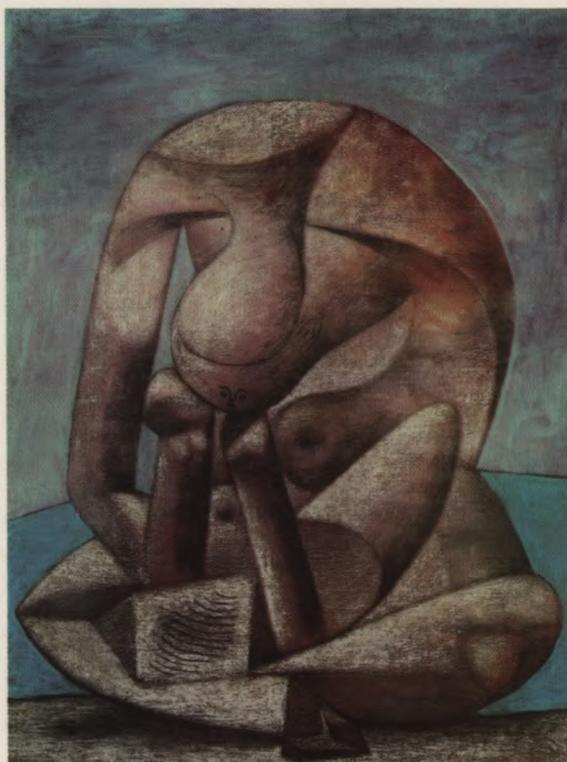


REVISTA DE  
**HISTÓRIA**  
**DAS IDEIAS**



O LIVRO E A LEITURA

VOLUME 20, 1999

INSTITUTO DE HISTÓRIA E TEORIA DAS IDEIAS  
FACULDADE DE LETRAS DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

## O SOCIAL EMERGENTE

### Sistemas adaptáveis complexos e interpretação histórica\* \*\*

#### Introdução

O objectivo deste artigo é apresentar um conjunto de conceitos, oriundos do campo das Ciências da Computação, que permite abordar o funcionamento de sistemas compostos por agentes que se adaptam e evoluem. Estes sistemas designam-se por *sistemas adaptáveis complexos*. Inicialmente justificaremos o interesse interdisciplinar deste conceito, em particular no que toca à compreensão da evolução biológica e social. Veremos que um conjunto variado de fenómenos estudados em diferentes ciências se centra à volta das noções de *informação, ordem e complexidade*. Pareceu-nos útil retomar as definições que a teoria da informação fornece para estes conceitos de uso corrente, possibilitando uma abordagem mais formal do nosso tema.

Uma parte considerável deste artigo apresenta uma simulação computacional de um fenómeno *emergente*. Trata-se de uma situação em que se constata o aparecimento de uma estrutura com características *sociais* a partir da interacção de entidades de natureza

\* Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra e Centro de Informática e Sistemas da Universidade de Coimbra.

\*\* Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia sob o programa Praxis. Agradeço ao Doutor Carlos Fiolhais, do Departamento de Física da Universidade de Coimbra, os valiosos comentários feitos a uma versão preliminar deste texto.

individualista. Esta experiencia permite demonstrar que sistemas compostos por agentes animados por regras muito simples podem evoluir no sentido de criarem estruturas complexas, por um processo de auto-organização. Veremos, por exemplo, surgir estruturas persistentes: formas criadas espontaneamente pela interacção individual e que sobrevivem aos indivíduos, enquadrando e moldando o comportamento das gerações seguintes. Poderemos também observar o efeito do processo de auto-organização na evolução demográfica de populações de agentes artificiais, com destaque para o modo como se ultrapassam as crises de mortalidade e se atinge um equilíbrio entre população e recursos. O nosso modelo está longe da sofisticação permitida pela teoria dos sistemas adaptáveis complexos. Assim completaremos a parte experimental com a apresentação das principais características desses sistemas e dos processos que operam no seu contexto.

A parte final do artigo procura retirar algumas conclusões de ordem metodológica e interpretativa para o estudo da evolução das sociedades humanas, arriscando uma ponte entre a teoria e as simulações, por um lado, e a prática historiográfica por outra. Essa tentativa assume a forma de uma enumeração de objectivos que podem orientar a interpretação dos fenómenos históricos.

*O contexto: porque aumenta a complexidade da vida e das sociedades?*

O estudo dos sistemas de agentes tornou-se uma área intrinsecamente interdisciplinari). São inúmeras as ciências que têm de analisar sistemas compostos por agentes com capacidades de adaptação: a biologia, a economia, a sociologia ou o estudo de grandes redes informáticas como a Internet. A progressiva construção de teorias e modelos decorrentes de uma base formal comum em disciplinas muito diversas revela uma necessidade partilhada de um paradigma novo.

Um primeiro passo para esta comunhão de meios decorreu em consequência da formulação das teorias sobre o caos e a auto-

(<sup>1</sup>) Uma das instituições de referência nesta área é o Santa Fe Institute, nos E.U.A., uma organização privada sem fins lucrativos dedicada ao estudo dos sistemas complexos numa perspectiva interdisciplinar. Ver a informação disponível em <http://www.santafe.edu>.

organização. Estas teorias quebraram uma imagem da Natureza feita de uma ordem imutável e expressa por leis que exprimem a regularidade eterna do Universo, onde o tempo é uma variável reversível. A atenção aos fenómenos caóticos, aos fenómenos marcados pelo tempo, à emergência da ordem no meio de desordem, aproximaram as ciências da Natureza das problemáticas das ciências sociais e humanas. Esta primeira aproximação tem uma dupla vertente: compreendeu-se que a Natureza não é uma entidade regular e previsível, passível de uma apreensão completamente determinística; verificou-se também que dentro da Natureza existem fenómenos que demonstram uma tendência da matéria para a organização em circunstâncias que, apesar de particulares, são frequentes. Diminuiu uma desqualificação epistemológica do biológico, do humano e do social ao descobrir-se que a incerteza e a imprevisibilidade eram inerentes a muitos fenómenos físicos-químicos<sup>(2)</sup>.

Existe contudo uma diferença entre os fenómenos de auto-organização no mundo físico e os sistemas de agentes adaptáveis que encontramos ao nível da biologia, da etologia ou da sociologia. Essa diferença reside basicamente numa tendência constante e sustentada para o aumento da complexidade que parece ser característica da vida.

O exemplo da genética é paradigmático. A descoberta da molécula do ADN é, para além de um feito científico notável, um dos grandes momentos unificadores da ciência contemporânea. O substrato físico-químico da vida fica esclarecido: a molécula funciona como um programa que incorpora o resultado da evolução e determina, em todos os pormenores, a construção do ser vivo. As leis da hereditariedade, há muito tempo conhecidas, são finalmente compreendidas. Velhos problemas de finalismo desaparecem. Mas novas questões surgem em seu lugar: que significado tem dizermos

<sup>(2)</sup>A ideia de que novas pontes entre as ciências sociais e as ciências da natureza são possíveis em virtude da evolução do próprio conceito de Natureza é o tema de: Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *A Nova Aliança: metamorfose na ciência*, Lisboa, Gradiva, s.d., [ed. original francesa de 1980]. Pelo interesse histórico ver também: Benoit Mandelbrot, "Sur l'épistémologie du hasard dans les sciences sociales. Invariance des lois et vérification des prédictions", in Jean Piaget (dir.), *Logique et connaissance scientifique*, Paris, Gallimard (Encyclopédie de la Pléiade), 1976, pp. 1097-1113.

que uma molécula funciona como um "programa" semelhante a um algoritmo informático? Como surge um "programa" num mundo de matéria sem vida? Porque mecanismos específicos um tal programa assume a capacidade de se tornar mais complexo, com capacidade de captar de forma sofisticada a interacção do ser vivo com o meio? O que significa "informação" para uma molécula? A problemática da vida desloca-se assim para um mundo de questões ligadas a conceitos de informação, de algoritmo, e complexidade crescente<sup>(3)</sup>.

Um momento decisivo e de certo modo revolucionário na direcção de uma abordagem unificante dos sistemas de agentes foi dado pelo desenvolvimento dos algoritmos genéticos, já nesta década, por John Holland<sup>(4)</sup>. A expressão "algoritmos genéticos" designa um tipo de abordagem em programação de computadores que se inspira nos processos operantes na evolução dos seres vivos. Define um modo de criação de programas que resolvem problemas por um processo em tudo semelhante ao da selecção natural: os programas reproduzem-se com pequenas variações aleatórias e as versões mais aptas a resolver o problema em causa têm mais probabilidades de se reproduzirem, criando uma descendência que combina as capacidades dos progenitores. Num ambiente de competição a solução mais eficaz vai surgindo por adaptação e selecção<sup>(5)</sup>.

A formalização trazida pela teoria dos algoritmos genéticos veio acrescentar um novo plano na compreensão dos processos evolutivos. Depois de sabermos que no centro da vida está um programa codificado na molécula do ADN, passamos agora a ter uma ideia cada vez mais clara de como programas com características semelhantes podem ser escritos e progressivamente melhorados. Simplificando, podemos dizer que a principal contribuição dos

<sup>(3)</sup> As questões levantadas pela biologia pós-ADN, entre as quais o papel da teoria de informação, a auto-organização e sobretudo a questão crucial de porque é que a evolução tem um sentido tão claro orientado para a complexidade crescente são tratadas em: Henri Atlan, *Entre le cristal et la fumée: essai sur l'organisation du vivant*, Paris, Le Seuil (col. Points), 1986.

<sup>(4)</sup> Os princípios básicos dos algoritmos genéticos foram apresentados por John Holland, numa obra fascinante destinada a um público não especialista: *A Ordem Oculta: como a adaptação gera a complexidade*, Lisboa, Gradiva, 1997 [ed. original de 1995].

<sup>(5)</sup> A teoria será apresentada com mais detalhe adiante.

algoritmos genéticos é de fornecer, pela primeira vez, uma explicação clara dos mecanismos de processamento de informação que permitem evolução e aumento de complexidade ao mesmo tempo que demonstram a sua extraordinária eficácia<sup>(6)</sup>.

A utilização do termo "algoritmo genético" prende-se com o notável paralelismo existente com os mecanismos presentes no centro da vida, tais como mutação e cruzamento de genes na reprodução sexual. Contudo o formalismo tem aplicação muito geral e tem sido demonstrada a sua eficácia em muitos campos. A nova abordagem atinge um detalhe muito grande na descrição dos processos evolutivos enquanto mecanismos de processamento de informação, ou seja, enquanto algoritmos. É possível então elaborar modelos computacionais que simulam com crescente sucesso processos complexos de evolução. Toma-se assim progressivamente mais fácil reproduzir um processo evolutivo em computador. O formalismo é particularmente eficaz a tratar sistemas de agentes que se adaptam uns aos outros.

Do ponto de vista das metodologias da programação, este

(6)Jean Piaget, em 1976, identificava a necessidade de entender melhor o mecanismo pelo qual o processo de adaptação ao meio, realizado pelo indivíduo, poderia inscrever-se no código genético. Por outras palavras, como se poderia imaginar um retorno do fenotipo sobre o genotipo. De facto, é difícil conceber que mutações puramente ocasionais provoquem organismos progressivamente mais complexos, uma vez que não existe nenhuma prova de inscrição no ADN de caracteres adquiridos pelos indivíduos. Seria necessário, por isso, uma "terceira via" entre o lamarckismo (que admite a transmissão de aptidões adquiridas) e o neo-darwinismo. Piaget propunha, a nível puramente hipotético e por analogia aos processos cognitivos, um sistema de recompensas e inibições que fluiria do meio exterior em direcção ao ADN. Na sua proposta existiria uma cadeia de mensagens desde o código genético até à periferia do organismo, onde a reacção com o meio exterior se processa. O resultado das acções do indivíduo desencadeariam mensagens em sentido inverso, inibidoras ou estimuladoras, que, não modificando o ADN, uma vez que se considerava isso impossível, provocariam uma reacção criadora de um novo equilíbrio. Esta hipótese não anda muito longe de certas características dos algoritmos genéticos, nomeadamente o modo como se ajustam cadeias de mensagens em função das consequências das acções que se encontram no seu término. Jean Piaget, "Les deux problèmes principaux de l'épistémologie biologique", in Jean Piaget (dir.), *Logique et connaissance scientifique*, Paris, Gallimard (Encyclopédie de la Pléiade), 1976, pp. 893-923.

avanço traz uma nova forma de abordar problemas antigos. Onde anteriormente se procuravam soluções genéricas para determinados problemas, que supunham uma análise prévia da lógica subjacente, criam-se agora programas que têm a capacidade de partir de uma abordagem inicial minimalista e evoluírem até soluções extremamente eficazes para problemas particulares, por um processo adaptativo em tudo semelhante ao da selecção natural. A Inteligência Artificial, ramo da Ciências da Computação que se dedica à reprodução de processos mentais de alto nível, passa assim de uma fase onde se procurava formalizar o conhecimento humano de forma transmissível a um computador, para uma fase em que se entende a inteligência como o resultado da interacção de entidades autónomas<sup>(7)</sup>.

Mas, mais interessante do que o impacto conseguido directamente pelas metodologias de programação, é a capacidade destes formalismos de lançarem nova luz sobre velhas questões caras às mais variadas ciências. O princípio é similar ao que operou nas metodologias da programação: o objectivo deixa de ser conseguir explicações gerais sob a forma de grandes leis, para residir na tentativa de compreender a interacção de numerosos agentes animados por regras.

O que une todas as disciplinas que actualmente se sentem atraídas por estas propostas é o facto de o seu objecto de estudo conter sistemas complexos de agentes que evoluem por adaptação. O termo "agente" é utilizado para unificar entidades tão díspares fenomenologicamente como os neurónios, as células do sistema imunitário, os agentes económicos, os indivíduos em sociedade, as comunidades

(7)Para uma visão de síntese ver: Jacques Ferber, *Les Systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*, Paris, InterEditions, 1995. Esta obra é uma introdução extremamente útil à compreensão detalhada dos sistemas de agentes. Apesar de bastante pormenorizada e útil para quem deseje trabalhar com modelos específicos, adopta uma abordagem conceptual e pouco tecnicista que lhe dá um interesse geral. Justifica-se pienamente a definição de público alvo feita pelo autor: "Cet ouvrage s'adresse tout d'abord à des professionnels de l'informatique non spécialistes de la question qui désirent avoir un point de vue synthétique sur ce domaine. Il s'adresse aussi à des non-informaticiens spécialistes des sciences sociales ou des sciences de la nature qui veulent utiliser les systèmes multi-agents pour modéliser des comportements naturels et d'étudier l'émergence de phénomènes complexes." p. 3.

dentro de sociedades alargadas, etc. Todos estes agentes têm em comum o facto de agirem com base em informação recolhida do exterior, segundo conjuntos de regras que evoluem ao longo do tempo por um processo adaptativo. A informação disponível a um agente é normalmente incompleta, imperfeita e local<sup>(8)</sup>. Interagindo em sistemas, os agentes adaptam-se não só a um meio ambiente mas também às acções recíprocas e aos esforços de adaptação dos outros agentes, numa rede de interações que justifica a designação de "sistema adaptável complexo". Assim o sistema imunológico, o sistema nervoso central, os ecossistemas, a Internet, os mercados, a economia mundial, as cidades, as nações, a civilização no seu conjunto, são exemplos de "sistemas adaptáveis complexos", redes de agentes que se adaptam continuamente ao meio e às acções dos outros agentes. Apesar da analogia com os processos biológicos, que é imanente na teoria dos algoritmos genéticos, as áreas de aplicabilidade são muito vastas e novas aplicações continuam a ser descobertas ou propostas.

A capacidade de modelar estes sistemas e criar simulações virtuais dos processos em causa não é apenas resultado de um salto tecnológico na capacidade das máquinas que processam informação. Pelo contrário, a mutação é de natureza essencialmente teórica. Estamos perante um daqueles momentos em que um conjunto de conceitos novos, um novo paradigma, provoca uma dramática redução da aparelhagem conceptual necessária para analisar determinados aspectos da realidade. Há, como veremos, uma aposta metodológica em manter uma distância grande entre a simplicidade das causas e a complexidade dos efeitos. De facto é essa distância que acaba por ser o verdadeiro objecto desta corrente epistemológica. Conseguir muito a partir de pouco, é mesmo uma das definições informais de um conceito chave: *emergência*.

Para trazer esta exposição a um nível mais concreto necessitamos de precisar o significado de alguns conceitos.

P) Por "informação local" expressamos o facto de os agentes terem acesso a informação directamente relacionada com a sua esfera de acção e nem sempre, ou mesmo raras vezes, terem acesso a informação global, como as características gerais do sistema em que estão inseridos.

### Conceitos

Alguns dos conceitos com que iremos lidar têm significações correntes e são de utilização frequente no discurso das ciências sociais, incluindo a História. Trata-se de palavras tão comuns como "informação", "ordem" e "complexidade". Outras, menos frequentes, não estão contudo ausentes do discurso comum destas disciplinas, como é o caso de "entropia", "caos" ou "emergência". Como é evidente, encontramos em todas as áreas teóricas que há muito batalham pela necessidade de aplicar estes conceitos de forma interdisciplinar - podemos citar Edgar Morin e Ilya Prigogine, para juntar dois exemplos de disciplinas afastadas, a sociologia e a química<sup>(9)</sup>. Importa-nos mostrar aqui que estes conceitos receberam, progressivamente, uma definição formal decorrente de teorias matemáticas e físicas relativas à informação e foram aprofundados dentro de algo que progressivamente vai surgindo como uma disciplina transversal, que toca muitas áreas: a ciência da complexidade. Iremos assim explicitar os conceitos com um mínimo de rigor que pensamos lhes dá uma nova operacionalidade.

### Informação e incerteza

O conceito de informação ocupa um lugar central em todas as abordagens formais dos fenómenos da vida e do social, desde a molécula de ADN à especificidade cultural dos seres humanos.

<sup>(9)</sup> Em relação a Edgar Morin há que assinalar, por um lado, o seu esforço em alicerçar uma teoria sociológica num conceito muito alargado de "sociedade", em que as entidades mais primitivas capazes de comportamento social não podem ser ignoradas e, por outro, uma abordagem onde o determinismo físico é tratado a um nível verdadeiramente fundamental, com o reconhecimento dos constrangimentos trazidos ao estudo das sociedades pelas grandes leis fundamentais da matéria, como a do aumento da entropia, que veremos mais adiante. Uma reedição de alguns estudos importantes de Morin concentra o essencial do seu pensamento nesta área: Edgar Morin, *Sociologia*, Lisboa, Publicações Europa-América, 1998 [a partir da edição original francesa, revista no mesmo ano]. Para o que nos ocupa destaca-se: "Um sistema auto-organizador", pp. 76-94 e "Das sociedades da natureza à natureza das sociedades humanas", pp. 95-113. Ver também: Carlos Fiolhais, "Morin e a auto-organização", *Cadernos de Filosofia*, n.º 3-4, Fevereiro de 1991, republicado em Carlos Fiolhais, *Universo, Computadores e tudo o resto*, Lisboa, Gradiva, 1994, pp. 65-86.

Informação é tudo o que reduz a nossa incerteza sobre algo. Sempre que um determinado acontecimento tem vários desenlaces possíveis, como, por exemplo, lançar uma moeda ao ar, "informação" é aquilo que necessitamos para saber qual dos desenlaces de facto ocorreu. Um desenvolvimento fundamental deste conceito foi a sua quantificação nos anos 40 por Claude Shannon, o fundador da moderna teoria da informação<sup>(10)</sup>.

A quantidade de informação mede o grau em que a incerteza é reduzida e exprime-se na unidade bit. Um bit é a unidade mínima de informação possível e corresponde a uma redução de incerteza de 50%. No caso do lançamento de uma moeda ao ar, a nossa incerteza sobre o lado em que cai a moeda baseia-se no facto de haver dois desenlaces possíveis (cara ou coroa). Um bit de informação reduz essa incerteza em 50%, de dois desenlaces possíveis para um real, fazendo desaparecer a incerteza. Dizemos, por isso, que a quantidade de informação envolvida num lançamento de moeda ao ar, em que nos interessa apenas saber sobre que lado cai a moeda, é de um bit. Do mesmo modo um acontecimento com quatro desenlaces possíveis envolve dois bits de informação, um com oito desenlaces, três bits de informação, etc.<sup>(11)</sup>.

Vale a pena precisar um pouco mais a relação entre acontecimento, incerteza e informação. Quando dizemos que o lançamento de uma moeda ao ar envolve um bit de informação estamos na verdade a dizer o seguinte: para comunicar, ou armazenar, o resultado do lançamento, é necessário um bit de informação. Dito

<sup>(10)</sup> Sobre o conceito de informação ver: David Ruelle, *O acaso e o caos*, Lisboa, Relógio de Água, 1994 [ed. original francesa de 1991], pp. 159-166. Murray Gell-Man, *O Quark e o jaguar: aventuras no simples e no complexo*, Lisboa, Gradiva, 1997, pp. 49-67 [ed. original inglesa de 1994]. Warren Weaver, "A Matemática da comunicação", in David M. Messick (ed.), *O pensamento matemático nas ciências do comportamento [27 estudos publicados no Scientific American]*, Rio de Janeiro, ed. Rennes, 1973 (ed. original inglesa de 1968). O texto fundador é: C.E. Shannon, "A Mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal*, vol. 27, Julho 1948, pp. 379-423, Outubro de 1948, pp. 623-656.

<sup>(11)</sup> Se designarmos por N o número de desenlaces possíveis de um acontecimento então a quantidade de informação envolvida é calculável pela fórmula:  $I = \log_2 N$

ainda de outro modo: uma mensagem sobre o resultado de um lançamento de moeda ao ar tem o comprimento de um bit.

O conteúdo de informação de uma mensagem não diz respeito à importância do seu significado. Paradoxalmente, o conceito de informação é completamente desprovido de considerações sobre o sentido subjacente à informação. Relaciona-se sim com o número de mensagens possíveis numa dada situação. No nosso exemplo só existem duas mensagens possíveis - logo, a quantidade de informação de cada mensagem é um bit.

Outro aspecto importante a realçar é o carácter convencional da noção de informação quando referida a um acontecimento real. Os acontecimentos reais não possuem nenhuma quantidade de informação intrínseca. O conceito que estamos a explicar só é aplicável quando, num acontecimento dado, é focada uma faceta do acontecimento e definidos os estados possíveis sobre os quais se baseia nossa incerteza. O mesmo lançamento de moeda pode ser focado não em função da face que fica para cima mas do ponto de uma superfície plana onde a moeda cairá. Em função do tamanho da superfície e do grau de precisão com que pretendermos conhecer a posição final da moeda, é possível calcular a dimensão da nossa incerteza face ao acontecimento "lançar moeda ao ar", que passa, de facto, a corresponder à questão: "onde cai a moeda lançada ao ar?". Essa incerteza, e por isso a quantidade de informação necessária para a anular, será muito maior do que a associada à questão mais simples ("cara" ou "coroa").

Em conclusão, o conceito de informação está sempre associado a uma representação concreta do real que pré-define o conjunto de estados pertinentes para um acontecimento e por isso o número de mensagens possíveis que o descrevem. Para cada fragmento do real, o número de estados pode variar de muito poucos até um número imensamente grande. Esta variação é por vezes designada por "granularidade" da descrição do real, e é uma grandeza associada ao observador.

A quantificação da informação é algo que implica a existência de um receptor e um emissor e é aplicada a canais que transmitem mensagens ou a dispositivos de armazenamento de mensagens como a memória. É por isso que a unidade bit, e os seus múltiplos mais comuns como bytes (8 bits), quilobytes (1024 bytes), megabytes (1024 quilobytes), e gigabytes (1024 megabytes), povoaram a linguagem comum, associadas às capacidades de armazenamento de informação

dos computadores e dispositivos periféricos ou às velocidades de transmissão das vias de comunicação de informação digital (onde a quantidade de informação é dividida pelo tempo de transmissão para obter a velocidade expressa em bits por segundo, ou unidades múltiplas desta).

### *Informação, entropia, e conteúdo algorítmico da informação*

É comum associar o conceito de informação acima descrito com o conceito de entropia. Esta associação é importante porque a entropia remete para a famosa segunda lei da termodinâmica: "a entropia do Universo tende a aumentar". Este princípio introduz aquilo que os físicos designam por "flecha temporal", um sentido no modo como o tempo flui. Assim, uma associação entre os conceitos de "entropia" e "informação" permitiria introduzir uma dimensão temporal no modo como a informação varia, aspecto relevante porque enquadra o papel da vida e do social, a que o conceito de informação está ligado, na evolução do mundo físico tal como é determinado por um dos princípios fundamentais da física<sup>(12)</sup>.

(12) Sobre este assunto ver, para além dos textos de Morin e Atlan já referidos, o capítulo intitulado "As setas do tempo", da obra de Murray Gell-Man, *O quark e o jaguar, cit.*, pp. 238-256. O estatuto do "tempo" em física não pode deixar de fascinar um historiador, para quem a temporalidade é a evidência primeira e a condição mesmo da sua ciência. As grandes leis da física são neutras em relação ao tempo, com excepção da lei do aumento de entropia, referida no texto. Por exemplo, as leis newtonianas da mecânica celeste funcionam do mesmo modo se o tempo for invertido. O "filme" do movimento dos corpos celestes que Newton estudou podia ser passado de trás para diante sem que se percebesse a diferença. Assim o universo dos físicos está repleto de leis que explicam fenómenos regulares mas não explicam porque é que o tempo flui num determinado sentido. As propriedades da matéria que implicam que o tempo flui em determinada direcção, não sendo reversível nem anulável, são cuidadosamente enumeradas (são as "setas do tempo", apontando numa direcção específica), porque servem para fundamentar a coisa mais evidente do mundo: que existe passado, presente e futuro, por esta ordem. É como se um dos objectivos da compreensão da Natureza fosse anular o tempo como uma consequência da imperfeição do nosso conhecimento. Como escreveu Einstein, quando morreu o seu amigo Besso: "Michele precedeu-me de pouco para deixar este mundo estranho. Isso não tem importância. Para nós, físicos convencidos, a distinção entre passado, presente e futuro não é mais do que uma ilusão, ainda que tenaz"

A entropia pode ser vista como uma medida da quantidade de desordem de um sistema. Quando se diz que a entropia do universo tende a aumentar diz-se que o grau de desordem ou indiferenciação do universo tende a aumentar. Podemos dizer que a entropia aumenta porque a desordem é mais provável que a ordem. Um macaco pressionando ao acaso um teclado produz um texto sem sentido. Nenhuma lei da física seria violada se, por esse processo, o macaco produzisse uma obra literária. Podemos mesmo supor que se pudéssemos esperar uma eternidade, o macaco acabaria por produzir um texto com sentido. Só que a elevada improbabilidade desse acontecimento garante-nos que o resultado normal será uma sequência desordenada de letras. De todas as sequências possíveis de letras que se possam imaginar, só uma ínfima parte corresponde a um texto com significado. Todas as outras sequências serão conjuntos sem sentido de letras. A desordem é mais provável do que a ordem.

A tendência de um sistema é evoluir no sentido de atingir um equilíbrio energético. A parte quente do sistema aquece necessariamente a parte fria, arrefecendo por sua vez. Pelas trocas de calor entre ambas as zonas o sistema evolui para um estado de equilíbrio, ou seja, a entropia do sistema tende a aumentar. Para impedir ou reverter o processo de indiferenciação térmica é necessário introduzir nova energia no sistema, aquecendo uma parte e arrefecendo outra. Mas, ao fazê-lo, o sistema em questão deixou de ser um sistema isolado. Qualquer baixa de entropia no sistema inicial é compensado pelo aumento de entropia de um sistema mais alargado.

Isso leva-nos a uma conclusão importante: a entropia pode baixar dentro de um sistema que evolui para um estado de maior organização, porque a entropia do sistema mais geral que inclui este aumenta de forma a manter verdadeira a segunda lei da termodinâmica. Assim, situações como o aparecimento da vida ou qualquer outro tipo de fenómeno de tipo auto-organizativo não violam a tendência geral do universo para a indiferenciação ou desorganização. São, contudo, situações circunscritas e que necessitam de um

(citado por Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *ob. cit.*, p. 373). Richard Feynman tem páginas fascinantes sobre este problema ("La distinction entre le passé et le futur", in *La nature de la physique*, Paris, Seuil, s./d., pp. 129-150). O estudo dos fenómenos caóticos e de auto-organização contribuiu para reintroduzir o tempo na física - este é um dos pontos centrais da obra de Prigogine.

fluxo contínuo de energia do exterior do sistema para se poderem perpetuar. Continuam, não obstante, a ser situações de elevada improbabilidade. É necessário explicar, para além da improbabilidade inicial do seu aparecimento, porque existe uma tendência tão clara e forte para o aumento da complexidade na vida.

Um dos problemas teóricos que se coloca é de compatibilizar a tendência manifesta da vida para criar estruturas cada vez mais complexas, com a tendência do universo para uma desordem crescente. O conceito de informação tem sido utilizado para tratar esse problema.

Podemos considerar "informação" e "entropia" associadas directamente. Nesta perspectiva o número de mensagens possíveis para descrever um sistema poderia ser identificado com o número de estados possíveis do sistema. Num caso simples, em que o número de mensagens é pequeno, diríamos que o grau de desordem do sistema é baixo. Num caso em que sejam possíveis muitas mensagens diferentes diríamos que a entropia é elevada<sup>(13)</sup>. Deste modo a informação é o veículo para contrariar, localmente, o aumento da entropia do universo. Designa-se então a informação por "neguentropia", entropia negativa<sup>(14)</sup>.

Os conceitos de informação e entropia são úteis para distinguir diferentes tipos de mensagens. Suponhamos uma imagem, a preto e branco, que consiste num quadrado de 200 por 200 pontos. Cada um dos 40 000 pontos pode ser ou preto ou branco. A quantidade informação associada a esta imagem é de 40 000 bits. Uma mensagem que descreva uma imagem dessas pode consistir em 40 000 bits de tal modo que o primeiro corresponda ao primeiro ponto no canto superior esquerdo da imagem e os seguintes, por ordem, representam os pontos da esquerda para a direita e de cima para baixo. Quando um bit é igual a "1" convencionamos que o ponto está a preto e quando é zero, o ponto está a branco. Todas as imagens possíveis que se criem nessa tela podem ser descritas por uma mensagem de 40 000 bits. Contudo existe uma diferença entre uma imagem

(U) *y<sub>er</sub> Atlan, ob. cit., pp. 27-37.*

<sup>(14)</sup>Ver Gell-Man, *ob. cit., pp. 246-247*, onde se explica como a informação pode ser enquadrada dentro de um sistema como factor de redução de entropia. A mesma abordagem da informação como "neguentropia" é usada por Morin.

completamente preta, ou completamente branca, e uma imagem em que os pontos são aleatoriamente pretos ou brancos. Uma mensagem a descrever a imagem completamente negra seria uma longa série de bits todos com o mesmo valor. Poderíamos por isso resumir a longa série de bits a uma expressão mais curta do tipo "todos os bits são 1". Se a imagem fosse metade branca e metade negra, uma mensagem que a descreve pode ser "os primeiros 20 000 pontos são brancos e os seguintes são negros".

Estas imagens altamente regulares são imagens de baixa entropia, com os pontos organizados em zonas bem estruturadas. Inversamente uma imagem com os pontos aleatoriamente colocados com a cor preta ou branca é uma mensagem que não pode ser descrita de nenhum modo mais curto que a longa enumeração de todos os 40 000 bits.

Assim, embora a quantidade de informação associada à transmissão de uma imagem qualquer seja sempre a mesma (40 000 bits), as mensagens que descrevem situações de entropia baixa têm características diferentes das mensagens que descrevem situações de entropia alta. A relação é a seguinte: quando há regularidades na imagem (entropia mais baixa), a mensagem que a descreve é passível de ser "resumida" numa expressão mais curta. Quando a entropia é elevada e não há regularidades na mensagem, essa "redução" não é possível. Podemos assim concluir que em situações de entropia baixa a nossa incerteza sobre o real pode ser reduzida por informação mais compacta do que em situações de entropia elevada.

Utiliza-se o conceito de "conteúdo algorítmico de informação" (CAI) para fazer esta diferenciação. O CAI de uma mensagem define-se como a extensão do programa mais pequeno que pode reproduzir a mensagem. Para mensagens altamente regulares, que descrevem situações de baixa entropia, o CAI é pequeno. Para mensagens com grande grau de aleatoriedade, que descrevem situações de entropia elevada, o CAI é elevado.

O conceito de CAI tem alguma arbitrariedade no sentido em que aquilo que se designa como "extensão do programa de computador mais pequeno" é, na prática, algo difícil de definir com precisão. Assume-se, para tornar o conceito operacional, que existe um computador padrão e um programador padrão que produz sempre o programa mais pequeno. O importante da noção de CAI é que nos fornece um modo de relacionar a informação com a entropia e de certo modo nos dá uma definição de "ordem" associada ao

conceito de informação. A "ordem" ou "regularidade" relaciona-se com a compressibilidade da informação<sup>(15)</sup>.

### *Complexidade*

O conceito de complexidade leva a relação entre informação e entropia mais longe. Quando dizemos que a vida assume formas progressivamente mais complexas, qual é o significado de "complexidade"? Complexidade distingue-se de regularidade. Uma imagem feita só de pontos pretos é altamente regular mas não a consideramos uma imagem complexa. Do mesmo modo, uma imagem completamente aleatória, sem qualquer padrão reconhecível, também não é uma imagem complexa. A complexidade é algo que ocorre quando existe um padrão que não é demasiado regular nem demasiado aleatório, na zona entre uma entropia baixa e uma entropia alta. Por outras palavras, a complexidade surge em informação com um CAI intermédio<sup>(16)</sup>.

Como definir melhor o conceito? A proposta de Gell-Man é a de utilizar a noção de sistema que detecta regularidades no real, como um ser vivo. Um tal sistema analisa o fluxo de informação e produz regras internas que sintetizam as regularidades dos dados. A medida que se vão detectando regularidades, o conjunto de regras elaboradas pelo sistema vai crescendo, criando aquilo que se designa por um "esquema" - um conjunto de regras que capta as regularidades do fluxo de informação fornecido pelo meio. O tamanho do esquema é uma medida da complexidade da informação recebida.

Um exemplo, utilizado por Gell-Mann, ajuda a esclarecer esta proposta. Quando uma criança aprende as primeiras palavras começa por repetir sequências de sons que ouve à sua volta. Pelo contacto permanente com outros seres humanos, a criança vai captando estruturas linguísticas progressivamente mais elaboradas. As primeiras regras que a criança capta são as que correspondem às palavras mais frequentemente utilizadas ao seu redor e que, quando repetidas pela criança, provocam reacções gratificantes do exterior (como "mamã", "papá", ou palavras para designar comida e água). As primeiras regras sintácticas assimiladas serão as mais gerais.

<sup>(15)</sup> Gell-Man, *ob. cit.* pp. 49-67.

<sup>(16)</sup> Gell-Man, *ob. cit.* pp. 77-88.

Demorará vários anos até as regras gerais serem completadas por regras específicas que lidam com circunstâncias *progressivamente mais irregulares*. Por exemplo, as crianças dirão "fazi" em vez de "fiz", porque captam primeiro a regra geral de declinação verbal e só depois captam as inúmeras exceções.

Podemos, por isso, dizer que a dimensão do esquema construído a partir da informação linguística captada vai aumentando, quer pelo número de regras, quer pela especificidade das mesmas, no sentido em que uma regra mais específica é maior, por ter mais "condições" que descrevem um domínio de aplicabilidade mais restrito. Este aumento do tamanho do esquema mental é o reflexo da complexidade da linguagem. Sistemas menos complexos produzem esquemas mais curtos. A linguagem utilizada na sinalização de estradas é menos complexa do que a linguagem natural, porque o conjunto de regras necessária para a apreender na sua totalidade é muito mais pequeno.

É fácil ver que esta definição é coerente com as características da ideia natural que temos de "complexidade", em especial daquilo que a diferencia da noção de ordem ou de entropia. Uma situação altamente regular, como as imagens metade brancas, metade pretas, produz um esquema curto, porque a regra subjacente à imagem é simples. Uma imagem completamente aleatória também produz um esquema curto porque não existem regras nenhuma detectáveis - na verdade, no caso de aleatoriedade absoluta a dimensão do esquema é zero. É na zona intermédia entre a regularidade e a desordem, entre o cristal e o fumo, como diz Atlan, que a complexidade surge.

### *Emergência*

O conceito final que importa introduzir é o de "emergência". Na sua mais recente obra, precisamente sobre esta temática, John Holland confessa a dificuldade em fornecer uma definição sucinta e clara do conceito<sup>(17)</sup>. Nos termos mais coloquiais possíveis, emergência é "obter muito a partir de pouco". Elaborando um pouco mais podemos dizer que emergência significa uma transição do menos complexo ao mais complexo.

<sup>(17)</sup>John Holland, *Emergence: from Chaos to Order*, Reading, Helix Books, 1998. Ver também Gell-Man, *ob. cit.*, pp. 250-254.

De um ponto de vista mais prático, encontramos a noção de emergência quando observamos que um conjunto de princípios simples produzem fenómenos complexos. Em geral, existe um factor de surpresa na constatação da emergência de complexidade, no sentido em que algo surge que não se esperava examinando as condições iniciais.

Holland destaca várias características das situações "emergentes"<sup>(18)</sup>:

- A emergência ocorre em sistemas gerados com cópias de um número relativamente pequeno de diferentes componentes que obedecem a simples regras de interacção. Tipicamente essas cópias estão ligadas por uma rede ou por proximidade espacial.
- O todo é mais do que as partes nesses sistemas. O modo como as partes interagem impede que se deduza facilmente o comportamento geral a partir do conhecimento dos componentes isolados.
- Os fenómenos emergentes têm "persistência estrutural", isto é, a interacção entre os componentes gera estruturas que subsistem quando os componentes que as produziram desapareceram, sendo substituídos por outros. Apesar das estruturas serem fruto da acção individual, uma vez criadas elas passam a determinar as acções dos novos indivíduos, sobrevivendo como "forma" aos seus componentes.

O conceito de emergência, apesar da dificuldade de o definir, está no cume da construção progressiva de uma teoria da evolução em direcção ao complexo. Tem também, no plano epistemológico, uma função central, uma vez que remete para uma lógica simples da explicação de determinado tipo de fenómenos, constituindo uma manifestação recente do antigo princípio de Ockam, em que as melhores explicações do real são aquelas que envolvem o menor número de causas.

Para captar melhor esta proposta, iremos de seguida introduzir

(18)John Holland, *Emergence*, pp. 225-231. Apresentamos aqui apenas alguns aspectos da exposição de Holland uma vez que alguns planos do seu conceito de emergência pressupõem um formalismo cuja explanação ultrapassa os objectivos deste texto.

um modelo extremamente simples capaz de produzir um fenómeno emergente. A análise de um exemplo concreto, no ambiente controlado das simulações computacionais, ajudará a entender algo de fundamental, e que vemos repetido por muitos dos que se debruçam sobre estes problemas: o efeito de surpresa criado por uma emergência, o elevado grau de complexidade que se obtém com regras extremamente simples.

### *Um exemplo minimalista*

#### *A ideia geral*

O modelo que iremos apresentar foi desenvolvido com intuítos pedagógicos, o que colocou alguns requisitos específicos. O objectivo era criar uma situação em que agentes evoluíam por adaptação ao meio. Uma simulação típica deveria durar relativamente pouco tempo, de modo a poder ser utilizado durante uma aula de duas horas. Por outro lado, a estrutura interna deveria ser suficientemente simples para que estudantes, pouco familiarizados com descrições matemáticas ou métodos informáticos sofisticados, pudessem apreender e modificar a lógica do modelo. Finalmente, os resultados obtidos na simulação tinham de ser visualizáveis sem dificuldade, não exigindo grandes tratamentos interpretativos<sup>(19)</sup>.

Inicialmente o projecto consistia em reproduzir um modelo, conhecido com o nome de "protozoários de Palmiter", em que agentes móveis se deslocam num espaço povoado de alimentos fixos, uniformemente distribuídos. Os movimentos dos agentes no espaço são determinados pelos seus genes. Quando um agente recolhe suficiente alimento reproduz-se, criando uma cópia de si mesmo. As mutações intervêm na fase de reprodução provocando o aparecimento de agentes com padrões de movimentação diferentes. Inicialmente os agentes movem-se aleatoriamente. A medida que a simulação evolui

<sup>(19)</sup>O modelo foi desenvolvido no âmbito da cadeira de "Métodos informáticos e abordagens formais em Ciências Humanas e Sociais", disciplina de opção do curso de História da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra. A ferramenta utilizada foi o programa AgentSheets, que se revelou um instrumento pedagógico poderoso no campo da criação de agentes, devido à facilidade de utilização e modo intuitivo como se criam conjunto de regras de comportamento. Para mais informação ver: <http://ivww.agentsheets.com>.

vão emergindo padrões de deslocamento mais eficazes, detectando-se "rebanhos" de agentes móveis que se deslocam de modo a conseguirem recolher a maior quantidade de alimentos. Contudo, colocando-se um conjunto significativo de alimentos de forma concentrada numa região do espaço, os agentes mudam os seus padrões de deslocamento, movendo-se em círculos sobre o alimento. Existem diferentes implementações deste modelo, variando na forma como os genes decidem a movimentação<sup>(20)</sup>.

O modelo aqui proposto apresenta uma diferença muito significativa. Os agentes também podem "atacar" outros agentes móveis, retirando-lhe parte do seu stock de alimentos. Ataques repetidos podem desprover o agente atacado de todo o seu alimento, provocando-lhe a "morte". Assim um agente móvel pode recolher alimento directamente na comida imóvel (que para simplificar a descrição designaremos por "plantas") ou atacando outro agente móvel. O comportamento "carnívoro" é altamente recompensador permitindo uma recolha de alimento por unidade de tempo 10 vezes superior ao máximo que se consegue comendo "plantas".

Um elemento adicional é introduzido pelo facto de um agente não poder atacar qualquer outro, indiscriminadamente. A regra é a seguinte: todos os agentes têm uma "cor", representada por um número. Numa simulação com quatro cores os números serão 0, 1, 2 e 3. Cada agente só pode atacar um agente com uma "cor" imediatamente inferior. Assim um agente de cor 3 pode atacar um agente de cor 2, este pode atacar um agente de cor 1, que por sua vez ataca os agentes de cor 0. Finalmente os agentes de cor 0 atacam os agentes da cor mais elevada, neste caso 3. Cria-se assim um ciclo alimentar, em que cada agente tem uma presa e um predador associado. Esta regra simples introduz um princípio de interacção. As relações entre agentes são reguladas exclusivamente por esta regra.

A cor de um agente faz parte dos seus traços geneticamente determinados. Como tal está sujeita a mutação no momento da

<sup>(20)</sup>Sobre este modelo ver, A.K. Dewdney, *A máquina mágica: um manual de magia computacional*, Lisboa, Gradiva, 1994, pp. 176-191. [ed. original de 1991]. Esta obra contém em disquete vários programas entre os quais uma implementação dos "protozoários de Palmiter"; Stephen Prata, *Divertindo-se com a vida artificial: a evolução na ponta dos dedos*, Rio de Janeiro, Berkeley Brasil editora, 1994 [ed. original 1993], pp. 143-150.

reprodução. É possível por isso que um agente de uma cor dê origem a um agente de outra cor. A probabilidade de tal ocorrer é relativamente elevada: 1/28, cerca de 3,5% das vezes que um agente se reproduz ocorre uma mutação na cor.

Tal como nos protozoários de Palmiter os agentes móveis têm padrões de deslocamento determinados geneticamente. No nosso caso existem quatro genes responsáveis pela movimentação. Cada um desses genes contém um valor que representa a probabilidade de o agente se deslocar numa das quatro direcções que correspondem aos pontos cardeais.

Finalmente, os agentes móveis possuem ainda um gene que determina a quantidade de "plantas" que comem por unidade de tempo (supondo que se encontram num local com "plantas" em quantidade suficiente). Este gene permite a existência de agentes com uma capacidade de absorção de "plantas" maior que outros. Os agentes que comem em maior quantidade chegam mais rapidamente à fase de reprodução mas esgotam mais rapidamente as reservas de comida existentes.

O "código genético" destes agentes é assim composto por seis genes: quatro são responsáveis pela movimentação, um pela cor que determina a interacção com outros agentes e o sexto pela capacidade de absorção de "plantas". Quando um agente se reproduz é gerado um número aleatório entre 1 e 7. Se for 7 nenhuma mutação ocorre. Quando o valor é entre 1 e 6 substitui-se o gene correspondente por um novo com um valor aleatório (dentro do espectro de valores admissíveis para cada gene). Por este processo geram-se mutações com muita frequência (6/7 das vezes). A elevada taxa de mutações torna o processo evolutivo muito rápido<sup>(21)</sup>.

(21) Muitos modelos evolutivos exigem um elevado número de gerações para apresentarem resultados interessantes. Um método para acelerar a evolução é aumentar a taxa de mutações. Contudo, quando a taxa de mutação é muito elevada, os resultados positivos da selecção natural podem ser destruídos e a evolução pode ser mais difícil e morosa. Este modelo apresenta um compromisso entre ambos os constrangimentos.

Enquanto a simulação decorre cada agente dispõe de uma quantidade de tempo suficiente para executar as tarefas básicas:

- Interagir com outros agentes que estejam contíguos no espaço.
- Alimentar-se se existirem "plantas" contíguas.
- Reproduzir-se se tiver acumulado alimento suficiente.
- Morrer se tiver ultrapassado o limite de "idade" ou se tiver gasto todo o alimento ingerido.
- Mover-se para uma célula contígua a Norte, Sul, Este ou Oeste.

A unidade global de passagem do tempo é o "ciclo". Em cada ciclo todos os agentes têm oportunidade de executar a lista das tarefas referidas. A "idade" de cada agente é o número de ciclos decorridos desde o seu nascimento, ou seja, o número de vezes que executou a lista de tarefas da lista. Cada agente dura no máximo 500 ciclos, altura em que é eliminado pelo programa.

Um dos factores mais importantes nestas simulações é o fluxo de alimentos, ou de energia. As regras que gerem esse fluxo são as seguintes:

- Cada agente "nasce" com 100 unidades de energia.
- Cada agente gasta sempre uma unidade de energia por ciclo.
- A reprodução só ocorre quando um agente acumulou 300 unidades de energia, criando então um novo agente com 100 unidades e diminuindo o seu próprio total de 150 unidades (há assim uma perda de 50 unidades na reprodução).
- Um ataque a uma presa provoca uma transferência de 100 pontos de energia da presa para o predador.
- As plantas crescem a um ritmo que é definido antes de cada simulação, podendo-se fazer diferentes simulações com as plantas a crescer mais depressa ou mais devagar; este ritmo designa-se por taxa de reposição alimentar e corresponde ao número de unidades de energia que cada planta "cresce" por ciclo (nos exemplos que vamos dar a taxa será de 0,5 e 2); este valor define a entrada de energia no sistema.
- Quando um agente morre a sua energia acumulada perde-se.

## Objectivos

É importante entender os requisitos e objectivos do modelo antes de iniciar a sua análise. É sobretudo fundamental entender que o objectivo principal não é criar um tipo de agente que seja altamente eficaz. Seria simples criar agentes que se fixam em cima da comida e eliminam todos os agentes que com eles competem. Mas o nosso objectivo não é testar, por esta via, a capacidade de transmitir a nossa análise da situação a um agente programável. Nesta simulação procurou-se atingir um máximo de complexidade de comportamento com um mínimo de faculdades atribuídas aos agentes. Por outras palavras procura-se maximizar a emergência. É possível que outros modelos fornecessem uma simulação mais eficaz de um fenómeno emergente.

Enumeremos os objectivos do modelo:

- Demonstrar que se pode construir uma simulação com agentes que evoluem ao longo do tempo, a partir de regras relativamente simples. Gerações sucessivas de agentes devem mostrar uma melhor adaptação ao meio, e eventuais modificações do meio devem provocar adaptações correlativas dos agentes.
- A adaptação ao meio faz-se por selecção "natural" entre agentes que possuem códigos genéticos diferenciados por mutação. Não há, por isso, adaptação por "aprendizagem". Os agentes não aprendem enquanto entidades individuais. Cada agente tem um comportamento regido sempre pelos mesmos parâmetros genéticos. Quando um agente se reproduz cria um novo agente com um comportamento ligeiramente diferente. A selecção "natural" opera quando os agentes com comportamentos mais eficazes se reproduzem mais.
- As aptidões dos agentes são propositadamente mantidas simples e primitivas: os agentes deslocam-se uma unidade espacial de cada vez, segundo um princípio probabilístico determinado geneticamente; reconhecem a existência de "plantas" na sua vizinhança imediata, alimentando-se; detectam a presença de outro agente na sua vizinhança imediata, atacando-o se pertencer à espécie "presa". Os agentes não têm visão nem cheiro, isto é, não detectam alimentos à distância. Não têm a capacidade de de-

cidir não se alimentarem na presença de alimentos, nem de não atacarem na presença de presas. Também não têm a capacidade de "fugir" aos predadores. *Nada no seu comportamento é intencional ou dirigido a um fim.*

Com estes factores presentes passemos à análise do comportamento dos agentes

### *O comportamento observado*

A figura 1 mostra o estado inicial de uma simulação (fase A, ao fim de 61 ciclos). As plantas são dispostas aleatoriamente e alguns agentes colocados também ao acaso. A taxa de reposição dos alimentos é baixa, 0,5 unidades por ciclo. Na fase B, ao fim de 749 ciclos os agentes multiplicaram-se e espalharam-se pelo espaço. Começa-se a distinguir um padrão de distribuição não uniforme dos agentes das várias cores. Agentes brancos e listados (cores 0 e 2) concentram-se preferencialmente em cima e à esquerda enquanto o resto de espaço é partilhado por agentes de todas as cores de forma dispersa. Ao fim de 1531 ciclos, na fase C, vemos que o espaço foi partilhado: as cores 0 e 2 ocupam o lado esquerdo do espaço e as cores 1 e 3 ocupam o lado direito. É possível traçar uma fronteira entre as duas zonas. Se deixarmos a simulação correr durante mais tempo vemos existir uma tendência lenta, mas clara, para as cores 1 e 3 irem progressivamente expandindo-se para a esquerda, fazendo avançar a fronteira.

A figura 2 mostra outra simulação em que a taxa de reposição dos alimentos foi aumentada para 2 unidades por ciclo e as plantas dispersas descontinuamente, formando ilhas (fase A). Com o alimento a crescer rapidamente e concentrado em zonas determinadas os agentes multiplicam-se com muita velocidade (fase B, 202 ciclos). Ao fim de 350 ciclos, na fase C, já são detectáveis agregações de cores e padrões de distribuição espacial em duas das ilhas (ao centro e à direita). Na fase D, com 700 ciclos decorridos, já emerge com clareza uma forma de partilha da totalidade do espaço, com as cores 0 e 2 a ocuparem a ilha central e as cores 1 e 3 as restantes aglomerações de alimentos. Esta configuração espacial é estável e não sofrerá mais alterações, como se vê nas fases E e F, passados 1035 e 8000 ciclos respectivamente.

*Explicação do comportamento observado*

A distribuição do espaço entre cores diferentes representa um fenómeno de auto-organização dos agentes. O mecanismo por detrás desse processo decorre de forma bastante directa da regra de interacção que define as presas e os predadores.

Com efeito, num cenário de quatro cores, é fácil deduzir que as cores 0 e 2 têm vantagem de "viverem em comum", o mesmo acontecendo com as cores 1 e 3. Isto por uma regra racional muito simples que é a seguinte: um agente tem vantagem em associar-se com outro que ataque o seu predador. O predador da cor 0 é a cor 1 que é atacada pela cor 2. Por seu lado o predador da cor 2 é a cor 3 que é atacada pela cor 0. Assim, se agentes 0 e 2 coabitarem e se protegerem mutuamente dos seus predadores, as cores 1 e 3, aumentam as suas chances de sobrevivência. O mesmo raciocínio se passa com as cores 1 e 3 que têm vantagem em se protegerem mutuamente.

Podemos descrever a evolução típica do sistema do modo que segue. Inicialmente um determinado agente pode surgir com um comportamento altamente eficaz pelas características dos seus movimentos, que o mantêm junto de um conjunto importante de alimentos. Este agente reproduz-se rapidamente criando vários agentes semelhantes, igualmente eficazes. A cor dos descendentes é, na maior parte dos casos, a mesma dos progenitores, de modo que vemos uma estirpe de agentes com o mesmo comportamento e a mesma cor a tomar-se numericamente dominante.

Mas necessariamente aparecerão nesse grupo mutações de cor diferente. E algumas dessas mutações criarão indivíduos predadores dos seus progenitores. Podemos mesmo calcular a probabilidade disso acontecer: uma vez em cada sete reproduções o gene sujeito a mutação é o da cor. De cada vez que o gene da cor é sujeito a mutação existe uma possibilidade em quatro de surgir uma mutação predadora, ou "maligna". Portanto a probabilidade é de 1 em 28 ( $7 \times 4$ ). Quando um agente altamente eficaz aparece podemos esperar que um em cada 28 dos seus descendentes será uma mutação maligna, um "predador". Quando a mutação "maligna" acontece, o mutante tem condições de sobrevivência excepcionais porque surge no meio de um número significativo de agentes "presas". Cada agente que ataca dá-lhe 100 pontos. Isso significa que o novo agente "maligno" se reproduz a uma velocidade enorme.

Rapidamente o novo agente predador e os seus descendentes atacam a população inicial, tomando-se cada vez mais numerosos. Este movimento só é parado quando, por sua vez, a descendência do predador produz uma nova mutação "maligna". Assim assiste-se a vagas sucessivas de predadores que se tomam presas ao fim de pouco tempo. Esta fase distingue-se bem na primeira simulação, onde tem uma duração maior. O gráfico 1B mostra que nos primeiros 1300 ciclos, aproximadamente, as populações das várias cores sofrem oscilações violentas. Um aumento da população de presas aumenta as possibilidades de sobrevivência dos predadores. O aumento do número dos predadores provoca a diminuição da população das presas o que por sua vez irá provocar a diminuição dos predadores.

O modo como as populações de presas e predadores interagem na Natureza foi estudado matematicamente e é representável por um conjunto de equações chamadas de Lotka-Volterra. O comportamento previsto por estas equações é exactamente o que observamos no gráfico 1B.

Esta fase oscilatória não se mantém. Na mistura de cores que se vai criando nas vagas sucessivas acontece que em determinadas zonas se produzem agrupamentos ocasionais de alguns agentes de cores desconstruídas, como 0 e 2 ou 1 e 3. Nos sítios onde isso acontece o ataque dos predadores é diminuído pelo facto de se encontrarem próximos "presas" e "predadores de predadores". Dito de outro modo, se pelo acaso dos movimentos, ataques e localização dos alimentos, um agente de tipo 0 fica próximo de um agente de tipo 2, as chances de ambos sobreviverem é maior do que se estivessem afastados. O agente 0 atacará um agente de cor 3, "protegendo" o agente de cor 2 e este atacará agentes de cor 1, "protegendo" o agente de cor 0. Com as suas chances de sobrevivência aumentadas, havendo alimentos disponíveis, estes dois agentes vão-se reproduzir na proximidade um do outro, aumentando assim o número de agentes de cor 0 e 2 a partilharem o mesmo espaço. As mutações continuarão a acontecer mas os agentes de cada uma das cores encarregam-se de eliminar à nascença os mutantes nocivos à outra cor.

Deste modo as oscilações de tipo Lotka-Volterra desaparecem ao fim de um certo tempo, para dar origem a um padrão diferente, de populações mais estáveis. No caso da primeira simulação por volta dos 1500 ciclos as oscilações dão lugar a outro tipo de evolução. No gráfico 2A, correspondendo à segunda simulação, a fase de

oscilações é muito curta, e quase não perceptível, dando rapidamente lugar a populações estáveis. O momento em que os gráficos estabilizam corresponde, do ponto de vista espacial, ao momento em que o espaço se diferencia.

As duas simulações demonstram também duas tendências de evolução na fase posterior à diferenciação espacial. Na primeira simulação vemos que uma das associações demonstra tendência a ocupar a totalidade do espaço. Na segunda simulação a diferenciação espacial parece estável a longo prazo.

Esta diferente evolução aparenta estar relacionada com a densidade populacional que, por sua vez, é fruto da taxa de reposição dos alimentos. No primeiro caso, a taxa de reposição era 0,5, obrigando os agentes a ocupar um espaço maior para se alimentarem. A densidade populacional mais baixa significa que o efeito de protecção mútua dos agentes é menos eficaz. Examinando a figura 1, na fase C, vemos do lado esquerdo, perto da fronteira, zonas com agentes isolados, todos da mesma cor, numa situação de fragilidade. Este factor afecta ambas as associações e não é por si só causa para o declínio de uma em relação à outra. Contudo, a partir do momento em que uma das associações tem mais elementos que a outra, os movimentos de travessia da fronteira tornam-se desequilibrados. Há mais agentes a passarem da zona da associação mais populosa para o outro lado do que o inverso. Estes agentes "emigrantes" correspondem a mutações com tendência a movimentarem-se horizontalmente e serão sempre uma percentagem fixa do total da população. Assim, uma população maior produz mais emigrantes e invade mais frequentemente o outro território, ocupando pequenos pedaços de território junto à fronteira, mas já do outro lado. Este processo tem avanços e recuos mas tendencialmente, pela lei das probabilidades, recompensa a associação mais numerosa.

Quando a densidade populacional aumenta este processo é anulado. Na simulação 2, com uma taxa de reposição de alimentos quatro vezes superior (2 unidades por ciclo), os agentes movem-se menos, "sedentizam-se", por assim dizer, tomando a cooperação para defesa mútua mais eficaz. A geografia também ajuda, uma vez que nesta segunda simulação, o espaço dividido em ilhas cria uma fronteira "natural" mais difícil de cruzar sem perda de energia. Embora o desequilíbrio de fluxos migratórios também esteja presente, a associação minoritária consegue proteger o território pela eficácia de uma densidade populacional maior e pela maior taxa de natalidade

que os recursos abundantes provocam, repondo rapidamente as percas devidas aos ataques. Ao fim de 8000 ciclos o espaço tem a mesma estrutura que se delineou ao fim de 700 ciclos e o gráfico 2A mostra que as populações são estáveis na longa duração.

*Características emergentes: os agentes inventaram a sociedade?*

Este exemplo pode ser abordado de perspectivas variadas. Estudiosos de diferentes disciplinas reconheceriam aqui fenómenos de ordem muito diversa.

Para o físico, o que tem perante si é um sistema dissipativo que tende a auto-organizar-se enquanto evolui para um equilíbrio energético, que nunca atinge devido à realimentação constante do sistema. O crescimento das "plantas" constitui a entrada de energia no sistema. A movimentação dos agentes, as percas que ocorrem na reprodução e sobretudo a morte dos agentes por velhice, correspondem aos fluxos de saída. As diferenças entre a primeira e a segunda simulação devem-se aos diferentes modos que assumem os fluxos de energia oriundos do exterior. No primeiro caso, a energia entra em menor quantidade e de forma mais uniformemente distribuída do ponto de vista espacial (as "plantas" estão distribuídas uniformemente). No segundo caso, a energia entra em maior quantidade (as "plantas" crescem mais depressa) e de forma mais diferenciada no espaço (sob a forma de "ilhas"), obtendo-se assim um efeito auto-organizador mais forte. As correntes de convecção que se geram num fluido aquecido viriam talvez à mente do físico como uma imagem similar.

O biólogo reconheceria o princípio das associações simbióticas que, na natureza, permitem precisamente superar as relações de Lotka-Volterra. Poderia, decerto, fornecer alguns exemplos de situações reais semelhantes a esta.

E o historiador ou o sociólogo, o que vêm neste exercício? A sua atenção só seria de certo retida a partir do momento em que a diferenciação espacial ocorre e o sistema sai da fase caótica inicial. De facto, nesse momento, verificam-se no sistema um conjunto de fenómenos interessantes:

- As variações demográficas abruptas desaparecem, ou, por outras palavras, as grandes crises de mortalidade suavizam-se.
- Conjuntos de indivíduos de características diferentes ocu-

pam zonas diferentes do espaço, detectando-se fronteiras que são mantidas ao longo do tempo.

- A violência, que aqui corresponde à transferência de quantidades significativas de recursos entre indivíduos, tende a diminuir depois de uma fase inicial em que é muito alta (ver gráfico 2B).
- Quando se criam duas comunidades de características diferentes podemos distinguir uma violência periférica que ocorre nas fronteiras das comunidades, e uma violência interna que tem como efeito o anular das mutações malignas. A primeira é mais significativa do que a segunda.
- A esperança média de vida aumenta com a diminuição da violência: cada vez mais indivíduos morrem de velhos e a população envelhece.
- A comparação das duas simulações mostra o efeito do aumento dos recursos e a sua concentração espacial na transição de um comportamento nómada para um sedentário.

Todos estes factores descrevem uma transição significativa e não deixa de ser interessante vê-los surgir num modelo tão simples. Mas o que é realmente crucial são dois aspectos adicionais:

- A partir do momento em que a transição ocorre, a sobrevivência de cada indivíduo deixa de ser função das suas aptidões individuais e passa a ser sobretudo determinada pelas características do grupo onde se encontra. Deslocado um indivíduo desse grupo para outro local do espaço as suas chances de sobrevivência alteram-se radicalmente. *É a inserção num determinado grupo, ou conjunto de indivíduos, que passa a determinar em primeira instância as chances de sobrevivência individual.*
- A partir da transição, as associações entre indivíduos de diferentes cores passam a ser sujeitas a evolução e competição entre si, podendo evoluir conjuntamente para situações de equilíbrio (simulação 2) ou para situações em que umas se sobrepõem a outras (simulação 1). *Os grupos ou associações de indivíduos passam a comportarem-se como agentes de ordem superior.*

Estes dois factos permitem-nos concluir que a transição observada corresponde ao surgimento de uma lógica social onde inicialmente só havia uma lógica individual. O surgimento dessa

lógica, com todas as consequências apontadas, corresponde a uma situação *emergente* que claramente provoca uma descontinuidade com o "passado", apesar de ser a consequência directa desse passado.

A essência desta transição reside no aparecimento de uma "forma" de organização do espaço que tem muito claramente a "persistência estrutural" associada aos fenómenos emergentes. Repárese de novo nas fases E e F da figura 2. A forma de diferenciação do espaço é a mesma. Contudo, 7000 ciclos separam as duas imagens. Como cada agente tem um período de vida máximo de 500 ciclos, não existe na fase F nenhum dos indivíduos que existiam na fase E. A estrutura permanece apesar do desaparecimento dos indivíduos que a criaram.

Assim, uma estrutura que surge como resultado da interacção individual toma-se independente da acção individual. Ou melhor, a estrutura, uma vez surgida no tempo, passa a condicionar a acção individual. No nosso exemplo, passa a determinar que tipo de indivíduos sobrevivem em que lugares do espaço. E, por esse efeito de retorno sobre a acção dos indivíduos que a criaram, a estrutura perpetua-se no tempo.

Podemos assim dizer que os agentes descobriram, ou inventaram, a sociedade.

#### *Resumo da característica emergente da simulação*

A função deste exemplo não foi, como é evidente, tentar simular nenhuma situação real. O valor do modelo como elemento de explicação de qualquer fenómeno etológico, histórico, ou social é nulo. O interesse da simulação situa-se no plano da lógica interpretativa. Serve para demonstrar a distância que pode existir entre a simplicidade de regras de acção individual e a complexidade do comportamento colectivo. Ilustra particularmente bem o princípio de "motivos locais, comportamentos globais".

Para isso importa recordar as regras dos agentes insistindo na simplicidade do nível do indivíduo.

- Os agentes não têm qualquer representação do espaço global. Não sabem que há comida mais à esquerda ou mais à direita. São cegos e não têm faro. Apesar disso acabam por adoptar estratégias de movimentação eficientes.
- Os agentes não têm qualquer ideia da disposição dos outros agentes no espaço, nem das concentrações de cores.

Sabem simplesmente detectar se têm outro agente à esquerda ou à direita e se o podem atacar ou não. Não obstante organizam-se espacialmente em função uns dos outros da forma mais lógica.

- Os agentes não têm qualquer capacidade de aprendizagem ou de transmissão de comportamentos adquiridos à geração seguinte. Toda a evolução é por puro e simples acaso e selecção. Contudo, emergem estruturas colectivas que se perpetuam para além dos indivíduos.
- Não existem decisões de cooperar ou não cooperar entre agentes. A cooperação emerge de acções simples de sobrevivência<sup>(2)</sup>.
- Os agentes assumem um comportamento "racional", sendo completamente desprovidos de uma visão "racional" do mundo em que vivem ou de qualquer representação da realidade para além de detectarem a presença de alimento. Existe uma grande desproporção entre os resultados do comportamento e as representações que o dirigem.

É esta distância entre as causas e os efeitos que toma o exemplo interessante. Mas, tratando-se de um modelo tão simples, é legítimo interrogarmo-nos do que se obteria com um sistema de indivíduos com capacidades iniciais mais estendidas. Que tipo de competências poderíamos associar aos nossos agentes e que tipo de situações emergentes conseguiríamos obter?

No ponto seguinte iremos enumerar as características dos sistemas complexos para fornecer uma visão menos simplista do que podem ser os mecanismos da interacção entre agentes.

(22) Este facto distingue a "cooperação" presente no nosso modelo da cooperação baseada em decisões de cooperar ou não cooperar, o que supõe agentes com uma representação interna da alternativa. A cooperação baseada em escolha é a base da obra de Robert Axelrod, *The Evolution of Cooperation*, S.I., Basic Books, 1984, que tem grande interesse para a análise da emergência de fenómenos de socialização. A existência de cooperação sem intenção é frequente no reino animal, por exemplo em insectos como as formigas. Ferber designa este segundo tipo como *colaboração reactiva*, por oposição à *colaboração intencional*, *ob. cit.* pp. 78-83. Ver também: Michael W. Macy, "Social Order in Artificial Worlds", in *Journal of Artificial Societies and Social Simulations*, vol. 1, nº 1, <http://www.soc.surrey.ac.Uk/JASSS/1/1/4.html>.

### *Sistemas adaptáveis complexos*

O exemplo apresentado é, como foi assinalado, de uma simplicidade extrema. Apesar das reduzidas capacidades dos agentes que o compõem e da simplicidade da regra que rege a sua interacção, vimos que se desenvolveu um comportamento emergente com características surpreendentes. A questão que agora se coloca é a de saber que tipo de comportamentos obteríamos com agentes mais complexos e com regras de interacção mais sofisticadas. Esta interrogação leva-nos mais longe que estes modelos simples, em direcção aos grandes sistemas de agentes com interacções mais sofisticadas. Chegamos por isso ao conceito de "sistema adaptável complexo". O interesse da obra de John Holland reside em tomar mais rigoroso e formalizado este conceito, definindo as características comuns aos vários sistemas conhecidos e fornecendo um modelo para o processo adaptativo levado ao cabo pelos agentes (o algoritmo genético).

### *Características gerais*

É comum os sistemas adaptáveis complexos serem definidos por enumeração: identificando uma série de entidades reais que exibem características comuns e que correspondem ao conceito intuitivo que temos.

Um primeiro exemplo é uma grande cidade. As cidades são sistemas complexos com uma persistência estrutural extremamente grande, durando séculos e sobrevivendo a todo o tipo de modificações. Contudo, tudo o que compõe a cidade muda com o tempo: as pessoas, as pontes, os edifícios, as administrações. A cidade, como diz Holland, "é um padrão no tempo"<sup>(23)</sup>. A sua existência não depende de uma vontade central nem de uma ideia comum que todos os que a habitam partilhem.

Passando ao nível microscópico encontramos no sistema imunológico outra organização tão complexa como uma grande cidade. Aqui os anti-corpos têm de identificar, entre milhões de entidades, as que pertencem ou não pertencem ao indivíduo. O sistema não pode conter previamente a definição de tudo o que perigoso e deve ser destruído. Tem de adaptar-se e evoluir. Contudo,

(23) John Holland, *A ordem oculta, cit.*, pp. 23-24.

existem doenças que podem perturbar o sistema imunitário e levar a rejeições de partes do corpo sadias, quer à incapacidade de reconhecer invasores.

As mesmas características de multiplicidade complexa, interacção e adaptação existem no sistema nervoso central (em que os neurónios são os agentes) e nos eco-sistemas.

A capacidade de evoluir ao longo do tempo, adaptando-se a novas situações e ao mesmo tempo manter uma identidade estrutural clara é uma das características mais importantes destes exemplos. Designar todos eles de "sistemas adaptáveis complexos" é acreditar que existem princípios gerais comuns a todos eles. Na *Ordem oculta*, John Holland enumera sete elementos básicos que se encontram presentes nos vários sistemas.

#### *Os sete elementos básicos*

Os setes elementos dos sistemas adaptáveis complexos são divididos em propriedades e mecanismos. As propriedades são: a agregação, não-linearidade, fluxos, diversidade. Os mecanismos são: marcação, modelos internos, blocos constituintes.

A *agregação* é uma propriedade que está associada a comportamentos emergentes colectivos, resultantes da simultaneidade de acções simples. O nosso modelo é um exemplo desta propriedade porque produz novas entidades, "as associações de cores", a partir de indivíduos. O formigueiro é o exemplo mais claro de sistema que exhibe esta propriedade em alto grau, uma vez que as formigas, individualmente, só são capazes de comportamentos estereotipados. As chances de sobrevivência de um indivíduo quando definitivamente separado do formigueiro são nulas. Contudo, o formigueiro enquanto colectividade tem uma elevada capacidade de adaptação. Em certas espécies os formigueiros migram grandes distâncias para ambientes novos. Do mesmo modo, os seres vivos são agregados de células, o sistema imunitário é um agregado de neurónios. A agregação está ligada ao conceito de meta-agente - um agente feito de agentes que, por sua vez, podem ser sistemas complexos<sup>(24)</sup>.

A *não-linearidade* exprime uma propriedade dos sistemas em que a relação dos processos com as suas condições iniciais sofre

(24) *Idem, ibidem*, pp. 34-36.

variações muito fortes. Pequenas variações nos valores iniciais podem gerar variações grandes nos resultados. Existe, digamos assim, uma desproporção entre as causas e os efeitos. O célebre princípio de Malthus que estipulava que os recursos aumentavam aritmeticamente enquanto que a população aumentava geometricamente, distinguia precisamente uma evolução linear (a dos recursos) de uma evolução não linear (a da população). As oscilações de Lotka-Volterra, que vimos na fase inicial da nossa simulação é outro exemplo de uma situação não linear<sup>(25)</sup>. Esta propriedade dificulta a previsão do comportamento dos sistemas. Mesmo no nosso modelo limitado é difícil prever coisas simples. A relação linear entre as necessidades energéticas dos agentes e a disponibilidade de "plantas" é suplantada pelo efeito não linear e imprevisível da ocupação do espaço por diferentes associações, que determina a intensidade dos ataques e a mortalidade geral das populações. Apesar de ser determinístico tudo o que acontece na simulação, e as regras subjacentes serem simples, o resultado final é imprevisível. Irão desenvolver-se uma ou duas associações de cores? Como vai ser distribuído o espaço? A fase oscilatória será longa ou curta?

A existência de *fluxos* é outra propriedade dos sistemas adaptáveis complexos. Os fluxos são trajectos que os recursos seguem de agente para agente. Definem, de certo modo, a componente "energética" do sistema. Entender os fluxos de um sistema é entender como os recursos são trocados, o que por sua vez permite compreender os modos como os agentes interagem. Os efeitos de *multiplicação* e de *reciclagem* são duas características habituais dos fluxos de recursos nos sistemas adaptáveis complexos. A multiplicação ocorre quando uma troca de recursos entre agentes opera de modo que os recursos se vão espalhando por uma rede alargada de agentes. Por exemplo, quando se adquire uma casa, o dinheiro pago pelo cliente ao construtor e só parcialmente retido por este, que passa parte do montante aos empreiteiros, que por sua vez pagam aos operários e aos fornecedores dos materiais, que por sua vez pagam aos fabricantes, que pagam aos fornecedores de matérias primas, etc. Assim, uma troca de recursos propaga-se pelo sistema com um efeito multiplicativo importante. A reciclagem ocorre quando uma sequência de fluxos deste tipo criam ciclos que permitem aos mesmos recursos

(25) *Idem, ibidem*, pp. 38-46.

serem utilizados várias vezes. É o que acontece em certos sistemas ecológicos, entre os quais se destaca a floresta tropical. A reciclagem é importante porque determina a capacidade do sistema crescer e complexificar-se sem ser demasiado dispendioso do ponto de vista energético<sup>(26)</sup>.

A *diversidade* é a quarta e última propriedade dos sistemas adaptáveis complexos. Os processos de adaptação tendem a produzir um grande número de variações ao nível dos agentes. A partir de uma ascendente comum os processos evolutivos biológicos criam uma diversidade enorme de seres. O aumento da complexidade gera naturalmente um aumento da diversidade, à medida que interacções mais variadas criam oportunidades para agentes progressivamente mais especializados<sup>(27)</sup>.

A *marcação* é um mecanismo presente nos sistemas adaptáveis complexos e que tem um papel importante nas interacções entre os agentes. Uma *marca* é uma representação que identifica um tipo de agente. Bandeiras, logotipos, cores fortes em animais ou plantas, configurações de moléculas ao nível celular, são exemplos de marcas que servem para facilitar a interacção entre os agentes. Na nossa simulação a "cor" do agente funcionava como marca que determinava o modo de interacção. E pelo mecanismo de marcação que os agentes conseguem distinguir o que, de outra forma, seria indistinguível. Ao diferenciarem os agentes, as marcas são um processo importante de persistência estrutural e de organizações hierárquicas com agentes, meta-agentes e metameta-agentes<sup>(28)</sup>.

Os *modelos internos* são o mecanismo que permite aos agentes em sistemas adaptáveis complexos criarem uma representação da sua interacção com o real. Consiste num processo de abstracção de pormenores e detecção de determinadas regularidades no fluxo de informação recebido do exterior. Esses padrões, uma vez criados internamente ao agente, influenciam a sua actuação e aumentam a sua eficácia. Este aspecto está ausente da nossa simulação. Embora seja natural associarmos o mecanismo dos modelos internos a uma actividade psicológica (desde os reflexos condicionados às teorias científicas), presente só em animais complexos, na verdade o conceito

<sup>(26)</sup> *Idem*, pp. 47-53.

<sup>(27)</sup> *Idem*, pp. 52-55.

<sup>(28)</sup> *Idem*, pp. 36-38.

aplica-se a representações muito primitivas, como a tendência das bactérias móveis de se deslocarem no sentido em que há maior concentração de alimentos ou as práticas de mimetismo de certos animais. Uma componente importante do mecanismo dos "modelos internos" é o facto de a representação do real determinar a forma como o agente actúa. Essa ligação permite distinguir entre modelos eficazes e modelos menos eficazes criando um princípio pelo qual a adaptação ao meio contribui para a propagação de modelos cada vez mais adequados (29).

O último mecanismo identificado por Holland designa-se por *blocos constituintes*, e está intimamente ligado aos modelos internos. Designa a capacidade dos agentes em combinarem modelos parciais para lidarem com novas situações. Decompor uma situação nova em situações mais simples para as quais o agente possui representações /acções testadas é um instrumento de grande eficácia. A evolução por adaptação utiliza grandemente este mecanismo, permitindo que a agregação de elementos testados produzam elementos mais complexos(30).

Estes sete elementos dos sistemas adaptáveis complexos estão fortemente interligados. Por exemplo, a agregação é facilitada através da marcação e concretizada através de fluxos de recursos. O leitor atento reconhecerá, contudo, que de todos estes elementos o mecanismo designado como "modelos internos" concentra em si uma dimensão crucial. O conceito de sistemas adaptáveis complexos só se torna interessante na medida em que os agentes são capazes de criar representações eficazes do meio e da interacção com os outros agentes. Referir que essa faceta crucial se deve à capacidade dos agentes de construir "modelos internos", que motivam a sua acção corresponde a deslocar todas as questões importantes para uma ideia relativamente vaga.

O enorme interesse do livro de Holland reside precisamente no facto de desenvolver longamente, e num plano formal, o que é, e como se produz, um modelo interno. É esse processo que está associado à metodologia dos algoritmos genéticos e a proposta contida na *Ordem oculta* ambiciona ter aplicabilidade a todo o tipo de agentes.

(29) *Idem*, pp. 56-60.

(30) *Idem*, pp. 60-63.

Resta-nos assim fornecer uma síntese deste elemento final, e crucial, da teoria dos sistemas adaptáveis complexos.

*Um modelo para o processo adaptativo*

Os modelos internos aos agentes são constituídos por conjuntos de regras. Tal como na nossa simulação, o comportamento é determinado por construções do tipo:

SE determinada condição for verdadeira

ENTÃO executar determinada acção.

Por exemplo:

SE estou próximo de comida

ENTÃO alimento-me.

ou

SE tenho mais que 300 pontos de energia

ENTÃO reproduzo-me.

As regras ligam percepções a acções. Funcionam, dito de outro modo, como princípios de reacção à informação recebida do meio (estar próximo de comida), ou do estado interno do próprio agente (nível de energia acumulada), desencadeando modificações do meio (alimentar, reproduzir).

Podemos assim definir um agente como um conjunto de "detectores", que recolhem informação no meio e no estado interno do agente, e um conjunto de "actuadores" que consistem nas acções possíveis do agente sobre o meio. Os detectores ligam-se aos actuadores por um conjunto de regras que constituem o sistema de desempenho.

Para que este esquema possa captar representações complexas do real é necessário algo mais do que simples regras de causa-efeito, que mais não captam do que ligações estímulo-resposta. O carácter mais inovador do método dos algoritmos genéticos é mostrar como se pode estender o conceito de regra SE-ENTÃO para lidar com situações muito complexas e capazes de evoluir. Essa extensão faz-se introduzindo novos elementos: mensagens, paralelismo, mérito e hierarquias.

Em primeiro lugar introduz-se o conceito de mensagem na definição das regras. Os "detectores" emitem mensagens em função das características do meio que rodeia o agente. As regras de comportamento detectam determinadas mensagens oriundas dos detectores e produzem mensagens em direcção aos "actuadores". Os

"actuadores", por sua vez, passam a ser activados pelas mensagens que recebem das regras. As regras passam pois a ligar mensagens sob a forma de condições: SE determinada mensagem foi recebida ENTÃO enviar outra mensagem.

O esquema ganha muita flexibilidade se permitirmos às regras produzirem e actuarem sobre mensagens "arbitrárias", isto é, mensagens que não são directamente oriundas num detector nem destinadas a um actuator. Por exemplo, um agente pode ter uma regra que actúa sobre as mensagens "objecto grande" e "objecto em movimento", oriundas dos seus detectores, para produzir uma outra mensagem arbitrária, "X", que passa a significar "objecto grande e em movimento". Outro detector do mesmo agente poderia produzir uma mensagem "objecto aproxima-se" activando outra regra que produziria a mensagem "Y". Uma terceira regra ligaria "X" e "Y" e produziria a mensagem "fugir". Regras adicionais reagiriam à mensagem "fugir" enviando mensagens aos vários actuadores que provocariam o comportamento correcto ("saltar", "voar", ou "correr").

Esquemáticamente:

regra 1: SE objecto grande ENTÃO "G"

regra 2: SE objecto em movimento ENTÃO "M"

regra 3: SE objecto se aproxima ENTÃO "Y"

regra 4: SE "M" e "G" ENTÃO "X"

regra 5: SE "X" e "Y" ENTÃO "F"

regra 6: SE "F" ENTÃO correr.

Deste modo podem-se constituir cadeias complexas de mensagens entre os detectores e os actuadores.

A existência de mensagens permite também que um conjunto de regras relacione um conjunto grande de percepções e o condense em mensagens simples. Este é um processo de agregação que tem uma eficácia importante. Do mesmo modo, combinações de regras e mensagens permitem desdobrar mensagens simples num conjunto grande de acções. A mensagem "fugir" pode ser desdobrada numa série complexa de acções que activa os mecanismos de locomoção do agente.

Este mecanismo de mensagens, apesar de muito simples, cria abstracções, ao juntar determinadas características do real, ignorando outras. Este aspecto relaciona-se com o paralelismo de funcionamento das regras. Um agente pode ter diferentes regras para a mesma circunstância. Perante um objecto, pode haver uma regra que, com base em determinadas características (volume, movimento, direcção),

produz uma mensagem determinada e ao mesmo tempo outra regra que com base em outras características (volume, velocidade, cor) produz outra mensagem diferente. Cada uma das mensagens corresponde a uma abstracção diferente do mesmo objecto. As duas são produzidas simultaneamente e ambas ficam disponíveis para serem utilizadas por outras regras que avancem o processo em direcção aos actuadores.

O passo seguinte é criar um mecanismo de selecção das regras mais eficazes, que elimine aquelas que produzem mensagens inúteis ou acções nocivas. Quando uma regra activa directamente um actuador, e produz uma acção no meio, não temos dificuldade em imaginar que um mecanismo de recompensa simples reforce as regras que provocam acções benéficas e iniba as regras responsáveis por acções prejudiciais. Mas, por vezes, as consequências de uma regra, sobretudo daquelas que produzem abstracções, não são imediatamente avaliáveis. Outras vezes ainda uma acção que parece nociva a curto prazo revela-se positiva a médio prazo, depois de ter desencadeado uma série de consequências ao longo do tempo. Não só uma acção concreta pode ser fruto de uma longa cadeia de regras e de troca de mensagens, como algumas acções podem ter consequências cujo valor varie ao longo do tempo, sendo benéficas a curto prazo e prejudiciais a longo, ou vice-versa. Como determinar as regras mais eficazes neste contexto?

Holland trata deste problema por uma analogia entre a competição do mercado e a competição entre regras. Cada regra é considerada como um agente económico que compra e vende mensagens. Compra as mensagens que "consome" na parte "SE" e vende as mensagens que produz na parte "ENTÃO". No exemplo acima, a regra 4 compra as mensagens "M" e "G" e vende a mensagem "X". Assim cada regra tem fornecedores que produzem as mensagens que ela consome e clientes que utilizam as mensagens que ela produz. A força, ou eficácia de uma regra, é um valor que funciona como dinheiro. Quando uma regra compra mensagens aos seus fornecedores tem de pagar vendo a sua força reduzida. Quando vende uma mensagem a um cliente recebe um valor, aumentando a sua força.

A competição entre regras é então moldada como um sistema de licitação. Existindo várias regras em condições de utilizar as mensagens presentes, são as regras mais fortes que licitam mais alto. Compram assim a informação que necessitam e produzem as suas mensagens, que vendem, reforçando-se. As regras mais fracas, que

não vencem a licitação, não pagam nada mas também não produzem as suas mensagens, não recebendo dos seus clientes.

Assim as cadeias de regras tomam-se cadeias de transferência de recursos em direcção aos detectores. O "dinheiro" vem todo desses consumidores finais que são as regras que activam directamente os actuadores. Quando uma acção concreta do agente é benéfica, a regra responsável pela acção é reforçada directamente pelo meio exterior. Esse valor serve-lhe para licitar alto as mensagens que necessita para ser activada. Assim as regras que produzem as mensagens consumidas pela acção benéfica vêem o seu valor de mercado aumentado, o que por sua vez lhes permite licitarem mais fortemente as mensagens que consomem. O reforço conseguido como consequência de uma acção benéfica propaga-se assim pelas cadeias de regras que a provocaram.

Este processo de propagar os resultados das acções por cadeias extensas de regras permite que a experiência do agente vá reforçando sequências de regras eficazes, que levam a acções recompensadoras e a desvalorizar sequências de regras menos eficazes. O modelo interno do agente, constituído pelo conjunto das regras, vai-se apurando progressivamente.

O mecanismo acabado de descrever explica a valorização e desvalorização de regras existentes, mas não adianta muito sobre o processo de descoberta de novas regras. É aqui que entra o algoritmo genético. Novas regras são constituídas a partir das regras existentes por um processo de selecção, cruzamento e mutação. A selecção opera escolhendo para reprodução as regras mais fortes, aquelas que, na sequência das experiências do agente, se provaram mais eficientes. As regras assim seleccionadas são emparelhadas e "cruzadas", isto é, as condições e as consequências são misturadas, como os genes dos cromossomas se cruzam durante a reprodução biológica. Cria-se assim uma nova regra com condições e consequências herdadas de ambos os progenitores. Esta nova regra vai coexistir com as regras progenitoras. Se demonstrar ser mais eficaz que os progenitores o mecanismo de licitação encarrega-se de progressivamente aumentar a sua força, o que aumentará as chances de se reproduzir. Assim, ao fim de certo tempo, a nova regra tornar-se-á dominante e as progenitoras originais perderão progressivamente a sua força, acabando por desaparecer. A este mecanismo de sobrevivência do mais forte o algoritmo genético acrescenta mutações aleatórias, para aumentar as chances de aparecimento de novas formas. Grande parte

do apuramento dos modelos internos deve-se, porém, ao resultado combinado do esquema de licitação, da reprodução dos mais fortes e do processo inovador criado pelo cruzamento das regras.

Holland demonstra que este processo leva à criação de modelos internos compostos por conjuntos de regras cada vez mais eficazes. Os agentes evoluem, assim, para entidades com capacidades cognitivas progressivamente mais complexas. A possibilidade desta evolução liga-se, obviamente, à existência de padrões e regularidades nos fluxos de informação captados pelos detectores do agente. É a este nível que os conceitos apresentados anteriormente de informação, ordem e complexidade se ligam a uma teoria da evolução por adaptação.

Não se pode deixar de notar o paralelismo entre o processo que ocorre dentro do agente, na criação dos seus modelos internos, e os processos que operam dentro dos sistemas adaptáveis complexos ao nível da interacção dos agentes individuais. Em ambos os casos, o motor do processo é um mecanismo de selecção e adaptação. Os mesmos processos que apuram os conjuntos de regras no interior dos agentes, operam igualmente na selecção dos agentes. Como os agentes, por sua vez, se podem agregar em meta-agentes, temos basicamente os mesmos processos a operarem em escalas sucessivas. O poder unificante destas teorias vem assim não só do elevado número de fenómenos reais a que se aplicaria como do facto de propor mecanismos semelhantes para níveis muito diferentes do real.

### *O teste da prática*

Na *Ordem oculta*, John Holland elenca algumas das aplicações práticas da teoria, em especial as que saíram dos seminários interdisciplinares do Instituto de Santa Fé. As aplicações existentes na altura (1995) tratavam da emergência de cooperação entre agentes inicialmente egoístas, simulação de bolsa de valores e das relações comerciais entre países<sup>(31)</sup>. O grande desafio que se coloca à teoria é contudo criar um modelo computacional genérico que permita testar vários casos particulares e no qual seja possível reproduzir aquilo que se sabe sobre o comportamento de agentes reais nas situações

<sup>(31)</sup> *Idem*, pp. 111-124.

mais variadas. O trabalho actualmente em curso nesta área dirige-se à produção deste modelo concreto que possa servir para testar a validade da teoria formal. Holland descreveu em algum detalhe a forma que deve assumir tal implementação, num conjunto de regras e mecanismo que designou por ECHO. O objectivo dos modelos ECHO é fornecerem uma ferramenta de simulação capaz de produzir fenómenos emergentes numa grande variedade de campos. Foram definidos vários níveis de modelos ECHO, desde os mais simples, assentes apenas em agentes capazes de relações de ofensiva, defensiva e cooperação, até aos nível mais complexos, onde existe reprodução condicional (ou seja espécies distintas) e agregação de agentes em meta-agentes com capacidade reprodutiva própria (o equivalente aos animais multi-celulares). Tanto quanto sabemos só os primeiros níveis do modelo ECHO foram até agora implementados. Existe assim um défice de aplicações práticas, que o trabalho florescente nesta área tenderá a colmatar a curto prazo <sup>(32)</sup>.

Conclui-se assim que, neste momento, a importância da teoria dos sistemas adaptáveis complexos é fundamentalmente teórica. Ela fornece um paradigma que dirige a nossa atenção de maneira nova para fenómenos antigos. Ao mesmo tempo tem um grau de formalidade suficiente para permitir tentativas de simulação que

<sup>(32)</sup>Uma obra pioneira, originária das trocas interdisciplinares que o Santa Fé Institute promove, é: J.M. Epstein; Robert Axtell, *Growing artificial societies: social science from the bottom tip*, Cambridge Mass., The MIT Press, 1996. Este trabalho serve também para marcar a agenda teórica de uma "inversão" da lógica científica em ciências sociais, em que interpretar, ou explicar, seria equivalente a "simular". Outro desenvolvimento interessante é a criação, sempre pelo Santa Fé Institute, do sistema SWARM, uma ferramenta que visa facilitar a criação de simulações baseadas em agentes nas ciências sociais (ver <http://www.santafe.edu/projects/swarm/>). Um bom local para seguir a evolução nesta área é "Computer simulations of societies" mantido pelo Centre for Research on Simulation in the Social Sciences (CRESS) do Department of Sociology, University of Surrey, Guildford, UK (<http://www.soc.surrey.ac.uk/research/simsoc/simsoc.html>). Existe uma publicação electrónica especializada: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/JASSS.html>), com 5 números editados até Janeiro de 1999, e uma lista de correio electrónico "socsim" (<http://wzvw.mailbase.ac.uk/lists/simsoc/>) cujos arquivos permitem ter uma rápida ideia dos principais tópicos que ocupam os investigadores.

podem ser esclarecedoras, mas cuja realização está limitada pelo grau ainda incipiente das ferramentas disponíveis. Esta dificuldade prática é particularmente forte nas ciências sociais, onde a utilização de meios informáticos é instrumental e padronizada pelas ofertas do mercado de massas, sendo difícil juntar as competências necessárias para uma implementação de raiz de um modelo complexo.

É por isso ao nível das incidências da teoria para uma prática interpretativa em história que devemos terminar este texto.

### *Consequências metodológicas*

É chegada a altura de concluir, tentando enumerar as consequências possíveis destas abordagens na prática quotidiana da História, ou das disciplinas que se ocupam dos fenómenos sociais. Sabemos que a história das ideias, ou mais concretamente do pensamento científico, está cheia de entusiasmos periódicos levantados pela esperança de conseguir para as ciências do social uma base sólida que sempre se inveja nas ciências da natureza. Essas vagas alternam com visitas periódicas de físicos, químicos, biólogos ou etólogos e, mais recentemente, informáticos, que, debruçando-se sobre o campo do humano, não resistem a considerar que têm um contributo significativo a dar. Este processo decorre desde Newton, que constituiu o momento de separação de uma ciência matematizada, com um método rigoroso, do fundo comum da "filosofia" indiferenciada.

Não há nada de negativo neste processo. De facto a ciência vive desses contactos, do confronto de modelos. A constatação da sua inadequação, a diversidade de perspectivas, a variedade de construções formais, em vez de serem temidas como um desrespeito da heterogeneidade do real e da especificidade das disciplinas, são um contributo importante para o "arejamento" das problemáticas. Antes ocorressem mais vezes.

Contudo, o historiador não pode deixar de lado um cepticismo fundado em séculos de entusiasmos excessivos. O que se segue é por isso um resumo prudente mas que acreditamos não ser trivial, apesar de não conter nada que não tenha sido proposto e defendido por vários e importantes autores. A importância da sua enumeração aqui liga-se ao facto de pensarmos que os novos formalismos descritos anteriormente acentuam, a uma nova luz, algumas propostas metodológicas existentes, permitindo talvez talhar de outro modo discussões metodológicas abstractas.

*Primeiro objectivo: entender os fluxos de recursos*

Vimos o papel fundamental que a análise dos fluxos de recursos joga na teoria dos sistemas adaptáveis complexos. Referimos os efeitos "multiplicador" e de "reciclagem" que caracterizam esses fluxos. Recordemos que os físicos ligam as capacidades auto-organizativas dos sistemas à existência de fluxos de energia constantes, que impedem que um estado de equilíbrio seja alcançado.

A importância da análise dos recursos na compreensão da evolução histórica é indiscutível e consensual. Marx chamou a atenção para o carácter estruturante que a produção e apropriação de recursos tinha nas sociedades humanas. Claude Lévi-Strauss identificou a disponibilidade de energia *per capita* como o único critério seguro de "progresso" humano<sup>(33)</sup>. Morin, mais recentemente, insistia na base energética das sociedades humanas e nas consequências que tal facto deveria ter nas teorias sociológicas<sup>(34)</sup>. Joel de Rosnay advogou mesmo que a história da organização social poderia ser vista sob o ângulo da energia, alegando que as leis energéticas têm prioridade sobre as leis políticas e económicas<sup>(35)</sup>.

A reconstituição dos fluxos de energia em sentido estrito, calculando as percentagens relativas de cada uma das suas formas e rendimentos, como faz Rosnay, é um factor importante mas que, na análise histórica concreta, não tem um valor explicativo muito grande. Nas sociedades humanas o conceito de recurso pode ser utilizado no

<sup>(33)</sup>Claude Lévi-Strauss, *Raça e Historia*, Lisboa, Presença, 1996, [ed. orig. 1958].

<sup>(34)</sup> Edgar Morin, *Sociologia*, cit., p. 83, onde afirma: "[...] a teoria sociológica concebeu muitas vezes que a organização social é inseparável de um processo energético, de trabalho, de transformação. Os sociólogos perceberam, evidentemente, que o conjunto dos processos económicos de produção, de circulação, de troca, diziam respeito à base e à existência material das sociedades. Alguns ligaram profundamente, por vezes linear e esquematicamente, a produção económica à própria produção da sociedade, a organização económica a todas as formas da vida social. Mas o energetismo e o dinamismo do fenómeno social ainda não foram associados fundamentalmente à energia física, ao segundo princípio da termodinâmica, à teoria dos sistemas abertos, que, por sua vez, é inseparável, como vamos ver, da auto-eco-reorganização".

<sup>(35)</sup> Joel de Rosnay, *O macroscópio: para uma visão global*, Lisboa, Arcádia, 1977 [ed. original 1975], em especial "A energia e a sobrevivência", pp. 121-184.

lugar do termo mais restritivo de energia, para representar aquilo que os indivíduos necessitam para sobreviver e se reproduzirem.

A mudança de sensibilidade que queríamos propor é muito menos radical. Resume-se à insistência nos fluxos de recursos e não no seu simples inventário ou em visões estáticas da sua distribuição pela população num momento dado. O que é realmente importante é perceber como os recursos são produzidos, em primeiro lugar, e depois como circulam pelo tecido social, como são apropriados. É o fluir dos recursos que permite compreender as estruturas organizadoras dos agentes.

Um exemplo que poderíamos referir é o papel do espaço físico. Em sociedades históricas pré-industriais grande parte da riqueza vem da produção agrícola. Assim o contexto geográfico de uma comunidade, ou de uma região mais alargada, é fundamental, quando é tratado em termos de paisagem agrícola, que revela as diferentes distribuições de culturas e os constrangimentos espaciais (solos, água, clima, relevo, etc.). Mas o valor explicativo de uma descrição do espaço só é real quando percebemos como os recursos por ele gerados são efectivamente apropriados. Assim uma ideia das práticas agrícolas, dos meios de produção necessários é fundamental. Aqui entram os utensílios, as práticas de rotação de culturas, os pousios, as necessidades energéticas adicionais (animais de tracção, por exemplo), a existência de práticas colaborativas. Mas não chega. A isto temos de juntar as formas jurídicas de apropriação: os foros, a duração dos contratos, o papel dos rendeiros, os monopólios de culturas ou meios de produção por entidades senhoriais, as reservas de períodos para escoamento dos produtos cobrados como rendas. A paisagem em si é inútil se não for completada por esta análise. O importante é como os recursos entram e saem do sistema em análise. Como na nossa simulação, e nos sistemas dissipativos, é à volta desse fluxo que a organização e a complexidade emergem.

A análise dos comportamentos morais numa paróquia rural na transição do século XVII para o XVIII fornece um exemplo mais concreto da importância da reconstituição dos fluxos de recursos<sup>(36)</sup>.

<sup>f36)</sup> Joaquim Ramos Carvalho, *Comportamentos morais e estruturas sociais numa paróquia de Antigo Regime (Soure, 1680-1720)*, dissertação de doutoramento em História Moderna apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, 1997, pp. 109-123.

Como qualquer outra comunidade pré-industrial os principais recursos de Soure eram de origem agrícola. A melhor terra de cultivo pertencia à Ordem de Cristo e era dada em comenda, pelo rei, a elementos da nobreza em recompensa de serviços prestados à coroa. Estes senhorios absentistas, os comendadores, cobravam rendas importantes (entre 1/4 a 1/2 da produção), e tinham um conjunto grande de direitos e privilégios que lhes garantia uma variedade de recursos adicionais: dízimos dos gados, monopólio dos lagares de azeite, direito exclusivo de venda do seu vinho durante alguns meses do ano (direito de relego), e muitos outros. Uma grande parte dos recursos produzidos localmente eram assim canalizados para o exterior.

A cobrança de todos estes rendimentos só podia ser feita por pessoas no local, que conhecessem bem as terras, a produção, as eiras, e que pudessem movimentar rapidamente os produtos colhidos, vendendo cereais e outros géneros, escoando a produção de vinho cobrada como renda durante os meses do relego. Aos comendadores, que viviam em Lisboa ou faziam carreira de alta administração no ultramar, não fazia sentido ocuparem-se directamente destes assuntos, nem terem pessoal a tempo inteiro para o fazer. Como todos os outros senhorios de Antigo Regime, os comendadores vendiam o direito de cobrar as suas rendas por uma quantia determinada de dinheiro, desligando-se completamente do processo local de apropriação dos recursos. Existia em consequência um tipo particular de agente designado por rendeiro, que pagava ao comendador uma quantia estipulada e tentava depois cobrar o máximo que podia dos camponeses.

O rendeiro podia ser uma personalidade local, ou podia ser um agente de maior estatuto, que contratava várias rendas de vários senhorios. No segundo caso existiria um segundo contrato com um agente local, porque era absolutamente necessário ter uma implantação no terreno. Os rendeiros locais, quer tivessem contratado directamente com o comendador, quer através de um intermediário, necessitavam por sua vez do concurso de trabalhadores braçais, para movimentar os produtos e de almocreves para os transportar para mercados mais distantes. Por vezes contratavam ainda um estrado adicional de capatazes ou sub-rendeiros. Necessitavam também de manter locais de venda de vinho durante o período do relego, o que significava mais pessoas envolvidas.

Assim, o fluxo de recursos em direcção ao exterior, desdobra-

se numa série de fluxos acessórios e de direcção contrária: do comendador para o rendeiro fica a mais valia conseguida pela diferença entre o valor acordado e o valor realmente cobrado aos camponeses. Mas essa mais valia do rendeiro é parcialmente distribuída por agentes de recursos progressivamente menores, os almocreves e trabalhadores braçais, mulheres para a venda dos vinhos, criando um efeito multiplicativo em sentido inverso. Estrutura-se assim um sistema de trocas à volta da cobrança das rendas que é muito mais complexo que a simples apropriação por um senhorio absentista de uma parte considerável da produção.

O aspecto interessante deste mecanismo é que a sua dimensão não é estritamente económica. Em primeiro lugar vemos que as pessoas que participam nestes fluxos estabelecem relações a um outro nível: os comendadores são padrinhos de baptismo de filhos dos rendeiros, que apadrinham por sua vez os filhos dos almocreves e dos trabalhadores. A sobreposição dos dois planos é muito clara. Os recursos fluem no mesmo sentido que os apadrinhamentos. Um terceiro plano junta-se a estes dois: uma série de relações ilícitas estabelecem-se entre pessoas relacionadas com a cobrança de rendas: concubinatos entre rendeiros e raparigas solteiras de famílias pobres, ou entre rendeiros e mulheres de almocreves ou trabalhadores braçais. As mulheres circulam pela mesma rede no sentido contrário aos recursos. Tudo isto ocorre num espaço geográfico muito limitado, criando uma teia de relações cruzadas muito densa.

Nesta análise a reconstituição dos fluxos de recursos é essencial. Ela possibilita situar as relações de concubinato nas relações de desnível económico. O plano dos apadrinhamentos permite ainda perceber que todos os agentes envolvidos tiram vantagens do processo. A relação de apadrinhamento implica um acto voluntário do pai da criança em pedir a outro homem que seja padrinho do filho ou filha. É uma forma de consolidar uma ligação que existiria no plano económico. O apadrinhamento é uma relação assimétrica, em termos sociais (ninguém, nesta comunidade, escolhe para padrinho do filho alguém de condição social inferior). Assim o acto de pedir a outro que seja o padrinho do filho tem um efeito de marcação, é um modo de reconhecimento mútuo das posições respectivas no fluxo dos recursos. A dimensão de troca sobressai assim onde uma leitura mais desatenta poderia ver apenas espoliação.

*Segundo objectivo: explicar localmente os comportamentos globais*

Um dos princípios dos modelos baseados em agentes, como vimos, é que a representação que estes têm do sistema global em que se inserem pode ser bastante limitada. Não obstante, os agentes interagem de forma não trivial criando estruturas complexas. Esta foi uma das características principais da simulação que apresentámos: um padrão global emergiu de acções individuais desprovidas de representação da globalidade.

Significa isto que as explicações não são sempre da mesma ordem dos fenómenos que explicam. Por vezes, perante um fenómeno global, os historiadores ou os sociólogos procuram uma lei geral que o explique. Normalmente essa lei relaciona dois ou mais factores de um sistema global por relações de causalidade: a relação entre industrialização e família nuclear, entre o protestantismo e o desenvolvimento do capitalismo, entre a pequena propriedade e uma idade média alta ao casamento. Mas os avanços trazidos pela compreensão dos padrões de interações dos agentes em sistemas adaptáveis complexos levam-nos a reforçar a posição de individualismo metodológico defendida por alguns sociólogos e economistas. As características globais dos sistemas, quer sejam valores médios assumidos por variáveis quantificadas, quer sejam padrões modais de comportamento, têm de ser explicadas em função das acções dos indivíduos entendidos não como agentes racionais informados sobre o meio mas como agentes adaptáveis agindo sobre informação parcial<sup>(37)</sup>.

Uma das áreas onde esta necessidade é mais explicitamente sentida é na demografia histórica. Das várias disciplinas que se ocupam da evolução das sociedades a demografia é aquela que tem uma ligação mais directa aos factores básicos da sobrevivência e onde,

<sup>(37)</sup>Para uma apologia vigorosa do "individualismo metodológico" em sociologia veja-se Raymond Boudon, *O Lugar da desordem*, Lisboa, Gradiva, 1990 [ed. original de 1984]. Em economia destaca-se o papel da denominada escola austríaca, em particular de F.A. Hayek. Para este autor: "[...] o problema é, não como usar um *dado* conhecimento disponível como um todo, mas como tomar possível que o conhecimento que não está, e não pode estar, à disposição de nenhum espírito individual, possa, mesmo assim, ser usado, na sua forma fragmentária e dispersa, pelos muitos indivíduos que interagem: um problema não para os agentes, mas para os teóricos, ao tentarem explicar essas acções", citado por José Manuel Moreira, *Hayek e a história da escola austríaca de economia*, Lisboa, Afrontamento, p. 72

por isso, é mais fácil supor uma racionalidade imanente aos fenômenos. Podemos sempre partir do princípio que as populações humanas regulam os factores demográficos de uma forma globalmente eficaz, porque se não o fizessem não teriam sobrevivido para serem estudadas. Com a documentação histórica existente pode-se reconstituir uma série de "padrões" demográficos distribuídos temporal e espacialmente. As grandes variáveis demográficas relacionadas com a natalidade, a mortalidade, a nupcialidade e a dimensão dos agregados familiares, combinam-se de forma diversa para criar zonas no espaço e no tempo em que determinadas formas são prevaletentes. Foi desenvolvido um enorme esforço em classificar os agregados familiares quanto à extensão e tipo de relações de parentesco existente entre os seus membros e reconstituir a sua distribuição geográfica e cronológica. A combinação de todos estes parâmetros deu origem a uma série de modelos que combinam diferentes distribuições de determinadas variáveis demográficas, criando uma geografia diferencial, ou uma perspectiva de evolução temporal. Fala-se, por exemplo, de um padrão de família ocidental caracterizado pelo casamento tardio, residência neolocal e colocação de jovens como criados em outras famílias<sup>(38)</sup>.

Estes modelos têm grande valor por permitirem descrições comparáveis de regiões afastadas no espaço e no tempo. Contudo criam a ilusão que o fenómeno historicamente interessante a explicar é qual o modelo predominante em determinado momento. Ora quando os historiadores examinam em detalhe as sociedades que produzem determinado padrão confrontam-se com uma grande variedade de situações. Modelos predominantes em pontos afastados da Europa encontram-se, lado a lado, em duas micro-regiões vizinhas<sup>(39)</sup>. Os modelos de organização doméstica que eram supostos servir a uma geografia de formas familiares demonstram adaptar-se e modificar-se muito rapidamente perante novas solicitações

(38) Richard Wall; Jean Robin; Peter Laslett, *Family forms in historic Europe*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983. Para uma síntese mais recente ver André Burguière; François Lebrun, "As mil e uma famílias da Europa" in André Burguière, *et. al.*, *História da Família*, vol. Ili, pp. 15-82, Lisboa, Terramar, 1998, [ed. original de 1986] e Robert Rowland, "Regime demográfico e sistema familiar", in Robert Rowland, *População, Família, Sociedade, Portugal, Séculos XIX-XX*, Oeiras, Celta, 1997.

(39) Burguière e Lebrun, *ob. cit.*, p. 42.

económicas ou legais. A relação entre os modelos demográficos e as variáveis sociais, como as que relevam da economia, das mentalidades ou dos sistemas políticos variam fortemente de contexto para contexto. Ao mesmo tempo, quando os historiadores se debruçam com mais detalhe sobre os casos concretos, detectam uma multiplicidade de estratégias e motivações individuais que têm dificuldade em ligar à existência de um padrão global. A variedade é tal que exprimir esta realidade complexa sob a forma de um conjunto de padrões de causalidade ou co-ocorrência se revela extremamente difícil.

Robert Rowland resume claramente o problema do ponto de vista do demógrafo:

“Não é fácil articular conceptualmente *decisões* conscientes de indivíduos com a *lógica* subjacente ao funcionamento de um sistema auto-regulado, porque no primeiro caso estamos a utilizar uma metodologia *individualista*, que procura explicar o sentido *intrínseco* e consciente de decisões e acções individuais, e no segundo estamos à procura de um sentido *extrínseco* e *sociológico* (que pode muito bem ser inconsciente) dessas mesma acções e decisões, utilizando uma metodologia de tipo *holista*. [...] Apesar dessas dificuldades, é precisamente aqui que se torna necessário concentrar as atenções, nos processos através dos quais comportamentos individuais se transformam em mecanismos sociais e vice-versa<sup>(40)</sup>).

A lógica do sistema terá necessariamente de ter uma fundação na prática dos indivíduos. Contudo os indivíduos não têm consciência dessa lógica quando praticam as acções que a exprimem<sup>(41)</sup>. A distância entre o sistema e a prática individual é um dos temas centrais da teoria social actual<sup>(42)</sup>.

<sup>(40)</sup> Robert Rowland, *ob. cit.*, p. 72. Ver sobre isto, do mesmo autor, *Antropologia, História e diferença*, Porto, Afrontamento, 1987.

<sup>(41)</sup> Pierre Bourdieu exprimiu este princípio de forma muito clara: "Une des contradictions pratiques de l'analyse scientifique d'une logique pratique reside dans le fait paradoxal que le modèle le plus cohérent et aussi plus économique, celui qui rend raison de la manière la plus simple et la plus systématique de l'ensemble des faits observés, n'est pas le principe des pratiques don't il rend raison mieux qu'aucune autre construction; ou, ce qui revient au même, que la pratique n'implique pas - ou exclut - la maîtrise de la logique qui s'y exprime.", in *Le Sens Pratique*, Paris, Ed. de Minuit, 1980, p. 25.

<sup>(42)</sup> Louis Dumont apresenta este dualismo como a grande distinção

Parece-nos que, neste confronto, o individualismo metodológico sofre de um défice formal. O holismo teve essa grande referência que foi o movimento estruturalista que se origina na distinção saussuriana entre *langue* e *parole*<sup>(43)</sup>. A linguística estrutural forneceu um conceito novo e fascinante: o da estrutura inconsciente que fornece a condição de possibilidade para a prática dos indivíduos (a língua por detrás da fala). Esta ligação é fundamentalmente unidireccional - é difícil teorizar a invenção de algo tão complexo, racional e estruturado como uma língua humana a partir da interacção espontânea de indivíduos que lhe preexistiam.

Da linguística este conceito passa à antropologia pela obra marcante de Claude Lévi-Strauss. Primeiro com o parentesco, depois com o pensamento mítico, Lévi-Strauss demonstrou que existiam outras "línguas" por detrás de outras "falas"<sup>(44)</sup>. A partir daqui alastra um movimento teórico nas ciências sociais fortemente marcado pelo paradigma holístico da linguística e que se designou por "estruturalismo"<sup>(45)</sup>.

A ultrapassagem desta dualidade passa pela construção de conceitos operatórios que unam as duas dimensões. É de certo modo esse o objectivo do labor de Bourdieu, que produziu os conceitos de *habitus*, campo, capital e estratégia<sup>(46)</sup>.

O conceito de "emergência" é central a todo este debate. Aceitar

metodológica actual: *Ensaio sobre o individualismo: uma perspectiva antropológica sobre a ideologia moderna*, Lisboa, D. Quixote, 1992 [ed. original de 1983], pp. 13-14.

<sup>(43)</sup> Ferdinand de Saussure, *Cours de linguistique générale*, Paris, Payot, 1962 [baseado num curso de 1906-11]. Comentário em Bourdieu, *Le sens pratique*, pp. 51-70.

<sup>(44)</sup> Claude Lévi-Strauss, *Les structures élémentaires de la parenté*, Paris, Mouton, 1968 [ed. original de 1947]; *Mythologiques*, Paris, Plon, 4 vols., 1964-67.

<sup>(45)</sup> Jean-Marie Benoist, *La révolution structurale*, Paris, Grasset, 1975; J.B.Fages, *Para entender o Estruturalismo*, Lisboa, Morais, 1970 [ed. original de 1967].

<sup>(46)</sup> Sobre estes conceitos e a necessidade teórica da sua criação face aos limites dos dualismos das teorias sociais existentes veja-se: "A génese dos conceitos de habitus e de campo", in Pierre Bourdieu, *O poder simbólico*, Lisboa, Difel, 1989 [ed. original 1986] pp. 89-73 e Pierre Bourdieu, *Le sens pratique, cit.*, pp. 87-109.

o contributo dos sistemas adaptáveis complexos neste domínio é prestar uma atenção redobrada às motivações locais dos agentes. Em vez de descrevermos o modelo demográfico que melhor encaixa nos dados reconstituídos das populações do passado e de o complementarmos com o rol habitual de nuances e excepções detectadas, façamos destas últimas o centro da análise e procuremos demonstrar o modo como as estratégias individuais produzem os dados agregados.

*Terceiro objectivo: estar atento aos fenómenos de agregação e emergência*

Como salienta Raymond Boudon, o efeito de agregação de comportamentos individuais está, em muitos casos, longe de ser intuitivo. É necessário um esforço de atenção e de recolha de informação especificamente orientado para resolver situações aparentemente simples. Alguns exemplos, recolhidos na obra *O lugar da desordem*<sup>(47)</sup>:

- Se alguém deseja habitar um meio em que metade dos seus vizinhos seja da sua categoria social, o resultado é que quase todos os vizinhos de cada indivíduo pertencerão à mesma categoria que ele. A agregação das pretensões individuais limitadas tem um efeito que excede largamente a expectativa inicial.
- As preferências individuais podem ser transitivas (se preferir A a B e B a C então prefiro A a C), mas as preferências colectivas podem não o ser.
- Circunstâncias em que a oferta e a procura nunca coincidem: num dado momento há falta de determinados profissionais o que incita os jovens a procurarem formação nessa área. Durante algum tempo temos estudantes em formação, que ainda não entraram no mercado de trabalho, sentido-se ainda a falta de oferta. Quando a oferta equilibra a procura ainda há muitos jovens no processo formativo o que provoca excesso de profissionais.
- Quando se observam os salários de uma amostra de indivíduos constata-se normalmente que os valores crescem até uma determinada idade e depois vão decrescendo. Contudo,

<sup>(47)</sup> *Ob. cit.*, pp. 90-96.

do, dentro da população em causa o salário de cada um aumenta de forma regular ao longo de toda a vida. Este dois factos não são incompatíveis.

A superação do dualismo entre individualismo e holismo passa pela reconstituição dos efeitos recíprocos entre os indivíduos e as estruturas. A acumulação de exemplos de situações emergentes no estudo dos sistemas adaptáveis complexos encoraja a que se enfrente esta problemática com alguma esperança.

A atenção dos historiadores é muitas vezes captada pela tentação de testar modelos. Saber, para retomar o exemplo demográfico, que forma de organização familiar prevalece numa determinada região em determinada época. Interrogarmo-nos se o feudalismo, como modelo de organização social, económica e política, existiu ou não no nosso país. Se o Salazarismo foi um verdadeiro fascismo. Outras vezes, pelo contrário, é a tentação da descrição espessa, da reconstituição dos casos particulares, que orienta a investigação.

É necessário levar a atenção especificamente para o efeito agregativo, conseguir explicar como comportamentos simples geram padrões complexos.

*Quarto objectivo: chegar às estratégias para além das normas*

Os algoritmos genéticos dão-nos uma perspectiva formalizada e eficaz para lidar com aquilo que designamos por "estratégias" e que normalmente significa uma série de escolhas feitas pelos indivíduos para atingirem determinados fins. O processo de construção de modelos internos permite pensar que os agentes não possuem visões necessariamente coerentes e estruturadas do real. Antes funcionam com conjuntos de regras, algumas contraditórias, cuja interacção está constantemente a ser modificada pela prática concreta.

Esta perspectiva permite evitar o uso exagerado de noções como "visão de mundo", "ideologia dominante" ou "mentalidade" para explicar o enquadramento cognitivo dos agentes históricos. Essas noções apontam todas para um conjunto coerente de conceitos que enquadram as acções colectivas e que são, por isso, responsáveis pela reprodução social. Em sociedades pré-industriais um papel importante é acordado à religião e à Igreja no plano do enquadramento mental das populações, reservando-se embora algo para uma mentalidade

popular mais ou menos autónoma, para dar conta dos testemunhos que a própria Igreja deixou das dificuldades que sentia em moldar as mentes dos seus fiéis. A principal característica dessas visões de mundo é que por um lado produzem as "representações" (categorias que os indivíduos utilizam para apreender o real) e as normas (os sistemas de proibições e obrigações que define o comportamento socialmente aceitável ou desejável).

O problema de partirmos do princípio que existe uma visão de mundo partilhada pela comunidade é que nos limita a capacidade de explicar o desvio à norma, o comportamento não conformista. Ou pensamos que o enquadramento mental dominante é imposto por meios de coerção ou sedução parcialmente eficazes, ou supomos que existem grupos que de algum modo se situam à margem da sociedade, escapando às suas normas.

Ora em muitas situações necessitamos de uma abordagem mais flexível que admita que os mesmos indivíduos, ou indivíduos diferentes com lugares sociais equivalentes, possam sucessivamente seguir ou violar as regras de comportamento geralmente seguidas, segundo os seus interesses estratégicos conjunturais sem que isso crie um problema de descrença ou de marginalidade.

Um caso retirado, novamente, da paróquia de Soure no século XVIII ilustra esta ideia<sup>(48)</sup>. Em 1700 duas irmãs, Joana e Josefa, ficam órfãs de pai. Têm, respectivamente, 11 e 14 anos de idade. A irmã mais nova, Joana, irá recorrer 12 anos mais tarde a um dos mecanismos comunitários de apoio a raparigas pobres: o dote de casamento da Misericórdia, no valor 15.000 réis, entregue a quem quisesse casar com uma rapariga sem meios e de bons costumes. O objectivo do dote era livrar essas raparigas de caírem na tentação de uma vida pecaminosa por não encontrarem quem com elas quisesse casar. A Misericórdia de Soure só concedia um dote anual e Joana conseguiu-o em 1712, casando-se com 23 anos. Josefa, a irmã, com 27 anos na altura, fica solteira. Os anos passam. Em 1716, com 30 anos de idade, Josefa denuncia um José Rodrigues por a ter seduzido com promessas de casamento. A denúncia surge porque José pretende casar com outra rapariga e quando o pároco publica os banhos Josefa levanta um impedimento, chamado de pública honestidade, alegando que

(48) Joaquim Ramos Carvalho, *ob. cit.*, pp. 171-172.

ele lhe tinha prometido casamento. Na instrução do processo Josefa relata vários pormenores da sua relação com José. Aparentemente José apareceu-lhe dizendo que queria casar com ela. Face a essa promessa Josefa entregou-se-lhe. Mas José foi sucessivamente adiando a data do casamento, com as desculpas mais variadas: que não tinha um capote; que o pão estava caro; que se esperaria pelo S. João. E Josefa vai mantendo a relação, de adiamento em adiamento, até ao dia em que, na igreja da paróquia, ouve o anúncio do casamento de José com outra.

Estas duas irmãs estão de dois lados diferentes das estatísticas do conformismo moral. Contudo não só o seu contexto social é o mesmo mas, é preciso sublinhar, as suas motivações são as mesmas. Ambas querem casar. Joana consegue-o pela via da virtude recompensada em dinheiro. De certo modo o seu sucesso determina que a mesma via fica fechada à irmã - a Misericórdia não daria o dote duas vezes na mesma família. À medida que Josefa vê fechar-se a curta janela temporal que o casamento tardio deixa aberta para uma rapariga encontrar parceiro, a via da virtude toma-se uma estratégia menos competitiva. Assim, quando aparece José, Josefa permite uma relação pré-conjugal, quando uns anos atrás não teria provavelmente permitido.

Neste exemplo parece claro que a questão não é nem de crença, nem da eficácia da visão do mundo normalizante. É claramente uma questão de estratégia, em que as normas morais, neste caso, são um dos elementos que os agentes têm em conta, no meio de outros. Ter um comportamento moral tem vantagens e desvantagens, que variam conforme muitas outras variáveis. A função das instâncias com objectivos normalizadores, como a Misericórdia e a Igreja, é incrementar as vantagens da moralidade e as desvantagens da imoralidade. A inculcação e interiorização de conceitos de bem e mal, de pecado e salvação, são meios importantes de cumprir essa função, e que, quando funcionam, são particularmente económicos. Mas estas instituições não se coíbem de tomar mais mundanos a recompensa e o castigo.

A concepção de modelos intemos que determinam as acções dos agentes com base num conjunto de estratégias alternativas que competem entre si, permite muito mais eficazmente dar conta do episódio relatado do que uma abordagem em termos de conformismo ou não conformismo face a uma visão de mundo normativa que nem a própria Igreja do tempo acreditava que funcionasse plenamente.

Esse conceito não só avaliza uma explicação em termos simplesmente de estratégia, como a que apresentamos, como também dá coerência à actividade de instituições como a Misericórdia, cuja prática não pode senão ser considerada como eficaz à luz de um exemplo destes: tinham razão, o dote fazia uma diferença. Assim as instâncias normativas actuam sobre os mecanismos de recompensa e inibição que moldam a evolução das estratégias individuais, ajudando a construção dos modelos internos "correctos".

*Quinto objectivo: relativizar a objecção da "representatividade"*

A objecção da representatividade consiste no argumento de que o estudo de uma comunidade restrita, por muitos resultados interessantes que produza, tem sempre um valor reduzido por não ser possível determinar até que ponto o objecto de estudo constitui ou não um caso particular a partir do qual se pode generalizar. O conhecimento assim produzido teria por isso um valor muito reduzido para o avanço geral dos conhecimentos. Quando a natureza do estudo é estatística esta objecção é passível de ser antecipada pela utilização de modelos de amostragem.

A ideia da representatividade é a de que existe um conjunto de variáveis típicas, que se obtêm juntando uma grande quantidade de casos. Implica por isso a crença que estamos perante um sistema que pode ser adequadamente descrito por um comportamento médio. Ora em sistemas não lineares, como é o caso dos sistemas adaptáveis complexos, tal pressuposto pode ser completamente falso. Que sentido faria, na nossa simulação, agregar todas as curvas demográficas de todas as disposições de agentes que pudéssemos recolher? Por outro lado, o que há para descobrir não é o valor mais frequente, ou médio, de um conjunto de variáveis. É antes a lógica dos processos, o funcionamento das estratégias. Nesse contexto o estudo espesso de uma comunidade é muito mais elucidativo, porque se entende melhor o contexto das estratégias e das interacções entre agentes, do que um estudo agregativo que fornece a distribuição de umas poucas variáveis.

*Sexto objectivo: não exorcizar o acaso*

Finalmente algumas palavras sobre o papel do acaso, ou do aleatório, na interpretação histórica. É coerente com uma determinada

ideia de ciência que atribuir um acontecimento ao acaso implica uma insuficiência explicativa fundamental. Nada acontece por acaso. O acaso é a ilusão de não conhecermos todas as causas.

Decorre também da ideia dos fenómenos sociais como sendo sobre-determinados por estruturas ou leis relacionais que o grau aleatório das acções individuais não pode alterar radicalmente a lógica subjacente ao todo social. Contudo a não linearidade dos fenómenos e os exemplos das teorias do caos e da auto-organização implicam que acontecimentos a uma escala muito pequena podem ter consequências macroscópicas importantes. Essa diferença de escala reintroduz o aleatório na lógica da evolução das sociedades. O acaso passa a ser a consequência do facto de pequenas acções ou pequenos acidentes poderem ter um efeito macroscópico grande. Como não podemos ambicionar um conhecimento suficientemente detalhado de todos os fenómenos microssociais, necessariamente existirão fenómenos macrosociais que se devem a variações a escala muito pequena que, para todos os efeitos, não obedecem a qualquer padrão.

Na nossa simulação esse tipo de mecanismo está presente no sentido em que podemos dizer que a configuração concreta da distribuição espacial das espécies é de natureza aleatória. Na verdade ela é a consequência, perfeitamente determinística, dos movimentos combinados dos agentes nas fases iniciais de evolução do sistema. Mas os movimentos dos agentes têm uma natureza probabilística. Em termos estatísticos cada agente tem uma tendência clara para se deslocar preferencialmente em determinadas direcções. Dentro dessa tendência, num dado momento, um agente que tende para Norte pode deslocar-se brevemente para Sul. Esse movimento pode perfeitamente dar origem a uma disposição espacial de três ou quatro agentes que seja o embrião de uma agregação cooperativa e determinar, por isso, ao fim de muito tempo, a distribuição geral das espécies pelo espaço a nível macroscópico. Até esse "momento mágico" ocorrer muitas outras configurações finais seriam possíveis. Uma pequena variação provocou um "congelamento" das alternativas equi-prováveis e fixou o futuro.

De um modo mais geral podemos lançar a hipótese que existem em determinados momentos históricos muitas configurações alternativas possíveis para a evolução futura de um sistema dado. Essas configurações têm inicialmente probabilidades de ocorrência semelhantes. Mas um pequeno detalhe pode fixar uma delas em detrimento das outras.

Poderíamos considerar, como muitos estudos parecem sugerir, que diferentes formas de organização familiar resultam de uma série de comportamentos adaptativos em que situações semelhantes podem dar lugar a soluções diferentes. Entre soluções de eficácia semelhante, a escolha pode ser aleatória e perpetuada pela inércia natural dos comportamentos e o período de tempo lento em que as gerações se substituem. Aliás, existindo várias estratégias alternativas, é natural que algumas se tornem dominantes não só porque são superiores, mas simplesmente porque é difícil coexistirem estratégias diferenciadas quando cada uma implica esquemas de reciprocidade que envolvem muitos agentes. As estratégias vencedoras não são necessariamente as melhores, mas apenas aquelas que *por acaso* (isto é, por circunstâncias suficientemente "pequenas" para escaparem à nossa observação) se tomaram dominantes, criando uma situação difícil de modificar. Algo semelhante acontece na evolução tecnológica, em que um produto superior novo não tem condições para sobreviver por muito excelente que seja, simplesmente porque o custo de modificação dos hábitos maioritários seria tal que as vantagens da nova solução são anuladas.

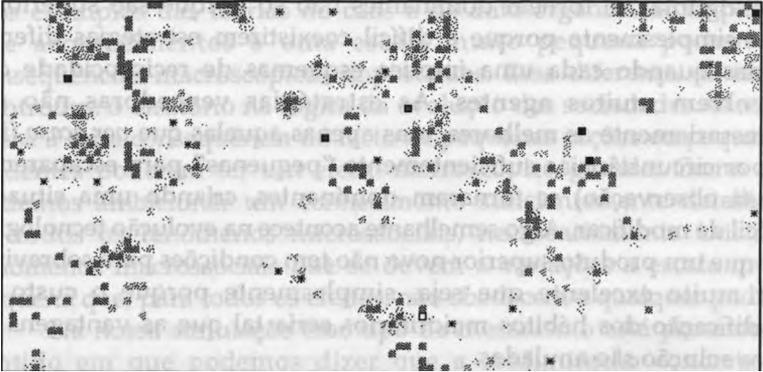
O que interessa realçar é o seguinte: pode não ser possível explicar porque determinado modelo, e não outro qualquer, prevaleceu em determinado momento. Vários modelos poderiam ser igualmente prováveis e fenómenos microscópicos, em termos sociais, provocaram o ligeiro avanço de um deles, avanço esse que, pela não linearidade dos sistemas, torna o modelo em solução dominante e dificulta o surgimento de alternativas. Nesses casos, para todos os efeitos, a explicação do porquê aquele modelo e não outro deve-se ao acaso. É óbvio que o modelo dominante pode e deve ser explicado em termos da sua adequação à função social que cumpre. Será sempre um sistema cuja eficácia carece de ser estudada. Mas será talvez inútil procurar uma causa intrínseca para a superioridade da solução que ele encerra.

### Conclusão

A teoria dos sistemas adaptáveis complexos pode dar um contributo interessante para a interpretação da evolução das sociedades humanas. A simulação de fenómenos sociais ganhou uma metodologia muito mais eficaz, permitindo o teste de teorias em ambientes controlados. O contributo mais imediato, contudo, parece

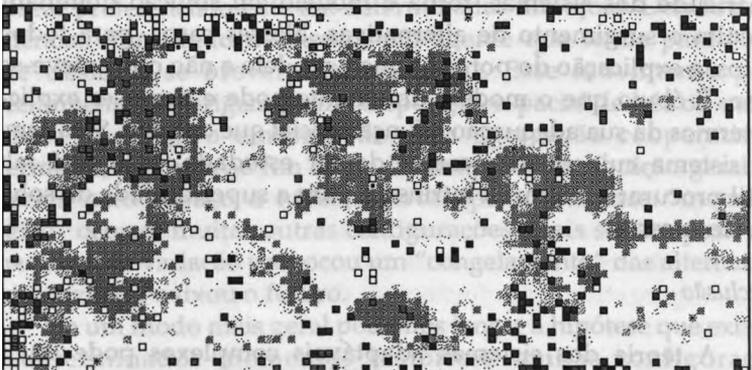
ser a introdução de um conjunto de conceitos que possibilita interpretar, de forma mais consistente, a interação dos comportamentos individuais com as características globais dos sistemas sociais.

Figura 1: Simulação com taxa de reposição de recursos baixa.



61

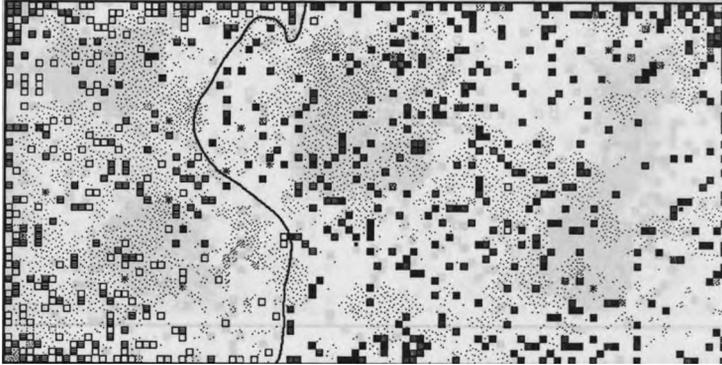
(A) Fase inicial da simulação: alguns agentes aleatoriamente colocados.



749

(B) Início do processo de associação com segregação espacial (canto superior direito)

Figura 1: Simulação com taxa de reposição de recursos baixa (cont.)



1531

Fase (C): divisão do espaço consumada (fronteira adicionada para maior clareza).



3000

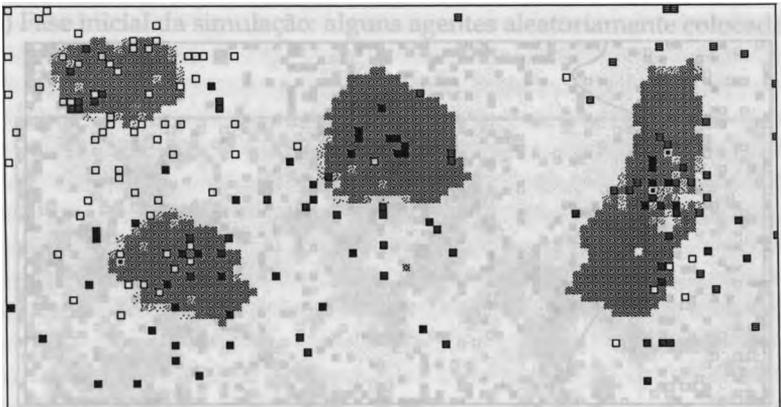
Fase (D): Progressivo mas lento recuo da associação minoritária (fronteira adicionada).

Figura 2: Simulação com taxa de reposição de recursos alta



1

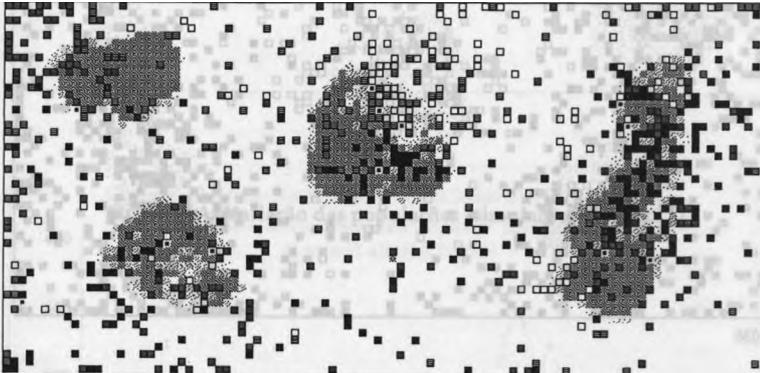
Fase(A) Quatro agentes, um de cada cor, colocados em quatro zonas de alimento.



202

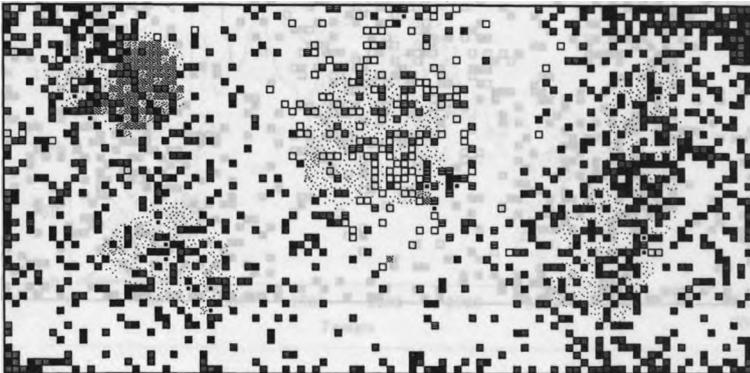
Fase(B) Multiplicação dos agentes e surgimento de mutações

Figura 2: Simulação com taxa de reposição de recursos alta  
(cont.)



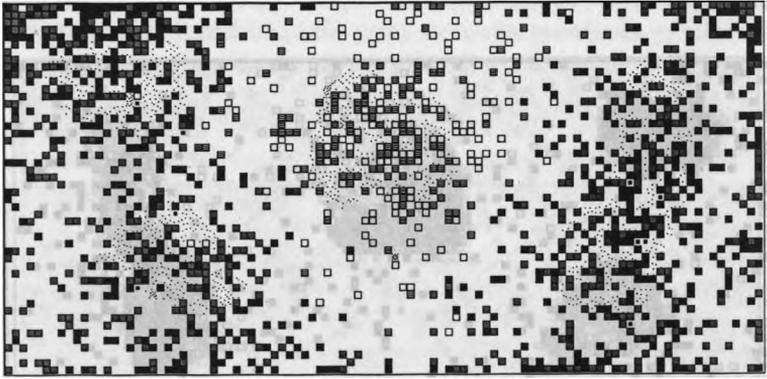
350

Fase(C) Início do processo de associação e segregação espacial  
(centro e direita)



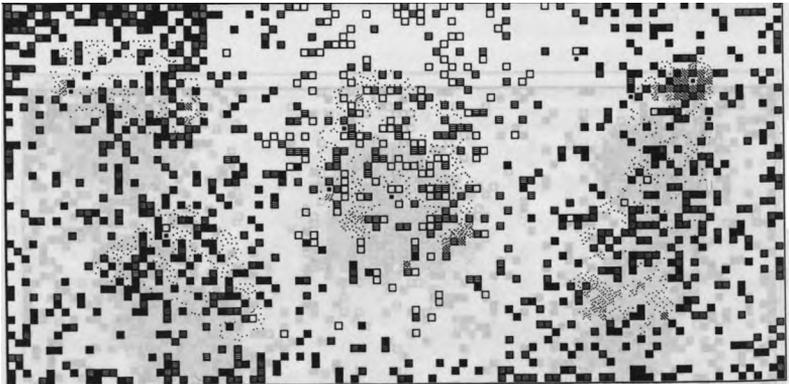
700

Fase(D) Consolidação do processo de ocupação espacial.  
Configuração estável.



1035

Fase(E) Capacidade de sustentação do meio atingida.



8000

Fase(F) Permanência da estrutura apesar da constante substituição dos indivíduos.

