

## **Modelação Computacional Baseada em Agentes: Enfrentar a Complexidade**

**Helder Coelho**

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
hcoelho@di.fc.ul.pt

### **Resumo**

A análise dos sistemas sociais e dinâmicos assiste a uma mudança de paradigma, dos métodos matemáticos tradicionais para a simulação baseada em agentes. Trata-se de uma nova linha de pensar, interdisciplinar, onde abundam inovações metodológicas e conceptuais, e onde se criam sociedades artificiais com agentes individuais e inteligentes que se comportam como seres humanos muito simples e plausíveis. Neste artigo abordam-se os modelos desses agentes e os modos como regras simples de interacção social local geram explicações de comportamentos complexos. Através de dois exemplos (inovação tecnológica num parque de ciência e desenho de políticas de tributação), mostra-se como as ferramentas Swarm e NetLogo foram exploradas para modelar os mundos reais.

**Palavras-Chave:** Simulação Social Multi-agente, Apoio à Decisão, racionalidade individual.

**Title:** Agent-based computational modelling: Facing complexity

### **Abstract**

The analysis of social and dynamical systems faces a paradigm shift, from mathematical methods to agent-based simulation. It is a new line of thinking, multidisciplinary, where technological and conceptual innovations grow, and where artificial societies of individual and intelligent agents are generated to replicate simple and plausible human beings. This paper deals with agent models and the ways how simple rules of social interaction grow explanations of complex behaviors. Through two examples (technological innovation in a science park and design of tax compliance policies) we show how Swarm and NetLogo tools were explored to model real worlds.

**Keywords:** Multi-agent Social Simulation, Decision Support, individual rationality.

### **1-Introdução**

Será possível experimentar com seres ou sociedades pré-históricas, representando o comportamento de indivíduos relevantes culturalmente em paisagens determinadas? E, dispor de duplos artificiais para construir cenas de batalhas envolvendo centenas de milhares de figurantes? O que diferencia estes dois desejos, um do domínio da Arqueologia e o outro do cinema?

A resposta é positiva. No primeiro caso, tratou-se do estudo do que aconteceu aos Anasazi, no sudoeste dos EUA, no século XIV [Epstein 2007], e, no segundo caso, à produção da trilogia de *O Senhor dos Anéis* de Peter Jackson. Em ambos os casos, recorreu-se à simulação social através

de ferramentas (Sugarscape/Ascape e Massive, respectivamente) e de modelos baseados em agentes para manipular o comportamento de agentes artificiais em cenários escolhidos (o vale Long House, no nordeste do estado do Arizona dos EUA e as paisagens da Nova Zelândia).

Existem semelhanças que importa aqui salientar: os modelos gozam de heterogeneidade, de autonomia, de espaços explícitos, de interações locais, de racionalidade limitada, e de uma dinâmica de não equilíbrio. E, contrariamente às críticas mais apressadas, os modelos têm equações (funções recursivas parciais), são dedutivos e gerais. As paisagens capturam aspectos importantes de situações do mundo real ou ser totalmente imaginárias, são percorridas por agentes todos diferentes, possuindo atributos especiais (tempo de vida, visão, movimento, exigências alimentares, capacidades de consumo e armazenamento, etc.) para replicar aspectos relevantes dos indivíduos e das suas unidades sociais. Os agentes possuem regras plausíveis capazes de definir os modos de interação com o seu ambiente envolvente e entre eles. A alteração dos atributos de cada um dos agentes, das regras de interação e das características dos cenários permite o exame experimental das respostas comportamentais a condições iniciais diferentes, a relações, e a parâmetros espaciais e temporais. E, finalmente, as interações repetidas dos agentes com os seus cenários sociais e físicos revelam os modos como eles respondem às mudanças das condições ambientais e sociais. Mesmo os modelos relativamente simples podem iluminar realidades sociais e culturais muito complexas.

No caso particular da Arqueologia (com base em dados da Antropologia), os modelos permanecem sem verificação até que são avaliados em casos concretos. O grau de conformidade, entre o modelo e as situações do mundo real, permite que a validade do modelo seja autenticada. Além disso, a adequação entre a totalidade ou parte do modelo e os dados de teste indica que o modelo, embora simplificado, tem poder de explicação. A falta de ajuste implica, pelo contrário, que o modelo não é aceitável. No caso do exemplo dos Anasazi a prova foi feita e aceite pela primeira vez sobre um modelo em Sugarscape e mais tarde em Ascape [Epstein e Axtell 1996].

## **2-Campo interdisciplinar da complexidade**

Complexidade é a propriedade de um modelo que faz com que seja difícil encontrar uma descrição do seu comportamento global numa dada linguagem, mesmo que seja fornecida informação razoavelmente completa sobre os seus comportamentos atômicos e as suas inter-relações. Esta é uma definição geral que pode ter várias interpretações em contextos diferentes. Trata da dificuldade em formalizar o todo em relação à formalização das suas partes (modelo descendente em contraste com modelo ascendente) naquela linguagem. É apenas aplicável em casos onde existe pelo menos uma possibilidade de ganhar informação significativa dos seus componentes, separando claramente a ignorância da complexidade. As concepções diferentes da complexidade dependem da linguagem base escolhida, do tipo de dificuldade e do tipo de formulação desejada no âmbito daquela linguagem.

Os aspectos importantes desta via são os seguintes: aplica-se mais a modelos do que a sistemas naturais; a complexidade distingue-se da ignorância; é relativa à linguagem de modelação na qual é expressa; é relativa à identificação dos comportamentos e do comportamento global; a complexidade é uma característica global de um modelo; existem tipos diferentes de complexidade a partir dos vários tipos de dificuldades; a complexidade representa a fenda entre o conhecimento dos componentes e o conhecimento do comportamento (emergente) global.

A Ciência da Complexidade é um território interdisciplinar, oriundo da Física, com fortes influência da Teoria dos Sistemas e da Matemática (o Santa Fe Institute construiu-se à custa da migração de um grupo de cientistas do Los Alamos Laboratory), com conversas frequentes com as Ciências da Vida, apoiando-se nas Ciências da Computação (e, obviamente na Inteligência Artificial), e impregnado por ideias da Filosofia, da Sociologia, da Economia, ou mesmo das Ciências Políticas.

A Simulação Social (Baseada em Agentes) surge, assim, naturalmente para ajudar a quebrar os desafios dos problemas complexos, enquanto as ferramentas computacionais são uma ajuda para realizar a análise das conjecturas e hipóteses avançadas, permitindo também a observação directa das consequências das opções escolhidas.

### **3-A ideia de agente**

Um agente inteligente é um programa que está situado (existe num ambiente), autónomo (independente, não controlado externamente), reactivo (responde a mudanças no ambiente), pró-activo (persegue os seus objectivos com persistência), flexível (tem vários modos de atingir os objectivos), robusto (recupera após uma falha), e social (interactua com outros agentes).

Um agente é uma forma com estados, processos e relações causais entre eles, que contém uma mente e um corpo. Na sua arquitectura existem estados internos (mentais) que podem ser associados a desejos, crenças, intenções, expectativas, esperanças, receios, pensamentos, etc, todos interagindo causalmente uns com os outros. Um agente não é apenas um simples objecto computacional, onde cada classe incorpora certas propriedades (entidades: dados e estados; métodos: operações de interacção com mensagens).

Embora existam semelhanças entre os conceitos de objecto e de agente, as diferenças são grandes: um agente possui capacidade de decisão autónoma, é capaz de comportamento reactivo, pró-activo e social, e possui um fluxo de controlo próprio e distinto dos restantes agentes que compõem um dado sistema multi-agente.

Um agente pode ser definido pelo seu modelo e pela sua arquitectura. O modelo é uma abstracção ou descrição formal das componentes funcionais que são úteis para fins analíticos. A arquitectura é a organização interna do funcionamento de cada agente, estabelecendo como estão estruturados as suas relações e interacções. Em geral, um modelo não tem todas as propriedades do objecto a descrever e serve para podermos raciocinar sobre um certo conceito que reputamos como indispensável. Por exemplo, podemos definir um agente através de três aspectos:

Agente= <intenções, comportamentos, recursos>

Conceptualizar um agente passa pelo recurso a formalismos como as lógicas modais (operadores de crenças, deónticos, de acção, condicionais) para representar e raciocinar acerca de conceitos normativos e de conceitos estruturais (papeis), que são essenciais para descrever (no nível abstracto) as interacções entre os agentes, e podem servir também como blocos básicos de construção para descrever as organizações e os agentes individuais.

Imaginemos agora que queremos construir um ambiente de aprendizagem capaz de simular o que se passa numa aula de História, entre um professor e os seus alunos. Os agentes alunos podem ser imperfeitos, com um conjunto de crenças inconsistente ( $B_A$ ) e o seu poder de raciocínio ( $R_A$ ) será incompleto e correcto:

$$\text{Agente}_A = \langle B_A, R_A \rangle$$

O estado de crença de um agente A  $m_A$  será:

$$m_A = \langle A, T, \text{cred}, \text{rel}, D_A \rangle \text{ com } D_A = (B_A, \langle A, R_A \rangle)$$

onde A responde pelos identificadores dos agentes, T pelos identificadores dos tópicos do domínio do problema, cred pela credibilidade do agente sobre um tópico, rel pela relação entre as fórmulas lógicas e os tópicos e  $D_A$  pela estrutura de dedução onde  $\langle A$  é a ordem [Gaspar 1994].

Se sofisticarmos ainda os cenários de aprendizagem, introduzindo vários alunos para um professor, aceitando várias personalidades dos alunos (envergonhados, preguiçosos, com falta de atenção, obstinados e teóricos) e dos professores (autoritários, dialogantes, permissíveis), seremos forçados a melhorar o modelo anterior de um agente. Justifica-se uma extensão com a inclusão de memória, de motivação, e de contextos no domínio e no tempo [Eusébio e Coelho 1995]. O novo estado da crença será agora:

$$m_A = \langle A, CxS_C, \text{cred}, \text{rel}, D_A, \text{mem}, Tl, \text{mot}_A \rangle \text{ com } \text{mot}_A = (M_A, I_A, \langle A, R_A \rangle)$$

onde  $\text{mot}_A$  é a estrutura global de motivação,  $M_A$  é o conjunto de motivos e  $I_A$  é o conjunto de interesses de ensino e aprendizagem organizados segundo uma pirâmide. A arquitectura é uma proposta (desenho ou concepção) organizativa e estrutural da realização de um agente, e neste caso tem um conjunto de módulos responsáveis por cada uma das partes do modelo. Por exemplo, no ambiente anterior, foi construída uma bancada Windows, escrita em Prolog [Eusébio 1994], com uma interface para os utilizadores, a base de conhecimento para o domínio da Álgebra, uma base de crenças e memória de trabalho, os módulos de raciocínio e uma base de comunicações. Cada agente tem uma base de crenças e memória de trabalho, uma variedade de modos de raciocínio e uma base de comunicação (a interacção é realizada com mensagens públicas e privadas, de pedido, resposta e informação).

A tipologia dos agentes é variada. Por exemplo, [Genesereth e Nilsson 1987] propõem dois tipos, os agentes tropísticos que agem em resposta a um estímulo externo,

$$\langle S, T, A, \text{ver}, \text{fazer}, \text{agir} \rangle$$

onde S representa o conjunto dos estados externos, T é o conjunto de subconjuntos disjuntos tal que o agente é capaz de distinguir estados em partições diferentes, mas incapaz de distinguir estados na mesma partição, A é o conjunto de acções, e ver, fazer e agir são três funções:

$$\text{ver: } S \rightarrow T, \text{ fazer: } AxS \rightarrow S, \text{ agir: } T \rightarrow A$$

O segundo tipo, agentes histeréticos, diz respeito aos que possuem estados internos ou memória,

$\langle I, S, T, A, \text{ver}, \text{fazer}, \text{interno}, \text{agir} \rangle$

onde I é agora o conjunto de estados internos e as funções são: ver:  $S \rightarrow T$ , agir:  $I \times T \rightarrow A$ , e interno:  $I \times T \rightarrow I$ .

Existe um espaço de formas que se pode constituir a partir de módulos vulgares: sensores, percepção, cognição, acção e actuadores. Se nos concentrarmos apenas na capacidade reactiva o elemento cognição fica ausente, e o agente não pensa (reactivo). Duas funções são suficientes:

ver:  $S \rightarrow P$ , agir:  $P^* \rightarrow A$

Um agente baseado em estados  $\langle I, S, T, A, \text{ver}, \text{agir}, \text{próximo} \rangle$  é um passo seguinte, a caminho da deliberação plena, e as funções serão:

ver:  $S \rightarrow P$ , agir:  $I \rightarrow A$ , próximo:  $I \times P \rightarrow I$

Depois, surgem os agentes guiados por objectivos e os baseados na utilidade. Em livros clássicos de IA, como o de [Nilsson 1998] ou o de [Russell e Norvig 2003], adoptam-se mapas que fazem emergir a evolução dos agentes ao longo de um espectro de formas reactivo-deliberativo. Para se viajar nestes espaços temos de fazer escolhas entre privilegiar as formas orientadas para as tarefas ou para os objectivos, ou ainda o ênfase no conhecimento ou no comportamento. Também a selecção dos atributos (propriedades) dos agentes é importante para arrumarmos os seus tipos.

Por exemplo, podemos querer desenhar agentes em função de três aspectos: características, interacção e comportamento. Nas características costuma-se sublinhar o número, a uniformidade, os objectivos, a arquitectura e as capacidades (sensores, efectores, cognição). Na interacção temos de escolher a frequência, a persistência, o nível, o padrão (fluxo de dados e de controle), a variabilidade e o propósito. E, no comportamento, importa a previsibilidade, a acessibilidade e sabedoria, a dinâmica, a diversidade e a disponibilidade de recursos.

Ao conceber um agente temos sempre de especificar as suas necessidades, as suas restrições e as suas preferências. E, assim, é indispensável saber algo sobre as aptidões como a comunicação, poder, autonomia e adaptabilidade. Ou seja, um tipo de agentes depende das suas subclasses de comportamentos, isto é, para realizar uma certa tarefa um agente pode precisar de mobilidade, modo de resposta, autonomia, aprendizagem ou cooperação. Um agente colaborativo tem capacidade para cooperar, um agente interface tem capacidade para aprender, e um agente ideal pode combinar estas duas capacidades anteriores.

Não é o mesmo desenhar um agente para realizar uma função ou um papel: depende das suas propriedades, ou seja da representação e do raciocínio sobre as acções, os planos, os conhecimentos, ou do estado dos seus processos de interacção. E, assim, existe uma lista de atributos que pode ser mínima (autonomia, sociabilidade, reactividade, pró-actividade e persistência) ou máxima (mobilidade, aprendizagem, intencionalidade, veracidade, racionalidade, benevolência e estados mentais).

Por exemplo, podemos constituir um espectro de agentes atendendo à simulação ou à corporização física. O agente COG [Brooks e Stein 1993] defende a necessidade de um corpo para a emergência de comportamento do tipo humano e de conhecimento conceptual. O agente SOAR [Laird, Newell e Rosenbloom 1987] aponta para aprendizagem limitada ao armazenamento de experiências de resolução de problemas para uso futuro. O agente NEO [Cohen, Atkin e Oates 1997] sublinha a aprendizagem através da interacção e nenhuma necessidade de um corpo.

Após aprender os antecedentes causais de certos padrões de comportamento, um agente gera uma nova oportunidade de escolha. Para agir, precisa de força de vontade. Agir não é só fazer! Muito do que fazemos, e somos, é expresso e explicado em termos do que sentimos, acreditamos, desejamos, tencionamos, esperamos, receamos, etc. A compreensão do comportamento é feita em função de estados mentais, ie. as explicações de uma pessoa para agir [Bratman 1987].

Para caracterizar as acções e um comportamento de um agente recorreremos amiúde a abstracções denominadas estados mentais (Psicologia Popular), como as crenças, os objectivos, os desejos ou as intenções. As crenças dizem o que o agente imagina ser o estado do mundo. Os objectivos são os estados que o agente prefere. Os desejos são as preferências (motivações) do agente. As intenções são os objectivos ou os desejos que o agente escolheu para trabalhar.

“Atribuir crenças, livre arbítrio, intenções, consciência, habilidades, ou querer a uma máquina é legítimo quando uma tal atribuição expressa a mesma informação acerca da máquina daquela que é expressa sobre uma pessoa.” “É útil quando esta atribuição ajuda-nos a compreender a estrutura da máquina, o seu comportamento passado ou futuro, ou como repará-la ou melhorá-la.” [McCarthy 1978].

Existe uma variedade de lógicas BDI (sistemas formais) capazes de suportarem as especificações dos agentes, embora depois a sua tradução para a construção de arquitecturas computacionais (por exemplo, o dMars) não seja trivial e a sua simplificação seja frequente, podendo daí resultar uma traição da tradução.

Na construção da acção podemos distinguir dois tipos de raciocínio, o raciocínio teórico (RT), dirigido às crenças, e o raciocínio prático (RP), dirigido à acção.

O raciocínio prático pode ser decomposto em dois processos computacionais:

- 1) Decidir sobre que estado queremos atingir (deliberação); resultado: escolha.
- 2) Decidir como queremos atingir esse estado (raciocínio meios-fins); resultado: plano.

Existem assim dois níveis do raciocínio prático, onde a intenção aparece como atitude que controla a conduta:

1º Nível: as intenções e os planos anteriores colocam problemas e fornecem um filtro para as opções que são as soluções potenciais desses problemas.

2º Nível: as razões desejo-crença entram como considerações para serem depois pesadas (valores) na deliberação entre as opções relevantes e admissíveis.

Este esquema corresponde ao modelo BDI a partir do seguinte algoritmo básico [Wooldridge 2002]:

1. while true
2.     observe o mundo;
3.     actualize o modelo interno;
4.     delibere sobre qual a intenção que deve alcançar a seguir;
5.     use o raciocínio meios-fins para obter um plano para essa intenção;
6.     execute o plano
7. end-while

onde podemos descobrir os três componentes do ciclo de controle:

Função de revisão de crenças (brf):  $f(B) \times Per \rightarrow f(B)$

Processo de deliberação (delibere):  $f(B) \rightarrow f(I)$

Raciocínio meios-fins (plano):  $f(B) \times f(I) \rightarrow \text{plano}$

#### 4-Exemplos

A simulação social com instalações de agentes começou a ser desenvolvida em Portugal (Grupo de Inteligência Artificial do LNEC), no domínio do ensino e aprendizagem (em História e Matemática) e ainda nos anos 90, com um modelo muito simples concebido com Graça Gaspar, introduzido na secção anterior. Este modelo foi mais tarde aproveitado e potenciado por Castro Caldas para se abordar a interacção estratégica em mercados oligopolistas, em Economia, e, apesar da aproximação aos resultados da experimentação com sujeitos humanos, concluiu-se da necessidade de mecanismos de aprendizagem, porque os agentes artificiais não se adaptavam durante a dinâmica das interacções típicas de um mercado. Esta ideia foi mais tarde recuperada, no início deste século, durante a construção de um ambiente de aprendizagem (AMPLIA) para o diagnóstico médico [Flores et al 2003].

No âmbito do projecto europeu COSI, dedicado à Complexidade nas Ciências Sociais, desenvolveu-se um mundo de faz-de-conta [Schilperoord et al 2003], tendo como objecto os processos de inovação (descobrir uma oportunidade, conceber um novo produto ou serviço) ocorridos no Parque Tecnológico de Oeiras (TagusPark) recorrendo à bancada Swarm como ferramenta de construção. A ideia principal do modelo INTERSECTIONS foi ajudar os administradores de um parque tecnológico a testar intuições, a montar cenários “o-que-se” (“what-if”) e a prever o impacto das suas decisões, sem grandes investimentos. O modelo de simulação focou dois tipos de interacções entre os actores envolvidos no processo de inovação (empresas, universidades, laboratórios de investigação, trabalhadores), quer situados no interior ou no exterior do parque (parque industrial próximo). O primeiro tipo de interacções ligou-se directamente ao prosseguimento da inovação, em particular as estratégias e os comportamentos dos actores (compatibilidades) que interactuavam com o objectivo de actualizar as suas aptidões e tecnologias sob pressão para inovar: os produtos eram as inovações. O segundo tipo de interacções focou a rede de laços sociais entre os actores, em particular os seus encontros (as reuniões) e os possíveis impactos que deles podem resultar para a evolução dessa mesma rede: o produto era a sociabilidade. Ambas as interacções se interligaram, pois as colaborações

conduziam a novos laços ou a laços mais fortes entre os parceiros, e por outro lado esses laços implicavam a confiança entre os novos parceiros. Tais interações foram estudadas ao longo da dimensão geográfica (proximidade física, cultura), separando-se os aspectos locais (no interior do parque ou da empresa) dos aspectos globais (fora do parque). Recorreu-se a um grafo dinâmico (técnica para a visualização de redes em mudança e ao longo do tempo) combinado com estatísticas para observar a evolução das redes sociais em função do seu crescimento e dos agrupamentos engendrados, e assim dos processos de inovação, aqui considerados como trajetórias no espaço tecnológico. Do ponto de vista dos mecanismos sociais e cognitivos identificaram-se os seguintes, com interesse para o contexto geográfico no que respeita a inovação: actores, ligações sociais, encontros, acontecimentos, laços de confiança, padrões, agrupamentos e estratégias. As estratégias disseram respeito aos actores (pioneiro, imitação, colaboração, procura de parceiros) e aos acontecimentos (procura de parceiros, criação de ligações sociais, procura de participantes). Ficaram ainda por aprofundar os mecanismos com importância para gerir o contexto cultural [Schilperoord 2005].

A ferramenta INTERSECTIONS ofereceu um ponto de vista não trivial sobre a dinâmica espacial da inovação, nomeadamente no que respeitou às mudanças do tipo ascendente (base-topo), aos impactes das contingências e à emergência de um clima de inovação. Além disso, facilitou a resposta sobre as questões quanto à melhoria da interação entre os actores do parque, aos efeitos de mais interação no caso da emergência da inovação, às medidas de sucesso, à mistura óptima dos tipos de actores, e aos modos de alterar o comportamento de inovação das micro-empresas, de reactivo para pró-activo.

A actividade de simulação, em torno do mundos de-faz-de-conta, deve ser vista de modo mais amplo, assim como as várias aproximações realizadas a domínios de aplicação com interesse prático, como foi o caso dos edifícios inteligentes. Alguns problemas são demasiado complicados para admitirem soluções racionais e lógicas, e naturalmente podemos esperar que não existam respostas claras e apenas as intuições sirvam para continuarmos a reflectir sobre a sua resolução. A complexidade, aflorada aqui e ali, ao longo da última década e meia, primeiro em redor dos sistemas administrativos e depois em exercícios mais contidos (TagusPark), permitiu perceber que estamos perante sistemas constituídos por inúmeras partes muito simples que se assumem como todos articulados (corpos). E, como verificámos no estudo dos modelos e arquitecturas mentais, a complexidade é muito mais uma propriedade emergente da interação entre dois sistemas (ou espaços) do que um aspecto intrínseco de um sistema considerado no isolamento. A ideia da complexidade surge quando é difícil formular um comportamento global, e mesmo quando se conhece quase toda a informação sobre as suas componentes atómicas e as suas inter-relações, não tem nada a ver com tamanho, ignorância, variedade, descrição mínima e ordem, e exige medidas para darmos conta dos processos envolvidos. A complexidade está ligada ao número e variedade de componentes (entidades, processos, agentes), às ramificações condicionais, aos graus de encastramento, aos tipos de formas (estruturas, funções, organizações), e às propriedades dinâmicas (não lineares). Em suma, e como afirma Stephen Wolfram, “todos os fenómenos complexos são produzidos por regras simples, e existe uma regra simples no coração de todas as coisas”.

Os mecanismos que geram surpresas (caos, catástrofes, instabilidades, emergências) são responsáveis pela nossa incapacidade em fazer boas previsões. A surpresa é o que acontece quando o senso comum falha, e daí que nas Ciências da Complexidade tenhamos de arranjar bons



instrumentos não só para enfrentar a realidade, as regras, mas também as surpresas. Existem várias metodologias que nos ajudam a enfrentar o complexo, nomeadamente começando por fazer construções com a ajuda de boas fundações (fundamentos), depois, através de simulações, encetarmos explorações que permitam gerar reflexões e projecções. Na nossa linha de investigação [Coelho 2004], desde os anos 70, privilegiámos seguir da realidade (processos desconhecidos entre causas e efeitos) para os modelos formais (interacções de agentes entre comportamentos especificados e o resultado emergente da simulação), e finalmente para a intuição (sobre comportamentos e capaz de gerar previsões). Nesse esforço de aproximação à complexidade usámos as metáforas da descentralização e da evolução, e tivemos atenção aos aspectos da forma, variedade, mudança e proximidade, como por exemplo no caso de estudo da dinâmica da inovação.

A submissão aos impostos é um problema de um estado de direito que interessa resolver bem, pois disso depende o equilíbrio do orçamento geral e os investimentos públicos. Por isso, qualquer governo traça políticas que levem os contribuintes a não fugirem às suas obrigações, mantendo comportamentos e decisões compulsivas. O contexto desta investigação, dirigida por Luis Antunes desde 2005, apoia-se na simulação social e na teoria da decisão, e projecta-se no desenvolvimento de instalações baseadas em agentes computacionais [Antunes et al 2006]. Duas ideias ressaltam desta linha de I&D em fase de desenvolvimento: a simulação exploratória, cujo objectivo é construir dinamicamente uma teoria científica enquanto se obtêm esclarecimentos do problema através da simulação multi-agente, e a racionalidade heterogénea que permite observar a relação micro-macro (entre a mente individual, e o comportamento associado, e a dinâmica social) através da modelação das interacções sociais e também do estudo das trajectórias individuais. Repare-se que as políticas de tributação que promovam o cumprimento das obrigações dos contribuintes em geral são difíceis de erigir porque os problemas de decisão que se colocam às autoridades e aos indivíduos estão entrelaçados de modo muito complexo. O resultado das políticas públicas emerge a partir do conjunto complexo de regras e dos comportamentos sociais e individuais.

Do ponto de vista metodológico tudo se passa em redor do contribuinte, em particular da sua riqueza, dos seus ganhos, da sua reputação, e da pressão que é sobre ele exercida, quer do ponto de vista externo (Direcção Geral dos Impostos) ou do interno (avaliação social, aprovação individual, julgamento moral) para diferenciar os indivíduos, ou ainda de medidas como o dinheiro, o tempo, o poder, a equidade, o prazer, a utilidade, etc. Quanto às decisões elas estão dependentes da racionalidade multi-variada, situada e individual, onde a escolha se conjuga com a avaliação e a adaptação (cálculo da importância), em vez das habituais probabilidades e utilidades (cálculo utilitário da teoria dos jogos, baseado nos equilíbrios e nas optimizações). A racionalidade individual permite uma heterogeneidade social, a adaptação ocorre individualmente e produz mudanças sociais em face das mesmas condições, a avaliação individual depende dos valores individuais e sociais, e a comprovação de se pagar impostos, por um observador das simulações, está ligada ao esquema de escolha dos agentes individuais.

O problema da submissão dos impostos é geralmente enquadrado pelas finanças públicas, pelo cumprimento das leis, pelo desenho organizacional, pelo mercado de trabalho, e pela ética. A via da economia tradicional (e da teoria da decisão) falha em explicar o comportamento do mundo real, isto é, porque as pessoas são tão submissas e decidem pagar sempre todos os seus impostos (considerando que as penalizações monetárias e as probabilidades de auditoria são baixas). Por

isso, um estudo experimental poderá trazer explicações, conjecturas ou hipóteses novas. Qualquer instalação deverá ter em linha de conta a equidade, a eficiência, as penalizações, a detecção da evasão, as auditorias e os castigos, a balança e estrutura do mercado do trabalho. Em suma, o problema envolve o desafio racional colocado a cada pessoa e as consequências que daí resultam para o comportamento global da sociedade.

TESE: A via dos agentes para os sistemas complexos, enriquecida por uma perspectiva heterogénea da racionalidade, pode fornecer uma visão mais realista das verdadeiras motivações dos agentes.

A instalação experimental baseada em agentes serviu-se de uma pirâmide de modelos [Respício et al 2006], do problema da escolha, montados do modo seguinte: em baixo, a teoria normal (Ec0) e a história (Ec0), e depois subindo na estrutura temos os modelos da individualidade (Ec1), da adaptabilidade (Ec2), da sociabilidade (Ec3: percepção e interacção), e da heterogeneidade social (Ec4). Por exemplo, o modelo Ec0, referente aos agentes conscientes dos impostos, segue a teoria clássica e contém as seguintes assunções: a auditoria determinada pelas probabilidades permanece constante, nenhum limite para o número das auditorias, as regras de decisão para auditar são largamente conhecidas, e a punição apenas se concentra no ano corrente. O modelo Ec1, referente à individualidade de um agente, fixa um conjunto de características sobre a decisão dos agentes, tais como a ética (espaço da postura ética), a riqueza, o ritmo de consumo, ou a escolha flexível quanto a pagar ou a fugir (espaço de liberdade, cerne da autonomia).

O ambiente experimental em NetLogo 3.0 foi construído num quadro de 100x100, com 500 agentes, e 200 ou 2000 iterações. Obtiveram-se as seguintes conclusões ou esclarecimentos:

- A simulação forneceu a razoabilidade, e a heterogeneidade e a individualidade deram conta de realismo;
- Foi possível testar diferentes cenários, tais como melhorar a adaptabilidade ou introduzir interacções, graças a inserção de novos mecanismos de pôr ou tirar;
- A submissão aos impostos é um desafio à racionalidade;
- Comportamentos imitativos e subornos podem provocar um efeito multiplicador na submissão global;
- O desenho de políticas é fácil de testar graças à actuação em simultâneo sobre vários parâmetros;
- A produção de intuições e de explicações apoiou-se na geração de filmes, sobre o ecrã de computadores (o desfolhar de padrões ou o crescimento das experiências), sobre o crescimento das sociedades artificiais e das interacções sociais ocorridas entre diversos processos ao longo do tempo.

Em síntese, os problemas com a teoria das utilidades são conhecidos na Inteligência Artificial desde os anos 50, graças aos estudos de Herbert Simon sobre a racionalidade dos agentes (se alguma vez os agentes pudessem ser calculadores instantâneos, a utilidade forneceria uma definição de racionalidade). O prémio Nobel atribuído a Kahneman, em 2002, relançou novamente a discussão do problema da escolha (infelizmente, não foi resolvido pela teoria das utilidades) e projectou-a sobre a mente de um agente: que modelo escolher quando mesmo a

arquitectura BDI é incapaz de responder pelo mecanismo do poder de um agente, a sua vontade: os agentes actuam apenas graças à sua vontade, dependendo fortemente das suas motivações.

## 5-Conclusões

Como se podem entender os processos reais que governam os comportamentos individuais e os globais? Como podemos interpretar melhor os resultados e propor trajectórias alternativas? Estas duas perguntas “simples” podem ser respondidas através da construção de melhores modelos dos agentes (controlando os comportamentos dos agentes e da sociedade através da influência do seu sistema motivacional, ou seja mexendo nos mecanismos da escolha e da autonomia) e de instalações baseadas em agentes via a simulação exploratória.

A modelação computacional baseada em agentes vem alterando a face das ciências sociais, e não só, através de respostas seguras para os problemas que desafiavam as vias tradicionais. Esta nova técnica permite que as ciências encontrem uma nova norma de explicação, através da qual crescemos o fenómeno do nosso interesse numa sociedade de agentes interactivos, heterogéneos, racionalmente limitados, e representados por objectos.

Esta via para confrontar a complexidade (epidemias, passagem à reforma, violência civil, emergência de classes económicas) baseia-se na produção de conhecimentos profundos (“insights”), via a geração ou o crescimento de explicações, pois em muitos casos as respostas não são possíveis. A simulação é um terceiro modo de fazer ciência que contrasta com as vias clássicas da dedução ou da indução. Como a dedução, começa com um conjunto de assunções explícitas. Mas ao contrário da dedução, não demonstra teoremas. Em vez disso, a simulação gera dados que podem ser analisados indutivamente. Ao contrário da indução típica, os dados simulados provêm de um conjunto de regras, especificadas rigorosamente, e não da medida directa do mundo real. Enquanto a indução pode ser usada para achar padrões nos dados, e a dedução pode ser usada para retirar consequências das assunções, a modelação através da simulação pode ajudar a intuição.

## Bibliografia

Antunes, L., Balsa, L., Respício, A. L., Coelho, H. (2006). Autonomous Inspectors in Tax Compliance Simulation. Proceedings of the European Meeting on Cybernetics and Systems Research (EMCSR'06), International Symposium on Agent Based Modeling and Simulation, Viena, April 18-21.

Bratman, M. E. (1987). Intentions, Plans and Practical Reasoning. Harvard University Press, London.

Brooks, R. A. e Stein. L. A. (1993). Building Brains for Bodies. MIT AI Lab Memo 1439.

Coelho, H. (2004). Explorações, Ligações e Reflexões (Rede de 30 anos de pesquisas em IA com sentido prático). Fundação Calouste Gulbenkian, Série de Manuais Universitários.

Cohen, P. R., Atkin, M. S. e Oates, T. (1997). Neo: Learning Conceptual Knowledge by Sensorimotor Interaction. Proceedings of The First International Conference on Autonomous Agentes.

Epstein, J. M., Axtell, R. L. (1996). Growing Artificial Societies: Social Science from Bottom-Up. Brookings Institution Press e MIT Press.

Epstein, J. M. (2007). Generative Social Science, Studies in Agent-Based Computational Modeling. Princeton University Press.

Eusébio, A. M. (1995). Ambiente de Aprendizagem em Matemática Apoiado em Agentes Autónomos Inteligentes. Tese de Mestrado, ISEG/UTL.

Eusébio, A. M., Coelho, H., Costa. E. (1995). A Closer Look to Artificial Learning Environments. Proceedings of 7th Portuguese Conference on Artificial Intelligence (EPIA-95), Funchal, 3-6 October, Springer-Verlag Lecture Notes in Artificial Intelligence 990, pp. 129-142.

Flores, C., Vicari, R., Seixas, L., Glutz, J., Coelho, H. (2003). Projecto AMPLIA, Uso da Informática na Educação Médica. Actas do II Simpósio Brasileiro de Qualidade de Software (SBQS'2003), III Workshop de Informática Médica, Fortaleza (Brasil), 1-3 Setembro.

Gaspar, G. (1990). Communication and Belief Changes in a Society of Agents. Proceedings of the 5th Rocky Mountain Conference on AI, Las Cruces, June.

Gaspar, G. (1994). Modelização de Agentes Inteligentes Autónomos e Integrados em Sociedades de Agentes. Tese de Doutoramento, FCUL.

Genesereth, M., Nilsson, N. (1987). Logical Foundations of Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann.

Laird, J. E., Rosenbloom, P. S. (1992). Pursuit of Mind... The Research of Allen Newell. AI Magazine, Vol. 3, Nº. 4, Winter.

McCarthy, J. (1979). Ascribing Mental Qualities to Machines. Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Memo AIM-326, Stanford University, March.

Nilsson, N. (1998). Artificial Intelligence: A New Synthesis. Morgan Kaufmann.

Respício, A. L., Antunes, L., Balsa, J., Coelho, H. (2006). Decision Support for Public Tax Policies through Social Simulation. Proceedings of the IFIP Tc8/8.3 WG International Conference on Creativity and Innovation in Decision Making and Decision Support (CIDMDS), London, June 28-July 1, and Adam F, Brezillon P, Carlsson S and Humphreys P (eds.), Creativity and Innovation in Decision Making and Decision Support, Vol 2, Ludic Pub.

Russell, S., Norvig, P. (2003). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice Hall, 2nd. Edition.

Schilperoord, M., Caldas, J. M. C., Coelho, H. (2003). INTERSECTIONS: a management tool for science and technology parks. Proceedings of XX IASP World Conference on Science and Technology Parks, Lisbon, June 1-4.

Schilperoord, M. (2005). Complexity in Foresight, Experiences with INTERSECTIONS: An Agent-Based Simulation Workbench to Help Achieve Adaptiveness in Strategic Planning. PhD Thesis, Erasmus University, Rotterdam.

Wooldridge, M. (2002). Introduction to MultiAgent Systems. John Wiley.