

**Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Filosofia e Ciências
Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Filosofia**

ANEXO AO PROCESSO Nº 00901/2002

DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM 30/03/05

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

Juliano Antonio Brolí

**Auto-Organização e Mecanicismo na Robótica:
Uma Análise Filosófica**

**Marília
2005**



JULIANO ANTONIO BROLI

AUTO-ORGANIZAÇÃO E MECANICISMO NA ROBÓTICA:
UMA ANÁLISE FILOSÓFICA



Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia e Ciências da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Marília, para obtenção do título de Mestre em Filosofia (Área de Concentração: Ciências Cognitivas e Filosofia da Mente)

Orientadora: Profa. Dra. Maria Eunice Quilici Gonzalez.

Co-orientador: Prof. Dr. Willem Ferdinand Gerardus Haselager.

1410001777



Marília
2005



UN 0013770321

20505046

Nº cham. 003.7

B867a

Nº Tombo 1.777

Aquisição D

Preço R\$ 5,00

Data 10/11/05

Proced. Autor

- Sistemas auto-organizadores
 - Robótica
 - Autopoiese
 - Teoria dos sistemas dinâmicos
- 129 p., il., anexo

Broli, Juliano Antonio

B867a Auto-organização e mecanicismo na robótica: uma análise filosófica / Juliano Antonio Broli -- Marília, 2005.
129 f.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, 2005.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Eunice Quilici Gonzalez.

Co-orientador: Prof. Dr. Willem Ferdinand Gerardus

Haselager.

Bibliografia: f. 108-117

1. Auto-organização e Autopoiese. 2. Teoria dos sistemas dinâmicos. 3. Paradigmas da robótica. 4. Teoria da percepção direta. I. Autor. II. Título.

CDD: 153.4

JULIANO ANTONIO BROLI

AUTO-ORGANIZAÇÃO E MECANICISMO NA ROBÓTICA:
UMA ANÁLISE FILOSÓFICA

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE

COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Willem Ferdinand Gerardus
Haselager (co-orientador)
FFC – UNESP
NICI – RU, Nijmegen, Holanda

Profa. Dra. Mariana Claudia Broens
Departamento de Filosofia
FFC - UNESP

Prof. Dr. Ademar Ferreira
Poli – USP

SUPLENTES

Profa. Dra. Maria Eunice Quilici Gonzalez
(orientadora)
Departamento de Filosofia
FFC - UNESP

Profa. Dra. Itala Maria Loffredo D'Ottaviano
Departamento de Filosofia e CLE -
UNICAMP

Marília, 30 de março de 2005.



Dedico esta dissertação à minha família, ao Campus da FFC e às pessoas que dessas páginas possam tirar algum proveito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores e amigos, Profa. Dra. Maria Eunice Quilici Gonzalez e Prof. Dr. Willem Ferdinand Gerardus Haselager, primeiro pela amizade, mas também pelo incentivo constante, a confiança, a liberdade, o apoio e a orientação que tornaram possível essa dissertação. Nós sabemos o que suas aulas, o estágio docente e as orientações significaram para a minha introdução ao mundo das Ciências Cognitivas e da Filosofia da Mente. Felizes aqueles que compartilharem de seu universo informacional.

Também agradeço aos professores Mariana Claudia Broens e Ademar Ferreira, pela gentileza de participarem de minhas bancas de qualificação e defesa, bem como pelas valiosas contribuições.

Novamente, agradeço à professora Maria Eunice Quilici Gonzalez, por suas contribuições para o crescimento das Ciências Cognitivas e da Filosofia da Mente no Brasil.

Agradeço à Silvia Cristina de Souza, por me incentivar a fazer o mestrado; aos alunos e professores da primeira turma do curso de Automação Industrial do Colégio Impacto, em Araçatuba – SP, cuja colaboração e competência na realização do projeto DEVA levaram à elaboração de meu pré-projeto para o mestrado.

Agradeço ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Filosofia da FFC - UNESP, pelas contribuições inestimáveis e principalmente pela amizade. (Em ordem cronológica das disciplinas) Especialmente ao Marar (pelas primeiras orientações), ao Hércules, ao Alfredo, à Maria Cláudia, ao Marinho, à Maria Candida, à Beth, à Ana Maria, ao Ricardo, ao Kester e a todos os outros professores que contribuíram através de aulas e discussões. Infelizmente, devido ao espaço limitado para os agradecimentos, não é possível mencionar todos os nomes, e por isso peço desculpas.

Agradeço aos amigos João Queiroz e Charbel Niño El-Hani, pelos comentários valiosos no início de minha dissertação, bem como pela formidável receptividade em todos os momentos em que nos encontramos.

Agradeço pelas amizades, afetos e trocas interdisciplinares com os alunos do programa. Cada um de vocês é responsável por um pedacinho deste trabalho: à Marina, aos amigos Otávio (Maic-Joe) e Flávio (Tima), à Paula e Izabel (Bel), ao João Luís e ao Rodrigo Barboza, ao Paulo Lustosa e ao Marcos Alves; ao Sérgio Silva Pinto, à Odete, ao Sérgio, à Maria Angélica, ao Malcon, ao Luís Henrique Silvestrini; aos integrantes do GAEC, pelas discussões e pela paciência perante minhas freqüentes intervenções.

Agradeço aos amigos e co-autores Luís Felipe de Oliveira e Luís Guilherme Pereira Lima, companheiros do *Mlab*, à Maria Amélia e ao Patrik.

Agradeço ao amigo Ramon Capelle, pelo “gás”, pelo “teto” e pela paciência nos momentos finais da elaboração dessa dissertação.

Agradeço ao amigo Adilson e aos alunos do primeiro ano de filosofia de 2003, com os quais tive o prazer de conviver e aprender um pouco mais, durante o estágio docente.

Também agradeço ao professor Andy Wells, por enviar tão prontamente alguns artigos que influenciaram minha pesquisa, aos professores Achim Stephan, Claus Emmeche e Ricardo Manzotti, pelas frutíferas discussões durante o V Encontro Brasileiro Internacional de Ciência Cognitiva.

Agradeço ao corpo de funcionários da FFC, por serem sempre gentis e eficientes. À Edna, secretária do departamento de filosofia, ao pessoal da segurança, da biblioteca e às meninas da seção de pós-graduação. Vocês fizeram parte de uma história muito boa.

Agradeço à CAPES, por financiar parte de minha pesquisa.

Todos vocês são ótimos!!

MUITO OBRIGADO!



An artifact can be thought of as a meeting point – an “interface” in today’s terms – between an “inner” environment, the substance and organization of the artifact itself, and an “outer” environment, the surroundings in which it operates. If the inner environment is appropriate to the outer environment, or vice versa, the artifact will serve its purpose.

(Herbert Simon)

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma análise filosófica da Teoria da Auto-Organização, no contexto da Ciência Cognitiva, de modo a verificar a possibilidade de aplicação dos seus princípios nos paradigmas da robótica contemporânea. Inicialmente, apresentamos uma análise dos tipos de auto-organização, propostos por Michel Debrun, e argumentamos que a autopoiese é uma das possíveis realizações dos processos auto-organizados. Em seguida, analisamos os principais paradigmas da robótica contemporânea, afim de verificar em que medida suas arquiteturas permitem a ocorrência da auto-organização. Encontramos na Robótica Evolucionária um conjunto de técnicas que podem ser usadas como ferramentas para a evolução de robôs num modo auto-organizado. Além disso, apresentamos argumentos no sentido de mostrar que a tese de Ross Ashby, segundo a qual não existem, em princípio, máquinas capazes de se auto-organizar, pode atualmente ser refutada na área da robótica evolucionária. Concluimos, de um ponto de vista filosófico, que as pesquisas atuais da Robótica Evolucionária fornecem casos concretos de processos auto-organizados em robôs, apesar deles estarem longe de uma comparação com os sistemas autopoieticos, como é o caso dos organismos vivos, dinamicamente acoplados ao seu ambiente.

Palavras-chave: Auto-Organização; Autopoiese; Redes Neurais Artificiais; Robótica Evolucionária; *Affordances*; Teoria da Percepção Direta; Sistemas Dinâmicos; Fundamentos da Ciência Cognitiva; Bases Conceituais da Robótica.

ABSTRACT

This dissertation presents a philosophic analysis concerning the theory of Self-Organization, in the context of the Philosophy of Mind and Cognitive Science, in order to investigate its value for contemporary paradigms in robotics. Initially, the categorization of self-organized processes proposed by Michel Debrun is examined, and we argue that self-organized processes can be related to autopoiesis under certain conditions. We then analyze the principal paradigms in contemporary robotics, to verify to what extent its architectures permit self-organization. We find that the Evolutionary Robotics approach provides powerful tools to evolve robots in a self-organizing way. Therefore, we provide evidences to indicate that Ashby's thesis about the impossibility of self-organizing machines should be reevaluated in the light of evolutionary robotics. However, these robots do not qualify as autopoietic systems yet. From a philosophical perspective, then, we conclude that current work in Evolutionary Robotics provides challenging concrete cases for an analysis based on the theory of self-organization, but is still long way off from being comparable to autopoietic systems such as living organisms that are dynamically coupled to their environment.

Keywords: Self-Organization; Autopoiesis; Artificial Neural Networks; Evolutionary Robotics; Direct Perception Theory; Affordances; Dynamical Systems; Cognitive Science Foundations; Conceptual Bases of Robotics.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	11
CAPÍTULO 1 A TEORIA DA AUTO-ORGANIZAÇÃO	
1.1 Apresentação.....	16
1.2 A teoria da auto-organização.....	18
1.3 Auto-organização primária e auto-organização secundária.....	23
1.4 Autopoiese: os limites entre a abertura e o fechamento dos sistemas.....	28
CAPÍTULO 2 OS PARADIGMAS DA ROBÓTICA: DELIBERAÇÃO VS. REATIVIDADE	
2.1 Apresentação.....	36
2.2 Os paradigmas da robótica contemporânea.....	38
2.2.1 Arquiteturas.....	41
2.3 Análise dos paradigmas da robótica contemporânea.....	42
2.3.1 O paradigma deliberativo ou hierárquico.....	43
2.3.2 O paradigma reativo.....	49
2.4 Discussão.....	55
CAPÍTULO 3 O PARADIGMA HÍBRIDO E A ROBÓTICA EVOLUCIONÁRIA	
3.1 Apresentação.....	61
3.2 Classificação esquemática dos comportamentos nos organismos em geral.....	62
3.3 O paradigma híbrido deliberativo/reactivo e sua possível evolução.....	68
3.4 Robótica evolucionária: alcances e limites dos mecanismos automáticos de evolução.	73



CAPÍTULO 4 AUTO-ORGANIZAÇÃO EM ROBÔS: PRINCÍPIOS EVOLUCIONÁRIOS NA PERSPECTIVA DA TEORIA DA PERCEPÇÃO DIRETA

4.1 Apresentação.....	81
4.2 Auto-organização e os princípios da cibernética.....	82
4.3 Teleonomia: um conceito prescindível às explicações da autopoiese?.....	88
4.4 Mecanismos ecológicos de manutenção da vida.....	91
4.5 Affordances e robôs: a importância da co-evolução.....	95
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
REFERÊNCIAS.....	108
APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DO APARATO SENSORIO-MOTOR DE DEVA.....	118
ANEXO A – EXEMPLO DO FUNCIONAMENTO DE <i>STRIPS</i>	123

INTRODUÇÃO

O objetivo central da presente dissertação é fazer uma análise filosófica da Teoria da Auto-Organização, no contexto da ciência cognitiva, de modo a verificar a possibilidade de aplicação dos seus princípios nos paradigmas da robótica contemporânea.

A ciência cognitiva se originou, segundo Dupuy (1996), com o movimento dos cibernéticos, na década de 1940, através de suas tentativas de criar sistemas de controle que exibissem inteligência. Conforme ressalta este autor, as origens da ciência cognitiva foram esquecidas após a sua suposta superação pelo movimento da inteligência artificial simbólica, representado pelos trabalhos pioneiros de Minsky, Papert, Simon, Newell, entre outros. Naquele momento, considerava-se os processos inteligentes sem que houvesse uma preocupação com os estados físicos dos sistemas. É importante enfatizar que, principalmente devido à rápida ascensão das pesquisas relacionadas à inteligência artificial, as possibilidades de avanços em outras áreas subjacentes, como é o caso da sistêmica, foram ofuscadas. Deste modo, realizações como o advento do computador digital só vieram a potencializar uma tendência já existente de se esquecer as próprias raízes da ciência cognitiva na cibernética e assumir que os processos inteligentes poderiam se resumir a processos simbólicos realizados por máquinas abstratas universais, como é o caso da máquina de Turing. Através delas, os processos inteligentes poderiam, supostamente, se estruturar a partir do processamento de informação simbólica, estruturado a partir de um conjunto de regras preestabelecidas.

Nas últimas décadas, contudo, novas pesquisas surgiram como reação às negligências realizadas pela inteligência artificial de cunho puramente simbólico, bem como em razão de seu relativo fracasso em atingir seus objetivos de simular processos inteligentes a partir de modelos computacionais. Neste contexto, procuramos estar atentos, na busca de novas

modelagens, para não realizarmos os mesmos erros, devido ao esquecimento de nossa própria história.

Assim, nossa proposta principal nesta dissertação é analisar os processos auto-organizados e a possibilidade de sua ocorrência na robótica. Para tanto, dividimos este trabalho em quatro capítulos, organizados de acordo com a descrição a seguir:

No *capítulo 1*, apresentamos uma análise das hipóteses centrais que caracterizam o paradigma da Auto-Organização. As idéias de Debrun (1996a; 1996b; 1996c), Gonzalez (1996) e Ashby (1962; 1970), entre outros, fornecem os subsídios que julgamos necessários para tratar os conceitos básicos da teoria da auto-organização. Conforme explicitaremos, a auto-organização surge em processos que não possuem um componente (externo ou interno ao processo) capaz de determinar, diretamente, as direções que serão tomadas pela organização a que poderão dar origem. Dois sentidos fundamentais da auto-organização serão explicitados, os quais podem ser classificados como *auto-organização primária* e *auto-organização secundária*, sendo diferenciados entre eles principalmente pela capacidade de *aprender*. Argumentaremos que os sistemas auto-organizados adquirem uma certa autonomia em relação ao meio onde surgiram, e que isso se deve às propriedades intrínsecas que emergem das interações entre os seus componentes. O conjunto de idéias expresso no capítulo 1, em síntese, será usado como um substrato teórico para as nossas discussões sobre a possibilidade de ocorrerem processos auto-organizados em robôs.

No *capítulo 2*, introduzimos as noções de paradigmas e arquiteturas, tais como descritas por Arkin (1998) e Murphy (2000), as quais servirão de apoio para a nossa análise das características que diferenciam os principais paradigmas da robótica contemporânea: o paradigma *deliberativo*, também conhecido como paradigma *hierárquico*, o paradigma *reativo* e o paradigma *híbrido deliberativo/reativo*. Basicamente, são três as primitivas utilizadas pela robótica: percepção, planejamento e ação, e conforme será descrito, os

paradigmas podem ser classificados pelo modo como estas primitivas ou funções são organizadas. Argumentamos que, apesar de não existirem paradigmas nem arquiteturas específicas para a realização de determinados tipos de aplicações, uma certa tendência em incorporar alguns componentes pode ser observada em algumas áreas de aplicação. Após a apresentação desses três paradigmas, fazemos um breve balanço sobre o alcance e os limites dos mesmos no estudo do comportamento inteligente.

Após indicarmos alguns limites encontrados pelos paradigmas deliberativo e reativo na busca pelo desenvolvimento de sistemas inteligentes, apresentamos, no capítulo 3, uma breve classificação dos tipos de comportamento existentes nos organismos biológicos. Nosso objetivo, ao apresentar tal classificação, é indicar possíveis causas para a falta de flexibilidade presente no comportamento dos robôs puramente reativos, além de questionar em que medida esse comportamento pode ser comparado àquele dos organismos vivos, bem como indicar quais deles podem ser implementados em robôs. Delineado este panorama, iniciamos a descrição do paradigma híbrido, que permite uma incorporação entre a capacidade de planejamento com as respostas rápidas exibidas pelos robôs reativos.

Apresentamos, ainda no capítulo 3, um ramo de pesquisa em robótica que vem se desenvolvendo paralelamente aos paradigmas hierárquico, reativo e híbrido: a Robótica Evolucionária (*Evolutionary Robotics*). Entendemos que a robótica evolucionária é composta por um conjunto de técnicas e mecanismos automáticos de evolução, usados na investigação sobre a possibilidade de robôs evoluírem. As técnicas utilizadas pela robótica evolucionária podem ser (e vêm sendo) aplicadas aos paradigmas da robótica, já que seus métodos não estão ligados diretamente à organização entre as primitivas de percepção, planejamento e ação. Em resumo, a robótica evolucionária utiliza métodos apoiados nos pressupostos da teoria da auto-organização para alcançar processos evolucionários, cujo potencial também discutiremos no quarto capítulo.



Iniciamos o *capítulo 4* com uma recapitulação da problemática levantada por Ashby (1962) sobre a impossibilidade (em princípio) das máquinas se auto-organizarem. Apresentamos os seus argumentos, para em seguida contrapô-los com a hipótese de que existe uma classe de máquinas capaz de se auto-organizar, a saber, as máquinas autopoieticas. Admitindo que as máquinas autopoieticas constituem uma classe de máquinas capaz de manter a própria existência no mundo por meio de processos auto-organizados, inferimos que talvez seja possível buscar alguns *insights* sobre o papel dos mecanismos de troca com o ambiente, existentes nos organismos, para investigar novas possibilidades de robôs conseguirem se manter no ambiente por si próprios.

Ao investigarmos, em estudos realizados por Kelso (1999) e Holloway (2004), o comportamento dos organismos mais simples perante as restrições impostas pelo ambiente, verificamos a existência de alguns mecanismos coletivos de interação intra-espécies, capazes de levar muitos organismos a interagir de modo coletivo, ou seja, a operar como se fossem um único organismo, capaz de se ajustar mais facilmente ao ambiente.

Dadas essas condições, questionamos quais as possíveis origens de tais padrões de comportamento, que parecem ocorrer também nos sistemas mais complexos. É nessa perspectiva que trazemos à tona a noção de informação significativa, proposta por Broens e Gonzalez (2005). As autoras situam os critérios de relevância, utilizados pelos organismos, como resultantes de uma capacidade geneticamente evoluída de captar no meio o que elas chamam de informação significativa.

A partir da proposta de Broens e Gonzalez (2005) e de características que detectamos em robôs desenvolvidos através de métodos evolutivos, elaboramos algumas conjecturas sobre os limites atuais da robótica na tentativa de realizar processos auto-organizados, além de sugerir algumas das possíveis trajetórias da robótica para o futuro.



Capítulo 1 – A TEORIA DA AUTO-ORGANIZAÇÃO



The child who breaks open a toy to find out how it works would be very disappointed if that toy was self-organized. Self-organizing systems have no deus ex machina, no ghost in the machine ordering the parts

(J. A. Scott KELSO)

1.1 Apresentação

Este capítulo tem por objetivo analisar algumas hipóteses sobre a natureza dos processos auto-organizados, supostamente inerentes aos sistemas autônomos em geral. Em particular, nos interessa verificar em que medida os processos auto-organizados podem contribuir para o desenvolvimento de sistemas artificiais, uma vez que as principais correntes de pesquisa da inteligência artificial, connexionismo e robótica mencionam estes processos como centrais em sua caracterização. Assumimos que a auto-organização é uma participante direta dos processos responsáveis pela manutenção dos organismos biológicos e de alguns seres artificiais. As características intrínsecas dos processos auto-organizados são analisadas a partir dos trabalhos de Debrun (1996a; 1996b; 1996c), Gonzalez (1996), Haken (1999; 2000), Maturana e Varela (2002), Ashby (1962; 1970) e Kelso (1999).

O capítulo está dividido em mais 3 seções, explicitadas a seguir:

Na *seção 1.2*, apresentamos um panorama geral da Teoria da Auto-Organização e uma definição dos processos auto-organizados, adotada por autores como Debrun (1996a; 1996b; 1996c), Ashby (1962; 1970), Gonzalez (1996) e outros. Também apresentamos, na seção indicada, uma breve introdução aos conceitos da Teoria dos Sistemas Dinâmicos, os quais serão usados no decorrer dessa dissertação, tais como propostos por Haken (1999; 2000), Kelso (1999) e outros.

Na *seção 1.3*, analisamos a proposta de Debrun (1996a; 1996b; 1996c) e Ashby (1962; 1970) de classificar os processos de auto-organização em primário e secundário. Como veremos, nos processos que envolvem a auto-organização primária, grande ênfase é dada às *condições de partida* para o seu desenrolar, apontando para as formas ou organizações às quais eles tendem a convergir. Na auto-organização secundária, enfatizamos a presença de



mecanismos de *aprendizagem* que a diferenciam da auto-organização primária. Ressaltamos, ainda, o aspecto criador dos sistemas auto-organizados, bem como a capacidade que determinadas estruturas possuem de evoluir por meio das relações entre os elementos que as constituem. Argumentamos que os processos de aprendizagem, característicos da auto-organização secundária, podem atingir um grau de complexidade de modo que a organização resultante destes processos tenda a um funcionamento autônomo, no sentido de depender cada vez menos do meio para realizar-se.

Na seção 1.4, intitulada *Autopoiese: os limites entre a abertura e o fechamento dos sistemas*, indicamos algumas diferenças entre sistemas autopoieticos e alopoieticos, bem como as suas realizações como sistemas auto e hetero-organizados. Sugerimos uma interpretação alternativa àquela proposta por Debrun para os sistemas *autopoieticos*. Nesta interpretação, propomos que os sistemas autopoieticos constituem possíveis realizações dos processos auto-organizados, e que o aumento de sua autonomia com relação ao meio é consequência da organização dos componentes dessa classe de sistemas.

Em conjunto, nas seções 1.2 a 1.4 apresentamos o contexto a partir do qual a nossa investigação sobre a presença da auto-organização em seres artificiais será desenvolvida nesta dissertação.



1.2 A teoria da Auto-Organização

Autores como Ashby (1962; 1970), Debrun (1996a; 1996b; 1996c), Gonzalez (1996; 2004), Haken (1999; 2000), Kelso (1999) e Varela, Thompson e Rosch (1991) definem a auto-organização como um processo que envolve a interação dinâmica de diversos elementos e que precisa, necessariamente, atender ao requisito de não possuir um centro controlador ou organizador que determine, *a priori*, a natureza das relações estabelecidas entre eles.

O prefixo *auto* transmite a idéia de que certas *organizações* podem surgir e se desenvolver ou se reestruturar a partir delas próprias. Nesse sentido, Debrun (1996b, p. 3) afirma que:

A idéia de auto-organização situa-se na encruzilhada da idéia de “organização” e da intuição que temos do prefixo “auto”. Esse termo é uma âncora lingüística, constantemente relacionada com nossa experiência do mundo. Em particular com nossa percepção da interação - causal, moral, política - entre indivíduos ou coletividades, e com a avaliação que fazemos dos seus respectivos graus de autonomia e auto-afirmação.

O processo de auto-organização, conforme aponta Debrun (1996a, p.34-35), se realiza em três fases específicas: *começo*, *interiorização* ou *endogenização* e *cristalização* de uma forma ou identidade¹. Contudo, por entendermos que o termo cristalização pode levar a algumas confusões conceituais (que explicitaremos mais adiante) preferimos substituí-lo pelo termo *sedimentação*.

A primeira fase do processo de auto-organização, seu *começo*, ou corte em relação a uma situação anterior, conforme aponta Debrun (1996a, p. 34,35), pode resultar do encontro espontâneo entre diversos componentes, séries causais, ou mesmo de uma decisão, individual

¹ Tanto Debrun (1996a, 1996b e 1996c) quanto Maturana e Varela (2002) usam o termo identidade para caracterizar, de modo geral, os sistemas como unidades distintas do meio.

ou coletiva, que causará o início de suas interações. Isso significa, empregando as palavras de Debrun, que o processo de auto-organização não é o desdobramento de um processo anterior, nem é comandado por um conjunto preestabelecido de regras e nem se reduz a uma simples aplicação de estruturas ou regras dadas de antemão a conteúdos diversos, mesmo que eles sejam novos ou imprevistos.

Debrun (1996c, p. xxxvi-xxxvii) ressalta, no trecho abaixo, o duplo papel desempenhado pelo impulso inicial nos processos auto-organizados:

[...]o impulso inicial assegura um duplo papel. De um lado, ele constitui um corte, maior ou menor, em relação ao passado e ao contexto. De outro lado, ele aponta para o futuro, fornecendo uma orientação que não será necessariamente seguida adiante, mas que todavia define um perfil à medida que eventuais tentativas de reestruturação terão de se medir com ela. Nesses dois papéis podemos dizer que o impulso inicial assegura o aspecto 'auto' da auto-organização. É o que chamaríamos de um 'ponto de amarração'.

A partir de um início casual em que elementos com histórias distintas se encontram, vem a fase chamada *endogenização*. Quando a interação entre os diversos componentes de um processo auto-organizado que se esboça é bem sucedida, ele tende a se desenvolver pela distinção gradual entre o “dentro” e o “fora” (DEBRUN, 1996a, p. 35), ou seja, através da delimitação gradual das fronteiras de uma forma que se esboça, o que implica numa maior participação do processo no seu desenrolar e na diminuição da importância de possíveis acasos. Isso significa, para Debrun (1996a, p. 36-38), que o processo de auto-organização não deve ter um controlador absoluto, capaz de definir sua direção e seu desenvolvimento. Ao invés disso, a interação dinâmica entre seus elementos poderá fazer surgir *atratores* que tornem cada vez mais provável o sentido ou caminho evolutivo do processo. Estes atratores devem se alicerçar na presença de uma memória “efetiva”, que vai além de simples lembranças, “mas que [...] fica ‘atrás’ do presente, pronta a lhe servir de sustentáculo e de princípio de orientação, no futuro imediato.” (DEBRUN, 1996a, p. 38).

Entendemos que esta memória “efetiva” caracterizada por Debrun pode servir como fundamento à “capacidade do reconhecimento da forma”, inerente aos hábitos formados pelos sistemas materiais, em todos os seus níveis (inclusive o molecular). Tal capacidade serviria de base para o princípio da continuidade dos processos naturais, postulados por Peirce (como lembra Silveira [2004]). Se nossa hipótese estiver correta, talvez os *hábitos* (enquanto tendência à repetição, inclusive em forma de potencial de geração de novas estruturas), ao mesmo tempo em que são característicos das organizações materiais em geral, possam ser indicados como os alicerces dos processos auto-organizados. Os hábitos seriam, nessa perspectiva, uma espécie de elo que permitiria o *encontro* entre os componentes no início do processo de auto-organização – no mesmo sentido de início usado por Debrun (1996a, p. 34 e 44). Isto é, existiria na natureza uma certa tendência à repetição, a qual funcionaria como uma espécie de memória para as combinações moleculares.

Como já ressaltamos, uma das condições necessárias à realização dos processos auto-organizados é a ausência de um controlador central que dirija o funcionamento dos componentes envolvidos no processo. Uma vez que a auto-organização não pode ocorrer a partir de regras e limites que determinem por completo as suas interações, julgamos que será possível estabelecer uma primeira relação entre a noção de autonomia e os processos auto-organizados: as regras ou regularidades, quando existirem, serão inerentes ao próprio processo. A observação dessa correlação (entre auto-organização e autonomia) servirá como um ponto de partida para a análise, no próximo capítulo, dos paradigmas deliberativo e reativo da robótica.

Nesse contexto, Debrun (1996c, p. xxxix) ressalta que “A autonomização do processo em relação a outros fatores reforça seu caráter *auto*, esboçado pelo surgimento do *ponto de amarração*”. Esse ponto de amarração, como vimos, indica uma possível orientação para um determinado sistema, servindo como um *atrator provisório*, que poderá se desintegrar e ser

substituído por novos atratores, candidatos a dar um novo sentido para as evoluções do sistema auto-organizado.

Os atratores acima mencionados são elementos de processos que constituem objeto de investigação tanto da teoria da auto-organização (TAO) como da teoria dos sistemas dinâmicos (TSD). Essas teorias trazem uma série de métodos de investigação que possibilitam a análise das relações entre os componentes que formam os sistemas complexos (HAKEN, 1999; HAKEN, 2000; BEER, 1997; GONZALEZ, 2004; KELSO, 1999; HASELAGER, 2004c).

Em linguagem mais simples, os *atratores* são pontos para os quais um sistema tende a convergir. Da mesma maneira, existem pontos que parecem repelir a convergência dos processos, chamados de *repulsores*.

Um sistema dinâmico é composto por muitos componentes que interagem de modos diversos. Estas interações ocorrem em tempo real e podem produzir no sistema padrões de comportamento que se manifestam no decorrer do tempo, as suas trajetórias (HASELAGER, 2004c). Estes padrões de comportamento são conhecidos, na teoria dos sistemas dinâmicos, como *parâmetros de ordem*. Parâmetros de ordem, segundo Haken (1999), são formas estruturadoras emergentes da dinâmica de interação entre os elementos no plano microscópico, que dão origem, no plano macroscópico, a novos padrões de organização. As variáveis macroscópicas que governam o padrão das partes microscópicas através de restrições são chamadas por Haken (2000, p. 13) de *parâmetros de controle*.

Um fenômeno interessante que ocorrerá durante a formação dos sistemas dinâmicos é a *causalidade circular* (*circular causality* [KELSO, 1999, p. 8-9]). Esta se caracteriza como um processo de cooperação entre os subcomponentes de um sistema, que o leva a assumir uma determinada ordem, ao mesmo tempo em que governa o comportamento dos seus subcomponentes, restringindo-os. A causalidade circular possibilita a formação de novos parâmetros de controle (HAKEN, 1999; HAKEN, 2000; GONZALEZ, 2004). Kelso (1999, p. 7)

chama a atenção para o fato de que os parâmetros de controle não determinam ou contêm um código para a formação do padrão emergente, eles simplesmente levam o sistema através da sua variedade de padrões ou estados possíveis.

Dependendo da complexidade dos sistemas e da maneira como eles estão acoplados ao ambiente, identificar quais são os parâmetros de controle responsáveis pela modificação de sua ordem global pode ser muito difícil (HASELAGER, 2004c). Contudo, este desafio pode implicar na possibilidade de influenciar o seu comportamento.

Segundo van Rooij, Bongers e Haselager (2000), as explicações ou previsões das trajetórias dos sistemas dinâmicos são feitas a partir da observação das estruturas do espaço de trajetórias possíveis e das forças que formam uma trajetória em particular. Os estados internos de um sistema não representam situações externas, mas especificam os efeitos possíveis de perturbações na trajetória em desdobramento.

A diferença entre os sistemas dinâmicos tradicionais e os auto-organizados, segundo Debrun (1996a), está nos tipos de atratores inerentes a cada um deles. Ele afirma que os sistemas dinâmicos tradicionais possuem atratores fortes, dados previamente pelas características intrínsecas dos sistemas em questão, enquanto que nos auto-organizados os atratores surgem no decorrer do processo.

Deste modo, os atratores que surgem no processo de auto-organização geralmente não possuem a capacidade de fazer o sistema convergir em determinada direção. Ao contrário, na maioria das vezes eles irão apenas esboçar tal iniciativa, terminando por desintegrar-se. Em alguns momentos, entretanto, eles podem sedimentar-se e constituir atratores mais fortes, que terão uma influência maior no desenrolar dos processos (DEBRUN, 1996a).

A formação e a estabilidade dos atratores constituirão elementos decisivos, conforme indicaremos a seguir, para que possamos classificar metodologicamente os processos de auto-organização como primário ou secundário.



1.3 Auto-organização primária e auto-organização secundária

No início do processo de auto-organização primária a ausência de atratores impossibilita o direcionamento do processo no sentido de realizar-se enquanto sistema. Será apenas com o desenvolvimento dos “mecanismos de ajuste” entre os componentes do processo que atratores começarão a se esboçar. Partindo dessa hipótese, argumentamos que *no ponto de partida da auto-organização primária, a organização ou forma não possui identidade*. Isto porque será necessária a auto-organização secundária para que parâmetros de ordem se estabeleçam, delimitando a forma de atuação dos componentes do sistema no plano microscópico. Tal forma de atuação será determinante no estabelecimento daquilo que Debrun (1996a) denomina *organização ou forma*. Esta é gerada a partir de um processo que se transforma em sistema quando o seu atrator se torna o próprio processo, que tende a se consolidar esboçando a sua identidade. Esse esboço de identidade caracteriza, em sua fragilidade, a auto-organização primária, como proposta por Debrun.

Por *auto-organização primária*, Debrun (1996a, p. 49) entende “todo processo de integração de elementos realmente distintos que, ao invés de tender para um atrator já dado, sedimenta progressivamente seu próprio atrator e, portanto, se cria a si próprio enquanto sistema.” Ele identifica a ocorrência da auto-organização primária quando, em um processo, os *encontros* e as interações entre elementos *realmente distintos* tenderem – sem intervenção de um supervisor ou centro controlador – à constituição de uma forma global ou todo, dependendo essencialmente dessas interações e, em menor grau, das *condições de partida* ou do intercâmbio com o ambiente (DEBRUN, 1996a, p. 32).

Apesar de enfatizar a necessidade de que os elementos que fazem parte do processo de auto-organização sejam realmente distintos, Debrun (1996a, p. 33) lembra que *um grau*



mínimo de redundância entre alguns destes elementos é indispensável para que eles possam desempenhar o papel de “soldas”. Assim, uma vez que os elementos afins (ou que possuem algum grau de redundância) cercam os elementos distintos, permitem a estes últimos que se transformem em “paredes” ou “pilares” internos dos processos de auto-organização primária.

Debrun ressalta que o *grau de autonomia* dos processos de auto-organização está vinculado às suas *condições de partida*. Assim, por exemplo, em um programa de computador em que as funções são predeterminadas por um operador, ou mesmo em um sistema dinâmico caótico, essas condições tendem, de maneira direta, a causar a determinação de todos os processos subseqüentes. Por outro lado, se considerarmos o exemplo de um robô auto-organizado primariamente, inserido em um ambiente complexo – a exemplo do que ocorre idealmente (como veremos nos capítulos subseqüentes) naquelas simulações computacionais de Sims (1994b), baseadas em *vida artificial* – os processos serão determinados pelas relações estabelecidas entre o robô e os diversos elementos presentes no ambiente.

Contudo, se a *riqueza informacional* presente num ambiente for tão grande a ponto de impossibilitar a sua descrição, as evoluções do sistema ao qual este ambiente faz parte tornam-se, em princípio, indeterminadas. Dessa forma, atratores previamente definidos ou mesmo qualquer tipo de pré-programação tornam-se insuficientes para a predeterminação do sistema. Seus processos, nesse sentido, tornam-se relativamente autônomos com relação às condições iniciais.

Segundo Debrun (1996a, p. 30), nos casos em que a interação entre os elementos do processo é cerceada pelas condições de partida, podem ocorrer apenas “fenômenos de *autofuncionamento* mas não (ou só de modo fraco) fenômenos de auto-organização”. Inversamente, condições de partida *mais flexíveis* geralmente podem levar à produção de atratores fracos e com poucas chances de conduzirem o processo de alguma forma. Entretanto, no caso da sedimentação de um atrator que consiga conduzir o sistema para

alguma direção, este processo será auto-organizado e terá graus de autonomia maiores com relação ao ambiente.

Voltamos a lembrar que no início do processo de auto-organização ainda não existe uma forma ou organização definida. Em consequência disso, o papel do ruído numa auto-organização primária pura é insignificante, já que ainda não existe nenhum ser ou sistema que possa ser perturbado (DEBRUN, 1996a, p. 50).

Os sistemas auto-organizados em geral são contrastados com os hetero-organizados, pois ao contrário dos sistemas auto-organizados, eles são originados a partir de processos que possuem condições de partida rígidas, que regem o seu funcionamento global, conferindo-lhe graus de liberdade praticamente nulos – como é o caso dos processos mecânicos ou algorítmicos em geral.

Isso posto, parece que não existem variações possíveis nas formas de organização dos componentes hetero-organizados que interagem com outros componentes, compondo organizações maiores. Nesse caso, os componentes hetero-organizados continuam funcionando como dispositivos de entrada e saída e sua organização não é influenciada pelo meio. Mais especificamente, podemos afirmar que dado um padrão específico de entradas (*inputs* ou estímulos em forma de sinais, energia ou matéria), os componentes hetero-organizados irão sempre produzir o mesmo tipo de saída (*outputs* resultantes do processamento dos *inputs*, com base em regras predefinidas).

Já os componentes que possuem em suas características intrínsecas algum grau de auto-organização e interagem com outros componentes (inclusive os hetero-organizados), compondo novas formas auto-organizadas, podem sofrer influências do meio ou dos componentes com os quais eles interagem. Observamos que no caso das organizações compostas por processos de auto-organização primária, as influências sofridas pelas interações com os outros componentes e com o meio são maiores, enquanto que nas



compostas por processos de auto-organização secundária tais influências são relativamente menores.

Os processos auto-organizados primariamente, enfim, vão constituir uma das possíveis fontes de geração dos processos de auto-organização secundária. Para que sistemas auto-organizados primariamente realizem a auto-organização secundária, eles devem atingir um limiar, que aparece na forma de um ingrediente a mais envolvido no processo: *a aprendizagem*.

Embora sob uma nova ordem, ou assumindo uma *lógica do fechamento* - “mesmo que, de fato, essa lógica não esteja sempre, ou só esteja parcialmente respeitada” (DEBRUN, 1996c, p. xxxix) - vários dos aspectos da auto-organização primária são conservados na realização deste novo sistema que começa a sedimentar-se por meio da auto-organização secundária.

Debrun aponta relações entre os graus de auto-organização dos sistemas com os seus graus de autonomia em relação ao meio. Para ele, quanto mais avançado estiver o processo de auto-organização secundária, maior será o grau de autonomia do sistema.

Nos capítulos 3 e 4 da presente dissertação apresentaremos algumas hipóteses sobre como a auto-organização secundária parece ocorrer em robôs, envolvendo, inclusive, aspectos como memória, antecipação e formação de atratores.

Contudo, para enriquecer nossa análise, precisamos lembrar que em determinado momento as formas originadas pela realização da auto-organização podem apresentar a capacidade de aprender, e tais processos de aprendizagem serão, neste caso, indicados como os limites (ou diferenciais) entre os processos de auto-organização primária e secundária. Neste novo momento, em que um processo atua nas reestruturações do seu próprio ser, seja em conjunto ou no tocante a tal ou qual parte, nível ou função”, surgem questões sobre como o trabalho de si sobre si pode realizar-se “não apenas materialmente mas enquanto *autotrabalho*” (DEBRUN, 1996a, p. 51).

[...]qualquer atividade que um agente exerça sobre ele mesmo, mas que poderia ser efetivada de igual maneira sobre ele por um terceiro, não pode ser uma operação de auto-organização. [...] Logo, a auto-organização secundária só vai residir nas operações organizacionais nas quais um agente é o único agente a poder realizá-las sobre si mesmo (DEBRUN, 1996a, p. 52).

Reconhecemos que um aspecto fundamental da auto-organização advém da interação entre as partes ou elementos do sistema. No capítulo 2 dissertaremos sobre alguns paradigmas da robótica tradicional, a fim de verificar como a presença de regras preestabelecidas no início dos processos podem influenciar ou determinar a evolução do comportamento dos sistemas em geral.

O processo de auto-organização, conforme ressaltado por Debrun no trecho abaixo, é parcialmente autônomo em relação às suas condições de partida.

Isso, porém, não implica num banal indeterminismo, numa capacidade de ‘pular’ fora de uma situação dada. Ao contrário: no caso de um processo auto-organizado, algumas das condições de partida permitem que o processo alce vôo próprio, que ele ultrapasse suas condições de partida a partir delas próprias.² (DEBRUN, 1996c, p. 6).

Em síntese, para que um sistema se auto-organize, não podem existir algoritmos ou leis que dirijam completamente a sua produção. Nas palavras de Debrun (1996a, p. 31), haverá auto-organização propriamente dita quando um sistema conseguir “ser a própria gênese do seu ser” ou se, por aprendizagem e/ou incorporação de elementos externos, conseguir alcançar novos patamares de atividade.

Entendemos que a idéia exposta por Debrun, no trecho acima, seja similar aos

² Correntes de pesquisa como a robótica evolucionária (*Evolutionary robotics* [NOLFI, 1998]) e a vida artificial (ALife, ou *artificial life* [SIMS, 1994]), sobre as quais dissertaremos nos capítulos 3 e 4, desenvolvem métodos para a produção de sistemas capazes de se auto-complexificar. Além de tentar gerar sistemas com essa capacidade, a robótica evolucionária usa métodos que se apóiam em processos auto-organizados para fornecer *insights* sobre como seria possível manter sua existência no meio. As pesquisas em vida artificial, por sua vez, podem trazer *insights* sobre a constituição de “formas” a partir de componentes elementares. Como veremos no terceiro capítulo, as pesquisas em vida artificial também fornecem mecanismos de busca, como os algoritmos genéticos, freqüentemente usados na robótica evolucionária.

princípios da *autopoiese* postulados por Maturana e Varela (2002). Entretanto, Debrun afirma que elas possuem diferenças. Assim, nos sentimos instigados a levantar uma questão: *existem processos auto-organizados que atendam à proposta de Debrun, e que não se enquadrem na classificação de sistemas autopoieticos?* Por motivos que se tornarão mais claros no quarto capítulo, e também para respondermos a esta questão, julgamos conveniente a inserção da seção subsequente, na qual trabalhamos a idéia de autopoiese.

1.4 Autopoiese: os limites entre a abertura e o fechamento dos sistemas

Se examinarmos um sistema *autopoietico* e nos perguntarmos quais as características que o tornam diferente dos processos de auto-organização secundária, talvez não tenhamos muito sucesso em obter respostas gerais para a pergunta.

Debrun (1996b, p. 5,6) argumenta que a auto-organização permanece um processo, mesmo que ela seja uma criação, e que à diferença da autopoiese, ela “não é um ato indivisível, quase atemporal. Nessas condições, a auto-organização não é mera decorrência do seu próprio começo. Se fosse o caso, ela se transformaria, precisamente, em autopoiese”. O autor reconhece, porém, que seu ponto de vista é polêmico entre os teóricos da auto-organização, e aponta para a importância das condições de partida nos processos de auto-organização primária, quando é introduzido um corte com o passado e o contexto, o que possibilita ao processo adquirir certa autonomia com relação ao “resto do universo”. Ainda que algum direcionamento possa existir no início de um processo de auto-organização primária, este direcionamento não deve ser determinante³. Ao invés disso, o processo

³ Entendemos que Maturana e Varela (2002) compartilham desse pensamento.



incorpora tal direcionamento, “mas não se sabe como as suas fases reagirão a essas condições de partida”.

Mesmo perante essa caracterização, entendemos que a autopoiese seja uma das possíveis realizações da auto-organização. Conforme ressaltam Maturana e Varela (2002), diferente dos processos auto-organizados, a realização da autopoiese é uma questão de *tudo ou nada*. Contudo, isso não quer dizer que a sua realização não tenha um início, e que este início possa, perfeitamente, originar-se de processos de auto-organização primária. Ao contrário, Maturana indica que uma unidade autopoietica pode surgir do encontro e estabelecimento de relações entre componentes distintos presentes no meio, desde que este meio ofereça algumas condições para que ocorra tal encontro (MATURANA e VARELA, 2002, p. 22). Ao sugerir que os seres vivos possuem um caráter sistêmico, Maturana enfatiza que todas as características surgem na dinâmica de sua autopoiese, e que nenhuma molécula, ou classe de moléculas, determina, por si mesma, qualquer aspecto ou característica do operar do ser vivo como tal (MATURANA e VARELA, 2002, p. 24).

Deste modo, entendemos que a diferença entre os processos auto-organizados e os autopoieticos possa estar nas características de seus atratores. Examinaremos, a seguir, o papel dos atratores nesses processos.

O que Maturana e Varela (2002) propõem com a idéia de *tudo ou nada* é que os processos autopoieticos não possuem graus. Para os autores, um sistema não pode ser *quase* autopoietico, tampouco pode ser *bastante* ou *pouco* autopoietico. Desse modo, ou os seus componentes participam de uma dinâmica (auto-organizada) que resulta nas relações de auto-produção de componentes, com a finalidade de conservação da organização do próprio sistema do qual fazem parte, ou eles são componentes de um sistema alopoiético. Não obstante, entendemos que um sistema ser classificado como alopoiético não implica que ele seja hetero-organizado. Para ser hetero-organizado, em princípio, um sistema precisa ter um

controlador central que determine completamente o seu modo de funcionamento⁴.

De modo bastante resumido, Debrun postula que será plenamente auto-organizado todo processo que *partir* de causas intrínsecas ao sistema, ou seja, exclusivamente das relações estabelecidas entre seus componentes, de maneira isolada do meio. Em contrapartida, processos disparados por qualquer força externa a um sistema que venha, de algum modo, a influenciar as relações entre os seus componentes, não serão de natureza plenamente organizada.

Neste sentido, a formação de atratores pode ocorrer durante os processos auto-organizados que ainda não assumiram uma lógica de fechamento, ou seja, naquelas etapas iniciais dos processos de auto-organização primária, quando apenas existe um esboço da forma ou organização. Se tais atratores não são dados previamente, a exemplo do que ocorre nos sistemas dinâmicos tradicionais, na maioria das vezes eles são fracos, e não conseguirão influenciar de maneira significativa a ordem do sistema. Todavia, outros atratores podem surgir e fazer realizar-se uma ordem que expresse a lógica do fechamento, típica da auto-organização plena. Ora, *se* (a) os sistemas autopoieticos seguem a mesma lógica de fechamento, já que constituem unidades distintas do ambiente, e *se* (b) essas unidades se mantêm a partir de processos de auto-produção de componentes, determinados pela dinâmica estabelecida entre suas partes constituintes, e não por fatores externos a ela, *então* pensamos ser possível inferir que os sistemas autopoieticos podem ser originários de processos auto-organizados. Ademais, apesar da recíproca não ser verdadeira, os processos autopoieticos parecem estar em consonância com a caracterização dos estágios avançados dos processos de auto-organização secundária, tal como proposta por Debrun. Parece que eles atendem aos requisitos para que um sistema seja caracterizado como um sistema em estágio avançado de

⁴As máquinas propostas por Turing (1950) e Ashby (1962), como veremos no capítulo 4, são hetero-organizadas, pois seu domínio de funcionamento é delimitado por uma função (ou conjunto de funções) específica. O mesmo ocorre no caso dos algoritmos, que possuem um início, meio e fim bem delimitados, não permitindo, por isso, qualquer novidade em seu desenrolar.



auto-organização secundária.

Nesse sentido, parece que os atratores dos sistemas autopoieticos os levam, de modo geral, a traçar uma ordem sistêmica, o que não ocorre com os outros sistemas auto-organizados secundariamente. Seria como se os atratores dos sistemas autopoieticos os atraíssem para uma ordem de funcionamento global, que coincide plenamente com a própria manutenção do sistema.

Já comentamos que quanto mais fechado o processo, maiores poderão ser os graus de autonomia por ele conquistados, no sentido de depender cada vez menos do meio, e mais de sua própria estrutura/organização. Contudo, pensamos que existem limites para o fechamento dos sistemas, uma vez que não são possíveis, em princípio, sistemas fechados na natureza. Assumir a possibilidade do total fechamento de um sistema implicaria em sua *morte* ou *desintegração*.

Apesar disso, conforme ressalta Debrun no trecho abaixo, existem alguns casos em que os sistemas auto-organizados secundariamente conseguem manter uma abertura mínima, próxima ao fechamento, suficiente apenas à sua manutenção.

A idéia de auto-organização que propomos é um pouco diferente: o processo auto-organizado, embora se 'nutrindo' de matéria, energia, informação, símbolos exauridos do 'lá fora', permanece - na sua dinâmica - essencialmente centrado sobre si mesmo. É cada vez mais, à medida que a auto-organização progride, *por si mesmo e para si mesmo*. Sua lógica, repitamos, é a do fechamento. No limite a auto-organização pode desembocar na constituição de verdadeiros *quistos* (DEBRUN, 1996c, p. xli).

A hipótese de fechamento proposta por Debrun indica uma tendência à cristalização dos sistemas auto-organizados em suas tentativas de fechamento ou interiorização. A constituição e manutenção de quistos, conforme indicado no trecho supracitado, se daria nos casos em que o sistema pudesse suprir suas necessidades através de um acoplamento rígido com o meio. Entendemos que essa seja uma tarefa difícil, já que o ambiente é extremamente

dinâmico, exigindo canais de acoplamento flexíveis para que os sistemas se mantenham.

É importante lembrar que os sistemas dinâmicos são compostos por vários subcomponentes que se acoplam, de modo a estabelecer relações de interação entre si. Seguindo os mesmos princípios, os sistemas maiores também são formados pelo acoplamento e estabelecimento de relações de outros componentes ou sistemas menores. Maturana (2000) afirma que quando relações dessa natureza são estabelecidas, os componentes acoplados passam a constituir uma história de interações entre si, e suas relações de causalidade passam a ser mútuas, originando algo que ele chama de congruência estrutural. Isso significa que, ao constituírem uma história conjunta, os sistemas acoplados passam a se moldar, nem sempre conforme suas necessidades exclusivas. Ao invés disso, devido ao acoplamento entre as suas estruturas e as dos outros sistemas envolvidos, as modificações resultarão de ajustes entre os sistemas em questão, possivelmente guiados pelas restrições do sistema que originam.

Entendemos que estes processos de ajuste também se aplicam à realização da *autopoiese*, uma vez que a congruência estrutural só se dá se ambas as estruturas, do sistema e do ambiente, estiverem acopladas num mesmo domínio (MATURANA e VARELA, 2002). Contudo, isso não quer dizer que todos os sistemas acoplados sejam autopoieticos, ou mesmo que tenham atingido uma relativa autonomia perante o ambiente. Mesmo porque sistemas completamente independentes do meio seriam sistemas cristalizados, o que para nós significa morte ou incapacidade de interação.

Enfatizamos que o entendimento da organização dos sistemas autopoieticos, e da diferença (em termos qualitativos) entre eles e os sistemas auto-organizados secundariamente, servirão de suporte para as discussões que permeiam essa dissertação. Nesse sentido, indicaremos a seguir alguns pontos que julgamos importantes sobre a realização da *autopoiese*.

Maturana e Varela (2002) argumentam que a realização da *autopoiese* é condição



suficiente para a obtenção da autonomia dos sistemas com relação ao meio. Esta inicia-se com um esboço de uma forma, que tende a sedimentar-se como uma unidade distinta do meio, o que lhe atribui uma certa identidade. Apenas no momento em que emerge tal identidade é que temos um sistema autopoietico. Além disso, tal sistema deve ter como característica intrínseca à sua organização, a capacidade e a *obrigatoriedade* de se auto-produzir. Destacamos o termo *obrigatoriedade* para enfatizar que, na autopoiese, todos os processos realizados no sistema têm a meta única da *auto-produção* e *auto-manutenção* do sistema. Nenhuma quebra na organização autopoietica pode ocorrer, já que implicaria na perda da sua identidade. Pode ocorrer, contudo, a modificação da ordem de um sistema autopoietico, de modo que as relações entre os seus componentes se modifiquem. Além disso, entendemos que os graus de autonomia dos sistemas podem ser medidos de acordo com a sua capacidade de ajuste perante as restrições impostas pelo acoplamento com o meio.

Assim caracterizada, a autopoiese parece realizar um salto qualitativo em relação à auto-organização secundária no que diz respeito ao seu modo de realização. Além disso, a presença da auto-organização secundária num sistema, por si só, não é condição suficiente para que ele seja caracterizado como autopoietico. Conforme veremos no capítulo 4, as redes neurais artificiais apresentam processos de auto-organização secundária em sua dinâmica – mesmo que de maneira *fraca*, conforme aponta Gonzalez (1996). Contudo, elas estão longe de realizar autopoiese. Ainda que os sistemas auto-organizados secundariamente e os autopoieticos progridam no sentido de conservação e auto-manutenção das unidades que constituem, parece que em um dado momento (aquele em que ocorre a diferença entre o *tudo* ou *nada*, indicado por Maturana e Varela), os atratores do sistema autopoietico tendem a indicar trajetórias que são coerentes com a própria organização autopoietica.

Uma vez que os sistemas autopoieticos possuem como característica central a sua própria organização, sua ordem de funcionamento parece permanecer, mesmo perante as

interações com o meio, exclusivamente voltada à auto-manutenção do sistema. É como se o atrator do sistema fosse uma espécie de *super-atrator*, que direcionasse a ordem do sistema para a sua própria manutenção.

Tanto no caso dos processos autopoieticos, quanto dos auto-organizados de segunda ordem, a idéia é que o processo deverá aumentar sua autonomia em relação ao meio à medida em que seus níveis de organização vão se complexificando⁵. Temporariamente, este fato nos permite supor que existem chances de ocorrerem processos auto-organizados ou autopoieticos em robôs, hipótese que investigaremos nos capítulos subseqüentes.

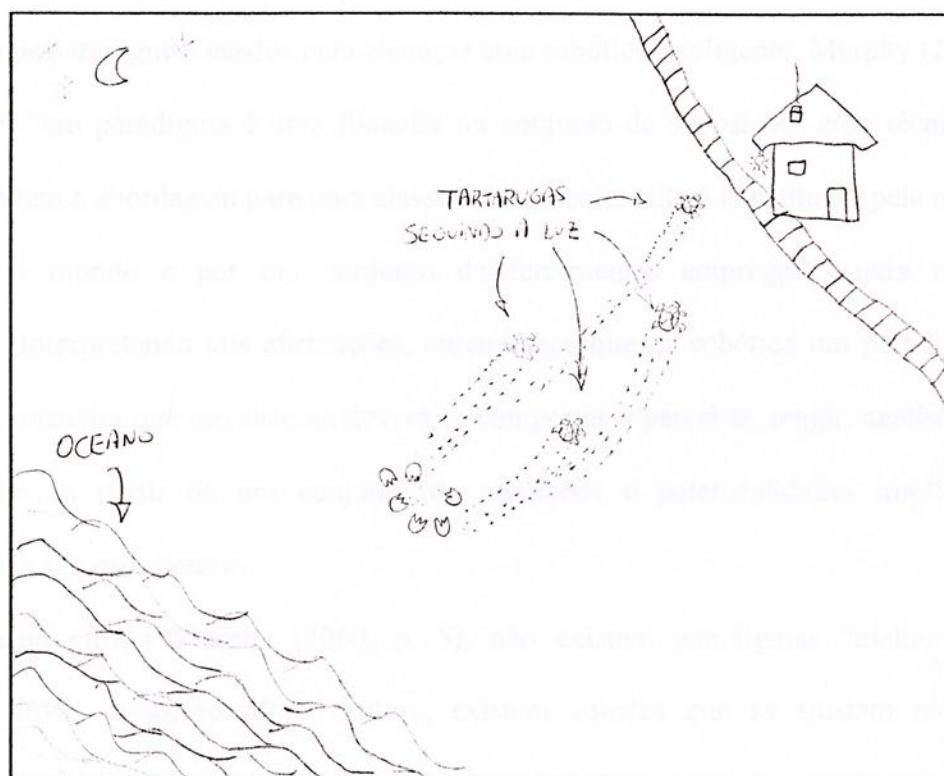
Para concluir, podemos considerar que existem séries de pesquisas que se apoiam no paradigma da auto-organização para sintetizar processos, dispositivos ou mesmo seres artificiais que sejam capazes de realizar, desenvolver ou participar de processos de adaptação e aprendizagem. Se os elementos que entram na sua composição global puderem vir a ter finalidades, mas no conjunto desses elementos não existir nenhuma *finalidade prévia*, então estaremos diante da possibilidade dos processos auto-organizados serem inseridos no contexto da robótica. Isto porque os robôs e o ambiente constituiriam elementos distintos, passíveis de se encontrar e estabelecer relações; e nesse sentido, eles poderiam atender aos principais requisitos necessários à realização dos processos de auto-organização.

Nos capítulos subseqüentes, analisaremos três dos principais paradigmas da robótica, extraindo deles características importantes para verificar em que medida eles permitem a ocorrência de processos auto-organizados em robôs. Julgamos que para isso seja necessário analisar, entre outras coisas, as características dos paradigmas e verificar se as condições características de cada um são propícias aos processos de auto-organização, além de classificar tais processos caso observemos a sua ocorrência.

⁵ Neste sentido, a relevância do estudo da auto-organização e da autopoiese no contexto da robótica nos parece bastante forte, e um dos pontos que nos leva a esta conclusão é que a autopoiese não precisa ser realizada a partir de componentes constituídos de matéria orgânica.



Capítulo 2 - OS PARADIGMAS DA ROBÓTICA: DELIBERAÇÃO VS. REATIVIDADE



The appropriate construct for intelligence starts with the problem space. If we know what problem space a subject is operating in, we already know a good deal about what behavior is obvious.

(Allen Newell e Herbert A. Simon)

2.1 Apresentação

Um dos objetivos centrais deste capítulo é iniciar uma análise dos principais paradigmas da robótica que permita a verificação dos seus pressupostos teóricos. Considerando os paradigmas usados para alcançar uma robótica inteligente, Murphy (2000, p. 5) afirma que: “um paradigma é uma filosofia ou conjunto de suposições e/ou técnicas, as quais caracterizam a abordagem para uma classe de problemas. Ele é constituído pela maneira de se olhar o mundo e por um conjunto de ferramentas empregadas para resolver problemas”^{1,2}. Interpretando tais afirmações, entendemos que na robótica um paradigma se configura pela maneira que um sistema deverá se comportar – perceber, reagir, analisar – em dadas situações, a partir de um conjunto de restrições e potencialidades implícitas e delimitadas pela sua *arquitetura*.

Conforme afirma Murphy (2000, p. 5), não existem paradigmas “melhores” ou “piores”. Ao invés disso, ressalta a autora, existem aqueles que se ajustam melhor a determinados tipos de tarefas, que serão executadas mais facilmente ou de maneira otimizada.

Apoiados nas afirmações de Murphy, podemos inferir que paradigmas diferentes podem ser aplicados à resolução dos mesmos problemas, obtendo-se resultados semelhantes, mas com diferentes graus de dificuldade (em termos de tempo, esforço, desgaste, etc).

No decorrer de nosso trabalho, fazemos referência a paradigmas diferentes que podem ser aplicados à resolução dos mesmos problemas. Um exemplo seria a questão do processamento de sinais: o mesmo trabalho pode ser realizado usando-se o paradigma

¹ *A paradigm is a philosophy or a set of assumptions and/or techniques which characterise an approach to a class of problems. It is both a way of looking at the world and an implied set of tools for solving problems.*

² O termo paradigma aqui empregado expressa a influência de Thomas Kuhn na obra *A Estrutura das Revoluções Científicas*. Não desenvolveremos, entretanto, uma análise detalhada deste conceito, uma vez que a definição apresentada por Murphy é suficiente para o presente propósito.



conexionista (que faz uso de informações distribuídas, sem a representação explícita das informações, que são processadas paralelamente por *modelos de neurônios artificiais* interconectados) ou o GOFAI (abreviação de *Good Old Fashioned Artificial Intelligence*), que se apoia fortemente no planejamento e na manipulação simbólica para implementar o método tradicional de processamento seqüencial de informações. Algo similar ocorre quando os problemas relacionados à robótica são abordados: existem diferentes paradigmas que podem servir de base para as mesmas aplicações.

Tomemos como exemplo DEVA, um braço de robô criado por alunos do curso de Automação Industrial do Colégio Impacto, em Araçatuba-SP, entre fevereiro de 2000 e agosto de 2001, projeto que tivemos a oportunidade de coordenar. DEVA é controlado a partir de métodos tradicionais, que envolvem *telemetria* e *automação* de processos. Ele foi projetado para realizar tarefas repetitivas, em um ambiente estático e de modo discreto. Como o nosso propósito imediato é realçar o método usado para controlar DEVA, maiores detalhes sobre seus controladores e aparato sensório-motor podem ser encontrados no *Apêndice A* dessa dissertação. Por não *precisar* de muita riqueza de informações sensórias, DEVA (ou melhor, o seu *software* controlador) quase não as recebe do ambiente, com exceção de um aviso proprioceptivo³ de fechamento de suas pinças (responsáveis por agarrar algum objeto) ou de aviso que uma posição limite foi alcançada. O sistema controlador é responsável pela deliberação a respeito dos passos a serem executados, sendo que qualquer decisão é tomada com base em diretivas e precondições inseridas por seus programadores.

A maneira como descrevemos a organização da arquitetura de DEVA (presente no apêndice A), bem como o funcionamento de seu controlador, caracterizam o *paradigma simbólico*, utilizado para a sua construção e controle. Usando-se a mesma arquitetura, ou adicionando-se alguns componentes, DEVA também poderia ser controlado a partir de um

³ O termo comumente utilizado para a realimentação, capaz de influenciar os estados de um sistema com informações adquiridas no ambiente, é *feedback*.



conjunto de redes neurais artificiais, responsáveis pela coordenação de seu aparato sensório-motor. Contudo, a utilização das redes neurais para a realização de processos deliberativos é de difícil implementação, o que provavelmente levaria à adoção de um outro paradigma. Neste caso, ao invés de ser parado bruscamente por um aviso proprioceptivo da chegada ao final da trajetória (por exemplo: girar sua base em 180°), DEVA poderia ser modelado a partir de outras técnicas, como por exemplo calcular, seqüencialmente, um número predeterminado de passos a partir de seu estado atual, até chegar em seu estado final, para novamente realizar as tarefas a ele atribuídas. Também poderiam ser adicionados alguns tipos de *feedback*, que possibilitariam variações nos ajustes dos movimentos de DEVA em modos bastante variados. Os dois paradigmas a que nos referimos acima são o paradigma híbrido deliberativo/reactivo e o paradigma deliberativo, que serão objeto de análise das seções que se seguem.

Na seção 2.2, descrevemos como os principais paradigmas da robótica são classificados, em termos da *organização das suas primitivas ou funções*. Em seguida, apresentamos a noção de arquiteturas, que julgamos relevante para o estudo dos robôs inteligentes.

Na seção 2.3, descrevemos os paradigmas deliberativo e reativo, para finalmente, na seção 2.4, realizarmos um balanço do alcance e limites desses paradigmas no estudo do comportamento inteligente.

2.2 Os paradigmas da robótica contemporânea

Existem atualmente três principais paradigmas relacionados à robótica, classificados como *paradigma hierárquico* (também conhecido como *deliberativo*), *paradigma reativo* e



ROBOT PRIMITIVES	INPUT	OUTPUT
SENSE	Sensor data	Sensed information
PLAN	Information (sensed and/or cognitive)	Directives
ACT	Sensed information or directives	Actuator commands

Figura 2.1: Primitivas ou funções gerais dos robôs, definidas em termos de *inputs* e *outputs* (adaptado de Murphy [2000, p. 6]). As primitivas do robô, classificadas em percepção, planejamento e ação (*robot primitives: SENSE, PLAN, ACT*).

paradigma híbrido deliberativo/reactivo (como o próprio nome sugere, este último é fruto da combinação entre os dois primeiros). Esses paradigmas são definidos por três tipos de funções ou primitivas principais: *SENSE, PLAN, ACT*⁴. Vale lembrar que alguns autores fazem uma divisão que inclui mais uma classe de função, ou seja, a *aprendizagem*. Murphy (2000, p. 12) aponta que ainda não existem implementações reais que incorporem esta primitiva, e que portanto ainda não houve uma mudança de paradigma propriamente dita. Contudo, na última seção deste capítulo, destinada à *discussão* sobre o alcance e limites dos modelos em questão, inserimos algumas suposições a respeito do potencial desta primitiva.

Murphy (2000, p. 5-6) sugere que são duas as maneiras para se descrever um paradigma na robótica: a primeira diz respeito à forma como as três primitivas (*SENSE, PLAN, ACT*) se relacionam:

Se uma função adquirir informações a partir dos sensores do robô, produzindo uma saída útil para outras funções, então esta função está dentro da categoria *SENSE*. Se a função adquirir informações (tanto a partir dos sensores como de seu conhecimento predeterminado do mundo) produzindo uma ou mais tarefas para que o robô execute (vá até o fim da sala, vire à esquerda, prossiga mais 3 metros e pare), esta função está dentro da categoria *PLAN*. Funções que produzem comandos de

⁴ Preferimos não traduzir as três primitivas (*SENSE/PLAN/ACT*) devido ao fato da primitiva *SENSE* assumir diferentes interpretações (percepção ou sentido). Deste modo, consideramos esta nota conveniente para afirmar que, na robótica, a primitiva *SENSE* é usada no sentido de captar estímulos físicos do ambiente através dos sensores disponíveis na arquitetura do robô.

saída para motores ou atuadores estão na categoria *ACT* (vire 98° no sentido horário, em uma velocidade de 0.2mps).⁵ [Conforme mostra a figura 2.1⁶]

A segunda maneira de descrever um paradigma seria pela forma como os dados percebidos são processados e distribuídos através do sistema⁷. Apresentamos, mais adiante, os detalhes acerca do processamento e distribuição da informação em cada paradigma, mas no momento é importante destacar que o uso de processamento pode ser local para determinadas funções, ou então as informações adquiridas do meio físico podem ser processadas e combinadas com as informações predeterminadas.

O ambiente é um dos componentes que influenciam o comportamento dos organismos em geral, sendo capaz de reduzir ou ampliar suas potencialidades. Autores como Arkin (1998), Nolfi (1998), Brooks (1999) e Murphy (2000) procuram estender o papel do ambiente, em ambos os casos, no estudo do comportamento de seres artificiais (os chamados *behavior-based robots*).

Na seção 2.2, destinada ao estudo do paradigma reativo, o papel desempenhado pelo ambiente no desenvolvimento dos robôs será comentado em maiores detalhes. Contudo, para

⁵If a function is taking in information from the robot's sensors and producing an output useful by other functions, then that function falls in the *SENSE* category. If the function is taking in information (either from sensors or its own knowledge about how the world works) and producing one or more tasks for the robot to perform (go down the hall, turn left, proceed 3 meters and stop), that function is in the *PLAN* category. Functions which produce output commands to motor actuators fall into *ACT* (turn 98°, clockwise, with a turning velocity of 0.2mps).

⁶Os sinais de entrada (*INPUT*) da primitiva *SENSE*, adquiridos pelos sensores do robô (*Sensor data*), serão convertidos em sinais de saída (*OUTPUT*), em forma de informação captada (*Sensed information*). A primitiva de planejamento (*PLAN*) tem seus sinais de entrada em forma de informação cognitiva ou adquirida do meio (*Information: cognitive and/or sensed*), que é convertida nas diretivas (*Directives*) do robô, compostas por seus planos de ação, além de mapas e todas as informações necessárias à realização de suas tarefas. A primitiva responsável por realizar os movimentos do robô (*ACT*) a partir das informações percebidas do meio ou das primitivas de planejamento (*Sensed information or directives*), produz como saída comandos aos atuadores (*Actuator commands*) do robô.

⁷Acreditamos que a presente nota seja importante para pensarmos na validade dessa definição perante a Teoria dos Sistemas Dinâmicos e da Teoria da Informação. É possível definir a fronteira de um sistema (neste caso, um robô), uma vez que este é apenas um dos componentes do sistema, junto com o meio onde ele está inserido? Em seres humanos e outros agentes culturais, esta é uma tarefa difícil e ainda não resolvida. Sob quais perspectivas da Teoria da Informação devemos observar como a informação é tratada nos diferentes paradigmas da robótica? Entendemos que um estudo aprofundado dessas questões pode levar a avanços significativos na área da robótica.

que possamos entender melhor os vários paradigmas, julgamos importante o tratamento do conceito de arquiteturas.

2.2.1 Arquiteturas

Até este ponto esboçamos uma visão geral do conceito de paradigma, bem como sua tipologia relacionada à robótica e a maneira como ela é descrita. Para conhecer um pouco mais os paradigmas da robótica, detalharemos algumas arquiteturas que julgamos significativas em cada um deles.

A importância de uma arquitetura aparece quando pensamos na organização dos componentes de um robô, sua disposição, o modo como eles iriam se relacionar e ser controlados. Murphy (2000, p. 11) faz uma analogia entre as arquiteturas de robôs e de casas. A autora observa que não existem *designs* corretos para a construção de casas, apesar de muitas delas compartilharem os mesmos componentes (como cozinhas, banheiros, paredes, pisos, portas, etc). O mesmo ocorre durante o *design* de robôs, uma vez que seus componentes podem ser organizados a partir de arquiteturas diferentes, ainda que todas elas estejam fundadas no mesmo paradigma. Se transportarmos este exemplo para a robótica, podemos conceber a construção de arquiteturas baseadas em redes neurais artificiais nos paradigmas aqui investigados. Contudo, é conveniente ressaltar que a escolha inapropriada de uma arquitetura pode implicar num esforço maior para a realização de algumas tarefas.

Uma arquitetura fornece os princípios de organização de um sistema de controle. Entretanto, ao fornecer uma estrutura, ela impõe limitações às maneiras como o problema do controle pode ser resolvido (MURPHY, 2000, p. 10).



Neste mesmo contexto, Arkin (1998, p. 124) afirma que: “arquiteturas de robôs são sistemas de *software* e especificações que fornecem linguagens e ferramentas para a construção de sistemas baseados em comportamentos”⁸.

Seguindo os pressupostos acima, entendemos que as diferentes arquiteturas resultam da construção ou *design* de algum objeto, concreto ou virtual, essencialmente a partir do mesmo conjunto de componentes. A diferença entre uma arquitetura e outra se dá pelo modo como os componentes de um objeto se relacionam, se comunicam ou como se comportam quando entram em contato. O ponto em questão é: a partir de um mesmo conjunto de componentes, pode-se construir objetos com arquiteturas diferentes. Murphy (2000, p. 11) sugere que o estudo de algumas arquiteturas representativas e as instâncias de suas aplicações em robôs facilitaria a compreensão das diferentes maneiras como os componentes e ferramentas associados aos paradigmas podem ser usados na construção de robôs artificialmente inteligentes. Em concordância com essa linha de pensamento, fazemos, nas seções seguintes, uma análise dos paradigmas da robótica, além de um estudo de algumas das suas implementações.

2.3 Análise dos paradigmas da robótica contemporânea

Tanto Arkin (1998) quanto Murphy (2000) adotam um conjunto peculiar de critérios para analisar as implementações de diversas arquiteturas e os respectivos paradigmas em que elas se baseiam. Sua justificativa é que, conhecendo bem as arquiteturas, teríamos condições de avaliar com um certo grau de precisão se determinada arquitetura seria eficiente ou não na

⁸ *robotic architectures [are] software systems and specifications that provide languages and tools for the construction of behavior-based systems.*



implementação de determinadas aplicações. Os critérios adotados para a análise de arquiteturas de robôs são: (a) modularidade, que está relacionada aos princípios de construção do *software* do robô; (b) ambiente de metas, que está relacionado à precisão na execução de tarefas específicas; (c) portabilidade, que irá medir o grau de dificuldade do robô em se ajustar a aplicações diversas; (d) robustez, que diz respeito à vulnerabilidade do robô, ou à sua capacidade de trabalhar perante possíveis falhas.

Os critérios acima relacionados podem ser utilizados para indicar alcances e limites de algumas arquiteturas de robôs. Apesar de não ser nosso principal objetivo a quantificação da eficiência dos paradigmas ou das arquiteturas, julgamos que esses critérios indicam alternativas teóricas para a definição das funções indicativas de sucesso no desempenho dos robôs estudados na robótica evolucionária, que será objeto de investigação no capítulo 3. Antes porém, faremos uma breve apresentação dos paradigmas da robótica, iniciada pelo paradigma deliberativo ou hierárquico.

2.3.1 O paradigma deliberativo ou hierárquico

O paradigma hierárquico, que vigorou a partir de 1967 até 1990, se apóia fortemente no *planejamento*, uma vez que ele surgiu e foi desenvolvido por pesquisadores da vertente tradicional da Inteligência Artificial. Entre suas principais características estão a operação num estilo *top-down*, seqüencial e metódica, usada para a construção de *modelos globais de mundo*, que servem de base para o planejamento de todas as ações dos robôs que operam neste paradigma. Sua principal vantagem, conforme aponta Murphy (2000, p. 61), é permitir a ordenação das relações entre percepção, planejamento e ação (*SENSING, PLANNING, ACTING*).



Estes modelos são estruturados a partir de informações *relevantes* predefinidas por um programador (axiomas), informações do ambiente adquiridas através de sensores, e de qualquer conhecimento adicional que possa ser necessário ao cumprimento de uma tarefa. Em resumo, estes modelos resultariam da combinação entre um conjunto de axiomas e os dados estáticos sobre um conjunto de objetos do mundo (representados como predicados, funções que avaliam algo como verdadeiro [*TRUE*] ou falso [*FALSE*]), inclusive o robô (MURPHY, 2000, p. 42, 43 e 47). Assim, a forma de *representação* da informação percebida, dentre outros fatores, se torna um dos pontos fundamentais do paradigma em questão. Como o modelo de mundo precisa ter todas as informações necessárias para que o robô possa agir, estas representações servem como parâmetros centrais para que os estados do mundo sejam modificados de modo que o robô atinja os objetivos para os quais ele foi programado.

Resumidamente, podemos dizer que o paradigma deliberativo se funda na representação do ambiente, em termos de um mapa ou *modelo global de mundo*. A figura 2.2 representa o funcionamento de um robô baseado neste paradigma: primeiro, ele constrói um mapa global de mundo, com base em informações adquiridas do mundo físico por seus sensores (*SENSE*). Em seguida, baseando-se neste mapa, o robô “planeja” todas as diretivas necessárias para alcançar seu objetivo (*PLAN*), e então passa a executá-las, passo a passo, como se estivesse de olhos fechados (*ACT*). Terminada esta sequência *SENSE/PLAN/ACT*, o robô reinicia uma nova etapa, verificando o estado atual de seu *modelo de mundo* (que pode ser modificado por seus movimentos ou pela dinâmica do ambiente). A partir do segundo *loop* de execução, as diretivas são modificadas com base nas novas informações adquiridas (MURPHY, 2000, p.43).

Dentre os principais problemas desse paradigma, sempre estiveram presentes a necessidade da *suposição de um mundo fechado*, o *problema dos frames* e os *altos custos computacionais* (MURPHY, 2000). Como veremos na próxima seção, o principal argumento



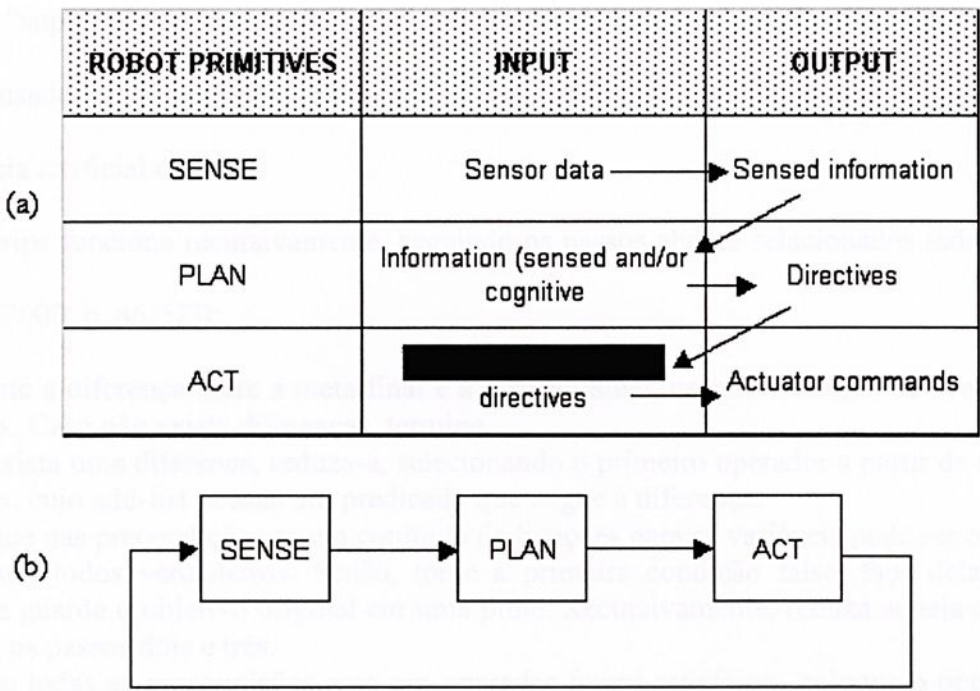


Figura 2.2: (a) Organização da informação no paradigma Hierárquico; (b) ilustração da linearidade na interação entre as três primitivas desse paradigma. (Adaptado de Murphy [2000, p. 43])

dos pesquisadores do paradigma reativo diz respeito à limitação da informação “percebida” pelo robô, que não pode estar ligada diretamente aos comandos dos seus atuadores, uma vez que, após a percepção, existe sempre uma etapa para o planejamento da ação. Segundo Brooks (1999), são comuns na natureza os casos que não exigem nenhum tipo de deliberação para que ocorra uma ação de movimento. Assim sendo, mesmo com a evolução da capacidade de processamento advinda das novas tecnologias, o paradigma hierárquico continua trazendo resultados insatisfatórios perante muitas tarefas que requerem respostas rápidas, próprias de um agente inserido em um ambiente real, dinâmico e complexo.

Nessa perspectiva, podemos afirmar que existem dois responsáveis centrais pela fragilidade da maioria dos sistemas baseados no paradigma hierárquico: (1) a suposição de um mundo fechado (*closed world assumption*) e (2) o problema dos *frames* (HASELAGER [1997]; MURPHY [2000]).

Um exemplo clássico é apresentado por Murphy (2000, p. 44) para ilustrar o problema chamado “suposição de mundo fechado” (*closed world assumption*). Trata-se de *Strips*⁹, um método usado para controlar *Shakey*, um dos primeiros robôs móveis baseados em inteligência artificial clássica.

Strips funciona recursivamente, seguindo os passos abaixo relacionados (adaptado de Murphy [2000, p. 46-52]):

1. Compute a diferença entre a meta final e a posição atual, usando a função de avaliação de diferenças. Caso não exista diferenças, termine.
2. Caso exista uma diferença, reduza-a, selecionando o primeiro operador a partir da tabela de diferenças, cujo *add-list* possua um predicado que negue a diferença.
3. Verifique nas precondições se um conjunto de ligações para as variáveis pode ser obtido, os quais sejam todos verdadeiros. Senão, tome a primeira condição falsa, faça dela o novo objetivo e guarde o objetivo original em uma pilha. Recursivamente, reduza aquela diferença repetindo os passos dois e três.
4. Quando todas as precondições para um operador forem satisfeitas, coloque o operador na pilha de planejamento e atualize uma cópia do modelo de mundo. Então *retorne* para o operador com a precondição falha, de modo que ele possa aplicar seu operador ou agir recursivamente em outra precondição que tenha falhado.

É fato corriqueiro entre os programadores, que eles esqueçam ou que não sejam capazes de inserir em um modelo de mundo fechado - conforme a complexidade deste mundo aumenta - todos os detalhes necessários à perfeita execução dos objetivos desejados. Este fato é responsável pela fragilidade dos sistemas que assumem a necessidade de modelos de mundo fechados (MURPHY, 2000; ARKIN, 1998; BROOKS 1999), uma vez que os seres humanos não podem pensar em todas as possíveis necessidades de ação em um sistema. Murphy (2000, p. 53) também atenta para o fato de que, mesmo que um brilhante programador conseguisse inserir todas as informações necessárias em seu modelo de mundo, o resultado seria um modelo enorme, aumentando proporcionalmente os custos computacionais.

Outra limitação dos modelos de mundo fechado consiste na dificuldade de se especificar algoritmos baseados em funções recursivas capazes de atuar eficientemente

⁹ O Apêndice B descreve com maiores detalhes uma aplicação que usa Strips como algoritmo controlador. Neste apêndice também aparecem alguns termos como *add-list*, *tabela de diferenças*, entre outras.

perante as mudanças do mundo: voltando a pensar nas primitivas do paradigma hierárquico, lembramos que todo o planejamento para a execução de uma ação é feito com base em um modelo de mundo estático, que é construído a partir das informações adquiridas do ambiente através dos sensores do robô. Uma vez obtido o plano de ação, as instruções são enviadas aos atuadores do robô, que passam a executá-las. Pequenas modificações no ambiente poderiam comprometer o plano de ação planejado, já que as diretivas foram geradas com base num modelo de mundo extraído em um outro momento, e cujas informações encontram-se defasadas.

Para ilustrar o problema acima, pensemos em *Shakey* tentando atravessar uma avenida apoiado em informações extraídas do ambiente (*SENSING*) – por exemplo, se o semáforo está indicando a passagem de pedestres, se não existem obstáculos na faixa de pedestres, se não existem obstáculos em seu caminho ou carros ultrapassando o sinal em alta velocidade. Uma vez que estas informações foram extraídas do ambiente, um algoritmo qualquer, responsável por guiar *Shakey*, constrói um modelo de mundo, e a partir dele traça um plano de ação (*PLANNING*). Se as informações coletadas indicassem a ausência de obstáculos na faixa de pedestres, semáforo indicando a passagem de pedestres, e a ausência de carros na avenida, *Shakey* iniciaria a travessia da rua, ou seja, passaria a executar seu plano de ação (*ACTING*). Mas após iniciar a travessia, qual seria a reação de *Shakey* se surgissem alguns carros que ignorassem o sinal fechado? Infelizmente, *Shakey* se tornaria mais uma vítima do trânsito. Isso aconteceria porque, no paradigma hierárquico, uma vez iniciado um plano de ação, enquanto todas as suas etapas não forem executadas, as funções responsáveis pela aquisição de informações no meio não voltam a funcionar.

Murphy (2000) argumenta que o problema dos *frames* é acentuado em arquiteturas que se apóiam em *modelos globais de mundo*. Isso se deve ao fato de que, para executar as tarefas mais simples, os robôs baseados no paradigma deliberativo precisam processar as mesmas

informações que seriam processadas durante a execução de tarefas mais complexas. Em ambos os casos, o robô delibera sobre todos os possíveis detalhes, inclusive aqueles que não são relevantes para a execução daquela ação específica. É impossível para o programador inserir algum critério de relevância eficiente, que selecione apenas as informações relevantes à execução de tarefas em sistemas deliberativos.

Se considerarmos o problema que envolve as tentativas de representar, de maneira tratável computacionalmente, uma determinada situação de um mundo real e dinâmico, teremos mais facilidade em entender o problema dos *frames*. Murphy (2000, p. 53) afirma que “quando os pesquisadores da robótica dizem que *um robô deve funcionar em um mundo aberto*, eles assumem que a suposição de mundos fechados não pode ser aplicada àquele domínio em particular”¹⁰. Segundo ela, a idéia de representar o mundo formalmente, mantendo esta representação atualizada a cada modificação ocorrida no mundo real, não é muito intuitiva. Isto se deve, dentre outros fatores, ao fato dos axiomas responsáveis pela estrutura do mundo se tornarem numerosos demais dentro de qualquer domínio real, o que potencialmente aumenta em muito o problema dos *frames*.

Em resumo, dentre as principais características do paradigma hierárquico/deliberativo se destacam o uso das primitivas *SENSE/PLAN/ACT*, cuja operação se baseia fortemente no planejamento (*PLANNING*). Tal planejamento é feito a partir de mapas ou modelos globais de mundo, construídos a partir da extração das informações disponíveis no ambiente e também daquelas predefinidas pelos programadores. Dentre os principais problemas do paradigma hierárquico/deliberativo, destacam-se o problema dos *frames*, o problema da suposição de mundos fechados, e os altos custos computacionais. Devido ao fato do seu planejamento estar sempre voltado para a execução precisa das tarefas (*niche targetability*), as implementações de sistemas que seguem o paradigma hierárquico acabam pagando um preço alto: sofrem pela

¹⁰ *when roboticists say that ‘a robot must function in the open world’, they are saying the closed world assumption cannot be applied to that particular domain.*

dificuldade de escolha dos princípios de construção do robô (*modularity*) e suas limitações em operar em situações diversas (*portability*). Dadas essas dificuldades, os sistemas tornam-se frágeis e suscetíveis a falhas (*robustness*).

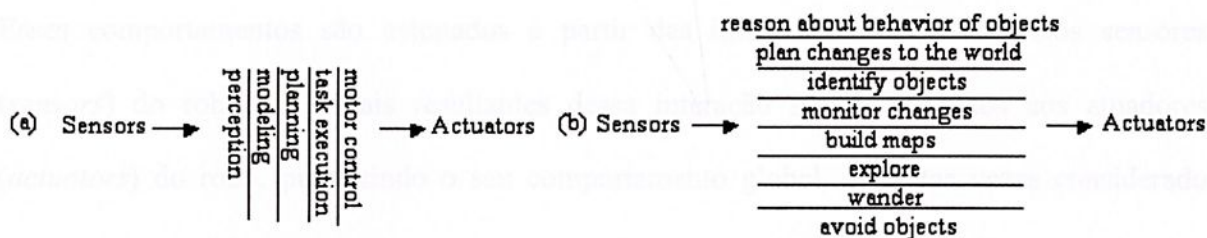
Nas décadas de 1980 e 1990, com o intuito de tratar os problemas acima relacionados a partir de uma outra abordagem, surgem pesquisas que buscam aplicar algumas técnicas sugeridas pela biologia e pelas ciências cognitivas. Em outras palavras, os cientistas passam a buscar inspiração na biologia e em estudos mais recentes sobre o comportamento dos seres vivos. Tais pesquisas iriam dar origem ao paradigma reativo, apresentado na próxima seção.

2.3.2 O paradigma reativo

As primeiras hipóteses propostas pelos precursores do paradigma reativo surgem num contexto um tanto quanto atribulado. Em meio à resistência acirrada por parte de muitos pesquisadores do paradigma deliberativo, Brooks, dentre outros, inicia suas pesquisas numa nova área. O objetivo de Brooks, um dos proponentes mais famosos do paradigma reativo, era questionar o paradigma dominante (o deliberativo), com o intuito de repensar os princípios responsáveis pela organização da inteligência.

Insatisfeitos com os fracassos das aplicações que se apoiavam em modelos globais de mundo e motivados pela ânsia da criação de robôs capazes de agir inteligentemente no mundo, os pesquisadores do paradigma reativo inserem em suas pesquisas algumas inspirações advindas da biologia e das ciências cognitivas.

Brooks (1999, p. 4-5) faz referência a duas possíveis abordagens para a resolução dos problemas por ele trabalhados: a primeira abordagem para a construção de sistemas de



Figuras 2.3(a): ilustração do modelo de decomposição vertical, usado tradicionalmente no paradigma deliberativo. e 2.3(b): ilustração do modelo, proposto por Brooks, da decomposição em camadas horizontais, que atuam paralelamente. (Adaptado de Brooks [1999, p. 4-5]).

controle, aquela tradicional e baseada nos moldes da inteligência artificial clássica, consiste na decomposição do problema em módulos funcionais, reunidos *verticalmente em camadas seqüenciais*, conforme mostra a figura 2.3(a). Nela, podemos visualizar que as informações adquiridas pelos sensores (*sensors*) são transmitidas, seqüencialmente, para as camadas de percepção (*perception*), modelagem (*modeling*), planejamento (*planning*), execução de tarefas (*task execution*) e controle motor (*motor control*). Cada camada processa as informações e a transmite para a camada seguinte. A camada de controle motor transmite os sinais processados para os atuadores (*actuators*) do robô.

A segunda abordagem para a construção de sistemas de controle, baseada em uma decomposição do problema em comportamentos ajustados em camadas *horizontais*, foi chamada por Brooks de “comportamentos para a execução de tarefas” (*task achieving behaviours*). Melhor visualizado na figura 2.3(b), este tipo de decomposição tem suas implementações descritas em *hardware*, possibilitando respostas mais rápidas e trazendo um conjunto de vantagens que envolvem, segundo Brooks (1999, p. 5), robustez, facilidade de construção e de testes.

Conforme pode ser verificado na figura 2.3(b), cada camada é responsável por um comportamento específico, tais como: evitar objetos (*avoid objects*), perambular (*wander*), explorar (*explore*), construir mapas (*build maps*), monitorar mudanças (*monitor changes*), identificar objetos (*identify objects*), planejar modificações do ambiente (*plan changes to the*

world) e deliberar sobre o comportamento de objetos (*reason about behavior of objects*). Esses comportamentos são acionados a partir das informações captadas pelos sensores (*sensors*) do robô. Os sinais resultantes dessa interação são transmitidos aos atuadores (*actuators*) do robô, produzindo o seu comportamento global, e muitas vezes considerado emergente.

Um breve resumo dos principais pressupostos do paradigma reativo, proposto por Brooks, pode ser feito a partir dos cinco pontos que seguem:

- a. Eliminação de qualquer pressuposição da necessidade de modelos globais de mundo;
- b. Suposição de que o ambiente encontra-se entre os fatores que influenciam o comportamento dos organismos (e neste contexto são incluídos os seres artificiais).
- c. Eliminação da primitiva de planejamento (*PLANNING*) das arquiteturas dos robôs, associada a uma ênfase maior nas primitivas responsáveis pela percepção (*SENSING*) e ação (*ACTING*): os robôs são dispensados da responsabilidade de deliberação, o que garante uma economia dos custos computacionais.
- d. Ligação direta ou *acoplamento* entre as primitivas de percepção (*SENSING*) e ação (*ACTING*) do robô: através da eliminação do planejamento e a conexão direta entre os seus sensores e efetores, é possível ao robô reagir imediatamente aos estímulos adquiridos do meio;
- e. Construção de camadas de controle ajustadas horizontalmente, de modo que os graus de competência do robô possam aumentar gradativamente: os comportamentos complexos devem ser decompostos em ações independentes. Brooks (1999) chama de comportamentos (*behaviors*) o mapeamento das informações adquiridas pelos sensores em padrões de ação motora, os quais são usados para resolver problemas. A implementação dos robôs consiste, portanto, na inserção de um comportamento, seguida de testes exaustivos.

Uma vez que seu funcionamento foi considerado satisfatório pelo *designer*, uma nova camada de comportamento é inserida, paralelamente à camada já existente. Os testes são novamente iniciados, e assim, sucessivamente.

A combinação dos pontos acima enumerados garante um certo conforto com relação ao problema dos *frames*, uma vez que a eliminação dos modelos de mundo fechado possibilita que as representações ou conhecimentos preexistentes deixem de ser necessários.

Brooks sugere que se olharmos para a linha evolutiva dos seres biológicos, é possível encontrar alguma sustentação para as pesquisas dentro do paradigma reativo, ou seja, para a investigação de formas de comportamento inteligente em robôs que dispensem deliberação. No trecho abaixo, Brooks descreve brevemente a linha evolutiva das espécies, apontando vários momentos antes que algum tipo de deliberação ou forma convencional de representação do conhecimento fossem necessárias:

É instrutivo refletir sobre o modo pelo qual a evolução biológica na terra gastou o seu tempo. Entidades unicelulares surgiram a partir da *sopa primordial*, há mais ou menos 3,5 bilhões de anos. Um bilhão de anos se passaram até que as plantas fotossintéticas aparecessem. Após outro bilhão e meio, mais ou menos há 550 milhões de anos, os primeiros peixes e vertebrados surgiram, e então os insetos há 450 milhões de anos. Então as coisas começaram a acontecer rapidamente. Os répteis surgiram há 370 milhões de anos, seguidos pelos dinossauros e os mamíferos, há respectivamente 330 e 250 milhões de anos. Os primeiros primatas apareceram há 120 milhões de anos e os predecessores dos grandes macacos, há meros 18 milhões de anos. O homem surgiu em sua presente forma há mais ou menos 2,5 milhões de anos. Ele inventou a agricultura há apenas 10000 anos, vindo a escrever há menos de 5000 anos e a obter conhecimentos “especializados” apenas nos últimos séculos.¹¹(BROOKS, 1999, p. 81)

¹¹It is instructive to reflect on the way in which earth-based biological evolution spent its time. Single-cell entities arose out of the primordial soup roughly 3.5 billion years ago. A billion years passed before photosynthetic plants appeared. After almost another billion and a half years, around 550 million years ago, the first fish and Vertebrates arrived, and then insects 450 million years ago. Then things started moving fast. Reptiles arrived 370 million years ago, followed by dinosaurs at 330 and mammals at 250 million years ago. The first primates appeared 120 million years ago and the immediate predecessors to the great apes a mere 18 million years ago. Man arrived in roughly his present form 2.5 million years ago. He invented agriculture a mere 10,000 years ago, writing less than 5000 years ago and 'expert' knowledge only over the last few hundred years.

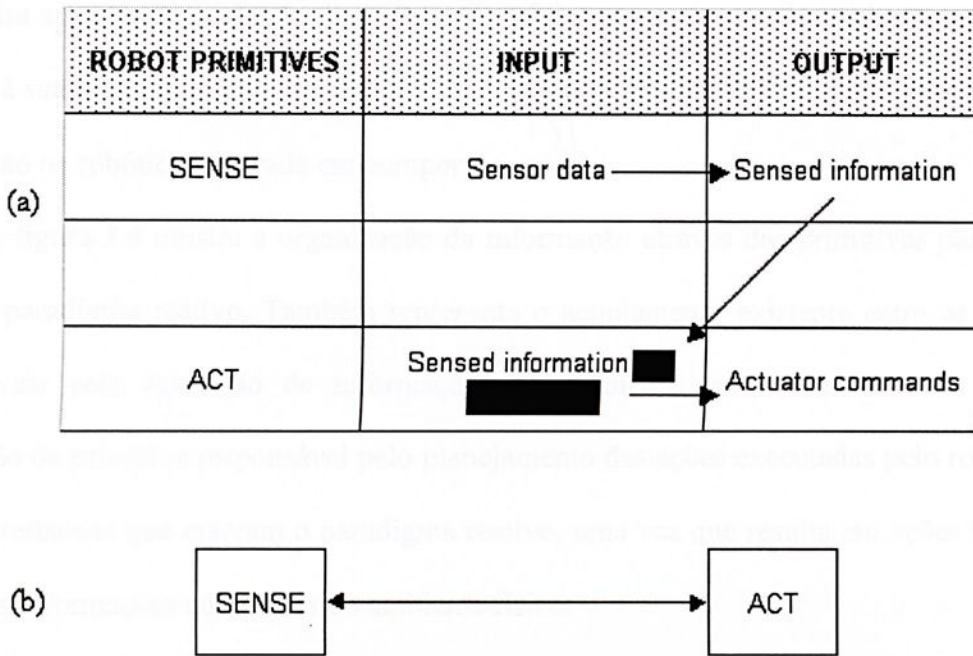


Figura 2.4: (a) Organização da informação através das primitivas (*robot primitives*) no paradigma reativo. A primitiva de percepção (*SENSE*) é formada por dados captados pelos sensores (*sensor data*) do robô, que são transformados em informação percebida (*sensed information*). As informações percebidas servem de entrada (*INPUT*) para a primitiva de ação (*ACT*), que enviará como saída (*OUTPUT*) os sinais de comando (*actuators commands*) diretamente aos atuadores do robô; (b) ilustração do acoplamento direto entre os sensores e atuadores neste paradigma (adaptado de Murphy [2000, p. 7-9]).

Brooks usa esta reflexão sobre a linha evolutiva para reforçar a hipótese de que as bases para o desenvolvimento e a evolução das espécies estão nas habilidades de locomoção, bem como na visão apurada ou quaisquer tarefas importantes para a sobrevivência e manutenção das espécies.

Entendemos que a mensagem transmitida por Brooks é que as investigações que envolvam a robótica inteligente devem seguir a seguinte estratégia: tentar construir robôs que evitem qualquer tipo de deliberação predeterminada. Isso levaria a uma linha de pesquisa que deixaria de lado o planejamento, para dar maior ênfase à percepção e ação. Segundo Brooks (1999), a grande ambição dessa linha de pesquisa seria construir robôs que alcancem, por estes métodos, graus de inteligência compatíveis aos dos insetos.

Resumidamente, consideramos que o objetivo de Brooks seria construir robôs capazes de se manterem no mundo, percebendo o ambiente que os circunda e reagindo aos estímulos

de maneira apropriada, podendo, inclusive, modificar este ambiente de modo a torná-lo mais propício à sua auto-manutenção. Na figura 2.4, Murphy (2000, p. 7-9) ilustra a organização da informação na robótica inspirada em comportamentos.

A figura 2.4 mostra a organização da informação através das primitivas *percepção* e *ação* no paradigma reativo. Também representa o acoplamento existente entre os sensores, responsáveis pela aquisição de informações no ambiente, e os atuadores do robô. A eliminação da primitiva responsável pelo planejamento das ações executadas pelo robô é uma das características que marcam o paradigma reativo, uma vez que resulta em ações imediatas perante as informações adquiridas do ambiente físico.

Brooks (1999, p. 64) indica as três principais suposições que marcaram o início das pesquisas sobre o paradigma reativo: (a) é possível que um observador descreva legitimamente as crenças¹² e os objetivos de um agente¹³, mesmo que este agente não manipule estruturas de dados simbólicos em tempo de execução. Uma especificação simbólica formal do *design* do agente poderia ser compilada posteriormente, produzindo eficientes programas de robôs; (b) a maioria das ações realizadas pelas pessoas em seu cotidiano não se relaciona com planejamentos, nem é direcionada à resolução de problemas (no sentido de *problem-solving*, conforme indicado na seção sobre o paradigma deliberativo). Ao invés disso, são rotinas de interação perante um mundo dinâmico; (c) para testar as hipóteses sobre inteligência, é importante que sejam construídos robôs com sensores reais, a partir dos quais eles possam operar em ambientes dinâmicos. Modelos globais de mundo, além de impossíveis de se obter, não são necessários para que os agentes atuem de modo

¹² Na filosofia e nas ciências relacionadas ao estudo do comportamento, os termos *crenças* e *objetivos* foram tradicionalmente tratados como atributos exclusivos dos seres vivos. Ambos os termos ganham um sentido peculiar quando são inseridos no contexto das pesquisas sobre robótica. Armstrong (1981) sugere que o termo *crença* deva ser entendido como *o estado do sistema que o habilita a agir*. Esta interpretação é condizente com o pensamento dos pesquisadores da robótica.

¹³ Em 1986 já existia uma forte tendência em se chamar os seres artificiais (robôs ou seres virtuais) de agentes. Esta tendência permanece até hoje, mas possui divergências com o sentido filosófico da palavra.

competente. Muitas das ações dos agentes são decomponíveis – um tipo de *inteligência coerente pode emergir a partir de subcomponentes independentes interagindo no mundo*.

Até esta parte da seção, resumimos o funcionamento, bem como os principais pressupostos e os objetivos das pesquisas em robótica que se apóiam no paradigma reativo. A seguir, faremos alguns comentários sobre as asserções (a), (b) e (c), descritas acima. Também indicaremos alguns pontos que consideramos importantes sobre as condições necessárias, descritas por Brooks, para que um robô possa ser considerado uma *Criatura* (*Creature*, como Brooks as chama).

As suposições (a) e (b) preconizam um novo pensamento no que tange os processos relacionados à inteligência. Conforme já foi exposto, o paradigma deliberativo é fortemente baseado no planejamento antes de qualquer ação. Por outro lado, qualquer tipo de deliberação ou conhecimento explícito ou predeterminado por programadores e *designers* deixa de fazer sentido no paradigma reativo. Ao invés disso, são valorizadas as ações *habituais*, ou seja, aquelas ações que se tornam *automáticas* devido à sua execução constante perante determinadas situações do cotidiano. Parte destes pressupostos também está presente em (c), mas o que julgamos mais importante enfatizar é o trecho que indica a emergência de inteligência coerente a partir da interação dos subcomponentes de um sistema e o ambiente.

2.4 Discussão

Como mencionado, *percepção* e *ação* caracterizam as primitivas nas quais o paradigma reativo se apoia. Mais que caracterizá-las simplesmente, ele as faz *acopladas* através da interação prática. Isso significa que no paradigma reativo, percepção e ação devem

ser entendidas como um conjunto indissociável, de modo que todos os movimentos executados pelo robô resultam de sua interação com o meio. Este par irá se configurar em comportamentos, nos quais os efetores, ou atuadores, respondem diretamente às informações perceptíveis do ambiente, sem que haja a mediação de uma camada de planejamento.

Mas até que ponto podemos afirmar que novos comportamentos (sugeridos por Brooks como emergentes) podem surgir pela interação entre os subcomponentes dos robôs reativos e o ambiente?

Brooks (1999, p. 86) indica quatro características necessárias à criação de seres artificiais. Entendemos que estes requisitos sejam atendidos em boa parte dos robôs reativos, mas articulamos, após cada uma das características, algumas observações que julgamos importantes, as quais indicaremos através da abreviação (OI):

a. *Uma Criatura deve agir apropriadamente e em tempo real com as mudanças em seu ambiente dinâmico*¹⁴;

OI: As *Criaturas* são capazes de responder de forma imediata aos desafios apresentados pelo ambiente. Conforme já foi apresentado, essa característica se dá pelo acoplamento direto entre os sensores e os efetores do robô, resultado da eliminação da primitiva responsável pelo planejamento nos robôs reativos.

b. *Uma criatura deve ser robusta com respeito ao seu ambiente; pequenas modificações nas propriedades do ambiente não devem levar o seu comportamento ao colapso total; ao invés disso, deve ocorrer uma mudança gradual nas suas capacidades, acompanhando as mudanças no ambiente;*¹⁵

OI: Os robôs reativos possuem desempenhos mais eficientes que os robôs hierárquicos diante de mudanças no ambiente, pois os últimos sempre se deparam com os problemas que

¹⁴ *A Creature must cope appropriately and in a timely fashion with changes in its dynamic environment;*

¹⁵ *A Creature should be robust with respect to its environment; minor changes in the properties of the world should not lead to total collapse of the Creature's behavior; rather one should expect only a gradual change in capacities of the Creature as the environment changes more and more;*

acompanham a suposição de modelos globais de mundo. Contudo, sabemos que o ambiente está em constante modificação. Uma das características responsável pelo sucesso das espécies diz respeito à flexibilidade: os organismos, em geral, são flexíveis a ponto de, reciprocamente, modificarem o ambiente, ao mesmo tempo em que são modificados por ele. Maturana (2000) ilustra este processo, que envolve uma história de interações, um contexto, através do seguinte exemplo: uma pessoa vai comprar um par de sapatos. Por achar um modelo muito confortável, acaba comprando dois pares iguais, e guarda um deles. Quando o primeiro par fica velho, a pessoa se decepciona ao perceber que o par que foi guardado já não é mais confortável como antes. Por outro lado, o par antigo permaneceu confortável e moldou-se conforme as modificações dos pés da pessoa através do tempo. Analogamente, os robôs puramente reativos, por não serem capazes de acompanhar as modificações presentes no ambiente, se tornam ineficientes e vulneráveis perante suas modificações.

*c. Uma Criatura deve ser capaz de manter tarefas diversas e, dependendo das circunstâncias em que se encontrar, modificar aquela tarefa específica que está sendo realizada; assim, ela tanto pode se adaptar às necessidades imediatas, quanto aguardar por circunstâncias mais apropriadas;*¹⁶

OI: Como as camadas de comportamento dos robôs reativos são organizadas paralelamente, em dados momentos um comportamento específico pode ser inibido, reforçado, ou mesmo dar lugar a um novo tipo de comportamento que não esteja especificado em nenhuma camada. Entretanto, não é possível para os robôs reativos a inserção de novas seqüências de comportamentos em tempo de execução, dada a sua implementação em *hardware*.

*d. Uma Criatura deve realizar algo no ambiente; ela deve ter algum propósito ou fim.*¹⁷

¹⁶ *A Creature should be able to maintain multiple goals and, depending on the circumstances it finds itself in, change which particular goals it is actively pursuing; thus it can both adapt to surroundings and capitalize on fortuitous circumstances;*

¹⁷ *A Creature should do something in the world; it should have some purpose in being.*

OI: Em que sentido podemos afirmar que os robôs reativos possuem metas, ou perseguem objetivos? Qual é a natureza ontológica das funções por eles executadas? Concordamos que os robôs reativos são capazes de agir sobre o ambiente, mas os princípios que regem suas ações não são os mesmos daqueles que regem as ações dos organismos em geral. Apoiados na teoria de Maturana e Varela (2002), retomaremos estas questões no último capítulo. Temporariamente assumimos que os robôs reativos possuem um certo “propósito”, mas que este propósito está vinculado àquelas funções que levaram seu *designer* a idealizá-lo. Concordamos, ainda, que os robôs reativos também podem apresentar comportamentos emergentes, em termos de funcionalidade não programada ou *funcionalidade emergente* (STEELS [1990]; WILLEMS e HASELAGER [2003]; CLARK [2001]), um tipo de função que não foi idealizada pelos *designers* do robô, mas que pode ser classificada como coerente aos olhos do observador.

Steels (1990, p. 451) define a funcionalidade não programada (*emergent functionality*) como sendo “uma função que não foi alcançada diretamente por um componente ou um sistema hierárquico de componentes, mas indiretamente pela interação entre os componentes mais primitivos do sistema e o ambiente”¹⁸. Além disso, conforme indica Clark (2001), a funcionalidade não programada parece ser resultado de ajustes perante (*tailor-made*) os *problemas* em questão. Os experimentos feitos por Willems e Haselager (2003) ilustram este ponto: os autores observaram em suas simulações que os *robôs virtuais* que deveriam *competir* por alimento acabaram *cooperando* quando foram colocados em um ambiente com escassez de *comida* e um *predador* (virtuais) mais rápido que eles.

A grande limitação dos robôs puramente reativos talvez possa ser atribuída ao fato de que, dado um padrão qualquer de informações captadas pelos sensores dos robôs, seu

¹⁸ *Emergent functionality means that a function is not achieved directly by a component or a hierarchical system of components, but indirectly by the interaction of more primitive components among themselves and with the world.*

comportamento será invariante. Ao mesmo tempo em que esta característica garante estabilidade ao robô, de modo que ele obtenha um certo sucesso nos pontos (a), (b), (c) e (d) supracitados, ela é a causadora direta de sua maior carência: a falta de flexibilidade.

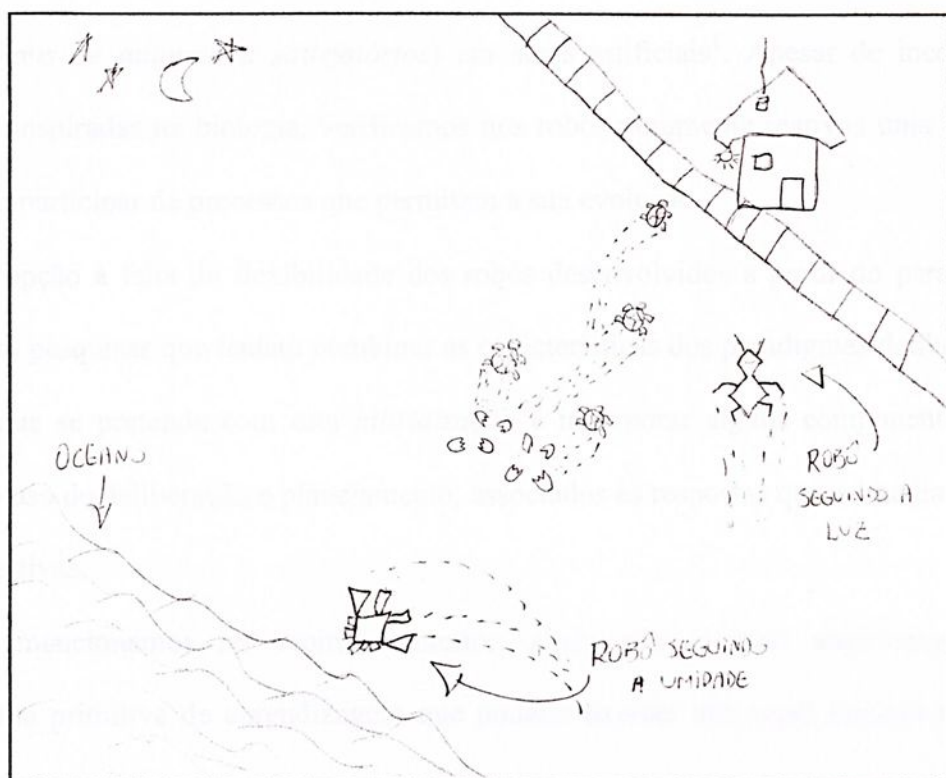
Murphy (2000, p. 85), sugere que a teoria de Gibson (1986) é interessante aos pesquisadores da robótica, pois uma *affordance* é diretamente perceptível, de modo objetivo. A autora explica que a percepção direta dispensa inferências, memória ou interpretação, gerando respostas quase instantâneas em computadores e robôs. Este é um ponto nevrálgico que deve ser discutido, mas por motivos estratégicos, só o faremos no último capítulo.

Além disso, deve ser observada a nossa insistência em destacar o papel desempenhado pelo comportamento na evolução dos organismos. Essa insistência decorre de nosso intuito de questionar a ocorrência, nos paradigmas estudados até este ponto, de *processos auto-organizados* que tenham um potencial considerável em termos evolutivos. Mas, uma vez ressaltado o papel da *emergência de novas funções* em decorrência dos processos evolutivos, existiria aqui uma controvérsia¹⁹. Retomaremos esta discussão nos próximos capítulos, juntamente com os pontos que surgirão sobre o paradigma híbrido e a robótica evolucionária.

¹⁹ Neste ponto, julgamos ser importante enfatizar um recorte que fizemos na definição do paradigma reativo, o qual esperamos ficar claro mais adiante. Algumas vezes, no decorrer do trabalho, nos referimos aos robôs reativos como *puramente reativos*, para indicar aquelas arquiteturas originadas no paradigma reativo, as quais não se baseiam no uso de redes neurais artificiais.



Capítulo 3 - O PARADIGMA HÍBRIDO E A ROBÓTICA EVOLUCIONÁRIA



A proper understanding of the intimate interdependence between an adaptive organism and its environment is essential to a clear view of what a science of an adaptive species can be like.

(Allen Newell and Herbert A. Simon)

3.1 Apresentação

No capítulo anterior, verificamos que os paradigmas deliberativo e reativo possuem alguns limites no que tange os processos evolutivos (que constituem condição necessária para se alcançar *graus de autonomia satisfatórios*) em seres artificiais¹. Apesar de incorporar características inspiradas na biologia, verificamos nos robôs puramente reativos uma grande dificuldade em participar de processos que permitam a sua evolução.

Como opção à falta de flexibilidade dos robôs desenvolvidos a partir do paradigma reativo, surgem pesquisas que tentam combinar as características dos paradigmas deliberativo e reativo. O que se pretende com esta *hibridização* é incorporar alguns componentes que possibilitem o uso de deliberação e planejamento, associados às respostas quase imediatas das arquiteturas reativas.

Como mencionamos no capítulo anterior, ainda não existem arquiteturas que incorporem uma primitiva de aprendizagem que poderia exercer um papel fundamental no desenvolvimento dos seres artificiais. Apoiados nos estudos realizados até o momento, concluímos, temporariamente, que a realização de auto-organização secundária não é possível em robôs puramente reativos ou deliberativos. Isto se deve ao fato de não encontrarmos neles indícios de alguma possibilidade de evolução, através de mecanismos de ajustes e aprendizagem. Por este motivo, os objetivos do presente capítulo são: (a) investigar se o paradigma híbrido deliberativo/reactivo fornece subsídios que possibilitem a realização de processos auto-organizados secundariamente em robôs e (b) verificar em que sentido podemos afirmar que os robôs podem evoluir. Argumentaremos aqui que a possível realização

¹ Apenas recapitulando, a noção de autonomia a que nos referimos é aquela que diz respeito ao processo de auto-organização no qual os robôs podem se envolver, tornando-se cada vez mais independentes do ambiente para realizar as suas ações.



de processos de auto-organização secundária seria suficiente para eliminar vários dos limites presentes nos paradigmas deliberativo e reativo.

Para verificar o objetivo (b), nos apoiaremos em exemplos da biologia, uma vez que foi a partir dela que surgiram muitas das inspirações que indicaram os avanços na robótica. Deste modo, o nosso próximo passo é apresentar, na *seção 3.2*, uma classificação dos tipos de comportamentos exibidos pelos organismos biológicos.

Na *seção 3.3* faremos uma análise das principais características do paradigma híbrido deliberativo/reativo, focalizando os seus aspectos relacionados aos processos de aprendizagem.

Na *seção 3.4* analisamos um conjunto de técnicas e mecanismos automáticos de evolução que se apóiam nos pressupostos centrais da auto-organização, a Robótica Evolucionária (*Evolutionary Robotics*).

Finalmente, concluímos o capítulo levantando questões acerca dos alcances e limites das técnicas atuais aplicadas à robótica para a realização de processos auto-organizados, as quais discutiremos no capítulo 4.

3.2 Classificação esquemática dos comportamentos nos organismos em geral

Desejamos recordar que um dos objetivos da pesquisa de Brooks (1999) é construir robôs reativos com graus de comportamento inteligente compatíveis aos dos insetos.

Como já verificamos na seção sobre o paradigma reativo, no capítulo anterior, o comportamento dos correspondentes robôs parece, num primeiro momento, eficiente no que diz respeito ao desempenho de certas atividades relacionadas à navegação. Apesar disso, as



respostas rápidas e livres de deliberação perante os eventos no ambiente se revelaram limitadas, quando comparadas ao comportamento dos organismos em geral. Nossa primeira explicação para esta dificuldade é a falta de flexibilidade existente nas arquiteturas dos robôs puramente reativos.

Julgamos que uma outra questão a respeito dessas limitações possa ser elaborada: quais os motivos que levam à falta de flexibilidade presente nos comportamentos dos robôs puramente reativos, e em que sentido estes comportamentos podem ser comparados ao comportamento dos organismos vivos?

Murphy (2000, p. 73-75) apresenta uma classificação esquemática do comportamento dos organismos em geral, a qual tomaremos como modelo para iniciar os estudos dos comportamentos dos robôs. Resumidamente, a autora divide o comportamento dos organismos em: (a) *comportamento por reflexo*, subdividido em (a.1) reflexos, (a.2) tropismos e (a.3) padrões fixos de ação; (b) *comportamento reativo* e (c) *comportamento consciente*.

Apresentaremos, a seguir, a explicação de cada um deles, juntamente com seus exemplos na biologia, que irão fundamentar uma comparação das suas possíveis aplicações e deficiências em robôs puramente reativos.

(a) *Comportamento reflexo*: Esta categoria de comportamento inclui aqueles do tipo estímulo-resposta. Por estarem conectados diretamente aos efetadores, os estímulos irão garantir uma resposta imediata do organismo. Este tipo de comportamento é subdividido em três: (a.1) *reflexos*, segundo os quais a resposta dura tanto quanto o estímulo, sendo também proporcional em intensidade. A famosa martelada no joelho é um exemplo deste tipo de comportamento; (a.2) *tropismos*, que causam a orientação e/ou movimentação do organismo, ou parte dele, em alguma direção específica – inclusive no sentido oposto ao estímulo. Existem na natureza diversos exemplos de tropismos, como a orientação dos girassóis em busca da luz solar, o chamado sonoro dos grilos para o acasalamento ou o uso dos feromônios

por insetos, como formigas e cupins; (a.3) *padrões fixos de ação* (*fixed-action patterns*), aqueles em que a resposta continua por um tempo razoável após o estímulo. Todos conhecemos bem o efeito de uma descarga de adrenalina ao levarmos um grande susto. Em termos evolutivos, esta é uma característica muito importante, também no que diz respeito à emergência de comportamentos e novos padrões filogenéticos: comportamentos de perseguição e fuga entre predadores e presas são exemplos disso. Observamos que a perseguição da presa pelo predador ilustra a presença dos três tipos de comportamentos por reflexo, o que consideramos ser um indício de sua importância para a auto-manutenção dos organismos e das espécies.

(b) *Comportamento reativo*, que é assimilado e, por meio de repetição, consolidado em padrões definidos. Após a consolidação de um comportamento, ele se torna *automático*. Ao tocar um instrumento musical ou andar de patins, os movimentos do aprendiz tornam-se automáticos com o passar do tempo. Entretanto, existem ocasiões em que tanto o músico como o patinador podem influenciar seus movimentos de maneira consciente. O músico, por exemplo, precisa, algumas vezes, mudar um pouco o ritmo para acompanhar ou corrigir possíveis falhas do regente. Algo parecido poderia ocorrer com um patinador quando ele estivesse sobre gelo fino. Atentamos para o fato que, apesar da coincidência dos nomes, o comportamento reativo possui significados diferentes nos organismos e nos robôs.

(c) *Comportamento consciente*: é aquele que envolve deliberação. Um exemplo de deliberação seria a maneira como um pesquisador usa as palavras para construir o texto de sua dissertação de mestrado em filosofia. O cuidado extremo com as palavras e a estruturação das idéias para demonstrar os resultados obtidos, são exemplos de deliberação.

Apresentamos, a seguir, os exemplos similares de comportamentos em robôs reativos. No caso do comportamento consciente, que não se reduz aos exemplos reativos, tecemos um comentário e inserimos um exemplo do paradigma deliberativo.



Um exemplo de comportamento por reflexo seria o de um robô reativo tentando manter o comportamento de seguir em frente a uma velocidade uniforme, determinada em tempo de *design*. Caso um outro robô, uma pessoa, ou mesmo uma parede obstrua seu caminho, e não haja em sua arquitetura camadas que o levem a um comportamento de evitar obstáculos, o robô continuará tentando manter sua velocidade até que seus efetadores deixem de funcionar.

Um exemplo clássico de fototropismo existente na robótica consiste na orientação de *tartarugas artificiais* em direção a fontes de luz (WALTER, 1950). Contudo, consideramos um outro exemplo relevante, no qual observou-se a emergência de um novo padrão de comportamento: num experimento de Dedieu e Mazer (1994), um robô puramente reativo que não possuía o comportamento de evitar objetos terminou por apresentá-lo enquanto às vezes tentava perseguir uma fonte de luz. Os autores verificaram, mais tarde, que tal comportamento surgiu porque alguns objetos produziam sombras, que potencialmente não seriam bons estímulos perante o aparato sensorio do robô.

Existem na robótica vários experimentos que se apóiam em comportamentos (padrões fixos de ação) de predador e presa (NOLFI e FLOREANO, 1998), ou em outras formas de competição e cooperação, intra ou interespecies, para implementar processos evolutivos e auto-organizados em seres artificiais (um detalhamento deste assunto será realizado na seção 3.4 deste capítulo).

O paradigma reativo, apesar da coincidência de nomes, não permite um comportamento puramente reativo nos robôs. Desenvolver robôs capazes de aprender por repetição, ou mais que isso, de mudar seus hábitos adquiridos, parece ser um desafio inatingível para arquiteturas puramente reativas, uma vez que suas implementações de comportamentos são feitas de forma fixa, quer seja em *hardware* ou em *software*. Uma alternativa para este problema seria o *designer* construir, por tentativa e erro, cada uma das

camadas do robô. Entretanto, a afirmação de que o robô tenha aprendido algo é questionável, já que todas as modificações foram feitas a partir das intuições do *designer*. Também consideramos que, em termos evolutivos, esta falta de flexibilidade torna os robôs puramente reativos bastante vulneráveis. Uma outra opção, a qual comentaremos adiante, incorpora o uso das simulações computacionais.

Juarrero (2002) destaca que, mais importante que estabilidade e robustez, a flexibilidade é indispensável para a evolução. Em acordo com tais idéias, pretendemos enfatizar aquela que julgamos ser uma classe específica de arquitetura existente entre os robôs reativos: as arquiteturas reativas baseadas em redes neurais artificiais, abordadas a partir da seção 3.4.

A inserção de planejamento em robôs reativos também será objeto de investigação da próxima seção. No momento, ressaltamos apenas que este comportamento não é apresentado nas arquiteturas puramente reativas. Contudo, é importante lembrar que o uso da deliberação foi o norteador das vertentes mais fortes no início das pesquisas em inteligência artificial. Dentre as mais célebres obras dessa vertente, destaca-se a de Newell e Simon (1972). Um exemplo de comportamento deliberativo que pode ser também encontrado em robôs diz respeito à atividade de jogar xadrez. Sistemas deliberativos chegam a superar os seres humanos nessa tarefa, o que se deve ao grande potencial encontrado nos mecanismos de busca para a solução de problemas, como é o exemplo de *Strips*.

Em resumo, até o momento verifica-se que tanto os comportamentos dos organismos classificados como reativos quanto os conscientes não são possíveis em arquiteturas puramente reativas. Isso se deve, segundo o nosso entendimento, à inexistência de deliberação ou qualquer forma de aprendizagem nesses tipos de arquitetura.



Por este motivo, e impulsionados pelo aceno de uma possibilidade de processos auto-organizados secundariamente ocorrerem em robôs, fazemos a seguir uma análise do paradigma híbrido deliberativo/reactivo.

3.3 O paradigma Híbrido Deliberativo/Reativo e sua possível evolução

Voltando nosso olhar para um dos pontos que deixamos em aberto no capítulo anterior, lembremos que a falta de flexibilidade com relação à possibilidade de novos comportamentos constitui um dos maiores problemas encontrados em robôs reativos. Na introdução deste capítulo, indicamos a inserção de componentes deliberativos nas arquiteturas reativas, numa tentativa de aumentar esta flexibilidade.

Generalizando, poderíamos considerar que o paradigma híbrido seria uma espécie de paradigma reativo, que permite a inclusão de recursos não-reativos, como por exemplo a capacidade de construir mapas, monitorar os estados do robô durante a realização de uma tarefa, planejar a seleção de comportamentos, etc.

Entendemos que o desafio dos pesquisadores da robótica seria construir novas arquiteturas inspiradas no paradigma híbrido que envolvessem planejamento e deliberação, sem o comprometimento da reatividade dos robôs. Nesse sentido, se fosse possível adicionar aos componentes reativos de uma determinada arquitetura, mecanismos de ajuste que permitissem a ocorrência de processos de auto-organização secundária, teríamos, possivelmente, robôs em condições de evoluir.

Arkin (1998, p. 206), por exemplo, sugere que a navegação inspirada em comportamentos reativos pode se tornar mais flexível com a introdução de várias formas de

conhecimento em uma arquitetura robótica qualquer. Dentre as vantagens desta estratégia, indica o autor, encontra-se o aumento da versatilidade dos robôs, além de ser possível, por meio de conhecimentos *a priori*, a reconfiguração dos comportamentos já existentes.

Neste contexto, realizamos a seguir uma breve análise do paradigma híbrido, focalizando seus principais atributos, além de alguns aspectos de suas arquiteturas. Como uma das expectativas do paradigma híbrido é a capacidade de reorganizar os comportamentos reativos dos robôs para aumentar sua flexibilidade, analisaremos os tipos de comportamento que as arquiteturas híbridas comportam, bem como os princípios que regem a referida capacidade de reorganização.

Murphy (2000, p. 259) descreve a organização das diretivas dos sistemas híbridos da seguinte maneira: planejar (*PLAN*), para em seguida perceber-agir (*SENSE-ACT*). Esses passos se resumem em: (a) planejamento das etapas para a realização de uma tarefa ou a construção de um modelo de mundo global, e (b) execução do plano obtido, com o acionamento das diretivas responsáveis pelo comportamento reativo que execute o plano de ação, ou parte dele, até que a meta estabelecida seja alcançada.

Apesar da semelhança entre os paradigmas híbrido e deliberativo, no que se refere à realização dos planos de ação após o planejamento, o paradigma híbrido difere do deliberativo devido ao acoplamento reativo entre *SENSE* e *ACT*, que permite aos robôs navegar com maior robustez. Tal robustez se deve ao fato dos robôs navegarem de modo reativo enquanto recebem as informações adquiridas pelos sensores, o que não ocorre no paradigma deliberativo. A figura 3.2 ilustra a maneira como a diretiva *SENSING* distribui as informações adquiridas para o restante do sistema.

Conforme destaca Murphy (2000, p. 261), as informações captadas pelos sensores são distribuídas entre as diretivas de comportamento (*SENSE-ACT*) e a diretiva de planejamento/construção de mapas (*PLAN*). A autora também destaca que os comportamentos

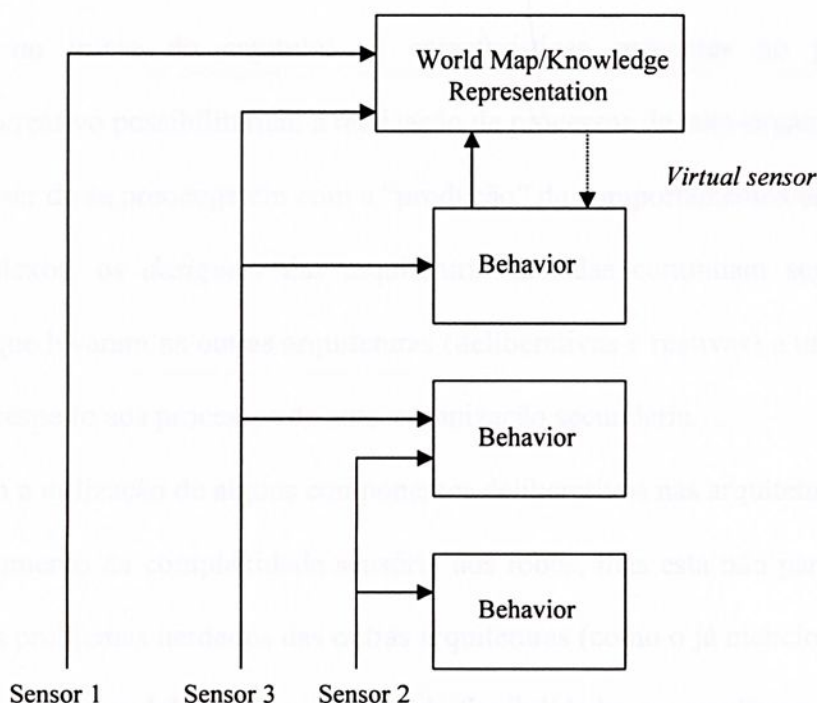


Figura 3.2: No paradigma híbrido deliberativo/reactivo, são mantidas as ligações diretas entre os sensores (*sensor2*, *sensor3*) e os atuadores dos robôs, responsáveis pela realização dos comportamentos (*behaviors*). A novidade desse paradigma está na possibilidade de acrescentar à arquitetura do robô comportamentos deliberativos em forma de camadas, que irão interagir com as outras camadas, reativamente. Modelos de mundo (*world map*), conhecimentos (*knowledge*) inatos e adquiridos do ambiente, através de sensores (*sensor1* e *sensor3*), bem como outros tipos de representação (*representation*) de informação são utilizados na deliberação sobre um plano de ação para executar as tarefas determinadas (a exemplo do que ocorre no paradigma deliberativo). Após a deliberação, o robô passa a executar, reativamente, o plano de ação que foi construído (Adaptado de MURPHY, 2000, p. 261).

existentes no paradigma híbrido podem incluir aqueles estruturados por reflexo, os inatos e aqueles adquiridos adaptativamente (*reflexive, innate, and learned behaviors*).

As modificações descritas acima resumem as diferenças do paradigma híbrido com relação aos paradigmas deliberativo e reativo, tanto no que diz respeito à organização das diretivas *PLANNING/SENSING/ACTING*, como à distribuição, através do sistema, da informação adquirida do ambiente.

A partir da descrição acima, estamos em condições de retomar uma das questões levantadas no início do capítulo: as características presentes no paradigma híbrido deliberativo/reativo possibilitariam a realização de processos de auto-organização secundária?

Apesar de se preocuparem com a “produção” de comportamentos emergentes cada vez mais complexos, os *designers* das arquiteturas híbridas continuam seguindo alguns dos princípios que levaram as outras arquiteturas (deliberativas e reativas) a um relativo fracasso, no que diz respeito aos processos de auto-organização secundária.

Com a utilização de alguns componentes deliberativos nas arquiteturas híbridas, houve um certo aumento na complexidade sensória dos robôs, mas esta não parece suficiente para dissolver os problemas herdados das outras arquiteturas (como o já mencionado problema dos *frames*, no paradigma deliberativo, e a falta de flexibilidade, no paradigma reativo).

No que diz respeito à expectativa de auto-organização do comportamento reativo dos robôs, entendemos que houve um passo importante no que envolve a característica de flexibilidade, como por exemplo a verificação da disponibilidade ou falha de sensores, entre outros recursos. Contudo, o comportamento reativo é geralmente organizado por meios deliberativos, o que nos remete à participação do programador enquanto organizador dos processos. Uma diferença central entre os processos realizados nos paradigmas deliberativo e híbrido é que no último existem métodos automáticos que determinam quais sensores deveriam atuar. Mesmo assim, a maioria dos comportamentos reativos nos sistemas híbridos possibilitam apenas a emergência de funções não-programadas.

Uma diferença significativa entre os sistemas inspirados nos dois paradigmas citados está na complexidade dos processos que ocorrem antes ou durante o acionamento dos comportamentos reativos. Entretanto, seria necessário verificar, na prática, se dado um padrão qualquer de informações captadas pelos sensores do robô (sensores que, no paradigma



híbrido, estão geralmente ligados aos módulos deliberativos ou de planejamento), o seu comportamento global será o mesmo.

É importante ressaltar que, especificamente no comportamento adaptativo apresentado pelos robôs híbridos, a adaptação resulta de suas interações com o ambiente, as quais podem implicar em respostas diferentes daquelas apresentadas anteriormente diante dos mesmos padrões de sinais. Contudo, ainda observamos a presença de um programador central, que insere, nos módulos deliberativos da arquitetura, um conjunto de regras que especificam como serão tratadas e armazenadas as informações adquiridas do meio.

Em resumo, os tipos de aprendizagem nos paradigmas da robótica parecem limitar-se (a) aos métodos predeterminados pelos programadores, ou (b) àqueles já conhecidos nas redes neurais artificiais. No primeiro caso, ao mesmo tempo em que ocorre uma melhor adaptabilidade inicial, a organização das primitivas e a falta de flexibilidade dos componentes restringe a evolução do processo de auto-organização secundária. Os casos de inserção, nos robôs híbridos, das redes neurais artificiais, parecem indicar duas possibilidades: uma delas seria o uso das redes neurais do tipo *feedforward*², as quais Nolfi (1997, p. 7) concluiu serem incapazes de classificar corretamente (sem o uso de outros módulos que as informem quais estímulos podem ser classificados) um conjunto de padrões adquiridos no ambiente; a segunda possibilidade seria inserir redes neurais recorrentes³ nos robôs. No trecho abaixo, Jordan (1999, p. 709) descreve o papel dos ciclos nas redes neurais.

A presença de ciclos em uma rede leva naturalmente a uma análise da rede como um sistema dinâmico, no qual o seu estado em um dado momento depende do estado anterior. Em alguns casos, contudo, é mais natural entender os ciclos como especificando restrições simultâneas que os *nodos* de uma rede devem satisfazer, um ponto de vista que não precisa envolver qualquer análise de comportamento variado no tempo. Estes dois pontos de vista podem, em princípio, ser conciliados se as

² Redes sem ciclos ou *feedback loops*. Em resumo, aquelas redes capazes de mapear um conjunto de valores de entrada para um conjunto de valores de saída correspondente.

³ Redes com um ou mais ciclos ou *feedback loops*, que permitem uma análise da rede como um sistema dinâmico, "além de promover um impacto profundo nas capacidades de aprendizagem da rede e sua performance" (Haykin, 1994, p. 20).

restrições forem entendidas como especificações dos estados de equilíbrio de um sistema dinâmico⁴ (tradução nossa).

Entendemos que a utilização das redes recorrentes em robôs híbridos possa trazer alguma flexibilidade às suas arquiteturas. Condicionada ao uso restrito de métodos deliberativos, tal flexibilidade poderia resultar em aprendizagem, num sentido fraco. Além de inserir as redes neurais em robôs, eliminando assim o uso de informação simbólica, alguns métodos evolutivos vêm sendo utilizados para otimizar os processos de aprendizagem em robôs. Trata-se da Robótica Evolucionária, tópico apresentado na próxima seção.

3.4 Robótica Evolucionária: alcances e limites dos mecanismos automáticos de evolução

Até aqui, realizamos uma análise dos principais paradigmas da robótica contemporânea. No que tange os objetivos de nossa pesquisa apontamos, na seção anterior, alguns indícios da possibilidade de realização da auto-organização secundária em robôs híbridos, desde que suas arquiteturas possuam redes neurais recorrentes, e em alguns casos, redes neurais do tipo *feedforward*. No que se segue, analisaremos os robôs estruturados a partir da robótica evolucionária.

A robótica evolucionária apresenta uma tentativa de desenvolver robôs e seus sistemas de controle sensório-motor através de processos de *design* automáticos que envolvem evolução artificial (NOLFI, 1998; NOLFI e FLOREANO, 2002). Uma de suas principais

⁴ The presence of cycles in a network leads naturally to an analysis of the network as a dynamic system, in which the state of the network at one moment in time depends on the state at the previous moment in time. In some cases, however, it is more natural to view the cycles as providing a specification of simultaneous constraints that the nodes of the network must satisfy, a point of view that need not involve any analysis of time-varying behavior. These two points of view can in principle be reconciled by thinking of the constraints as specifying the equilibrium states of a dynamic system.

características reside na tentativa de lidar com processos evolutivos que envolvem auto-organização (NOLFI, 1998). Isso se dá pela adoção de técnicas de evolução artificial, que são usadas com o objetivo de diminuir, senão eliminar, o papel do *designer* nos processos adaptativos.

No que diz respeito aos componentes físicos utilizados na robótica evolucionária, eles são praticamente os mesmos da robótica reativa e híbrida. Entretanto, seus métodos e técnicas incorporam *adaptação evolutiva por meio de processos auto-organizados*. A natureza de tais processos, entretanto, precisa ser investigada, de modo a verificar os alcances e limites de sua utilização. Este é um dos objetivos centrais da presente dissertação.

Como verificamos no capítulo anterior, os *designers* fazem uso do método de decomposição do comportamento de robôs reativos para, em seguida, recompô-los em camadas de controle horizontais, responsáveis pelo seu comportamento global. Conforme afirma Brooks (1999, p. 10), após a inserção de cada nova camada de controle na arquitetura de um robô reativo, testes exaustivos devem ser executados a fim de depurar possíveis falhas na interação das camadas.

Nolfi (1997; 1998) argumenta que o uso da auto-organização é vantajoso por dispensar os *designers* da tarefa de decompor o comportamento global dos robôs em suas subrotinas. Ao invés disso, afirma o autor, “[...] o processo de quebra do comportamento em sub-componentes deve resultar de um processo de adaptação, e não de uma decisão do experimentador.”⁵ (NOLFI, 1997, p. 2).

Os algoritmos genéticos e a computação evolutiva são apresentados pelos proponentes da robótica evolucionária como ferramentas que, quando aplicadas como mecanismos de busca, fornecem soluções mais simples e eficientes do que aquelas obtidas pela robótica reativa.

⁵ [...]the process of breaking down the required behavior into sub-components should be the result of an adaptation process and not of a decision of the experimenter.

Na robótica evolucionária, o comportamento dos robôs é desenvolvido a partir de suas interações com o ambiente, nas quais a intervenção humana é limitada à especificação de uma regra que determine o quanto um dado comportamento se aproxima daquele desejado (NOLFI, 1997; NOLFI e FLOREANO, 2002).

Dentre as ferramentas utilizadas pelos pesquisadores da robótica evolucionária, encontram-se as simulações computacionais. Estas são feitas com o intuito de reduzir o tempo necessário à execução de algumas das etapas do processo evolutivo do sistema em questão.

São dois os grandes problemas indicados por vários pesquisadores da robótica evolucionária (NOLFI e FLOREANO, 2002; NOLFI, 1998): o primeiro deles diz respeito ao tempo necessário para que ocorram os processos evolutivos de um determinado robô ou conjunto de robôs (NOLFI e FLOREANO, 2002, p. 36; NOLFI, 1998, p. 179). Em um de seus experimentos, Nolfi (1997, p. 3) afirma que o processo evolutivo de um robô por simulação computacional durou menos de um dia. Este mesmo processo, segundo ele, levaria um ano para ser cumprido em um robô real.

Outro dos grandes problemas indicados é a dificuldade em se encontrar métodos de codificação da informação genética, úteis na produção de processos evolutivos incrementais e abertos (NOLFI e FLOREANO, 2002, p. 36).

Os avanços nas técnicas usadas para fazer com que os *designers* participem cada vez menos da “ontogênese” dos seres artificiais são considerados, em geral, positivos na robótica evolucionária. Contudo, essas técnicas ainda são rudimentares, pois as morfologias obtidas através delas ainda resultam de uma construção *centrípeta*, segundo a qual as partes dos robôs são acopladas de fora para dentro do sistema. Em contraste, conforme ressaltam Bohm (1998) e Bertalanffy (1995), nos organismos, o desenvolvimento de suas partes ocorre de dentro para fora, em função de sua totalidade. Esta é uma diferença importante, pois no caso da

organização dos robôs, a presença do *designer* ainda é fundamental, o que dificulta também a transmissão de informação genotípica através das gerações.

Pesquisadores da vida artificial (ALife) estão tentando desenvolver seres artificiais (SIMS, 1994a; 1994b; 1994c) num modo *centrífugo*. Contudo, até o momento as pesquisas se restringem ao desenvolvimento de novas morfologias para seres virtuais. Vale indicar que em tais pesquisas, muitas das novas morfologias chamaram a atenção dos observadores pela não trivialidade do posicionamento e relação entre os componentes (órgãos ou membros) dos seres virtuais.

Estudos recentes (BUASON, BERGFELDT e ZIEMKE, 2005; NOLFI e FLOREANO, 2002) têm investigado morfologias em robôs situados no ambiente. Contudo, como apontam Buason, Bergfeldt e Ziemke (2005, p. 2-3), tais estudos são feitos a partir de um recorte entre o corpo do robô e os sistemas controladores (que desempenham o papel de sistema nervoso). Este recorte constitui um problema no que diz respeito aos avanços direcionados ao acoplamento entre organismos e ambiente, tema fortemente debatido entre autores como Clark (1997), Beer (1997), Haselager (2003a; 2004a; 2004b; 2004c), Thelen (2000), Varela, Thompson e Rosch (1991), Brooks (1999), Bertalanffy (1995), Bohm (1980) e Broens e Gonzalez (2005), entre outros.

Apontamos, no capítulo 2, alguns detalhes sobre a importância do forte acoplamento entre corpo e ambiente para que o sucesso evolutivo das espécies se concretize⁶. Abordaremos essa questão mais adiante, no presente capítulo e no capítulo 4.

Para garantir certa fidelidade entre os objetos reais e suas simulações, o que inclui detalhes sobre o corpo dos robôs, seus sensores e o ambiente, Nolfi (1997) indica a necessidade de se preparar o experimento antes de começar as simulações. Tal preparação envolve, entre outros, a calibragem dos sensores do robô com o cenário no qual ele irá atuar.

⁶ É importante lembrar que pesquisadores como Maturana e Varela (2002) e Varela, Thompson e Rosch (1991) desenvolveram este tópico de modo mais abrangente e aplicado à biologia.



Outra questão a ser levantada é até que ponto este processo garante uma boa fidelidade. Não existe o risco de ocorrerem recortes pela arbitrariedade na escolha das características do robô que serão calibradas? Além disso, práticas dessa natureza revelam que a participação dos *designers* vai além da simples especificação de algumas funções de avaliação.

Para realizar a evolução de um robô com aparato sensório-motor relativamente simples, em ambientes de escritório ou habitacionais, Nolfi (1997, p. 3-4) indica as seguintes etapas preliminares: (a) posicionar o robô diante dos objetos presentes no ambiente, em diversas posições relativas, calculando o estado de ativação dos sensores; (b) armazenar os valores relativos aos estados de ativação em duas matrizes; (c) inserir tais valores em um simulador, que realizará os etapas consideradas necessárias ao processo de evolução do robô em questão; (d) colocar as informações obtidas no processo de simulação no robô;

Nolfi ressalta a necessidade de calibragem dos sensores e atuadores do robô uma vez que, mesmo sensores eletronicamente idênticos irão responder diferentemente ao conjunto de padrões informacionais disponível no ambiente. Como as informações coletadas neste processo serão inseridas em uma simulação computacional, ele argumenta que a calibragem é necessária para garantir que o simulador construído seja condizente com as características físicas do ambiente e do robô que nele irá atuar.

Apesar das dificuldades iniciais, o sistema controlador evoluído por simulação é capaz de realizar tarefas que não são realizadas a partir da abordagem usada no paradigma reativo (decomposição e integração em camadas de comportamento). Nolfi (1997) observa, inclusive, que as soluções encontradas no processo evolutivo do robô em questão incluem técnicas não-reativas, que não envolvem decomposição e ajuste dos comportamentos em camadas horizontais. As redes neurais evoluídas para controlar o robô, nesse experimento, são do tipo *feedforward*. É importante lembrar que, ao tentar implementar robôs híbridos com redes desse tipo, Nolfi conclui ser impossível fazê-lo sem a utilização de módulos auxiliares.

Em resumo, vimos até aqui que uma das abordagens dentro da robótica evolucionária enfatiza a evolução do comportamento de um único robô em relação ao seu ambiente. Nesta abordagem, pode ser evoluído o conjunto que compreende corpo e sistema controlador. Uma outra abordagem consistiria em acrescentar ao ambiente outros robôs, fazendo-os interagir coletivamente. O emprego deste método caracteriza a *robótica co-evolucionária*.

“Do ponto de vista da robótica evolucionária, uma questão fundamental é como a evolução artificial pode ser usada para selecionar indivíduos que possuam competências que permitam a resolução de tarefas complexas”⁷(NOLFI, 1998, p. 175).

Para selecionar os robôs através das gerações, a capacidade de realizar tarefas de cada um deles é analisada a partir de critérios delimitados pelo designer (*fitness function*). A partir de tais critérios, são selecionados os robôs que poderão se reproduzir através das gerações, procedimento este que pode ser entendido como uma maneira de direcionar o comportamento dos robôs (HASELAGER, 2004a).

Nolfi (1998, p. 175) aponta que existe uma relação inversa entre a complexidade da tarefa a ser realizada e a capacidade dos indivíduos que constituem as primeiras gerações de robôs. Isso quer dizer que quanto mais complexas as tarefas implícitas na *fitness function*, menor a probabilidade da primeira geração de robôs conseguir se reproduzir. Classificado por Nolfi (1998) como *the bootstrap problem*, este problema pode ser minimizado através da co-evolução.

Nos mecanismos de co-evolução, técnicas de cooperação ou competição podem ser aplicadas entre os robôs. Uma das técnicas comumente empregadas considera a evolução de colônias de presas e predadores. Processos de co-evolução entre colônias de presas e predadores permitem, segundo Nolfi (1998), que comportamentos de fuga e predação se tornem cada vez mais sofisticados diante do mesmo critério de seleção inicial.

⁷From the point of view of evolutionary robotics, a key question is how artificial evolution can select individuals which have competencies that allow them to solve complex tasks.

Nolfi (1998) descreve os resultados de experimentos obtidos a partir da evolução de colônias de presas e predadores, como segue: (a) no que diz respeito à evolução do comportamento de predadores e presas em ambientes separados, pouca evolução ocorre no comportamento dos robôs: o problema do *bootstrap* é perene; (b) quanto à co-evolução por competição entre predadores e presas no mesmo ambiente, apesar do critério de seleção permanecer o mesmo, as colônias de presas e predadores continuaram evoluindo, apresentando novas técnicas de predação e fuga; (c) no que concerne a relação entre presas evoluídas por competição *versus* predadores evoluídos isoladamente, o experimento falhou, pois as populações não apresentaram evolução. Nolfi explica que isto se deu porque as primeiras populações de predadores não conseguiram capturar as presas evoluídas, e as presas evoluídas não tiveram predadores capazes de capturá-las.

No que se refere às contribuições da robótica evolucionária para o entendimento dos sistemas naturais, Nolfi e Floreano (2002, p. 36) sugerem que os experimentos que envolvem robôs incorporados em condições ambientais específicas podem nos ajudar a entender como os organismos naturais resolvem problemas similares em condições ambientais igualmente similares. Nessa mesma perspectiva, Beer sustenta que o objetivo final de seu programa de pesquisas é “elucidar os princípios essenciais de uma *teoria do comportamento adaptativo*”⁸ (BEER, 1997, p.257). Os dois pressupostos centrais de suas pesquisas são:

(a) que um agente e seu ambiente devem ser entendidos como dois sistemas dinâmicos acoplados, cuja interação mútua é responsável pelo comportamento do agente e (b) que a necessidade do agente de manter sua existência no ambiente define uma restrição de viabilidade sobre a sua dinâmica comportamental. (BEER, 1997, p.257)

No próximo capítulo argumentaremos que a formulação da proposta de Beer, citada acima, ultrapassa os limites atuais da robótica evolucionária e que os resultados obtidos

⁸ [...] to elucidate the essential principles of a theory of adaptive behavior.



através da análise dos robôs evoluídos não parecem ter uma relevância direta na explicação da forma como os organismos naturais produzem comportamentos similares. Entretanto, eles podem ser usados para desenvolver novos modelos de comportamento adaptativo, os quais, através de análise experimental, propõem explicações (ou modelos explicativos) numa área de pesquisa ainda pouco explorada.



But, actually, intelligence is neither an objective property, nor a habit and property, or it is both of them. As a habit and property, the disposition of conceptual-objective and helps us in selection of the useful ones. It is actually a habit of the animal world and a sort of behavior. It is both physical and personal, for nature, in reference to power habit, is the selection of the useful and to the animal.

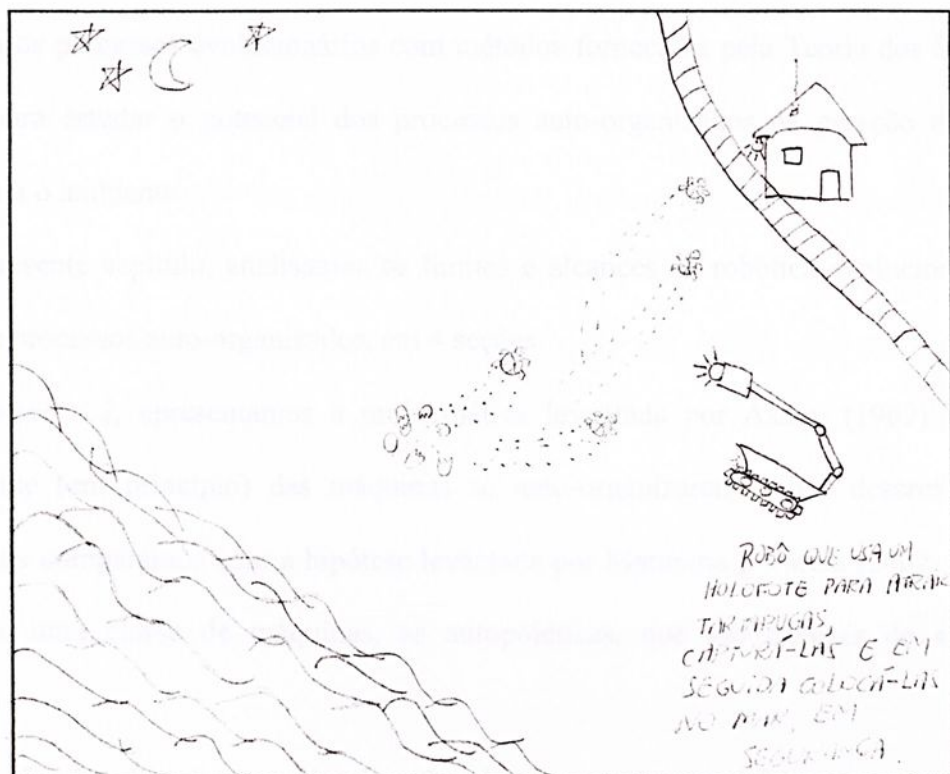
(Damas & Wilson, 1986, p. 129)

Intelligence is not essentially of structure, nor of properties.

(Damas & Wilson, 1986, p. 130)

Capítulo 4

AUTO-ORGANIZAÇÃO EM ROBÔS: PRINCÍPIOS EVOLUCIONÁRIOS NA PERSPECTIVA DA TEORIA DA PERCEPÇÃO DIRETA



But, actually, an affordance is neither an objective property nor a subjective property; or it is both if you like. An affordance cuts across the dichotomy of subjective-objective and helps us to understand its inadequacy. It is equally a fact of the environment and a fact of behavior. It is both physical and psychical, yet neither. An affordance points both ways, to the environment and to the observer.

(James J. Gibson, 1986, p. 129)

Nature is not economical of structures – only of principles.

(Abdus Salam, citado por Kelso [1999, p. 15])

4.1 Apresentação

No capítulo anterior apresentamos algumas técnicas usadas pela robótica evolucionária com o intuito de aumentar o papel da auto-organização e diminuir o papel do *designer* na estruturação dos robôs. Também fizemos uma breve introdução à proposta de Beer (1997), que combina os processos evolucionários com métodos fornecidos pela Teoria dos Sistemas Dinâmicos para estudar o potencial dos processos auto-organizados na geração de robôs acoplados com o ambiente.

No presente capítulo, analisamos os limites e alcances da robótica evolucionária na realização de processos auto-organizados, em 4 seções.

Na *seção 4.2*, apresentamos a problemática levantada por Ashby (1962) sobre a impossibilidade (em princípio) das máquinas se auto-organizarem. Após descrever seus argumentos, os comparamos com a hipótese levantada por Maturana e Varela (2002) sobre a existência de uma classe de máquinas, as autopoieticas, que são capazes de se auto-organizarem.

Na *seção 4.3*, discutimos as implicações da teleonomia na robótica, no contexto das explicações sobre as máquinas autopoieticas.

Na *seção 4.4*, apresentamos alguns exemplos da biologia que expressam a capacidade dos organismos, em conjunto, assumirem determinadas ordens de funcionamento, de acordo com as condições encontradas no ambiente. Argumentaremos que essa capacidade é de fundamental importância para a discussão sobre os critérios de relevância a serem adotados na sua manutenção.

Finalmente, na *seção 4.5*, analisamos o conceito de *affordance*, proposto por Gibson (1986) e indicamos a sua relevância nas pesquisas da robótica contemporânea.



4.2 Auto-organização e os princípios da cibernética

Ashby (1962) analisa o conceito de auto-organização no paradigma da cibernética e argumenta que as máquinas não podem, em princípio, se auto-organizar. O seu argumento tem a seguinte estrutura: uma máquina pode ser definida como uma função, f , que toma elementos de um *domínio* (A) e os leva a um outro domínio (B), segundo um conjunto de regras preestabelecidas. Ela pode ser representada pela notação $f: A \rightarrow B$. Por possuírem um domínio de execução muito bem definido e regras preestabelecidas de estruturação, as máquinas não podem, em princípio, se auto-organizar.

Comentando o efeito do argumento acima, Dupuy (1996, p. 201) descreve a presença de Ashby nas Conferências Macy¹ como um “eletrochoque” para os cibernéticos. A grande polêmica gerada no meio científico pelo argumento de Ashby serviu, no nosso entendimento, como um estímulo à transição para o movimento da Segunda Cibernética.

O conceito de máquinas proposto por Ashby é compatível com aquele fornecido por Turing (1973)². Em 1950, quando Turing publica seu trabalho sobre as Máquinas Universais, propõe uma idéia de máquina a partir de uma abstração. Uma máquina de Turing M é um *dispositivo abstrato de estados finitos*, capaz de realizar operações sobre uma fita infinita, subdividida em infinitas posições, que podem ser acessadas (por uma cabeça de leitura e gravação presente em M) uma de cada vez. Em princípio, a fita representa o papel no qual um usuário implementa, seqüencialmente, os passos de um algoritmo qualquer. Contudo, a

¹ Segundo Dupuy (1996, p. 9), as chamadas Conferências Macy, num total de 10, foram realizadas de 1946 a 1953 com o objetivo de “edificar uma ciência geral do funcionamento da mente”, intitulada *Cibernética*. Dupuy (1996, p. 201) eleva o trabalho de Ashby ao posto de “uma das pedras fundamentais da segunda cibernética”. A Segunda Cibernética é o movimento subsequente à (Primeira) Cibernética, que coincide com a realização das Conferências Macy.

² Trabalho publicado, originalmente, em 1950.

Máquina de Turing Universal (MTU) é um sistema abstrato que pode ser instanciado em inúmeras máquinas (particulares).

Como as máquinas de Turing e de Ashby constituem autômatos finitos, entendemos que elas sejam equivalentes.

Ashby, conforme aponta Dupuy (1996, p. 203), “terá, afinal, elevado uma definição matemática e sua relativa arbitrariedade à condição de princípio universal da natureza”, o que, entendemos, eliminaria o papel da auto-organização no domínio das máquinas.

Mas e quanto à robótica? Seriam os robôs equivalentes à máquina de Ashby e às MTU's? E os organismos vivos, poderiam eles ser entendidos como máquinas? Ainda que muitos biólogos sejam contrários a essa possibilidade, Maturana e Varela (2002) concluem que os organismos podem ser entendidos como máquinas. Eles argumentam que os seres vivos são uma classe de máquinas autopoieticas³, que se diferenciam das máquinas alopoieticas⁴ apenas por seu princípio de funcionamento. Tal princípio consiste em manter a estrutura do todo subjugando as suas partes, de modo que cada componente se comporte em função da manutenção da totalidade, mesmo que não tenha conhecimento de seu papel nessa totalidade.

Nos sistemas orgânicos e inorgânicos, em geral, algumas de suas variáveis devem ser mantidas dentro de valores limites determinados; caso tais limites sejam ultrapassados, tanto os sistemas autopoieticos como os alopoieticos poderão entrar em colapso.

No caso dos sistemas autopoieticos, o que deve ser mantido dentro de um limite, especificado pelas características intrínsecas do sistema, é justamente a organização do sistema como um todo. Tal organização se inicia em virtude do movimento de um conjunto de componentes que, dentro de uma dinâmica (interrelacional), diferencia-se do ambiente para

³ Unidades que são autônomas em sua realização, no sentido de se auto-produzirem, através de uma dinâmica que depende das relações entre seus componentes, numa dinâmica que permite variações estruturais, desde que se conserve a unidade enquanto processo, ao mesmo tempo acoplado ao e diferente do meio.

⁴ As máquinas que não são capazes de realizar esta dinâmica.

constituir uma unidade, pertencente ao ambiente do qual acabou de se diferenciar. A dinâmica a qual essa unidade recém surgida estabelece para se manter diferente do ambiente a que pertence é um dos fatores que a diferencia dos sistemas alopoiéticos. Além disso, é fundamental na diferenciação entre os sistemas autopoieticos e os alopoiéticos, que a dinâmica dos primeiros não seja guiada, exclusivamente, por nenhuma fonte externa. Ao contrário, a realização dos sistemas autopoieticos surge da dinâmica estrutural e relacional de seus componentes, a qual Maturana e Varela (2002) chamam de *congruência estrutural*.

Um outro ponto importante é que os componentes do sistema autopoietico não precisam ser de natureza específica, ou seja, não precisam ser constituídos por este ou aquele material, como parece ser o caso, por exemplo, dos materiais orgânicos, supostamente os únicos capazes de comportar a flexibilidade necessária aos processos mais complexos de auto-organização secundária. Assim, desde que estejam acoplados apropriadamente e realizando um padrão de funcionamento que seja capaz de manter a organização do sistema sem descaracterizá-lo enquanto unidade, componentes de natureza inorgânica podem, em princípio, formar um sistema autopoietico. Para isso, o comportamento exibido pelos componentes do sistema deve ser moldado, literalmente, em *função* do todo.

De modo bem resumido, diríamos que a diferença das máquinas autopoieticas é que os seus componentes precisam (a) estabelecer, por si só, uma dinâmica de relações de autoprodução, capaz de (b) manter a organização do sistema de modo que sua unidade se mantenha diferenciada do meio, mesmo que para isso seja necessário complexificar suas estruturas. Por outro lado, aquelas máquinas que não são capazes de realizar (a) e (b) são classificadas por Maturana e Varela (2002) como alopoiéticas.

A hipótese, discutida no capítulo 1, segundo a qual a autopoiese é uma das possíveis realizações da auto-organização, parece contrariar a hipótese de Ashby (1962) de que as máquinas não podem, em princípio, se auto-organizar. Isto porque a autopoiese pode ser

realizada por sistemas cujos componentes sejam de *qualquer natureza*, ou seja, orgânica ou inorgânica, desde que estes estejam envolvidos numa dinâmica de funcionamento que caracterize uma unidade distinta, mas acoplada ao ambiente.

Em resumo, a idealização de máquina de Ashby é compatível com a de máquina alopoiética, ou seja, ela é diferente das máquinas autopoieticas porque sua dinâmica de funcionamento segue um conjunto de regras preestabelecido, mesmo que tais regras sejam estabelecidas aleatoriamente. As máquinas autopoieticas, por outro lado, usam o que chamaríamos de *fator criativo* para encontrar soluções para as possíveis interferências que possam ameaçar a sua organização. Usamos o termo *fator criativo* para realçar a capacidade das máquinas autopoieticas de solucionar os problemas relacionados à sua manutenção, sem que seja necessário qualquer direcionamento externo aos sistemas que elas compõem. Além disso, não podem ocorrer quebras nos processos em questão, pois elas implicariam na descaracterização ou desintegração do sistema (decorrente da perda de sua identidade⁵).

Ashby poderia questionar a hipótese de que a autopoiese é uma das possíveis realizações dos processos auto-organizados. Contudo, entendemos que uma conclusão contrária a essa hipótese não iria descaracterizar a proposta de Maturana e Varela (2002), já que os autores propõem que os organismos também são máquinas de uma classe específica, ou seja, máquinas biológicas, diferentes das máquinas formais propostas por Ashby.

Poderíamos questionar também o caso dos robôs, que não se caracterizam, necessariamente, como máquinas formais: poderiam eles ser entendidos como máquinas autopoieticas? Analisemos esta questão em termos da auto-organização primária e secundária.

Entendemos que os princípios de estruturação dos componentes usados atualmente na robótica geram barreiras difíceis para a realização da auto-organização primária,

⁵ Essa identidade, conforme nos referimos no capítulo 1, resulta da autonomia do sistema com relação ao meio, característica dos sistemas autopoieticos. Ela se dá no momento em que o sistema autopoietico é constituído como uma unidade diferente do meio.



principalmente no que diz respeito à matéria que compõe os robôs. Como vimos no primeiro capítulo, Debrun indica que a questão do encontro entre partes distintas e outras com uma certa redundância é fundamental para a realização da auto-organização primária, e uma vez que são os *designers* que realizam a organização das partes constituintes dos robôs, perde-se a oportunidade de encontros espontâneos. Neste sentido, o processo de auto-organização primária em robôs, até o momento, ainda não se realizou.

Com relação à *auto-organização secundária*, argumentamos no capítulo 3 em defesa da hipótese de que ela ainda não se realiza em robôs deliberativos e puramente reativos. Contudo, caso os robôs consigam aprender a partir de suas próprias experiências no mundo, ela poderá, em princípio, ser realizada. O experimento de Dedieu e Mazer (1994), ao qual nos referimos, não parece envolver auto-organização secundária no sentido especificado por Debrun (1996a, 1996b, 1996c). Apesar do comportamento do robô ser emergente (no sentido de não ter sido previsto por seus *designers*), ele ainda envolveu respostas fixas a um padrão fixo de estímulos, uma vez que, naquele experimento, o robô deveria perseguir, reativamente (e não de outra maneira), fontes de luz. Na realização dessa tarefa, o robô deve se desviar dos objetos que se encontram entre ele e o estímulo luminoso. Esse comportamento não acontece em consequência do aprendizado de que objetos constituem obstáculos que não deixam os robôs chegarem às fontes de luz, e sim pelo fato de que os objetos produzem sombras, e como as sombras constituem ausência de luz, elas acabam “repelindo” o robô.

É possível prever, a partir da perspectiva da teoria dos sistemas dinâmicos, que os pontos do ambiente que não possuem luz funcionarão como repulsores para o robô, enquanto os pontos luminosos seriam os seus atratores. Suas trajetórias, nesse sentido, resultam da interação dinâmica entre os componentes do robô e o ambiente. A ordem de funcionamento de um robô reativo, portanto, resulta dos ajustes entre o seu sistema sensório-motor e o ambiente. Esta hipótese é compatível com a afirmação de Beer (1997, p. 266) sobre a

profunda interconexão entre o papel das influências do ambiente e a dinâmica intrínseca dos agentes na geração do seu comportamento. Entretanto, como geralmente os robôs reativos não possuem uma arquitetura muito flexível, os ajustes podem ser difíceis de ocorrer, o que compromete o processo de auto-organização entre robô e ambiente.

Um ponto importante que devemos destacar é que, apesar de estarem seguindo as fontes de luz, os robôs parecem estar perambulando e evitando obstáculos. Neste caso, afirmam Dedieu e Mazer (1994), o mais importante não é o método de implementação do robô, mas o seu comportamento global perante o ambiente. Para os autores, não importa se o comportamento do robô foi obtido por meio de técnicas de implementação deliberativas, reativas ou por ambas.

Indicamos, neste trabalho, algumas possibilidades para a realização da auto-organização em robôs, mas parece que nenhuma delas é suficiente para alicerçar, nessa classe de máquinas alopoiéticas, comportamentos compatíveis, num sentido forte, com os princípios da autopoiese. Como resultado, concebemos robôs esboçando uma forma de auto-organização secundária, mas que não conseguem, por motivos que tentaremos explicitar adiante, avançar no processo.

Uma vez traçado um panorama geral dos processos auto-organizados, bem como as suas possíveis realizações em robôs desenvolvidos a partir dos atuais paradigmas da robótica, nos deparamos com o problema de como desenvolver robôs capazes de alcançar níveis de organização mais elevados que os obtidos até o momento.

Uma das abordagens para a solução dos problemas acima vem sendo a utilização de robôs reativos e híbridos que combinem o funcionamento reativo às *redes neurais artificiais*. Dentre os diversos tipos de redes neurais, Beer (1997, p. 270) indica que as *redes neurais recorrentes de tempo contínuo* (*continuous time recurrent neural network* – CTRNN) são os mais simples modelos existentes de redes neurais dinâmicas de tempo real.



Entendemos que, incorporando (*embedding*) aos robôs redes neurais desse tipo, novos comportamentos podem surgir, de acordo com as suas *experiências*⁶ no ambiente. Nesse sentido, talvez os robôs possam adquirir hábitos e modificá-los a partir de sua situação (*situatedness*) no mundo, trazendo como consequência o surgimento de uma classe de robôs na qual os processos de auto-organização secundária talvez possam ocorrer. Na seção 4.4 descrevemos alguns dos experimentos de Beer (1997), envolvendo redes desse tipo.

Concordamos que a capacidade de aprender a desenvolver novos padrões de comportamento é certamente fundamental, mas que ela não é o único ponto importante; para os robôs e os organismos em geral, também é importante aprender como se manter no mundo. Mas em que sentido a experiência desses robôs seria relevante para a sua manutenção? Respostas a essa questão envolvem a necessidade de se estabelecer *critérios de relevância* para a aprendizagem, assunto que abordaremos na próxima seção.

4.3 Teleonomia: um conceito prescindível às explicações da autopoiese?

No capítulo 2, analisamos a hipótese proposta por Brooks (1999), segundo a qual os processos evolutivos se desenvolvem sem que seja necessário qualquer tipo de deliberação. Também consideramos, no capítulo 3, a possibilidade de existirem robôs que sejam capazes de aprender (e deste modo realizar auto-organização secundária num sentido fraco) a partir de sua situação no mundo (*situatedness*), e que tal aprendizagem deve se apoiar em alguns

⁶ Consideramos a inserção da presente nota para destacar o problema considerado na filosofia como “o problema das outras mentes”. Haselager (2003a) o classifica como *um problema perene da inteligência artificial*, e enfatiza que a questão “como poderíamos saber se alguém, que não sejamos nós, pode ou não ter experiências?” pode ser aplicada tanto a seres humanos como a robôs.

critérios de relevância eficientes na manutenção de robôs no ambiente. Naturalmente, surge a questão de como estabelecer tais critérios de relevância para atingir um certo fim.

Talvez encontremos, na teoria de Maturana e Varela (2002), alguns *insights* sobre caminhos viáveis para a investigação da questão acima, mas antes de iniciar nossas especulações, julgamos ser necessário esclarecer alguns *desacordos* conceituais sobre o conceito de finalidade, que é o objeto de estudos relativos à teleonomia.

Resumidamente, o termo teleonomia é usado por Maturana e Varela (2002, p.77) para expressar “esse elemento de aparente propósito ou posseção de um projeto ou programa, [...] sem implicar qualquer conotação vitalista, considerado freqüentemente um aspecto definitório necessário, se não suficiente, dos sistemas vivos”. Perante essa definição, os autores concluem que teleonomia é “um conceito prescindível” às explicações da autopoiese. Tal afirmação, diríamos, rejeita qualquer suposição de *fins*⁷ nos sistemas autopoieticos. Ao invés de referir-se à teleonomia, Maturana e Varela (2002, p. 79) consideram a organização da unidade autopoietica para entender a organização dos sistemas vivos.

Nessa perspectiva, o processo de evolução da unidade autopoietica constrói o seu próprio direcionamento, que determina que “toda troca no sistema aconteça subordinada a sua conservação, fixando assim os limites que determinam o que lhe pertence e o que não lhe pertence em sua materialização específica” (MATURANA e VARELA, 2002, p. 79). Como resultado, Maturana e Varela chegam à conclusão de que a ontogenia dos organismos, enquanto processo, não é “a passagem de um estágio incompleto (embrionário) a outro mais completo ou definitivo (adulto), mas apenas a manifestação do acontecer de um sistema que é em cada instante a unidade em sua totalidade” (MATURANA e VARELA, 2002, p. 79). Ora, se

⁷ No sentido aristotélico, o termo *fim* está associado à idéia de teleonomia, uma vez que pressupõe um direcionamento da matéria. A nossa interpretação para o papel das quatro formas de causação aristotélicas é que elas funcionam como uma espécie de processo em potencial para a atualização da matéria. Por serem indissociáveis, as causas material, formal, eficiente e final não atuam isoladamente; ao contrário, compõem um processo que se atualiza a cada momento, dinamicamente.

adicionarmos a esta conclusão, a hipótese dos autores de que “em cada sistema vivo, toda troca deve produzir-se sem interferir em seu funcionamento como unidade, numa história de trocas através da qual sua organização autopoietica permanece invariante” (MATURANA e VARELA, 2002, p. 79), então entendemos que haja uma *atualização do sistema autopoietico enquanto um processo contínuo*. Deste modo, a idéia de *fim* se torna compatível com os processos autopoieticos, uma vez que a idéia de atualização não implica em perda de identidade ou desmaterialização da unidade. Além disso, é garantida aos sistemas uma ontogenia que seja “expressão tanto de individualidade dos sistemas vivos como da maneira em que essa individualidade se concretiza” (MATURANA e VARELA, 2002, p. 79).

De acordo com a teoria da autopoiese, a principal *finalidade* dos sistemas autopoieticos é justamente manter a própria existência, em termos de relações de (auto)produção de componentes necessários à manutenção da organização do sistema. A organização desse sistema, por sua vez, é o conjunto de relações que devem ser mantidas para que ele faça parte de uma determinada classe (MATURANA e VARELA, 2002).

Julgamos que a predeterminação não constitui condição necessária ou suficiente para a existência das relações de autoprodução dos sistemas autopoieticos; ao contrário, a realização da autopoiese parece ser um resultado *emergente* de processos de ajustes com o meio, semelhante àqueles que se suporiam presentes em robôs idealmente auto-organizados.

Em resumo, entendemos que a *finalidade* nos sistemas autopoieticos pode ser descrita em termos da manutenção de sua existência. Contudo, os mecanismos de manutenção da organização dos sistemas autopoieticos nem sempre aparecem de modo explícito. Ao contrário, tais mecanismos emergem das relações entre seus componentes e parecem indicar a presença de um certo critério de relevância com relação às trocas de matéria e energia que serão realizadas com o ambiente. Uma vez que o papel das trocas com o ambiente é condição necessária à manutenção dos sistemas autopoieticos, discutiremos, na seção subsequente, a



hipótese de que a incapacidade de realizar trocas está ligada à ineficiência dos robôs atuais na realização plena da auto-organização.

4.4 Mecanismos ecológicos de manutenção da vida

Na seção anterior, sugerimos que os critérios de relevância, supostamente necessários para que robôs se auto-organizem plenamente, estão intrinsecamente ligados à dinâmica relacionada à auto-manutenção dos sistemas autopoieticos. Também sugerimos que esta manutenção se realiza de forma relativamente independente da influência de forças externas ao sistema autopoietico, de modo que o próprio sistema “construa” o seu direcionamento através da atualização da unidade autopoietica. A seguir, apresentamos alguns exemplos de uma dinâmica existente até nos organismos mais simples, e em seguida formulamos uma sugestão sobre o surgimento e manutenção de tal dinâmica.

Holloway (2004) ilustra, no trecho abaixo, a capacidade que as bactérias *salmonela* possuem de perceber se sua população alcançou um número suficiente de componentes para liberar suas toxinas no hospedeiro.

[as] bactérias *salmonela* podem esperar até que seus batalhões estejam organizados antes de liberar uma toxina que faça o hospedeiro adoecer; se agissem como assassinos independentes, em vez de atuarem como exército, o sistema imunológico provavelmente as eliminaria. Pesquisadores mostraram que as bactérias também usam o *quorum sensing* para formar a placa bacteriana sobre os dentes, corroer cascos de navios e controlar a reprodução e a formação de esporos.

Entendemos que o *quorum sensing*, citado por Holloway (2004), é um mecanismo utilizado pelas bactérias para perceber se o ambiente está propício para as suas ações (neste caso específico, o ambiente está propício quando a população de bactérias atinge um limiar).

Um exemplo correlato é apontado por Kelso (1999, p. 14), num contexto em que o autor está afirmando ser possível o surgimento de padrões dinâmicos de comportamento tanto em matéria inanimada, como em organismos vivos. Segundo Kelso, quando são expostas a antibióticos ou algum estímulo insalubre, algumas bactérias bastante comuns se organizam e formam padrões complexos de organização para se proteger. O autor também faz referência a amebas que, perante a ausência de alimento, conseguem se agregar em forma de uma substância viscosa multicelular (uma espécie de limo), capaz de se mover até um ponto mais propício à sua sobrevivência.

Os exemplos acima descritos por Kelso (1999) e Holloway (2004), ilustram a auto-organização de organismos em padrões dinâmicos de comportamento voltado à proteção mútua, quando interagem com um ambiente *inóspito* ou propício, respectivamente, para a realização de ações específicas.

Todos estes fenômenos coletivos, que não parecem ser redutíveis às características específicas de seus componentes são, além de auto-organizados, classificados como emergentes. Os componentes não fazem idéia de seu papel individual no todo, mas são capazes de operar coletivamente, como se formassem um único organismo, sempre que necessário.

Nos sistemas autopoieticos de maior ordem⁸, aqueles sistemas formados por um conjunto de sistemas autopoieticos menores, acoplados estruturalmente, também emergem padrões de comportamento coletivo quando o meio parece inóspito. Em seres humanos, por exemplo, algumas diferenças locais (observadas em termos de competições individuais) parecem desaparecer em momentos extremos, como é o caso das lutas entre grupos ou as guerras. Neste caso, parece emergir um padrão de cooperação intrínseco à história dos

⁸ Aquelos sistemas autopoieticos gerados pelo acoplamento de outros sistemas autopoieticos, que conduz à geração de uma nova unidade (de modo geral, os organismos multicelulares são sistemas autopoieticos de maior ordem; os seres humanos, por exemplo, são materializações de sistemas dessa natureza).

organismos, relacionada à manutenção da vida, semelhante aos padrões que ocorrem nos organismos mais simples.

As simulações computacionais de robôs reativos, realizadas por Willems e Haselager (2003), são consonantes com a hipótese de que as pressões do meio contribuem para que vários indivíduos exibam um padrão cooperativo de comportamento. O cenário das simulações descritas pelos autores é formado por um ambiente, que pode variar entre *floresta tropical* ou *deserto*. O ambiente escolhido é habitado por uma população de *Unies*, e seus predadores, os *Wumpus*. Basicamente, os *Wumpus* possuem a estratégia de circundar o alimento dos *Unies* para caçá-los. Em ambientes mais propícios (em geral a floresta tropical), a abundância de alimentos e abrigo facilita a aquisição de alimento aos *Unies*, que atuam individualmente. Por outro lado, em simulações cujo ambiente escolhido é o deserto, escasso em alimentos e abrigo, emerge nos *Unies* um padrão de funcionamento não-programado previamente. Este padrão consiste em um dos *Unies* chamar a atenção do *Wumpus* (correndo o risco de desaparecer) e, em seguida, começar a fugir do predador. Ao perseguir a presa, o *Wumpus* é levado para longe do alimento dos *Unies*, que fica disponível aos outros *Unies* até que ele volte. Conforme afirmam Willems e Haselager (2003, p. 8), sua pesquisa indica alguns padrões de comportamento que parecem ser planejados ou pré-programados, mas que na realidade surgem da interação entre sistemas (cognitivamente) simples e seu ambiente.

Consideramos a relevância dos resultados expostos pelos autores em dois aspectos: (a) por sugerirem que a interação entre componentes relativamente simples e seu ambiente pode levar à emergência de comportamentos coletivos que não dependem de uma programação prévia, além de dispensarem comunicação ou deliberação sofisticadas; (b) por permitirem a realização de testes que disponibilizem algumas intuições aos pesquisadores sobre o comportamento de robôs em ambientes ainda não explorados.



Com relação a (b), reconhecemos a existência de um *abismo* entre a riqueza informacional dos ambientes reais e dos simulados. Contudo, autores como Ziemke (2003) afirmam que as simulações de robôs não podem ser totalmente menosprezadas. O autor lembra que, no desenvolvimento de novas morfologias para robôs, as simulações permitem experimentos mais sistemáticos, por várias gerações, o que em robôs reais se dá de modo muito restrito.

Recapitulando, apresentamos até este ponto da seção uma série de exemplos de organismos capazes de se auto-organizar perante as ameaças do ambiente (HOLLOWAY, 2004; KELSO, 1999). Também apresentamos o experimento de Willems e Haselager (2003), que é condizente com a hipótese de que as pressões do ambiente podem influenciar o comportamento dos sistemas, levando-os a cooperar entre si para garantir a sua conservação. Contudo, parece que persiste nossa questão sobre a possibilidade dos robôs desenvolverem critérios de relevância capazes de suportar um comportamento coerente com a sua manutenção.

Esses critérios, conforme indicam Broens e Gonzalez (2005), estão relacionados à capacidade de se captar do meio ambiente informações significativas. As autoras sugerem uma possível interpretação para a capacidade dos organismos extraírem informação relevante do ambiente: trata-se de compreender a informação em termos da sua significação para um agente: “caracterizamos informação significativa como um processo evolucionário e auto-organizado de geração de padrões que delimitam as ações”⁹(tradução nossa).

É justamente na informação significativa que Broens e Gonzalez (2005) situam os critérios de relevância utilizados pelos organismos na sua manutenção. Esta, por sua vez, conforme ressaltam as autoras, está fortemente ligada à habilidade tátil, nutritiva, inerente ao sistema perceptivo dos seres vivos.

⁹ *We characterize meaningful information as an evolutionary, self-organizing process of pattern generation that constrains actions.*



Estabelecendo uma distinção entre *contato* e *tato*, no que diz respeito aos mecanismos de ajuste e reciprocidade entre organismo e ambiente, as autoras argumentam que, no caso dos robôs atuais, a relação estabelecida com o ambiente possui uma direção única, determinada pela sua estrutura física.

Contudo, existem pesquisadores da robótica que afirmam que os robôs são capazes de captar no ambiente informações relevantes às suas ações, em forma de *affordances*. Para verificar essa hipótese, faremos na próxima seção uma análise do significado das *affordances* na teoria da percepção direta, além de discutir se os robôs são ou não capazes de captá-las.

4.5 *Affordances* e robôs: a importância da co-evolução

Na seção anterior, introduzimos ao nosso plano de investigações o termo *affordance*, o qual nos propusemos a esclarecer na presente seção.

Gibson (1986, p. 18-19), o idealizador da teoria da percepção direta (também conhecida por teoria ecológica da percepção, ou abordagem ecológica), classifica as *affordances* como ofertas da natureza, em forma de possibilidades ou oportunidades (de ação). Tais ofertas, segundo o autor, são invariantes, e assim permaneceram durante toda a evolução da vida animal. Além disso, Gibson (1986, p. 128) chama a atenção para o fato de que o ambiente existia muito antes dos animais.

O ambiente natural oferece muitas formas de vida, e diferentes animais possuem diferentes maneiras de viver. O nicho implica um tipo de animal, e o animal implica um tipo de nicho. Note a complementariedade dos dois. Mas note também que o ambiente como um todo, com suas possibilidades ilimitadas, existia anteriormente aos animais. As condições físicas, químicas, meteorológicas e geológicas da superfície da terra e a preexistência das plantas fizeram possível a existência dos

animais. Elas tiveram que ser invariantes para que os animais evoluíssem.¹⁰ (tradução nossa).

É importante ressaltar que, apesar de classificar algumas características do ambiente como invariantes, Gibson não supõe, no trecho acima, a existência de um ambiente imutável. O autor entende que o tempo de duração das características ambientais é maior, mas isso não quer dizer que elas não sejam dinâmicas. O que acontece, então, é que nos animais as modificações são muito mais rápidas, a ponto de várias gerações evoluírem até que ocorram mudanças significativas no ambiente, que parece, a estas gerações, invariante.

Analisando as idéias de Gibson, Chemero (2003b, p. 580) afirma que “as *affordances* são oportunidades para a ação, e que devido ao fato dos animais possuírem habilidades diferentes, as *affordances* são relativas às habilidades daqueles que as percebem”¹¹ (tradução nossa). Neste sentido, captar *affordances* seria, segundo Chemero (2003a, p. 187), localizar certas características do ambiente, observando que a situação oferece uma certa possibilidade de ação. Entendemos que, por evoluírem em congruência com o ambiente, as capacidades dos animais para captar *affordances* se especializam através de uma história de co-evolução entre animal e meio.

Nessa perspectiva, os robôs deliberativos não são capazes de captar *affordances*, uma vez que as ofertas para ação dadas pelo ambiente *devem* ser captadas sem que haja inferências ou qualquer tipo de deliberação. Essa situação, em princípio, parece retirar dos robôs deliberativos qualquer chance de captá-las por si próprios.

¹⁰ *The natural environment offers many ways of life, and different animals have different ways of life. The niche implies a kind of animal, and the animal implies a kind of niche. Note the complementarity of the two. But note also that the environment as a whole with its unlimited possibilities existed prior to animals. The physical, chemical, meteorological, and geological conditions of the surface of the earth and the pre-existence of plant life are what make animal life possible. They had to be invariant for animals to evolve.*

¹¹ *Affordances are opportunities for behavior. Because different animals have different abilities, affordances are relative to the behavioral abilities of the animals that perceive them.*

Murphy (2000, p. 68) sugere que o trabalho de Gibson (1986), publicado originalmente em 1979, serviu como um dos fundamentos para o pensamento sobre a percepção em robôs, sendo também uma das chaves para o sucesso do paradigma reativo.

Conforme indicado no trecho abaixo, Murphy (2000, p. 86) considera as *affordances* interessantes para os pesquisadores da robótica porque elas são captadas diretamente.

O que torna Gibson tão interessante aos pesquisadores da robótica é que uma *affordance* é diretamente perceptível. Percepção direta significa que o processo de percepção não requer memória, inferência ou interpretação. Isso significa computação mínima, a qual usualmente se traduz em tempos de execução muito rápidos (quase instantâneos) em um computador ou robô.¹² (tradução nossa).

Murphy (2000, p. 158-159) chega a descrever uma competição entre robôs que se apóiam nas *affordances* das cores para guiar o seu comportamento, sugerindo que robôs reativos podem explorar as cores como *affordances*. Estas, segundo a autora, consistem na análise de uma imagem e a identificação de regiões em busca de uma cor determinada, que ao ser encontrada, serve de estímulo para os comportamentos dos robôs.

Não concordamos completamente quanto à possibilidade dos robôs puramente reativos captarem *affordances*. Isso porque tais robôs respondem sempre da mesma maneira a um dado padrão de sinais captado no ambiente. Enquanto nos animais é criada uma história de interações com o meio, isso não ocorre nos robôs, o que empobrece o caráter relacional e a dinâmica entre os robôs e o ambiente.

Vale lembrar que este é um ponto de divergência entre os teóricos da teoria da percepção direta, uma vez que alguns consideram que as *affordances* estão presentes no ambiente, de modo fixo, e independem dos animais. Por outro lado, autores como Gonzalez e, no nosso entendimento, o próprio Gibson, defendem que as *affordances* são relacionais.

¹² What makes Gibson so interesting to roboticists is that an *affordance* is directly perceivable. Direct perception means that the sensing process doesn't require memory, inference, or interpretation. This means minimal computation, which usually translates to very rapid execution times (near instantaneous) on a computer robot.

Apesar de defender o caráter objetivo das *affordances*, Gibson (1986) ressalta o elemento relacional - organismo-ambiente -, a partir do qual as *affordances* se constituem.

Nos organismos, a capacidade para captar *affordances* se especializa através de uma história de co-evolução com o ambiente. Para Gonzalez (2005), organismo e ambiente co-evoluem como uma unidade que não pode ser fragmentada, e as interações entre corpo e meio restringem, mutuamente, a percepção e ação dos organismos. Estes, por sua vez, em seu processo dinâmico e específico de percepção e ação, podem "usar" os recursos disponíveis, sem que seja necessário qualquer tipo de representação mental.

Como os robôs puramente reativos não possuem a capacidade de ajustar suas estruturas com o ambiente, a sua dinâmica de interações se torna unilateral, ao invés de recíproca ou interrelacional, como deve ser, em princípio.

Parece existir uma diferença entre (a) o disparo de uma ação ou uma sequência de ações que ocorre nos robôs reativos perante um determinado padrão de sinais captados do meio, e (b) a capacidade de captar a disponibilidade para uma ação no meio, a qual os animais (inclusive os humanos) captam tão eficientemente. Entendemos que a indicação da diferença entre (a) e (b) esteja de acordo com a afirmação feita por Gibson (1986, p, 243) de que "os estímulos não são sempre impostos sobre um sujeito passivo. Na vida, alguém capta estímulos para deles extrair informações. A informação pode ser a mesma, apesar de uma mudança radical no estímulo captado"¹³(tradução nossa).

Até aqui, concluímos que os robôs deliberativos e os puramente reativos não captam, por si próprios, *affordances* do meio; os deliberativos, por se apoiarem fortemente no planejamento a partir das informações adquiridas por seus sensores; e os reativos por não serem capazes de estabelecer uma história de interações em sintonia com o ambiente. Nos resta agora investigar se os robôs reativos que incorporam em suas arquiteturas redes neurais

¹³ *Stimuli are not always imposed on a passive subject. In life one obtains stimulation in order to extract the information [...]. The information can be the same, despite a radical change in the stimulation obtained.*

artificiais, e os robôs híbridos, especialmente aqueles cuja arquitetura é composta por redes neurais recorrentes associadas a componentes reativos, são capazes de captar *affordances*.

Descrevemos, no capítulo anterior, o experimento realizado por Nolfi (1997), no qual robôs e seus sistemas controladores foram evoluídos para localizar e se manter próximos a objetos cilíndricos presentes no ambiente, além de evitar choques com paredes. Nesse experimento, os resultados obtidos com a evolução de redes do tipo *feedforward* sem camadas ocultas, foram significativos. Nolfi (1997, p. 8-9) afirma que os robôs controlados por redes sem ciclos conseguiram, na maioria dos casos, atingir o objetivo especificado pela função de avaliação (*fitness function*). Acrescenta-se aos resultados obtidos no experimento o fato dos robôs evoluídos apresentarem, de modo geral, padrões de comportamento diferentes perante os mesmos estímulos captados no ambiente. Nolfi atribui, no trecho abaixo, essas diferenças às condições iniciais dos processos evolucionários de cada um dos robôs.

Analisando a estratégia dos outros robôs evoluídos, nós observamos que, devido às diferentes condições iniciais do processo evolucionário, houve variação nas posições relativas dos robôs com relação ao alvo (alguns pararam com o alvo em frente ou quase em frente a si, outros com o alvo à sua direita, e apenas alguns com o alvo à sua esquerda). Contudo, todos os robôs evoluídos permaneceram perto do alvo, se movimentando para frente e para trás, em frente a ele.¹⁴ (NOLFI, 1997, p. 9-10). (tradução nossa).

Se levarmos em conta que os robôs (na realidade um único robô, com diferentes redes neurais evoluídas) possuíam o mesmo aparato sensório-motor, encontramos um caso merecedor de atenção na perspectiva da teoria da auto-organização. Apoiados nas descrições desses experimentos, inferimos que os robôs, por meio de processos evolucionários, não só conseguiram adquirir hábitos a partir de suas interações com o ambiente, como também

¹⁴ By analyzing the strategy of the other evolved individuals we observed that, because of the different initial conditions of the evolutionary process, these individuals varied in the relative positions assumed in front of the target (some stopped with the target in front or almost in front of them, other with the target on the right side, and only a few with the target on the left side). However, all evolved individuals remained close to the target, moving back and forth in front of it. In addition, in most cases, evolved individuals remained close to the target by assuming relative positions which were not located in the discriminative area.

podem ter desenvolvido a capacidade de captar *affordances* no meio (mesmo não estando envolvidos em tarefas que levassem em conta sua manutenção num sentido mais forte, enquanto manutenção autopoietica).

Nolfi (1997) não se refere, durante a descrição dos experimentos, à capacidade de captar *affordances*. Porém, a sua descrição dos processos é, a grosso modo, semelhante ao processo filogenético: em seus experimentos, diversas gerações de robôs evoluíram de modo a transmitir às gerações futuras algumas características, dentre as quais está a capacidade de responder a um determinado padrão de sinais captados no meio com algumas ações.

Ainda resta a possibilidade de evolução de robôs que incorporem redes neurais recorrentes. Estas, conforme indicamos ao final do capítulo 3, podem ser entendidas como sistemas dinâmicos. Uma das áreas de aplicação na qual essa classe de redes vem sendo utilizada é o desenvolvimento de tarefas biologicamente inspiradas, como por exemplo o desenvolvimento motor (HAYKIN, 1994; BEER, 1997).

Beer utiliza métodos evolucionários para desenvolver controladores, com o intuito de “buscar o espaço dos sistemas dinâmicos, definido pelos parâmetros da arquitetura em questão (da CTRNN), para dinâmicas que, quando acopladas a um modelo do robô e do ambiente, otimizem a performance do robô na realização de suas tarefas”¹⁵ (tradução nossa).

São três os tipos de tarefas para os quais Beer (1997) submeteu robôs em seus experimentos: (a) quimiotropismo, (b) coordenação de um sistema motor hexápode e (c) tomada de decisões e aprendizagem seqüencial. Em (a), Beer (1997, p. 271) relata a evolução do robô em diversos padrões de tropismo: seguir diretamente para o estímulo; alternar movimentos ritmados de um lado para o outro, para seguir em direção ao estímulo; quando o robô estiver longe do estímulo, usar movimentos rítmicos laterais para captar o estímulo de

¹⁵ [...]to search the space of dynamical systems defined by the parameters of given CTRNN architecture for dynamics which, when coupled to a model agent's body and environment, optimize that agent's performance on a given task (BEER, 1997, p. 270).

modo mais eficiente, e quando se encontrar perto do estímulo, que é mais forte, seguir diretamente para a sua fonte; entre outros padrões interessantes. Nos experimentos em (b), o robô convergiu, de modo semelhante, para um movimento ritmado dos membros, em diversas variações entre a presença e a ausência de *feedback* originado dos membros do robô (proprioceptivos) (Beer, 1997, p. 275). Finalmente, em (c), Beer (1997, p. 280) relata que foram evoluídos controladores capazes não só de gerar seqüências particulares de respostas para um conjunto de estímulos, como também de usar a correlação entre os sinais de reforço (*feedback*) e sua própria resposta durante o estímulo anterior, modificando os comportamentos seguintes.

Em resumo, foram obtidos padrões de comportamento diferentes nas diversas condições descritas por Beer (1997) em (a), (b) e (c). De modo geral, os robôs apresentaram a capacidade de aprender e até modificar seus padrões de comportamento perante os estímulos captados no ambiente, além de esboçar, aos olhos de um observador externo, a formação de critérios de relevância no que diz respeito à realização das ações perante algumas modificações no decorrer dos experimentos.

Apoiados nas descrições de Nolfi (1997) e Beer (1997), inferimos que os robôs dotados de controladores compostos por redes neurais recorrentes parecem ser capazes de atingir graus de auto-organização secundária superiores àqueles que incorporam redes do tipo *feedforward*.

No que se segue, apresentamos um balanço dos resultados obtidos em nossa pesquisa.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Iniciamos a presente dissertação enunciando o nosso objetivo de investigar a Teoria da Auto-Organização, de modo a verificar suas possíveis contribuições para as pesquisas em robótica. Procuramos esclarecer as hipóteses centrais defendidas pelos teóricos da auto-organização, ressaltando, entre elas: (a) a inexistência, nos processos de auto-organização, de um centro controlador capaz de influenciar diretamente os rumos desses processos, (b) a necessidade de existirem em tais processos a interação entre seus componentes de modo a possibilitar a emergência de novas formas de organização.

No *capítulo 1*, após analisarmos os pressupostos da teoria da auto-organização, apresentamos conceitos que julgamos relevantes para a compreensão da Teoria dos Sistemas Dinâmicos, os quais, conforme procuramos indicar, constituem um conjunto de ferramentas úteis para o estudo dos sistemas que, em geral, são influenciados pela dinâmica de interações entre os seus componentes. Dentre os sistemas dinâmicos auto-organizados estudados, enfatizamos as máquinas autopoieticas. Estas, como vimos, constituem uma classe de máquinas capazes de se organizar a partir de processos de produção de componentes concatenados de modo que sejam capazes de gerar as condições necessárias às suas próprias interações e transformações.

A partir do contexto das teorias da auto-organização e dos sistemas dinâmicos, investigamos, no *capítulo 2*, os principais paradigmas da robótica contemporânea. O primeiro paradigma analisado foi o *deliberativo* ou *hierárquico* que, conforme ressaltamos, se realiza pela organização seqüencial das primitivas de percepção, planejamento e ação, respectivamente.



Ainda no capítulo 2, apresentamos uma descrição do paradigma reativo, caracterizado principalmente pela eliminação da primitiva de planejamento nas suas arquiteturas. Verificamos que tal eliminação foi inspirada em sistemas biológicos cognitivamente simples, cuja capacidade de se manter no ambiente não está associada a processos de inferência e planejamento.

Dentre os principais problemas ainda não resolvidos no paradigma deliberativo, ressaltamos o problema dos *frames* e a suposição de modelos de mundo fechados. Concluimos provisoriamente que mesmo que aspectos desses problemas fossem resolvidos, restaria ainda uma restrição muito grande à realização dos processos auto-organizados nesses paradigmas: eles se apóiam fortemente em processos simbólicos de processamento de informação.

Com relação às arquiteturas reativas, verificamos que as suas maiores restrições dizem respeito à falta de flexibilidade no comportamento dos robôs, que sempre respondem do mesmo modo a um conjunto de sinais captados no ambiente por seus sensores.

Concluimos o capítulo 2 considerando que os robôs construídos a partir dos paradigmas deliberativo e reativo não podem realizar processos de auto-organização secundária, a menos que seus *designers* lancem mão de arquiteturas baseadas em redes neurais recorrentes.

No capítulo 3, analisamos o paradigma híbrido deliberativo/reativo, ressaltando que apesar do aumento na flexibilidade com relação aos comportamentos presentes no paradigma reativo, a diferença na organização de suas primitivas em relação aos demais paradigmas analisados reside na realização do planejamento, num modo deliberativo, das tarefas antes que sejam iniciadas as ações, num modo reativo.

Apesar da expectativa de superação dos problemas encontrados nos paradigmas deliberativo e reativo pelo paradigma híbrido (uma vez que suas arquiteturas incorporam



técnicas reativas associadas à capacidade de memória local, planejamento e mesmo a utilização de modelos de mundo), os robôs híbridos também apresentaram limitações quanto à capacidade de se ajustar às demandas do ambiente. Argumentamos que as arquiteturas baseadas em redes neurais artificiais, por permitirem a aquisição de hábitos nos robôs e, no caso das redes recorrentes, por garantirem uma certa flexibilidade com relação aos ajustes com o ambiente, tornam possível aos robôs a realização de formas iniciais de auto-organização secundária. Entretanto, foi na robótica evolucionária, apresentada como uma proposta de expansão e otimização dos mecanismos de busca que se apóiam em processos de auto-organização, que encontramos as características mais promissoras para a realização de auto-organização secundária em robôs.

Entendemos que os processos envolvidos na robótica evolucionária permitem um salto qualitativo no potencial dos modelos elaborados na robótica, uma vez que possibilitam a implementação de mecanismos de busca poderosos. Tais mecanismos permitem uma aproximação, mantidas as devidas distinções, entre os processos de auto-organização realizados pelos robôs e os processos autopoieticos. Esta aproximação relaciona-se à característica dos processos de auto-organização secundária, cujo desenvolvimento possibilita que os sistemas que os incorporam dependam cada vez menos do meio para se manter.

Como ressaltamos no *capítulo 4*, o que falta aos robôs para que eles consigam atingir níveis de auto-organização mais avançados, são critérios de relevância que lhes permitam aprender, através de mecanismos de ajustes como o meio, a tornar viável a sua presença no mundo. Buscamos na biologia algumas inspirações para indicar possíveis caminhos para o desenvolvimento de tais critérios, e foi no comportamento dos organismos mais simples que encontramos indicações promissoras. Isso porque, em tais organismos, parece existir uma capacidade de tratar informação de modo significativo, sem que sejam necessários processamento ou inferências complexas. De modo a compreender essa capacidade, buscamos



subsídios na teoria da percepção direta, desenvolvida por Gibson, segundo a qual o ambiente desempenha um papel fundamental no sentido de fornecer aos organismos oportunidades para ação. Dentre os principais pressupostos dessa teoria, encontra-se justamente a hipótese de que os organismos são capazes de captar *affordances*, ou informação significativa sobre as ofertas para ação presentes no ambiente. A questão que levantamos nesse contexto é se os robôs teriam a capacidade de captar tais *affordances*. Uma resposta a essa questão poderia indicar respostas à questão anterior, relativa ao estabelecimento de critérios de relevância para a ação. A nossa hipótese é que para adquirir critérios de relevância suficientes para guiar suas ações, os robôs precisariam captar as diversas *affordances* presentes no ambiente.

Um breve estudo sobre os sistemas autopoieticos foi realizado com o intuito de indicar uma classe de máquinas (as autopoieticas) capazes de captar *affordances* a partir de uma história bem definida de interações com o ambiente. E é a esta história de interações que atribuímos a perfeita integração entre os organismos e o ambiente, para concluirmos que somente máquinas integradas realmente com o meio (e consigo próprias) terão condições de evoluir completamente (em congruência com o meio), e com isso aumentar seus graus de auto-organização secundária, tornando-se, assim, cada vez mais autônomas com relação ao ambiente.

Nesse sentido, não bastaria aos robôs captarem *affordances* para que graus de auto-organização secundária próximos da organização autopoietica pudessem ser atingidos. Isso porque, na teoria autopoietica, o sistema e sua organização devem ser entendidos como um todo.

O que importa, nessa perspectiva, é que as pesquisas sejam direcionadas para uma integração entre robôs e ambiente, num sentido análogo à proposta de Varela, Thompson e Rosch (1991), Clark (1997), Maturana e Varela (2002) entre outros, de entender os

organismos enquanto possuidores de mentes e corpos integrados e fortemente acoplados ao ambiente.

Para as pesquisas futuras, pelo menos dois possíveis campos parecem estar abertos para férteis investigações: o primeiro está relacionado aos alcances e limites dos processos de auto-organização secundária na robótica evolucionária, desenvolvida numa perspectiva ecológica e orientada à construção de robôs acoplados ao meio.

O segundo e mais ambicioso campo de possibilidades, consiste na tentativa de gerar robôs a partir de uma construção centrífuga, que permitiria a evolução de sistemas realmente integrados e acoplados ao meio. Este método traria aos robôs (se é que eles continuariam a ser chamados assim) a possibilidade de realizar a dinâmica da auto-organização, passando pelos estágios primário e secundário, ou até chegando a realizar a autopoiese. Nessa perspectiva, as informações que os robôs captassem no ambiente teriam, potencialmente, a capacidade de influenciar os seus demais componentes. As modificações que tivessem mais sucesso na dinâmica de interação dos robôs com o ambiente poderiam ser transmitidas adiante, através das gerações. Uma pesquisa dessa natureza implicaria, em certa medida, no surgimento de um novo paradigma, o qual permitiria o desenvolvimento de robôs capazes de estabelecer uma história co-evolucionária com o ambiente.

Nos casos acima citados, pesquisas vêm sendo desenvolvidas, mas existe ainda uma interrogação sobre quais serão os limites e alcances dos robôs em nosso cotidiano. Intuitivamente, poderíamos dizer que os seres humanos, nas últimas décadas, têm criado com os robôs uma história de co-evolução. Essa história, como indica Clark (2003), é apenas uma consequência da estrutura de funcionamento pela qual os seres humanos são naturalmente guiados: a tendência de incorporar tecnologias que potencializem suas próprias capacidades cognitivas.



Quais serão os limites ultrapassados com o uso dessas novas tecnologias? Essa é uma questão de difícil resposta, já que ela depende dos tipos de relações estabelecidas entre os seres humanos, os robôs em desenvolvimento e as tecnologias que vêm surgindo em decorrência das pesquisas que buscam desenvolvê-los.

Contudo, se analisarmos de modo crítico a tendência de incorporarmos novas tecnologias à nossa atividade cotidiana, poderemos direcionar o seu desenvolvimento de modo apropriado. Seria uma maneira de, como indica Clark (2003, p 195), “estruturarmos ativamente os tipos de mundo, tecnologias e culturas que construirão os tipos de pessoas que nós escolhemos ser”.

Segue abaixo um breve resumo de nossas conclusões:

	Robôs Deliberativos	Robôs Puramente Reativos (sem RNA)	robôs reativos dotados de RNA do tipo <i>feedforward</i>	robôs reativos dotados de RNA do tipo recorrente	robôs híbridos sem RNA	Robôs híbridos dotados de RNA
Auto-organização primária	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Auto-organização secundária	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Autopoiese	Não	Não	Não	Não	Não	Não
<i>Affordances</i>	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim
CrITÉRIOS de relevância para ação	Não	Não	Talvez	Talvez	Não	Talvez

Quadro 1: o quadro acima exibe um resumo comparativo de nossas conclusões acerca dos limites e alcances dos robôs analisados neste estudo, frente aos níveis de auto-organização, *affordances* e critérios de relevância para ação.

REFERÊNCIAS

- ARISTOTLE. *The Physics*. Book 2. Translated by R. P. Hardie and R. K. Gaye. Disponível em: <<http://classics.mit.edu/Aristotle/physics.2.ii.html>>. Acesso em: 12 fev. 2005.
- ARISTOTLE. *The Physics*. Books 1-4. Translated by P. H. Wicksteed and F. M. Cornford. Harvard: Harvard University Press, 19--.
- ARMSTRONG, D. M. *Belief, Truth and Knowledge*. London: Cambridge University Press, 1981.
- ARKIN, R. C. *Behavior-Based Robotics*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1998.
- ASHBY, W. R. Principles of the self-organizing system. In: Foerster, H. von; Hopf, Jr. G. W. (Ed.). *Principles of self-organization*. p. 255-278. Oxford, Pergamon, 1962.
- ASHBY, W. R. *Introdução à Cibernética*. São Paulo: Editora Perspectiva, 1970.
- BEDAU, M. Downward Causation and Autonomy of Weak Emergence. In: El-Hani, C. N. (Ed.). *Principia, Special Issue on Emergence and Downward Causation*, n. 6, p. 5-50. 2002.
- BEDAU, M. A. Philosophical Aspects of Artificial Life. In: Varela, F. J.; Bougine, P. (Ed.). *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. p. 494-503. 2. printing. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994.
- BEDAU, M. A. et al. Open problems in artificial life. *Artificial Life*, n. 6, p. 363-376. Cambridge, MA: The MIT Press, 2001. Disponível em: <<http://parallel.hpc.unsw.edu.au/complex/alife8/cfp.html>>. Acesso em: 20 set. 2004.
- BEER, R. D. The dynamics of adaptive behavior: a research program. *Robotics and Autonomous Systems*. n. 20, p. 257-289, Elsevier, 1997.
- BENANTE, R. C. *Alcance e limites das Redes Neurais Artificiais na Ciência Cognitiva*. 2001. 241f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, 2001.
- BERTALANFFY, L. von. *Teoría General de los Sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. Traducción de Juan de Almela. 10. reimpressão. México: Fondo de Cultura Económica, 1995.
- BISHOP, C. M. Pattern recognition and feedforward networks. In: Wilson, R. A.; Keil, F. C. (Ed.) *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1999.
- BOHM, D. *A Totalidade e a Ordem Implicada: uma nova percepção da realidade*. Tradução de Mauro de Campos Sales. Revisão técnica de Newton Roberval Eichenberg. 10. ed. São Paulo: Cultrix, 1998.

- BOHM, D. *Wholeness and the implicate order*. London: Routledge & Keagan Paul, 1980.
- BRAGA, A. P.; LUDEMIR, T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. *Redes Neurais Artificiais: teoria e aplicações*. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- BRESCIANI, F.E.; D'OTTAVIANO, I.M.L. Conceitos Básicos de Sistema Dinâmico Caótico. In: *Seminários de Auto-Organização do Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência*. Campinas: Unicamp, 2001.
- BROENS, M. C.; GONZALEZ, M. E. Q. Information, Life and Evolutionary Robots: a systemic approach.. *Auto-Organização: estudos interdisciplinares em filosofia, ciências naturais e humanas, e artes*. Campinas: Unicamp. (Coleção CLE). Submitted, 2005.
- BROLI, J. A. Autonomia: um fenômeno emergente em agentes biológicos e artificiais. In: Encontro Brasileiro Internacional de Ciência Cognitiva, 6., *Auto-Organização e Informação: uma abordagem sistêmica do conhecimento*, 2004, São Luís do Maranhão. *Resumos*. São Luís, MA, 2004a. p. 35.
- BROLI, J. A. Evolução e comportamento emergente em agentes adaptativos. In: Encontro Brasileiro Internacional de Ciência Cognitiva, 5., *Vida, Robôs e Emergência: novas perspectivas na Ciência Cognitiva*, 2003, São Vicente. *Resumos*. São Vicente, SP, 2003a. p. 63-64.
- BROLI, J. A. O problema da especificação de fronteiras em sistemas autônomos formados por agentes coletivos. In: Silva, J. C. S.; Pinto, P. R. M. (Ed.) *Atas do XI Encontro Nacional de Filosofia da ANPOF. Resumos*. Salvador, BA: Associação Nacional de Pós-Graduação em Filosofia, 2004b. p.248-249.
- BROOKS, R. A. Artificial life and real robots. In: Varela, F. J.; Bourgine, P. (Ed.). *Towards a Practice of autonomous systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. p. 3-10. 2. printing. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994.
- BROOKS, R. A. *Cambrian Intelligence: the early history of the New AI*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1999.
- BUASON, G.; BERGFELDT, N.; ZIEMKE, T. Brains, Bodies, and Beyond: competitive co-evolution of robot controllers, morphologies and environments. *Genetic Programming and Evolvable Machines*. in press. Disponível em: <<http://www.ida.his.se/~tom/>>. Acesso em: 12 mar. 2005.
- CHEMERO, A. An Outline of a Theory of Affordances. *Ecological Psychology*. 15(2), p. 181-195. Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 2003a.
- CHEMERO, A. Information for Perception and Information Processing. *Minds and Machines*. 13: p. 577-588. Printed in the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003b.
- CHEMERO, A.; KLEIN, C.; CORDEIRO, W. Events as Changes in the Layout of Affordances. *Ecological Psychology*. 15(1), p. 19-28. Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 2003.
- CHURCHLAND, P. S.; SEJNOWSKI, T. J. *The Computational Brain*. Cambridge, MA: The MIT Press. 4. ed. 1996.

CLARK, A. *Being There: putting brain, body and world together again*. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.

CLARK, A. *Mindware: an introduction to the philosophy of Cognitive Science*. Oxford, OX: Oxford University Press, 2001.

CLARK, A. *Natural-Born Cyborgs: minds, technologies, and the future of human intelligence*. Oxford, OX: Oxford University Press, 2003.

CLIFF, D. Neural Networks for Visual Tracking in an Artificial Fly. In: Varela, F. J.; Bourgine, P. (Ed.). *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. p. 78-87. 2. printing. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994.

COLORNI, A.; DORIGO, M.; MANIEZZO, V. Distributed Optimization by Ant Colonies. In: Varela, F. J.; Bourgine, P. (Ed.). *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. p. 134-142. 2. printing. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994.

CUTLAND, N. *Computability: an introduction to recursive function theory*. 7. re-impression. Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1994.

DEBRUN, M. A Dinâmica da Auto-Organização Primária. In: Debrun, M.; Gonzales, M. E. Q.; Pessoa Júnior, O. (Org.). *Auto-Organização: estudos interdisciplinares em filosofia, ciências naturais e humanas, e artes*. v. 18, p. 25-59. Campinas: Unicamp, 1996a. (Coleção CLE)

DEBRUN, M. A Idéia de Auto-Organização. In: Debrun, M.; Gonzales, M. E. Q.; Pessoa Júnior, O. (Org.). *Auto-Organização: estudos interdisciplinares em filosofia, ciências naturais e humanas, e artes*. v. 18, p. 3-23. Campinas: Unicamp, 1996b. (Coleção CLE)

DEBRUN, M. Prefácio: Por que, quando e como é possível falar em auto-organização? In: Debrun, M.; Gonzales, M. E. Q.; Pessoa Júnior, O. (Org.). *Auto-Organização: estudos interdisciplinares em filosofia, ciências naturais e humanas, e artes*. v. 18, p. xxxiii-xliii. Campinas: Unicamp, 1996c. (Coleção CLE)

DEDIEU, E.; MAZER, E. An Approach to Sensorimotor Relevance. In: Varela, F. J.; Bourgine, P. (Ed.). *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. p. 88-95. 2. printing. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994.

DENNETT, D. C. *Kinds of Minds: towards an understanding of consciousness*. New York: Basic Books, 1996.

DESCARTES, R. *As Meditações*. São Paulo: Abril Cultural, 1979. (Coleção Os Pensadores).

DROGOUL, A.; FERBER, J.; CORBARA, B.; FRESNEAU, D. A Behavioral Simulation Model for the Study of Emergent Social Structures. In: Varela, F. J.; Bourgine, P. (Ed.). *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. p. 161-170. 2. printing. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994.

DUPUY, J. P. *Nas origens das ciências cognitivas*. São Paulo: Editora UNESP, 1996.



EL-HANI, C. N. *Níveis da ciência, níveis da realidade: evitando o dilema holismo/reducionismo no ensino de ciências e biologia*. 2000. 377 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, 2000.

EL-HANI, C. N.; EMMECHE, C. On Some Theoretical Grounds for an Organism-centered Biology: property emergence, supervenience, and downward causation. *Theory Biosci.* n.119, p. 234-275. Urban & Fischer Verlag. Apr. 2000.

EL-HANI, C. N.; PEREIRA, A. M. Higher-level Descriptions: why should we preserve them? In: Andersen, P. B.; Emmeche, C.; Finnemann, N. O.; Christiansen, P. V. (Org.). *Downward Causation: minds, bodies and matter*. p. 118-142. AARHUS University Press, 2000.

EL-HANI, C. N.; VIDEIRA, A. A. P. Causação Descendente, Emergência de Propriedades e Modos Causais Aristotélicos. *Theoria*, v. 16, n. 41, pp. 301-329. San Sebastian, Mayo 2001.

FEITOSA, H. A.; PAULOVICH, L. *Um prelúdio à Lógica*. Bauru, SP: UNESP, 2001.

FLOREANO D. & NOLFI S. Adaptive behavior in competing co-evolving species. In: Husband, P.; Harvey, I. (Ed.). *Proceedings of the Fourth Conference on Artificial Life*. p. 378-387. Cambridge, MA: The MIT Press, 1997.

FLOREANO D.; NOLFI S. God Save the Red Queen! Competition in co-evolutionary robotics. In: Koza, J.R. et. al. (Ed.) *Genetic Programming 1997: Proceedings of the Second Annual Conference*. p. 398-406. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1997. Disponível em: <<http://gral.ip.rm.cnr.it/nolfi/nolfipub.html>>. Acesso em: 23 nov. 2004.

GIBSON, J. J. *The ecological approach to visual perception*. 10th re-printing. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 1986.

GONZALES, M. E. Q. Ação, Causalidade e Ruído nas Redes Neurais Auto-Organizadas. In: Debrun, M.; Gonzales, M. E. Q.; Pessoa Júnior, O. (Org.). *Auto-Organização: estudos interdisciplinares em filosofia, ciências naturais e humanas, e artes*. v. 18, p. 273-297. Campinas: Unicamp, 1996. (Coleção CLE)

GONZALEZ, M. E. Q. Complexidade e criatividade: uma abordagem sistêmica dos processos auto-organizados. In: Cirne-Lima, C; Helfer, I.; Rohden, L. (Org.). *Dialética, caos e complexidade*. p. 245-256. São Leopoldo, RS: Editora Unisinos, 2004. (Coleção Idéias, 13).

GONZALEZ, M. E. Q. Information and Mechanical Models of Intelligence: what can we learn from Cognitive Science? *Pragmatics and Cognition*, 2005. (in press).

GONZALEZ, M. E. Q.; BROENS, M. C.; HASELAGER, W. F. G. Consciousness and Agency: the importance of self-organized action. *Networks*, 3-4. p.103-113, 2004. Disponível em: <<http://lgxserve.ciseca.uniba.it/lei/ai/networks/04/>>. Acesso em: 12 dez. 2004.

GONZALEZ, M. E. Q.; HASELAGER, W. F. G. Creativity and self-organization: contributions from cognitive science and semiotics. *SEED* (3),3, 61-70, 2003. Disponível em: <http://www.library.utoronto.ca/see/pages/SEED%20journal%20library.html#3_3>. Acesso em: 12 dez. 2004.

GONZALEZ, M. E. Q.; HASELAGER, W. F. G. Raciocínio abdutivo, criatividade e auto-organização. *Cognitio*, 3, 22-31, 2002.



GROSSBERG, S.; GOVINDARAJAN, K. K.; WYSE, L. L.; COHEN, M. A. ARTSTREAM: a neural network model of auditory scene analysis and source segregation. *Neural Networks*. v. 17, n. 4, p. 511-536, May, 2004. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 23 abr. 2004.

GROSSBERG, S. The link between brain learning, attention, and consciousness. *Consciousness and Cognition*. n.8, p.1-44, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 08 nov. 2004.

HAKEN, H. *Information and Self-Organization: a macroscopic approach to complex systems*. 2nd enlarged ed. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

HAKEN, H. Synergetics and Some Applications to Psychology. In: Tschacher, W.; Dauwalder, J-P. (Ed.). *Studies of Nonlinear Phenomena in Life Science, 8. Dynamics, Synergetics, Autonomous Agents: nonlinear systems approaches to Cognitive Psychology and Cognitive Science*. p. 3-12. Singapore: World Scientific, 1999.

HASELAGER, W. F. G. Co-evolutionary robotics and the problems of autonomy. In: Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, 8. *Proceedings*. São Luiz, MA, Brazil. 2004a. In press.

HASELAGER, W. F. G. *Co-evolutionary robotics and the problems of autonomy*. Trabalho apresentado ao VI Encontro Brasileiro Internacional de Ciência Cognitiva e VIII Simpósio Brasileiro de Redes Neurais. São Luís, MA, 2004b.

HASELAGER, W. F. G. *Cognitive Science and Folk Psychology: the right frame of mind*. London: SAGE Publications Inc., 1997.

HASELAGER, W. F. G. Cursos ministrados ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Filosofia nos anos de 2002, 2003, 2004. Disponível em: <<http://www.nici.kun.nl/~haselag/port/portindex.html>>. Acesso em 08 nov. 2004c.

HASELAGER, W. F. G. Form, function and the matter of experience. *SEED* (3),3, 100-111, 2003a. Disponível em: <http://www.library.utoronto.ca/see/pages/SEED%20journal%20library.html#3_3>. Acesso em: 12 dez. 2004.

HASELAGER, W. F. G. Robots and emergence: what's life got to do with it? In: Encontro Brasileiro Internacional de Ciência Cognitiva, 5., *Vida, Robôs e Emergência: novas perspectivas na Ciência Cognitiva. Resumos*. São Vicente, SP, 2003b. p. 22-23.

HASELAGER, W. F. G. *Robots and emergence: what's life got to do with it?* Trabalho apresentado ao V Encontro Brasileiro Internacional de Ciência Cognitiva. *Vida, Robôs e Emergência: novas perspectivas na Ciência Cognitiva*. São Vicente, SP. 2003c.

HASELAGER, W. F. G.; GONZALEZ, M. E. Q. Causalidade Circular e Causação Mental: uma saída para a oposição entre internalismo e externalismo? *Manuscrito*, XXV(1), 217-238, 2002.

HASELAGER, W. F. G.; GROOT, A. D. de; RAPPARD, J. F. H. van. Representationalism versus anti-representationalism: a debate for the sake of appearance. *Philosophical Psychology*, 16(1), 5-23, 2003.

HAYKIN, S. *Neural Networks: a comprehensive foundation*. 8. printing. Englewood Cliffs, NJ: Macmillan College Publishing Company, Inc., 1994.

HEBB, D. O. *The Organization of Behavior*. New York: Wiley, 1949.

HOLLOWAY, M. A Intrigante Comunicação das Bactérias. *Scientific American Brasil*, Duetto, São Paulo, abril de 2004. Disponível em: <<http://www2.uol.com.br/sciam/>>. Acesso em: 10 abr. 2004.

HOPFIELD, J. J. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Properties. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79. p. 2554-8, 1982.

HUME, D. Investigação sobre o entendimento humano. Tradução de José Oscar de Almeida Marques. São Paulo: Editora UNESP, 1998.

JORDAN, M. I. Recurrent Networks. In: Wilson, R. A.; Keil, F. C. (Ed.) *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1999.

JUARRERO, A. *Dynamics in Action: intentional behavior as a complex system*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2002.

KELSO, J. A. S. *Dynamic Patterns: the self-organization of brain and behavior*. 3rd ed. Cambridge, MA: The MIT Press, 1999.

KOHONEN, T. An Adaptive Associative Memory Principle. *IEEE Transactions on Computers*. C 23. p. 444-445, 1974.

KOHONEN, T. Correlation Matrix Memories. *IEEE Transactions on Computers*, C 21. p. 353-359, 1972.

KOHONEN, T. *Self-Organization and Associative Memory*. Berlin: Springer-Verlag, 1989.

KOHONEN, T. Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. *Biological Cybernetics*, 43. 1982.

KUHN, T. S. A Estrutura das Revoluções Científicas. Tradução de Beatriz Boeira e Nelson Boeira. 3. ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 1991. (Coleção Debates).

KUNG, S. Y. *Digital Neural Networks*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1993.

LIMA, L. G. P.; BROLI, J. A.; OLIVEIRA, L. F. Ordem e Caos em Redes Neurais Booleanas. In: Simpósio em Filosofia e Ciência, 5. *Trabalho e conhecimento: desafios e responsabilidades da ciência*. Anais eletrônicos. Marília: UNESP, 2003.

LUSTOSA, P. R. Reflexões filosóficas sobre a cognição animal. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, 2003.

MARAR, J. F. *Polinômios Potências de Sigmóide (PPS): uma nova técnica para aproximação de funções, construção de Wavenets e suas aplicações em processamento de imagens e sinais*. 1997. 180 f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal de Pernambuco, 1997.



MARR, D. *Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: W. H. Freeman and Co., 1982.

MATURANA, H. Transdisciplinaridade e Cognição. In: Nicolescu, B. et. al. *Educação e Transdisciplinaridade*. pp. 83-114. Brasília: UNESCO, 2000.

MATURANA, H., VARELA, F. J. *De máquinas e Seres Vivos: autopoiese – a organização do vivo*. 3. ed. Tradução de Juan Acuña Llorens. 2. reimpressão. Porto Alegre: Artes Médicas, 2002.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*. 5, p. 115-133. 1943.

MIGLINO, O.; NOLFI, S.; PARISI, D. Discontinuity in evolution: how different levels of organization imply pre-adaptation. In: Belew, R. K.; Mitchell, M. (Ed.). *Adaptive Individuals in Evolving Populations*. p. 399-415. Readings, MA: Addison-Wesley, 1996. Disponível em: <<http://gral.ip.rm.cnr.it/nolfi/nolfipub.html>>. Acesso em: 23 nov. 2004.

MINSKY, M. L. PAPERT, S. *Perceptrons: an introduction to computational geometry*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1969.

MURPHY, R. R. *Introduction to AI Robotics*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2000.

NEWELL, A., SIMON, H. A. *Human Problem Solving*. 10. printing. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc. 1972.

NILSSON, N. *Learning Machines*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1965.

NOLFI, S. Adaptation as a more powerful tool than decomposition and integration. In: Fogarty, T.; Venturini, G. (Ed.). International Conference on Machine Learning, 13th. *Proceedings of the Workshop on Evolutionary Computing and Machine Learning*. University of Bari, Italy, 1996.

NOLFI, S. Evolutionary Robotics: exploiting the full power of self-organization. *Connection Science*, v. 10, n. 3-4, p. 167-184, 1998.

NOLFI, S. Evolving non-trivial behavior on autonomous robots: adaptation is more powerful than decomposition and integration. In: Gomi, T. (Ed.). *Evolutionary Robotics*. Ontario: AAI Books, 1997. Disponível em: <<http://gral.ip.rm.cnr.it/nolfi/nolfipub.html>>. Acesso em: 23 nov. 2004.

NOLFI, S. Power and the limits of reactive agents. *Neurocomputing*, 49, p. 119-145. 2002. Disponível em: <<http://gral.ip.rm.cnr.it/nolfi/nolfipub.html>>. Acesso em: 23 nov. 2004.

NOLFI, S.; FLOREANO, D. Co-evolving predator and prey robots: Do 'arm races' arise in artificial evolution? *Artificial Life*. 4 (4), p. 311-335. 1998. (in press). Disponível em: <<http://gral.ip.rm.cnr.it/nolfi/nolfipub.html>>. Acesso em: 23 nov. 2004.

NOLFI, S.; ELMAN, J. L.; PARISI D. Learning and evolution in neural networks. *Adaptive Behavior*, (3) 1:5-28. 1994. Disponível em: <<http://gral.ip.rm.cnr.it/nolfi/nolfipub.html>>. Acesso em: 23 nov. 2004.

NOLFI, S.; FLOREANO, D. Synthesis of autonomous robots through evolution. *Trends in Cognitive Sciences*. v. 6, n.1, Jan. 2002.

PARISI, D.; NOLFI, S. The influence of learning on evolution. In: Belew, R. K.; Mitchell, M. (Ed.). *Adaptive Individuals in Evolving Populations*. p. 419-428. Readings, MA: Addison-Wesley, 1996.

PESSOA JÚNIOR, O. Medidas Sistêmicas e Organização. In: Debrun, M.; Gonzales, M. E. Q.; Pessoa Júnior, O. (Org.). *Auto-Organização: estudos interdisciplinares em filosofia, ciências naturais e humanas, e artes*. v. 18, p.129-161. Campinas: Unicamp, 1996. (Coleção CLE)

ROBOCRITTERS: Os Novos Robôs. Co-produção da BBC/TLC, versão brasileira: VTN-Santos. Exibido pela Discovery Channel, 2000.

ROOIJ, I. van; BONGERS, R. M.; HASELAGER, W. F. G. The Dynamics of Simple Prediction: judging reachability. In: Gleitman, L. R.; Joshi, A. K. (Ed.). *Proceedings of the 22nd annual meeting of the Cognitive Science Society*. p.535-540. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 2000.

ROSENBLATT, F. The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*. 65, p. 386-408. 1958.

ROSENBLATT, F. *Principles of Neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms*. New York: Spartan Books, 1962.

RUMELHART, D. E. The Architecture of Mind: a connectionist approach. In: Thagard, P. (Ed.). *Mind Readings: introductory selections on Cognitive Science*. p. 207-238. Cambridge, MA: The MIT Press, 1998.

RYLE, G. *The Concept of Mind*. London: Penguin Books, 2000.

SABER ELETRÔNICA. São Paulo: Editora Saber LTDA. n. 320, set. 1999.

SCHRÖDINGER, E. *O que é vida? o aspecto físico da célula viva*. Tradução de Jesus de Paula Assis e Vera Yukie Kuwajima de Paula Assis. São Paulo: Editora UNESP, 1997.

SEARLE, J. R. Mente, Linguagem e Sociedade: filosofia no mundo real. Tradução de F. Rangel. Rio de Janeiro: Rocco, 2000.

SEARLE, J. R. *The mystery of consciousness*. New York, NY: NYREV, Inc., 1997.

SHAW, R. The Agent-Environment Interface: Simon's indirect or Gibson's direct coupling? *Ecological Psychology*, v. 15 n.1, p. 37-106. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2003.

SILVEIRA, L. F. B. Pragmatismo e o Princípio de Continuidade no Cosmos Auto-Organizado. In: D'Ottaviano, I. M. L.; Gonzalez, M. E. Q.; Souza, G. M. (Org.). *Auto-Organização: estudos interdisciplinares*. v. 39. Campinas: Unicamp, 2004. (Coleção CLE)

SIMON, H. A. *The Sciences of the Artificial*. 3rd ed. Cambridge, MA: The MIT Press, 1996.

SIMS, K. Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition. In: Brooks, R.; Maes, P. (Ed.). *Artificial Life IV Proceedings*. p. 28-39. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994a.



Disponível em: <www.cs.bham.ac.uk/~txs/teaching/2001/nature-inspired/notes/08-evolve-3D-4up.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2004.

SIMS, K. Evolving Virtual Creatures. Computer Graphics, Annual Conference Series. *SIGGRAPH 94. Proceedings*. p. 15-22. 1994b. Disponível em: <<http://wwwradig.in.tum.de/personen/mauss/creatures/>>. Acesso em: 23 nov. 2004.

SIMS, K. Interactive Evolution of Dynamical Systems. In: Varela, F. J.; Bourgine, P. (Ed.). *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. p. 171-178. 2. printing. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994c.

SKINNER, B. F. *About Behaviorism*. London: Jonathan Cape Ltd., 1974.

SKINNER, B. F. *Beyond Freedom and Dignity*. Harmondsworth: Penguin, 1973.

STEELS, L. *Building Agents out of Autonomous Behavior Systems*. 1994. Disponível em: <<http://www.cs.brandeis.edu/~zippy/alife-library.html>>. Acesso em: 1 abr. 2004.

STEELS, L. Towards a Theory of Emergent Functionality. In: Meyer, J-A.; Wilson, S. (Ed.). *From Animals to Animats: Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. p. 451-461. Cambridge, MA: The MIT Press, 1990. Disponível em: <<http://www.santafe.edu/~dynlearn/dynlearn/RoMADS/steels01/>>. Acesso em: 01 fev. 2005.

STEPHAN, A. *Emergence*. Galley: Article – 00112. Artigo entregue pelo autor durante o V Encontro Brasileiro Internacional de Ciência Cognitiva. São Vicente, SP. 2003.

STEPHAN, A. Emergentism, Irreducibility, and Downward Causation. *Grazer Philosophische Studien*. 65, p. 77-93, 2002. Disponível em: <www.institutnicod.org/Reduction/06_Stephan_GPS65.pdf>. Acesso em: 12/03/2005.

STEPHAN, A. Phenomenal Emergence. *Networks*, 3-4. p. 91-102, 2004. Disponível em: <<http://lgxserve.ciseca.uniba.it/lei/ai/networks/04/>>. Acesso em: 12 dez. 2004.

STEPHAN, A. Robot and Artificial Life Emergentism. Trabalho apresentado ao V Encontro Brasileiro Internacional de Ciência Cognitiva. *Vida, Robôs e Emergência: novas perspectivas na Ciência Cognitiva*. São Vicente, SP. 2003.

STEPHAN, A. Varieties of Emergentism. *Evolution and Cognition*. v. 5, n. 1, 1999.

STUTTGART'S NEURAL NETWORK SIMULATOR (SNNS) USER'S MANUAL, Version 4.2. Disponível em: <<http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/>>. Acesso em: 08 nov. 2004.

THELEN, E. Grounded in the World: developmental origins of the embodied mind. *Infancy*. 1(1), p. 3-28. Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 2000.

TURING, A. Computadores e Inteligência. In: Epstein, I. (Org.), *Cibernética e Comunicação*. São Paulo: Cultrix/Edusp, p. 45-82, 1973.

VARELA, F. J. *Conhecer as Ciências Cognitivas: tendências e perspectivas*. Tradução de Maria Teresa Guerreiro. Instituto Piaget, 2000.



VARELA, F. J.; THOMPSON, E.; ROSCH, E. *A mente corpórea: ciência cognitiva e experiência humana*. Tradução de Joaquim Nogueira Gil e Jorge de Sousa. Bobadela, Portugal: Instituto Piaget, 1991a.

VARELA, F. J.; THOMPSON, E.; ROSCH, E. *The Embodied Mind: cognitive science and human experience*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1991b.

VARELA, F. J.; BOURGINE, P. Towards a Practice of Autonomous Systems. In: Varela, F. J.; Bourguine, P. (Ed.). *Towards a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. p. xi-xvii. 2. printing. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994.

VESEY, G. Plato's Two Kinds of Causes. In: Flew, A.; Vesey, G. *Agency and Necessity*. p. 1-43. Oxford: Basil Blackwell, 1987.

WALTER, W. G. An Imitation of Life. *Scientific American*, 182 (5), p. 42-45, may, 1950.

WELLS, A. J. Gibson's Affordances and Turing's Theory of Computation. *Ecological Psychology*. v. 14, n.3, p. 141-180. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2002.

WELLS, A. J. Turing Machines and the Study of Human Cognitive Architecture. *Encyclopedia of Computer Science and Technology*. v. 43, supplement 28, p. 337-357. New York: Marcel Dekker, Inc., 2000.

WELLS, A. J. Turing's Analysis of Computation and Theories of Cognitive Architecture. *Cognitive Science*. v. 22, n.3, p. 269-294, 1998.

WIENER, N. *Cibernética*. 2. ed. São Paulo, SP: Polígono S.A., 1970.

WILLEMS, D. J. M.; HASELAGER, W. F. G. Cooperative behavior in simulated reactive robots. In: Heskes T.; Lucas, P.; Vuurpijl, L.; Wiegerinck, W. (Ed). *Proceedings of the 15th Belgium-Netherlands Conference on Artificial Intelligence (BNAIC)*. p. 355-362. Nijmegen: University of Nijmegen, 2003.

WOODFIELD, A. *Teleology*. London: Cambridge University Press, 1976.

ZIEMKE, T. On the Role of Robot Simulations in Embodied Cognitive Science. *AISB Journal*. v.1, n.4, SSAISB, 2003. Disponível em: <<http://www.aisb.org.uk>>. Acesso em: 10 out. 2004.

ZIEMKE, T.; JIRENHED, D.-A.; HESSLOW, G. Internal Simulation of Perception. A Minimal Neurorobotic Model. *Neurocomputing*. (in press). Disponível em: <<http://www.ida.his.se/~tom/>>. Acesso em: 12 mar. 2005.

ZIEMKE, T.; SHARKEY, N. A stroll through the worlds of robots and animals: applying Jakob von Uexküll's theory of meaning to adaptive robots and artificial life. *Semiotica*. v.134, n.1-4, p. 701-746. Wakter de Gruyter, 2001.

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DO APARATO SENSÓRIO-MOTOR DE DEVA

Deva é um robô que foi construído, a princípio, para que fosse controlado de forma discreta. De acordo com os valores informados pelos usuários, o robô assumiria o posicionamento correspondente a tais valores, concluindo as operações a ele designadas. Não nos aprofundamos muito no estudo de seus componentes eletrônicos pois, para nossos propósitos, é mais importante compreender a maneira como eles estão organizados do que as suas propriedades específicas.

Por outro lado, descrevemos as medidas e graus de liberdade do robô, já que estas são características que influenciam diretamente no desempenho durante a execução das tarefas a ele atribuídas.

Descrição do aparato sensório-motor

O aparato motor de Deva é composto por uma base giratória, com liberdade de 180° , onde ficam acoplados um braço de 30 centímetros de comprimento e aproximadamente 90° de liberdade. Ligado a este último, existe um antebraço que mede 25 centímetros e possui uma liberdade de 60° . Ao antebraço de Deva fica acoplada uma pinça simples, que pode girar 360° e tem uma abertura de 2,5 centímetros. Sua base giratória está acoplada a um suporte de aproximadamente 45 centímetros de comprimento, a mesma largura, e uma altura aproximada de 25 centímetros, onde também se encontra embutido quase todo seu aparato eletrônico.



Apresentadas as dimensões do aparato motor de nosso robô, segue-se a sua descrição, para que possamos especificar seu funcionamento e apurar alguns dos possíveis canais sensórios já presentes.

Comunicação e acionamento dos motores

A comunicação entre microcomputador e robô é feita, em sua maior parte, de forma unidirecional. Assim, os dados são inseridos pelo usuário através de um programa supervisorio, e através de uma porta paralela, são enviados para o robô. Não há *feedback* do robô para o programa supervisorio, ou seja, a posição ou estados em que o robô se encontra a cada momento, não são informados ao supervisorio. O único momento em que o supervisorio recebe alguma informação do robô é quando este termina a tarefa a ele determinada.

É importante esclarecer que, ao se falar da comunicação entre microcomputadores e outros dispositivos, os dados são transmitidos em forma de tensão, que representará dois estados lógicos: zero (tensão ausente) e um (tensão presente).

Dessa forma, temos definido que todas as informações trocadas entre microcomputador e robô serão representadas em forma binária, sejam elas relativas a números, imagens ou sons.

Como já vimos no início desta seção, até o momento apenas o microcomputador envia dados ao robô, e para isso ele usa especificamente 8 pinos da porta paralela, conforme indicado na figura 5.1.

Mais especificamente, os pinos 0, 1, 2 e 3 são usados para enviar sinais a um microcontrolador (PIC 16F84, fabricado pela Microchip), usado para direcionar o



acionamento dos motores do robô, enquanto os pinos 4, 5, 6 e 7 enviam sinais para um conversor DAC (0808 National), responsável pela conversão de sinais digitais em analógicos, necessários ao acionamento de relês, configurados de forma a possibilitar o funcionamento coordenado dos motores, e fazendo-os parar quando alcançarem a posição desejada.

Dessa forma, é possível construirmos duas tabelas com os valores enviados ao robô através da porta paralela, uma referente ao acionamento dos motores e outra referente ao seu posicionamento.

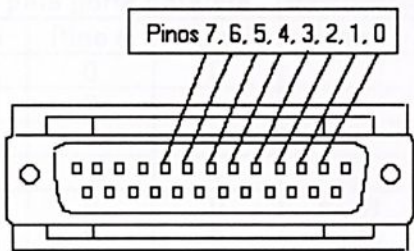


Figura 5.1 – Bits de saída de dados.

Motor	Pino 0	Pino 1	Pino 2	Pino 3
Braço	1	0	0	0
Antebraço	0	1	0	0
Base Giratória	0	0	1	0
Abertura da pinça	0	0	0	1
Fechamento da pinça	1	0	0	1
Rotação da pinça - lado direito	0	1	0	1
Rotação da pinça - lado esquerdo	0	0	1	1

Figura 5.2 - Bits usados para o acionamento do robô.

Os valores escritos nos pinos 4, 5, 6 e 7 (veja figura 5.3) passam por um inversor lógico, de forma que esses valores chegam com estados lógicos invertidos aos dispositivos responsáveis pelo acionamento dos motores. Este artifício é usado para assegurar uma maior segurança, garantindo um isolamento entre a porta, no microcomputador, e os circuitos que se encontram no robô.

Outra característica importante do aparato motor de Deva, é que o acionamento dos motores nunca é feito simultaneamente, e enquanto um motor não tiver alcançado a posição desejada, nenhum outro será acionado. O fato de não existir um retorno do robô ao microcomputador, no que diz respeito ao acionamento dos motores em relação aos comandos recebidos, configura um problema de sincronismo entre eles. Como tais motores são máquinas de estado discreto, este problema foi solucionado através de temporizadores que calculam o tempo necessário à conclusão de cada movimento.

Valores enviados pela porta paralela				Deslocamento dos servos (em graus)		
Pino 4	Pino 5	Pino 6	Pino 7	Braço	Antebraço	Base Giratória
0	0	0	0	-	-	180
0	0	0	1	-	-	167,14
0	0	1	0	-	-	154,28
0	0	1	1	90	-	141,43
0	1	0	0	81,81	-	128,57
0	1	0	1	73,63	-	115,71
0	1	1	0	65,45	-	102,86
0	1	1	1	57,27	-	90
1	0	0	0	49,09	-	77,14
1	0	0	1	40,9	-	64,28
1	0	1	0	32,72	60	51,43
1	0	1	1	24,54	45	38,57
1	1	0	0	16,36	30	25,71
1	1	0	1	8,18	15	12,86
1	1	1	1	0	0	0

Figura 5.3 – Sinais enviados a Deva e as respectivas posições assumidas por seu aparato motor.

No caso da pinça do robô, o tamanho dos objetos que ela deveria pegar com certeza não seria constante, limitando a eficiência dos temporizadores. Uma maneira encontrada para solucionar este problema foi o uso de um sensor que seria acionado no momento da total abertura da pinça, enviando então um sinal que faria com que o motor fosse desligado. O mesmo foi feito quanto ao fechamento da pinça, com um sensor que seria acionado quando um objeto fosse agarrado ou quando ela se fechasse completamente.

Breves Considerações

O sistema de controle do agente descrito acima é bastante rudimentar, se pensarmos no alcance das tecnologias descritas nessa dissertação. Talvez seja possível fazer uma abordagem connexionista para incrementar as potencialidades do agente, de modo a otimizar as suas funções motoras. Os canais sensórios presentes em sua arquitetura não enviam sinais para o microcomputador ligado a ele, mas estes sinais deverão surgir e aumentar consideravelmente, caso sejam acrescentados módulos de visão e audição. Caso seja necessário acrescentar outros canais de transmissão ou recepção de dados, as portas paralelas dos microcomputadores possuem, além dos 8 pinos já usados para transmissão, mais 5 para recepção e outros 4 que podem ser usados para ambos. Além destes novos pinos da porta paralela, existe a possibilidade de transmitir e receber dados pelas portas seriais do microcomputador. A recepção de sinais oriundos de um sistema de visão poderia ser feita a partir de equipamentos específicos, como placas de aquisição de sinais e câmeras de vídeo.

Dentre as alternativas descritas acima, a mais interessante é aquela que disponibiliza alguns canais de transmissão de *feedback* ao programa supervisorio, mas o sistema em si continua com a limitação de ser totalmente controlado por um usuário, ou seja, não possui nenhum grau de autonomia.

ANEXO A – EXEMPLO DO FUNCIONAMENTO DE *STRIPS*¹

Strips é uma das variantes do solucionador geral de problemas (GPS - *General Problem Solver*). Por ter sido escolhido para ser o módulo de planejamento para as tarefas executadas por *Shakey*, o primeiro robô móvel baseado em inteligência artificial, este algoritmo tornou-se bastante conhecido. Murphy (2000, p. 44) afirma que o método usado por *Strips* consiste, resumidamente, em: se o robô não puder completar uma tarefa ou alcançar um objetivo numa única etapa, ele cria uma sub-rotina que resolva o problema que o impede de alcançar o objetivo principal. Uma vez concluída esta sub-rotina, o objetivo principal é retomado e, caso ainda não seja possível alcançá-lo num único passo, é criada uma nova sub-rotina.

Murphy (2000, p. 46) indica três etapas necessárias à elaboração de uma aplicação como *Strips*, capaz de planejar as ações executadas por IT (um outro robô baseado em inteligência artificial), as quais resumiremos a seguir: (a) construção de um *modelo de mundo*, etapa na qual o programador precisa eleger todas as informações que julgar relevantes para a resolução dos problemas identificados. Murphy (2000, p. 47) ilustra o exemplo de um modelo de mundo especificado para mostrar ao robô se um certo objeto, que pode ser movido, se encontra em uma sala, ou próximo a uma porta ou de um outro objeto que também pode ser movido; se uma porta está aberta ou fechada; e que salas são ligadas por uma porta.

Murphy (2000, p. 47) afirma que, do ponto de vista do programador, apenas três tipos de *coisas* existentes no mundo são importantes: *movable_object* (que pode ser um robô ou uma caixa que o robô pode pegar), *room* (as salas em que o robô está operando) e *door* (a

¹ O conteúdo do presente anexo é uma adaptação da descrição do funcionamento de *Strips*, feita por Murphy (2000, p. 44-52).



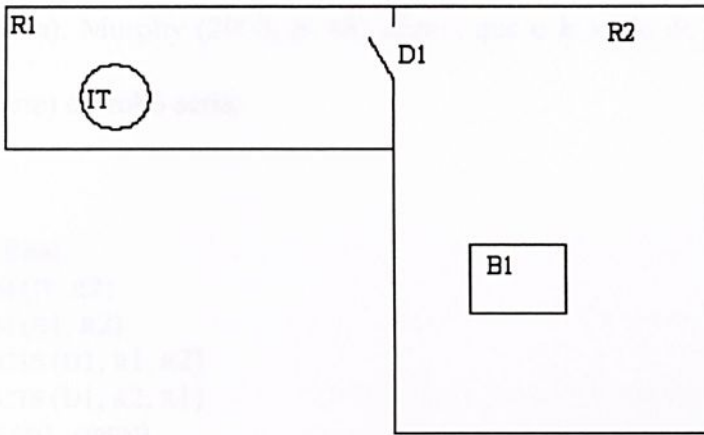


Figura 6.1: Ilustração de duas salas ligadas por uma porta (Adaptado de Murphy [2000, p. 48]).

porta que liga as salas). Além disso, os predicados abaixo ilustram todo o conhecimento do robô:

INROOM (x , r)	onde x é um objeto do tipo <i>movable_object</i> , e r é do tipo <i>room</i> .
NEXTTO (x , t)	onde x é um <i>movable_object</i> , t é do tipo <i>door</i> ou <i>movable-object</i>
STATUS (d , s)	onde d é do tipo <i>door</i> , s é um tipo enumerado: OPEN (aberta) ou CLOSED (fechada)
CONNECTS (d , rx , ry)	onde d é do tipo <i>door</i> e rx e ry são <i>room</i> .

A partir dos predicados acima, o modelo de mundo para o estado inicial do mundo indicado pela figura 6.1 pode ser representado por:

estado inicial:

```
INROOM (IT, R1)
INROOM (B1, R2)
CONNECTS (D1, R1, R2)
CONNECTS (D1, R2, R1)
STATUS (D1, OPEN)
```

Conforme indicado por Murphy (2000, p. 48), este modelo de mundo captura que um objeto específico do tipo *movable_object*, chamado IT, se encontra em uma sala R1, e que B1 está em uma outra sala, R2. Uma porta D1 conecta uma sala chamada R1 a outra chamada R2,

e vice-versa. Uma porta chamada D1 possui um valor atribuído OPEN (o que significa que ela está aberta). Murphy (2000, p. 48) afirma que o modelo de mundo que descreve o objetivo (*goal state*) do robô seria:

estado final:
INROOM (IT, R2)
INROOM (B1, R2)
CONNECTS (D1, R1, R2)
CONNECTS (D1, R2, R1)
STATUS (D1, OPEN)

A segunda etapa, indicada por Murphy (2000, p. 48) como necessária à elaboração do algoritmo *Strips*, seria (b) construir uma tabela de diferenças (*difference table*), ilustrada abaixo:

Operador	Precondições	Add-list (lista de adições)	delete-list (lista de exclusões)
OP1: GOTODOOR (IT,dx)	INROOM (IT, rk) CONNECT (dx,rk,rm)	NEXTTO (IT, dx)	
OP2: GOTHRUDOOR (IT,dx)	CONNECT (dx,rk,rm) NEXTTO (IT, dx) STATUS (dx, OPEN) INROOM (IT, rk)	INROOM (IT, rm)	INROOM (IT, rk)

Murphy (2000, p. 49) indica que a tabela de diferenças acima é programada apenas para duas operações: ir até uma porta (GOTODOOR) e passar pela porta (GOTHRUDOOR). O operador GOTODOOR pode ser aplicado apenas *se* as precondições abaixo forem verdadeiras:

INROOM (IT, rk)
CONNECT (dx,rk,rm)

O robô está em uma sala, a qual será designada por rk.
Existe uma porta, a qual será designada pelo identificador dx, a qual conecta rk a alguma outra porta chamada rm.

O rótulo IT é usado para delimitar os predicados. Murphy (2000, p. 49) aponta que apenas as variáveis dx e rk são importantes quando a rotina GOTODOOR é chamada; rm pode

ser qualquer coisa. Se GOTODOOR é executada, o robô está próximo à porta dx. Nada é excluído do estado do mundo porque o robô ainda está na sala rk; a porta dx ainda conecta as duas salas rk e rm. A única coisa que foi modificada é a posição do robô: ele está próximo à porta.

Conforme indica Murphy (2000, p. 49), a tabela de diferenças especifica que o operador GOTHURDOOR só será acionado se: o robô estiver na sala e próximo à porta, se a porta estiver aberta, e se a porta conectar a sala onde o robô está a uma outra sala. Neste caso, predicados serão adicionados e excluídos do modelo de mundo quando o operador entrar em execução. Quando o robô estiver em uma sala rk e passar pela porta, ele passará para a sala rm (que será adicionada) e não estará mais na sala rk (que será excluída).

Murphy (2000, p. 49) acrescenta, ainda, que construir uma tabela de diferenças não faz sentido se não existir uma *função de avaliação das diferenças*, que pode ser, dependendo da aplicação, o cálculo da distância euclideana, ou mesmo um cálculo de predicados, como é o caso do exemplo apresentado. Neste exemplo, o estado inicial (*initial state*) é logicamente subtraído do objetivo final (*goal state*), e essa diferença pode ser expressa como:

$\neg \text{INROOM}(\text{IT}, \text{R2})$ ou $\text{INROOM}(\text{IT}, \text{R2}) = \text{FALSE}$

Murphy (2000, p. 50) afirma que, uma vez que o modelo de mundo e a tabela de diferenças já foram criados, deve ser iniciada a redução de diferenças, passo (c), que é executado já na fase de resolução dos problemas. Esta fase seria, para a autora, como montar um quebra-cabeças através de algumas tentativas relacionadas às peças disponíveis. É importante ressaltar que, para reduzir uma diferença, *Strips* realiza buscas na tabela de diferenças, começando pelo topo, de acordo com a coluna *add-list*, e procura uma situação em que as condições sejam satisfeitas. Tal busca é feita na *add-list*, ao invés de ser feita em colunas de diferenças separadas, pois a *add-list* expressa o resultado do operador. Se *Strips*

encontra um operador que produza o objetivo, então aquele operador elimina a diferença entre o estado inicial e o objetivo final.

Neste exemplo, se $rm=R2$, então o resultado de OP2 deveria ser INROOM (IT, R2). Isto pode eliminar a diferença, o que faz de OP2 um candidato operador.

Antes de aplicar OP2, *Strips* precisa verificar as precondições. Para isso, rm deve ser substituído por R2 em cada predicado nas precondições. OP2 possui duas precondições; apenas CONNECTS (dx, rk, R2) é afetado, tornando-se CONNECTS (dx, rk, R2). Até que dx e rk estejam ligados, o predicado não possui um valor verdadeiro (TRUE) ou falso (FALSE). Essencialmente, dx, rk são variáveis vazias (*wildcards*), CONNECTS (*,*,R2). Para preencher tais variáveis com valores, *Strips* procura no estado atual do modelo de mundo para encontrar uma situação que satisfaça as precondições. O predicado no estado atual do mundo CONNECTS (D1, R1, R2) satisfaz CONNECTS (*,*,R2). Neste ponto, D1 está ligado a dx e R1 está ligado a rk.

Então, *Strips* propaga as ligações para a próxima precondição da lista: NEXTTO (IT, dx). NEXTTO (IT, dx) é falso (FALSE) porque o predicado não está no estado atual do mundo. NEXTTO (IT, D1) é considerado uma precondição não satisfeita (*failed precondition*). Neste caso, IT precisa estar perto de D1.

Assim, *Strips* repete, recursivamente, o procedimento por completo. Ele marca o objetivo inicial como G0, o coloca numa pilha (local de espera para entrar em execução, posteriormente), e então ele cria uma nova sub-rotina, G1.

A diferença entre NEXTTO (IT, D1) e o estado atual do modelo de mundo é:

$\neg$ NEXTTO (IT, D1)

Novamente, *Strips* faz uma busca na *add-list* da tabela de diferenças para localizar um operador que possa negar este estado do mundo. Assim, OP1: GOTODOOR (IT, dx) possui uma condição satisfeita na *add-list* de NEXTTO (IT, dx). *Strips* precisa atribuir novamente os valores

aos identificadores porque o programa entra em um novo escopo de programação. Assim, $dx=D1$.

Strips analisa as precondições novamente. Desta vez, $rk=R1$ e $rm=R2$ podem ser satisfeitos com CONNECTS (dx, rk, rm) e todas as precondições são satisfeitas ou, como observa Murphy (2000, p. 51), avaliadas como verdadeiras. *Strips* coloca o operador OP1 na pilha de planejamento e aplica o operador ao modelo de mundo, mudando o seu estado. Murphy (2000, p. 51) ressalta que, neste momento, o robô ainda se encontra parado, apenas realizando cálculos e operações.

Ao aplicar o operador OP1, modificações são feitas na *add-list* e na *delete-list*. Existe apenas um predicado na *add-list* e nenhum na *delete-list*. Após adicionar NEXTTO (IT, D1), o estado do mundo é:

estado após OP1:
 INROOM (IT, R1)
 INROOM (B1, R2)
 CONNECTS (D1, R1, R2)
 CONNECTS (D1, R2, R1)
 STATUS (D1, OPEN)
 NEXTTO (IT, D1)

A primeira chamada é, então, retomada por *Strips*. Ele retorna ao ponto de avaliação das precondições para OP2 com $dx=D1$, $rm=R2$ e $rk=R1$, e neste ponto o mundo foi modificado. Ambos STATUS (D1, OPEN) e INROOM (IT, R1) são verdadeiros, e assim todas as precondições para OP2 estão satisfeitas. *Strips* insere OP2 em sua pilha e muda o modelo de mundo aplicando os predicados da *add-list* e *delete-list*. Isto resulta em como o estado do mundo estará quando o planejamento for executado:

estado após OP2:
 INROOM (IT, R2)
 INROOM (B1, R2)
 CONNECTS (D1, R1, R2)
 CONNECTS (D1, R2, R1)

STATUS (D1, OPEN)
NEXTTO (IT, D1)

Strips termina e o planejamento para a execução das tarefas no mundo é: GOTODOOR (IT, D1), GOTHRUDDOOR (IT, D1).

Murphy (2000, p. 52) ressalta, principalmente, que *Strips* apenas planeja as ações, ao invés de executá-las: ele cria uma lista de operadores para serem aplicados; ele não aplica tais operadores.



