supondo que $x = x_1, \dots, x_N$ e $y = y_1, \dots, y_N$

$$\text{cor}(x, y) = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{N}}{\sqrt{\left(\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{N}\right) \left(\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{N}\right)}}$$

intervalo de confiança $[a, b]$ é um intervalo de confiança para X a $\alpha\%$ se

$$\Pr(a < X < b) = \alpha.$$

Note-se que X é um parâmetro populacional.

teste de hipótese Um teste de hipótese serve para verificar se os dados amostrais são ou não compatíveis com determinadas populações. O resultado de um teste é uma de duas respostas possíveis: afirmativa ou negativa. Um teste de hipóteses é sempre composto por uma hipótese nula H_0 que é formulada em termos de uma igualdade e uma hipótese alternativa H_1 obtida a partir da hipótese nula substituindo a igualdade por uma desigualdade estrita (testes unilaterais) ou uma diferença (testes bilaterais). Procura-se infirmar a hipótese alternativa provando a inverosimilhança da hipótese nula. Isto é: Admite-se verdadeira a hipótese nula e procura-se evidência estatística apontando em sentido contrário. Nesse caso rejeita-se a hipótese nula e aceita-se como válida a hipótese alternativa. Os cálculos envolvidos dependem do nível de significância α do teste. O valor mais comum é $\alpha = 0,95$.

igualdade de valores esperados Dadas duas amostras x e y provenientes de duas populações X e Y , quer-se saber se

$$H_0 : \mu X = \mu Y.$$

A decisão de rejeitar a hipótese nula H_0 é tomada com base na computação de (a) uma estatística observada z , calculada a partir das amostras x e y e (b) uma região de rejeição $\{\zeta : \zeta > Z_{crit}\}$ definida pelos pressupostos populacionais (por exemplo, a população segue uma distribuição normal). Se a estatística observada z , se encontrar na região de rejeição então a hipótese nula H_0 deve ser rejeitada. Essa decisão é ainda reforçada pelo cálculo do valor da prova (valor p).

correlação Dadas duas amostras x e y provenientes de duas populações X e Y , procura-se saber se

$$H_0 : \text{cor}(X, Y) = 0.$$

O teste à correlação, conforme implementado pelo programa «R», computa, a partir das amostras e de um nível de confiança (por defeito, $\alpha = 0,95$), o intervalo de confiança (com o nível dado) para a localização do valor populacional da correlação e o valor de prova, isto é, a probabilidade de, tendo a hipótese nula sido rejeitada, afinal *não* haver correlação.

valor de prova ou *valor p*. Ver testes de hipóteses. Mede a qualidade da conclusão do teste (quando a conclusão é «rejeitar a hipótese nula») e é a probabilidade de a estatística do teste tomar um valor igual ou mais extremo do que aquele que, de facto, é observado. Quanto menor for o valor de prova, maior será a probabilidade de contradizer a hipótese nula. Isto é, corresponde à probabilidade de se cometer um *erro de tipo I*: rejeitar a hipótese nula quando esta é verdadeira. Na prática comum, a conclusão de um teste é aceite se o respectivo valor de prova for inferior a 0,05.

O teste de igualdade de médias pressupõe uma de duas condições: Ou as amostras são «grandes» ou provêm de populações normais. Mas o que é uma «amostra grande»? A resposta baseia-se na lei dos grandes números: A média amostral converge, em probabilidade, para o valor esperado μ da população, quando a dimensão da amostra cresce, isto é, supondo que as observações x_n provêm da mesma população e não estão correlacionadas, então para qualquer $\varepsilon > 0$,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr \left(\left| \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} - \mu \right| < \varepsilon \right) = 1$$

Desta forma, a média de um «amostra grande» está, com elevada probabilidade, muito próxima de μ , o valor esperado para a população. Note-se que na lei dos grandes números não é feita qualquer suposição sobre a distribuição da população. A partir daqui é possível determinar um valor n para o qual a média das amostras esteja provavelmente suficientemente próxima do valor esperado da população. Ou seja, a suposição de normalidade pode ser ignorada se amostra for suficientemente grande. Como regra prática toma-se $n \approx 30$.

E

Convenções para Pseudo-Código

Procurou-se usar uma sintaxe de pseudo-código, tanto quanto possível, clara e simples.

Ao contrário de sintaxes delimitadas por *palavras reservadas*, como é o caso do Pascal (com as palavras reservadas **begin** e **end**), ou do C e Java (com os delimitadores { e }), os blocos lógicos de código serão delimitados pela sua *identação*.

Assim e a título de exemplo para *iterações*, considere-se o algoritmo de Euclides para computar o máximo divisor comum:

```
1: função MDC(a,b)                                ▷ Máximo Divisor Comum entre a e b
2:    $r \leftarrow a \bmod b$ 
3:   enquanto  $\neg(r = 0)$  :
4:      $a \leftarrow b$ 
5:      $b \leftarrow r$ 
6:      $r \leftarrow a \bmod b$ 
7:   resultado  $\leftarrow b$ 
```

Figura E.1: Pseudo-código para a *iteração*.

Na linha 1 está o nome da função MDC seguido dos argumentos (*a*, *b*). Mais à direita, separado por um pequeno triângulo, está um comentário. A função é definida pelas instruções 2–7 e que a iteração guardada na linha 3 compreende as linhas 4–6.

Iterações limitadas podem ser definidas por uma variável a percorrer um conjunto, ou uma lista, o que é ilustrado na figura E.2.

Por outro lado, para *condicionais*, usa-se o bloco **se...senão**, ilustrado em E.3.

As listas serão representadas por colchetes [] e argumentos opcionais por ⟨⟩, como em E.4. Nesse exemplo, o argumento *y* poderá não ser defi-

```

1: função SOMATÓRIO(X)
2:   s ← 0
3:   para cada x ∈ X :
4:     s ← s + x
5:   resultado ← s

```

Figura E.2: Pseudo-código para *iterações limitadas*.

```

função SIRACUSA(n)                                ▷ Função de Collatz
  se par(n) :                                       ▷ Caso n par
    y ← n/2
  senão:                                           ▷ Se n ímpar ...
    y ← 3 × n + 1
  resultado ← y

```

Figura E.3: Pseudo-código para *condicionais*.

nido, quando da evocação de função (o que poderá corresponder a uma definição múltipla de funções, uma para cada combinação dos argumentos opcionais).

```

procedimento ARGOP(x, ⟨y⟩)
  ...
  a ← primeiro ([1, 2, 3])
  ...

```

Figura E.4: Pseudo-código para *listas e argumentos opcionais*.

Finalmente, nas duas últimas figuras as linhas não estão numeradas, o que será usado sempre que for desnecessário referir as instruções.

Índice

- acção, 5, 69, 79, 143
 - curso de, 5, 23, 24, 66, 144
 - de controlo, 69
 - motora, 69
 - valor, 28
- agência, *ver* agente
- agente, 17
 - contentor, *ver* agente externo
 - externo, 6, 79
 - inteligente, 1, 5, 17, 27, 30
 - meta agente, 6
- ambiente, 5, 6
 - dinâmica, 5, 33, 34, 40, 47, 59, 61
 - acção, 20
 - transição, 20
 - dinâmico, 5, 11
 - estado, 143
 - externo, 79
 - imprevisível, 5, 11
 - social, 19
 - estruturante, 33, 38, 39, 47
- aptidão, 5
- arquitectura
 - CDI, 11, 24
 - do agente, *ver* controlo individual
 - reactiva, *ver* controlo reactivo
 - representativa, *ver* controlo representativo
- complexidade computacional, 15, 21, 27
- comportamento, 5
 - individual, 11, 33, 34, 40, 47, 65
 - ambicioso, 50
 - conformista, 35, 50, 135
 - desertor, 38
 - sedutor, 39
 - racional, 27
 - conhecimento, 5, *ver* crença
- controlo, 5
 - CLG, 67, 70
 - deliberativo, 5, 13, 20
 - individual, 79, 93
 - reactivo, 5, 6, 72, 79, 80, 139
 - representativo, 80
- correlação, 36, 147
- decisão, 5, 13, 20
 - efectiva, 5
- deliberação, 143
- desempenho, 79
- dinâmica social, *ver* dinâmica do ambiente
- entropia, 63
- espaço mental, 6, 79, 80
- estado interno, *ver* espaço mental
- estado mental, 3, 6, 23, 27, 35, 79, 97
 - crença, 3, 5, 21, 23, 27, 30, 80, 93
 - desejo, 3, 27, 30
 - disposição, 68, 70
- empenho, 5, 11, 66, 144
- intenção, 3, 23, 27, 30
- objectivo, 5, 23, 66, 80, 143

- dominante, 5, 80
- evidência empírica, 34
- fundamentação experimental, *ver* validação empírica
- inteligência artificial, 1, 17
- intervalo de confiança, 148
- mente, *ver* espaço mental
- modelo
 - económico
 - CC, 34, 36, 59
 - CC1, 38
 - CC2, 39
 - CC3, 51
- observação, *ver* percepção
- percepção, 6, 21, 79
- perfil individual, *ver* controlo individual
- plano, *ver* curso de acção
- poder, 13, 20, 28
 - individual, 5, 30, 33, 34, 36, 61, 93
 - elementos, 5
 - social, 29, 36, 93
- poder-sobre, *ver* poder social
- predictabilidade, *ver* qualidade predictiva
- problema
 - NP-completo, 2, 15
 - de decisão num processo de Markov, 20
 - parcialmente observável, 21
 - optimização com restrições, 22
 - distribuídas, 22
- processo deliberativo, *ver* comportamento individual
- qualidade predictiva, 5, 55
- raciocínio, *ver* controlo deliberativo
 - prático, 23
- realização, 79, *ver* objectivo
- recompensa, 20
- série temporal, 5
- simulação
 - multi-agente, 34, 51, 59
 - social, 33
- sistema motor, 69
- sistema multi-agente, *ver* ambiente social
- sistema pericial, 16
- sistema sensorial, 69
- sociedade, *ver* ambiente
- subsunção, *ver* controlo reactivo
- teoria de jogos e leilões, 24
- teste de hipóteses, 33, 148
- teste de Turing, 13, 27
- utilidade, 11, 24, 28
- validação empírica, 5, 33, 35
- valor de prova, 37, 45, 149
- variável
 - de grupo
 - custo unitário, 136
 - global
 - preço, 136
 - individual
 - capacidade, 136
 - capacidade de produção, 35, 38, 50
 - depende, 38, 136
 - expectativa de vida, 35
 - idade, 36, 136
 - nível hierárquico, 35, 36, 50, 138
 - nome, 38, 137
 - taxa, 39
- vontade, 3, 5, 11, 30, 34, 36, 65, 66, 68, 93

