

Vida Artificial – Parte 1

1	Introdução	2
2	Origem e desenvolvimento da vida artificial	6
3	Vida natural	11
4	Reduccionismo	14
5	Holismo	16
6	Reduccionismo × Holismo	18
7	Autopoiese	19
8	Organização e Estrutura de um Sistema	22
8.1	Modelo POE	23
9	O “modo de vida” artificial.....	23
10	As muitas vidas da vida artificial	26
11	Sistemas complexos	27
11.1	Sistemas complexos organizados	32
12	Auto-organização.....	33
13	Homeostase	35
14	Computação emergente.....	37
15	Autômatos celulares	38
16	Aprendizado e evolução.....	40
16.1	O efeito Baldwin	40
16.2	Aspectos conceituais do efeito Baldwin	42
16.3	O efeito Baldwin verificado na prática – Exemplo 1.....	43
16.4	O efeito Baldwin verificado na prática – Exemplo 2.....	47
17	Referências bibliográficas	51

1 Introdução

- A vida artificial envolve o estudo da vida e/ou de comportamentos de seres vivos a partir de processamento de informação e modelagem computacional.
- O que se busca é uma explicação para fenômenos associados à vida-como-ela-é, desde a origem de metabolismos bioquímicos até a co-evolução de estratégias de comportamento, e também para fenômenos associados à vida-como-ela-pode-ser.
- Trata-se, portanto, de uma área de atuação científica vinculada à biologia matemática e a biocomputação, embora com muitas outras características multidisciplinares. Destacam-se a etologia e a teoria evolutiva.
- Etologia: estudo dos hábitos dos animais e da sua acomodação às condições do ambiente (seus criadores, von Frisch, Lorenz & Tinbergen, ganharam o Prêmio Nobel de 1973).

- Outras áreas envolvidas são: inteligência artificial, psicologia, física, bioquímica, imunologia, economia, filosofia e antropologia.
- O termo Vida Artificial (*Artificial Life* ou *A-Life*) é inclusive considerado inadequado por alguns pesquisadores da área, por indicar o objetivo de produzir artificialmente formas de vida. Embora este seja o propósito de parte dos pesquisadores, muitos questionam até a sua possibilidade prática. Termos menos polêmicos ou provocativos têm sido sugeridos. Exemplo: *animats* (robôs reais ou virtuais que reproduzem comportamento animal) (MEYER & WILSON, 1991).
- No entanto, as seguintes questões continuam levantando controvérsias:
 - ✓ A manifestação de vida requer um corpo material?
 - ✓ É possível estabelecer uma gradação para a existência de vida?
- Por exemplo, os proponentes da *autopoiesis* (teoria que associa a vida com uma entidade autônoma capaz de se auto-reproduzir) responderiam sim para a primeira e não para a segunda pergunta (MATURANA & VARELA, 1980).

- Outros responderiam sim à primeira questão, mas por outras razões (HARNAD, 1994).
- Mas estas questões filosóficas não precisam ser respondidas a contento para permitir que a pesquisa em Vida Artificial progrida, justamente porque não é objetivo de boa parte dos pesquisadores propor diretamente mecanismos artificiais de geração de vida.
- A característica central da Vida Artificial continua sendo a auto-organização verificada em sistemas vivos que interagem com um ambiente externo.
- Já que o sistema vivo está imerso em um ambiente, uma questão fundamental diz respeito a como se dá a interação da auto-organização com a seleção natural. KAUFFMAN (1992) defende a hipótese de que a auto-organização gera as formas de organização fundamentais e a seleção natural, por sua vez, trabalha sobre a maior ou menor adequação de cada forma de organização.

- Para uma visão mais detalhada desta perspectiva, sugere-se assistir à palestra de Charles Ofria, presidente da International Society for Artificial Life, intitulada “Artificial Life, Open-Ended Evolution, and the Origins of Biological Complexity” (<https://www.youtube.com/watch?v=qkHVIkOhABo>).
- Por exemplo, Charles Ofria associa vida e evolução com processos abertos (*open-ended*), pelas seguintes motivações:
 - Novas estratégias de sobrevivência aparecem regularmente;
 - A evolução promove aumento ilimitado na complexidade dos processos;
 - Observa-se uma construção contínua de novos nichos (soluções coletivas para a sobrevivência);
 - Acredita-se que possam ocorrer transições evolutivas abruptas (por exemplo, de organismos unicelulares para pluricelulares e de organizações coletivas simples para sociedades complexas).

2 Origem e desenvolvimento da vida artificial

- Os pioneiros em pesquisa com vida artificial são os mesmos responsáveis pelos primeiros passos da inteligência artificial: Alan Turing e John von Neumann.
- 1950 (von Neumann): autômatos celulares; estudo dos fenômenos de auto-organização e reprodução.
- 1952 (Turing): estudo de morfogenia (desenvolvimento de formas biológicas). Os resultados deste trabalho continuam sendo explorados até hoje.
- No entanto, as idéias destes dois grandes nomes da área de computação só puderam ser melhor exploradas com o advento de grande quantidade de recursos computacionais, ou seja, com o aperfeiçoamento técnico da máquina que eles próprios ajudaram a conceber (o computador digital).
- Só como um exemplo da influência exercida por esses dois proeminentes pesquisadores, basta mencionar que John Holland, o autor dos algoritmos genéticos, foi aluno de Arthur Burks, colega de von Neumann.

- Em suas investigações envolvendo autômatos celulares, von Neumann já havia proposto que erros de cópia (mecanismo equivalente à mutação) poderiam implicar evolução. E estas proposições tiveram lugar antes da descoberta do DNA e do código genético.
- Após os primeiros desenvolvimentos, os processos de vida artificial foram parcialmente “esquecidos”, porque o foco de atenção dos pesquisadores de áreas afins se voltou para a pesquisa em inteligência artificial.
- Foi somente no início dos anos 80 que os processos de vida artificial voltaram a ser explorados de modo significativo. A área ganhou evidência após a iniciativa de Christopher Langton em organizar o primeiro Workshop em Vida Artificial, em Los Alamos, no ano de 1987. Neste evento, Langton cunhou o termo “vida artificial” (do inglês *artificial life*).
- O principal periódico envolvido com o tema de Vida Artificial é editado pela MIT Press (*Artificial Life*), mas há outros, como da Springer (*Artificial Life and*

Robotics) e da IGI Global (*International Journal of Artificial Life Research*). Periódicos de áreas afins são também referência para vida artificial, como *Swarm Intelligence* da Springer e *Swarm and Evolutionary Computation* da Elsevier.

- Como publicações introdutórias e abrangentes, tem-se: LANGTON (1989), BODEN (1996a), EMMECHE (1994) e LEVY (1992).
- Para Langton, a trilogia informação, comunicação e interpretação é considerada fundamental para processos de vida natural e/ou artificial.
- Houve até quem definisse a vida como sendo “matéria com significado” (PATTEE, 1995).
- Uma preocupação ao se trabalhar com processos de vida artificial é conseguir uma forma de medir numericamente o grau de ordem e desordem em um sistema e, assim, conseguir uma medida do “grau de vida” de alguns tipos de sistema.
- Através de muitos experimentos com autômatos celulares, Langton determinou um grau de desordem que é o limiar para a vida. Acima deste valor, o sistema é

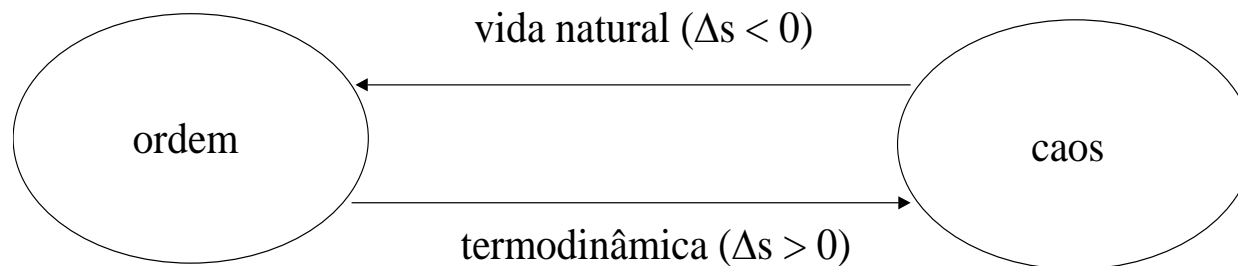
potencialmente vivo. Abaixo deste valor, o sistema é homogêneo, rigidamente periódico ou caótico.

- Outro conceito muito explorado por Langton é o da autonomia. Este conceito foi muito bem definido por BODEN (1996b), que distinguiu três tipos de autonomia:
 1. Sistemas reativos, em que a saída é determinada somente pelo estado atual do sistema;
 2. Sistemas em que o mecanismo de controle foi automaticamente gerado, embora outros níveis hierárquicos de decisão fiquem a cargo do projetista;
 3. Sistemas em que tanto o mecanismo de controle quanto o de decisão, ou seja, todos os níveis hierárquicos de decisão, evoluem de forma automática respondendo a estímulos do ambiente.
- Qualquer que seja a manifestação de vida, a pesquisa em Vida Artificial busca mecanismos de simulação com maior ou menor grau de abstração ou idealização.

- Em Vida Artificial, praticamente não existem metodologias explícitas para representação de conhecimento e planejamento para efeito de tomada de decisão (BROOKS, 1991).
- Uma comparação simples entre a Vida Artificial e a Inteligência Artificial dos anos 70 pode ser resumida nos seguintes contrastes:
 - Abordagem: bottom-up × top-down
 - Controle: local × global
 - Regras: simples × complexas
 - Comportamento: emergente × pré-programado
- Mas, em essência, Vida Artificial e Inteligência Artificial estão filosoficamente muito próximas (<https://web.stanford.edu/group/SHR/4-2/text/helmreich.html>), particularmente para aqueles que aceitam que “*cognition is inseparable from life processes and that the path to AI might be found by modeling -- on computers and in robots -- the evolutionary and vital dynamics that support mental life.*”

3 Vida natural

- Não existe uma definição universalmente reconhecida de vida. Porém, há um consenso de que a vida é um conjunto de atributos tais como: auto-organização, emergência, autonomia, desenvolvimento, crescimento, reprodução, auto-regeneração, evolução, adaptação e metabolismo.
- A presença de alguns destes atributos (não todos) já é tido como suficiente para se implementar processos de vida.
- Alguns cientistas acreditam que o conceito de vida pode variar dependendo do contexto, não aceitando, portanto, uma definição única e fechada. A figura a seguir indica que a vida corresponde a um processo de redução de entropia.



Nota: Caos aqui não se refere ao comportamento apresentado por alguns sistemas dinâmicos não-lineares determinísticos e sim à ausência de ordem.

- As manifestações de alto nível apresentadas por organismos vivos são muito variadas. Elas incluem:
 - Mecanismos universais da vida: autonomia e evolução;
 - Estilos de vida distintos: parasitismo (fitofítico, zoofítico ou zoótico) e simbiose;
 - Comportamentos funcionais específicos: formação de colônias (recifes de corais), estratégias de caça e de fuga;
 - Mecanismos de expansão: diferenciação celular;
 - Morfologia corpórea: padrões de ramificação em plantas, anatomia dos órgãos sensoriais nos animais;
 - Coerência mesmo na presença de fluxo de matéria, energia e informação.

- Algumas definições mais formais para a vida:
 - “A self-sustaining chemical system capable of undergoing Darwinian evolution.” Gerald Joyce
 - “A self-organized non-equilibrium system such that its processes are governed by a program that is stored symbolically and it can reproduce itself, including the program.” Lee Smolin
 - “Life is a system that dynamically preserves pattern.” David H. Ackley (<https://www.youtube.com/watch?v=YJRRu4dJnTI&t=544s>)



GJ



LS



DA

4 Reduccionismo

- O pai do reduccionismo é René Descartes.
- Definição do Aurélio: Ato ou prática de analisar ou descrever um fenômeno, desenvolver a solução de um problema, etc., supondo ou procurando mostrar que certos elementos ou conceitos complexos não devem ser compreendidos ou explicados em si mesmos, mas referidos a, ou substituídos por outros, situados em um nível de explicação ou descrição considerado mais básico.
- É importante buscar uma definição mais abrangente para este termo, principalmente em virtude de seu uso ser abusivo e inadequado em muitos casos.
- É conveniente dividir a definição em três partes:
 1. Reduccionismo ontológico: o todo pode ser descrito pelos seus elementos constituintes, ou seja, a parte existe isolada do todo. Consequências: (1) devem existir substâncias irreduzíveis, de modo que todas as outras substâncias possam ser reduzidas a elas; (2) organismos vivos são nada mais, nada menos, que máquinas de funcionamento complexo. Por exemplo, os mecanicistas defendem

que os fenômenos biológicos podem ser explicados pelas propriedades de seus elementos inorgânicos.

2. Reduccionismo metodológico: é a crença de que, em ciência, é sempre possível particionar o todo em elementos menores constituintes. No entanto, este desejo por particionar é relativo: um sociólogo reducionista (adepto do individualismo como doutrina) tentaria explicar fenômenos sociais a partir de sentimentos e comportamentos de indivíduos, mas jamais tentaria explicá-los a partir das moléculas que compõem cada indivíduo. Assim, a melhor estratégia científica é particionar as coisas que precisam ser explicadas em entidades mais simples, enquanto o custo-benefício da redução se mostrar compensador. Esta estratégia é, sem dúvida, responsável por alguns dos maiores sucessos da ciência. O maior triunfo do reduccionismo metodológico foi a demonstração de que a unidade de hereditariedade, o gene, é uma macromolécula. No entanto, nem mesmo os reducionistas defenderiam a teoria de que um ser humano é uma marionete manipulada por uma dupla-hélice.

3. Reduccionismo teórico: é a crença de que existe uma super-teoria, para a qual convergiriam todas as teorias já propostas: unidade da ciência.

5 Holismo

- Definição: qualquer ponto de vista segundo o qual as propriedades dos elementos constituintes de um todo são determinadas pelas relações que eles sustentam com outros elementos. Neste caso, um elemento em um sistema holístico não pode existir isolado do todo.
- Exemplo: o significado de uma palavra em um texto depende de seu relacionamento com outras palavras do texto.
- O holismo tem se difundido muito neste século em biologia e ciências sociais, e também no estudo da mente e da linguagem.
- É muito fácil fazer com que o holismo aparente ser óbvio: qualquer coleção de elementos exibe propriedades que não estão presentes nos elementos individuais. Exemplo: Objetos de 1 dimensão podem ser juntados para compor um objeto de duas dimensões.
- O todo é mais do que a soma de suas partes (exemplo do brinquedo de armar).



“*The Art of the Brick*” foi lançada em abril de 2007, pelo artista plástico norte-americano Nathan Sawaya.

6 Reduccionismo × Holismo

- O paradoxo de sorites, atribuído a Ebulides de Mileto, filósofo grego, se refere a quando se deixa de ter um monte de areia ao se retirar um grão de cada vez de um monte de areia. Tentar explicar uma escultura de areia a partir dos grãos que a compõem não parece fazer algum sentido prático. Por outro lado, é possível descrever um carro a partir das peças que o compõem.
- Há vários cenários análogos, como aquele de imagens descritas por pixels (visão holística) e imagens descritas por *metafiles* (visão reducionista).
- Embora o reduccionismo seja dominante na ciência e, se assim ocorre, é porque se mostra efetivo na aquisição de conhecimento, os resultados da mecânica quântica, por exemplo, impõem sérias dificuldades para a aplicação de uma perspectiva reducionista no estudo da física da matéria.
- A biologia sistêmica (*Systems Biology*) é uma área de pesquisa que privilegia aspectos holísticos no estudo de sistemas vivos.

7 Autopoiese

- Autopoiese ou autopoiesis (do grego auto “próprio”, poiesis “criação”) é um termo cunhado nos anos 70 pelos biólogos e filósofos chilenos Francisco Varela e Humberto Maturana (MATURANA & VARELA, 1980) para designar a capacidade dos seres vivos de produzirem a si próprios.
- Segundo esta teoria, um ser vivo é um sistema autopoietico, caracterizado como uma rede fechada de produções moleculares (processos), onde as moléculas produzidas geram com suas interações a mesma rede de moléculas que as produziu.
- A conservação da autopoiese e da adaptação de um ser vivo ao seu meio são condições sistêmicas para a vida. Portanto, um sistema vivo, por ser um sistema autônomo, está constantemente se autoproduzindo, autorregulando, e sempre mantendo interações com o meio, onde este apenas desencadeia no ser vivo mudanças determinadas por sua própria estrutura, e não por um agente externo.

- De origem biológica, o termo passou a ser usado em outras áreas por Steven Rose na neurobiologia, por Niklas Luhmann na sociologia, e por Gilles Deleuze e Antonio Negri na filosofia.
- As pesquisas sobre autopoiese apontaram uma definição de vida como sendo a autonomia e a constância de uma determinada organização, ou das relações em um dado sistema entre os elementos constitutivos desse mesmo sistema. Essa organização é auto-referencial, no sentido de que a sua ordem interna é gerada a partir da interação dos seus próprios elementos, e auto-reprodutiva, no sentido de que tais elementos são produzidos a partir dessa mesma rede de interação circular e recursiva.
- Tanto a criação da teoria autopoietica como a sua aplicação aos sistemas sociais representou uma revolução epistemológica. Essa proposta de mutação no foco epistemológico propiciou uma melhor observação do meio e suas características. Anteriormente, o processo de observação científica de um dado objeto

pressupunha a análise estrutural de todos os seus elementos constitutivos isoladamente. Conhecer algo significava poder determinar quais são as partes que determinam o todo desse objeto. Não se avaliava as relações entre os elementos mas apenas sua condição/colocação no todo.

- A proposta da teoria autopoietica, diferentemente da postura analítica, parte da observação de determinado objeto pela interação de seus elementos, possibilitando, assim, a construção de um arcabouço científico embasado nas relações entre os elementos e as funções exercidas no todo comunicativo dos sistemas.
- CAPRA (1984) compara o pensamento cartesiano, reducionista, modelo para o método científico desenvolvido nos últimos séculos, e o paradigma emergente do século XX, holista ou sistêmico (que vê o todo como indissociável, de modo que o estudo das partes não permite conhecer o funcionamento do organismo), em vários campos da cultura ocidental atual, como a medicina, a biologia e a economia.

8 Organização e Estrutura de um Sistema

- Organização: o atributo definitivo de uma entidade sistêmica é o conjunto de inter-relações de seus componentes, com o propósito de:
 - definir a forma do sistema a cada instante;
 - servir como a identidade básica que é mantida mesmo sob a influência de variações dinâmicas ao longo do tempo.
- A organização de um sistema não especifica as propriedades de seus elementos, mas apenas as relações que eles devem manter entre si para que o sistema preserve sua individualidade. Assim, uma organização é independente das propriedades de seus elementos.
- A estrutura é uma realização (instância) particular de uma organização.
- Um sistema pode mudar sua estrutura sem perder sua individualidade, desde que ele mantenha sua organização.

- Exemplo de organização hierárquica aninhada: sistema social humano → ser humano → órgão → célula → processos moleculares → processos atômicos ...

8.1 Modelo POE

- Filogenia: história evolutiva das espécies.
- Ontogenia: desenvolvimento orgânico do indivíduo desde a fecundação até a maturidade para a reprodução.
- Epigenia: ocorrência de mudanças ou adaptações durante a história de um indivíduo, influenciando o fenótipo sem alterar o genótipo (aprendizado em tempo de vida).

9 O “modo de vida” artificial

- A síntese (abordagem *bottom-up*) tem se mostrado mais apropriada para o estudo de sistemas complexos em geral, e sistemas vivos em particular.

- Capturar a essência dos processos de vida natural via simulação (emergência de comportamentos complexos) tem sido mais eficiente do que a execução de uma análise *top-down*, que começa pelas manifestações de vida e tenta extrair daí os seus princípios fundamentais.
- Problema: as abordagens puramente *top-down* geralmente têm dificuldade de obedecer a restrições de baixo nível, enquanto que as abordagens puramente *bottom-up* geralmente têm dificuldade de obedecer a restrições de alto nível.
- $\langle \text{A-vida-como-nós-a-conhecemos} \rangle \times \langle \text{A-vida-como-ela-pode-ser} \rangle$
- Desvantagens da abordagem sintética:
 1. Dificuldade de interpretar os modelos utilizados;
 2. Espaços de exploração de dimensão elevada;
 3. Ausência de restrições, abrindo espaço para $\langle \text{a-vida-como-ela-pode-ser} \rangle$.

- Mais que um campo de atuação científica, os processos de vida artificial representam um modo de praticar ciência (atividades didáticas e de laboratório).
- *A que extensão um modelo explica um fenômeno que ele é capaz de reproduzir?*
- Este definitivamente não tem sido o foco de atenção dos processos de investigação científica (PUTNAM, 1973).
- *Weak Alife*: possibilidade de utilizar computadores para simular vida;
- *Strong Alife*: possibilidade de que os programadores possam ir além de uma mera modelagem e efetivamente criarem “coisas” vivas. Em sua versão robótica, seria possível desenvolver um projeto de engenharia que utilizasse um computador para gerar um organismo vivo genuíno a partir de matéria inanimada. Por outro lado, em sua versão virtual, é possível gerar um organismo vivo genuíno simplesmente pela programação adequada de um computador.

10 As muitas vidas da vida artificial

- **Biologia × Vida Artificial:** mesmo objeto de estudo, mas metodologias distintas.
- **Vida Artificial ↔ Biologia Sintética**
- Os biólogos apresentam um ponto de vista a respeito de vida artificial que é muito diferente daquele defendido pelos cientistas da computação.
- Distinção análoga pode ser feita entre a visão destes dois grupos e aquela apresentada pelos engenheiros. O mesmo vale para os artistas.
- Pelo menos a distância entre biologia e engenharia está encurtando muito nos últimos anos, já que uma parcela crescente de biólogos tem se ocupado com o desenvolvimento de mundos artificiais para validar suas teorias, enquanto engenheiros têm se voltado à natureza, buscando inspiração para a construção de novos sistemas e novas soluções.
- Exemplo: Auto-organização de atividades coletivas no espaço e no tempo → formigueiro + fontes de alimento + formigas + feromônio

- Interpretações distintas deste processo: explicação de um fenômeno biológico, qualidade estética, ferramenta viável para a solução de problemas.

11 Sistemas complexos

- Todo processo de vida é um sistema complexo.
- Sistema complexo: rede de objetos (agentes, elementos ou processos) que exibem um comportamento dinâmico agregado. A ação de um objeto afeta possivelmente as ações subsequentes de outros objetos na rede, de modo que a ação do todo é mais do que a simples soma das ações de suas partes.
- Conseqüentemente, um sistema é complexo se ele não for redutível a poucos graus de liberdade ou a uma descrição estatística.
- Exceção: sistema caótico → sistema complexo passível de descrição determinística e com poucos graus de liberdade.
- A vida é um processo complexo organizado, em contraposição a processos simples organizados e processos complexos desorganizados (WEAVER, 1968).

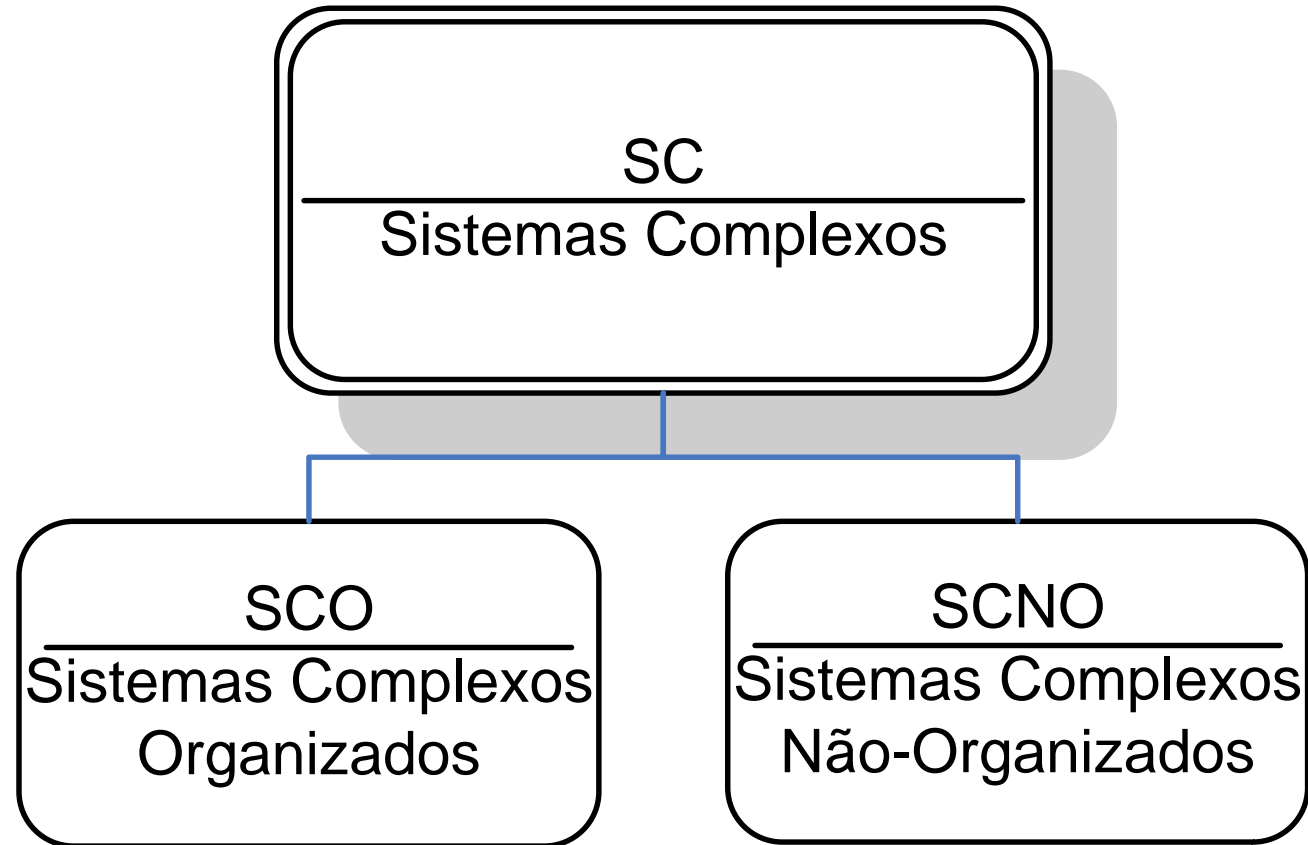


Figura 1 – Divisão circunstancial dos sistemas complexos (SC) em organizados (SCO) e não-organizados (SCNO). Baseado em VARGAS (2006).

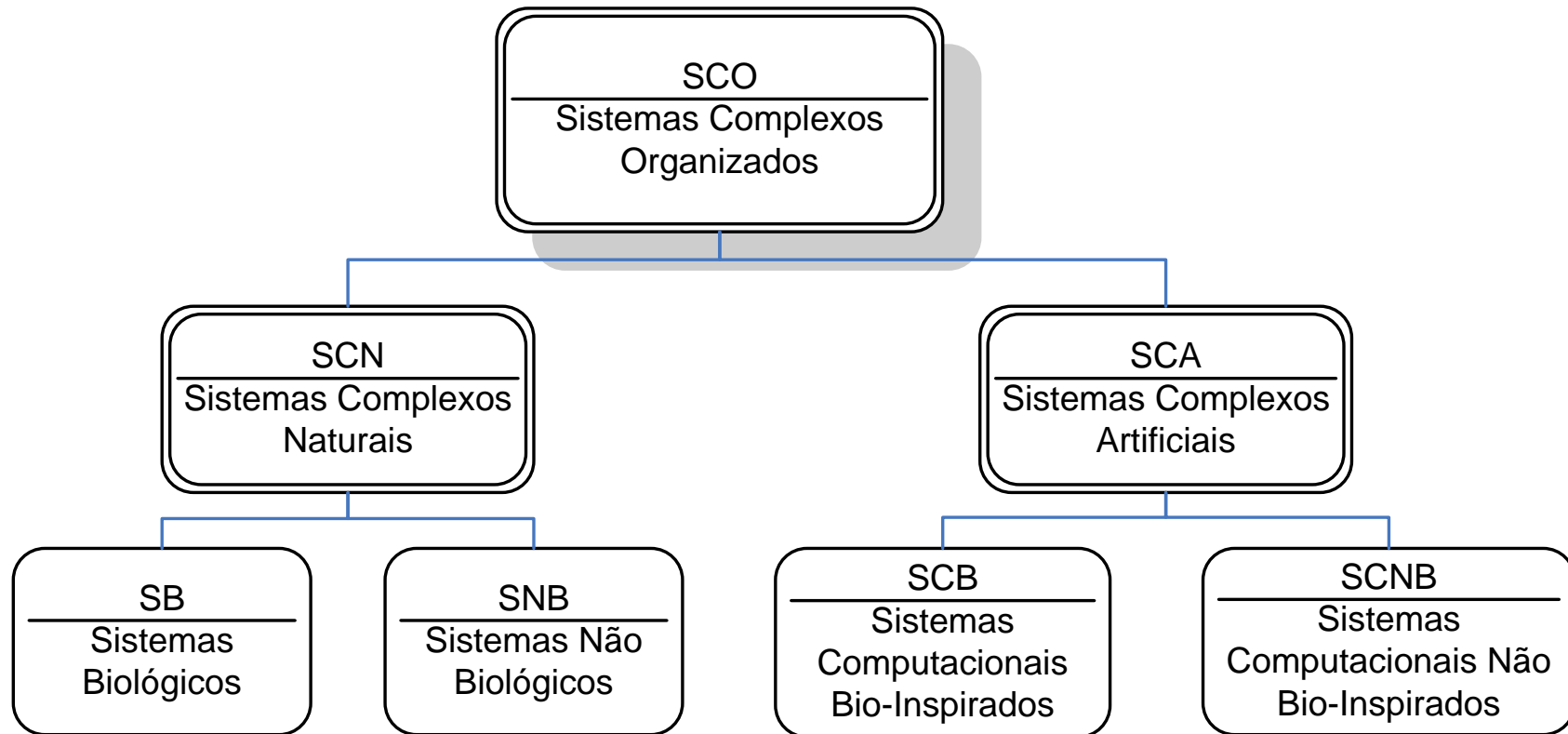


Figura 2 – Divisão circunstancial dos sistemas complexos organizados (SCO) em naturais (SCN) e artificiais (SCA) e seus subsistemas.

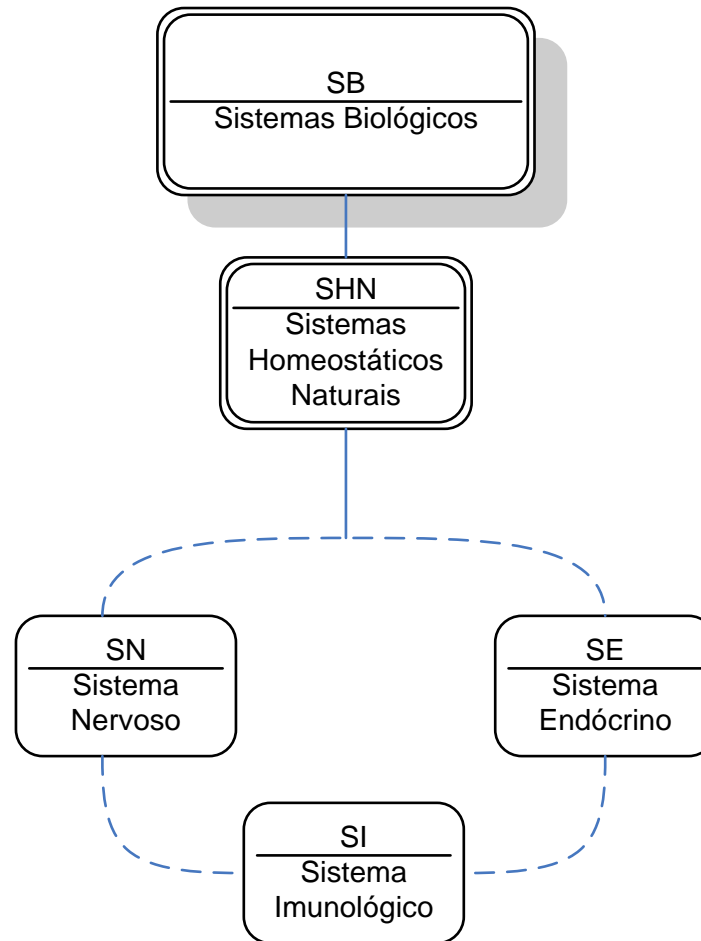


Figura 3 – Os sistemas nervoso, imunológico e endócrino, classificados circunstancialmente como um sistema homeostático natural.

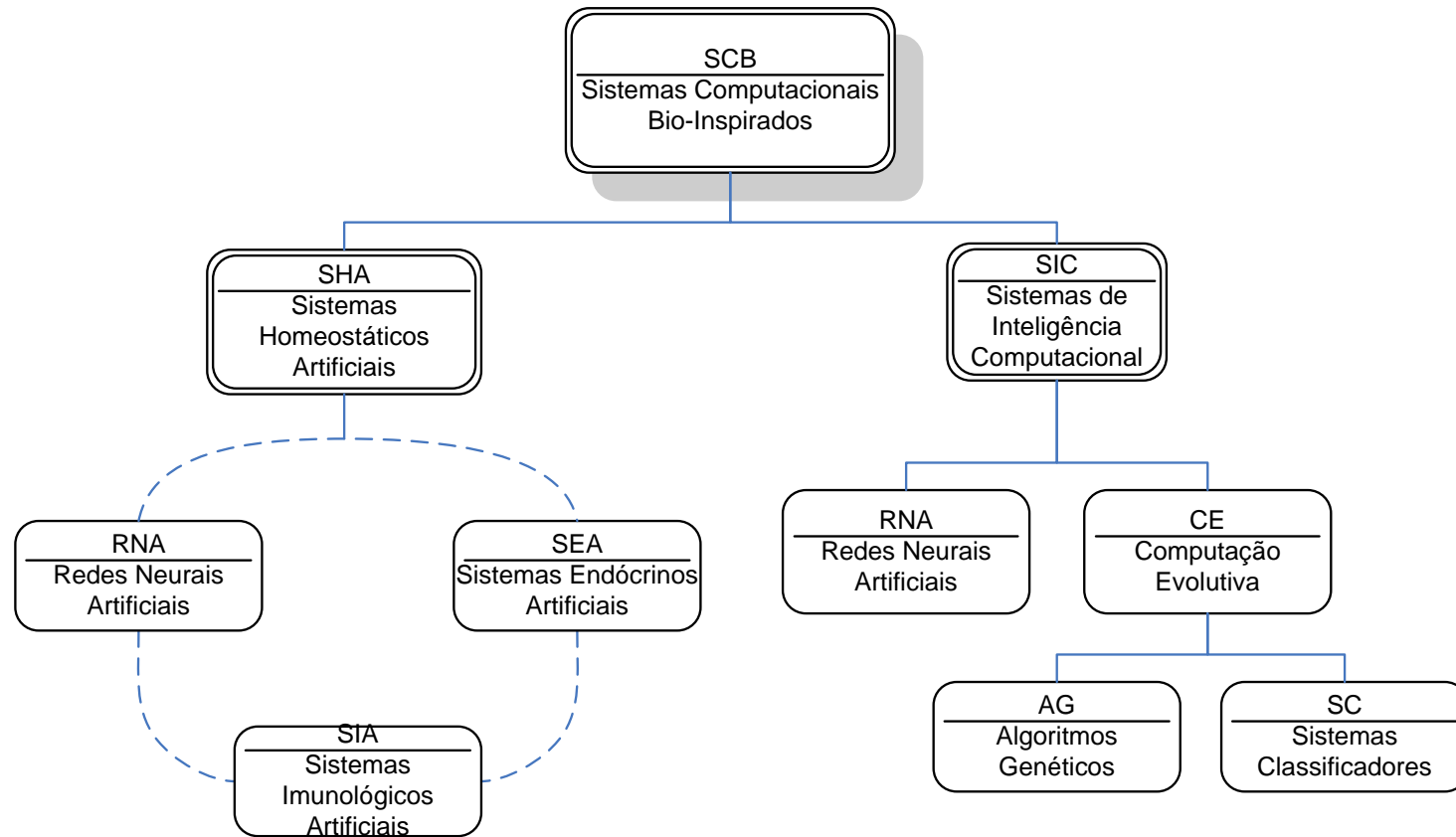


Figura 4 – Taxonomia circunstancial dos sistemas computacionais bio-inspirados.

11.1 Sistemas complexos organizados

- Sistemas complexos são caracterizados como sistemas abertos e acredita-se que eles se “alimentam” de um tipo de energia ordenada (BUSHEV, 1994), ou seja, uma energia com baixa entropia que será utilizada para contrabalançar a tendência de degradação da energia interna do sistema.
- Entretanto, nem toda energia que adentra o sistema pode ser diretamente utilizada. Tal energia deve passar por um processo de seleção, o qual tem como base os objetivos específicos do sistema, objetivos estes normalmente relativos à sobrevivência e proliferação (DARWIN, 1859; 1993).
- A partir dessa energia “filtrada”, o sistema passa por um processo de mudança ou adaptação, caracterizado por atividades internas. Esse processo é coordenado por mecanismos de auto-organização, através de funções ou estratégias de transição, assim como mecanismos de realimentação.

- Um sistema complexo organizado apresenta uma estrutura hierárquica e, portanto, é possível decompô-lo. Com isso, pode-se estudar e entender suas partes separadamente, embora esta iniciativa analítica não seja necessariamente produtiva para entender o todo (NICOLIS & PRIGOGINE, 1977; 1989; COVENEY & HIGHFIELD, 1995; BAK, 1996; GALLAGHER & APPENZELLER, 1999).
- Acredita-se que os organismos com maior graduação de inteligência são normalmente constituídos pela interação de vários sistemas complexos organizados, muitas vezes sem uma fronteira clara entre eles. Esses sistemas constituintes são passíveis de descrição apenas recorrendo-se a níveis hierárquicos de análise.

12 Auto-organização

- O conceito central em vida artificial é a auto-organização. Este conceito implica a emergência e manutenção de uma ordem ou complexidade a partir de um estado

menos organizado ou menos complexo. Esta auto-organização deve ser “intrínseca” ou “espontânea” e deve ser fruto das características do sistema.

- *Quais são os elementos-chaves e as relações que devem ser incorporadas ou sintetizadas em um sistema de vida artificial para possibilitar a emergência de uma organização cooperativa e/ou competitiva complexa?*
 1. Organização de agentes adaptativos em processos de interação cooperativa e/ou competitiva (auto-organização horizontal);
 2. Auto-organização vertical, complementando o processo de auto-organização horizontal.
- Em um processo de auto-organização horizontal, os agentes estão em um mesmo nível de organização, portanto não têm a capacidade de controlar outros agentes dentro do mesmo nível.
- Já no caso da auto-organização vertical, uma organização horizontal é controlada por um ou mais agentes que estabelecem um relacionamento hierárquico com a referida organização horizontal (NEHANIV & RHODES, 2000).

- Um relacionamento hierárquico implica que os agentes são capazes de influenciar a organização horizontal sem serem influenciados por ela (relacionamento unilateral).
- Condições necessárias para a ocorrência de auto-organização:
 - ✓ realimentação positiva;
 - ✓ realimentação negativa;
 - ✓ interação local.

13 Homeostase

- Estudos biológicos comprovam que existe interconexão e dependência entre o sistema imunológico, o sistema nervoso e o sistema endócrino na espécie humana (BESENDOVSKY & DEL REY, 1996). Essa interação é fundamental para a manutenção do equilíbrio interno do organismo, chamado também de *homeostase*.

- O termo *homeostase* ou *homeóstase* significa “propriedade auto-reguladora de um sistema ou *organismo* que permite manter o estado de *equilíbrio* de suas *variáveis essenciais* ou de seu meio *ambiente*”.
- Há controvérsia sobre o primeiro aparecimento do termo na literatura. Segundo LEVINE (1998), o primeiro registro ocorreu com a publicação do trabalho de Cannon em 1929 (CANNON, 1929). Para PFEIFER & SCHEIER (1999) o termo *homeostase* foi completamente caracterizado por Ashby em 1960.
- Independente de sua origem, existe o consenso de que o processo de *homeostase* está estreitamente ligado ao *equilíbrio* do sistema ou organismo e requer uma quantidade de receptores sensoriais especializados em detectar mudanças. No caso do corpo humano, esses receptores dão início a respostas específicas nos sistemas nervoso, imunológico e endócrino, os quais são os principais sistemas envolvidos diretamente com o processo de homeostase.

- Existem estudos que apontam para a existência de um outro fenômeno biológico contrário à homeostase, chamado de *heterostase*. Este termo foi criado por KLOPF (1982) para descrever um tipo de comportamento que ele acredita existir na natureza em organismos que procuram estímulos constantemente, por exemplo, excitação ou prazer máximo e constante. Apesar da idéia de Klopff apresentar alguma consistência, a mesma encontrou forte contestação no ambiente científico.

14 Computação emergente

- Muitos sistemas naturais de interesse são difíceis de descrever ou controlar utilizando métodos tradicionais:
 1. Sistemas ecológicos;
 2. Sistemas imunológicos;
 3. Sistemas econômicos.

- Estes sistemas naturais exibem habilidades de processamento coletivo de informação que emergem da ação individual de componentes simples, interagindo via canais de comunicação restritos (cada agente utiliza apenas a informação obtida pelos seus próprios “sensores”).
- O termo *computação emergente* é utilizado para descrever o surgimento de processamento de informação coerente em sistemas computacionais.
- Sistemas com comportamento emergente apresentam auto-organização, fenômenos coletivos e comportamento cooperativo e/ou competitivo.

15 Autômatos celulares

- Definição 1: Um autômato celular é um sistema dinâmico com espaço, tempo e estado discretos. Cada ponto em uma grade espacial regular, chamado célula, pode assumir qualquer um dentre um conjunto finito de estados. Os estados das células na grade são atualizados de acordo com uma regra local, ou seja, o estado de uma

dada célula, no instante de tempo atual, depende apenas de seu próprio estado e do estado das células vizinhas mais próximas no instante de tempo anterior. Os estados de todas as células são atualizados de forma síncrona e em instantes discretos de tempo.

- Definição 2: Um autômato celular é um modelo teórico de um computador paralelo sujeito a várias restrições que tornam tratável a investigação formal de seu poder de computação. Cada célula é um modelo de um computador com memória finita, ou seja, uma máquina de estado finito, e produz sua saída a partir de entradas que ela recebe de um conjunto finito de células que formam sua vizinhança e, possivelmente, de uma fonte externa. A saída de cada célula é distribuída às células vizinhas e, possivelmente, a um receptor externo.

16 Aprendizado e evolução

- Aprendizado e evolução são considerados processos adaptativos, sendo que o primeiro ocorre durante o ciclo de vida de um organismo (adaptação a mudanças rápidas no ambiente) e o segundo durante as gerações de organismos (adaptação a mudanças mais lentas no ambiente ou a ambientes estacionários).
- Qual é o nível de interação que pode haver entre aprendizado e evolução?
- O aprendizado que ocorre durante o curso de vida de um indivíduo pertencente a uma dada espécie pode, de algum modo, guiar a evolução da espécie? (MAYNARD SMITH, 1987)

16.1 O efeito Baldwin

- É consenso que não pode haver interação direta entre aprendizado e evolução.
- Em 1896, James Baldwin propôs um novo fator evolutivo, pelo qual características adquiridas podiam ser herdadas indiretamente.

- Idéias semelhantes foram independentemente propostas por Morgan e Osborn, no mesmo ano.
- Este novo fator está vinculado ao aprendizado, e foi denominado de plasticidade fenotípica, ou seja, a habilidade de um organismo se adaptar a seu meio durante sua vida.
- O efeito Baldwin opera em duas etapas (TURNERY *et al.*, 1996):
 1. Sinergia entre plasticidade fenotípica e evolução: primeiramente, a plasticidade fenotípica permite que um indivíduo se adapte a uma mutação parcialmente bem sucedida, que de outro modo poderia ser inútil ao indivíduo. Se esta mutação aumenta a adaptabilidade ao meio, ela tende a se proliferar na população;
 2. Assimilação genética: sendo assim, é dado tempo ao processo evolutivo para encontrar um mecanismo rígido que substitua a plasticidade fenotípica, correspondendo à segunda etapa do efeito Baldwin.

16.2 Aspectos conceituais do efeito Baldwin

- Se o aprendizado auxilia na sobrevivência, então organismos com maior capacidade de aprendizado terão um maior número de descendentes, conduzindo a um aumento, na população, da frequência de genes responsáveis pela habilidade do aprendizado.
- Se o ambiente for suficientemente estável de modo que a habilidade mais importante a ser aprendida permaneça a mesma, e se a aprendizagem da referida habilidade é custosa (forte pressão seletiva), então o processo evolutivo pode conduzir indiretamente à codificação genética da habilidade a ser aprendida (MITCHELL & FORREST, 1994).
- Dito de outra forma, é dado tempo e motivação continuada para que o processo evolutivo empregue sua “criatividade” na codificação genética da habilidade desejada. Enquanto esta codificação não ocorre, o indivíduo deve empregar uma grande quantidade de recursos para obter esta habilidade via aprendizado.

- Assim, um comportamento que foi em um primeiro momento aprendido, pode se tornar “instintivo” através deste processo, desde que se preserve um nível mínimo de estabilidade no ambiente e desde que o custo de aprendizagem seja elevado.
- Superficialmente, o efeito Baldwin se assemelha à teoria lamarckista. No entanto, não há aqui uma alteração direta do genótipo a partir de modificações no fenótipo.
- Conclusão: O aprendizado pode afetar a evolução, mesmo quando o que é aprendido não pode ser transmitido geneticamente.

16.30 efeito Baldwin verificado na prática – Exemplo 1

- A importância do efeito Baldwin para a computação evolutiva foi evidenciada a partir do trabalho de HINTON & NOWLAN (1987). Ele ocorre quando um algoritmo genético é aplicado na evolução de uma dada população de indivíduos, juntamente com algoritmos de busca local.

- Busca local é o análogo computacional de plasticidade fenotípica em evolução biológica. A assimilação genética é facilitada pelo uso de funções de adaptação, que incorporem o custo das buscas locais, e por permitir que o genótipo tenha algum controle sobre a extensão da busca local.
- Muitos sistemas híbridos atuais, compostos por algoritmos genéticos e algoritmos de busca local, têm procurado explorar esta sinergia. Exemplo: algoritmos meméticos (MOSCATO & COTTA, 2003).
- HINTON & NOWLAN (1987) obtiveram a demonstração empírica do efeito Baldwin e de sua magnitude a partir de um problema de formulação muito simples: *dada uma cadeia cromossômica de comprimento 20, encontrar a combinação de 0's e 1's, dentre as 2^{20} possibilidades, que representa a única solução correta para um dado problema.*
- O procedimento convencional para a aplicação de algoritmos genéticos a este problema, ou seja, a definição de uma população de candidatos à solução e

evolução desta população, geração a geração, pela aplicação dos operadores de reprodução e seleção, não foi capaz de conduzir à única solução correta.

- No entanto, a introdução da capacidade de aprendizagem na população de candidatos à solução reverteu completamente este quadro.
- A capacidade de aprendizagem foi implementada a partir da introdução de um alelo ‘?’, além dos alelos 0 e 1. Um gene ‘?’ não representa uma condição “*don’t care*”, mas apenas caracteriza um gene cujo valor (0 ou 1) será definido na fase de aprendizagem.
- Assim, os cromossomos da população de candidatos à solução passaram a ser definidos como sequências de 0’s, 1’s e ?’s, estes últimos com valor (0 ou 1) a ser definido via aprendizagem.
- Outro aspecto fundamental do experimento de HINTON & NOWLAN (1987) foi a utilização de uma técnica de aprendizagem pouco eficiente: a adivinhação aleatória do valor de cada alelo ‘?’ presente nos cromossomos. Ou seja, dado um

cromossomo, era tentado um número finito de vezes (até 1000 vezes) adivinhar quais seriam os melhores valores para os genes com alelo ‘?’. Com isso, o experimento acabava incorporando a idéia de que o processo de aprendizagem é custoso (fator custo foi incorporado na função de *fitness*), simulando assim o fato de que a habilidade a ser aprendida é suficientemente complexa para representar um diferencial de adaptabilidade significativo dentro da população.

- Com isso, um indivíduo que apresentasse todos os seus genes com alelos ‘?’ tinha a vantagem de conter garantidamente a solução correta em seu espaço de representação, mas a desvantagem de tornar o processo de adivinhação aleatória extremamente ineficiente.
- Por outro lado, um indivíduo sem nenhum gene com alelo ‘?’ não apresentava a possibilidade de ter seu nível de adaptação aumentado via aprendizagem.
- Isto significa que os melhores candidatos seriam aqueles com uma parcela de seus genes com alelos ‘?’ e outra parcela com valores adequados e já definidos.

- Sendo assim, os experimentos de HINTON & NOWLAN (1987) mostraram que o aprendizado pode guiar o processo evolutivo, representando um exemplo de ocorrência do efeito Baldwin.

16.40 efeito Baldwin verificado na prática – Exemplo 2

- Uma segunda verificação computacional do efeito Baldwin foi apresentada por ACKLEY & LITTMAN (1992), com seu modelo de agentes adaptativos sujeitos a ERL (*Evolutionary Reinforcement Learning*).
- Este modelo consiste de agentes adaptativos movendo-se aleatoriamente pelos nós de uma grade bidimensional, encontrando pelo caminho alimento, predadores, esconderijos e outros tipos de entidades.
- O estado de cada agente inclui as entidades localizadas em sua região de alcance visual, o nível de energia interna armazenada, e outros parâmetros.
- Cada agente possui duas redes neurais *feedforward*:

1. uma rede classificadora, que mapeia o estado do agente no instante t a um número representando a qualidade deste estado;
 2. uma rede atuadora, que mapeia o estado do agente no instante t a uma ação.
- As únicas ações possíveis correspondem ao deslocamento para um dos quatro nós vizinhos dentro da grade, mas as ações podem produzir efeitos adicionais como “comer” e “ser devorado”.
 - As arquiteturas das redes neurais são as mesmas para todos os agentes, mas a intensidade das conexões (pesos) pode variar de agente para agente.
 - A intensidade das conexões da rede classificadora de um dado agente não se altera durante o ciclo de vida do agente, enquanto que a intensidade das conexões da rede atuadora se altera de acordo com a experiência de vida do agente e em função de um algoritmo de aprendizado por reforço (do inglês *reinforcement learning*).

- O genoma de um agente é dado pela intensidade das conexões (pesos) das redes classificadora e atuadora. Os genes associados às conexões da rede atuadora são ajustáveis, enquanto que os outros genes são fixos.
- A energia interna de um dado agente, representada por um número real, deve ser mantida acima de um certo nível para preservar a vida daquele agente. O valor de energia aumenta quando o agente encontra alimento e diminui quando o agente se movimenta e também com o passar do tempo (representando a energia gasta com as funções vitais internas do agente).
- O agente deve se movimentar não apenas para encontrar alimento, mas também para fugir de predadores, evitando assim ser devorado.
- Um agente pode também se reproduzir caso possua energia interna suficiente. Esta reprodução pode se dar individualmente, por clonagem com mutação, ou então aos pares, via *crossover*.

- É importante mencionar que nesta aplicação não há nenhuma função de *fitness* definida externamente para avaliar o nível de adaptação do genoma de cada agente. A adaptabilidade de um indivíduo é medida pelo seu desempenho durante seu ciclo de vida. *Este é um exemplo típico das peculiaridades existentes na aplicação de algoritmos genéticos no contexto de vida artificial.*
- A intensidade das conexões da rede atuadora é ajustada comparando-se o nível de energia interna entre o instante atual e o instante anterior, obtendo-se assim um sinal de reforço. Este sinal é utilizado para modificar a intensidade das conexões no sentido de aumentar o nível de energia no próximo estado.
- Muitos fenômenos interessantes foram observados, com este modelo de agentes adaptativos. O principal fenômeno emergente observado foi uma versão do efeito Baldwin. Foram realizados três experimentos com as seguintes distinções:
 1. Evolução da população com aprendizado junto aos agentes individuais;
 2. Evolução da população, mas sem aprendizado;

3. Ausência de evolução, mas com aprendizado junto aos agentes individuais.

- O desempenho de cada experimento é medido em termos do tempo médio até a extinção da população, calculado a partir de várias simulações.
- Os resultados obtidos mostram que o melhor desempenho ocorreu no experimento 1, seguido do experimento 3, ambos muito superiores ao experimento 2.

17 Referências bibliográficas

- ACKLEY, D.H. & LITTMAN, M.L. Interactions between learning and evolution. *in* C.G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer & S. Rasmussen (eds.) *Artificial Life II*, pp. 487-507, Addison-Wesley, 1992.
- BAK, P. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*, Copernicus Books, 1996.
- BEER, R. D. *Intelligence as Adaptive Behavior: An Experiment in Computational Neuroethology*. New York: Academic Press, 1990.
- BESENDOVSKY, H. O. & DEL REY, A. Immune-Neuro-Endocrine Interactions: Facts and Hypotheses, *Endocrine Reviews*, 17(1), pp. 64-102, 1996.
- BODEN, M. A. (ed.) *The Philosophy of Artificial Life*. Oxford: Oxford University Press, 1996a.
- BODEN, M.A. Autonomy and Artificiality. *In* M.A. Boden (ed.) *The Philosophy of Artificial Life*. Oxford University Press, pp. 95-108, 1996b.
- BROOKS, R. A. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence* 47: 139-159, 1991.

- BURKS, A. W. *Theory of Self-Reproducing Automata*. Urbana: University of Illinois Press, 1966.
- BURKS, A. W. *Essays on Cellular Automata*. Urbana: University of Illinois Press, 1970.
- BUSHEV, M. *Synergetics: Chaos, Order, Self-Organization*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., London, UK, 1994.
- CANNON, W. B. *Organization for Physiological Homeostasis*, *Physiological Review*, 9, 399-431, 1929.
- CAPRA, F. *The Turning Point*, Bantam, 1984.
- CLARK, A. J. *Being There: Putting Brain, Body, and World Together Again*. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.
- COVENEY, P. & HIGHFIELD, R. *Frontiers of Complexity – The Search for Order in a Chaotic World*, Fawcett Columbine, 1995.
- DARWIN, C. *The Origin of Species by Means of Natural Selection or The Preservation of Favored Races in The Struggle for Life*. The Modern Library, New York, 1859; 1993.
- EMMECHE, C. *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life*. Princeton: Princeton University Press, 1994.
- GALLAGHER, R. & APPENZELLER, T. Beyond Reductionism, *Science*, 284 (5411), 1999.
- HARNAD, S. Levels of functional equivalence in reverse bioengineering. *Artificial Life* 1: 293–301, 1994.
- HINTON, G.E. & NOWLAN, S.J. How learning can guide evolution. *Complex Systems*, 1:495-502, 1987.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- KAUFFMAN, S. A. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford: Oxford University Press, 1992.

- KLOPF, A. H. *The Hedonistic Neuron: a Theory of Memory, Learning, and Intelligence*, Washington: Hemisphere, 1982.
- LANGTON, C.G. (ed.) *Artificial Life - An Overview*. The MIT Press, 1995.
- LANGTON, C. G. Self-reproduction in cellular automata. *Physica D* 10: 135–144, 1984.
- LANGTON, C. G. Studying artificial life with cellular automata. *Physica D* 22: 1120–1149, 1986.
- LANGTON, C. G. Artificial life. In C. G. Langton, Ed., *Artificial Life: The Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems (held September 1987)*. Redwood City, CA: Addison-Wesley, pp. 1–47, 1989. (Reprinted, with revisions, in M. A. Boden, Ed., *The Philosophy of Artificial Life*. Oxford: Oxford University Press, pp. 39–94, 1996.)
- LEVINE, D. S. *Explorations in Common Sense and Common Nonsense*, on-line book, URL: <https://www.uta.edu/psychology/files/faculty%20psyc/levine1/index.htm>, 1998.
- LEVY, S. *Artificial Life: A Report from the Frontier where Computers meet Biology*. New York: Vintage Books, 1992.
- MATURANA, H. R. & F. J. VARELA. *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. London: Reidel, 1980.
- MAYNARD SMITH, J. When learning guides evolution. *Nature*, vol. 329, pp. 761-762, 1987.
- MEYER, J.-A. & S. W. WILSON (eds.) *From Animals to Animats: Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.
- MITCHELL, M. & FORREST, S. Genetic Algorithms and Artificial Life. *Artificial Life*, vol. 1, pp. 267-289, 1994.
- MOSCATO, P. & COTTA, C. A Gentle Introduction to Memetic Algorithms, Chapter 5 of the Handbook of Metaheuristics, vol. 57, pp. 105-144, 2003.
- NEHANIV, C.L. & RHODES, J.L. The Evolution and Understanding of Hierarchical Complexity in Biology from an Algebraic Perspective. *Artificial Life*, vol. 6, pp. 45-67, 2000.

- NICOLIS, G. & PRIGOGINE, I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*, Wiley, 1977.
- NICOLIS, G. & PRIGOGINE, I. *Exploring Complexity: An Introduction*. W.H. Freeman and Company, NY, USA, 1989.
- PATTEE, H.H. Artificial Life Needs a Real Epistemology. In F. Moran, A. Moreno, J.J. Merelo, P. Chacon (eds.) *Advances in Artificial Life: Proceedings of the Third European Conference on Artificial Life*. Springer, pp. 23-38, 1995.
- PFEIFER, R. & SCHEIER, C. *Understanding Intelligence*, MIT Press, 1999.
- PUTNAM, H. Reductionism and the nature of psychology. *Cognition*, vol. 2, pp. 131-146, 1973.
- RAY, T. S. An approach to the synthesis of life. In C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, and S. Rasmussen, Eds., *Artificial Life II*. Redwood City, CA: Addison-Wesley, pp. 371–408, 1992. (Reprinted in M. A. Boden, Ed., *The Philosophy of Artificial Life*. Oxford: Oxford University Press, pp. 111-145, 1996.)
- RAY, T. S. An evolutionary approach to synthetic biology: Zen and the art of creating life. *Artificial Life 1*: 179–210, 1994.
- TURING, A. M. The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society: B* 237: 37–72, 1952.
- TURNER, P., WHITLEY, D. & ANDERSON, R.W. Evolution, Learning, and Instinct: 100 Years of the Baldwin Effect. *Evolutionary Computation*, vol. 4, no. 3, pp. iv-viii, 1996.
- VARGAS, P.A. *Sistemas Computacionais Bio-Inspirados: Síntese e Aplicação em Inteligência Computacional e Homeostase Artificial*, Tese de Doutorado, FEEC, Unicamp, 2006.
- WEAVER, W. Science and complexity. *American Scientist*, vol. 36, pp. 536-544, 1968.
- WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. *Review of Modern Physics* 55: 601–644, 1983.
- WOLFRAM, S. *Theory and Applications of Cellular Automata*. Singapore: World Scientific, 1986.