



Síntese Computacional de Fenômenos Naturais: Vida Artificial e Geometria Fractal Parte 1: Síntese Comportamental

*Yupanqui Julho Muñoz¹
Leandro Nunes de Castro¹*

1. Introdução

Sintetizar computacionalmente formas e comportamentos da natureza é uma tendência e também uma necessidade da atualidade. A indústria das artes, incluindo animação comportamental, cinema, jogos eletrônicos, e diversas outras áreas, precisa de abordagens capazes de sintetizar, de forma rápida e parcimoniosa, padrões e comportamentos encontrados na natureza. Por exemplo, tradicionalmente, ao desejarmos sintetizar virtualmente ou computacionalmente a forma de uma montanha ou planta, a idéia básica envolvia a utilização de formas Euclidianas comuns (p. ex., esferas, cilindros, retas, etc.), ou o uso de algum ‘padrão’ baseado em fotografias, como bloco construtivo. No caso da síntese de comportamentos, a metodologia típica empregada envolvia escrever um *script* (programa computacional usado para ações simples e repetidas) que determinasse unicamente a seqüência de passos e ações de um dado agente virtual. Além disso, diversos campos de pesquisa vêm surgindo dentro das várias disciplinas fundamentais (p. ex., biologia e

¹ Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSIn), Universidade Católica de Santos (UniSantos), Programa de Mestrado em Informática. Yupanqui Julho Muñoz munoz@lsin.unisantos.br; Leandro Nunes de Castro lnunes@unisantos.br

neurociências), como, por exemplo, *neuroetologia computacional* (Cliff, 1998) e *etologia sintética* (MacLennan, 2002). Isto se deve aos novos mecanismos de investigação, incluindo aqueles da Vida Artificial, que surgiram com o objetivo de complementar e suplementar limitações das técnicas tradicionais.

A *computação natural*, linha de pesquisa surgida nas últimas décadas e que vem aproximando a computação da natureza de uma forma inter e multidisciplinar com resultados marcantes para diversas áreas da ciência, comércio e indústria, surgiu com o intuito de promover uma quebra do paradigma que antes regia a síntese computacional de fenômenos naturais (de Castro, 2006). A computação natural enfatiza conceitos até então pouco explorados neste contexto, como emergência, auto-organização e a geometria fractal da natureza. O resultado é, invariavelmente, um processo de síntese muito mais realista da natureza com reduzido custo computacional e que amplia nossa perspectiva da *vida-como-nós-a-conhecemos* para a *vida-como-ela-poderia-ser*.

A perspectiva da computação natural enfatizada neste artigo é a do uso da computação, sob um ponto de vista amplo, como ferramenta para auxílio ao entendimento de questões fundamentais da vida (natureza), como: Quais as ‘leis’ e ‘regras’ que regem o comportamento coletivo dos organismos? Quais as ‘leis’ e ‘regras’ que regem o desenvolvimento e evolução orgânica? Estas ‘leis’ podem ser abstraídas da matéria constituinte dos organismos? Qual a utilidade prática de sintetizar e entender melhor as formas e comportamentos encontrados na natureza? Até que ponto a síntese de padrões e comportamentos pode contribuir para as ciências da vida, como a biologia?

Este artigo, dividido em duas partes, contribui para a difusão da computação natural como um novo paradigma computacional que propõe respostas, parciais e incompletas, para estas questões centrais da atualidade. A primeira parte discursa sobre a Vida Artificial enfatizando dois conceitos primordiais quando o enfoque é a síntese comportamental: *emergência* e *auto-organização*. São

apresentados alguns conceitos da área relevantes à discussão abordada e dois projetos de Vida Artificial são revistos no intuito de ilustrar como ela pode contribuir para o entendimento de parte das questões levantadas acima. Além disso, são referenciadas algumas das principais tendências e problemas em aberto da área, tanto sob uma perspectiva tecnológica quanto sob uma perspectiva fundamental e filosófica da ciência. Na segunda parte, dedicada à síntese da *geometria fractal* da natureza, o conceito de dimensão fractal é apresentado pragmaticamente, com ilustrações de como se calcular a dimensão fractal para formas e objetos distintos. Alguns dos fractais pioneiros são revistos e os sistemas de Lindenmayer são apresentados como uma das ferramentas para a síntese computacional de padrões, como plantas e outras paisagens arbóreas. Técnicas correlatas, como *movimento Browniano fracionário* e *sistemas de partículas*, também são brevemente discutidas e ilustradas. As principais tendências da área e problemas em aberto concluem a segunda parte deste artigo.

2. *Vida Artificial*

A Vida Artificial (do inglês *artificial life*, ALife) pode ser entendida como o estudo de sistemas feitos pelo homem que exibem comportamentos característicos de sistemas vivos. Esta definição foi proposta por Christopher G. Langton em 1989, um dos pioneiros deste novo campo de investigação interdisciplinar. Enquanto a biologia tradicional atua analiticamente no estudo da vida baseada em cadeia de carbono (único tipo de vida conhecido), a Vida Artificial é uma nova abordagem de síntese não apenas da *vida-como-a-conhecemos* (*life-as-we-know*), mas também da *vida-como-ela-poderia-ser* (*life-as-it-could-be*) (Langton, 1989) e seu enfoque, como veremos mais explicitamente adiante, é a síntese comportamental.

A abordagem da *vida-como-ela-poderia-ser* trás a biologia ao seu princípio, que é o estudo da vida independentemente de sua composição material (Langton, 1989). A concepção da vida como um processo dinâmico se desvencilha da convenção analítica da

biologia tradicional, na qual a matéria é a base para a vida, e passa a se preocupar com características universais compartilhadas por qualquer entidade reconhecida como viva, independentemente de sua composição química. Essas características (ou propriedades) universais da vida (Farmer & Belin, 1991; Keeley, 1997) são capturadas pelos comportamentos elementares dos componentes constituintes de um organismo ou sistema vivo e elas são propriedades do todo (p. ex., sistema vivo), pois nenhuma das partes as possui independentemente. É importante reconhecer, entretanto, que a conceituação de vida através da especificação de um conjunto de características é controversa (El-Hani & Videira, 2000).

A Vida Artificial imersa nesta abordagem trás inerente a ela uma outra metodologia de modelagem de fenômenos naturais. Enquanto a biologia tradicional, a IA clássica e muitos outros campos de pesquisa utilizam, predominantemente, uma estratégia top-down para modelar sistemas (o sistema é modelado como um todo, antes de entrar em detalhes nas partes que o compõem), envolvendo um controle complicado e centralizado que toma decisões baseadas em acessos a todos os aspectos do estado global, a Vida Artificial faz uso de uma estratégia do tipo *bottom-up* (o sistema é desenvolvido detalhando os componentes e as regras locais que regem as interações entre eles). Muitos sistemas naturais exibem comportamentos autônomos complexos, parecendo estar organizados paralelamente em redes distribuídas de comunicação entre ‘agentes’ que tomam decisões capazes de afetar diretamente apenas seus estados locais. Cada decisão do agente se baseia na informação referente ao seu próprio estado local. A estratégia *bottom-up* possibilita uma modelagem em Vida Artificial que abrange as seguintes propriedades de nível superior dos organismos vivos (Boden 2001):

- *Características universais da vida*: autonomia e evolução.
- *Estilos de vida*: simbioses, parasitismo, etc.
- *Comportamentos particulares*: aglomeração, evasão, etc.
- *Processo de desenvolvimento expansivo*: diferenciação celular, etc.

- *Morfologia corpórea*: padrão de ramificações em planta, etc.

Deste modo, há diversas vantagens metodológicas no uso das estratégias sintéticas de modelagem computacional através de abordagens *bottom-up* e que podem ser mencionadas (Dean 1998; Bedau, 2003):

- Podemos alterar livremente os parâmetros que definem os padrões de eventos, as arquiteturas dos organismos, o ambiente e as leis que regem o comportamento dos objetos do ambiente construído;
- Podemos isolar e variar cada parâmetro isoladamente, associar diversas variações, combiná-las temporalmente e/ou espacialmente, e observar as conseqüências decorrentes de um, ou diversos, destes procedimentos;
- Podemos replicar todos os procedimentos, introduzir novos e subtrair antigos parâmetros;
- Podemos rever a história de interação de cada organismo com seus co-específicos, com seus predadores, com o ambiente e com os diversos eventos que o constituem e, a partir destes dados, calcular “probabilidades de encontros entre organismos”, ou prever o aparecimento de certas atividades, quando assumidas certas condições.

Todas estas características proporcionam uma maior flexibilidade e rapidez no entendimento não só de sistemas biológicos, mas também de diversos fenômenos naturais (p. ex., sociológicos, psicológicos e lingüísticos).

Em síntese, numa modelagem *bottom-up* o resultado final é um comportamento dinâmico exibido pelo modelo, como conseqüência de iterações locais entre suas partes componentes, ao simular um fenômeno natural. Este comportamento é caracterizado por duas propriedades fundamentais: *auto-organização* (Decker, 2000; Camazine et al., 2001) e *emergência* (Holland, 1998; Emmeche et al., 1997).

3. *Auto-Organização e Emergência Conceituadas*

A auto-organização é a propriedade que se refere à tendência de organização espontânea contínua, que apresenta um compor-

tamento adaptativo adquirido autonomamente, ou seja, ausente de qualquer controle externo (Wolf & Holvoet, 2004). O aspecto fundamental é entendê-la como a formação de padrões e comportamentos através de interações internas ao próprio sistema, sem intervenção direta de influências externas. Além disso, as regras específicas de interação entre os componentes dos sistemas são executadas usando apenas informações locais, sem referência ao global (Camazine *et al.*, 2001). As principais características da auto-organização são (Wolf & Holvoet, 2004):

- *Aumento na ordem*: ‘organização’ é uma parte importante do conceito e que acontece continuamente numa estrutura, seja ela espacial, temporal ou funcional. Um sistema inicialmente semi-organizado ou totalmente aleatório adquire uma ordem que promove uma função específica (comportamento). Para tanto, o sistema deve estar entre a não-existência de ordem e a ordem excessiva, no limiar entre a ordem e o caos (Shalizi, 2001; Mostefaoui *et al.*, 2003; Heyligen, 1989, 2002).
- *Autonomia*: o sistema deve se organizar espontaneamente sem que qualquer fator externo o conduza, pois um fator externo introduziria informações exógenas ao sistema continuamente. Portanto, em um sistema autônomo as decisões serão tomadas com base na sua própria organização e dinâmica interna (Shalizi, 2001; Mostefaoui *et al.*, 2003; Camazine *et al.*, 2001; Foukia & Hassas, 2003; Heyligen, 1989, 2002).
- *Robustez e Adaptabilidade*: num fenômeno auto-organizado é esperada uma reação a mudanças mantendo sua organização autônoma. Logo, um comportamento adaptativo é necessário. Em outras palavras, mudanças no ambiente podem influenciar o sistema a gerar uma nova função específica sem alterar os comportamentos característicos de suas partes constituintes (Foukia & Hassas, 2003; Mostefaoui *et al.*, 2003).
- *Dinâmica*: para uma adaptação rápida às mudanças externas o comportamento auto-organizado precisa ser dinâmico. Mudanças influenciam a organização da estrutura e, para manter

a estrutura, é necessário haver uma dinâmica que se encarregue dessas mudanças. Em outras palavras, o sistema necessita estar afastado do equilíbrio estático, isto é, ele precisa estar sensível a mudanças do ambiente, além de adaptável e capaz de reagir (Shalizi, 2001; Heyligen, 1989, 2002).

A formação de padrões ou comportamentos auto-organizados pode ser observada em muitos fenômenos naturais e sociais, como, por exemplo, em tempestades de areia, furacões, sistemas biológicos e químicos (p. ex., respostas imunológicas e neurais), construção de ninhos por insetos sociais (p. ex., abelhas, vespas, cupins e formigas), e muitos outros fenômenos (Laszlo 1987; Depew & Weber 1999; Camazine et al., 2001; de Castro, 2006).

Já a propriedade de *emergência*, ou *comportamento emergente*, é tipicamente entendida como um processo ou comportamento que surge ao nível macro do sistema, mas que se mostra irreduzível aos comportamentos e às propriedades de suas partes (Wolf & Holvoet, 2004). Portanto, o termo *emergência* é freqüentemente relacionado à idéia de *criação de novas propriedades* (Morgan, 1923). Isso se deve a imprevisibilidade do comportamento emergente global de um sistema a partir de suas partes. Em simulações computacionais, por exemplo, isso se dá quando o programador, que tem acesso ao algoritmo subjacente à simulação, não consegue antecipar propriedades globais que os sistemas simulados apresentarão. Neste caso, estas propriedades são denominadas emergentes. As propriedades emergentes podem ser entendidas, em um sentido técnico, como uma certa classe de propriedades de nível superior (macro ou global) que se relacionam de uma certa maneira com o nível inferior (micro ou individual) em um sistema. Estas propriedades apresentadas no nível macro são, contudo, oriundas do comportamento agregado das partes no nível micro e devem ser explicadas a partir delas. Algumas das características importantes da emergência são (Wolf & Holvoet, 2004):

- *Efeito Micro-Macro*: refere-se às propriedades, comportamentos, estruturas ou padrões, que acontecem no nível

macro, oriundos das interações no nível micro. O comportamento global (emergente) é o resultado destas interações entre as entidades individuais do sistema (Holland, 1998; Odell, 2002; Crutchfield, 1994a,b).

- *Novidade*: os componentes do nível micro não explicitam a representação do comportamento global, em outras palavras, não podem ser diretamente descritos nem preditos investigando-se individualmente os componentes micro. A novidade, ou ‘nova propriedade’, surge porque o comportamento global não é compreendido e nem esperado pelo comportamento das partes (Holland, 1998; Crutchfield, 1994b).
- *Coerência*: refere-se a uma correlação compatível das partes. A emergência aparece como o todo integrado que tende a manter algum sentido de identidade, mas para atingir esta coerência no todo deve existir uma correlação entre os componentes (Holland, 1998; Odell, 2002).
- *Interação das Partes*: interações entre as partes são necessárias, pois sem elas o comportamento do nível macro não emerge (Holland, 1998; Odell, 2002).
- *Dinâmica*: novos tipos de comportamento (propriedades emergentes) surgem no sistema em certos instantes de tempo (Holland, 1998; Crutchfield, 1994a; Odell, 2002).
- *Controle Descentralizado*: esta é uma característica diretamente conseqüente da imprevisibilidade necessária à emergência. Um componente ou subconjunto de componentes não é suficiente para definir completamente o comportamento global do sistema e o todo não está sujeito a um controle central (Heyligen, 2002; Odell, 2002).
- *Relação Bidirecional*: a relação entre os níveis micro e macro é bidirecional num sistema emergente. Do nível micro para o nível macro e das interações entre partes surge um comportamento emergente global. Na outra direção, o comportamento emergente influi nas partes. Por exemplo, no caso da formação de trilhas de feromônio pelas formigas,

a trilha emergente influencia a movimentação das formigas (nível micro), pois elas são atraídas pelas trilhas de feromônio (Gordon, 1999; Odell, 2002).

- *Robustez e Flexibilidade*: dada à descentralização do controle, uma simples entidade não tem representatividade no comportamento global, implicando que uma falha em um determinado ponto ou componente não afeta o todo. Um dano ou erro que venha a ocorrer em algumas das partes do sistema poderá causar uma perda de desempenho, mas não uma perda total de funcionalidade. Esta flexibilidade permite que os componentes sejam substituídos e, ainda assim, o sistema mantenha sua estrutura emergente. Por exemplo, no vôo em bando dos pássaros, os pássaros podem ser substituídos por outros pássaros, mantendo o mesmo fenômeno (Heyligen, 2002; Odell, 2002).

Estes dois conceitos, auto-organização e emergência, são compreendidos e empregados algumas vezes de maneira confusa e errônea por estarem freqüentemente combinados em sistemas complexos adaptativos (Holland, 1998; Wolf & Holvoet, 2004). A principal similaridade entre eles é que ambos envolvem sistemas dinâmicos, mas cada um deles enfatiza aspectos diferentes do comportamento de um sistema e isto reflete a caracterização de cada um. Na auto-organização há uma robustez caracterizada pela adaptabilidade, propriedade importante e essencial de um sistema auto-organizado, que é adquirida autonomamente e em constante aumento da ordem. Já na emergência há uma robustez caracterizada pela flexibilidade, essencial para a existência de um comportamento global novo. Para melhor entendimento destes conceitos centrais em Vida Artificial, descreveremos a seguir um modelo clássico da área, denominado *Boids* (Reynolds, 1987).

4. Auto-Organização e Emergência Ilustradas

C. Reynolds (1987) desenvolveu um modelo comportamental para um conjunto de agentes virtuais, denominados *Boids*, atualmente

bastante utilizado em diversos contextos, em particular na indústria cinematográfica (p. ex., nos filmes *Batman Returns*, *O Rei Leão* e *O Corcunda de Notre Dame*). Os *boids* foram inspirados no comportamento coletivo de um bando de pássaros, onde não há um líder que conduz a formação convergente do bando, mas cada indivíduo (pássaro) toma uma ação a partir de seu estado interno e de sua percepção local do ambiente (espaço ao redor). Estes agentes são bastante simples e sem nenhuma capacidade cognitiva superior ('inteligência'). Suas ações e percepções se restringem a três regras comportamentais que promovem a simulação do bando (Reynolds, 1987):

- *Evasão de colisão*: cada agente evita colisão com os agentes próximos;
- *Ajuste de velocidade*: cada agente ajusta a sua velocidade com as dos agentes próximos;
- *Centralização do bando*: cada agente mantém-se próximo do centro de massa de um conjunto de agentes na sua vizinhança, como ilustrado na Figura 1.

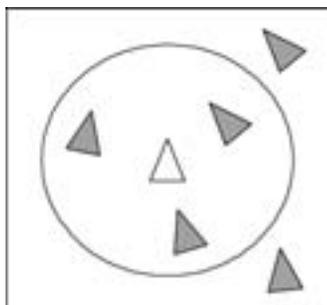


Figura 1: Ilustração de um *boid* e sua vizinhança.

Para ilustrar os fenômenos de auto-organização e emergência descritos acima observe os resultados apresentados na Figura 2. Estes resultados foram gerados *on-line* utilizando o Laboratório Virtual em Computação Natural (LVCoN). O leitor interessado em investigar estes fenômenos pode acessar o LVCoN no endereço: <http://lsin.unisantos.br/lvcon>. Na Figura 2(a), inicialmente foram inseridos no ambiente alguns *boids* próximos entre si e cujas velocidades iniciais possuem sentidos diferentes, mas não muito discre-

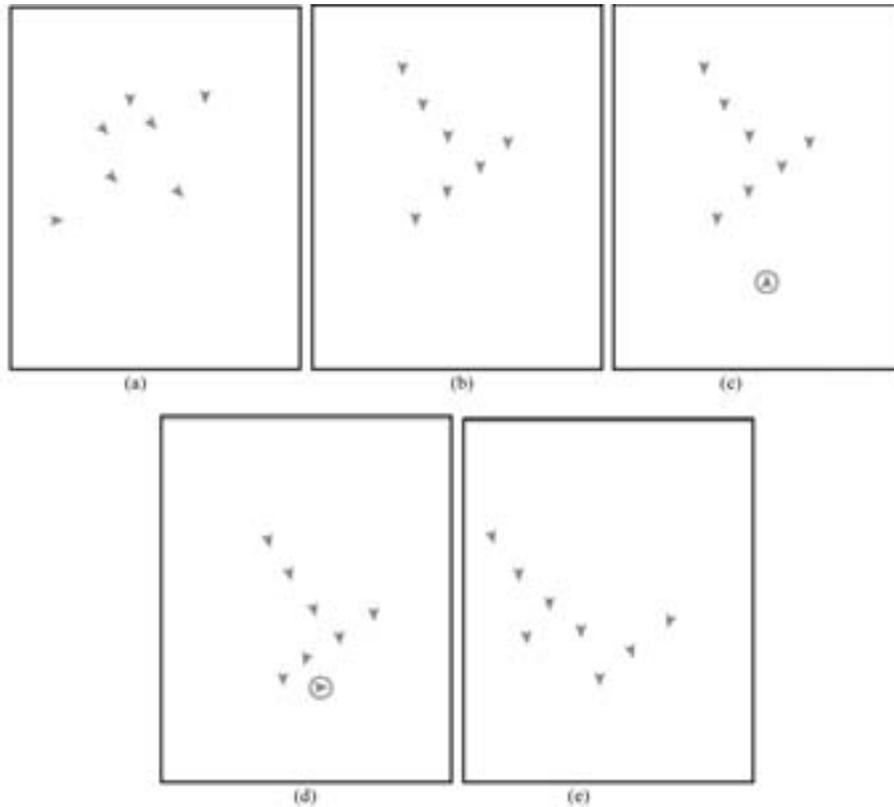


Figura 2: Uma simulação on-line dos boids realizada com o Laboratório Virtual em Computação Natural (LVCoN - <http://lsin.unisantos.br/lvcon/>). (a) Inserção de alguns boids no ambiente. (b) Após algumas iterações uma formação de bando emerge e se mantém em equilíbrio dinâmico. (c) Um novo *boid* (circulado) é inserido no ambiente seguindo, inicialmente, de encontro ao bando. (d) À medida em que o novo *boid* se aproxima do bando ele vai suavemente mudando o seu sentido e conseqüentemente se unido ao bando. (e) Após mais algumas iterações uma nova formação em bando emerge com a inclusão do novo *boid* e o bando se auto-organiza de forma a acomodar o novo *boid*.

pantes. Na Figura 2(b), passadas poucas iterações, uma formação em bando bastante familiar emerge e se mantém dinamicamente estável por um tempo até que um novo *boïd* seja inserido (ver Figura 2(c)) com velocidade e direção opostas à do bando. Na Figura 2(d) e (e), influenciado pelo bando, o novo *boïd* gradativamente se une aos outros emergindo uma nova formação em bando. Assim, o comportamento em bando torna-se um resultado natural da capacidade de auto-organização dos *boïds*, que é guiada pelas regras comportamentais individuais de cada *boïd*.

Não entraremos em detalhes sobre as regras comportamentais empregadas, pois o foco aqui é perceber a presença dos dois conceitos neste exemplo. O comportamento auto-organizado deste sistema pôde ser observado pelos seguintes aspectos: *i*) autonomia dos agentes: nada além das três regras internas regem suas ações; e *ii*) aumento na ordem: os agentes encontram-se inicialmente espalhados aleatoriamente pelo ambiente, mas com o passar do tempo convergiram para uma formação dinâmica em bando. Se colocarmos os *boïds* em um ambiente com obstáculos, o bando se adaptará as condições adversas encontradas (p. ex., divisão do bando para contornar um obstáculo). Um comportamento emergente também pôde ser observado, por exemplo, pelo comportamento global de formação do bando, que emergiu através das interações locais entre os *boïds* (a eliminação ou inserção de alguns *boïds* não compromete o comportamento global); e pela novidade, uma vez que não é possível prever quando e como será a formação do bando durante a simulação.

4.1. Algumas Implicações

A partir da abordagem *bottom-up* predominante na modelagem em Vida Artificial e das principais propriedades extraídas destes modelos, a *auto-organização* e a *emergência* deixam bem claro o enfoque da Vida Artificial na síntese comportamental. No exemplo dos *Boids* ilustrado na Figura 2, a relevância está no fato do comportamento de locomoção em grupo dos agentes virtuais ser muito semelhante ao de uma revoada de pássaros: os agentes virtuais (*boïds*) em si são meramente imputados como pássaros. Citando Lang-

ton (1989; p. 33), “Se os componentes são implementados corretamente, os processos que eles apóiam são genuínos – cada parte tão genuína quanto o processo natural que ela imita”.

A afirmação de Langton apresentada acima trás uma série de questionamentos e, baseado neles, C. Emmeche (1992) promove algumas discussões importantes. O fato de modelar a lógica de sistemas vivos não implica necessariamente que este modelo represente a real lógica dos sistemas vivos, pois os modelos são construídos através de dados derivados de teorias e observações. Um modelo científico, entretanto, não representa a natureza diretamente, mas sim uma teoria, não necessariamente completa. Além disso, a lógica da vida possui muitos níveis que transcendem tempo e espaço, indo do molecular ao ecológico e às relações evolutivas. Estes níveis (p. ex., físico-químico) são descritos por diferentes conjuntos de teorias, logo suas funções podem ser similares (entre o modelo e o organismo) em algum nível, mas a lógica inerente aos processos num nível físico-químico e, provavelmente, em níveis mais altos, é diferente (Emmeche, 1992). Ainda seguindo esta linha de argumentação, Emmeche questiona a filosófica premissa base da *Vida Artificial Forte* (Rennard, 2004), cujos detalhes serão discutidos na próxima seção: *independência entre forma e matéria*.

Emmeche (1992) ilustra a interdependência entre forma e matéria com um exemplo da bactéria *Escherichia coli* (*E.coli.*). A síntese do aminoácido *tryptophan* ocorre em três etapas e cada uma é catalisada por uma enzima específica. Para elas acontecerem se faz necessária uma rede complexa envolvendo outras enzimas e proteínas, além das especificações de suas seqüências de aminoácidos e da unidade de controle (*tryptophan operon*) no DNA. Todas as transcrições e traduções consomem bastante energia, logo, uma regulação destes processos em resposta as necessidades das enzimas é bastante vantajosa e importante para a célula. Foi descoberto na *E.coli.* que este sofisticado sistema para controle da transcrição da *tryptophan operon* envolve tanto a função da proteína codificada, quanto a natureza física da cadeia de RNA (ver Landick & Yanofsky, 1987).

Neste caso, apresentado de forma bastante resumida, por mais que um modelo em Vida Artificial possa ser formalmente similar ao *E.coli.*, sob uma perspectiva operacional, ele não terá similaridade física ou causal com o sistema real. É freqüentemente usado o modelo de auto-reprodução de Von Neumann (1966) fazendo analogias aos seus componentes como sendo ribossomos, polimerases, etc. Porém, esta analogia é incompleta, uma vez que as funções biológicas dos componentes não são separadas no sistema real e dependem da estrutura física específica dos constituintes. A informação dinâmica armazenada na estrutura tri-dimensional do DNA e o resto dos componentes não é representada num modelo formal de auto-reprodução. Assim, a tentativa de realizar esta descrição formal em um outro meio, que não a cadeia de carbono, será difícil se a implementação da descrição formal não levar em conta a interdependência da forma e matéria no nível celular. O que será realizado é a teoria formal e não a duplicação original de um sistema vivo (Emmeche, 1992). Além disso, não estaríamos fazendo uma interpretação intrínseca ao sistema formal e sim imputando à saída simbólica um significado (p. ex., *boids* com pássaros): “a semântica não é intrínseca à sintaxe” (ibid.; p. 472).

Outro importante aspecto discutido por Emmeche é sobre a generalização do conceito de *vida*. Ela recai no mesmo problema da Inteligência Artificial clássica e do funcionalismo na ciência cognitiva, que por mais que generalize o conceito de cognição, incluindo tanto máquinas como pessoas pensantes, não responderá à questão da real natureza do pensar. Assim, a generalização do conceito de Vida, incluindo desde sistemas artificiais com comportamentos semelhantes aos vivos até organismos reais, não revelará as restrições específicas da vida que evoluiu ou poderia evoluir na Terra, além de não ser capaz de nos mostrar muitas novidades acerca da *vida-como-ela-poderia-ser*. “A característica processual da vida será sempre um fenômeno de alto nível restrito pelas propriedades específicas de baixo nível. O fenômeno geral da emergência é provavelmente uma característica universal da vida, mas também se deve

observar o conjunto de possíveis substratos materiais que possam dar suporte à emergência” (Emmeche, 1992; p. 472).

Apesar das argumentações de Emmeche um tanto desanimadoras sobre Vida Artificial e outras abordagens sintéticas, ele não aponta para a inviabilidade da computação baseada na “real” Vida Artificial. Para isso, é importante a presença de filósofos e biólogos participando ativamente nesta recente linha de pesquisa, que é a vida artificial, pois há muitas questões fundamentais comuns às áreas em aberto, uma vez que o objetivo em si é o mesmo para todos: a compreensão do fenômeno chamado *vida*.

4.2. Um Exemplo de Contribuição para a Biologia

As contribuições que a Vida Artificial pode oferecer à teoria biológica são, citando Emmeche (1992; p. 473): “*i*) simulação do desenvolvimento e evolução do fenômeno da vida na Terra; *ii*) simulação da vida como ela poderia evoluir em um ambiente não terrestre, dados alguns conjuntos de condições de contorno realísticas; *iii*) promoção de novos conceitos e modelos do fenômeno *emergência* pertencente ao grupo geral dos sistemas complexos do qual os sistemas biológicos (sob particular tipos de descrição) são um subgrupo”.

Para ilustrar de que forma a Vida Artificial pode contribuir para a biologia, discutiremos brevemente um trabalho publicado tanto em um proceedings da conferência *Artificial Life*, quanto nos periódicos *BioSystems* e *Journal of Theoretical Biology*. Trata-se do modelo desenvolvido para simular o comportamento de construção de ninhos de vespas (Bonabeau *et al.*, 1994; Theraulaz & Bonabeau, 1995; Bonabeau *et al.*, 2000). Na natureza podemos observar os ninhos de vespas (Figura 3) como estruturas sofisticadas resul-

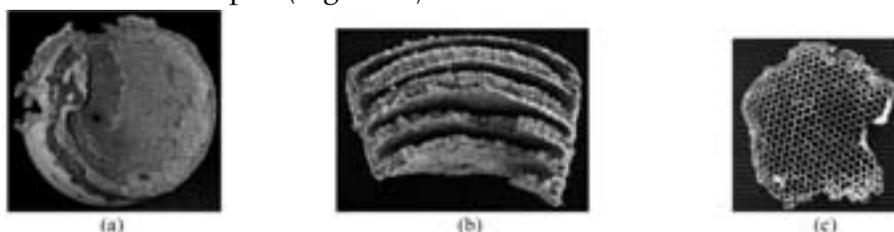


Figura 3: Fotos de um ninho de vespa. (a) Visão inferior. (b) Corte transversal (observe as camadas de pentes). (c) Pente (composto por células hexagonais). (Fonte: L. N. de Castro, 2006).

tantes de três características básicas que as compõem: *i*) os agrupamentos isolados de células (unidades do ninho - cada célula provê o ambiente para o desenvolvimento de uma cria) organizados em pentes (*combs*); *ii*) a separação entre os pentes por meio de um *pedículo*; e *iii*) a proteção do pente por um *envelope*. Outro detalhe interessante citado por L. N. de Castro (2006; p. 415) é o fato de que “O vespeiro tem uma arquitetura modular, que é resultado de uma atividade de construção cíclica imposta pela estrutura do ninho por ela mesma, e não resultante do ciclo de construção interno”. Estas características refletem pontos importantes para sobrevivência das vespas: *i*) é menos custoso produzir células adjacentes em contato entre si, compartilhando paredes comuns e organizadas dentro de um pente; *ii*) o pedículo tem um papel importante na proteção do ninho contra ataques de alguns tipos de predadores (p. ex., formigas) reduzindo área de ação deles; e *iii*) o envelope, além de ter também o papel importante na proteção contra alguns predadores, funciona como um elemento termo-regulador.

Para modelar o processo de construção de ninhos de abelhas, Bonabeau *et al.* (1994, 2000) e Theraulaz & Bonabeau (1995) definiram um grupo de algoritmos distribuídos, chamado *lattice swarms*, que permite que um simples agente do enxame (*swarm*) construa estruturas parecidas com ninhos. Uma versão *beta* do algoritmo pode ser encontrada no sítio: <http://www-iasc.enst-bretagne.fr/PROJECTS/SWARM/nest.html>. O fundamento básico deste modelo é bastante simples: cada agente interage localmente depositando um bloco (célula) de acordo com o estado local do ambiente, sem que haja qualquer comunicação entre os agentes, representação global da arquitetura em construção ou plano pré-definido. Os agentes usam números limitados de blocos de diferentes tipos e tamanhos, depositando-os de acordo com um conjunto de regras específicas que delimita os tipos de blocos para aquele determinado local, isto é, varia de acordo com a configuração atual dos blocos vizinhos no local. Esses conjuntos de regras variam de acordo com a estrutura que é construída. Os resultados deste modelo reprodu-

zem características do comportamento de construção similares aos observados na natureza (Figura 4), como: o pedicelo é inicialmente construído para posteriormente às células serem inseridas gradativamente a sua volta dando um formato de pente (*comb*) e cada pente é terminado antes de começar um novo.

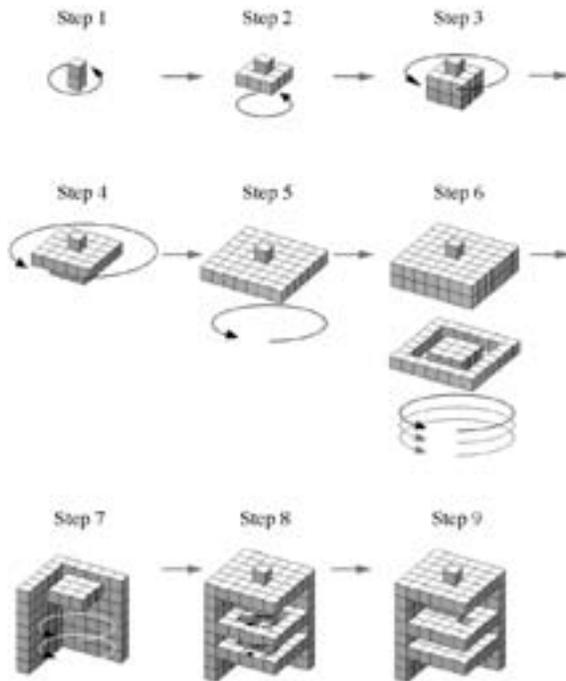


Figura 4: Passos sucessivos no processo de construção de ninhos pelo algoritmo *lattice swarms*. ("Reproduzida com permissão de Bonabeau et al., 2000 [Figura 3], Copyright Elsevier").

O modelo *lattice swarm* de construção de ninho de vespas foi desenvolvido principalmente por biólogos com o objetivo de entender os processos envolvidos no comportamento de construção de ninhos pelos insetos sociais, através de agentes simples executando algoritmos básicos. Os resultados mostraram que o algoritmo *lattice swarm* é um bom exemplo de algoritmo comportamental capaz de produzir arquiteturas coerentes e biologicamente plausíveis. Este estudo evidencia padrões e comportamentos coerentes globais dinamicamente complexos e emergentes de interações locais entre agentes simples e o ambiente, assim como na sociedade de insetos em seu habitat natural.

Em abordagens como as deste exemplo, na qual existe um modelo pertencente a uma classe de fenômenos observados na natureza, os parâmetros do modelo devem ter alguma significância biológica, seja assumida ou explícita. Uma vez que os parâmetros relevantes são descobertos, eles geralmente fazem com que o modelo explique as observações empíricas, isto é, que o modelo permita fazer previsões. Por exemplo, se o sistema biológico é perturbado, a correspondente perturbação no modelo sintético deve conduzi-lo a uma resposta ou reação semelhante ao sistema real. Outro ponto relevante é o intervalo de valores, pois se os parâmetros possuírem um grupo de valores inadequados, comportamentos não biológicos podem surgir (fato às vezes compreendido como a *vida-como-ela-poderia-ser*). Por exemplo, este modelo também permitiu aos pesquisadores concluir que é possível configurar o algoritmo para que formas desestruturadas que não são encontradas na natureza sejam geradas (Bonabeau *et al.*, 2000), como ilustrado na Figura 5.

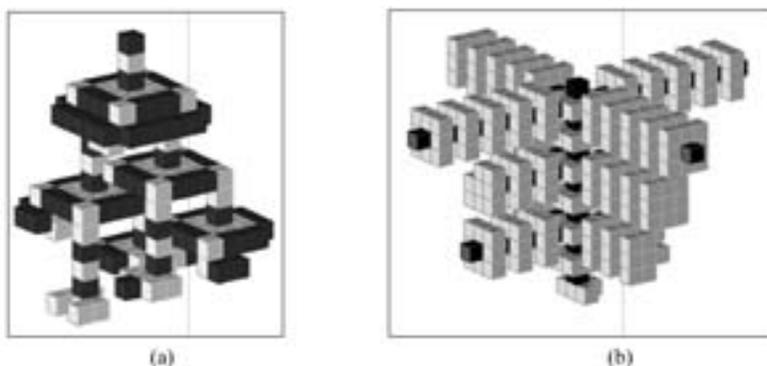


Figura 5: Diferentes estruturas que podem ser geradas através de variação paramétrica da ferramenta *lattice swarm*.

Esta possibilidade de extrapolar pode tanto servir para outras disciplinas (p. ex., engenharia) como para a própria biologia. Alguns grupos de restrições certamente guiam para um conjunto particular de parâmetros, permitindo que o modelo reproduza os comportamentos observados experimentalmente. Com base nisso, Bonabeau & Theraulaz (1994; p. 318) levantam duas questões

pertinentes: “[...] Estes valores de parâmetros são inevitáveis? É possível que outras restrições (ambientais) poderiam ter evoluído outros valores para os parâmetros?”. Como exemplo dos estudos e resultados promovidos pelo modelo *lattice swarm*, a abordagem *bottom-up* da Vida Artificial permite um entendimento da natureza dos parâmetros, o que é inviável ao tentar procurar por restrições prováveis que levem a um comportamento particular (Bonabeau & Theraulaz, 1994).

5. Tendências e Problemas em Aberto

Apesar do enfoque na síntese de fenômenos naturais apresentada neste artigo, a Vida Artificial possui diversas outras abordagens e aplicações. Os modelos desenvolvidos podem ser caracterizados como *sistemas complexos adaptativos* (Emmeche, 1997; Science, 1999; Goldenfeld & Kadanoff, 1999), comumente encontrados em outros sistemas não necessariamente vivos (Bedau, 2003; de Castro, 2006). Além disso, a extrapolação ou a simples inspiração da *vida-como-a-conhecemos* nos propicia retornos muito relevantes a diversas outras disciplinas, como também diretamente ao nosso cotidiano. Esta seção ilustra brevemente algumas das principais aplicações da Vida Artificial na atualidade e discute os diversos problemas em aberto da área.

5.1. Principais Aplicações

Dentre as principais tendências da pesquisa em Vida Artificial, destaca-se sua aplicação a jogos e artes, estudos sobre a evolução e realização da vida, estudos sobre a evolução da linguagem e aplicações em robótica.

Jogos e Artes

A variedade de padrões de estruturas e comportamentos gerados por simulações é imensa, principalmente quando o objetivo é transcender ao máximo a criatividade sem se preocupar com a coerência e fundamentação na *vida-como-a-conhecemos*. A abordagem da *vida-*

como-ela-poderia-ser é intensamente explorada nas artes e nos jogos, que exaltam, dentre outros, a fantasia. Graças a este potencial, atualmente existem eventos importantes abordando técnicas de Vida Artificial em Artes como a série de eventos em computação evolutiva - EVO (<http://evostar.org>) e a *competição internacional sobre arte e vida artificial* - VIDA (<http://www.telefonica.es/vida>). Além disso, uma característica bastante interessante que é investigada combinando sistemas evolutivos e Vida Artificial é a *evolução aberta* (*open-ended evolution*), característica esta de desenvolver abertamente (sem predefinir) um organismo artificial complexo a partir de um proto-organismo artificial (Maley, 1999). Esta característica é atualmente bastante explorada, porém de maneira restrita (geralmente abordando aspectos comportamentais e com leque de possibilidades evolutivas limitadas para um ou mais determinados fins), em jogos, principalmente em jogos de estratégia e CRPG (*Computer Role-Playing Game*), onde características como finais múltiplos, liberdade de decisão, resolução de objetivos e interação com o ambiente, são fundamentais para os jogos deste gênero. Exemplos destes tipos de jogos são o *SimCity 4* (Maxis, 2003), *Age of Empires III* (Ensemble Studios, 2005), *Civilization IV* (Firaxis Games, 2005) e *Spore* (TBA & Maxis, 2007).

Evolução da Vida

Além de sintetizar sistemas vivos, outro campo de pesquisa da ALife é a evolução dos sistemas vivos. Evolucionistas da biologia, filosofia, dentre outras áreas, vêm utilizando as ferramentas providas pela Vida Artificial na tentativa de compreender aspectos da evolução, como o surgimento da vida a partir de algo não-vivo ou “proto-vivo”, além das diversidades e complexidades dos sistemas vivos emergidos deste misterioso fenômeno que é a vida. Os modelos desenvolvidos nesta linha de pesquisa procuram alcançar propriedades de evolução aberta (*open-ended evolution*) e co-evolução (Maley, 1999; Ray, 1994; Ray & Hart, 1998; Conrad & Pattee, 1970; Adami & Brown, 1994; Fogel, 1998; Sims 1994; O’Neill 2003; Ofria & Wilke, 2004; Wilke & Adami, 2002).

Realização de Vida

Como mencionado anteriormente, a Vida Artificial definida por Langton (1989) prima por uma abordagem mais ampla sobre a vida, a *vida-como-ela-poderia-ser*. Assim, se propõe a Vida Artificial Forte (*Strong ALife*) como uma frente de investigação focada na *realização* de vida independente do meio (Rennard, 2004). Na seção seguinte apresentaremos alguns desafios da Vida Artificial que são pertinentes às possibilidades de alcançar a realização da *vida-como-ela-poderia-ser*.

Evolução da Linguagem

A linguagem é entendida como um dos sistemas naturais mais complexos (Kirby, 2002), pois “resulta da interação de três sistemas complexos adaptativos que operam em diferentes escalas de tempo: aprendizado da linguagem na escala de tempo ontogenética, evolução da linguagem na escala de tempo histórica, e a evolução dos cérebros dos usuários de língua na escala de tempo filogenética” (Bedau, 2003; p. 510). A abordagem metodológica da Vida Artificial vem progressivamente sendo utilizada para explicar muitos aspectos da linguagem, como fonética e fonologia, aquisição de linguagem, co-evolução das linguagens e emergência das estruturas complexas das linguagens (Kirby, 2002; Christiansen & Kirby, 2003).

Robótica

Na mesma linha da Inteligência Artificial Clássica, aliada à robótica com a finalidade de emular a cognição de um ser vivo conhecido, a Vida Artificial também se propõe a fazer o mesmo, mas não se limitando apenas ao meio virtual. Como exemplo temos o caso do robô cachorro da Sony, chamado AIBO (Artificial Intelligence Robot, e significa ‘companheiro’ em japonês, ver <http://www.sony.net/Products/aibo/>), que tenta, através de seus diversos sensores, atuadores e mecanismos adaptativos, gerar comportamentos complexos e emergentes similares aos que conhecemos (de Castro, 2006). Também no campo da Robótica Evolutiva (Nolfi & Floreano, 2000),

a abordagem de Vida Artificial é aplicada através de algoritmos evolutivos, p. ex., *algoritmos genéticos* (Holland, 1975), e sistemas imunológicos artificiais (de Castro & Timmis, 2002) a problemas de navegação autônoma de grupos de robôs (Cazangi *et al.*, 2006), dentre outros casos de comportamentos principalmente co-evolutivos (Nolfi & Floreano, 2000, 2002; Taylor & Massey, 2001).

Outra linha de pesquisa em robótica é a Inteligência de Enxame (*Swarm Intelligence*) (Kube *et al.*, 2004). Assim como diversas técnicas (p. ex., Computação Evolutiva, ver Bentley & Corne, 2002, Sistemas Imunológicos Artificiais e Rede Neurais Artificiais, ver Haykin, 1999) vêm sendo desenvolvidas para resolver problemas inspirando-se em mecanismos naturais que comumente resolvem problemas similares, a Inteligência de Enxame (Beni & Wang, 1989) busca inspiração no comportamento coletivo das sociedades de insetos (p. ex., cooperação entre as formigas para carregar uma presa muito grande) com o propósito inicial de desenvolver comportamentos ‘inteligentes’, isto é, capazes de resolver certos problemas autonomamente, através de um sistema composto por simples agentes (robôs) trabalhando coletivamente (Kube & Zhang, 1992; 1994; Kube *et al.*, 2004). Atualmente a Inteligência de Enxame vai além do escopo da robótica (Bonabeau *et al.*, 1999; Dorigo & Stützle, 2004; Kennedy *et al.*, 2001), mas sem perder a sua inspiração básica.

5.2. Problemas em Aberto

Assim como a matemática possui um conjunto de problemas em aberto, a Vida Artificial, apesar de ser uma linha de pesquisa recente, também possui uma série de questões em aberto devido, principalmente, à interdisciplinaridade e à motivação inicial em investigar a vida no contexto da *vida-como-ela-poderia-ser* (Bedau *et al.*, 2000). Como visto anteriormente, o escopo e a complexidade consideradas pela Vida Artificial estão imersas numa série de elementos básicos cujos conceitos e entendimento estão em aberto, como, por exemplo, vida, emergência e evolução dos sistemas vivos. Assim, focados no contexto mais fundamental e

teórico e não levando em consideração os desafios em abordagens aplicadas da Vida Artificial como jogos, robótica, artes, etc., Bedau *et al.* (2000) apresentam alguns desafios da área, dividindo-os em três principais categorias:

- Como a vida surge do inanimado?
 1. Gerar um proto-organismo molecular *in vitro*.
 2. Executar a transição para vida em um sistema químico artificial *in silico*.
 3. Determinar se fundamentalmente novas organizações vivas podem existir.
 4. Simular todo o ciclo de vida de um organismo unicelular.
 5. Explicar como as regras e símbolos são gerados a partir das dinâmicas físicas em sistemas vivos.
- Quais os potenciais e quais os limites dos sistemas vivos?
 6. Determinar o que é inevitável na evolução aberta (open-ended evolution) da vida.
 7. Determinar as condições mínimas para transições evolutivas de uma resposta específica para uma resposta genérica dos sistemas.
 8. Criar uma estrutura formal (framework) para a sintetização de hierarquias dinâmicas em todas as escalas.
 9. Determinar a capacidade de se predizer conseqüências evolutivas de manipulação de organismos e ecossistemas.
 10. Desenvolver uma teoria de processo de informação, fluxo de informação e geração de informação para os sistemas desenvolvidos.
- Como a vida está relacionada com mente, máquinas e cultura?
 11. Demonstrar a emergência da inteligência e da mente em sistemas vivos artificiais.
 12. Avaliar a influência das máquinas na próxima grande transição evolutiva da vida.
 13. Prover um modelo quantitativo de inter-relação entre cultura e evolução biológica.
 14. Estabelecer princípios éticos para a Vida Artificial.

Algumas questões fundamentais, como a natureza da vida, não foram listadas, pois a resposta de qualquer um dos problemas acima implica necessariamente em respondê-las, além de que novos desafios podem ser adicionados. Os desafios apresentados se destacam por quais vias interdisciplinares a Vida Artificial trafega e pela necessidade inevitável da cooperação e colaboração interdisciplinar no seu progresso. Todas estas investigações propiciam um aperfeiçoamento no uso de novas tecnologias para estender e criar novas formas de vida, incluindo drogas, materiais protéticos, Internet, hardware capaz de se desenvolver e robôs capazes de se reproduzirem (Bedau *et al.*, 2000).

6. *Discussão*

Neste artigo, a Vida Artificial foi apresentada como uma abordagem sintética (virtual) para o estudo de comportamentos, sistemas e organismos. Apesar da Vida Artificial ter adquirido identidade como linha de pesquisa apenas ao final da década de 1980 em decorrência de uma série de workshops organizados pelo Instituto Santa Fé, os primeiros trabalhos em ALife que seguem a filosofia discutida aqui podem ser vistos como aqueles desenvolvidos por Von Neumann em suas tentativas de criar máquinas auto-reprodutivas (Von Neumann, 1966).

Neste artigo, duas propriedades essenciais vinculadas à Vida Artificial com ênfase na síntese comportamental foram conceituadas e exemplificadas: *emergência* e *auto-organização*. Um comportamento emergente é aquele que surge em um nível global do sistema, mas que se mostra irreduzível aos comportamentos e às propriedades de suas partes. A auto-organização, por sua vez, pode ser entendida como a tendência de organização espontânea contínua e autônoma de um sistema. Comportamentos emergentes e a presença de auto-organização são constantes em fenômenos da natureza como, por exemplo, revoadas de pássaros, respostas imunológicas, enxames de formigas em busca de alimentos e outros. Dois projetos simples de Vida Artificial – *i*) simulação de comportamentos coletivos de

pássaros, e *ii*) de construção de ninhos (colméias) por vespas – foram empregados aqui para ilustrar emergência e auto-organização, assim como para discutir algumas implicações e contribuições da Vida Artificial para a biologia.

Dentre as principais aplicações da Vida Artificial, enfocamos aqui as mais recentes e que apresentam bases tecnológicas e filosóficas diversas, como jogos virtuais e estudos sobre a evolução da vida e linguagem. A discussão é concluída listando-se alguns dos principais problemas em aberto da área, deixando assim o leitor com diversas perspectivas não apenas sobre o que vem sendo desenvolvido, mas também sobre o que ainda pode ser feito em Vida Artificial nos próximos anos. A segunda parte deste trabalho enfatiza a *geometria fractal* como ferramenta para a síntese de padrões naturais, como nuvens, plantas, fogo, etc.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à Fapesp pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- ADAMI, C. & Brown, C. T. Evolutionary learning in the 2D artificial life system 'Avida'. In: Brooks, R. & Maes, P. (Org.), *Artificial Life IV*, The MIT Press, pp. 377-381, 1994.
- BEDAU, M. Artificial life: organization, adaptation and complexity from the bottom up. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), pp. 505-512, 2003.
- BEDAU, M. A., McCaskill, J. S., Packard, N. H., Rasmussen, S., Adami, C., Green, D. G., Ikegami, T., Kaneko, K. & Ray, T. S. Open problems in artificial life. *Artificial Life VI*, pp. 363-376, 2000.
- BENI, G. & Wang, J. Swarm Intelligence. *Proc. of the 7th Annual Meeting of the Robotics Society of Japan*, pp. 425-428, 1989.
- BENTLEY, P. J. & Corne, D. W. *Creative Evolutionary Systems*. Morgan Kaufmann, 2002.
- BODEN, M. A. Artificial Life. In: Robert A. Wilson and Frank C. Keil (Org.), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books, pp. 37-29, 2001.

- BONABEAU, E. W. & Theraulaz, G. Why Do We Need Artificial Life? *Artificial Life*, 1(3), MIT Press, pp. 303-325, 1994.
- BONABEAU, E., Guérin, S., Snyers, D., Kuntz, P. and Theraulaz, G. Three-Dimensional Architectures Grown by Simple ‘Stigmergic’ Agents. *BioSystems*, 56(2000), pp. 13–32, 2000.
- BONABEAU, E., Theraulaz, G., Arpin, E. & Sardet, E. The Building Behavior of Lattice Swarms. In R. A. Brooks and P. Maes (Org.), *Artificial Life IV*, pp. 307–312, 1994.
- BONABEAU, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G. *Swarm Intelligence from Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, 1999.
- CAMAZINE, S., Deneuborg, J., Franks, N. R., Sneyd, J., Theraulaz, G. & Bonabeau, E. *Self-organization in Biological Systems*. Princeton University Press, 2001.
- CAZANGI, R. R., Von Zuben, F. J. & Figueiredo, M. F. Stigmergic Autonomous Navigation in Collective Robotics. In: A. Abraham, C. Grosan & V. Ramos (Org.), *Stigmergic Optimization*, Berlin: Springer Verlag, 2006, pp. 25-64.
- CHRISTIANSEN, M. & Kirby, S. Language and evolution: consensus and controversies. *Trends in Cognitive Science*, 7(7), pp. 300–307, 2003.
- CLIFF D. Computational Neuroethology. In Arbib, M. (Org.) *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. MIT Press: Cambridge, Mass, 1998, pp. 626-630.
- CONRAD, M. & Pattee, H. H. Evolution experiments with an artificial ecosystem. *Journal of Theoretical Biology* 28, pp. 393-409, 1970.
- CRUTCHFIELD, J. The calculi of emergence: Computation, dynamics, and induction. *Physica D*, 75, pp. 11-54, 1994a.
- CRUTCHFIELD, J. Is anything ever new? Considering emergence. In G. Cowan, D. Pines & D. Melzner (Org.): *Complexity: Metaphors, Models, and Reality*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, XIX, Addison-Wesley, Reading, 1994b, pp. 479-497.
- DE CASTRO, L. N. *Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms, and Applications*. Chapman & Hall/CRC, 2006.
- DE CASTRO, L. N. & Timmis, J. I. *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach*, Springer-Verlag: London, 2002.

- DEAN, J. Animats and what they can tell us. *TRENDS in Cognitive Science*, 2 (2), pp. 60-67, 1998.
- DECKER, E. H. Self-Organizing Systems: A Tutorial in Complexity. *Vivek: A Quarterly in Artificial Intelligence*, 13(1), pp. 14-25, 2000.
- DEPEW, D. & B. Weber. Self-Organization. In: Robert A. Wilson and Frank C. Keil (Org.) *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books, 1999, pp. 737-739.
- DORIGO, M. & Stützle, T. *Ant Colony Optimization*, MIT Press, 2004.
- EL-HANI, C. N. & Videira, A. A. P. (Orgs.) *O que é vida? Para entender a biologia do século XXI*, Rio de Janeiro, Faperj/Relume Dumará, 2000.
- EMMECHE, C. Life as an abstract phenomenon: is Artificial Life possible? In: Francisco J. Varela & Paul Bourgin (Orgs.), *Toward a Practice of Autonomous Systems. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. The MIT Press, Cambridge, Mass, 1992, pp. 466-474.
- EMMECHE, C. Aspects of Complexity in Life and Science. *Philosophica*, 59(1), pp. 41-68, 1997.
- EMMECHE, C., Koppe, S. & Stjernfelt, F. Explaining Emergence: Towards an Ontology of Levels. *Journal for General Philosophy of Science*, 28, pp. 83-119, 1997.
- ENSEMBLE STUDIOS. *Age of Empires III*, <http://www.ageofempires3.com/>, 2005.
- FARMER, J. D. & Belin, A. d'A. Artificial Life: The Coming Evolution. In: C. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer and S. Rasmussen (eds.), *Artificial Life II*, 1991, pp. 815-840.
- FIRAXIS GAMES. *Civilization IV* <http://www.2kgames.com/civ4/home.htm>, 2005.
- FOGEL, D. B. (Org.) *Evolutionary Computation: The Fossil Record*. IEEE Press, New York, 1998.
- FOUKIA, N. & Hassas, S. Towards self-organizing computer networks: A complex system perspective. In: Proceedings of the International Workshop on Engineering Self-Organizing Applications 2003, Melbourne, Australia.

- GOLDENFELD, N. and Kadanoff, L. P. Simple Lessons from Complexity. *Science*, 284(5411), pp. 87–89, 1999.
- GORDON, D. *Ants at Work: How an Insect Society is Organized*, W. W. Norton, New York, 1999.
- HAYKIN, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd Ed., Prentice Hall, 1999.
- HEYLIGEN, F. Self-organization, emergence and the architecture of complexity. In: *Proceedings of the 1st European Conference on System Science*, Paris, 1989.
- HEYLIGEN, F. The science of self-organisation and adaptivity. In: *The Encyclopedia of Life Support Systems*. UNESCO Publishing-Eolss Publishers, 2002.
- HOLLAND, J. *Emergence: From Chaos to Order*, Oxford University Press, 1998.
- HOLLAND, J. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, 1975.
- KEELEY, B. L. Evaluating Artificial Life and Artificial Organisms. In: C. Langton and K. Shimohara (Org.), *Artificial Life V*, Addison-Wesley, 1997, pp. 264–271.
- KENNEDY, J., Eberhart, R. & Shi, Y. *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- KIRBY, S. Natural language from artificial life. *Artif. Life VIII*, pp. 185–215, 2002.
- KUBE, C. R. & Zhang, H. Collective Robotic Intelligence. In *From Animals to Animats: Int. Conf. on the Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 460–468, 1992.
- KUBE, C. R. & Zhang, H. Collective Robotics: From Social Insects to Robots. *Adaptive Behavior*, 2, pp. 189–218, 1994.
- KUBE, C. R., Parker, C. A. C., Wang, T. and Zhang, H. Biologically Inspired Collective Robotics. In: L. N. de Castro and F. J. Von Zuben (Org.), *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, Idea Group Publishing, Chapter XV, 2004, pp. 367–397.
- LANDICK, R. & Yanofsky, C. Transcription attenuation. In: Neidhardt, F. C. (ed) *Escherichia coli and Salmonella typhimurium*. *Cellular and*

- molecular biology*, Vol.2, American Society for Microbiology, Washington, 1987, pp. 1276-1301.
- LANGTON, C. G. Artificial life. In: Langton (Org.) *Artificial Life* (Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Vol. VI), Addison-Wesley, Redwood City, California, 1989, pp. 1-47.
- LASZLO, E. *Evolution*. Boston: Shambhala, 1987.
- MALEY, C. C. Four steps toward open-ended evolution. In: Banzhaf, W., Daida, J., Eiben, A. E., Garzon, M. H., Honavar, V., Jakiela, M. & Smith, R. E. (Org.), *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Morgan Kaufmann, 1999, pp. 1336-1343.
- MAXIS. *SimCity 4*, <http://simcity.ea.com/>, 2003.
- MACLENNAN B. Synthetic ethology: a new tool for investigating animal cognition. In: Bekoff M., Allen C., Burghardt G. (Org.), *The Cognitive Animal: Empirical and Theoretical Perspectives on Animal Cognition*. MIT Press: Cambridge, Mass, 2002, pp. 151-156.
- MORGAN, C. L. *Emergent Evolution*, London: Williams and Norgate, 1923.
- MOSTEFAOUI, S.K., Rana, O.F., Foukia, N., Hassas, S., Marzo, G.D., Aart, C.V. & Karageorgos, A. Self-Organising Applications: A Survey. In: *Proceedings of the International Workshop on Engineering Self-Organising Applications* 2003.
- NOLFI, S. & Floreano, D. *Evolutionary Robotics: the Biology, Intelligence and Technology of Self-Organizing Machines*, MIT Press, 2000.
- NOLFI, S. & Floreano, D. Synthesis of autonomous robots through evolution. *Trends in Cognitive Science*, 6, pp. 31-37, 2002.
- ODELL, J. Agents and complex systems. *Journal of Object Technology*, 1(2), pp. 35-45, 2002.
- OFRIA, C. & Wilke, C. O. Avida: a software platform for research in computational evolutionary biology. *Artificial Life X*, pp. 191-229, 2004.
- O'NEILL, B. Digital Evolution. *PLoS Biol*, 1(1): e8, 2003.
- RAY, T. S. & Hart, J. Evolution of differentiated multi-threaded digital organisms. *Artificial Life VI*, pp. 295-304, 1998.
- RAY, T. S. An evolutionary approach to synthetic biology: Zen and the art of creating life. *Artificial Life*, 1(1/2), pp. 195-226, 1994.

- RENNARD, J.-Ph. Perspective for Strong Artificial Life in De Castro. In: L. N. de Castro & F. J. Von Zuben (Eds), *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, Hershey:IGP, pp. 301-318, 2004.
- REYNOLDS, C. W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. In *Computer Graphics*, 21(4) (SIGGRAPH '87 Conference Proceedings), pp. 25-34, 1987.
- SCIENCE. Special Issue on Complex Systems, *Science Magazine*, 284(5411), 1999.
- SHALIZI, C. R. *Causal Architecture, Complexity and Self-Organization in Time Series and Cellular Automata*. PhD thesis, University of Wisconsin at Madison, 2001.
- SIMS, K. Evolving virtual creatures. In: *Computer Graphics, Annual Conference Series (SIGGRAPH'94)*, pp. 15-22, 1994.
- TAYLOR, T. & Massey, C. Recent developments in the evolution of morphologies and controllers for physically simulated creatures. *Artificial Life VII*, pp. 77–87, 2001.
- TBA e Maxis. *Spore*, <http://www.spore.com/>, 2007.
- THERAULAZ, G. & Bonabeau, E. Modeling the Collective Building of Complex Architectures in Social Insects with Lattice Swarms. *Journal of Theoretical Biology*, 177, pp. 381–400, 1995.
- VON NEUMANN, J. *Theory of Self-Reproducing Automata*. Edited and completed by A.W. Burks. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1966.
- WILKE, C. O. & Adami, C. The biology of digital organisms. *Trends in Ecology and Evolution*, 17, pp. 528-532, 2002.
- WOLF, T. D. & Holvoet, T. Emergence versus self-organisation: Different concepts but promising when combined. In: *Engineering Self-Organising Systems: Methodologies and Applications*, Lecture Notes in Computer Science 3464, pp. 1-15, 2004.