

## CAPÍTULO 2

### ABORDAGEM AO PROBLEMA DA ROBÓTICA BASEADA EM COMPORTAMENTO

#### 2.1 Introdução

O desafio de criar artefatos que se comportem de forma autônoma e executem tarefas exclusivas dos homens a fim de auxiliá-los é uma antiga aspiração da humanidade: Paracelsus, o alquimista medieval, prescrevia um processo para criar o *homunculus* ou pequeno homem misturando sêmen humano e fezes de cavalo, a lenda judaica do Golem criado a partir do barro e vivificado com palavras mágicas, a narrativa maia Popol Vuh da criação do mundo e do homem, os autômatos construídos com mecanismos de relojoaria e até mesmo as farsas de dispositivos capazes de jogar xadrez que escondiam jogadores de pequena estatura no seu interior ressaltam este objetivo. Em épocas mais recentes, os romances “Frankenstein” de Mary Shelley e os contos de ficção científica *I, Robot* de Isaac Asimov abordaram o tema e conquistaram legiões de leitores. A própria palavra Robot vem da peça R.U.R. (Robôs Universais de Rossum) de Karel Capek e significa escravo no idioma tcheco. Por fim, no século XX o cinema produziu inúmeros filmes que deslumbraram platéias com seus andróides ou robôs como em “Guerra nas Estrelas”, “Blade Runner” e “O Exterminador do Futuro”.

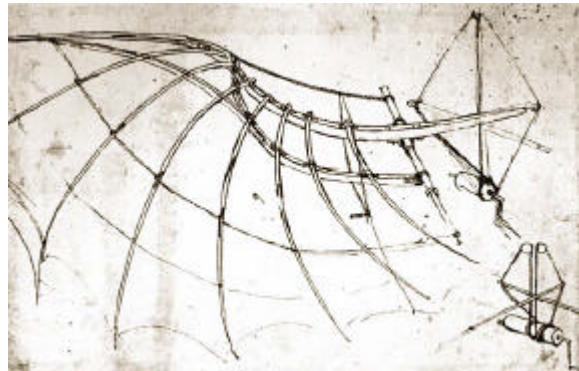
Uma longa série de avanços científicos e tecnológicos, incluindo os estudos anatômicos de Andreas Vesalius e René Descartes no Renascimento que minaram os argumentos antropocêntricos, a proliferação dos computadores digitais, a pesquisa genética, o aperfeiçoamento da mecânica fina e microeletrônica, o desenvolvimento de novos materiais e técnicas de prototipação rápidas, a compreensão do sistema nervoso de animais e sua relação com o comportamento dos mesmos, os métodos de Inteligência Artificial, asseveram que a autonomia robótica é uma meta alcançável pela tecnologia. A própria existência de seres vivos na Terra e a formulação de teorias que expliquem de forma consistente a origem e evolução das espécies reforçam a asserção anterior. Portanto, é lógico e sensato que a natureza viva seja tomada como modelo.

Escolhida a direção do passo inicial que aponta para a análise detalhada da vida, pergunta-se: Que analogias úteis colher da observação biológica? Quais princípios são comuns entre seres vivos e sistemas técnicos? Quais classes de comportamentos distinguem-se nos animais e são passíveis de imitação? Qual arquitetura de controle utilizar em robôs que se pretende ajam de forma autônoma? A seguir discute-se as questões apresentadas.

#### 2.2 Inspiração na natureza

Os seres humanos, comparados a outros seres vivos, somos particularmente hábeis na criação de ferramentas que nos auxiliam nas mais diversas tarefas como revelam os registros oficiais de patentes. Nos últimos duzentos anos presenciamos o surgimento de uma quantidade de novos inventos sem paralelo na existência da humanidade: velozes máquinas cruzam os céus, ampliadores da visão revelam minúsculos elementos ou as profundezas longínquas do cosmos, computadores capazes de bilhões de cálculos por segundo são alguns dos marcos dessa criatividade. Tais dispositivos ora multiplicando a força muscular, ora ampliando a sensibilidade dos órgãos dos sentidos tornaram-se indispensáveis nas sociedades modernas.

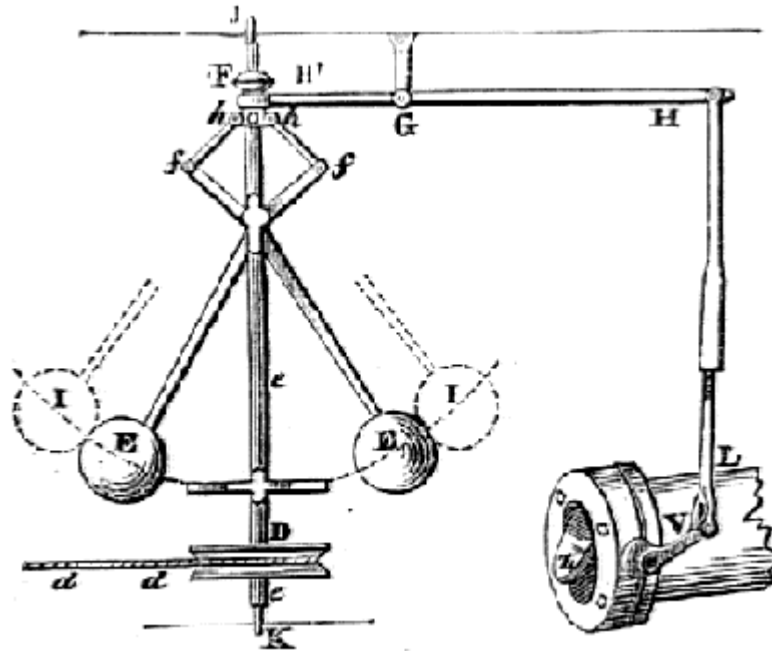
No meio desta miríada de mecanismos podemos distinguir uma classe especial que tem sua origem, princípios ou finalidade notoriamente inspirados na observação dos seres vivos. Esta fonte de idéias jorra há muito tempo como mostra os esboços das asas de morcegos (ver *fig.*) feitos pelo gênio universal Leonardo da Vinci, talvez encantado pelo mito grego de Ícaro, na busca por concretizar o ancestral sonho humano de voar como os pássaros. Podemos assim considerar Da Vinci o precursor da Biônica, área interdisciplinar da tecnologia surgida por volta de 1960, definida como *a arte de aplicar o conhecimento a respeito dos seres vivos na solução de problemas técnicos* [GERARDIN].



Diversos produtos são frutos desta fusão de conhecimentos técnicos e científicos de biólogos, matemáticos, engenheiros e físicos. Por exemplo, os sistemas de localização por eco de morcegos e golfinhos e a estrutura aderente de certas sementes serviram respectivamente de modelos para o radar, o sonar e o velcro.

Anterior à biônica, durante a Segunda Guerra Mundial, um pequeno grupo multidisciplinar liderado por Norbert Wiener fundava a Cibernética ou a *ciência do controle e comunicação nos animais e nas máquinas* (Wiener). Originalmente voltada para o problema militar de mira de canhões antiaéreos teve como pilar o ciclo de realimentação (*feedback*) que corrigia o ângulo de tiro mediante as informações de posição e velocidade que recebia sobre o alvo.

O laço de realimentação ou retroação caracteriza uma cadeia causal em que parte da energia ou informação saída do último elemento do sistema retorna ao primeiro. Deste modo, comparando a saída obtida com a saída desejada ajusta-se os componentes atuadores para o desempenho previamente estipulado. Uma antiga aplicação do conceito pode ser visualizada no regulador centrífugo de James Watt utilizado para manter em limites aceitáveis a velocidade de funcionamento de sua máquina a vapor (ver *fig.*).



Os ciberneticistas examinaram quão abrangente seria a noção de realimentação e constataram que estava presente em sistemas sociais e variados processos internos dos seres vivos. O esquema de controle da temperatura corporal dos mamíferos exemplifica um processo autoregulador desta natureza denominado de homeostase pelo fisiologista Walter Cannon, i.e., a manutenção do equilíbrio de certos parâmetros fisiológicos diante das variações ambientais. Em um homem saudável a temperatura interna de 36.6 graus centígrados, a quantidade de 1% de açúcar no sangue e a pressão sanguínea de 100-140 milímetros da coluna de mercúrio mantêm-se constante [SAPARINA]. O cientista britânico Ross Ashby aprofundou a compreensão do fenômeno e o demonstrou inequivocamente ao construir um dispositivo elétrico, denominado homeostato, que mantinha sua corrente interna aproximadamente constante quando sujeito a correntes variáveis na entrada [ASHBY]. Uma introdução didática à cibernética pode ser lida em [EPSTEIN].

### **Cérebro e Inteligência Artificial**

Concomitantemente, a formalização de computadores universais por Alan Turing e Émil Post, o advento de computadores eletromecânicos e eletrônicos, cuja arquitetura subjacente foi explicitada por John von Neumann, e os paralelos encontrados entre “cérebros eletrônicos” e cérebros naturais pela neurofisiologia e psicologia colocaram na pauta da cibernética as tentativas de simulação das estruturas e funções cerebrais. O primeiro degrau foi alcançado em 1943 quando o psiquiatra Warren McCulloch e o matemático Walter Pitts apresentaram o modelo computacional de um neurônio biológico cujas combinações poderiam implementar qualquer expressão lógica finita.

Êxito maior seria alcançado pelas redes de *perceptrons* de Frank Rosenblatt (1958) que após um período de treinamento é capaz de distinguir padrões a ela apresentados. No entanto, passada a euforia inicial na comunidade científica proveniente das especulações a respeito das possibilidades dos *perceptrons*, Marvin Minsky e Seymour Papert (1969) provam que o conjunto de padrões necessita ser linearmente separável o que diminui o seu espectro de aplicações e arrefece as pesquisas nesta linha. Esta limitação foi superada com a redescoberta do algoritmo *backpropagation* aplicado em redes neurais multicamadas.

Denominou-se conexionismo a corrente da Inteligência Artificial que estuda a arquitetura e algoritmos inspirados nas redes neuronais biológicas, e tem sido de grande valor nas implementações de controles para agentes artificiais autônomos.

Concorrente ao conexionismo nascia a IA simbólica, uma alternativa baseada em sistemas de manipulação de símbolos capazes de reproduzir atividades humanas inteligentes, tais como jogar xadrez e resolver desafios lógicos. A abordagem simbólica preocupa-se com o comportamento inteligente global e desconsidera os mecanismos responsáveis por este comportamento [ROISENBERG – *notas de aula*].

O programa Logic Theorist de Allen Newell, Herbert A. Simon e J. C. Shaw foi apresentado na conferência do Dartmouth College e era capaz de demonstrar teoremas extraídos da monumental obra *Principia Mathematica* de Alfred North Whitehead e Bertrand Russel. O Logic Theorist utilizava técnicas heurísticas para reduzir e tornar computável o exame da árvore de busca. Posteriormente, Newell, Shaw e Simon desenvolveram o General Problem Solver (1957), i.e., o Solucionador de Problemas em Geral com a possibilidade inovadora de o programa checar a proximidade da solução através da técnica “análise de meios e fins”.

A IA Simbólica ainda alcançaria um relativo sucesso com a introdução no mercado de produtos conhecidos como Sistemas Especialistas. Tais sistemas representam, tradicionalmente através de regras de produção do tipo Se-Então, o conhecimento de profissionais em áreas restritas do saber e são suscetíveis de consultas por parte de usuários. A derrota do campeão mundial de xadrez Gary Kasparov diante do supercomputador IBM *Deep Blue* em um *match* transmitido para todo o planeta via Internet é uma amostra da força e atualidade desta corrente.

### 2.3 Robótica Baseada em Comportamento

Durante um longo período (1969-1981) o tratamento simbólico reinou nas pesquisas da Inteligência Artificial e conseqüentemente nas aplicações robóticas. O esquema básico de controle deliberativo executa a sequência *sense-model-plan-act*. Informações são capturadas por sensores especializados que as enviam para um modelo do ambiente. Em seguida, um módulo de planejamento decide quais ações executar.

No entanto, alguns cientistas não foram seus súditos fiéis. O professor do M.I.T. Rodney A. Brooks era um dos insatisfeitos e desferiu sua crítica, sutilmente antecipada no título do seu artigo “Elephants don't play chess” (Elefantes não jogam xadrez), onde postula “*In this paper we argue that the symbol system hypothesis upon which 'classical AI' is based is fundamentally flawed, and as such imposes severe limitations on the fitness of its progeny*” [BROOKS]. A alternativa proposta por Brooks considera a operação de módulos dotados de comportamentos individuais dispostos em camadas hierarquizadas. Sob esta orientação a **questão comportamental** passou a ter um papel relevante e profícuo no projeto de agentes autônomos.

A Robótica Baseada em Comportamento é uma metodologia inspirada na biologia que favorece o paralelismo e a descentralização. Um robô projetado segundo esses ditames é controlado por uma rede de comportamentos que interagem entre si e com o ambiente. Cada comportamento destina-se a uma tarefa específica (ex., evitar-obstáculo, ir-para-casa, seguir-luz, seguir-parede, etc.) e podem ser definidos com níveis diversos de abstração (ex., um-passo-a-frente, siga-em-frente). São ativados por sinais de entrada capturados pelos sensores do robô e/ou de outros comportamentos e enviam sinais ou comandos para os atuadores do robô e/ou para outros comportamentos. O paralelismo é garantido pela possibilidade de excitação simultânea, não necessariamente a execução, de vários comportamentos. A informação não é centralizada ou centralmente

manipulada [MATARIC 1998].

### 2.3.1 Classes de Comportamentos

O afã de construir robôs capazes de atuar em ambientes dinâmicos levou à engenharia reversa da natureza. Os seres vivos afinal demonstram desempenho superior àquele que a tecnologia conseguiu com suas criaturas artificiais (agentes autônomos, robôs, animats). O animal move-se, come, foge ou luta para sobreviver e reproduz-se perpetuando desta forma suas características hereditárias para além de sua existência fugaz.

Os comportamentos adequados para a sobrevivência e procriação são induzidos por sinais externos percebidos do ambiente e consoante o estado interno do animal. A lista de comportamentos é bastante extensa, mas ainda assim pode-se dividi-la em cinco classes:

#### **Reflexo**

É uma resposta fixa (a mesma causa, produz o mesmo efeito) acionada por um determinado estímulo ambiental. A intensidade e persistência da ação reflexa são funções da intensidade e persistência do estímulo. A conhecida figura caricata de um médico golpeando o tendão abaixo do joelho de um paciente com um pequeno martelo e recebendo um chute de volta retrata o *reflexo patelar*. A ausência da reação (estiramento do músculo da coxa) pode significar algum problema no sistema nervoso como os decorrentes da sífilis.

#### **Taxia**

Direciona o animal para afastar-se ou aproximar-se da fonte emissora do estímulo. Este último determina a nomenclatura: quimiotaxe (estímulo químico), fototaxe (luz), tignotaxe (tato), reotaxe (correntes de água), etc. As mariposas, por exemplo, são atraídas pela luz incandescente. As formigas seguem trilhas de feromônios que vão depositando ao longo do caminho.

#### **Reativo ou Padrão Fixo de Ação (PFA)**

É descrito detalhadamente por [ROISENBERG]: *“Esta classe de comportamento é formada por uma série de comportamentos estereotipados como resposta a um dado estímulo. O estímulo que dispara o comportamento é geralmente mais complexo e específico que o necessário para disparar um comportamento reflexivo. A resposta, por sua vez, envolve uma seqüência temporal de ações que se desenrolam até o seu final, mesmo que o estímulo disparador não esteja mais presente. As respostas que compõem o comportamento reativo podem estar relacionadas de um modo intrincado, no qual cada resposta componente é disparada pelo final da ação precedente ou por algum estímulo ou sinal proveniente do ambiente e que é alcançado como resultado da ação precedente. Se qualquer dos sinais disparadores de uma ação da seqüência for inibido, todas as ações seguintes não serão disparadas, mesmo que os sinais seguintes sejam apresentados”*.

Encontra-se em [ALCOCK] uma tática, denominada *codebreaking*, utilizada por algumas espécies para aproveitar o PFA de outras: *“Um code breaker de primeira é o besouro Ateules pubicollis, o qual deposita seus ovos em ninhos da formiga Formica*

*polycytena. A larva desenvolvida produz um odor atraente, ou feromônio, que induz as formigas trabalhadoras a levar o besouro parasita para a incubadora, onde o verme regala-se com os ovos e larvas de formigas. Não contente com esta despesa, o parasita imita a súplica por comida típica da larva de formiga batendo com partes de sua boca nas mandíbulas de uma formiga trabalhadora. Esta ação é um liberador (releaser) que dispara a regurgitação (um PAF) da formiga. A larva eventualmente transforma-se em besouro adulto que também imita o liberador para as formigas trabalhadoras adultas alimentarem-no.”*

### **Instintivo**

Comportamento motivado, i.e., impulsionado em direção a uma finalidade, e que depende também do estado interno do organismo. Os estímulos apenas desencadeiam o comportamento instintivo e não são sempre necessários para guiá-los através do padrão total.

O instinto é definido como um comportamento padrão que aparece completamente funcional desde a primeira vez que é executado, mesmo que o animal não tenha tido prévia experiência com os sinais para os quais ele reage [ALCOCK].

O instinto de rolagem do ovos dos gansos cinzentos descrito por [LORENZ]: *“Em um ganso que está encubando, tal comportamento é liberado quando este se depara com um objeto situado fora do ninho, mas próximo a este, apresentando várias características de liberação. O objeto deve ser liso e com uma superfície dura. Sua forma é irrelevante; cubos de madeira são tratados como se fossem ovos, e o tamanho pode variar de um cubo de poucos centímetros até o máximo possível a ser abarcado pelo pescoço do ganso. O padrão fixo usado na ação consiste de um alongamento do pescoço para frente, curvando a cabeça para baixo, de maneira que toque o ovo com a porção inferior do bico, fazendo então rolar em direção ao ninho por intermédio de uma pequena curvatura do pescoço. Concomitantemente, movimentos compensatórios de cabeça e bico para cada lado mantêm o ovo equilibrado e previne seu desvio da trilha desejada. O padrão motor fixo pode ser isolado agarrando-se habilmente o ovo após o movimento ter sido liberado. O movimento então continua ocorrendo suavemente durante todo o percurso, permanecendo estritamente na mediana ao longo do plano de simetria da ave. Uma vez o movimento liberado, ele pode apenas percorrer seu caminho até o final.”*

### **Racional**

Baseia-se na presença de um modelo interno do mundo e na capacidade de manipular os objetos simbólicos da representação antes de uma ação efetiva. Definido nestes termos o apanágio não é exclusivo dos seres humanos como tem sido demonstrado em engenhosos experimentos. Por exemplo, o psicólogo alemão Wolfgang Köhler (1887-1997) testou o chimpanzé Sultão que solucionou o problema de alcançar um pedaço distante de banana conectando pequenos bastões [HILGARD 1979]. Carl Sagan [SAGAN 1977] relata o ensino pelos psicólogos Beatrice e Robert Gardner da linguagem americana de sinais para os chimpanzés Washoe, Lana e Lucy. Evidentemente, as realizações humanas ultrapassam em muito estas operações.

A classificação acima se torna útil na medida em que implicitamente se admite a análise de um comportamento complexo a partir da soma de outros simples. Esta **hipótese parcimoniosa** tem sido testada com resultados surpreendentes como exemplificados a seguir:

## **Tartarugas de Walter.**

William Grey Walter projetou a *Machina Speculatrix* [WALTER 1953] e construiu exemplares (Elsier, Elmer), que por aparência externa ficaram conhecidas como tartarugas. Eram dotadas de duas rodas traseiras com um motor acoplado para tração e uma roda dianteira responsável pela direção com motor próprio. Duas baterias alimentavam o circuito analógico. Todo o conjunto era montado em um *chassis* sobre o qual dispunha-se uma lâmpada e uma fotocélula para detectar fontes luminosas ambientais. Esta fotocélula estando conectada ao eixo da roda dianteira sempre apontava para a direção do movimento. Um sensor de toque e inclinação completava os órgãos do sentido.

A meta da tartaruga de Walter consistia em manter-se sob iluminação média. Para tanto dispunha de um conjunto de comportamentos básicos que lhe permitiam mover-se seguramente pelo ambiente e recarregar por si mesma suas baterias quando necessário:

- Procurar luz orientada pela célula fotoelétrica;
- As taxias seguir em direção a foco de luz fraco (atração) e afastar-se de foco de luz forte (aversão) que variavam de acordo com posição, localização e com o nível de carga das baterias.
- Recarregar bateria nas estações de alimentação que possuíam uma lâmpada brilhante. Quando a carga está baixa a sensibilidade para a luz diminui e a tartaruga estaciona até a recarga completar-se.
- Contornar obstáculos pesados e empurrar os leves.

Malgrado a estrutura elementar o comportamento da tartaruga de Walter não era tão simples [KONDRATOV]. A lâmpada sobre a tartaruga permanecia ligada, mas apagava sempre que detectava uma fonte de luz. Este artifício originava dois surpreendentes comportamentos sociais como relata Walter J Freeman [FREEMAN 2001]: “*As a means for detecting the internal state, Walter placed on the rotating capstan of the turning motor a marker light extending above the carapace, that stayed on when the turning motor was on, but went out when turning stopped. When the tortoise encountered its own light in a mirror, it stopped and oriented to its own light. Then it resumed circling, saw its light again, and stopped. The behavior continued until it had passed the mirror. If it encountered another of its own kind, attracted by the other light, a stately dance ensued of bumping and backing. Walter thought that these behaviors expressed self recognition and recognition of conspecifics.*”

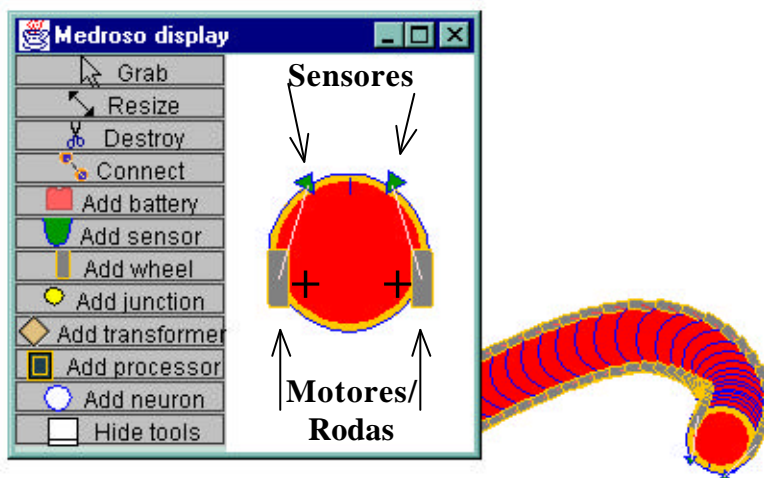
## **Veículos de Braitenberg**

Valentino Braitenberg imaginou uma série de veículos dotados de sensores conectados diretamente a motores [BRAITENBERG]. Estas transformações sensorio-motoras eram moduladas pelo padrão e força excitatória ou inibitória das conexões, resultando em comportamentos diversos. Por exemplo, um arranjo de dois sensores de luz colocados lado a lado na frente do veículo e cada um deles ligado respectivamente à entrada dos motores esquerdo e direito afastava o veículo de uma fonte luminosa. Posto que o sensor mais próximo da fonte de luz impunha um regime de funcionamento mais forte ao seu motor, a diferença de velocidades resultava no desvio observado, uma

manifestação que Braitenberg denominava de “medo”. Se adotarmos sua descrição outros arranjos resultavam em aversão, atração, amor, agressão, fuga, etc.

Adaptando circuitos lógicos a tijolos LEGO, cientistas do M.I.T. Media Laboratory trouxeram algumas criaturas de Braitenberg para o mundo real [HOGG et al.]. Montadas combinando tijolos sensores (luz, calor, som, toque) dotados de ajuste manual do limiar de sensibilidade, tijolos motores (com uma entrada para potência e outra para o sentido de rotação) e tijolos lógicos (e, ou, inversores, flip-flop, temporizadores) criaram veículos capazes de procurar sombras, evitar obstáculos, seguir paredes e o que mais a habilidade do construtor permitia. Faça-se um parêntese para dizer que versões destes tijolos tornaram-se um produto comercial e ferramenta de apoio à aprendizagem como definida na proposta original do projeto: “*Creatures built from Eletronic fall on the fuzzy boudary between animals and machines, forcing students to come to terms with how machines can be like animals, and vice-versa*” [RESNIK and MARTIN 1990]. Além de tijolos LEGO, softwares estão disponíveis na Internet para simular os veículos. [ALCOCK] descreve o artifício de fuga aérea do grilo *Teleogryllus oenicus* quando da aproximação de um morcego. Os morcegos emitem sons na frequência de 40-50 kHz para localização de obstáculos e alvos comestíveis. Supondo que o ataque é desferido pelo lado direito, o sensor de ultrassom do grilo localizado deste lado é acionado e acarreta um movimento ascendente da perna esquerda. Esta perna tocará a asa correspondente diminuindo a frequência da batida da asa. Então, a diferença de velocidades das asas impulsionadoras desviará o grilo para longe da fonte de ultrassom. Uma notável semelhança com uma criatura de Braitenberg.

Permita-se neste momento considerar a atuação das criaturas no seu **meio ambiente**. Tome-se o mais simples dos veículos que possui um único sensor conectado a um motor. Apesar de sua simplicidade ele pode apresentar uma conduta não linear devido às influências que recebe do meio (variações no atrito, inclinações). A relevância desta interação entre o agente e o ambiente foi realçada hipoteticamente por [SIMON] através da parábola de uma formiga caminhando na praia e cuja trajetória é bastante irregular: “... *A aparente complexidade do seu comportamento ao longo do tempo é em grande parte reflexo da complexidade do ambiente em que se encontra*”. Este ponto de vista é levado mais adiante com o conceito de nicho ecológico e é resumido por [ARKIN 1998]: “*Thus, for a roboticist to design effective real world systems, he must be able to characterize the environment effectively. The system must be target towards some niche. Often this implies a high degree of specialization*”.

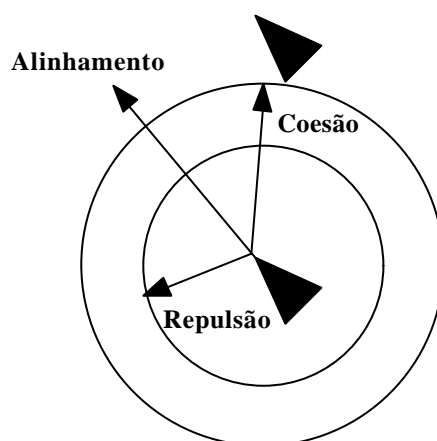


## Boids



A natureza é rica de organismos que atuam de forma ordenada: um bando de pássaros em vôo descreve trajetórias sinuosas, uma poderosa manada em disparada mantém a coesão sem atropelos internos, um cardume de peixes espalha-se na presença de um predador para logo em seguida agrupar-se novamente. Quais leis mantêm o equilíbrio dinâmico destes sistemas? Não sabemos, mas Craig Reynolds postulou um conjunto reduzido de regras seguido independentemente por cada elemento do grupo, denominado *Boid*, capaz de simular tais coreografias: “*So I just tried to mentally put myself inside a flock and imagine what I would have to do to fly with them. I'd have to make sure I didn't get too close to any of my local flockmates. I'd want to be flying at the same speed and in the same heading as my local flockmates. (This also means I'm unlikely to collide with them in the near future.) And finally, if I noticed that all of my local flockmates were on one side of me, I'd want to drift over towards them*” (fig.). Portanto, um *boïd* reage de acordo com sua posição e direção relativas aos vizinhos imediatos, e somente a estes, segundo as regras [REYNOLDS]:

1. *Coesão*: Cada boïd deve dirigir-se em direção ao centro de seu agrupamento local;
2. *Alinhamento*: Cada boïd alinha-se na direção de seus vizinhos e procura igualar a velocidade destes;
3. *Repulsão*: Manter distância dos que estão à sua volta para evitar colisão.



Posteriormente, Reynolds acrescentou uma regra para evitar obstáculos interpostos no ambiente. Ao aproximar-se de um obstáculo o bando dividia-se e reunia-se após contorná-lo. Certamente, um comportamento emergente não previsto. Um fato a destacar é que os *boïds*, seguindo o caminho da técnica para a biologia, serviram de base para o estudo de ornitólogos confirmando o que segundo [MATARIC 1998] é uma das metas da Robótica Baseada em Comportamento: “usar a robótica para modelar e melhor entender sistemas biológicos, tipicamente abrangendo de insetos a homens”.

Desconsiderem-se as limitações eventuais dos modelos apresentados e os exemplos corroboram o argumento minimalista desenvolvido neste tópico, i.e., combinações de comportamentos elementares podem resultar em comportamentos complexos. Evidentemente, a coordenação eficaz e eficiente desses blocos básico é o objetivo a ser perseguido pelos projetistas de AA.

## 2.4 Estratégias de Coordenação de Comportamentos

O escritor Isaac Asimov, mais do que qualquer outro, ajudou a difundir a idéia de robôs operando no cotidiano. Em seu clássico *I, Robot* [ASIMOV] expõe três leis que serviram de substrato lógico para o comportamento dos robôs nas histórias. As leis dispostas por prioridade decrescente são:

1. Um robô não pode ferir um ser humano, ou por inação, permitir que um ser humano sofra qualquer dano.
2. Um robô deve obedecer a um ser humano, a menos que isto contrarie a primeira lei.
3. Um robô deve preservar a sua existência, a menos que isto contrarie a primeira e a segunda lei.

Em um dos contos o robô *speedy* encontra-se num conflito entre preservar sua existência e cumprir uma ordem dada casualmente, sem ênfase, pelo prospector Mike Donavan. Deste modo, surge a alternância de controle entre as duas últimas leis que conduz o robô a ficar girando indefinidamente em torno do local que deveria alcançar (atração), local este permeado com substâncias corrosivas para a sua estrutura metálica (aversão). Os criadores de *speedy* tinham potencializado a 3ª lei acima do valor normal devido o preço exorbitante de sua construção e o risco de perdê-lo, e na situação defrontada ela era reforçada até o ponto de equilibrar a pressão da 2ª lei. A solução final veio do personagem Gregory Powell que se colocou em posição de risco de vida a fim de superar o impasse com a entrada em ação da inexorável 1ª lei.

### O Problema de Seleção da Ação (PSA)

A situação fictícia acima ilustra o ponto em que comportamentos distintos são ativados simultaneamente e um deles deve prevalecer. De forma geral, pela definição de [REDGRAVE], este é um ‘problema de seleção’ em que dois ou mais sistemas lutam pelo acesso ao mesmo recurso restrito. A questão fundamental é determinar o mais adequado conjunto de ações motoras que satisfaçam algum objetivo a ser alcançado pelo agente. [BLUMBERG] considera o PSA central para a construção de AA capazes de operar robustamente em ambientes complexos e dinâmicos.

Para a solução do conflito duas classes de coordenação de comportamentos, a competitiva e a cooperativa, são usualmente empregadas. Pelos métodos competitivos apenas um dos comportamentos sobressai (*winner-take-all* ou “o vencedor-leva-tudo”), enquanto pelo método cooperativo as respostas são somadas de acordo com uma função específica. Nesta segunda classe enquadra-se o método dos Campos Potenciais [ARKIN 1998] em que os obstáculos no teatro de operações geram vetores repulsivos e as metas induzem vetores atrativos. A interação do agente com estas linhas de campo conduzem-no em direção ao alvo. Este trabalho dispõe somente sobre os métodos competitivos posto que suportam os experimentos realizados.

Observou-se durante a leitura de textos que tratam dos mecanismos de seleção a falta de uma taxonomia padrão entre os diversos autores. [PIRJANIAN 1999], por exemplo, cita a taxonomia de Alessandro Saffiotti que divide os mecanismos de seleção em Arbitragem e Fusão de Comandos, enquanto [ARKIN 1998] particiona em métodos Competitivos e métodos Cooperativos (ver fig.). Mais grave que as distintas nomenclaturas são as diferenças conceituais e contextuais. Cite-se à guisa de exemplo que [PIRJANIAN 1999] considera *winner-take-all* um método específico dentro da

Arbitragem e [ARKIN 1998] o toma como a característica básica que define a classe dos métodos competitivos; o método de seleção por votação é posicionado distintamente pelos autores. Adota-se no presente texto a taxonomia de Arkin.

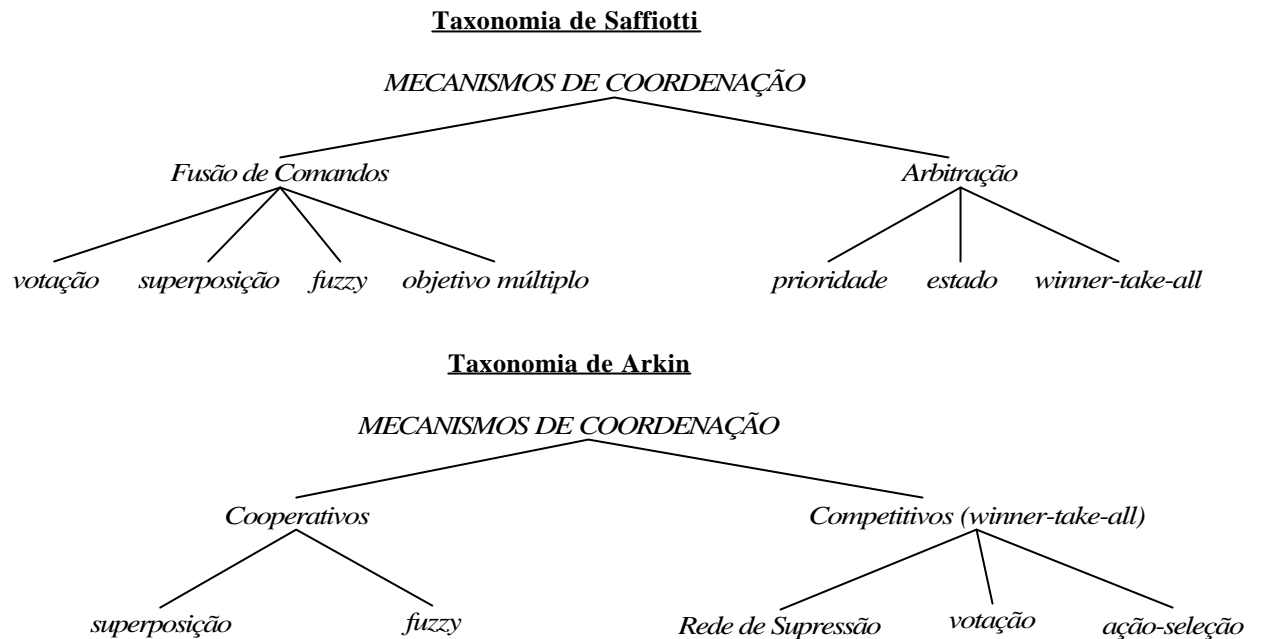


fig. XX

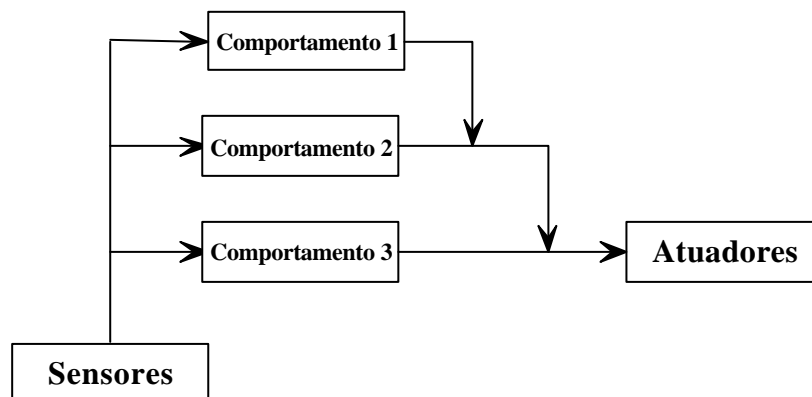
### Métodos de arbitragem

Um desafio central nos sistemas baseados em comportamento diz respeito à coordenação de múltiplos comportamentos, portanto fazendo “arbitragem”, i.e., decidindo que comportamento executar a cada instante [MATARIC 1998]

Subdividem-se os métodos competitivos pela forma de arbitragem empregada na escolha do conjunto de ações a ser passado para os atuadores do agente:

*Arbitragem via rede de supressão.* A escolha do comportamento é baseada em um esquema de prioridade fixa pré-definida. Os comportamentos estão dispostos hierarquicamente com os de nível mais alto suprimindo e inibindo os que estão abaixo (ver fig.).

A **Subsumption Architecture** de Rodney Brooks é o modelo mais conhecido desta forma de arbitragem e será apresentada posteriormente neste texto.

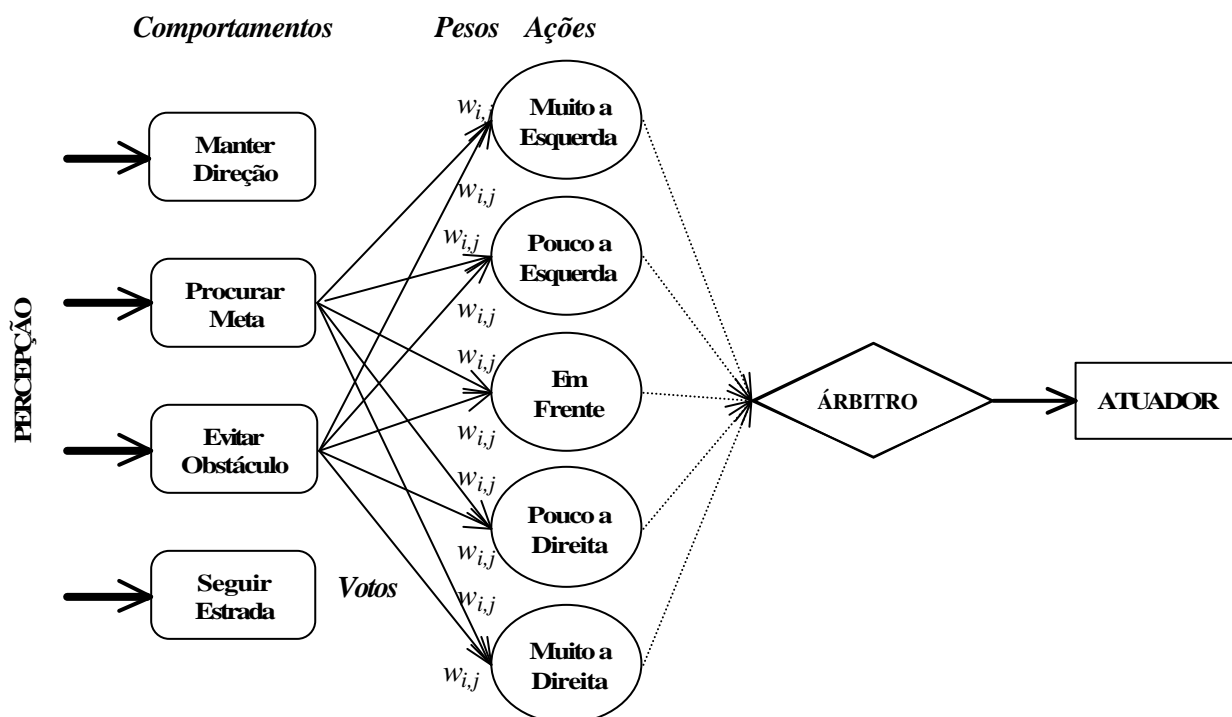


*Arbitragem via ação-seleção.* O comportamento mais ativo, calculado com base nas metas do agente e nos estímulos ambientais, é o vencedor. Não há hierarquia pré-definida entre os comportamentos e, portanto, a emergência é acentuada e novos comportamentos podem ser acrescentados de forma modular.

*Arbitragem via votação.* Ações motoras pré-definidas estão conectadas a distintos comportamentos e recebem votos destes últimos com base nas condições do ambiente. A ação eleita para execução é aquela de maior soma ponderada das conexões entre comportamentos e ações. Do mesmo modo que na arbitragem via ação-seleção não há hierarquização.

A **Distributed Architecture for Mobile Navigation (DAMN)** [ROSENBLATT 1997] consta de comportamentos que operam paralela e assincronamente. Esses enviam para um árbitro central os votos a favor ou contra as ações básicas de controle do agente. Os pesos das ligações representam o poder relativo dos comportamentos no controle do agente, mas é a apuração dos votos totais pelo árbitro que determinará a próxima ação a ser executada. Os pesos podem ser alterados através de um operador (*mode manager*) a fim de melhorar o desempenho do agente para cumprir a tarefa especificada.

DAMN foi implementada em veículos experimentais na Hughes AI Center, nos veículos Navlab da Carnegie Mellon University operando em terrenos abertos e no projeto militar Unmanned Ground Vehicle Demo II Program da agência DARPA (Defense Advanced Research Project Agency). A figura abaixo foi adaptada de [ROSENBLATT] e [ARKIN] e ilustra dois comportamentos ativos de um conjunto maior e algumas ações disponíveis. Estas recebem votos ponderados e um árbitro (a arquitetura permite mais de um árbitro) decidirá de acordo com alguma função específica a vencedora.



Os mecanismos de arbitragem, apesar de interessantes soluções do ponto de vista da engenharia, soam artificiais posto que carecem da contrapartida biológica

comprovada. Deste modo, o capítulo seguinte delinea o problema da coordenação partindo das relações de fluxo de informações e controle entre comportamentos, i.e., sua organização — um assunto profundo e amplamente estudado em etologia e neurociências, e de grande interesse para a robótica pelos *insights* que possa trazer para a compreensão de sistemas complexos.

## **2.6 Conclusão**

Neste capítulo apreciou-se o grande potencial dos modelos inspirados no comportamento animal para o desenvolvimento de agentes capazes de atuar autonomamente em ambientes dinâmicos. Classificaram-se os comportamentos e demonstrou-se a possibilidade de conectar elementos simples para a execução de ações complexas.

O importante Problema da Seleção de Ação encaminhou as discussões a respeito das funções de arbitragem diante de comportamentos competindo pela posse do mesmo atuador.

No entanto, até o presente momento passou-se ao largo das considerações dos mecanismos internos que interligam estímulos a respostas ou percepções e estados internos a comportamentos. Trataremos deste assunto no capítulo seguinte abordando as redes neuronais e neurais, tanto quanto suas implicações no projeto de agentes autônomos artificiais.

## CAPÍTULO 3

### MECANISMOS E ARQUITETURAS DE CONTROLE DO COMPORTAMENTO

#### 3.1 Introdução

Desaparecem a cada dia de 50 a 200 espécies no planeta Terra de um total estimado entre 3 milhões e 30 milhões. As causas desta extinção são a destruição do habitat por incêndios ou desflorestamento intencional, a invasão de espécies estrangeiras e as mudanças climáticas. O Homem é o principal causador da corrente extinção em massa.

O parágrafo acima é uma estranha forma de começar um capítulo sobre controle, mas justifica-se: a destruição ambiental provocada pelo “homo sapiens sapiens” (homem sábio sábio) resulta na perda da biodiversidade, com todas as suas conseqüências funestas, e, restritamente, das prováveis soluções de engenharia que pudessem advir do conhecimento desses seres extintos. Por que a preocupação se tantas outras espécies restam? Sugere-se refletir sobre o alerta do matemático Walter R. Fuchs quando diz “*Mas a ignorância, que não protege do castigo, pode algum dia, de repente, voltar a ser assustadoramente atual...*”.

Este capítulo trata dos princípios gerais de projeto utilizados pela natureza para gerar suas versáteis criaturas e dos mecanismos responsáveis pelo comportamento adaptativo. Diversos cientistas perscrutam estes modelos naturais com o objetivo de construir sistemas de controle para agentes autônomos. Dentre eles, Mauro Roisenberg do qual se apresenta a Arquitetura de controle **Piramidnet**. Por fim, discute-se as abordagens reativa e deliberativa e como elas, antes de opostas, podem ser complementares.

#### 3.2 Sistema Nervoso e Comportamento

O sistema nervoso dos animais é formado por um conjunto de células nervosas (neurônios) interconectadas especializado em receber informações do ambiente, armazená-las, processá-las, recuperá-las e ativar os músculos responsáveis pelos movimentos e locomoção do corpo. A operação do SN permite que pássaros e tartarugas naveguem distâncias continentais e retornem ao ponto de partida, a eterna luta entre presas e predadores, a corte e o ato sexual, enfim, os incontáveis comportamentos adaptativos para sobreviver e procriar.

#### Neurônios Biológicos

O neurônio é uma célula especial capaz de integrar sinais elétricos no **corpo celular (soma ou pericarpo)** provenientes de outros neurônios através de ramificações denominadas **dendritos**, gerar pulsos elétricos e transmiti-los por um longo filamento liso denominado **axônio** (fig.). Convém observar que esta estrutura estereotipada possui exceções tais como neurônios sem axônio ou dendritos, dendritos atuando como canais de saída e outras variantes. O leitor interessado poderá aprofundar no assunto em [NICHOLLS] que serviu de referência para o tópico presente.

Estimulados por mudanças de luminosidade, pressão ou substâncias químicas os dendritos alteram a permeabilidade de suas membranas para íons de sódio ( $\text{Na}^+$ ) e

potássio ( $K^+$ ) e permitem a sua circulação através de canais de proteínas que abrem ou fecham em função do potencial elétrico. A diferença de concentração de íons no interior e exterior da membrana gera um **potencial elétrico localizado** que pode propagar-se para áreas vizinhas. A amplitude do sinal gerado depende da intensidade do estímulo e atenua na medida que se afasta do ponto inicial. Se o sinal exceder um limiar específico no corpo celular, e somente neste caso, é disparado um pulso de despolarização (**potencial de ação**) constante em amplitude e duração ao longo do axônio, independente da intensidade e duração do estímulo que o originou.

O potencial de ação nascido é regenerado induzindo sinais elétricos na região contígua. Forma-se então um trem de pulso que trafega veloz para a extremidade do axônio. Ao atingir este ponto **vesículas pré-sinápticas** liberam substâncias químicas (**neurotransmissores**) em direção aos dendritos de outros neurônios através de intervalos chamados de **sinapses**. Proteínas **receptoras** nos destinos interagem com os neurotransmissores para criar um novo potencial localizado. A amplitude deste depende da quantidade de neurotransmissores enviados. Dependendo do tipo de receptor pós-sináptico a conexão será **inibitória** ou **excitatória**, i.e., dificultando ou não o surgimento do potencial de ação. No intervalo entre a **despolarização** e a **repolarização** total a membrana entrará no **período refratário** e não responderá a novos estímulos.

O sistema nervoso possui além dos neurônios uma quantidade abundante de **glias**, um tipo de célula sem dendritos ou axônio cujo papel ainda está sendo esclarecido. São formadoras da **bainha de mielina**, uma camada de lipídio que envolve determinados axônios e facilita a transmissão do pulso elétrico.

Neurônios operam como unidades elementares de **processamento de informações**. A intensidade de um estímulo é codificada pela frequência de disparo: quanto mais intenso o estímulo, maior a despolarização e, conseqüentemente, maior a frequência de disparo do neurônio.

## Redes Neuronais

Neurônios conectam-se a neurônios formando intrincadas redes neuronais com poder computacional enormemente ampliado. Um único neurônio motor da medula espinhal do ser humano pode receber conexões pré-sinápticas de aproximadamente 10.000 neurônios (**convergência**) e enviar sinais para milhares de outros através de **colaterais axônicos (divergência)**. Portanto, o número de conexões é muito maior que o número de neurônios.

A montagem em rede possibilita que padrões de informações mais sofisticados possam ser detectados e convertidos em comportamentos. Alguns destes grupos de neurônios (**sensores ou aferentes**), dispostos próximos à superfície da pele ou nos órgãos dos sentidos, capturam sinais ambientais transformando-os em potencial localizado e às vezes em potencial de ação. Comumente, grupos de neurônios intermediários (**interneurônios**) são acionados e coordenam a resposta do sistema nervoso. Se a resposta for no sentido de mover alguma parte do corpo ou de locomoção neurônios dedicados (**motores ou eferentes**) acionam os músculos necessários.

Uma importante característica da sinapse é sua **plasticidade**, i.e., uma alteração de curta ou longa duração na força de conexão entre o neurônio emissor e o receptor em resposta aos estímulos. A quantidade de neurotransmissores liberados pode ser modulada pela frequência e duração do trem de pulsos.

A plasticidade sináptica embasa um dos processos de **aprendizagem** de que são capazes as redes neuronais. A **aprendizagem associativa**, por exemplo, em que um

padrão é de alguma forma associado a outro e revela-se no momento da apresentação deste último seria explicada pela **lei de Hebb** (psicólogo canadense Donald O. Hebb): *“Quando o axônio de uma célula A excita a célula B e repetidamente ou persistentemente toma parte no seu disparo, algum processo crescente ou mudança metabólica participa em uma ou ambas as células tal que a eficácia de A, como uma das células que disparam B, é aumentada”*. [BARRETO] explica a lei de Hebb pelo princípio da facilitação: *“Ora, pode-se imaginar que seguindo um princípio freqüentemente válido em biologia, o de que o uso de um órgão favorece seu desenvolvimento, que cada vez que uma sinapse é ativada e encontra ativado ou consegue ativar outro neurônio o número de neurotransmissores liberados aumenta na próxima vez que o neurônio for ativado”*.

Como de hábito no estudo do sistema nervoso descobrem-se exceções. Ladislav Tauc e Eric R. Kandel (prêmio Nobel de Fisiologia e Medicina de 2000) enquanto estudavam a lesma marinha *Aplysia* encontraram um mecanismo diferente ao de Hebb que batizaram de **coincidência pré-modulatória**. A força de conexão entre dois neurônios é fortalecida quando um terceiro neurônio, o neurônio modulador, está ativo ao mesmo tempo em que o neurônio pré-sináptico. É dispensável a ativação do neurônio pós-sináptico [KANDEL].

Ainda quanto à mecânica da aprendizagem das redes neuronais, [ROISENBERG] acrescenta que conexões podem aparecer e desaparecer em minutos. Grupos de neurônios podem migrar de um lugar para outro [RUSSEL].

## Organização do Sistema Nervoso

A arquitetura completa do sistema nervoso devido à imensa quantidade de células nervosas e o emaranhado de suas conexões é ainda um mistério a ser desvendado pela ciência. No entanto, algumas características gerais de sua organização são identificadas.

Neurônios de partes distintas do corpo e de espécies animais diferentes funcionam de forma semelhante. A variedade das reações de um organismo é função da dimensão e topologia do sistema nervoso. Admitindo-se simplificações e exceções destacam-se alguns itens a respeito do sistema nervoso:

- Divide-se o sistema nervoso em **central** que compreende o cérebro e a medula espinhal, e **periférico** que inclui o sistema autônomo, nervos cranianos e nervos espinhais.
- Neurônios que contribuem para a executar uma mesma função encontram-se em densos grupos conhecidos como **gânglios (centralização)**.
- Acúmulo imenso de neurônios no crânio formando o **cérebro**. A **cefalização**, no entanto, não é o padrão de todo reino animal. A Hidra, um invertebrado celenterado (cnidário) encontrado em lagoas e cursos d'água, possui uma estrutura reticular de células nervosas distribuídas uniformemente no seu corpo. Ao ser irritada, por um pequeno crustáceo, por exemplo, a célula emite uma descarga détrica que se difunde pela rede com intensidade decrescente e ocasiona a contração muscular de todo o corpo capturando a presa. Não há neste caso controle central ou hierárquico.
- Existência de **conexões seqüenciais, laterais e recorrentes**. O sistema visual dos mamíferos apresenta os três tipos de conexões.

## O Problema de Seleção da Ação entre os animais



Walter J. Freeman [FREEMAN] simplificadamente define o cérebro como um conjunto de células na cabeça que regula o comportamento. Também define um animal como um coletivo de células que se move pelo ambiente para comer e evitar ser comido, em competição para reproduzir.

Em um ambiente comumente dinâmico e perigoso espécies resistem e proliferam graças à organização do sistema nervoso que os dota de **comportamentos adaptativos**. Sinais disparadores de ações adequadas para a situação confrontada são obtidos através de filtros sensoriais customizados ou por meio do descarte de informações irrelevantes nos níveis mais altos do SN.

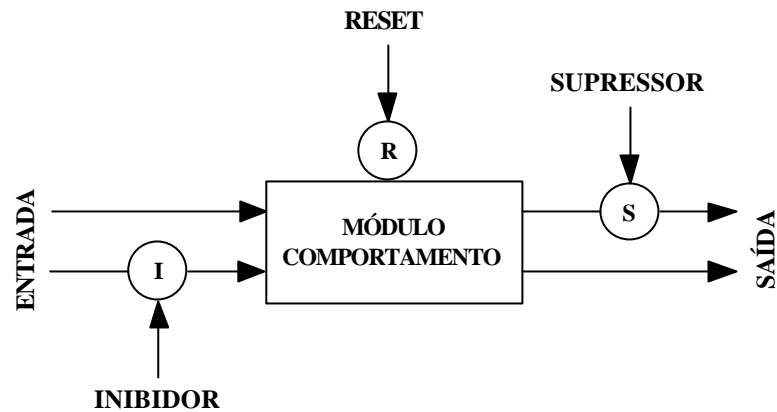
Problema maior advém de informações que implicam no uso do mesmo conjunto de atuadores por comportamentos conflitantes, como entre fugir ou comer diante de um adversário faminto. Neste caso ao SN cabe decidir qual comportamento executar, e assim retornamos ao problema de seleção da ação abordado no capítulo anterior. A leitura de [ALCOCK] é instrutiva acerca do tratamento dado ao PSA na natureza. Trata, por exemplo, dos **geradores centrais de padrão** encontrados em diversas espécies cujos neurônios ajustam o ritmo de grupos distintos de neurônios motores. A seção seguinte formaliza, além deste esquema **centralizado**, mais dois: o **hierárquico** e o **distribuído**.

### 3.3 Arquiteturas de Controle de Comportamentos

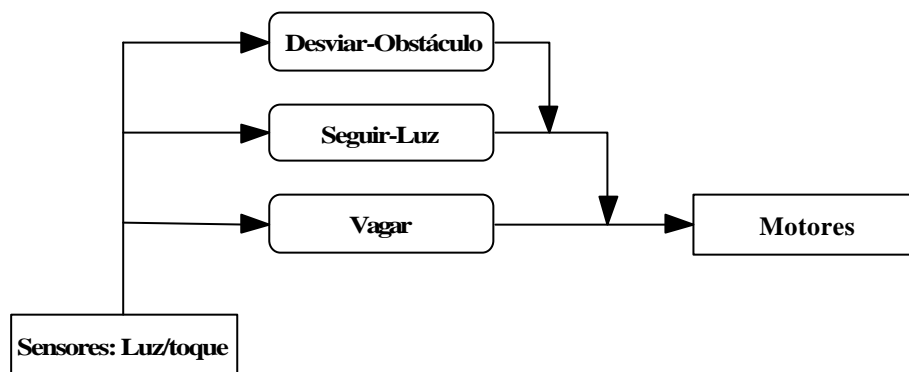
A Arquitetura provê um conjunto de princípios para organizar os sistemas de controle e impõe restrições na forma como os problemas de controle robótico podem ser resolvidos [MATARIC]. Distingue-se com base na lógica de conexão entre os módulos comportamentais, em competição pelo mesmo recurso, três tipos de arquiteturas de controle. Estas têm sido implementadas na solução do PSA para AA, suportam a decisão pelo método *winner-take-all* e possuem plausibilidade biológica conforme se expõe:

#### *Arquitetura hierárquica*

A **Subsumption Architecture** de Rodney Brooks é a referência fundamental deste esquema. Na sua forma pura caracteriza-se por camadas paralelas, em relação aos sensores, de comportamentos dispostos sequencialmente por níveis de prioridade e implementados usando máquinas de estado finito incrementadas com registradores e temporizadores (*fig.*). Cada camada é especializada em executar, assincronamente, uma tarefa determinada e uma camada superior é capaz de inibir a entrada sensorial da imediatamente inferior ou de suprimir a saída da mesma e, eventualmente, substituí-la pela própria; toda a operação ocorre sem o conhecimento da inferior, i.e., o estado interno de uma camada superior é inacessível à inferior.



A figura XX refere-se a uma implementação em um simulador robótico khepera que procura e caminha para fontes de luz, mas desvia de obstáculos no trajeto mesmo que estes obstáculos sejam transparentes [SILVA]. Recorre-se a este modelo ao tratar da Pyramidnet.



A arquitetura de Brooks é robusta como descreve [ALVES 1993]: “a falha de qualquer das camadas não significa, necessariamente, o colapso total do sistema”. Se a camada de mais alto nível está no controle momentâneo e sofrer algum dano o controle passa para a próxima camada de nível mais alto.

Como desvantagens da SA [PIRJANIAN 1999] enumera (1) Alterar a hierarquia inflexível de conexões entre comportamentos implica em redesenho do projeto; (2) A inexistência de metas explícitas no sistema; a funcionalidade do agente é uma propriedade emergente da interação entre os comportamentos e das condições ambientais.

### Arquitetura Distribuída

Em uma forma conhecida como *recurrent reciprocal inhibition* (RRI) as ações estão completamente conectadas umas às outras por pares de ligações inibitórias e de ligações excitatórias para o atuador compartilhado (fig.). A escolha da vencedora ocorrerá quando um ganho em ativação de uma ação passar a inibir as outras e conseqüentemente sofrer menos inibição por parte delas.

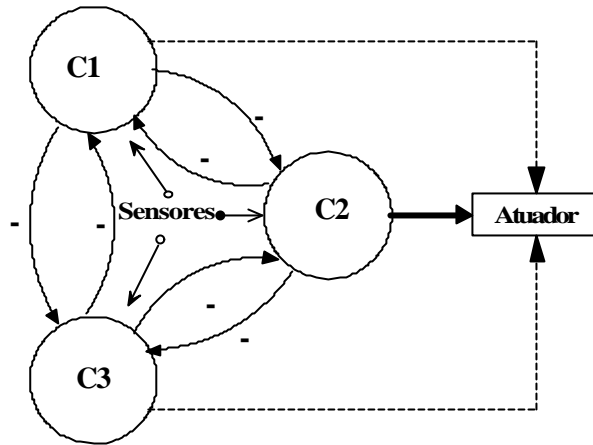


Fig.

### Arquitetura Centralizada

Um mecanismo central de seleção determina qual comportamento terá prioridade sobre o atuador compartilhado. Comparando-se com a arquitetura distribuída percebe-se o número menor de conexões e o custo mais baixo para acrescentar uma nova ação. Entretanto, uma falha no mecanismo central de seleção pode inviabilizar o agente.

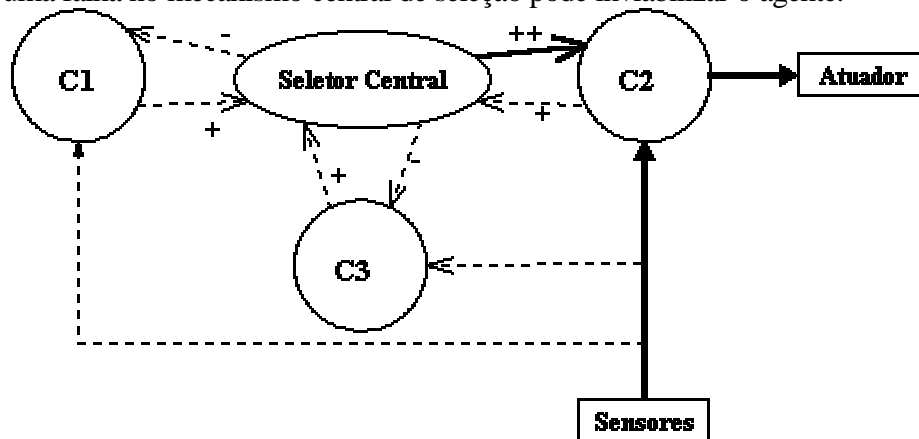


Fig.

### Análogos Biológicos

Esquemas de conexão homomórficos às arquiteturas de controle acima são encontrados no cérebro dos animais.

1. [PRESCOTT et al. 1999] argumenta que o cérebro dos vertebrados é dividido em camadas verticais de controle no estilo SA e encontra similaridades entre esta e o sistema de defesa de ratos. Considera hierarquicamente a estrutura neural do sistema de defesa e, respectivamente, a crescente sofisticação de suas respostas para o problema de evitar e reduzir danos, iniciando com simples reflexos oriundos da medula espinhal até o nível superior de supressão de respostas pelo córtex frontal.
2. [REDGRAVE et al. 1999] postula quanto à arquitetura descentralizada que "... a seleção que ocorre em vários subsistemas funcionais no cérebro dos vertebrados pode ser de natureza distribuída ou emergente".
3. O **Gânglio Basal (GB)** é um acúmulo de matéria cinzenta abaixo do córtex formado por cinco núcleos. Estes núcleos incluem o caudate

nucleus, putamen, globus pallidus, nucleus accumbens septi e tubérculo olfatório. O termo striatum refere-se ao caudate e putamen. O termo pallidum refere-se ao globus pallidum.

O striatum é a principal entrada externa do BG para sinais provenientes do córtex (maioria dos sinais), do núcleo subtalamico (STN), ambos modulados através do neurotransmissor glutamato, e do sistema dopaminérgico através do neurotransmissor dopamina. As saídas principais para o exterior (Tálamo) são por meio da substantia nigra pars reticulata (SN) e da área ventral tegmental (VTA). Internamente os sinais do striatum dirigem-se para a SN/VTA e para o Pallidum. Este possui projeções para o STN. O grafo (fig. XX) ilustra resumidamente algumas conexões. Um esquema mais detalhado pode ser encontrado em [AFIFI 1998]

Estudos sugerem que o GB está envolvido em processamento somatosensório, controle motor, atenção, percepção visual e aprendizagem por reforço [BROWN 1997]. [BISCHOFF 1998] demonstra a ação do GB em duas tarefas: (1) Inibir a atividade motora; e (2) estimar para o córtex o próximo estado sensório durante a coordenação de movimentos dos braços, como no ato de levar aos lábios uma xícara de café.

[PRESCOTT et al. 1999] propõe que o Gânglio Basal atua com um centro especializado em resolver conflitos entre vários sistemas sensoriomotores dos mamíferos competindo pelo mesmo recurso motor. A quantidade de conexões aferentes e eferentes de várias unidades funcionais do cérebro, como visto anteriormente, situa o GB como um local propício para resolver centralizadamente problemas de seleção de ação.

O papel do GB nas atividades motoras é sustentado por estudos cinemáticos, imagens geradas por *tomografia por emissão de positrons* e sintomas observados em pacientes com lesões na região. Diversas desordens de movimento parecem originar do mau funcionamento do GB [REDGRAVE et al. 1999]. Os movimentos lentos, o andar rígido, a imobilidade e os tremores de cabeça e mãos nos indivíduos afetados pela doença de Parkinson têm sido associados à deficiência de dopamina no BG. Os sintomas da esquizofrenia, coréia de Huntington, síndrome de Tourette e a desordem compulsiva obsessiva também parecem depender do mal funcionamento do GB.

### 3.4 Estudo de caso: PIRAMIDNET

O projeto de pesquisa “PyramidNet” rotulado e coordenado por Mauro Roisenberg na Universidade Federal de Santa Catarina é fortemente inspirado no comportamento e no sistema nervoso de animais. Tem como objetivo o desenvolvimento de uma arquitetura de controle (**PIRAMIDNET**) capaz de conduzir agentes a satisfazer padrões elevados de autonomia. Os fundamentos deste *framework*, ainda que não batizado pelo nome atual, são encontrados em [ROISENBERG] e uma síntese em [BARRETO]. O presente texto é um breve panorama.

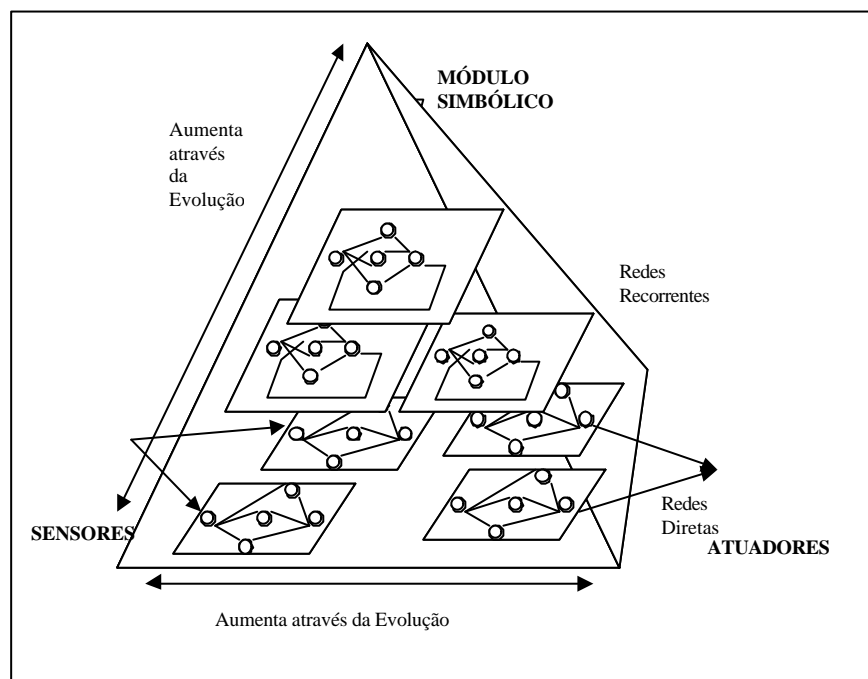
As ciências e técnicas que convergem na proposta: A **etologia** determina parâmetros para checar a complexidade da tarefa e a atuação final do agente. O sistema nervoso é o modelo para a coordenação e organização dos comportamentos e é superficialmente espelhado por **redes neurais (artificiais)**. Por fim, o sistema de controle pode ser aperfeiçoado com técnicas de **computação evolucionária** e

**aprendizagem** a fim de se adaptar a dinâmica ambiental. Obviamente, o nome PyramidNet (“Pirâmide de Redes”) alude à descrição estrutural da arquitetura.

As observações e experimentos de Konrad Lorenz, Nikos Tinbergen e von Frisch, fundadores da etologia, esclareceram a respeito dos complexos comportamentos de animais no meio ambiente. A análise, redução a unidades funcionais e o modelo comportamental resultante são pistas úteis para o desenvolvimento de agentes autônomos artificiais.

Um modelo requer uma linguagem precisa de descrição. **Autômatos de Estado Finito**. CONTINUAR....

AA / animal / ambiente / MEF /otimização de projeto natural / RNA / o problema da escalabilidade / evolução e design / módulo e hierarquia /.



### 3.5 Reativo versus Deliberativo

DECIDIR SE FICA NO CAPÍTULO...

#### Conclusão

Apresentaram-se as arquiteturas de coordenação de comportamentos com base nas conexões entre os módulos e na origem (centralizado, descentralizado) do controle. Foram fornecidos exemplos extraídos da biologia que guardam semelhança com as arquiteturas expostas.

A CONTINUAR...

## BIBLIOGRAFIA

- AFIFI, Adel K.; HOESEN, Gary Van; BECHARA, Antoine and RODNITZK, Robert Y. **Functional Anatomy of Basal Ganglia** <http://>. (1998).
- ALCOCK, John. **Animal Behavior: An Evolutionary Approach, Sixth Edition**. Sinauer Associates, Inc. Massachusetts. 1998.
- ALVES, J. B. da Mota. **Ficção, realidade e expectativa de robôs inteligentes baseados em comportamento**. In Anais do 1. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Rio Claro, SP, 1993. pp 145-154.
- ARKIN, Ronald C.. **Behavior-Based Robotics** The MIT Press - Cambridge, Massachusetts 1998.
- ASIMOV, I. I, **Robot**. Dobson Books, Great Britain, 1967.
- BARRETO, Jorge M. **Inteligência Artificial no limiar do século XXI**. Edição. Florianópolis 1999. 2ª ed. 324 p.
- BENTLEY, Peter. **An Introduction to Evolutionary Design by Computers**. In Bentley, P. (Ed.). *Evolutionary Design by Computers*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc. San Francisco, California. 1999. p. 1-73.
- BISCHOFF, Amanda (1998). **Modeling the Basal Ganglia in the Control of Arm Movements**. PhD dissertation, Faculty of the Graduate School, University of Southern California.
- BLUMBERG, Bruce. **Action-Selection in Hamsterdam: Lessons from Ethology**
- BOERS, Egbert; KUIPER, Herman. **Biological metaphors and the design of modular artificial neural networks**. M.Sc. Dissertation, Leiden University. 1992.
- BROOKS, Rodney A. **Elephants don't play chess**. In *Robotics and Autonomous Systems*, 6, p. 3-15. 1990.
- BROWN, Lucy L.; SCHNEIDER, Jay S. and LIDSKY, Theodore I. **Sensory and cognitive functions of the basal ganglia**. In *Current Opinion in Neurobiology*, 7, 157-163. 1997.
- EPSTEIN, Isaac. **Cibernética**. Editora Ática, São Paulo. 1986.
- FREEMAN, Walter J. **Introductory article on 'Brain'**. In *Encyclopedia of Science & Technology*, Vol 3, p 30-32, 8<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1997.
- FREEMAN, Walter J. **Grey Walter**. In Nadel, Lynn (Ed.). To appear in the *Encyclopedia of Cognitive Science*. Nature Publishing Group. 2001.
- GERARDIN, Lucien. **La biónica** Ediciones Guadarrama S.A. - Madrid, 1968.
- HILGARD, Ernest R. e ATKINSON, Richard C. **Introdução à Psicologia**. Companhia Editora Nacional 1979 (tradução).
- HOGG, David W.; MARTIN, Fred; RESNIK, Mitchel . **Braitenberg Creatures**. MIT Media Laboratory, Cambridge. June 1991.
- KANDEL, Eric R. and Hawkins, Robert D. **The Biological Basis of Learning and Individuality**. *Scientific American*. Vol 267, Number 3, p 53-60. 1992.
- KONDRATOV, A. **Nombre et Pensée**. Éditions MIR - Moscou 1967
- KOVÁCS, Zsolt L. **O Cérebro e a Sua Mente: Uma Introdução à Neurociência Computacional**. São Paulo: Edição Acadêmica, 1997. 214 p.
- LORENZS, Konrad. **Os Fundamentos da Etologia**. Traduzido de *The Foundations of Ethology (1981)*. Editora da Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 1995.
- MATARIC, Maja J. **Behavior-Based Robotics as a Tool for Synthesis of Artificial Behavior and Analysis of Natural Behavior**. *Trends in Cognitive Science*, Vol. 2, No. 3, March 1998, 82-87.
- MATARIC, Maja J. **Behavior-Based Robotics Control: Example from Navigation, Learning and Group Behavior**.

- NICHOLLS, John G.; MARTIN, A. Robert; WALLACE, Bruce G., and FUCHS, Paul A. (2000). **From Neuron to Brain, Fourth Edition**. *Sinauer Associates, Inc*, December 2000.
- PRESCOTT, Tony J. and IBBOTSON, Carl (1997). **A robot-trace maker: modeling the fossil evidence of early invertebrate behavior**, *Artificial Life*, **3**, 289-306
- PRESCOTT, Tony J.; REDGRAVE, Peter and GURNEY, Kevin (1999). **Layered control architectures in robots and vertebrates**, *Adaptive Behavior*, **7**, 99-127.
- REDGRAVE, Peter; PRESCOTT, T. J. and GURNEY K. (1999). **The Basal Ganglia: A Vertebrate solution to the Selection Problem?**, *Neuroscience*, **89**, 1009-1023.
- REYNOLDS, C. W. (1987) **Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model**, in *Computer Graphics*, 21(4) (SIGGRAPH '87 Conference Proceedings) pages 25-34.
- ROISENBERG, Mauro. **Emergência de Inteligência em Agentes Autônomos através de Modelos Inspirados na Natureza**. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina Como Parte dos Requisitos para a Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica — Área de Concentração em Sistemas de Informação. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis 1998. 206 p.
- ROSENBLATT, Julio K. (1997). **DAMN: A Distributed Architecture for Mobile Navigation**. PhD dissertation, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- SAGAN, Carl. **Os Dragões do Éden** - Livraria Francisco Alves Editora S.A. Rio de Janeiro 1983 (traduzido).
- SAPARINA, Yelena, **Cybernetics With Us**. Peace Publishers – Moscow, 1966
- SILVA, Flavio de Almeida e. **Redes Neurais Hierárquicas para implementação de comportamentos em Agentes Autônomos**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis 2001.
- SIMON, Herbert A.. **As Ciências do Artificial** Tradução feita sobre as M.I.T. Press Paperback Editions (1a. ed., Março-1970; 2a. ed., Abril-1981) Arménio Amado Editor, Sucessor Coimbra- 1981.