INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

A EVOLUÇÃO DE SISTEMAS BIOLÓGICOS COMO BASE PARA O DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE VIDA ARTIFICIAL

por

ANDRE ZANKI CORDENONSI

T.I. n. 696 CPGCC-UFRGS
Trabalho Individual I

Prof. Luis Otávio Campos Alvares
Orientador

Porto Alegre, dezembro de 1997.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS **3**

LISTA DE TABELAS **3**

RESUMO **4**

ABSTRACT **5**

1 INTRODUÇÃO **6**

2 PRINCÍPIOS BÁSICOS **7**

2.1 NATURAL, ARTIFICIAL E SINTÉTICO 7
2.2 A VIDA 8
2.3 DOS AMINOÁCIDOS AOS SERES HUMANOS 9
2.4 A IMPORTÂNCIA DA EVOLUÇÃO 11
2.5 GENÓTIPOS, FENÓTIPOS E MUTAÇÕES 12
2.6 O EFEITO DE BALDWIN 13
2.7 A APTIDÃO DO INDIVÍDUO E A SELEÇÃO NATURAL 13
2.8 A REPRODUÇÃO 15
2.9 A MORTE 16
2.10 A EVOLUÇÃO DO SER HUMANO 17
2.11 ALGORITMOS GENÉTICOS 17
2.11.1 Algoritmos Genéticos Tradicionais *17*
2.11.2 Algoritmos Evolutivos *19*
2.11.3 Algoritmos Genéticos e Algoritmos Evolutivos *20*
2.12 REDES NEURAIS 20

3 O SURGIMENTO DA VIDA ARTIFICIAL **21**

3.1 OS PRIMÓRDIOS DA VIDA ARTIFICIAL 23
3.2 A EVOLUÇÃO NA VIDA ARTIFICIAL 25
3.3 A EMERGÊNCIA NA VIDA ARTIFICIAL 26

4 MODELAGEM DE SISTEMAS DE VIDA ARTIFICIAL **28**

4.1 BOIDS 28
4.2 TURMITES 29
4.3 VÍRUS 30
4.4 MINHOCAS 32
4.5 MUNDOS VIRTUAIS 32

5 SISTEMAS DE MUNDOS VIRTUAIS **34**

5.1 TIERRA 34
5.2 EVOLUTIONARY REINFORCEMENT LEARNING 35
5.3 ECHO 36
5.4 STRATEGIC BUGS 38
5.5 LEARNING CLASSIFIER SYSTEMS 39
5.6 SISTEMAS IMUNOLÓGICOS 40

6 CONCLUSÕES **42**

BIBLIOGRAFIA **45**

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - Superfície de aptidão num espaço bidimensional 14
FIGURA 2.2 - Esquema geral para um Algoritmo Genético 18
FIGURA 3.1 - O jogo da vida 24
FIGURA 4.1 - Boids evitando colisões 28
FIGURA 4.2 - Turmites 30
FIGURA 4.3 - Mundo Virtual 33
FIGURA 4.4 - Modos de percepção em um mundo virtual 33

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 - Tabela de mudança de estados para um turmite 29
TABELA 4.2 - Direção final do turmite 29

Resumo

Neste trabalho apresentamos um estudo sobre as bases biológicas e evolutivas que influenciaram o estabelecimento e o desenvolvimento da Vida Artificial. A Vida Artificial surgiu a partir das pesquisas realizadas em biologia, que necessitavam um meio de testar suas teorias. A evolução biológica ocorreu em passos extremamente lentos, ao longo de milhões de anos, o que torna impossível a sua experimentação em laboratórios. Para resolver este problema, iniciou-se estudos para desenvolverem-se ambientes virtuais que simulassem as condições nas quais a vida iniciou e desenvolveu-se. Baseando-se nos conceitos da genética e da teoria evolucionária de Darwin, os pesquisadores têm construído sistemas de Vida Artificial que apresentam comportamentos semelhantes ao observados na biologia. Estes sistemas utilizam, usualmente, técnicas e algoritmos baseados no estudo da biologia e neurociência, tais como os Algoritmos Genéticos e as Redes Neurais. Utilizando os princípios adquiridos com a biologia, desenvolveu-se diversos modelos para a construção de sistemas de Vida Artificial, tais como: (1) *boids*, que simulam o comportamento de pássaros; (2) *turmites*, que são criaturas artificiais baseadas no conceito das máquinas de Turing; (3) vírus de computador, que apesar de não terem sido criados com os mesmos objetivos dos sistemas de Vida Artificial, apresentam comportamentos semelhantes; (4) minhocas, que são programas independentes, que agem em redes de computadores; e os (5) mundos virtuais, que são ambientes virtuais completos onde as criaturas podem aprender com o ambiente, desenvolver-se e evoluir sem, usualmente, a participação direta do observador. Analisando alguns sistemas desenvolvidos, podemos perceber que a Vida Artificial está progredindo em direção à sistemas que possam contribuir de forma mais clara e direta com a formulação e comprovação de teorias biológicas evolucionárias. No entanto, para alcançar tais objetivos, deve-se realizar estudos mais aprofundados sobre a coerência e a viabilidade dos modelos propostos.

Abstract

In this paper, we present an overview about the biological and evolutive fundamentals that had an influence in the establishment and development of Artificial Life (ALife). ALife had born in a biological research domain, which needs another media to prove their theories. In fact, the biological evolution occurs in extremely small moves, in millions of years. The simulation of this process is impossible in biological laboratories. To solve this problem, virtual environments that simulate the initial conditionals which life start and evolve, has been development by the researchers. Based on the assumptions of genetic and the evolutionary theory of Darwin, the researchers have been developed ALife systems that manifest similar behaviors with the natural biology. These systems, usually, utilize techniques and algorithms based in the biology and neuroscience researches, such like Genetic Algorithms and Neural Nets. Utilizing these principals, many models were suggested to build ALife systems: (1) boids, which simulate the birds behaviors; (2) turmites, which are creatures based in the Turing machine; (3) computer virus: although their initials propose is so different from the ALife creatures, the behaviors of both are similar; (4) worms, which are independent computer programs that execute in networks; and (5) virtual worlds, which are complete virtual environments, where the creatures can learn and evolve without intervention. Analyzing some developed systems, we can perceive that ALife is advancing in the way to develop systems that can improve the models and prove the biological evolutionary theories. Although, to realize this objectives, we must inquire about the coherence and the viability of the proposed models.

1 Introdução

Nossos conceitos sobre biologia, evolução e complexidade são altamente dependentes das observações realizadas a partir da única instanciação de vida que reconhecemos, ou seja, a vida biológica terrena, baseada em cadeias de carbono. Para realizarmos uma extensão destes conceitos, é necessário realizar comparações com outras formas de vida. Como não podemos observar a vida em outros planetas, a única alternativa é a criação de novas formas de vida aqui na Terra.

Para tanto, é necessário conhecer os fundamentos da vida biológica terrena e suas iterações com o ambiente que o cerca. É de fundamental importância observar a variedade e a complexidade dos ambientes que nos cercam para conduzirmos uma investigação científica que tente reproduzir as leis da natureza em outros meios, tais como os computadores.

Neste trabalho nos concentraremos numa abordagem evolutiva sobre o processo da criação de uma biologia sintética, a Vida Artificial. Para tanto, introduziremos os principais aspectos que tangem a definição da vida biológica e a sua influência no modo de pensar dos seres vivos, racionais ou não. Alguns fundamentos básicos de genética e evolução biológica serão apresentados no capítulo 2. Neste capítulo serão colocadas algumas questões acerca da evolução das espécies na Terra, concentrando-se na espécie humana. Ao final do capítulo, apresentamos algumas técnicas e algoritmos que foram baseados na pesquisa biológica e na neurociência.

Fundamentados nestes conceitos básicos, passaremos a investigar o surgimento da Vida Artificial, assim como seu dois principais conceitos: evolução e emergência da inteligência. A evolução em Vida Artificial é o seu objetivo maior pois é através desta que pesquisas podem ser realizadas no sentido de ajudar a desenvolver conceitos mais generalizados para a biologia e a evolução natural. A emergência da inteligência entrelaça-se com a evolução, permitindo que os sistemas de Vida Artificial possam evoluir de forma sensível ao observador, usualmente passivo ao experimento.

Após estas considerações realizadas no capítulo 3, nos concentraremos nos modelos propostos para a construção de sistemas de Vida Artificial. Estes modelos apresentam diferentes abordagens, pois foram originados a partir de diferentes propósitos. É importante salientar que nem todos estes modelos são aceitos unanimamente pela comunidade científica. Ainda há muita controvérsia sobre como um modelo e/ou sistema deve comportar-se para ser considerado realmente vivo.

Finalmente, no capítulo 5 apresentaremos alguns sistemas já desenvolvidos e testados que apresentam algumas das características gerais presentes em todo o texto. Estes sistemas foram escolhidos por apresentar abordagens inovadoras e resultados animadores para o progresso da Vida Artificial como uma ciência.

Ao final, apresentaremos algumas considerações finais acerca do trabalho desenvolvido, sugerindo também possíveis melhoramentos e campos de estudo.

2 Princípios Básicos

2.1 Natural, Artificial e Sintético

"A ciência natural é o cerne do conhecimento sob os objetos e fenômenos do mundo que nos cerca, sob suas características e propriedades inerentes, sob seus comportamentos e suas iterações intrínsecas. A tarefa principal das ciências naturais é transformar os prodígios da natureza em lugar-comum, mostrando-nos que a complexidade é uma máscara para a simplicidade, descobrindo os padrões escondidos no meio do caos aparente." [SIM 69]

O mundo que nos cerca atualmente é formado, basicamente, por elementos construídos por seres humanos (artificiais), em detrimento dos elementos naturais. Praticamente todos os componentes de nosso ambiente se mostram, ou seja, possuem características, construídas por seres humanos. A temperatura onde gastamos a maior parte do nosso tempo é mantida artificialmente, assim como a umidade e até mesmo as impurezas que respiramos são controladas. Mesmo sendo controladas artificialmente, estes fenômenos trabalham com algum tipo de matéria-prima natural.

O termo natural é definido como algo "da, ou referente à, ou produzido pela natureza"[HOL 80], ou seja, em que não há trabalho ou intervenção do homem. É preciso ter muito cuidado para não confundir um fenômeno *natural* com um fenômeno *biológico*. Uma floresta pode ser entendida como um fenômeno natural, ao passo que uma fazenda certamente é um fenômeno biológico, mas nunca natural. As várias espécies das quais o homem é dependente, tais como o gado e o trigo, em última instância, são artefatos de sua engenhosidade. Um campo arado não faz mais parte da natureza do que uma estrada asfaltada, nem menos. O ser humano vive num mundo cercado de objetos naturais e artificiais e seu ambiente é definido pelas iterações entre esses elementos e seus próprios propósitos.

A definição formal do termo *artificial* pode ser descrita como: "(1) produzido pela arte ou pela indústria; não-natural, (2) Dissimulado, disfarçado, fingido, (3) postiço"[HOL 80]. Ou seja, artificial é algo feito pelo ser humano, o oposto do natural. Apesar disso, os elementos que nós habitualmente denominamos artificiais não podem ser consideradas em separado à natureza. Eles não possuem nenhum tipo de isenção que os faça ignorar, ou mesmo violar, as leis da natureza, as leis físicas que regem o nosso mundo. Ao mesmo tempo, estes artefatos são adaptados aos objetivos e desejos humanos. Eles são o que são, desde que possam conduzir objetos ou seres humanos mais rapidamente (aeroplano) ou serem apreciados pelo paladar (criação de gado). Se os objetivos dos seres humanos mudarem, seus artefatos também mudam – e vice-versa.

Por outro lado, como exemplificou [SIM 69], uma gema produzida por um vidro colorido imitando uma safira, é um objeto artificial. Mas uma gema que fosse construída pelo ser humano, mas cuja composição química fosse indistinguível de uma gema natural, é um objeto sintético. Tais artefatos são imitações da natureza, em todos os seus detalhes, e esta imitação pode ou não utilizar os mesmos componentes básicos do objeto natural a ser imitado. O termo sintético é comumente usado como sinônimo para projetado ou composto.

A engenharia trata do sintético, da síntese, enquanto que a ciência trabalha com a análise. O engenheiro preocupa-se como os objetos devem ser, como deve ser sua funcionalidade, ou seja, quais são seus objetivos, enquanto que a ciência concentra-se no que os objetos são.

A Vida Artificial pode ser vista como um elo de ligação que une a dicotomia gerada entre o pensamento descritivo (analítico) e o pensamento normativo (sintético). Podemos descrevê-la como um campo de estudo devotado ao entendimento da vida pela tentativa de abstrair os princípios fundamentais das dinâmicas que envolvem os fenômenos biológicos (análise); e recriar tais dinâmicas em outro meio físico, como os computadores, tornando-os assim acessíveis para novos tipos de manipulações, experiências e testes (síntese). Enquanto que a pesquisa em biologia natural é essencialmente analítica, pois tenta quebrar os fenômenos complexos em seus componentes básicos, a Vida Artificial é, ao mesmo tempo, sintética, pois seu objetivo é construir fenômenos complexos a partir de elementos unitários; e analítica, pois é originada da análise dos fenômenos naturais, além de prover um complemento para as pesquisas biológicas tradicionais, pois permite a exploração de novos caminhos na tentativa de entender a vida.

2.2 A Vida

O que é vida ? Para desenvolvermos um sistema capaz de nos fornecer pistas sobre a vida e sua evolução, é necessário um aprofundamento maior sobre o que nós entendemos sobre o conceito de vida.

Formalmente, pode-se definir vida por:

> 1. Conjunto de propriedades e qualidades graças às quais animais e plantas, ao contrário dos organismos mortos ou da matéria bruta, se mantêm em contínua atividade, manifestada em funções orgânicas tais como o metabolismo, o crescimento, a reação a estímulos, a adaptação ao meio, a reprodução e outras; existência. 2. Estado ou condição dos organismos que se mantêm nessa atividade desde o nascimento à morte; existência. 3. A flora e/ou a fauna. 4. A vida humana. 5. O espaço de tempo que decorre do nascimento à morte; existência. 6. O tempo de existência ou de funcionamento de uma coisa. 7. Um dado período da vida. 8. Estado ou condição do espírito após a morte... [HOL 80]

Tradicionalmente, o conceito de vida tem sido identificado por uma coleção de materiais que observam certas listas de propriedades, tais como: metabolismo, adaptação, autonomia, crescimento, auto-suficiência, replicabilidade, reatividade (irritabilidade), evolução, etc. A maioria dos organismos vivos seguem estas regras. No entanto, alguns outros sistemas obedecem à subconjuntos destas regras, como os vírus, a própria Terra e alguns tipos de robôs. A abordagem cientifica tradicional tem reduzido o estudo dos sistemas vivos numa busca por respostas sobre a bioquímica dos organismos vivos. Esta alternativa vê a vida como nada mais que uma série complexa de fenômenos físicos e químicos.

Mesmo assim, a questão permanece sem resposta pois existem muitas maneiras de se obterem sistemas dinâmicos complexos (sistemas físicos), mas dentre destes, quais podem-se considerar realmente *vivos ?* Que tipo de complexidade estamos procurando ? Ninguém contesta o fato de que a vida é uma espécie de arranjo complexo de substâncias, mas qual é o limiar de complexidade necessário após o qual a matéria pode ser dita viva ? Para estudarmos a vida é necessário sintetizar a organização da

matéria com o mesmo limiar de complexidade, ou é suficiente simular os comportamentos dos organismos vivos ?

Objetivamente ou subjetivamente, pode-se reconhecer certas organizações de matérias como vivas. É a partir de percepção do mundo que nos cerca, que pode-se categorizar os organismos vivos dos não-vivos. É importante observar que esta percepção muda de indivíduo para indivíduo, assim como de espécie para espécie. Os seres humanos reconhecem as plantas como seres vivos, participantes do nosso ecossistema, o que não ocorre com os animais ditos inferiores . Estes não possuem uma percepção consciente que os permita reconhecer uma planta como um ser vivo e uma pedra como um ser inanimado, apesar de reconhecerem (e reagirem de acordo) à presença de outros animais.

Esta habilidade de reconhecer e categorizar eventos nos ambientes em que atuam, é uma das mais importantes diferenças entre os sistemas vivos e os não-vivos. A vida requer a habilidade de reconhecer e controlar os eventos em seu ambiente, para a sobrevivência do indivíduo. Esta é uma característica comum a toda vida conhecida, em conjunto com a habilidade de armazenar e transmitir registros sob estas habilidades.

Além disso, esta característica representa também a ruptura da física com a biologia. Os sistemas físicos são independentes de qualquer organismo em particular, são universais, inexoráveis, imunes à qualquer tipo de controle por qualquer organismo. Já os sistemas biológicos estendem seu controle para os organismos, permitindo que estes categorizem e controlem aspectos relevantes nas substâncias que os cercam. E é a definição da relevância destes aspectos que fornecem aos processos de categorização e controle um atributo extra, diferente das simples iterações físicas de ação-reação.

Resumindo, quando um organismo é apto a reconhecer e atuar sob aspectos de seu ambiente que são importantes para a sua própria sobrevivência, pode-se dizer que os mecanismos pelos quais o organismo reconhece e atua são funcionais, em referência ao próprio organismo (auto-referência). A física, por si só, não preocupa-se com as funções dos mecanismos, e sim como estes funcionam.

Em outras palavras, qualquer organização que atravesse o limiar de complexidade da vida, pode ser dito como emergente da física, pois seus atributos não podem ser explicados completamente pelas leis físicas. Funções, controle e categorização não podem ser explicadas unicamente pela física, apesar de seguirem fielmente suas leis. Finalmente, podemos entender a origem da vida como um problema de emergência de processos de categorização e controle a partir de um meio físico.

2.3 Dos Aminoácidos aos Seres Humanos

Atualmente, a teoria mais aceita sobre a origem da vida na Terra têm suas bases na criação do próprio Sistema Solar. Quando a Terra se formou, a cerca de 4,6 bilhões de anos atrás, ela era um deserto sem mares ou costas, uma rocha incandescente agredida continuamente por colisões com os milhões de fragmentos de cascalho que ocupavam desordenadamente o espaço exterior, restos do nascimento do sistema solar. A lua, provavelmente, estava muito mais próxima (cerca de 18 000 quilômetros) que agora (±400 000 quilômetros). Assim, a Lua girava em torno da Terra em cerca de seis horas, provocando enormes marés de rocha fundida.

A atmosfera era composta, primeiramente, por hidrogênio e hélio, os gases mais comuns e leves do universo. Muito cedo, contudo, a força dos ventos solares acabaram por esvaziar a atmosfera desses gases, que foram substituídos por gases que se infiltravam através das rachaduras e fendas e das crateras vulcânicas. Estes gases eram

constituídos provavelmente por metano, dióxido de carbono, amoníaco e vapor de água. Milhões de toneladas de carbono orgânico eram esparramados na superfície terrestre, provindo das estrelas cadentes que bombardeavam a Terra incessantemente. Alguns cometas também caíram, trazendo consigo enormes quantidades de gelo. No entanto, devido a alta temperatura terrestre, todo este gelo era vaporizado instantaneamente.

Centenas de milhões de anos se passaram. Os grandes bombardeios abrandaram e grande parte do calor originado pela formação da Terra já havia sido irradiado para o espaço. A temperatura esfriou, até um ponto abaixo da ebulição da água. Grandes nuvens formaram-se, provocando chuvas torrenciais sob as negras superfícies basálticas. Desse modo, a própria Terra fornecia os elementos básicos (água, carbono e energia) para a construção de aminoácidos, a partícula elementar de toda a vida terrestre. Através de sua constante agitação, o próprio caráter caótico do jovem planeta teria apressado o nascimento da vida combinando os aminoácidos e as moléculas orgânicas em combinações quase infinitas.

A formação de aminoácidos, a partir do carbono e a energia fornecida pelos raios ultravioletas, abundantes naquela época, já foram demonstradas experimentalmente em laboratório. Tubos de ensaio contendo uma sopa de elementos semelhantes aos da Terra primitiva, sofrendo a ação contínua de faíscas elétricas, acabavam gerando alguns tipos primitivos de aminoácidos, que seriam a origem dos demais. Apesar disso, a formação da primeira célula a partir dos aminoácidos é um fenômeno que encontra-se, ainda, em torno de diversas teorias e especulações, mas sem nenhuma certeza.

As primeiras células sobre a Terra tinham uma alimentação abundante, pois flutuavam num mar composto de aminoácidos e outras moléculas menos desenvolvidas. Além disso, novos suprimentos de aminoácidos eram constantemente gerados em volta dessas pelos raios ultravioletas. Contudo, à medida que as células prosperavam e multiplicavam-se, as reservas de moléculas orgânicas livres diminuíram até a exaustão. Num primeiro momento, as células foram quase dizimadas pela falta de alimentos. Mas, com a diminuição brusca do número de consumidores, a produção de aminoácidos aumentou o que levava a um novo aumento no número de células. Este vai-e-vem celular ocorreu, provavelmente dezenas de vezes, até que algumas células mutantes apresentaram uma característica importantíssima para a evolução da vida: a fotossíntese. Elas conseguiam utilizar a energia solar para produzir elas mesmas as moléculas orgânicas necessárias a sua sobrevivência. A vida sobreviveu graças à fotossíntese.

No entanto, a fotossíntese não terminou imediatamente com a carência geral de alimentos. Para crescer e multiplicar-se, cada célula necessitava de dois elementos fundamentais: energia e substâncias químicas (moléculas orgânicas, hidrogênio, etc.). O hidrogênio, uma das peças básicas para a vida celular, tornava-se cada dia mais escasso. Para suprir a falta de hidrogênio, algumas células conseguiram adaptar-se ao ambiente, retirando esse das moléculas de gás sulfídrico, que era jorrado em grandes quantidades pelos vulcões e fendas da crosta terrestre.

A vida, então, prosseguiu sem maiores sobressaltos, por uns cem milhões de anos. Neste intervalo de tempo, as células sofreram novas modificações, que as permitiram obter hidrogênio de uma fonte muito mais abundante que o gás sulfídrico: o vapor de água. Essas células, apesar de necessitar cerca de dez vezes mais energia para quebrar a molécula d’água, obtinham esta muito mais facilmente que o gás sulfídrico. Como a fonte de energia era ilimitada (raios solares), a troca foi vantajosa. Obviamente, nesta época, a quase totalidade da vida terrestre concentrou-se nos mares e oceanos. Estas células, conhecidas como cianobactérias, surgiram há uns 2,6 bilhões de

anos atrás e acabaram por multiplicar-se desenfreadamente, cobrindo todos oceanos e mares terrestres, o que acabou gerando uma segunda crise na vida terrestre.

Cada vez que uma desses células separava um molécula de dióxido de hidrogênio (água), utilizava os átomos de hidrogênio e liberava os átomos de oxigênio, que era um verdadeiro veneno nesta etapa evolutiva. O oxigênio é altamente reativo, principalmente com o ferro. Naquele tempo, existiam vastas quantidades de compostos de ferro (sais ferrosos) suspensos no mar, que combinando-se com o oxigênio formavam o óxido ferroso, que era precipitado sobre o mar. Muito rapidamente, as reservas de sais ferrosos foram combinadas, formando enormes depósitos de ferro, o que diminuiu drasticamente a quantidade de sais ferrosos no mar. Logo, as moléculas de oxigênio começaram a nadar livremente pelo ar e mar terrestres, ameaçando as cianobactérias, que eram adaptadas a baixos níveis de oxigênio.

Novamente, foi preciso uma readaptação ao ambiente. Primeiramente, algumas células acabaram por desenvolver enzimas especais que podiam fixar os componentes formados pelo oxigênio, transformando-os em componentes inofensivos para as cianobactérias. Tais células acabaram por prosperar rapidamente, através da seleção natural, tornando-se o padrão nos oceanos, que continha cada vez mais oxigênio. Tendo aprendido a tolerar o oxigênio, algumas destas células sofreram mutações que as permitiram utilizar o oxigênio, altamente reativo, como fonte de energia.

As cianobactérias, que aprenderam a utilizar a respiração como forma de obter energia, se espalharam ainda mais rapidamente pelo planeta. As células que puderam sobreviver à explosão de oxigênio multiplicaram-se nos mares. Um outro efeito da concentração excessiva de oxigênio foi a formação da camada de ozônio na atmosfera terrestre, cortando assim drasticamente a quantidade de luz ultravioleta que atingia a Terra. Num ambiente, mais ameno, as células mostraram-se aptas a diversificar-se igualmente em terra. A vida alterou a face do mundo, num processo contínuo que perdura até os dias de hoje.

É importante observar que, até hoje não há provas de que a existência da vida, assim como a de vida altamente organizada, seja inevitável. Esta feliz confluência de coincidências pode ser, ou não, uma exceção no universo.

2.4 A Importância da Evolução

A evolução biológica pode ser definida como a mudança progressiva no material genético de uma população por muitas gerações. Estas mudanças não precisam ser adaptativas. Na verdade, muitos genecistas acreditam que a maior parte da evolução pode ser considerada adaptativamente neutra ([KIM 68], [HAR 89]). Em seu livro [DAR 1859] apresenta o que viria a ser o núcleo de toda a teoria evolucionária atual, cujos principais conceitos eram:

- indivíduos variam de todas as formas viáveis nos ambiente em que ocupam;
- a variação é hereditária;
- a auto replicação de indivíduos tende a produzir mais descendentes que possam sobreviver com os recursos limitados disponíveis no ambiente;
- pelo resultado do embate pela sobrevivência, os indivíduos melhores adaptados irão gerar um maior número de descendentes na próxima geração.

Os dois principais conceitos apresentados acima são a seleção natural e a variação genética. A seleção natural é o processo pelo qual os indivíduos mais aptos produzem mais descendentes, em média, em gerações sucessivas, do que os indivíduos

menos aptos. A variabilidade genética resulta dos eventos aleatórios que podem ocorrer aos indivíduos de uma determinada população. Estes eventos incluem a mutação aleatória do material genético, a morte acidental de um indivíduo com alto grau de adaptabilidade, antes que esse tivesse a oportunidade de reproduzir-se, etc.

2.5 Genótipos, Fenótipos e Mutações

O gene é a unidade da hereditariedade. Cada gene, agindo sozinho ou com outros genes, determina uma ou mais características do organismo resultante. Todas as formas de vida conhecidas são baseadas em códigos genéticos. Mesmo os organismos unicelulares são construídos a partir do material genético do núcleo celular. Um conjunto completo de genes é conhecido como genótipo.

Os genes são encontrados no interior do material genético denominado cromossomo. Na maioria das células, cada gene ocupa uma posição em particular num cromossomo específico. Os cromossomos podem quebrar-se, durante a reprodução celular, e parte de seus genes são transferidos de um lugar para outro, dentro do mesmo cromossomo, ou para outros cromossomos. Quando isso acontece, novas combinações dos genes são formadas.

Os genes também podem mudar na sua composição química. Neste tipo de recombinação alterada ou variação química, eles acabam por produzir diferentes elementos a partir de genes inalterados. Esse processo é conhecido por mutação e tem um papel decisivo na evolução das espécies. Muitos fatores ambientais podem acabar alterando a estrutura da molécula de DNA (material genético). Alguns fatores podem ser físicos, e outros são químicos. Uma mutação ocorre quando estas alterações acabam por provocar mudanças permanentes na seqüência básica do DNA, que provocam uma mudança hereditária da síntese de proteínas.

Muitas mutações tendem a ser nocivas em seus efeitos. Tais efeitos podem reduzir a adaptabilidade de um descendente ou até mesmo matá-lo. Muitos tipos de câncer e algumas anormalidades de nascimento, são atribuídas à mutações. Para minimizar os prejuízos feitos ao DNA, existe um grande número de mecanismos de auto reparação, que tentam evitar o aparecimento de mutações.

Por outro lado, muitas vezes um novo gene ou um novo arranjo dos cromossomos possibilita ao descendente uma adaptação melhor ao ambiente que a dos seus pais. Estas mutações, neste caso, é que acabam fornecendo a matéria prima da seleção natural.

O fenótipo é o organismo de um ser vivo considerado em relação aos caracteres apreciáveis com o uso dos sentidos. Ou seja, o fenótipo de um indivíduo é o conjunto de comportamentos deste, em relação ao ambiente em que vive. Comportamentos estes definidos pelo código genético (genótipo) e pela capacidade de percepção e aprendizado do indivíduo frente ao mundo que o cerca. Essa definição é de suma importância em Vida Artificial, pois é a partir dos comportamentos dos indivíduos que esta busca a compreensão da vida e da sua evolução.

2.6 O Efeito de Baldwin

O aprendizado durante o tempo de vida de um indivíduo não afeta diretamente o seu material genético; consequentemente as ações aprendidas durante o tempo de vida do indivíduo não podem ser transmitidas diretamente aos seus descendentes.

No entanto, alguns biólogos evolucionistas tem discutido um efeito indireto do aprendizado na evolução, inspirado nas idéias de J.M. Baldwin [BAL 1896]. Ele introduziu o conceito de seleção orgânica na tentativa de explicar alguns exemplos de características que eram, inicialmente, adquiridas pelos membros de uma população em evolução durante o seu tempo de vida. Posteriormente estas características surgiam codificadas em seu material genético. Logo, a seleção orgânica é o processo pelo qual os indivíduos que são aptos a adquirir uma nova característica durante o seu tempo de vida terão uma maior probabilidade de sobrevivência e passarão esta habilidade de adquirir tal característica para os seus descendentes.

Em seu artigo [MIT 89] explicam o efeito de Baldwin pela teoria de que o aprendizado ajuda na sobrevivência do indivíduo, logo os organismos que sejam mais capazes de aprender terão o maior número de descendentes e incrementarão a freqüência de genes responsáveis pelo aprendizado. Se o ambiente for estável o suficiente para que as melhores ações a serem aprendidas permaneçam as mesmas, esta combinação de fatores pode gerar uma codificação genética destas ações que, originalmente, deveriam ser aprendidas.

A capacidade de adquirir um certo comportamento desejado permite ao organismo que está aprendendo a preferência na sobrevivência. Sem este aprendizado, a possibilidade de sobrevivência, e a oportunidade de uma nova descoberta genética originada pelos genes responsáveis pelo aprendizado, diminuem. Neste aspecto indireto, o aprendizado pode afetar a evolução, mesmo se o que está sendo aprendido não puder ser transmitido geneticamente.

Resumindo, o aprendizado fornece soluções parciais codificas geneticamente para conseguir vantagens parciais, ao invés do paradigma *tudo-ou-nada* dos organismos que não apresentam características de aprendizado. Um aspecto comum para o aprendizado é que ele fornece a capacidade ao organismo de adaptar-se à aspectos imprevisíveis do ambiente – aspectos que mudam muito rapidamente para a evolução tratar geneticamente. No entanto, apesar deste claro benefício da aprendizagem, o que o Efeito de Baldwin nos coloca é diferente: ele indica que o aprendizado ajuda os organismos a adaptarem-se geneticamente a aspectos previsíveis, mas difíceis, e que o aprendizado ajuda indiretamente na transformação destas adaptações em código genético.

2.7 A Aptidão do Indivíduo e a Seleção Natural

Para ilustrarmos o conceito de aptidão de um indivíduo e suas conseqüências para a seleção natural, partiremos do estudo de [WRI 32] que apresenta a idéia da *paisagem adaptativa* ou *superfície de aptidão*, que é um meio útil de visualizarmos como a seleção atua numa população que está evoluindo. A idéia aqui é traçar a aptidão (*fitness*) como uma função sob o espaço de todas as combinações genéticas possíveis para uma espécie em um ambiente em particular, como visto na figura a seguir.

O gráfico resultante forma a superfície de aptidão. O espaço de possíveis organismos têm milhares de dimensões, e as superfícies de aptidão tem tipicamente um

grande número de picos e vales, variando na altitude, pois algumas combinações dos genes são mais adaptativas do que outras.

A população é representada como uma nuvem de pontos sob a superfície de aptidão, um ponto para cada organismo na população. Quanto mais variável for a população, mais esparramada será a representação desta sob o gráfico. Os descendentes dos indivíduos mais aptos em uma população tendem a ser mais numerosos e mais aptos que os indivíduos menos aptos. Logo, após muitas gerações, a seleção natural tende a mover a população para os picos (aptidão elevada), enquanto que a caráter aleatório das mutações tendem a mover a população de forma esparsa sob a superfície do gráfico. Se a seleção natural dominar a evolução da população, a tendência é um aumento gradual no gradiente da superfície de aptidão; se a aleatoriedade dominar, a evolução tende a desviar-se por toda a superfície.

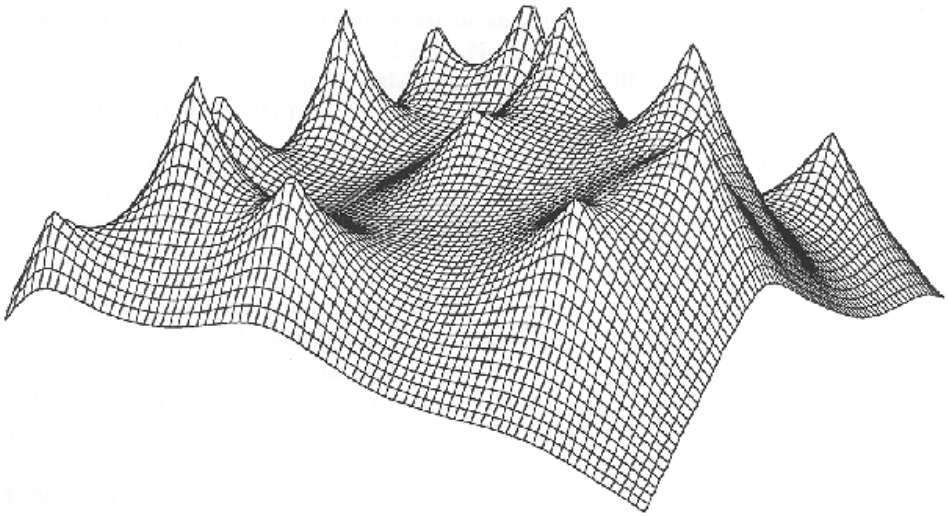

FIGURA 2.1 - SUPERFÍCIE DE APTIDÃO NUM ESPAÇO BIDIMENSIONAL. A altura da superfície é dada pelo grau de aptidão para cada combinação de genes num ambiente específico.

Na biologia, a aptidão é definida como a habilidade relativa à sobrevivência e reprodução no contexto de um ambiente em particular e de uma coleção de genes. Na natureza, a aptidão de um organismo é muito difícil de ser determinada, assim como a contribuição de um traço genético em particular. Medidas precisas de aptidão são necessária pois mesmo mudanças muito pequenas podem desencadear grandes conseqüências evolucionárias.

Como veremos adiante, a aptidão pode ser considerada um atributo de todo um genótipo, ao invés de referir-se a um gene ou traço específico. A seleção natural favorece determinados genótipos. O sucesso reprodutivo de determinados genótipos é determinado pela totalidade de traços e qualidades produzidas num dado ambiente.

A aptidão de um genótipo em particular é determinada pelos eventos em todos os estágios do seu ciclo de vida. O elemento mais óbvio da aptidão é a viabilidade, ou seja, a habilidade de um organismo desenvolver-se e sobreviver desde o nascimento até a fase adulta. Um outro componente importante é a habilidade de formar pares para o acasalamento, conhecido como a seleção sexual (ver seção seguinte). A seleção sexual é responsável pelas competições entre os machos de uma mesma espécie, escolha de um macho, escolha de uma fêmea, ou escolha mútua, através de iterações entre os machos e fêmeas.

Outra componente da aptidão é denominado *direção meiótica*, que trata sobre as diferenças na produção das combinações genéticas (usualmente de forma não aleatória) dos gametas, durante a formação destes (meiose). Outra forma de seleção é

seleção gamética, que resulta das diferenças no sucesso das fertilizações entre os gametas produzidos. A fecundidade de um indivíduo, ou seja, o número de zigotos (gametas fertilizados) produzidos, é um outro componente para a aptidão global de um genótipo.

Os efeitos combinados de todos estes componentes determinam a aptidão de um dado genótipo. É preciso ressaltar que um indivíduo, mesmo que viável e saudável na fase adulta, terá um grau de aptidão zero se falhar em encontrar um parceiro compatível durante a seleção sexual.

A aptidão também pode ser aplicada, e quantificada, a partir de uma sociedade de indivíduos (genótipos) em termos de sua adaptabilidade com o ambiente dado. Neste caso, as observações dos comportamentos seriam realizadas de uma forma macroscópica [BED 92], levando em conta toda as transformações realizadas pela sociedade como um todo, a tentar adaptar-se ao seu meio ambiente.

A formulação de quantificadores macroscópicos da evolução e adaptação, assim como as descrições dos mecanismos microscópicos de onde estas quantidades macroscópicas emergem, é essencial se a Vida Artificial for utilizada como uma ciência exploratória e quiser contribuir significativamente para a biologia evolucionária real. No entanto, esta abordagem apresenta uma análise difícil em termos de como definir e tratar estes quantificadores macroscópicos.

2.8 A Reprodução

A reprodução, seja ela sexuada ou assexuada, é o mecanismo pelo qual a célula perpetua a si mesma. Na reprodução assexuada, os novos indivíduos são produzidos pela simples divisão de células não reprodutíveis, através da formação de botões a partir de um sistema de origem (pais), pela formação de esporos, que são germinados diretamente neste novo indivíduo, etc. Ou seja, não é necessário para as células, ou para o núcleo celular, fundir-se com outro indivíduo para a reprodução. As novas gerações assexuadas são, essencialmente, idênticas, pois um pai único acaba por transmitir uma cópia fiel de si mesmo para todos os seus descendentes (clonagem).

Na reprodução sexuada, as novas gerações têm origem após uma fusão entre os núcleos das células de dois pais diferentes, o que acaba produzindo uma maior variação genética. As células que são utilizadas neste processo são denominadas gametas. Estas células formam pares provenientes de dois pais diferentes, para produzir um zigoto, ou seja, um ovo fertilizado, que é o ponto de partida para a nova geração.

Cada tipo de sistema reprodutivo provê algumas vantagens e desvantagens com maior ou menor importância evolutiva. Os sistemas assexuados são mais produtivos, mais prolíficos, e acabam por colonizar rapidamente um novo ambiente, pois muitos descendentes assexuados de constituição genética e adaptabilidade similares, acabam por preencherem rapidamente um habitat.

Já as espécies sexuadas são mais variáveis, logo um mínimo de tipos genéticos de uma mesma população podem adaptar-se às diferentes condições flutuantes, provendo uma chance maior para a continuação da população. Em geral, as espécies sexuadas são melhores adaptáveis a ambientes novos e sob influência de mudanças abruptas, enquanto que as espécies assexuadas trabalham melhor em cercanias estáticas.

No entanto, é importante observar que, em certas espécies em que o sexo é norma, uma mutação genética faz, eventualmente, aparecer uma fêmea assexuada, portadora de óvulos já prontos para gerar um embrião. Esta, é claro, acaba se reproduzindo com tamanha velocidade que logo se espalha por grandes áreas. Ora,

como na competição por alimentos costuma vencer quem pertence ao time mais numeroso, a população assexuada tende a sobreviver aos indivíduos sexuados que lhe deram origem. [OLI 90]

A seleção sexual refere-se às vantagens que certos indivíduos têm sob os outros indivíduos do mesmo sexo e espécie, com respeito a reprodução. A seleção sexual pode ser resultado da preferência demonstrada por uma fêmea por certos machos que estão competindo por ela, ou pelas iterações entre os machos competidores que acabam resultando em um só macho que irá impedir os demais de procriar. Sistemas de procriação competitiva ocorrem em muitas espécies animais devido ao número excessivo de machos em relação às fêmeas. A poligamia, ou seja, um macho procriar exclusivamente com muitas fêmeas, ocorre em certas espécies e acaba por acentuar a competição entre os machos.

Em seu livro, [DAR 1859] dá uma grande ênfase à seleção sexual como uma das principais forças no processo evolucionário. Ele estabeleceu que qualquer traço hereditário que incrementasse a taxa de sobrevivência e reprodução seria transmitida para seus descendentes. No entanto, Darwin também considerou a possibilidade de que alguns fatores envolvidos na seleção sexual poderiam não ter nenhuma função na luta pela sobrevivência, o que representa uma dicotomia entre a seleção natural e a seleção sexual.

2.9 A Morte

Como visto acima, na seleção natural, a fonte das mudanças são as mutações nos genes. A criação da natureza emerge da realização de experiências com os genes e observando seus resultados. Portanto, a natureza deve destruir suas criações antigas para dar espaço para a criação de novas experiências. A mortalidade de organismos multicelulares é uma necessidade evolucionária.

[RUC 93] enfatiza esta idéia, ao fazer cálculos sob o que ocorreria caso surgissem seres imortais. Suponhamos que cada indivíduo, em média, produza um novo descendente a cada trinta anos. Logo, se ninguém morresse e todos continuassem a reproduzir-se, a população iria dobrar a cada trinta anos. Se o processo iniciasse com dois imortais, teríamos 2^n imortais após 30*n anos. Uma estimativa indica que o universo tem o mesmo tamanho de um cubo de dez bilhões de anos-luz de lado. Considerando um ano-luz como dez trilhões de quilômetros, o universo teria, mais ou menos 10^{78} metros cúbicos.

Suponha que cada indivíduo ocupe um metro cúbico de espaço, quanto tempo seria necessário para que esta população de imortais preenchessem todo o universo ? Segundo os cálculos de Rucker, em apenas 260 gerações (± 7800 anos), esta população encheria completamente o universo.

Além do efeito devastador em termos de espaço, a morte ajuda na evolução de outras maneiras. A evolução é possível sempre que tivermos: (1) reprodução, (2) variação do genoma e (3) seleção natural. A variabilidade genética ocorre durante a reprodução, pelo cruzamento e mutação nos genomas do descendente. Já a seleção natural ocorre com a morte do indivíduo, ou seja, nem todas as criaturas tornam-se aptas a reproduzir-se antes de morrerem. Os indivíduos que reproduzem-se possuem genomas que são selecionados pelo processo de competição pela vida, originando descendentes que possam sobreviver.

2.10 A Evolução do Ser Humano

É importante estudarmos a evolução de nossa espécie em particular, que acabou por dominar toda a Terra. A Terra levou bilhões de anos para criar a primeira célula. A partir daí, a explosão da vida transformou por completo o ambiente que a cercava. Mas o que impulsionou a evolução do ser humano, em detrimento às demais sociedades, foi a integração pela linguagem super desenvolvida. A linguagem é utilizada em duas funções principais: comunicação entre os integrantes da sociedade e a modelagem da realidade.

Utilizando o material da linguagem, as pessoas podem construir modelos da realidade (sistemas de sinais) que nunca existiram no cérebro antes. Além disso, a linguagem pode ser considerada uma extensão comum unificada para todos os membros da sociedade. Este é um modelo coletivo da realidade que todos os membros da sociedade esforçam-se para aperfeiçoar, além de preservar a experiência das gerações anteriores, evitando a repetição dos erros.

A emergência dos seres humanos e sua integração formaram um novo mecanismo para a evolução. Antes, o desenvolvimento e o melhoramento dos níveis mais altos da organização (a estrutura do cérebro) ocorriam como resultado do combate pela sobrevivência e pela seleção natural. Este processo demorado requeria milhares de gerações. Na sociedade humana, o desenvolvimento da linguagem e da cultura são o resultado de esforços criativos de seus membros. A seleção de variantes as quais são necessárias para aumentar a complexidade da matéria do organismo pelo método da tentativa-e-erro foi trocado dentro do cérebro humano: ele tornou-se inseparável dos atos voluntários do indivíduo. Logo, a velocidade da evolução cultural aumentou várias vezes.

Resumindo, podemos constatar que, na evolução da cultura humana, o cérebro humano tornou-se a fonte da criatividade, e não mais um objeto de experimentação. Além disso, o aprendizado do indivíduo não era mais descartado, sendo repassado para seus descendentes de forma mais direta e objetiva. Este postulado não descarta a evolução biológica natural que ainda deve estar atuando sobre os seres humanos. Seria muita pretensão considerarmo-nos o ápice da evolução. Podemos considerar que os seres humanos são a espécie mais desenvolvida do planeta Terra, após 4,6 bilhões de anos. Isto não implica que a luta pela sobrevivência esteja ganha.

2.11 Algoritmos Genéticos

2.11.1 Algoritmos Genéticos Tradicionais

Os algoritmos genéticos (AG), apresentados por [HOL 75/92], são a abordagem mais amplamente utilizada na computação evolutiva. Exatamente por causa deste grande crescimento, os AG foram divididos em diversas partes. A principal divisão separa os AG que são utilizados como ferramentas de engenharia, na otimização de processos, da utilização dos AG como modelos científicos para processos evolutivos.

Os algoritmos genéticos baseiam-se no princípio da evolução, ou seja, a sobrevivência do mais apto. A partir de uma população de indivíduos (soluções potenciais), que colocados num processo de reprodução sofrem transformações unárias (mutações) e de ordem superior (crossover), geram uma nova população de indivíduos, potencialmente mais promissores que seus antecessores. Um esquema de

seleção, baseado no favorecimento dos indivíduos mais aptos, produz a nova geração de indivíduos.

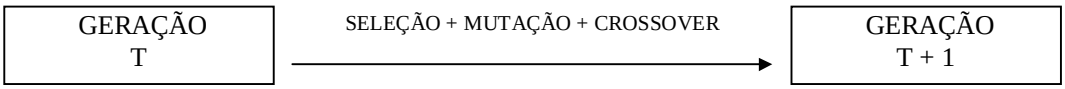

FIGURA 2.2 - ESQUEMA GERAL PARA UM ALGORITMO GENÉTICO

Após um certo número de gerações, espera-se convergir para uma geração de elite (solução ótima), através do preceito da evolução natural : “O problema que cada espécie enfrenta é buscar adaptações num ambiente complexo e hostil. O ‘conhecimento’ ganho pela espécie é incorporado pelos cromossomos de seus membros.”

Dentre as características principais dos Algoritmos Genéticos, podemos citar:

- robustez;
- naturalmente paralelizáveis;
- trabalham com informação absoluta de função objetivo. Não usam derivadas ou informações locais;
- enquadram-se como um algoritmo randômico;
- métodos de Otimização Global.

Para construir um AG com a finalidade de resolver um dado problema, é preciso criar:

- uma representação genética das soluções potenciais do problema (representação binária);
- uma população inicial de soluções potenciais;
- uma função de aptidão que avalie cada solução potencial;
- operadores genéticos para alterar a composição dos descendentes;
- valores para os parâmetros usados (tamanho da população, probabilidades dos operadores, etc.).

Um algoritmo genético simples pode ser descrito como:

1. Inicie uma população de cromossomos;
2. Calcule a função de aptidão de cada um;
3. Crie novos cromossomos com operadores genéticos definidos;
4. Gere uma nova população;
5. Se uma condição de parada não é satisfeita, volte para 2.

Condições de parada normalmente utilizadas:

- tempo de execução;
- número de gerações;
- falta de diversidade;
- últimas k gerações sem melhora (convergência).

As principais dificuldades encontradas, ao trabalhar-se com algoritmos genéticos estão baseadas na representação dos cromossomos, que acabam por influir diretamente na criação dos operadores genéticos.

A representação binária, utilizando *strings* fixas, normalmente utilizada, acaba por dificultar a representação de diversos problemas do mundo real. Usualmente, os elementos do espaço a ser pesquisado são melhores representados por estruturas de dados mais complexas, como matrizes, grafos, árvores, etc. Ao linearizarmos estas estruturas (transformando todos os dados em *strings* de *bits*), há uma perda considerável de informação. Os algoritmos genéticos necessitam que o problema seja reescrito numa forma apropriada, ou seja, efetuando-se um mapeamento entre possíveis soluções e a representação binária, construindo decodificadores ou algoritmos reparadores, etc.

2.11.2 Algoritmos Evolutivos

Algoritmos Evolutivos (AE) usam modelos computacionais de processamento evolucionário como base principal para o desenvolvimento e implementação de sistemas de resolução de problemas baseados em computação. Uma grande variedade de modelos computacionais evolutivos têm sido apresentados. Todos eles apresentam uma base conceptual comum para a simulação da evolução das estruturas do indivíduo através de processos de seleção, mutação e reprodução. Estes processos dependem da performance das estruturas do indivíduo, definidas por um ambiente.

Mais precisamente, os Algoritmos Evolutivos mantém uma população de estruturas, que envolvem as regras para a seleção e demais operadores, que são referenciados como Operadores Genéticos (ex.: recombinação e mutação). Para cada indivíduo na população, é possível calcular sua adaptabilidade no ambiente (*fitness*). A reprodução ocorre tendo em vista os indivíduos com maior grau de aptidão. A recombinação e mutação modificam estes indivíduos, que serão explorados no próximo passo. Apesar de ser extremamente simplista, do ponto de vista biológico, estes algoritmos são suficientemente complexos para prover mecanismos de busca robustos e extremamente adaptativos.

Evidentemente, muitos programas evolutivos podem ser formulados para um dado problema. Estes programas diferem em vários modos: eles podem usar diferentes estruturas de dados, operadores genéticos, parâmetros (tamanho da população, probabilidades de aplicação, operadores, etc.). No entanto, o princípio básico permanece: uma população de indivíduos sofrem diversas transformações, e durante este processo, os indivíduos tentam sobreviver.

Um algoritmo para os AE pode ser descrito como:

1. Inicialize o algoritmo (t = 0)
2. Inicialize uma população (randômica) de indivíduos
3. Calcule o grau de aptidão para todos os indivíduos da população (avalie P (t))
4. Enquanto uma condição de parada não for satisfeita
    a) Incremente o contador (t = t + 1)
    b) Selecione uma sub-população para reprodução (P'= select P(t))
    c) Recombine os genes desta seleção (recombine P'(t))
    d) Perturbe a população (mutação P'(t))
    e) Recalcule o novo grau de aptidão (avalie P'(t))
    f) Selecione os sobreviventes atuais (P = sobrev P, P'(t))

2.11.3 Algoritmos Genéticos e Algoritmos Evolutivos

Algoritmos Evolutivos surgiram baseados em Algoritmos Genéticos, tentando resolver seus principais problemas. Basicamente, os AE são AG que apresentam, incorporadas, conhecimentos do mundo real para um dado problema, tentando representá-los da forma mais "natural" possível.

Apesar disso, existem dois principais aspectos que diferem Algoritmos Genéticos e Algoritmos Evolutivos:

- Não há restrições na representação: os Algoritmos Genéticos clássicos envolvem uma codificação das soluções dos problemas como uma *string* (normalmente para representação binária), conhecida como genótipo. Em Algoritmos Evolutivos, a representação é baseada no problema. Uma rede neural pode ser representada da mesma maneira como é implementada, por exemplo, pois as operações de mutação não necessitam uma codificação linear.
- Mutações: as operações de mutação simplesmente modificam aspectos da solução de acordo com uma distribuição estatística que se traduzem em pequenas variações no comportamento dos descendentes, não provocando grandes alterações. Além disso, a severidade das mutações são sempre reduzidas quando um ótimo global está próximo.

2.12 Redes Neurais

Muitos pesquisadores de Vida Artificial, especialmente os que concentram-se em processos de alto nível, tais como aprendizado e adaptação, utilizam em seus organismos redes neurais que funcionam como uma espécie de cérebro artificial. Redes neurais são algoritmos de aprendizagem, que necessitam serem treinadas para que possam, por exemplo, classificar imagens em diversas categorias. Uma tarefa típica para redes neurais é o reconhecimento de caracteres escritos à mão livre.

Uma rede neural é composta por um coleção de dispositivos de entrada e saída, denominados neurônios, que são organizados num rede altamente conectada. Normalmente esta rede é organizada em camadas: uma camada de entrada que recebe os dados provenientes dos sensores, algumas camadas denominadas camadas escondidas que realizam as computações necessárias para a classificação da entrada, e uma camada de saída que indica o resultado desta computação. O treinamento de uma rede neural envolve o ajustamento dos pesos das conexões entre os neurônios da rede.

Em Vida Artificial, as redes neurais são usualmente utilizadas para a definição das ações a serem tomadas pelos organismos implementados. Estas redes, usualmente, não sofrem um pré treinamento. Elas serão treinadas durante o ciclo de vida do organismo. Um exemplo típico da utilização de redes neurais em sistemas de Vida Artificial é dado na seção 5.2.

3 O Surgimento da Vida Artificial

A Vida Artificial é o estudo de sistemas construídos por seres humanos (artificiais) que exibem comportamentos característicos de sistemas vivos naturais (biológicos). Ele completa as ciências biológicas tradicionais que concentram-se na análise dos organismos vivos, ao sintetizar comportamentos parecidos aos de destes em outro meio, tais como os computadores. Ao estender as fundações empíricas sobre a biologia além da vida baseada em cadeias de carbono que envolvem toda a Terra, a Vida Artificial pode contribuir com a biologia teórica mudando da visão da vida-como-nós-a-conhecemos para uma visão maior da vida-como-ela-poderia-ser. Este é, em essência, o pensamento desenvolvido por [LAN 89], no livro *Artificial Life*.

O mais importante na definição de Langton é que a Vida Artificial deveria ver a vida como uma propriedade da organização da matéria, ao invés de uma propriedade da matéria que foi organizada. Enquanto que a biologia concentra-se principalmente com as matérias básicas da vida, a Vida Artificial está preocupada com as bases formais da vida. Ela inicia-se de baixo, vendo o organismo como um grande população de máquinas simples, e trabalha sinteticamente a partir daí – construindo grandes agregados de objetos simples governados por regras, os quais interagem com os demais de uma forma não-linear, suportando dinâmicas globais, baseadas nos organismos vivos. O principal conceito em Vida Artificial é o comportamento emergente[1].

Logo, a Vida Artificial preocupa-se com a orquestração dos comportamentos destas máquinas simples de baixo nível, para que o comportamento emergente no nível global seja essencialmente o mesmo que os comportamentos exibidos pelos sistemas vivos naturais. Ou seja, a Vida Artificial concentra-se na geração de comportamentos parecidos com os dos sistemas naturais.

A metodologia apresentada por Langton é compatível com as noções de emergência da seção 2.2: a partir de iterações não-lineares de componentes simples e mecânicos, pode-se observar a emergência de comportamentos complicados, imprevisíveis, em suma, parecidos com os comportamentos naturais. Organismos vivos naturais também são compostos por componentes não-vivos. Como visto na seção 2.2, o problema da biologia é precisamente a emergência da vida a partir de componentes não-vivos. As substâncias destes componentes seguem, e são completamente descritas, pelas leis físicas, no entanto uma explicação física sobre a totalidade dos sistemas vivos é incompleta.

Similarmente, na Vida Artificial, nós temos componentes formais obedecendo um conjunto particular de axiomas, e a partir de suas iterações, alguns comportamentos globais emergem, os quais não são totalmente explicados pelas regras formais locais. Analogamente, as regras formais atuam como leis físicas artificiais e o comportamento global, se for reconhecido como similar aos comportamentos naturais, atua como uma biologia artificial, numa aproximação *bottom-up* para os comportamentos complexos.

---

[1] Segundo [Steels 94] um comportamento do sistema é dito emergente se ele pode ser definido utilizando categorias descritivas que não são necessárias para descrever o comportamento dos componentes constituintes do sistema. Em sistemas físicos (ver seção 2.2), a temperatura e a pressão são exemplos de fenômenos emergentes – eles ocorrem em largos conjuntos de moléculas, devido à iterações a nível molecular; no entanto uma única molécula não possui as propriedades de pressão e temperatura. A natureza nos mostra dezenas de exemplos em que ações simples, de interação local entre seus componentes, acaba dando origem a comportamentos globais altamente organizados. Nestes exemplos incluem-se as colônias de insetos, montagem de células, a retina ocular e o sistema imunológico.

Obviamente, o principal axioma assumido pela Vida Artificial é que a forma lógica (comportamentos) de um organismo pode ser separada de seus materiais básicos dos quais esse é formado, e que a vida em si pode ser encarada como uma propriedade desta forma lógica, ao invés das substâncias que a compõem. A idéia aqui é que estamos aptos a descobrir os princípios básicos da organização de sistemas vivos, logo as substâncias usadas para a criação da vida são irrelevantes. Ao investigar estes princípios básicos, estuda-se não apenas a vida biológica, baseada em cadeias de carbono (vida-como-nós-a-conhecemos), mas também as regras universais da vida (vida-como-ela-poderia-ser).

Apesar de ser, reconhecidamente, uma das bases da Vida Artificial, a abordagem de Langton apresenta alguns problemas. A observação de comportamentos emergentes em sistemas formais complexos, na busca por comportamentos interessantes, indica uma certa circularidade. Se a Vida Artificial concentra-se na busca de comportamentos parecidos com os naturais em sistemas artificiais, universais, as pesquisas apresentadas nos últimos anos vêm entrelaçando os conceitos da vida-como-ela-poderia-ser com a vida-como-nós-a-conhecemos através da análise de algumas semelhanças subjetivas. Esta abordagem dificilmente pode ser aceita como a busca por princípios universais.

O problema surge na análise dos comportamentos observados nos sistemas desenvolvidos. Esta análise, normalmente, é feita de forma subjetiva, baseada nas crenças pessoais sob como a vida deve ser, como ela deve desenvolver-se, evoluir e, principalmente, como ela se apresenta diante de nossos olhos. Estas crenças são formadas pela nossa própria convivência com o único sistema biológico natural disponível para análise, que envolve todo o planeta Terra.

Mas mesmo se a própria Terra pudesse repetir seu processo evolutivo, seria altamente improvável que o sistema biológico global reaparecesse com suas formas atuais. O mesmo se aplica a qualquer outro planeta, ou sistema, eventualmente habitável: a chance de surgirem sistemas genéticos iguais aos nossos, com seleção das mesmas singularidades levando às mesmas combinações de genes são extremamente remotas.

No entanto, ao estudarmos a evolução da vida na Terra, percebe-se que, embora os detalhes sejam diferentes, há modelos de problemas que são bem gerais; as soluções comuns para esses problemas poderiam se aplicar a qualquer lugar do universo e a qualquer sistema. Por exemplo, o vôo foi desenvolvido pelos ancestrais dos pássaros, dos insetos, dos morcegos e dos peixes teleósteos. Outro exemplo é a fotossíntese, criada por diferentes organismos do grupo de bactérias.

Há, entretanto, muitas soluções acidentais importantes, tal como o conjunto de singularidades anatômicas que nós herdamos a partir das células que saíram da água (ver seção 2.3). Estas particularidades foram chamadas de *paroquias*, para distinguirem-se das soluções universais, por [COH 92]. Para ele, assim como podemos reconhecer as soluções universais em nossa história evolutiva, pois estas manifestam-se de muitas maneiras, deveríamos ser capazes de reconhecer as soluções paroquiais, porque estas só aconteceram uma vez. Mas isso não é tão fácil, mesmo porque nem sempre é possível saber se algo aconteceu apenas uma vez, ou várias vezes.

Para [PAT 89], a Vida Artificial deve ser comparada com um mundo sem vida, real ou artificial. A vida num mundo artificial, para ele, requereria a exploração do que nós conhecemos por realidades físicas ou matemáticas alternativas. Para que a Vida Artificial realmente estendesse a visão da biologia, deveríamos estender também os nossos conceitos para os comportamentos esperados por estas, teoricamente, novas formas de vida.

Podemos perceber, então, dois objetivos diferentes para a Vida Artificial, de acordo com [ROC 97]. O primeiro, mais rígido, concentra-se na sintetização da Vida Artificial a partir de componentes computacionais ou materiais (robôs auto-situáveis, de acordo com os conceitos de [BRO 91]). O segundo, mais brando, está interessado em obter comportamentos semelhantes aos dos sistemas naturais, e é essencialmente metafórico. Para ser aceito como um campo científico, a Vida Artificial, além de imitar comportamentos subjetivos, deve concentrar-se na investigação das regras que nos permitem distinguir a vida da não-vida e que possam ser replicados experimentalmente em discursos científicos.

Segundo Rocha, não importa em qual dos dois objetivos está a meta, os artefatos e modelos a serem construídos devem sempre explicitar o conjunto de regras nos quais eles foram baseados, para que possam demonstrar porque tal organização artificial está viva ou observa alguns comportamentos parecidos com os dos sistemas vivos. Naturalmente, os requisitos para a pesquisa da síntese da Vida Artificial são muito mais rigorosos, pois este não importa-se apenas com o limiar comportamental que possa ser comparado com os sistemas biológicos, mas sim com a realização de uma organização artificial que esteja de acordo com os sistemas vivos em todos os seus aspectos. A pesquisa de comportamentos semelhantes aos sistemas naturais restringem-se a simulação de algumas características até que algum limiar seja satisfeito.

3.1 Os Primórdios da Vida Artificial

Uma das questões fundamentais concentra-se nas condições sob as quais a vida surge. Se examinarmos o nosso único exemplo, a vida orgânica baseada em cadeias de carbono, as condições mínimas necessárias seriam: (1) a existência de entidades auto-replicáveis que (2) fossem sujeitas a evolução ([KAU 90] e [RAY 92]). Se estas condições forem implementadas em algum meio artificial, a vida surgirá ? A existência destas entidades, tem incrementado as características citadas pelos pesquisadores em suas definições para vida, incluindo metabolismo, comportamentos propositais, estabilidade sob perturbações, etc.

No final da década de 40, o matemático e físico John von Neumann[NEU 66] começou a interessar-se pela questão de se uma máquina poderia se auto-replicar, ou seja, produzir cópias de si mesma. Von Neumann desejava investigar a lógica necessária para a replicação; ele não estava interessado, mesmo porque ele não tinha as ferramentas necessárias para isso, em construir uma máquina em nível bioquímico ou genético. Mesmo porque, naquela época, o DNA não havia sido descoberto ainda como o material genético da natureza.

Para conduzir uma investigação matemática formal, ele usou um modelo concebido pelo seu colega, o matemático Stanislaw Ulam. O modelo, conhecido como *autômato celular*, consistia numa grande grade de células, similar a um tabuleiro de xadrez, onde cada célula possuía um certo estado num dado momento. O número de possíveis estados por célula era finito e, usualmente, pequeno (normalmente cada estado era representado por uma cor diferente). Todas as células mudavam seu estado simultaneamente de tal modo que o estado da célula no próximo tempo dependia unicamente do estado corrente da célula e dos estados das células vizinhas. O princípio que guiava as transformações das células eram aplicados identicamente em todas as células, e este princípio era referenciado como a regra do sistema.

Por exemplo, uma regra simples para um autômato celular de dois estados (branco/preto) poderia mudar o estado da célula no próximo passo para preto se

houvesse um número par de vizinhos em preto, e para branco se houvesse um número ímpar de vizinhos. Mesmo esta simples definição para uma regra gerava um comportamento complexo no autômato.

Uma máquina para o modelo de autômato celular era uma coleção de células que podiam ser consideradas operando em harmonia. Desse modo, era possível observar *criaturas* simples que eram aptas a moverem-se mesmo neste universo austero, como podemos observar na Figura 3.

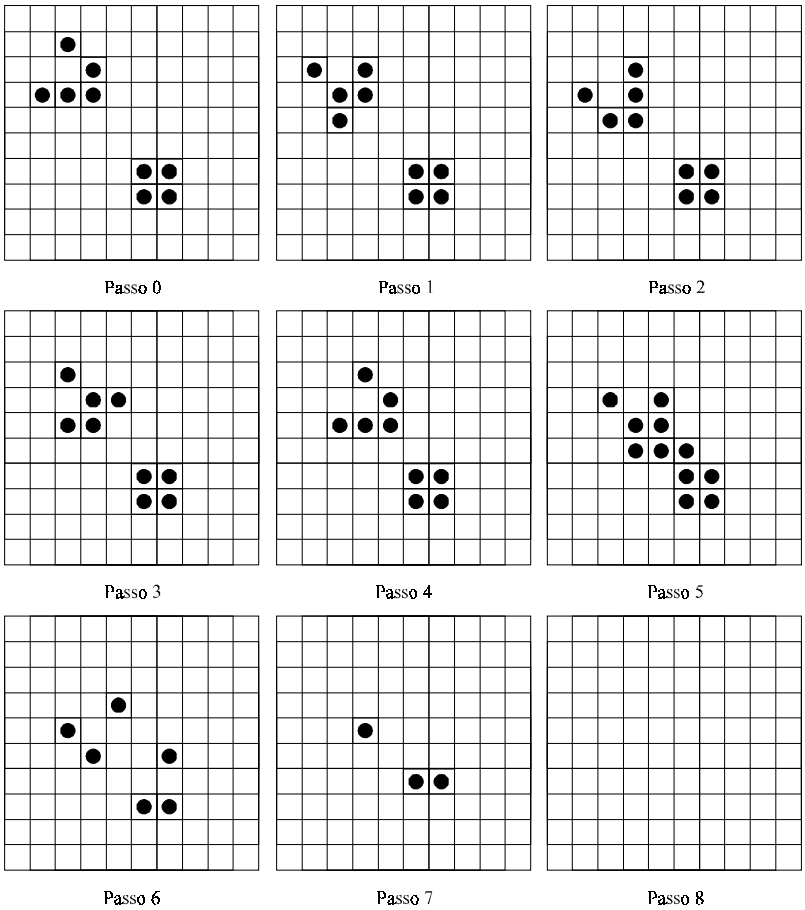

FIGURA 3.1 - O JOGO DA VIDA

A vida ocorre num tabuleiro virtual, segundo Jonh H. Conway. As células estão em um de dois estados: viva ou morta. Cada célula tem oito possíveis vizinhos, formados pelas células ao lado e as do canto. Se a célula, num determinado passo, está viva, ela continuará viva no próximo passo se houver dois ou três vizinhos vivos. Ela irá morrer por superpopulação se houver mais de três vizinhos vivos, e irá morrer por exposição se houver menos de dois vizinhos vivos. Se uma célula estiver morta, ela permanecerá morta no próximo passo enquanto não houver exatamente três, dos seus oito vizinhos, vivos. Neste caso, a célula irá nascer no próximo passo [LEV 92].

No passo 0, havia dois modelos, um quadrado estacionário (*bloco*) e uma criatura movendo-se (*planador*). O planador move-se uma célula, diagonalmente, a cada quatro passos. Ao encontrar outras criaturas, como o bloco, as duas criaturas são sujeitas a uma simples regra universal (leis da física deste mundo), que causa uma aniquilação mútua, neste caso. O importante é notar que as ações, como o movimento do planador, estão puramente nos olhos do observador – o nível mais básico consiste de simples transformações de estado, sem nenhuma movimentação aparente. No entanto,

considerando uma visão de mais alto nível do sistema, introduz-se novos termos para a descrição de fenômeno observado.

Von Neumann utilizou este modelo simples para descrever uma máquina construtora universal, que poderia ler instruções de montagem de qualquer máquina dada, e construir a máquina de acordo. Estas instruções seriam coleções de células de vários estados, como deveriam ser as da nova máquina após a montagem – na verdade, qualquer elemento composto na grade era simplesmente uma coleção de células. O construtor universal poderia construir qualquer máquina, dado o *genoma* apropriado (instruções de montagem); ou seja, dada a sua própria descrição, ele era capaz de construir uma cópia de si mesmo (auto–replicação). Para que os descendentes também pudessem realizar a auto-replicação, era necessário copiar as instruções de montagem para estes. Desta maneira, von Neumann mostrou que processos replicativos eram possíveis em máquinas artificiais.

Uma das principais conclusões de von Neumann foi que o processo replicativo utilizava as instruções de montagem em duas maneiras distintas: como um código a ser interpretado (durante a montagem), e como dados não-interpretáveis (durante a cópia das instruções de montagem para seus descendentes). Durante as décadas que se seguiram, quando os mecanismos genéticos básicos começaram a se desdobrar-se, ficou claro que o processo de von Neumann havia copiado o modelo genético. O processo pelo qual as instruções de montagem (DNA) é utilizado para construir máquinas operadoras (proteínas) também utiliza uma forma dual de informação: como um código interpretado e como dados não-interpretáveis. O primeiro é conhecido em biologia como tradução, o segundo como transcrição e ocorre durante a duplicação celular.

Um dos principais problemas com o autômato celular de von Neumann é a complexidade do construtor, que requer centenas de milhares de células. Além disso, cada célula pode estar em um de vinte e nove possíveis estados, ao invés de apenas dois, como exemplificado acima. Mais tarde, Chritopher Langton [LAN 84] observou que, embora a capacidade de construção universal seja uma condição suficiente para a auto-replicação, ela não era necessária; mesmo porque, os sistemas naturais não eram capazes de realizar uma construção universal. Langton desenvolveu autômatos auto-replicáveis que eram muito mais simples que o construtor universal de von Neumann. Para estas máquinas, no entanto, não havia qualquer capacidade de construção ou computação, sua única funcionalidade era a auto-replicação. Trabalhando em cima destes resultados, alguns pesquisadores têm construído estruturas auto-replicáveis que possam executar programas úteis [PER 96, TEM 95]. Estas últimas são máquinas mais simples que as de von Neumann. Elas mantém a capacidade de auto-replicação pois cada filho é capaz de continuar replicando-se, além de carregar outras funções escritas em seu código genético.

O autômato celular exibe um comportamento emergente, ou seja, o aparecimento de capacidades de processamento de informações globais que não eram representadas explicitamente nos componentes elementares do sistemas, ou em suas interconexões, como visto na seção 2.2.

3.2 A Evolução na Vida Artificial

A idéia da aplicação dos princípios biológicos na evolução natural de sistemas artificiais foi introduzida nas décadas de 50 e 60, quando vários pesquisadores começaram a utilizar sistemas evolucionários, demonstrando que estes poderiam ser

utilizados como uma ferramenta de otimização em problemas de engenharia. Inúmeras metodologias foram apresentadas desde então, mas a grande maioria delas acaba por seguir algumas regras que se tornaram padrão: inicia-se o algoritmo com uma população randômica de soluções potenciais, opera-se operadores inspirados na genética natural e na seleção natural sobre esta população, e ao final do algoritmo, as soluções melhores adaptadas (com maior grau na função aptidão) emergem do sistema.

Uma das principais questões envolvendo a evolução em sistemas artificias é a definição da função aptidão, ou seja, como reconhecer um bom indivíduo na população de organismos artificiais. Na resolução de problemas de otimização ou de engenharia, esta questão tem uma resposta simples: a função de aptidão é imposta externamente pelo observador, de acordo com o problema particular em questão. Por exemplo, se o problema é otimizar uma função que representa os custos operacionais de uma dada empresa, a função de aptidão é dada pelo valor do indivíduo perante a função analisada. A primeira geração de indivíduos tende a exibir uma performance pobre, mas com grande variabilidade. A medida que o algoritmo evolua, a performance aumenta e diminui a variabilidade, caracterizando a convergência do sistema.

É importante notar que a evolução nestes algoritmos ocorre sem a intervenção humana, ou seja, após o ambiente ter sido definido, uma população inicial é gerada randomicamente e o algoritmo evolucionários rodará até que uma solução satisfatória ser encontrada. A vantagem primordial dos métodos evolucionários em problemas de engenharia é o seu potencial para a adaptabilidade. Quando um evento imprevisto ocorre, o sistema consegue evoluir, ou seja, adaptar-se à nova situação, em analogia com a natureza.

A principal diferença entre os sistemas evolutivos de resolução de problemas para os sistemas evolutivos na Vida Artificial é que estes não possuem um estado final definido. Para os problemas do primeiro grupo, as definições de critério são impostas pelo usuário de acordo com a tarefa a ser realizada, ou seja, a evolução é direcionada para algum ponto. Esta característica contrasta com a evolução *em aberto* da natureza, que não admite a imposição de um critério externo de aptidão, e sim de um critério implícito, emergente e dinâmico (que pode ser discutido como a sua função de sobrevivência no ambiente). Outro aspecto significante dos ambientes naturais demonstra que um organismo deve adaptar-se também a todos os outros organismo com os quais ele interage, o que é referenciado como co-evolução.

Uma evolução sem um final definido, sem direção, é a única forma conhecida na evolução natural capaz de gerar dispositivos como olhos, asas e sistemas nervosos, além de produzir um elevado número de espécies. Evolução sem direção deve ser aplicada em sistemas evolucionários para observarmos a emergência de sistemas completamente novos.

3.3 A Emergência na Vida Artificial

Outro processo predominante em sistemas de Vida Artificial é a emergência, onde um fenômeno de alto nível surge das iterações em níveis mais baixos. Sistemas de Vida Artificial consistem de uma enorme coleção de unidades simples e básicas cuja principal característica é a emergência de comportamentos de alto nível. O modelo de von Neumann descrito na seção 3.1 é um exemplo de comportamento emergente. Outro exemplo é o trabalho de [REY 87] sobre o comportamento dos pássaros.

Reynolds queria investigar como um bando de pássaros voava, sem um direção central, ou seja, sem um líder. Ele criou um pássaro virtual com as capacidades básicas

de vôo, denominado *boid*. O mundo artificial era composto por uma coleção de boids, voando de acordo com as seguintes regras:

- Evitar colisões: evitar colisões com os pássaros em sua vizinhança;
- Igualar velocidades: manter a velocidade parecida com os pássaros em sua vizinhança;
- Concentração do bando: manter-se perto de seus vizinhos.

Cada *boid* era formado por uma unidade básica que enxergava apenas os pássaros que estavam em sua vizinhança e voava de acordo com estas três regras. Reynolds observou que estas regras formavam uma base suficiente para a emergência de um comportamento parecido com um bando de pássaros naturais. Os *boids* voavam como um grupo coeso e, ao surgir algum tipo de obstáculo, dividiam-se espontaneamente em dois subgrupos, sem nenhum tipo de guia central, reagrupando-se após atravessar o obstáculo.

O modelo de Reynolds demonstra a estrutura básica dos sistemas de Vida Artificial – um grande número de elementos unitários, interagindo com um pequeno número de vizinhos nas proximidades, sem nenhum tipo de controle centralizado. São observados fenômenos emergentes de alto nível, resultantes da iteração entre estes componentes de baixo nível. Apesar dos boids de Reynolds serem virtuais, o comportamento do bando é tão real como os observados nos pássaros reais.

A emergência de comportamentos complexos a partir de uma coleção de comportamentos simples pode ser analisada pela forma como esta é construída. As abordagens tradicionais para sistemas de Inteligência Artificial empregam uma metodologia *top-down* onde os comportamentos complexos (ex.: jogo de xadrez) são identificados e o sistema construído de tal maneira a representar todos os detalhes do comportamento desejado. Os sistemas de Vida Artificial operam com uma metodologia *bottom-up*, iniciando a partir de elementos unitários e construindo, gradualmente, seus comportamentos através da evolução, emergência e desenvolvimento.

4 Modelagem de Sistemas de Vida Artificial

Neste capítulo apresentaremos alguns dos principais modelos propostos para a construção de sistemas de Vida Artificial.

4.1 Boids

Como visto na capítulo anterior, os boids foram propostos por Craig Reynolds [REY 87]. Seu objetivo era produzir criaturas artificiais que apresentassem um comportamento semelhante a um bando de pássaros. A cada passo, cada boid atualiza seu vetor velocidade e move-se ao longo desse vetor até a sua nova posição.

Um boid simples não possui nenhum estado interno e sempre reage da mesma maneira em situações iguais. Além disso, um único boid colocado num ambiente vazio não realizará nenhum comportamento complexo. Ele apenas voará numa determinada direção, em linha reta. Quando são colocados diversos boids num ambiente, o número de situações possíveis torna-se extremamente alta – cada boid reage diferentemente de acordo com a posição e a velocidade de outros boids.

As três regras que compõem o vôo geométrico dos pássaros virtuais de Reynolds estão descritas a seguir:

- Evitar colisões: cada boid deve manter-se numa distância de cruzeiro otimizada, uma espécie de zona de segurança, entre ele mesmo e seus companheiros nas cercanias de sua vizinhança. Se um outro boid estiver dentro da zona de segurança, há o perigo de colisão. Os boids evitam as colisões diminuindo a velocidade, se o vizinho que atravessou a zona de segurança estiver na sua dianteira, ou aumentando a velocidade, se este estiver na traseira, como visto na primeira parte da figura abaixo.

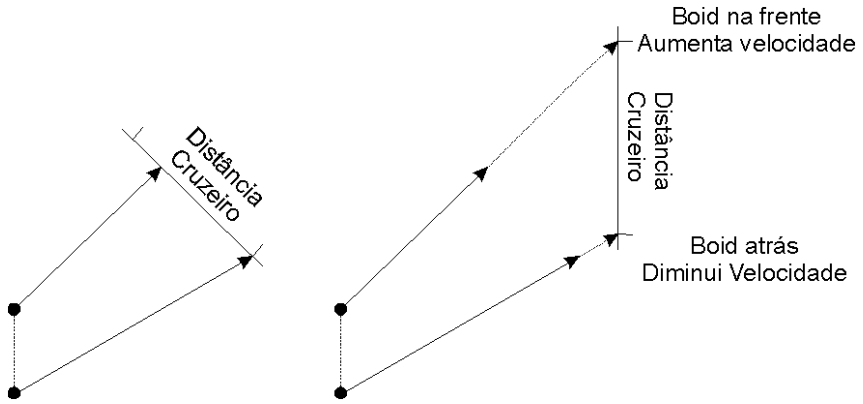

FIGURA 4.1 - BOIDS EVITANDO COLISÕES

Assim como o boid não deve aproximar-se demais de outro boid, ele também não deve afastar-se demais do boid que estiver mais próximo. Ou seja, se um boid e seu vizinho mais próximo estiverem mais longe que a distância de cruzeiro, o boid na frente aumenta a sua velocidade e de trás diminui a velocidade, como observado na segunda parte da figura acima;

- Igualar velocidades: cada boid tenta voar paralelamente ao seu vizinho mais próximo. Esta regra é realizada pelo ajustamento da tangente do vetor posição para que este se aproxime da tangente do vetor posição do vizinho mais próximo. Esta regra não modifica a velocidade do boid.
- Concentração do bando: cada boid tenta manter-se rodeado por outros boids por todos os lados. Isto é realizado calculando a posição média (*centroid*) em relação aos outros boids, e movendo-se para esta nova posição. Para realizar isso, o boid calcula o vetor que aponta para o centroid e gira a tangente do seu vetor posição para que os dois ângulos aproximem-se. Esta regra não modifica a velocidade do boid.

4.2 Turmites

Um turmite é um modelo de criatura de vida artificial que emula uma máquina de Turing em um ambiente bidimensional. Um turmite simples pode mover-se em quatro direções: norte, sul, leste e oeste. O estado da máquina de Turing é dado por um conjunto quíntuplo contendo: estado presente, cor de leitura, cor de escrita, novo estado e giro. O estado corrente e o novo estado são as direções que os turmites devem seguir.

A cabeça da máquina de Turing muda sua posição adicionando um giro à sua direção e movendo-se em sua nova direção. Os turmites são inicializados em algumas condições iniciais e seus movimentos são determinados apenas pelos giros e por uma tabela de mudança de estado.

Um exemplo de tabela de mudança de estado para um turmite que movimenta-se em quatro direções é mostrado a seguir:

Tabela 4.1 – Tabela de mudança de estados para um turmite

	Leste	Norte	Oeste	Sul
Mudança em X	1	0	-1	0
Mudança em Y	0	1	0	-1

Devemos assumir que cada máquina de Turing possui uma direção e que, ao final de cada iteração, o turmite move-se um passo em sua direção corrente. A mudança da direção ocorre em função do seu valor de giro, que varia de acordo com o conjunto abaixo:

K = [0, 1, ... número de direções possíveis – 1]

Em nosso exemplo, o turmite pode girar, sempre no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, de zero a três vezes. O efeito do giro na direção corrente do turmite é dada pela tabela abaixo:

Tabela 4.2 – Direção final do turmite

	Leste	Norte	Oeste	Sul
Giro 0	Leste	Norte	Oeste	Sul
Giro 1	Norte	Oeste	Sul	Leste
Giro 2	Oeste	Sul	Leste	Norte
Giro 3	Sul	Leste	Norte	Oeste

Por exemplo, se considerarmos um passo dado por Direção = Leste e Giro = 3, teremos ao final Direção = Norte, como mostrado na figura abaixo:

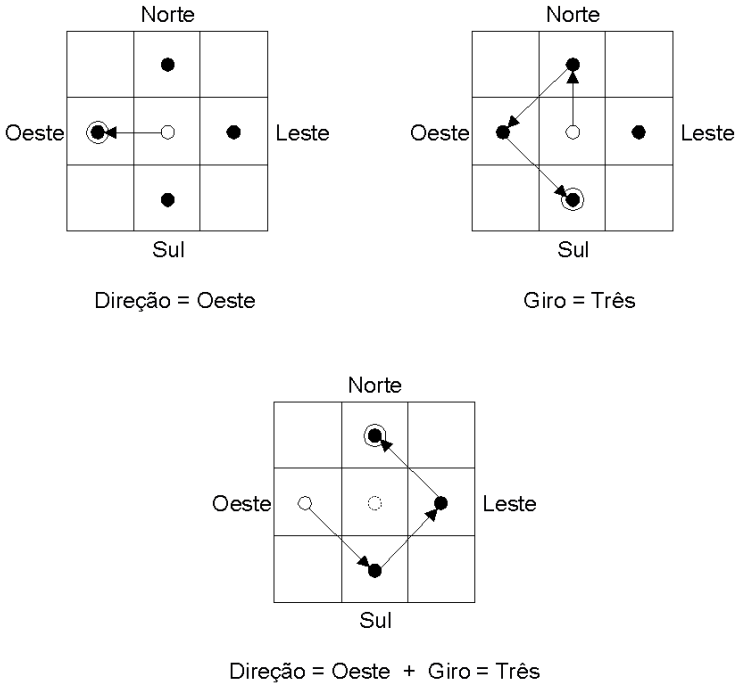

FIGURA 4.2 - TURMITES

4.3 Vírus

O termo vírus de computador é derivado e análogo ao vírus biológico. As infecções biológicas expandem-se quando o vírus (um pequeno casco contendo material genético) consegue injetar-se numa grande célula do corpo. A célula infectada é convertida numa fábrica biológica para a replicação do próprio vírus.

Similarmente, um vírus de computador é um segmento de código de máquina (tipicamente entre 200 e 4000 bytes) que replica seu código, quando ativados, em um ou mais programas hospedeiros. Quando os programas infectados são executados, o código viral também é executado o que acaba por expandindo a infecção.

Um vírus possui três estágios de ‘vida’:

- Execução: para que um vírus se espalhe, ele precisa ser executado. Esta fase ocorre como um resultado direto para um usuário que invoque um programa infectado, ou indiretamente, quando o sistema executa o código viral como parte de sua seqüência de inicialização ou ao executar uma tarefa administrativa em segundo plano;
- Replicação: o vírus, ao ser executado, replica-se para um ou mais programas escolhidos aleatoriamente;
- Realização de tarefas: além de auto replicar-se, os vírus podem realizar outras tarefas paralelamente, que apresentam uma variedade de efeitos (benéficos ou malévolos) que acabam por indicar a presença do vírus.

Algumas considerações podem ser feitas em relação às semelhanças entre os vírus e a Vida Artificial [SPA 91]:

- Vírus como um molde no espaço tempo: os vírus são representados como moldes de instruções que existem ao mesmo tempo em muitos sistemas de computadorizados. Os vírus não são associados com o maquinário físico, mas com as instruções executadas por este hardware;
- Auto replicação: os vírus de computador possuem a habilidade de reproduzir-se, gerando uma cópia exata ou mutante de seu código genético, o que constitui um dos princípios básicos da vida (ver seção 2.2);
- Armazenamento da informação de sua própria representação: assim como os vírus biológicos, que utilizam o DNA para armazenar toda a informação necessária para a replicação da célula, os vírus de computador utilizam o seu código como um gabarito ao auto replicar-se;
- Metabolismo virótico: esta propriedade envolve a energia ou a matéria que um organismo vivo necessita transformar para executar as suas atividades. Os vírus de computador utilizam a energia elétrica do sistema para executar as suas atividades. Eles não convertem matéria, mas utilizam esta energia para executar as suas instruções e infectar outros programas;
- Iterações funcionais com o ambiente: os vírus executam inspeções em seus sistemas hospedeiros como parte de sua atividade. Eles examinam as arquiteturas de memória e do disco rígido, alterando os endereços para que possam ocultar a si mesmos, ou seja, ele alteram seu ambiente para suportar a sua existência;
- Interdependência entre todas as partes do vírus: assim como os vírus biológicos, se um vírus de computador for dividido, ele será destruído e cessará suas atividades normais;
- Estabilidade perante perturbações: alguns vírus de computador podem rodar numa grande variedade de máquinas, sob diferentes sistemas operacionais. Muitos vírus podem constranger e derrotar programas antivírus;
- Evolução: esta é a maior diferença entre os vírus biológicos e os vírus de computador, pois o segundo não apresenta uma evolução. Apesar de ser possível construir um vírus capaz de evoluir de uma forma contínua, este seria tão grande e complexo, que dificilmente deixaria de ser detectado e eliminado. No entanto os vírus de computador apresentam mutações. Normalmente estas mutações variam poucas instruções, principalmente as que imprimem mensagens, ou os tipos de formas de ativação e replicação;
- Crescimento: o crescimento do vírus pode ser medido pelo número de arquivos infectados no sistemas. Certos vírus podem invadir todos os arquivos em algumas poucas ativações;
- Outros comportamentos: os vírus de computador agrupam-se em espécies com nichos ecológicos bem definidos, baseados no tipo de máquina hospedeira e no seu sistema operacional. Estas espécies são adaptadas para um ambiente específico e não sobrevivem se movidas para um ambiente diferente. Além disso, alguns vírus exibem comportamentos predatórios. Como exemplo, o vírus DenZuk procura e replica-se por cima das instâncias do vírus Brain, se os dois estiverem presentes no mesmo sistema. Outros vírus apresentam um comportamento territorial, marcando seus domínios territoriais para que outros vírus do mesmo tipo não possam entrar em sua área, competindo com o vírus original.

4.4 Minhocas

Uma minhoca de computador (*worm*) é um programa de computador que, parecido com os vírus, pode auto replicar-se. A diferença é que um *worm* não expande-se infectando programas executáveis hospedeiros. Ao invés disso, um *worm* inicia sua execução por si próprio, copiando seu código para novas posições de memória. Alguns *worms* mandam cópias de si mesmo para outros usuários utilizando o correio eletrônico.

Os *worms* rodam independente e viajam de máquina para máquina através das conexões de rede; os *worms* podem ter porções espalhadas rodando em diversas máquinas e, usualmente, não mudam outros programas. Apesar disso, eles podem carregar outros códigos que infectam o sistema (vírus).

Poucos *worms* foram construídos até hoje, principalmente os que executam funções danosas, pois eles são difíceis de construir. Os *worms* necessitam um ambiente de rede e um autor que esteja familiarizado com os serviços e facilidades da rede, assim como as operações necessárias para suportar o seu transporte de uma máquina para outra.

4.5 Mundos Virtuais

A construção de modelos de Vida Artificial utilizando mundos virtuais, usualmente bidimensionais, é a forma mais difundida e utilizada no estudo científico da Vida Artificial. As simulações computadorizadas de Vida Artificial são feitas construindo-se um mundo virtual no qual programas de computador (agentes[2]) podem mover-se, competir e evoluir.

Um agente neste mundo virtual contém, normalmente, um número pessoal de identificação, sua posição atual, e alguns valores que são utilizados para a comparação e definição dos comportamentos a serem seguidos. Estes comportamentos podem ser representados por tabelas, algoritmos genéticos e/ou redes neurais. Além disso, o agente pode manter dados adicionais sobre o seu estado, sua velocidade, os membros de sua colônia, o tipo de identificação de suas presas e predadores.

O mundo virtual, que é compartilhado por todos os agentes, é formado por uma grade de células, parecida com um tabuleiro de xadrez. Cada agente habita uma única célula de cada vez (ver seção 3.1). O mundo apresenta um marcador ou uma trilha individual para cada agente, que representa as mudanças de posição do agente. Além disso, o mundo mantém também algumas marcas que os agentes podem interpretar como comida, veneno, muros, caminhos, etc. Um exemplo típico de um mundo virtual é dado pela figura na próxima página.

Os agentes trabalham dentro de um laço de execução, usualmente definido como o que segue:

- Receba e analise as informações do mundo;
- Calcule a saída, a nova posição e os novos valores para os marcadores internos;
- Repasse a saída para o mundo.

[2] Um agente é uma entidade que atua num determinado sistema. O conjunto de agentes forma uma sociedade, dentro de um ambiente, que é formado por agentes ativos e passivos. Um agente raciocina sobre o ambiente e sobre os outros agentes, decidindo racionalmente quais objetivos deve perseguir, quais ações deve tomar, etc. [DEM 95]

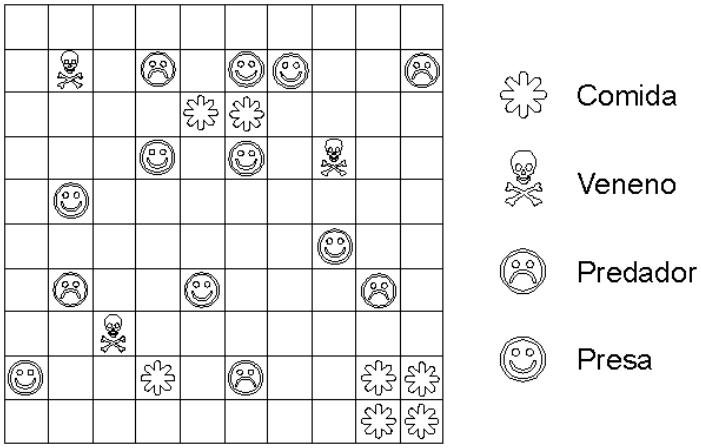

FIGURA 4.3 - MUNDO VIRTUAL

Os agentes podem receber vários tipos de informações do mundo, dependo do poder computacional da máquina e das variáveis envolvidas e desejadas pelo pesquisador. Em termos de processamento, o modo mais vantajoso é receber informações apenas da célula para a qual o agente está movendo-se. Alternativamente, pode-se construir um agente que receba informações de todos os seus vizinhos.

Outros modos incluem a concepção de visão, onde o agente recebe e calcula a distância e a direção dos outros agentes que estejam dentro do seu campo de visão. Finalizando, um agente ainda pode receber informações sobre todos os agentes do mundo, com a sua localização e tipo. Este tipo de informação, além de apresentar o maior custo computacional, não apresenta nenhuma similaridade com os modelos biológicos existentes.

Os quatro principais modos de percepção de um agente podem ser visualizados na figura abaixo:

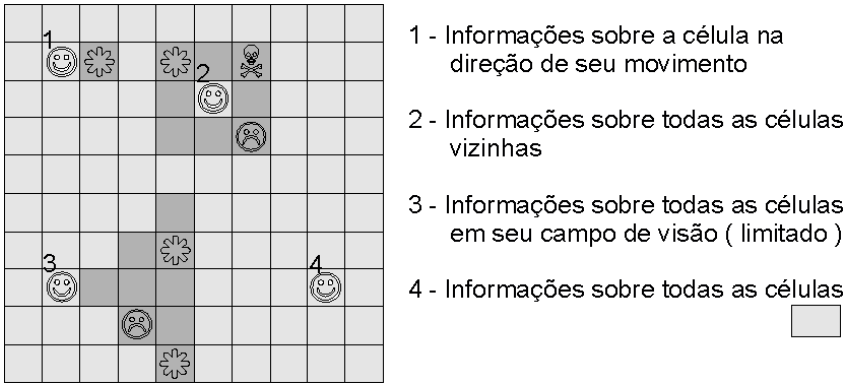

FIGURA 4.4 - MODOS DE PERCEPÇÃO EM UM MUNDO VIRTUAL

A partir da percepção do mundo que os cerca, os agentes podem tomar suas decisões. O processo de tomada de decisões é o mais importante e, potencialmente, o mais difícil de ser definido e executado. É a partir da definição destes comportamentos básicos que o sistema será posto a prova quanto à emergência de uma inteligência, normalmente não explicitada.

5 Sistemas de Mundos Virtuais

Neste capítulo apresentaremos uma síntese de alguns dos principais mundos virtuais implementados atualmente, assim como seus principais resultados.

5.1 Tierra

O projeto Tierra é um dos mais avançados no estudo da evolução dos organismos, ao nível da evolução do genoma. Ele foi desenvolvido por Tom Ray [RAY 94] na Universidade de Delaware. O Tierra provê um ambiente onde a evolução darwiniana pode ocorrer dentro de um computador, sem uma direção explícita ou intervenção humana.

Para Ray, deve-se observar uma distinção nítida entre simulações e instanciações de vida artificial. Por simulações, ele entende como populações de estruturas de dados num programa de computador que são utilizadas para representar populações de entidades biológicas (predadores, presas, formigas, etc.). A maioria dos projetos discutidos nas próximas seções encontram-se nesta categoria.

Em uma instanciação de vida artificial, populações de estruturas de dados não representam explicitamente nenhum organismo ou processo vivo, mas sim obedecem algumas leis artificiais abstraídas das leis naturais que governam os processos vivos. Para Ray, apenas as instanciações de vida artificial podem ser consideradas vivas.

No Tierra, os organismos são programas de computador em linguagem de máquina. Um organismo é uma *string* linear de instruções que são executadas movendo-se um ponteiro de execução ao longo deste. O principal avanço conceptual no projeto Tierra é a construção de um conjunto de instruções em linguagem de máquina extremamente robustas. Um programa (organismo) escrito neste conjunto de instruções pode sofrer mutações randômicas ou recombinações e, mesmo assim, continuar executável.

O Tierra apresenta um conjunto de 32 instruções, onde cada instrução é representada por um número de 5 bits. Um programa pode ser considerado uma simples concatenação de números de bits e, qualquer combinação de números de 5-bits é considerado um programa válido. Por exemplo, o operador de mutação opera sob os bits da *string* de execução. Modificando um destes bits ele pode transformar uma operação de JUMP (salto incondicional) numa operação de NOP (nenhuma operação). O programa, do ponto de vista do sistema operacional, continuará executável, apesar de não realizar mais nenhuma tarefa útil ou produzir ações sensíveis ao observador.

O operador de mutação é utilizado pelo sistema operacional para conduzir a evolução. Para as simulações realizadas, o sistema operacional aloca um certo número de ciclos de CPU e uma parcela de memória para as populações de organismos. Após um certo número de iterações (definidas pelo usuário), o sistema introduz erros (mutações) randômicas nos organismos.

Numa simulação típica, o sistema operacional é infectado por alguns organismos, capazes de auto reproduzir-se (fazer uma cópia de si mesmo em outras partes da memória). Logo, o sistema operacional irá executar o organismo repetidamente, o que ocasionará um aumento no número dos descendentes. Ocasionalmente, algumas mutações introduzidas nos descendentes acabam por impedir que este reproduzam-se. No entanto, outros tipos de mutações acaba por acelerar o processo de reprodução dos descendentes.

Quando há uma superlotação na memória, alguns organismos devem ser eliminados. Os organismos que serão excluídos são escolhidos de acordo com o quão bem estes rodam no sistema operacional, ou seja, elimina-se os organismos que podem gerar erros em certas condições. Cada organismo incrementa seu grau de penalidade, fornecido pelo sistema operacional, quando gera alguma condição de erro. O organismo é eliminado pelo sistema se acumular um grande número de penalidades (de acordo com os outros organismos da população). O resultado desta abordagem indica que os organismos que conseguem reproduzir-se rapidamente com um mínimo de erros ao sistema irá dominar a população. Mesmo assim, nas simulações realizadas, variabilidade da população é mantida, devido as contínuas mutações e recombinações. Alguns fenômenos evolucionários básicos são observados, como o parasitismo.

O Tierra é um ambiente artificial onde os organismos melhores adaptados sobrevivem, sem precisar uma definição de um grau de aptidão explícito. Neste ambiente, há apenas dois recursos: tempo de CPU (energia) e memória (território). Os organismos que conseguirem melhor adaptar-se ao ambiente e capturar a maior quantidade de recursos terá um taxa de sobrevivência mais alta que os demais.

O Tierra apresenta uma abordagem extremamente *bottom-up* para a construção de simuladores de Vida Artificial mais gerais. Apesar de apresentar algumas vantagens, como a mutabilidade e o grau de aptidão emergente, o sistema apresenta algumas dificuldades para a implementação de funções de alto nível tais como a percepção e a comunicação. No entanto, alguns fenômenos de baixo nível, como o estudo de organismos multicelulares, podem ser melhores estudados com esta abordagem.

5.2 Evolutionary Reinforcement Learning

Em seu artigo, [ACK 92], construíram agentes adaptativos, que movem-se randomicamente num espaço bidimensional, onde encontram-se alimentos, predadores, lugares escondidos a explorar, etc. Cada estado do agente inclui as entidades visualizadas pelo seu campo visual, o seu nível interno de energia, além de outras variáveis pertinentes.

Para a formação do seu comportamento, cada agente possui duas redes-neurais, do tipo *feed-forward*: (1) rede avaliadora que mapeia o estado do agente no tempo t como um número que representa o quão bom este estado é; (2) rede de ações que mapeia o estado do agente no tempo t como uma ação a ser tomada no tempo $t+1$. As únicas possibilidades de ações permitidas são o movimento para uma das quatro posições adjacentes : Norte, Sul, Leste e Oeste, mas estas ações podem resultar em situações como : alimentar-se, servir de alimento para um predador, descobrir um novo esconderijo, etc.

A arquitetura das redes neurais é a mesma para todos os agentes, mas os pesos para cada agente podem mudar. Os pesos das redes de avaliação são fixados na hora da criação (inicialização) do agente. Esta rede representa os comportamentos inatos e os desejos herdados de seus antecessores, tais como *estar-perto-da-comida-é-bom*. Já os pesos da rede de ações podem mudar seus valores durante o tempo de vida do indivíduo, de acordo com o algoritmo ERL. O genoma de cada agente codifica os pesos para a rede de avaliação e os pesos iniciais para a rede de ações.

Todos os agentes tem uma reserva interna de energia (representada por um número real) que deve manter-se acima de um determinado nível para prevenir a morte; o que é alcançado alimentando-se com a comida encontrada no ambiente. Um agente deve, além disso, manter-se longe de predadores, ou acabará sendo devorado.

Um agente só pode reproduzir-se se tiver uma quantidade de energia suficiente em seu compartimento interno. A reprodução assexuada é realizada clonando-se seus genomas e submetendo-os a mutação. Dois agentes que estejam suficientemente próximos podem gerar descendentes, cruzando seus genomas. Não há uma função de avaliação (*fitness*) externa, que possa avaliar o agente. Na verdade, o *fitness* emerge pelas suas ações e iterações com o ambiente durante o seu curso de vida.

O comportamento do agente é definido pelo algoritmo ERL : a cada tempo *t*, o agente avalia seu estado corrente, utilizando sua rede de avaliação. Esta avaliação é comparada com a avaliação produzida em *t-1*, em conjunto com a ação provocada, e esta comparação gera um sinal de reforço (positivo ou negativo) utilizado para modificar os pesos da rede de ações. A idéia aqui é que os agentes aprendam a agir de modo a melhorar o seu estado atual. Após este passo de aprendizado, a rede de ações já modificada é utilizada para determinar a próxima ação a ser executada.

Ackey e Littman compararam os resultados de três experimentos distintos: (*EA*) evolução da população em conjunto com o aprendizado dos agentes, (*E*) apenas evolução genética da população e (*A*), apenas aprendizado dos agentes. A estatística utilizada nesta comparação foi o período de tempo necessário para que esta população se extinguisse, em função dos predadores e das adversidades do ambiente. A melhor performance foi exibida pela população *EA*, seguida de perto pela população *A*, e muito abaixo, a população *E*.

Análises mais detalhadas da população *EA* revelaram que, em respeito a certos comportamentos, a importância relativa entre o aprendizado e a evolução muda durante o curso da evolução. Analisando os genes relativos ao comportamento de aproximar-se da comida (tanto na rede de avaliação como na rede de ações), eles descobriram que, nas primeiras gerações, os genes avaliadores da proximidade da comida (*estar-perto-da-comida-é-bom*) permanecem relativamente constantes perante a população, enquanto que os genes iniciais codificados na rede de ações eram muito mais variáveis. Esta observação indica a importância de manter as metas para o processo de aprendizado, assim como a importância do aprendizado para a sobrevivência.

No entanto, mais tarde, os genes avaliadores tornaram-se mais variáveis na população enquanto que os genes da rede de ações tornaram-se mais constantes. Este fato indica que os comportamentos inatos tornaram-se mais significativos que a aprendizagem durante esta fase. Ackey e Littman interpretaram estas observações como uma variante do efeito de Baldwin. Inicialmente, é necessário para os agentes aprenderem à aproximar-se do alimento; logo, a manutenção do conhecimento explícito de que *estar-perto-da-comida-é-bom* é essencial para o processo de aprendizagem tome lugar. Mais tarde, o conhecimento avaliativo de que *estar-perto-da-comida-é-bom* é transformado para uma codificação genética, em termos de comportamentos : *aproxime-se-da-comida-se-estiver-por-perto*. Logo, o conhecimento avaliativo não é mais necessário. A habilidade inicial de aprender um comportamento é o que permite que este seja, eventualmente, codificado geneticamente.

5.3 Echo

O Echo é um modelo de sistema ecológico, formulado por [HOL 75/92]. O Echo modela a ecologia do mesmo modo que os Algoritmos Genéticos modelam as populações genéticas. Ele abstrai virtualmente todos os detalhes físicos dos sistemas ecológicos reais e concentra-se num pequeno número de iterações, baseadas nas primitivas agente-agente e agente-ambiente. A meta do Echo é estudar como simples

iterações sob agentes simples podem emergir em fenômenos de alto nível, tais como o fluxo de recursos no sistema, ou a cooperação e competição em redes de agentes (ex.: comunidades, redes comerciais, distinção de raças e espécies).

O Echo estende os A.G. em diversos e importantes modos: os recursos são modelados explicitamente no sistema, os indivíduos (agentes) possuem uma localização geográfica que afeta o seu *fitness* (implícito), certos tipos de iterações entre agentes são construídos sob o sistema (combate, permuta, acasalamento), e o *fitness* é endógeno.

O sistema consiste de uma população de agentes distribuídos num conjunto de setores do ambiente. Muitos agentes podem coabitar o mesmo setor, cada um deles apresentando uma determinada localização geográfica. Também distribuídos no ambiente, temos vários tipos diferentes de recursos renováveis (onde cada tipo de recurso é codificado por uma letra : a, b, c ...). Diferentes tipos de agentes usam diferentes tipos de recursos e podem guardar estes recursos (representados pelas letras) internamente.

Os agentes interagem por acasalamento, comércio ou luta. O comércio e a luta resultam na troca dos recursos internos entre os agentes, e o acasalamento resulta num descendente cujo genoma é a combinação de seus pais. Cada agente tem um conjunto particular de regras que determinam suas iterações com outros agentes (ex.: quais recursos estão disponíveis e podem ser trocados, as condições pelas quais deve-se iniciar uma luta). A aparência externa de um agente também pode ser codificada nestas regras, como um *string* visível para os outros agentes. Esta característica abre a possibilidade da geração e evolução de regras sociais e a potencialidade para o mimetismo, um fenômeno freqüentemente observado nos ecossistemas naturais. As regras de iterações utilizam *strings*, o que torna mais fácil a sua transformação para o genoma. Os agentes também podem reproduzir-se de forma assexuada, através de replicação.

Os genótipos de cada agente codificam os detalhes das regras pelas suas iterações (condições pelas quais a regra deve ser aplicada) e os tipos de recursos necessários. Como em outros modelos de vida artificial, o Echo não possui uma função de *fitness* guiando a seleção e a reprodução. Na verdade, um agente reproduz-se quando acumula recursos suficientes para fazer uma cópia exata de seu genoma. Como nos A.G. tradicionais, a replicação é submetida a uma baixa taxa de mutação, e o acasalamento implica na troca do seu material genético.

Nas primeiras simulações, o sistema Echo demonstrou comportamentos surpreendentemente complexos, o que incluía algo parecido coma uma diferença de duas espécies biológicas competitivas desenvolvendo, progressivamente, estratégias ofensivas e defensivas cada vez mais complexas; dependências ecológicas entre diferentes espécies, tais como o triângulo natural formiga-lagarto-mosca; e o desenvolvimento de uma sensibilidade para diferenciar diversos recursos renováveis, em função dos diferentes números de fenótipos.

Possíveis estudos futuros para o modelo Echo incluem: (1) estudo da evolução da aparência externa como mecanismos para comunicação social, (2) extensão do modelo para suportar a evolução de metazoários, ou seja, comunidades de agentes conectados que possuem características e/ou funções internas quando agrupados, e reproduzem-se unitariamente. Esta capacidade suporta o estudo da especialização de um agente individual e a evolução de indivíduos multi-celulares; (3) estudo da evolução dinâmica do *schemata* da população; (4) e, utilizando-se dos resultados de (3), formular uma generalização do teorema do *schema*, baseado no *fitness* endógeno.

5.4 Strategic Bugs

Neste modelo, desenvolvido por [BED 92], o mundo é composto por um ambiente bidimensional, contendo apenas agentes adaptativos (insetos) e alimento. O suprimento de alimento é renovável, ou seja, ele é reposto periodicamente e distribuído dinamicamente no ambiente. Os insetos (agentes) sobrevivem descobrindo e comendo os alimentos, armazenando-os num reservatório interno até ter energia suficiente para a reprodução.

Os agentes usam energia do seu reservatório interno para movimentar-se. Se o reservatório tornar-se vazio, o agente morre (por inanição). Os comportamentos de cada agente são controlados por uma tabela interna que mapeia os dados sensoriais da vizinhança local do agente num vetor que indica a direção e a distância que o agente deve executar como próximo movimento (ex. *se-mais-de-10-unidades-de-comida-estiverem-a-2-passos-ao-sul -> ande-dois-passos-para-o-sul)*. Esta tabela é o material genético do agente, e cada entrada representa um gene.

O agente pode reproduzir-se assexualmente, e neste caso, transferir seu material genético ao seu descendente com uma baixa taxa de mutação por gene; ou sexualmente, onde o acasalamento ocorre com um agente espacialmente adjacente, produzindo um descendente cujo material genético é a combinação de seus pais, possivelmente com um algum pequeno número de mutações.

O objetivo de Berdau e Packard era definir e medir o que eles denominavam o grau de Atividade Evolucionária no sistema, durante um certo intervalo de tempo, onde a Atividade Evolucionária é definida informalmente como “a taxa pela qual as inovações genéticas úteis são absorvidas pela população”. Bedau e Packard diziam que o “uso permanente de novos genes é o verdadeiro sinal da atividade evolucionária”, ou seja, a Atividade Evolucionária é definida para medir a taxa de tempo na qual novos e úteis genes são descobertos, e que acabam por persistir na evolução.

Para quantificar a Atividade Evolucionária, Bedau e Packard começaram mantendo estatísticas da utilização dos genes para cada novo gene que aparecia na população (cada gene era uma entrada na tabela de pares *entrada-ação*). A cada gene era atribuído um contador, inicializado em zero, que era incrementado a cada momento em que o gene era utilizado, ou seja, no momento em que a situação de entrada surgia e ação correspondente era utilizada. Quando um agente pai passava um gene para seu filho, por reprodução sexual ou não, o valor do contador era passado e permanecia com o gene. A única situação em que o gene era inicializado em zero era quando um novo gene era criado por mutação. Desta maneira, os contadores refletiam a utilização dos genes sob muitas gerações. Quando um agente morre, os genes e seus contadores são destruídos.

Berdau e Packard plotaram, para cada passo de tempo durante a evolução, histogramas dos números de genes na população, mostrando seus valores de uso. Estes histogramas mostraram, o que eles denominaram, “ondas de atividades” durante o período observado, demonstrando que conjuntos de genes eram continuamente descobertos e acabam por persistindo na população, ou seja, que a população achava e explorava inovações genéticas continuamente. Esta era, precisamente, a definição de Berdau e Packard para a evolução e, de acordo com eles, enquanto as ondas continuassem a ocorrer, pode-se dizer que a população está continuamente evoluindo.

Eles acabaram por definir um número apenas, a Atividade Evolucionária num dado tempo, A(t) que mede o grau no qual a população está adquirindo novos e úteis materiais genéticos num dado tempo t, ou seja, se está ou não ocorrendo ondas de atividades no tempo t e como são suas características. Se A(t) for positivo, a evolução

está ocorrendo em *t*. Considerando que a vida é um problema para a população e não para organismos individuais, Bedau e Packard propuseram A(*t*) como um teste para a vida no sistema. Se A(*t*) fosse positivo, o sistema está exibindo vida em *t*.

A importância deste modelo é a definição de uma quantidade macroscópica como a Atividade Evolucionária. A formulação de quantificadores macroscópicos da evolução e adaptação, assim como as descrições dos mecanismos microscópicos de onde estas quantidades macroscópicas emergem, é essencial se a Vida Artificial for utilizada como uma ciência exploratória e quiser contribuir significativamente para a biologia evolucionária real.

5.5 Learning Classifier Systems

Os Sistemas de Qualificação do Aprendizado (SQA) [HOL 86] tem sido utilizados como modelos de comportamentos baseados no paradigma do estímulo-resposta e em outros processos cognitivos complexos. Os sistemas de qualificação são baseados em três princípios: aprendizado, retorno intermitente do ambiente, e modelos hierárquicos internos que representam o ambiente. Estes sistemas têm sido utilizados para modelar uma grande gama de comportamentos inteligentes: comportamento humano em situações sociais e econômicas, sistemas de classificação e categorização, etc.

Assim como as Redes Neurais, os sistemas de qualificação constituem-se de máquinas paralelas e algoritmos de aprendizagem que ajustam a configuração destas máquinas durante todo o tempo. Apesar disto, estes sistemas são diferentes das Redes Neurais nos detalhes da máquina paralela, que são referenciadas como Sistemas de Performance Interna, e nos detalhes dos algoritmos de aprendizado. A máquina dos SQA é mais complexa que a maioria das Redes Neurais, trabalhando com quantidades denominadas “mensagens” e controlando seus estado com regras *if-then*, que especificam os modelos das mensagens.

Um Algoritmo Genético é utilizado para descobrir regras úteis, baseado no retorno intermitente do ambiente e num algoritmo de armazenamento de crédito interno, denominado *bucket-brigade*. Um SQA consiste de três camadas, sendo que o Sistema de Performance Interna forma a primeira camada. Como segunda camada, o algoritmo de aprendizagem *bucket-brigade* coordena a fixação dos valores do crédito interno entre os classificadores que estão competindo (de forma análoga a uma Rede Neural utilizando *back-propagation*). Como última camada, temos os operadores genéticos que criam novos classificadores.

Associado a cada classificador existe um parâmetro de Força. Esta medida reflete a utilidade de cada regra, baseada na experiência passada do sistema. O algoritmo de *bucket-brigade* é o mecanismo pelo qual este parâmetro é alterado. O algoritmo está baseado na metamorfose de uma economia, onde o ambiente atua como o produtor das matérias-primas e como o consumidor dos produtos finais e, cada classificador, atua como um intermediário na cadeia de produção. Usando o *bucket-brigade*, o SQA está apto a identificar e utilizar um subconjunto de regras que provaram-se úteis no passado.

No entanto, a base inicial de regras de um SQA não contém todos os classificadores necessários para uma boa performance. O Algoritmo Genético interpreta a Força de cada regra como uma medida de seu *fitness* e, periodicamente (após os valores das Forças terem sido estabilizados pelo *bucket-brigade*), remove as regras que não mostraram-se relevantes ou úteis no passado (Força com baixo valor), e gera novas

regras utilizando-se operadores de mutação, *crossover* e outros de propósitos especiais. Assim como nos A.G. tradicionais, estas adições e remoções são realizadas probabilisticamente. Considerando a definição de indução como todo o processo de inferência que expande o conhecimento na face da incerteza, o A.G. atua como um mecanismo indutivo nos SQA.

Uma motivação importante na formulação dos SQA foi o princípio pelo qual os sistemas indutivos necessitam a habilidade de construir modelos internos do ambiente. Os modelos internos devem habilitar o sistema a gerar predições, mesmo que o conhecimento do ambiente seja incompleto ou incorreto e, posteriormente, refinar seu modelo interno quando informações adicionais tornarem-se disponíveis.

Em [RIO 91] utiliza-se os SQA para modelar o aprendizado latente e o comportamento de olhar ao seu redor, distinguindo tipos diferentes de objetos, observados em ratos. Para tanto, Riolo desenvolveu um labirinto simples, similar aos observados em experimentos com ratos de verdade, com um ponto inicial e vários pontos finais. Em cada ponto final havia um caixa, com ou sem comida, e que poderiam ser ou não distinguíveis uma da outra (pela cor, formato, etc.). Para o experimento, seguiu-se o seguinte algoritmo: (1) antes da "comida estar" colocada nas caixas, os ratos (agentes) sem fome são colocados no labirinto para explorá-lo; (2) deixavam os agentes explorarem o ambiente por 24 horas; (3) os agentes eram, então, colocados em algum dos pontos finais do labirinto, habilitados a alimentarem-se de alguma caixa; (4) os agentes eram colocados no ponto inicial do labirinto e seu comportamento é observado.

Se as caixas fossem distinguíveis, os agentes escolhiam normalmente o caminho que levava a caixa onde estes alimentaram-se em 3. Riolo fez algumas observações sobre o experimento : (1) na fase de exploração, os agentes aprenderam a estrutura do labirinto sem um objetivo a ser alcançado; (2) eles aprenderam a usar um modelo interno para realizar uma busca exploratória que os permitiu predizer qual caixa está em cada parte do labirinto; (3) os agentes tornaram-se aptos a utilizar esta busca com o reconhecimento, onde eles associaram a "comida" com uma determinada caixa; (4) este tipo de inferência não pode ser gerada por sistemas reativos simples (estímulo-resposta). O experimento de Riolo é um dos principais demonstrações da necessidade de modelos internos para os SQA realizarem determinadas tarefas.

5.6 Sistemas Imunológicos

Os Sistemas Imunológicos (S.I.) são sistemas adaptativos onde o aprendizado é realizado por mecanismo evolucionários semelhantes a evolução biológica. O Sistema Imunológico real é capaz de reconhecer, virtualmente, qualquer célula ou molécula estrangeira. Para tanto, ele deve distinguir as células do próprio corpo, assim como as moléculas criadas por estas (cerca de 10^5 proteínas diferentes) de todas as outras células estrangeiras. Estima-se que o S.I. é capaz de reconhecer cerca de 10^{16} moléculas estrangeiras diferentes (obs.: o genoma humano tem cerca de 10^5 genes).

O modelo de A.G. proposto por [FOR 96] é baseado num universo onde os antígenos (partículas estrangeiras) e os anticorpos (células que realizam o reconhecimento) são representados por *strings* binárias. Mais precisamente, as *strings* binárias são utilizadas para representar os receptores nas células B e T, e os epitopes dos anticorpos. O reconhecimento nos S.I. naturais é realizado por ligações moleculares. A química complexa do reconhecimento dos antígenos é simplificada no sistema binário, e modela como uma simples comparação de *strings*.

O A.G. é utilizado para evoluir populações de *strings* que combinam-se bem com antígenos específicos. Para *strings* de tamanho variável, uma combinação perfeita é altamente improvável, logo um regra de combinações parciais é utilizada para descobrir o maior número de combinações perfeitas numa determinada população. Esta regra de combinação parcial reflete o fato de que o reconhecimento no sistema imunológico natural necessita um alto grau de confiabilidade, para evitar confusões entre suas próprias moléculas e as estrangeiras.

As populações são criadas randomicamente e, enquanto que os anticorpos evoluem junto com os antígenos, estes co-evoluem em separado (pois não dependem dos primeiros). Os antígenos são apresentados a população de anticorpos seqüencialmente e os anticorpos que tiverem maior afinidade tem seu *fitness* incrementado.

O sistema imunológico binário tem sido utilizado para estudar aspectos diferentes dos sistemas imunológicos reais: (1) a habilidade de detectar padrões (esquemas) no ambiente ruidoso formados pelos antígenos apresentados randomicamente; (2) a habilidade de descobrir e manter informações sobre as diversas populações de antígenos; (3) e a habilidade de aprender eficientemente, mesmo quando nem todos os anticorpos estão expressados e nem todos antígenos são apresentados.

6 Conclusões

A Vida Artificial, apesar de ser uma ciência recente, se compararmos com as ciências naturais, tem tido um grande avanço nos últimos anos. Dezenas de pesquisadores tem desenvolvido projetos envolvendo a definição, construção e análise de sistemas de Vida Artificial. Apesar disso, ainda não há uma definição clara sob a viabilidade e a validade de tais sistemas.

A distinção entre os modelos de Vida Artificial que realmente comportam-se como simulações de processos biológicos, com os simuladores que apenas utilizam e codificam algumas propriedades inerentes da vida biológica, é análoga ao campo de estudo das dinâmicas complexas. Neste último, a relação entre as propriedades matemáticas e o comportamento real e perceptível dos sistemas descritos não é direta. Para alguns autores, não é claro se os sistemas realmente simulam um caos determinístico ou se seu comportamento realiza instâncias de quase-periodicidade.

Ao observarmos os modelos propostos e as simulações realizadas em Vida Artificial, fica difícil distinguir entre apenas uma outra simulação sob fatos já conhecidos dos sistemas que podem nos mostrar características importantes e gerais. Estas características concentram-se não apenas nos modos de construção para a vida artificial, mas também na definição de quais e como os fenômenos naturais devem ser modelados. Para tanto, precisam ser desenvolvido critérios adequados e métodos para a avaliação e discussão dos sistemas de Vida Artificial. Analisando os sistemas e modelos já propostos, torna-se claro que as pesquisas vindouras em Vida Artificial devem guiar-se por pelo menos um dos critérios citados acima, explicitando ao máximo o que o sistema desenvolvido tem a nos ensinar.

Concentrando-se nos modelos propostos, pode-se perceber alguns problemas na utilização dos Algoritmos Genéticos para a construção da população. Apesar de ser, reconhecidamente, um dos métodos mais utilizados e, talvez, o mais adequado, para o desenvolvimento de sistemas de Vida Artificial, a forma como estes são construídos pode trazer alguns problemas de difícil percepção e solução. O principal aspecto aqui refere-se a forma de representação dos indivíduos. Para qualquer problema dado, a escolha de quais características devem ser apresentadas no genótipo e a forma como estas serão representadas têm uma importância crucial na performance dos A.G. (ou em qualquer outro sistema de aprendizado).

A escolha das primitivas do sistema (no caso dos A.G., as características incluídas no sistema) é uma decisão de desenvolvimento que não pode ser automatizada. Ela depende da forma como o ambiente foi modelado, das características individuais codificadas no gene de cada membro da população e do tipo de ações que estes devem executar. Usualmente, os A.G. utilizam primitivas de baixo nível, tais como *strings* de bits, que possuem uma representação fácil de ser manipulada, mas com pouca expressividade. Por esta razão, o problema da representação é especificamente importante ao utilizarmos os A.G., tanto na construção de sistemas de Vida Artificial como na modelagem de sistemas vivos reais.

Em contrapartida, podemos perceber algumas inovações propostas para a codificação dos indivíduos. Em alguns sistemas evolutivos, a população é modelada utilizando expressões-S (pequenos programas escritos num subconjunto da linguagem Lisp). Outras formas de representação incluem a codificação dos indivíduos por *strings*, onde estas podem ser manipuladas, combinadas e concatenadas, formando *strings* mais longas e complexas; e a utilização de números reais no lugar de números binários. Esta última proposta é defendida principalmente por pesquisadores que utilizam algoritmos

evolutivos na resolução de problemas do mundo real (tipicamente problemas de engenharia).

Outro aspecto importante ao considerarmos os A.G. é a utilização da função de aptidão (*fitness*). O *fitness* explícito é o aspecto mais biológicamente irreal dos algoritmos genéticos. A maioria dos sistemas analisados neste trabalho utiliza uma função de aptidão externa e estática, aproximando-se de avaliadores co-evolucionários e endógenos. Ou seja, o grau de aptidão de um indivíduo é dado pelo quão bem suas características conseguem desenvolver-se, garantindo a sua sobrevivência. Apesar de ser relativamente fácil de implementar-se estratégias de *fitness* endógenos e co-evolucionários, não há nenhuma teoria que descreva o comportamento dos A.G. sob tais circunstâncias, pois não há provas matemáticas da convergência ou da eficiência dos A.G. utilizando tais parâmetros.

Ao analisarmos os modelos propostos, podemos perceber que a assertiva de que a vida é completamente independente de mídia não é absolutamente correta. Cada instância de uma vida artificial só pode ser percebida em conjunto com a sua mídia, ou seja, o *software* e o *hardware* envolvidos na sua criação e manutenção. A vida artificial não é completamente independente de mídia, mas mostra uma interdependência entre a sua forma e a matéria, demonstrada nos inúmeros simuladores construídos executando em diferentes tipos de máquinas. Considerando esta afirmação, podemos concluir que a vida pode existir em outra mídia, além da vida biológica baseada em cadeias de carbono. A forma como ela irá surgir é que acaba por distinguir os dois tipos de vida.

Relembrando a forma como a ciência da Vida Artificial foi construída e a posição consolidada em que se encontra agora, podemos perceber três grandes caminhos de pesquisa que dominarão o cenário mundial:

- Simulação do desenvolvimento e dos fenômenos envolvidos na evolução da vida biológica na Terra: esta linha de pesquisa deve concentrar-se no estudo da formação da vida baseada em cadeias de carbono, sua evolução e desenvolvimento, gerando hipóteses e parâmetros que possam ser simulados e avaliados em programas de computador;
- Simulação da Vida como ela poderia ser: para tanto deve-se construir ambientes e realidades diferentes das encontradas no planeta Terra fornecendo-lhes, porém, um conjunto de limites e parâmetros que estejam de acordo com as leis naturais universais;
- Generalização do conceito da vida: ao analisar os resultados dos primeiros grupos, deve-se procurar novos conceitos e modelos de fenômenos emergentes que pertençam a um conjunto de sistemas complexos mais gerais, onde os sistemas biológicos conhecidos hoje (baseados em cadeia de carbono) mostram-se apenas como um subconjunto.

Além destas três linhas de pesquisa mais gerais, a Vida Artificial pode, eventualmente, inspirar tentativas de criar uma vida artificialmente em outro tipo de mídia, no caso, em tubos de ensaio de laboratórios. Tal panorama inclui uma abordagem de experimentos em biologia molecular e pesquisa protobiológica que fogem do escopo deste trabalho.

Deve-se ter muito cuidado ao analisarmos as potencialidades e os reais benefícios da Vida Artificial. Idéias científicas revolucionárias, tais como a evolução em sistemas computadorizados, acabam por mudar os valores culturais e a visão do mundo pela sociedade. Novas tecnologias são quase sempre recobertas por retóricas utópicas. Qualquer tecnologia que é apregoada como uma libertação, deve ser analisada

cuidadosamente. Historicamente, tais tecnologias têm se mostrado muito mais opressivas que libertadoras.

Além disso, devemos considerar que a evolução é um processo extremamente egoísta. Cada espécie evolui, realizando suas tarefas, aprendendo com o mundo e utilizando este em seu único benefício, pensando apenas na sua sobrevivência, sem nenhuma consideração pelo suposto bem estar de outros grupos genéticos. Considerando estes fatos, a evolução livre e descontrolada de entidades artificiais autônomas pode se tornar potencialmente perigosa para as formas de vida orgânica. No presente, os organismos digitais habitam e evoluem apenas em computadores, em ambientes virtuais especialmente construídos para tal. Fora dessa mídia, eles transformam-se apenas em dados desconexos. É importante salientar que a evolução não é um processo completamente conhecido até hoje e seus resultados costumam ser imprevisíveis. O avanço da Vida Artificial fatalmente deverá levar em conta os aspectos éticos, filosóficos e científicos da criação da vida, para que possa contribuir de forma coesa e segura para o desenvolvimento do saber humano.

BIBLIOGRAFIA

[ACK 92] ACKLEY, D.H.; LITTMAN, M.L. Interactions between learning and evolution. *Artificial Life II*, 1992, Addison-Weley, p. 487-507.

[BAL 1896] BALDWIN, J. A new factor in evolution. In: *The American NaturalistI*, p. 441-451.

[BED 92] BEDAU, M.A.; PACKARD, N.H., Measurement of evolutionary activity, teleology, and life. *Artificial Life II*,1992, Addison-Weley., p. 431-461.

[BRO 91] BROOKS, R. A.. Intelligence Without Reason. In: *Computers and Thought*, Proceedings of IJCAI-91, 1991

[COH 92] COHEN, J., *Como Construir um ExtraTerrestre Verossímil*, Super Interessante, Editora Abril, 1992, ano 6, n° 4, p. 72-77.

[DAR 1859] DARWIN, C., *The Orign of Species*, John Murray, London, 1859.

[DAV 91] DAVIS, L.D., *Handbook fo Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold. 1991.

[DEM 95] DEMAZAU,Y. From interactions to collective behaviour agent-based systems. In: *Proc. of the 1st European Conference on Cognitive Science*, St. Malo, France, 1995.

[DIE 90] DIEGUEZ, F., *A Evolução em Delírio*, Super Interessante, Editora Abril, 1990, ano 4, n°11, p. 60-65.

[FOR 96] FORREST, S.; JAVORNIK, B.; SMITH, R; PERELSON, A. Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immunse system. *Evolutionary Computation*, 1996.

[HAR 89] HARTL, D.L.; CLARK, A.G. *Principles of Population Genetics*. Sinauer Associates, Inc., 1989,Sunderland, Massachusetts.

[HOL 75/92] HOLLAND, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, 1992, Cambridge.

[HOL 86] HOLLAND, J.H.; HOLYOAK, K. J.; NISBETT, R.E.; THAGARD, P. *Induction: Process of Inference, Learning and Discovery*. MIT Press, 1986.

[HOL 80] HOLAND, A.B. *Dicionário da Língua Portuguesa*, Editora Nova Fronteira, 1980, Rio de Janeiro.

[KAU 90] KAUFFMAN, S.A., Requirements for evolvability in complex systems: Orderly dynamics and frozen components. In: *Physica D*, 1990, vol. 42, p. 135-152.

[KIM 68] KIMURA, M.; Evolutionary rate at the molecular level, In: *Nature*, 1968, nº 217, p. 624-626.

[LAN 84] LANGTON, C.G., Self-reproduction in cellular automata. In: *Physica D*, 1984, vol. 10, p.135-144.

[LAN 89] LANGTON, C.G., Artificial Life, In: *Artificial Life*, Addison-Wesley, 1989, p. 1-47.

[LEV 92] LEVY, S., *Artificial Life: The Quest for a New Creation*. Random House. 1992.

[MIT 89] MITCHELL, M.; FORREST, S. Genetic Algorithms and Artificial Life, Santa Fe Institute Working Paper 93-11-072. Artificial Life, 1989.

[OLI 90] OLIVEIRA, L.H. Os Verdadeiros Segredos do Sexo, In: *Super Interessante*, Editora Abril, 1990, ano 4, n° 3, p. 26-32.

[PER 96] PERRIER, J.Y; SIPPER, M.; ZAHND, J. Toward a viable, self-reproducing universal computer. *Physica D*, 1996, vol. 97, p. 335-352.

[PAT 89] PATEE, H. Simulations, Realizations, and Theories of Life, In: *Artificial Life*, Addison-Weesley, 1989, p. 63-77.

[PFE 96] PFEIFER, R. Building "Fungus Eaters": Design Principles of Autonomous Agentes, In: *From Animals to Animats IV – Proc. SAB '96*, 1996, p.3-12.

[RAY 92] RAY, T.S. An approach to the synthesis of life. In: *Artificial Life II*, Addison-Wewley, Redwood City, CA., vol. X do SFI Studies in the Sciences of Complexity, 1992, p. 371-408.

[REY 87] REYNOLDS, C. W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behaviorial Model. In: *SIGGRAPH '87*, 1987, p. 25-34.

[RIO 91] RIOLO, R. Modeling simple human category learning with a classifer system, In: *Proceedigns of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, 1991, San Mateo, CA, p. 324-333.

[ROC 97] ROCHA, L.M. *Evolutionary Systems and Artificial Life – Lecture Notes*, Departament of Systems Science, State University of New York at Binghamton, 1997.

[RUC 93] RUCKER, R.v.B. *Artificial Life lab*, Waite Group Press. Corte Madera, CA, 1993.

[SIM 69] SIMON, H.A. *The Sciences of The Artificial*, M.I.T Press, Cambridge, 1969.

[SIP 97] SIPPER, M. If the Mileu is Reasonable: Lessons from Nature on Creating Life. In: *Journal of Transfigural Mathematics*, 1997, vol. 3, n° 1.

[SPA 91] SPAFFORD, E. H. Computer Viruses – A form of Artificial Life ?, In: *Artificial Life II, SFI Studies in the Sciences of Complexity*, 1991, vol XII, Addison-Wesley.

[STE 94] STEELS, L. The Artificial life roots of artificial intelligence. In: *Artificial Life Journal*, The Mit Press, Cambridge, 1994, vol. 1, n° 1, p. 75-110.

[TEM 95] TEMPESTI, G., A new self-reproducing cellular automaton capable of construction and computation. In F. Morán, A. Moreno, J.J. Merelo, and P. Chacón (eds), *ECAL'95: Third European Conference on Artificial Life*, vol. 929 of *Lecture Notes in Computer Science*, 1995, Springer-Verlag, Heidelberg, p. 555-563.

[NEU 66] NEUMANN, J. von., *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Illinois. Edited and completed by A W. Burks, 1966.

[WEI 86] WEINER, J. *Planeta Terra*, Livraria Martins Fontes Editora Ltda, São Paulo, 1986.

[WRI 32] WRIGHT, S. The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution. In: *Proceedings of the Sixth International Congress of Genetics*, 1932, vol. 1, p. 356-366.