

## PRINCÍPIOS PARA PROCESSOS COGNITIVOS

João Ranhel - Escola Politécnica da USP

### Resumo

Neste ensaio, uma discussão a respeito dos limiares do comportamento cognitivo é realizada por meio de um arcabouço que relaciona um conjunto de princípios, de atributos, de operações sobre dados e signos, e de processos computacionais. Alguns *princípios* (*significação, retenção, classificação, antecipação, seleção, e corporificação*) são propostos como necessários e capazes de impulsionar um agente (um organismo, um robô, um personagem virtual, um software) do domínio do tratamento de sinais (domínio do controle) para o domínio cognitivo. Esta é uma abordagem multidisciplinar, cujo foco está em como seleção natural e evolução levaram os organismos à cognição. Uma consideração é feita sobre como organismos unicelulares (e vários pluricelulares) operam no domínio dos sinais, enquanto que os sistemas cognitivos operam no domínio dos signos (da representação). Vários animais obtêm benefícios de alguns, mas não todos os princípios, e.g. os cnidários; portanto, há organismos que operam entre os dois domínios. Sistemas cognitivos usam todos os princípios propostos aqui. Algumas espécies de artrópodes e de moluscos são candidatos a sistemas cognitivos mínimos (que transpassam os limiares cognitivos). Pela análise de seus sistemas neurais, cientistas poderão encontrar o correlato neural para cognição (NCCog). Compreender os processos minimamente cognitivos pode ajudar em ambos: compreender o fenômeno cognitivo, e guiar a criação/simulação de agentes artificiais cognitivos.

### Palavras-chave

Cognição. Princípios da cognição. Comportamento cognitivo mínimo. Cognição corporificada. Detecção de Padrões. Cognição mínima.

TECCOGS

## 1 Introdução

O conceito de cognição tem sido construído com base em um conjunto de elementos obtidos desde simples observações de comportamento até inferências sobre os mais altos níveis de raciocínio humano. Mais ainda, alguns cientistas têm descrito cognição (ou têm defendido que ela existe) em níveis tão distintos quanto o molecular, o dos organismos unicelulares, e o nível mental humano. Como resultado, o termo tem sido evitado devido a sua imprecisão.

Nas últimas décadas coletou-se uma infinidade de dados advindos de vários campos de conhecimento ligados à Ciência Cognitiva. É tempo de examiná-los tentando encontrar leis, propriedades, atributos, estruturas e/ou organização que permitam formalizar uma definição de cognição, ou ao menos um conjunto de quesitos que possamos concordar como sendo responsável por levar uma *entidade* ao comportamento reconhecidamente cognitivo. No momento, uma análise conceitual de cognição parece ser tão importante para o progresso nesta área quanto são as construções de modelos e teorias sobre as questões concernentes. Há muito se suspeitava das capacidades cognitivas de mamíferos; porém, em um de seus livros, Darwin [1] abriu as portas para considerarmos inteligência em minhocas [2], [3].

Desde então, dados mais apurados vieram à luz e alguns cientistas inseriram insetos dentro do cenário cognitivo [4], [5]. Abelhas têm demonstrado várias capacidades cognitivas, como memória explícita para lugares (memória espacial) [6], [7], condicionamento associativo e de segunda-ordem, aprendizado contextual [8], [9], [10], abstração, generalização, categorização visual [11], [12], comunicação complexa, e talvez uma tosca linguagem por meio de sua dança (*waggle dance*) [13], [14], [15], [16], [17], [18]. Abelhas parecem ser capazes de distinguir entre fenômenos semelhantes e diferentes [11], [12], [19], [20]; embora algumas dessas capacidades gerem controvérsias e tenham sido rejeitadas [21], [22].

Formigas podem "ensinar" (ou pelo menos comunicar) companheiras ignorantes sobre um caminho para um alvo qualquer [16], [23], [24]. Vespas usam memória espacial (e.g. as da espécie *Cerceris rybyensis* [25], [26]) e comportamento antecipatório preparando tocas e esconderijos para onde carregam suas presas (ex: *Ampulex compressa* [27], [28], [29], [30]). Aranhas saltadoras do gênero *Portia* (*salticids*) demonstram capacidade antecipatória em labirintos, seguindo visualmente caminhos cheios de volteios (*detour*) para solucionar qual ramo, ou qual arame contorcido pode levar a uma presa [31], [32]. Elas demonstram também capacidade de planejamento, de imitar sinais sísmicos em teias de outras aranhas, comportamento de tentativa e erro, e podem trapacear e enganar presas maiores que

elas próprias [33], [34]. As *Portia* são as aracnídeas dotadas com a maior acuidade visual no mundo dos insetos [35], e são capazes de reconhecer objetos, formas, presas imóveis e parceiros sexuais [34], [36].

As moscas das frutas, *Drosophila melanogaster*, cujo cérebro é medido em micrômetros, são descritas como capazes de condicionamento associativo [37], [38], aprendizado conceitual [39], [40], [41], condicionamento de segunda-ordem [42], [43], orientação espacial, expectativa e antecipação, diferenciação de estímulo e sustentabilidade [5], [44]; todas essas características importantes para seus sistemas de decisão, que têm sido estudadas exaustivamente, trazendo novos dados para esclarecimentos na área [45].

Buscando na árvore filogenética podemos encontrar moluscos (e.g. polvos) que demonstram capacidades cognitivas excepcionais, como memória espacial e aprendizado associativo complexo. Cefalópodes possuem os sistemas nervosos maiores e mais complexos dentre todos os invertebrados [46], [47], [48], bem superior ao dos insetos; que geralmente são considerados meros sistemas responsivos. Polvos aprendem ao observar outros polvos serem ensinados.

Os comportamentos descritos acima deveriam ser reservados a “algo” (organismo/entidade) que consideramos cognitivo, embora o senso comum qualifique insetos como simples “programas”. Se traços de comportamento cognitivo podem ser encontrados em invertebrados, especialmente em insetos, por que marcas cognitivas não seriam encontradas em organismos filogeneticamente considerados mais “simples”? Dessa forma, é natural encontrarmos na literatura científica argumentos considerando cognição em bactérias [49], [50], [51], [52], [53], em plantas [54], [55], [56], e até mesmo em sistemas auto-organizados e *autopoieticos* [57], [58], [59], [60], [61]. Embora legítimo pensar cognição nesses domínios, o termo pode não ter ligação com o que o conceito cognição originalmente foi criado para representar [62].

Seria possível definir linhas que separam o que é cognitivo do que não pertence ao domínio da cognição? Seria possível encontrar um conjunto de princípios nos fenômenos que classificamos como cognitivos? Podem esses princípios guiar-nos para encontrar num substrato computacional uma estrutura e/ou uma organização sobre as quais um “mínimo cognitivo” se destaque? Podemos chegar a um acordo sobre o que seria um “limiar cognitivo”?

O objetivo desse ensaio é destacar *princípios* relacionados com *operações computacionais* que guiaram o surgimento das capacidades cognitivas em organismos; propriedades estas que não observamos em entidades meramente

reagentes, nem nas inanimadas. Portanto, o conceito de *cognição* aqui será analisado tentando compreender, de um ponto de vista computacional, o que torna algo minimamente cognitivo. Tais princípios mínimos devem ser o alicerce para fenômenos cognitivos de ordem superior. Embora existam outras formas de investigar atributos cognitivos, aqui analisaremos do ponto de vista da computação, do tratamento das informações que o sistema deve realizar e que o torna diferente dos sistemas meramente responsivos.

### 1.1 Darwin e Baldwin

É amplamente conhecido que a teoria da evolução foi desenvolvida por Darwin e Wallace, apresentada em dois ensaios de 1858; e em seguida publicada por Darwin em "*The Origin of Species by Means of Natural Selection*" [63]. A ideia de que espécies eram mutáveis não era nova. O francês Jean-Baptiste de Lamarck havia publicado, em 1809, um conceito de evolução baseado na teoria dos caracteres adquiridos. Evidências, especialmente fósseis, encarregaram de dar crédito à "*Seleção Natural*" de Darwin, apagando outras hipóteses. Seleção Natural (SN) – desenvolvida no cap. IV do livro de Darwin – é o mecanismo evolutivo mais aceito pela opinião corrente da comunidade científica para explicar adaptações e especializações por parte dos seres vivos, cujas evidências podem ser observadas desde os primeiros registros fósseis.

Três fatores importantes da SN são: hereditariedade, variação e seleção. Organismos se reproduzem e descendentes herdam características de seus progenitores – isso é o fator hereditariedade. No processo, acontecem mutações, ou variações nas características. O ambiente é exigente com os indivíduos de uma população, e nem sempre o meio suporta o crescimento de todos os membros de uma espécie; assim, os indivíduos com características mais adequadas (indivíduo mais aptos) terão mais chances de sobreviver e procriar, enquanto os indivíduos menos aptos morrerão – portanto, o meio realiza uma seleção (ver [63], [64]). Ponto chave na teoria darwiniana, é que a SN age no fenótipo. Indivíduos com fenótipos favoráveis terão mais chances de sobreviver e reproduzir. Como cada indivíduo tem um genótipo associado, então os genes dos indivíduos bem sucedidos terão frequência superior nas gerações seguintes. Passado longo período de tempo, o processo pode resultar em modificações e adaptações nos indivíduos de certos "nichos ecológicos", e pode inclusive resultar no surgimento de novas espécies. Em outras palavras, o que resulta no processo da SN é a evolução das espécies; elas evoluem e se adaptam; às vezes

se modificam, podendo tornar-se outras espécies no decorrer de um longo período de tempo.

Do ponto de vista *cognitivo*, como poderia a SN ter contribuído para o surgimento de seres com capacidade cognitiva? Podemos conjecturar que a SN sozinha pode explicar bem a emergência da cognição. Porém, parece que usamos o termo "cognitivo" para algumas características e propriedades com as quais o indivíduo nasce; mas que de alguma forma ele aprimora durante seu tempo de vida. Pode haver algum outro fator que explique melhor, ou que potencialize a existência de um aparelho cognitivo em animais? A resposta parece ser uma ideia complementar à SN, proposta por J. Mark Baldwin em 1896 [65], e no mesmo ano por trabalhos similares de Morgan [66], [67]. Dada a precedência na publicação, esta abordagem ficou conhecida como "*Efeito Baldwin*", contudo este termo retrata uma denominação incorreta, Baldwin propõe na verdade um conjunto de fatores que ocorrem com o indivíduo durante o tempo de vida, que ao final afeta a evolução das espécies [68].

A pergunta que Baldwin se propôs a responder foi: "*como organismos vêm a ser modificados durante sua história de vida?*". Em resposta, ele aponta que três fatores influenciam na produção de modificações ontogênicas, adaptações e variações. A primeira é agência física e influências do meio ambiente que operam sobre o organismo, produzindo modificações na sua forma e funções. Como exemplo, agentes químicos, esforços, contatos, atrasos no crescimento, má nutrição, mudança de temperatura, etc. Ele considera que tais forças agindo sobre os organismos são fortuitas ou acidentais; e propõe chamar tais fatores "*físico-genéticos*". A segunda classe de modificações surge de atividades espontâneas do organismo no decorrer de suas funções congênitas normais. Refere-se à disponibilidade e à capacidade por parte do organismo de sobrepular-se, de sobressair-se, de estar pronto para uma ocasião assim que ela surja, e tirar proveito das circunstâncias que ocorram em sua vida. Baldwin propõe chamar tais fatores de "*neuro-genéticos*", relacionando-os ao que Morgan e outros chamavam "propriedades seletivas" do sistema nervoso, e da vida em geral.

A terceira classe de modificações é um conjunto de adaptações asseguradas pela "agência consciente", que o autor propôs ser chamada "*psico-genética*". O processo que envolve todas as mudanças nesta classe está amplamente denominado pelo termo "inteligência"; por exemplo, imitação, influências sociais, instruções maternas, lições obtidas por meio de prazer ou dor, por qualquer tipo de experiência em geral, ou ainda pelo raciocínio de meios para atingir algum fim (retirado de [65], com tradução livre).

A proposta de Baldwin é totalmente compatível com a SN de Darwin, e difere da teoria lamarckiana. Lamarck propunha que os caracteres adquiridos durante o tempo de vida do indivíduo eram passados para as gerações seguintes. Por exemplo, se certo indivíduo usasse bastante certa parte do corpo ele a fortaleceria, e isso seria passado para as gerações futuras – o que é incorreto. Não é possível que as modificações ocorridas por uso e desuso de algum membro ou parte do corpo alterem o genótipo daquele indivíduo durante o decorrer de sua vida. Assim, as teorias lamarckianas são refutadas porque as características que um indivíduo adquire durante a vida não podem ser incorporadas à sua herança genética e, portanto, não serão passadas para sua prole.

Por outro lado, o que Baldwin propõe de fato acontece. Se um indivíduo tem propensão genética (informação genética) para construir um aparelho ou membro, a má nutrição, a desidratação, a exposição a agentes químicos, e alguns danos físicos etc., podem comprometer ou favorecer a construção de tal aparelho. Esse indivíduo pode se tornar mais ou menos apto para sobreviver e procriar que os membros da mesma espécie. Assim, um *fator físico* haverá contribuído para que a carga genética de alguns indivíduos apareça com frequência superior nas gerações seguintes. Por outro lado, se uma espécie tem informação genética para criar um aparelho nervoso especializado em tratar informações, sistema este que pode ser mais facilmente modificado do que estruturas físicas mais rígidas; então, um organismo desta espécie estará mais apto a adequar seu comportamento durante seu tempo de vida. Assim, as experiências pelas quais o indivíduo passar durante um período de aprendizado e moldagem de seu comportamento se refletirão nos adultos mais ou menos aptos em um determinado meio, e da mesma forma, mais capacitados para sobreviver e procriar. Assim, um *fator neurológico* contribuirá para que o indivíduo passe sua carga genética para gerações futuras.

Além disso, traduziu-se numa enorme vantagem uma espécie ter evoluído um sistema nervoso plástico, capaz de gerenciar informações e modificar-se durante o decorrer da vida. O bom uso desse aparelho pode tornar um indivíduo mais ou menos adequado a sobreviver num meio em constante mutação. A plasticidade de tal sistema, com capacidade de imitar comportamentos de outros indivíduos, de ensino e aprendizado social ou maternal, com capacidade de inferir, de aprender por meio de dor e de prazer, proporcionou competências adaptativas até então inéditas a qualquer outro animal. Assim, um *fator psíquico* (segundo Baldwin) pode influenciar na transmissão de material genético para as futuras gerações. Diferente da proposta lamarckiana, a transmissão genética não se dá de forma direta para a prole.

Esses fatores complementam a explicação da SN darwiniana. Condicionamento, treinamento e aprendizado que indivíduos adquirem *durante o tempo de suas vidas* podem, em certas situações, acelerar a evolução de uma dada espécie. Em contrapartida, aprendizado é dispendioso, uma vez que: (i) demanda um aparelho com capacidade para tal, (ii) exige do indivíduo passar um tempo adequando tal aparelho, (iii) exige que o indivíduo passe por experiências que podem resultar em dor ou prazer, sucesso ou falha. Assim, em ambientes relativamente estáveis, há pressão seletiva para a evolução de comportamentos instintivos, mais estereotipados. Aprendizado tem benefícios, contudo também tem um preço. O efeito Baldwin se preocupa com os custos e benefícios do aprendizado durante o tempo de vida do indivíduo em uma população em evolução [68].

Quais desses fatores estariam mais diretamente relacionados com *cognição*? Seria demasiado prematuro tentar responder esta questão, ela fica pendente para uma resposta ponderada em outros argumentos, que serão explanados adiante.

## 1.2 Definições e pressupostos

O termo *princípio*, neste texto, deve ser entendido como “elemento predominante ou primário”, como os constituintes elementares; assim, princípios para cognição seriam as propriedades basais, ou ainda os elementos primordiais que levaram organismos a desenvolver um aparato cognitivo. Por outro lado, o termo *computação* é usado no texto num sentido amplo. Dada a liberdade no uso o termo poderá provocar estranheza aos teóricos da computação matemática. Computadores são máquinas que manipulam dados de acordo com um conjunto de instruções. Portanto, no senso estrito relacionado com máquinas seqüenciais (e.g. Turing), computação é uma atividade relacionada ao uso de computadores para resolver problemas algorítmicos. Em matemática e ciência da computação, computar é o ato de executar uma atividade orientada por meta que requer ou tira proveito de um computador. Ocorre que o termo tem sido usado como sinônimo para “tratamento de dados” orientados para um fim. Por exemplo, no livro “*Biophysics of Computation: Information Processing in Single Neurons*” [69], o autor inicia o livro com a frase: “*O cérebro computa! Este é um truísmo aceito pela maioria dos neurocientistas [...]*”. Fato é que *computação* tem sido usado para sistemas que recebem dados e aplicam sobre eles operações com o propósito de obter um resultado. É nesse sentido que se toma a liberdade de utilizar o termo computação neste trabalho.

Sistemas responsivos são considerados aqui como aqueles que possuem sistemas de controle não maleáveis, que não modificam suas respostas. Em geral, o propósito

de tais estruturas de controle é perseguir estados operacionalmente estáveis para o sistema que elas controlam (ver teoria do controle [70], [71]). Sistemas responsivos geralmente não criam representações internas de objetos, ações, ou dos fenômenos exteriores que os circundam. Eles operam com base em *sinais*, termo tomado aqui no sentido de veículos de informações, de um veículo potencial dos signos. Sinais são diferenciados de signos na medida em que, ao cumprirem sua função semiótica, os signos excedem as características puramente físicas do sinal (ver [72] p.80, e adicionais referências).

Assume-se neste trabalho que cognição se manifesta em sistemas complexos, razão pela qual o termo *Sistema Cognitivo* (SC) será usado daqui por diante em referência a entidades e organismos com algum nível de cognição. Portanto, assume-se também a existência de *níveis* de cognição. O termo *cognição* foi cunhado para descrever fenômenos que certamente reconhecemos em humanos, talvez reconheçamos em animais, mas que de forma alguma observamos em sistemas meramente físicos como uma nuvem, um termostato, ou uma rocha. Entenda-se que o mínimo cognitivo está em contraposição ao cognitivo pleno; por exemplo, humanos em plena capacidade de uso de suas faculdades cognitivas. Assim, é possível descrever alguns níveis de cognição entre os dois extremos da organização da matéria/energia. O que podemos reconhecer como o limiar do comportamento cognitivo? O que seria um "comportamento minimamente cognitivo"?

Existem algumas abordagens sobre "*comportamento cognitivo mínimo*" (seguindo [73]) na literatura científica, por exemplo, em [49], [51], [62], [74], [75], [76], [77]. Princípios do comportamento cognitivo mínimo também já foi assunto abordado em [51], [78], [79], [80] e certamente por outros cientistas. Embora fontes de inspiração, estas abordagens divergem da que se apresenta aqui, assim como suas conclusões; todavia, fica fora do escopo deste trabalho discuti-las mais profundamente. As premissas e argumentos apresentados nesse trabalho excluem a possibilidade de considerar cognição nesse tipo de entidade, num nível de análise tão baixo quanto o nível molecular ou de seres unicelulares, como será mostrado a seguir.

Uma *entidade* é considerada aqui como algo que pode ser/estar separada (física ou logicamente) do resto do universo. Entidade, de uma forma bastante abstrata, pode ser qualquer "coisa" com existência distinta ou que se comporte como uma unidade; como uma pedra, um software, alguns sistemas auto-organizados, artefatos criados pelo homem como robôs ou termostatos; ou ainda, por mais estranheza que a ideia provoque, pode ser um sistema vivo e um ser humano, embora seja preferido o termo *organismos* nestes casos.

Também será assumido neste trabalho que o que quer que faça uma entidade se tornar um sistema cognitivo, este “algo” estará *dentro da entidade*; considerando que uma membrana, fronteira ou interface é parte da entidade. Esta consideração tenta restringir dois problemas: primeiro, admitir que algo externo possa transformar uma entidade em um sistema cognitivo é um passo fora do caminho da investigação científica. Segundo, o pesquisador deve mudar seu ponto de vista de observador de comportamentos para um investigador de estruturas e organizações internas no SC. Portanto, assume-se a seguinte premissa: *“Existe algo dentro dos sistemas cognitivos, em suas estruturas, em sua organização, em seus modos de operação, em sua interação com o ambiente, que pode revelar os limiares do comportamento cognitivo”*. Um passo adiante é identificar quais princípios garantem a inclusão de uma entidade/organismo no conjunto dos sistemas cognitivos, e quais estruturas podem realizar tais fenômenos.

Embora seja relevante uma discussão sobre cognição em bactérias e sistemas *autopoiéticos*, esta abordagem está fora do contexto e do escopo deste ensaio. Assumimos aqui que sistemas cognitivos começaram a acontecer em organismos com neurônios, conforme defende Moreno e colegas [62], [77]. É provável que sistemas cognitivos tenham surgido somente depois da evolução dos tecidos neurais. Kirschner e Gerhart explicam que tecidos neurais criam uma *“ligação fraca” (weak linkage)* no acoplamento dos processos orgânicos: *“Metabolism, for example, is based on the strong linkage of its many components [...] The extended nervous system is based on weakly linked components”* [81]. Em outras palavras, neurônios permitem que organismos tenham sistemas exclusivamente dedicados ao tratamento de informação, desacoplados dos processos metabólicos.

A fim de justificar esta consideração assumida aqui, argumenta-se que o tratamento de sinais no nível metabólico é susceptível a ruídos e interferências. Os sinais nos níveis metabólicos usam, como meio de propagação, material da mesma natureza que compõe as células, daí o “acoplamento forte”. Para uma célula modificar a forma como faz um processamento (computacional) de um sinal ela precisa modificar processos internos que podem atuar sobre toda a cadeia estabelecida para manter seu equilíbrio operacional (sua *homeostase*). Ou seja, uma modificação para computar um estímulo externo de forma diferente pode exigir que uma bactéria, por exemplo, modifique toda sua estrutura, e pode comprometer o equilíbrio que a mantém funcional. Assim, o tecido neural surgiu no processo evolutivo para resolver tais problemas. De forma hierárquica, o tecido neural isola sinais de informação de sinais de controle que atuam no sistema metabólico [62], [77], [82]. Parece lógico este raciocínio, além de plausível com o que se observa nos organismos. Quanto mais

“evoluídos” ou “complexos” se classificam os organismos, maior o número de neurônios e mais diversos são os tipos de tecidos nervosos que eles contêm; além de apresentarem comportamentos mais diversificados.

## 2 Princípios dos sistemas minimamente cognitivos

Os *princípios* podem ser considerados como um conjunto de operações fundamentais, de linhas-guia, de elementos ou de propriedades que os sistemas cognitivos executam ou possuem a fim de aprimorar suas interações com o ambiente. Grosso modo, os *princípios* são operações que os sistemas cognitivos realizam sobre conjuntos de dados, que os tornam diferentes de sistemas de controle responsivos.

Dados são considerados aqui como um conjunto de estímulos advindo tanto do mundo externo, quanto de subsistemas internos; ou seja, tanto do aparelho sensorial quanto de subestruturas internas. Os *princípios* surgiram de um racional, da observação das relações de alguns animais com o meio e de hipóteses sobre as operações computacionais envolvidas em cada etapa; portanto, os princípios surgiram de uma abordagem analítica *bioinspirada*.

Acredito que seis princípios guiaram o surgimento da cognição mínima: *Significação, Retenção, Classificação/codificação, Antecipação, Seleção, e Corporificação*. Eles serão descritos no decorrer deste tópico.

### 2.1 Significação

É tão complexo encontrar uma definição para o conceito de *informação* quanto para cognição. O termo “informação” é usado em muitos contextos, denotando um amplo espectro de significados. Como resultado, o termo acaba perdendo a capacidade de significar aquilo que ele intenta representar. Às vezes informação é tratada como uma “coisa física”, como na Teoria da Comunicação [83]. Outras vezes uma abordagem semântica é dada à informação ligando-a a conhecimento, como em [84]. Há ainda a abordagem puramente matemática na qual informação é um caso particular da teoria da probabilidade [85]. Na década de 1970 era comum uma abordagem que tratava informação como “*padrões de organização da matéria e energia*” (revisões em [85], [86], [87]).

Adicionalmente às estas abordagens, existe um arcabouço conceitual, comum em áreas como administração, economia, matemática e outras ciências, que trabalha a seguinte hierarquia: “dados” (*data*) denotam apenas a quantificação de algo. Dados

podem ser estruturados e se tornar "informação" (*information*), algo com potencial para representar qualquer coisa, que adquire um significado para alguém. Subseqüentemente, informação pode se tornar "conhecimento" (*knowledge*) quando apropriadamente interpretada e contextualizada. Variações dessa hierarquia incluem "sabedoria" (*wisdom*) nesta cadeia, conhecida como D-I-K-W (uma sigla para *data*, *information*, *knowledge*, e *wisdom*; ver revisão em [86], [88], [89]). Embora a abordagem adotada aqui esteja vagamente relacionada com parte da cadeia (apenas D-I-K), este modelo não será adotado neste trabalho, o mesmo ocorrendo com o termo *informação*.

Sistemas cognitivos emergiram dentro de organismos vivos durante o processo evolutivo. Podemos inferir que, primeiramente, organismos trocaram dados brutos com o meio ambiente na forma de fluxo de matéria (advinda de e por meio dos canais de proteínas) e energia (por meio de transdutores). Nos primeiros estágios do desenvolvimento da vida os organismos não possuíam sistemas especialistas no tratamento de dados. Podemos inferir que eles necessitassem e possuíssem vários laços (*loops*) de controle para manterem-se num estado operacionalmente estável (chamado *homeostase*). Ainda hoje é possível observarmos todos esses processos em organismos mais "simples", como as bactérias. Portanto, é possível pensar nestes sistemas vivos primitivos como complexos sistemas de controles (ver abordagem de *controle* nas ciências biológicas em [90]). Passo a passo as criaturas vivas evoluíram ao ponto de terem *representação interna* do mundo que as circunda. A capacidade de lidar com representações é um grande passo além do mero controle. Isso não significa um passo fora do domínio do *controle*; pelo contrário, isso é um passo evolutivo para os sistemas de controle. No domínio da representação conjuntos de dados internos podem significar algo que não seja meramente um conjunto de sinais. Uma representação é um conjunto particular de dados causalmente relacionado com objetos e ações que estão ocorrendo fora (ou mesmo dentro) da entidade/organismo. Como os organismos alcançaram tal status?

Organismos evoluíram sua maquinaria de detecção de padrões nas entradas de dados por meio do incremento do número, do tipo, da natureza dos canais em suas membranas (ou órgãos, como a pele, que servem de fronteiras entre organismos e o meio). Além do mais, organismos espalharam sensores por todo o corpo, criando regiões especializadas em receber certos tipos de estímulos. Observando do ponto de vista interno da entidade, uma grande quantidade de sensores localizados estrategicamente resultou em um conjunto de dados brutos constantemente fluindo, advindos de regiões específicas de seus corpos. Progressivamente, estes fluxos de dados foram tratados por camadas neurais mais e mais complexas, culminando em

uma maquinaria sensorial. Pelo uso desta estratégia, organismos se tornaram hábeis em detectar padrões nos dados brutos; mais ainda, tornaram-se capazes de realizar conexão entre padrões de naturezas diferentes (ver [91], [92]).

O uso do termo *informação* seria aceitável para nos referirmos a um padrão detectado em um fluxo de dados brutos; porém, parece mais apropriado o uso do termo "*signo*". Os signos são estudados em Semiótica, e signos como mediadores de representações entre coisas e mentes são objetos de estudos desde a Grécia antiga. A semiótica tem duas vertentes principais, a saussuriana (que estuda signos no ambiente da linguagem) e a peirciana, que entende o signo como um mediador mais amplo – portanto, mais apropriado ao presente estudo. Contudo, em Semiótica peirciana, um signo é uma abstração criada para explicar a relação entre um objeto, seu interpretante (não confundir com o intérprete) e uma mente que os interpreta [93]. Neste trabalho, o termo *signo* será usado para algo que acontece fisicamente num substrato, resultado de uma operação dentro de uma estrutura neural. Assim, semioticistas podem não concordar plenamente com a forma como signos serão abordados neste trabalho; porém, o conceito de signo continuará tendo ligação com sua base em semiótica.

No final do século XIX e início do XX Charles Peirce tentou descobrir como as coisas eram representadas nas mentes. Ele escreveu várias tentativas concisas de definição formal de signo [93], [94]. Naquele tempo, estudos sobre representação dos signos em neurobiologia eram ainda inimagináveis; isso porque Camillo Golgi e Santiago Ramón y Cajal estavam ainda tentando descrever as recém descobertas células nervosas e suas conexões sinápticas [95], [96]. Peirce pensou o signo como uma abstração, e uma de suas melhores definições reproduz-se abaixo, tirada de [97]: "*A sign, according to Peirce, is a material or merely mental phenomenon, related to a previous phenomenon, the object of the sign, and resulting in a further sign, the interpretant, which provides an interpretation of the first sign in relation to its object*". De acordo com a Semiótica peirciana, o conceito de signo descreve uma relação triádica. A fim de facilitar a compreensão, o conceito será explicado por meio de objetos reais percebidos pelo aparelho perceptivo visual.

Considere um objeto fora de uma entidade, digamos uma flor. A luz é refletida pela flor em todas as direções, e uma porção pode atingir a região fotossensorial da entidade (sua retina). Porém, a retina recebe indiscriminadamente estímulos luminosos advindos de todos os objetos para a qual ela está direcionada. A entidade precisa separar os estímulos vindos de um objeto em particular dos outros estímulos em geral. Para conseguir isto, durante todo o tempo, os olhos devem manter-se em movimento para ter a intensidade de luz (um fluxo de dados em um receptor em

particular) se modificando, de um transdutor para outro, no mapa sensorial da retina [35]. Humanos, e mamíferos em geral, realizam pequenos movimentos nos olhos (*micro-saccades*) associados a movimentos sacádicos maiores (*saccades*), relativos à fóvea [98]. Em insetos (e.g. moscas, besouros, abelhas) os olhos são fisicamente parte da cabeça, assim, eles precisam mover seus corpos em relação ao objeto focado para conseguir o mesmo efeito (ver [25], [26]); contudo, há outras soluções na natureza, como nos casos do camarão *Odontodactylus* e do louva-a-deus *Sphodromantis lineola*, que fazem varredura (*scan*) de imagens (ver cap. IX em [35]: *Movements of the eyes*).

Quando os organismos provocam o deslocamento da luz sobre o mapa sensorial (sobre a retina), olhando o conjunto de receptores como um todo, neurônios podem começar a disparar enquanto outros podem se tornar quiescentes. Quando ocorre o movimento dos olhos e um grupo de neurônios dispara continuamente, eles são chamados invariantes. Os movimentos provocam variação da intensidade de luz sobre a retina, conseqüentemente, neurônios invariantes formam um padrão de disparo que acompanha este movimento. Em outras palavras, um grupo de neurônios invariantes permanece disparando devido ao fato do estímulo vir da mesma fonte de luz, do mesmo objeto. O movimento dos olhos é necessário para permitir que o aparelho perceptivo separe diferentes grupos de neurônios disparando de forma invariante (em conjunto e temporalmente atados – *time-locked*). Ou seja, para separar diferentes objetos, os olhos são movidos para que a luz estimule diferentes áreas na retina.

O resultado interno de um grupo de neurônios disparando em conjunto pode resultar numa assembleia de neurônios, a qual pode ser detectada por estruturas neurais em camadas de níveis mais altos. Isto significa que neurônios nestas estruturas neurais superiores podem identificar padrões de estruturas inferiores e tratar tais “amostras” como fenômenos singulares. Extrair é usado aqui no sentido de “detectar”, de perceber um padrão de forma emergente. O resultado dessa detecção de padrões é considerado aqui como a primeira parte do signo – *a representação*. Toda vez que uma assembleia neural dispara devido ao conjunto de estímulos (e.g. a luz vinda da flor), considera-se aqui que esta assembleia ativa representa o objeto causador do estímulo. Esta é a parte do “*objeto imediato*” do signo, na semiótica peirciana (ver revisão em [72], [99]). Note-se que, neste caso, a formação da assembleia é uma situação ativada por evento (*event-driven*), e isso é importante para implementação de assembleias de redes neurais pulsantes.

Suponha agora que o objeto seja removido do campo visual. Seria desejável que atributos gerais desse objeto fossem retidos. Nem tudo, porque objetos possuem muitos detalhes irrelevantes. No entanto, é importante que depois de passar pela

experiência de identificar padrões presentes no grupo de estímulos o organismo (ou entidade) retenha atributos como uma forma de representação do objeto. Dessa forma, quando um padrão similar surgir, o organismo (ou entidade) será capaz de reconhecer outro objeto por meio da similaridade de suas representações.

Além disso, na ausência dos estímulos externos, o organismo (ou entidade) deve ser capaz de reativar, ao menos em parte, o padrão de disparo original; ou seja, ele/ela deve ser capaz de internamente reconstituir aspectos do padrão de disparo original. Em termos semióticos, esta é a parte do "*interpretante*" do signo, ou a parte do "*objeto dinâmico*" do signo [93], [94], [99]. Internamente, ao reativar uma assembleia neural, o padrão de disparo relativo a um signo, ou parte relevante dele, é reapresentado à rede de neurônios. Dessa forma, quando um objeto está ausente, mecanismos internos podem ativar assembleias neurais, fazendo com que aquele padrão de disparo "represente" o objeto original. Neste caso, o signo (o padrão de disparo, ou a assembleia neural) é ativado internamente, digamos, durante um pensamento ou na construção de um plano.

Pelo exemplo acima, e nos termos apresentados, detecção de padrões e operações com signos parecem ser complicadas, uma competência realizada apenas por organismos cognitivos superiores; mas na realidade não são. Insetos são capazes de reconhecer flores, predadores e outros objetos; embora reconhecimentos de padrões visuais sejam realmente complexos [100].

Devemos lembrar que, nos organismos, conjuntos de dados podem ser gerados internamente, ou podem advir do exterior por meio de fluxo de matéria e energia, ambos convertidos por sensores e transdutores em sinais eletroquímicos. Como foi descrito anteriormente, seguindo [72], distinções devem ser feitas entre *sinais* e *signos*: dentro de uma rede neural, sinais elétricos (potenciais de ação dos neurônios) são veículos potenciais dos signos, são as formas pelas quais os dados existem, pois nos potenciais de ação são veiculadas as mensagens advindas do exterior ou do interior do organismo. Sinais concomitantes (vários disparos paralelos e temporalmente atados) podem significar grande probabilidade de advirem da mesma fonte, do mesmo objeto (em termos semióticos, do *objeto do signo*). Um signo, por sua vez, é "algo" que não está num sinal isolado, algo que excede as características puramente físicas do sinal ao exercer sua função semiótica.

Um signo, aqui, é uma operação computacional de detecção de padrões nos dados veiculados nos potenciais de ação, o que resulta numa "*informação*", algo que emerge de um grupo de sinais. Em ciência da computação, redes neurais, e neurociências, os termos "*pattern detection*" e "*pattern recognition*" são comuns para definir esta operação computacional (e.g. [101]). Há controvérsias sobre o que é

signo, e sobre a questão da referência do signo em relação ao mundo para além dele (ver [72]); mas fica fora do escopo deste ensaio aprofundar neste assunto. Dessa forma, para este trabalho, um signo é uma *construção interna*, uma operação computacional realizada sobre um grupo de dados. Nos organismos pode ser uma operação simples realizada sobre pequenos grupos de sensores que detectam certo evento; ou pode ser uma operação sofisticada; aplicada sobre um fluxo contínuo de disparos neurais assíncronos e defasados, advindos concomitantemente de milhares de neurônios sensores ou transdutores de energia. Além disso, signos também podem ser resultados de operação interna, da reativação de padrões de sinais neurais que remontam àqueles pelos quais o organismo passou quando experimentou certos estímulos.

É possível notar que a abordagem adotada aqui é semelhante à hierarquia D-I-K (*data-information-knowledge*), uma vez que *dado* pode ser entendido como o conjunto de disparo dos neurônios, digamos causados pela quantidade de luz atingindo um grupo de sensores ou transdutores. Tais dados existem internamente na forma de *sinais* elétricos pulsantes (*spikes*), que funcionam como veículo para os signos. Operações sobre este fluxo contínuo e paralelo de dados podem resultar internamente na detecção de padrões que constituem *informação*. Neste sentido, informação é sinônimo de signo e representação. Um conjunto de *spikes* traz informações que não estão nos sinais elétricos isolados. Por último, conhecimento pode ser alcançado por meio da retenção e operações computacionais sobre signos, em níveis estruturais e organizacionais mais altos.

Em resumo, o princípio da *significação* está relacionado à capacidade de detectar padrões invariantes a partir de aflusos de dados, da retenção dos resultados dessa detecção como representações do objeto ou do evento que os causou, e da capacidade interna de reativar tais padrões de dados (*interpretantes*, em termos semióticos); sendo todas estas operações realizadas dentro de, ou por meio de, um substrato neural.

## 2.2 Retenção

A fim de detectar ou identificar padrões invariantes de um fluxo de entrada contínuo de dados, um sistema deve *reter* algum montante de dados por um tempo maior que zero, e então, de alguma forma, comparar ou executar alguma operação computacional entre os dados do passado e os correntes. Isto pode ocorrer em intervalos de tempo de frações de segundo, chamado "memória perceptiva implícita" ou *priming* ([102], [103]). Uma vez que um signo é detectado, o princípio da retenção

é também usado para manter a representação em estruturas como “memória de trabalho” (*working memory*) ou memória de longa duração (*long-term memory*) [103], [104].

Retenção de dados é uma necessidade, caso contrário, seria inútil ter um aparelho que detectasse padrões (ou signos) e os deixassem desaparecer tão logo fossem detectados. Mais ainda, em escalas de tempos intermediárias, este atributo é útil para que o organismo (ou entidade) armazene cadeias de signos que podem representar fatos, ações, eventos, e ocorrências da vida desse organismo; todos importantes para ajudar na tomada de decisão. O princípio da retenção é ainda importante para que a entidade crie e execute tarefas baseadas em metas e planos. Consideremos planos como uma sequência de ações. Assim, planos devem ser “esboçados” em algum tipo de estrutura que os retenha até que sejam executados ou descartados. Sua execução deve ser acompanhada, geralmente passo a passo; portanto, planos e metas exigem um sistema de memória que retenha não só o plano em si, mas também em qual etapa se encontra o processo de execução.

*Retenção* também aparece em qualquer atividade de aprendizado, de treinamento, de fixação e definição de comportamento estereotipado. Este princípio é fundamental para que o fator “*neuro-genético*” de Baldwin se estabeleça na evolução do indivíduo [65]. Durante este processo os organismos mudam suas estruturas internas a fim de agregar novas respostas estereotipadas em seus repertórios. Tais mudanças poderão ser mais ou menos permanentes na estrutura física. Processos de aprendizagem são responsáveis pela aquisição de novas habilidades, de novos padrões de respostas durante o tempo de vida daquela entidade; ou são responsáveis por aprimorar os já existentes.

### 2.3 Classificação ou codificação

Qualquer sistema cognitivo capaz de perceber e obter signos deve encarar um problema inerente a esta capacidade: o mundo é cheio de fenômenos físicos de diversas naturezas, e uma grande quantidade de dados atinge os sistemas sensoriais do organismo durante todo o tempo. Como descrito acima, aparelhos sensoriais detectam padrões, juntam aspectos componentes advindos da mesma fonte, e os memorizam. Todavia, o sistema de retenção não possui capacidade infinita e alguns signos são presumivelmente mais importantes do que outros em certos contextos.

Além disso, a fim de serem úteis, os signos que ingressam num instante qualquer devem ser combinados com aqueles memorizados. É possível que a complexidade das

operações com signos cresça exponencialmente. Mais ainda, signos são continuamente obtidos a partir de fontes de natureza diferentes, por exemplo, estímulos químicos, luz, estímulos mecânicos, além de outros. O aparelho cognitivo deve codificar signos relacionados advindos de fontes diferentes, e apontá-los todos para uma mesma estrutura de representação interna. Por exemplo, no sistema cognitivo humano, o padrão obtido do som da palavra "flor" provavelmente aponta para um "lugar comum" numa estrutura de memória (ou para uma assembleia de neurônios comum) que responda também ao padrão gerado pela visualização de uma flor, ou pelo padrão advindo do cheiro característico de certa flor. Portanto, parece razoável acreditar que algum tipo de classificação e/ou codificação está implícito ao fato de identificar cada signo; ou seja, é inerente de cada signo.

Parece plausível supor que quando signos são detectados eles são intrinsecamente classificados, codificados e organizados para preencher um aparelho estruturalmente existente (a rede neural para a qual eles têm algum significado). Neste sentido quando signos são detectados, selecionados por meio de mecanismos de *atenção*, e classificados, eles são também restringidos, enquadrados em um código; eles são organizados de acordo com uma estrutura existente. Esta é a razão pela qual *classificação* e *codificação* são ambas consideradas sobre o mesmo *princípio* aqui. Portanto, ao selecionarem, classificarem, codificarem e organizarem os signos, os sistemas cognitivos criam uma forma robusta de representar parcialmente o mundo.

## 2.4 Antecipação

Considere um sistema capaz de detectar ou extrair padrões invariantes, de retê-los e de classificá-los/codificá-los – o que foi exposto até este ponto pela introdução dos princípios anteriores. Então, considere este sistema recebendo estímulos (signos) que informam que um objeto está indo na direção de outro. Assim, considere o sistema retendo amostras de signos (como instantâneos) enquanto a ação se desenrola. Pela análise da sequência de signos o sistema deveria prever, ou ser capaz de detectar uma lei: o objeto "**A**" irá se chocar com o objeto "**B**". Computacionalmente falando, é mais econômico e eficiente identificar leis que descrevam ações do que armazenar grandes quantidades de dados descrevendo detalhes. O termo "*instantâneo*" não quer dizer imagens internas, mas assembleias de neurônios disparando e retendo os estados formados por algum tempo, representando assim tempos discretos na ocorrência dos signos (objetos "**A**" e "**B**" codificados).

Como um sistema cognitivo pode concluir que “A” e “B” irão colidir antes que isso aconteça no mundo real? Parece razoável formular a hipótese de que os sistemas cognitivos “encadeiam signos” numa velocidade maior que os eventos acontecendo no mundo real. Assim, ações e relações podem ser previstas internamente, por meio de rápidas operações sobre cadeias de signos (existentes como sinais elétricos). O princípio da *antecipação* descreve esta operação.

Ao considerar esta hipótese, assume-se que sistemas cognitivos possuem a capacidade de conectar signos (ou *interpretantes*) de forma que mantenham suas relações causais, a tal ponto que o aparelho cognitivo possa obter representações complexas de contextos, objetos, ações e eventos acontecendo ao seu redor. Em termos de operações neurais, a forma como isso acontece permanece desconhecida, tratando-se de um importante assunto para pesquisas. Tenho defendido uma abordagem de computação por meio de assembleias neurais que pode explicar como esse processo acontece em redes de neurônios artificiais e naturais [105], [106], [107].

Quaisquer que sejam as formas como as conexões entre signos sejam feitas, é possível inferir que se trata de uma operação que se ramifica; e a quantidade de opções que se abre para cada evento que se apresenta a um cérebro num certo instante pode ser exponencial. Some-se a isso o fato de o processo ser contínuo, ininterrupto. Assim, uma alegoria que cria uma imagem de como tal processo pode se parecer é o de uma cachoeira; e o fluxo constante de signos entrando nessa cascata parece ser uma torrente de impulsos elétricos. Torrentes de signos podem rapidamente simular possibilidades e apresentar opções para um sistema de seleção. Dessa forma, computacionalmente falando, a “consequência” da operação com torrentes de signos é uma antecipação; ou seja, podemos dizer que o propósito das torrentes de signos é antecipar eventos, fatos, relações etc. É plausível levantar a hipótese de que uma torrente de signos sejam as principais operações pelas quais cérebros (ou sistemas cognitivos) obtêm leis, antecipações, resultados, consequências, opções, entre outras operações. Seria possível chamar a torrente de signos uma espécie tosca de “*pensamento*”? Parece ser exatamente o que acontece. Pode ser que pensamento seja o resultado de um contínuo *fluxo de signos*, que nos cérebros seriam cadeias de assembleias neurais. Contudo, parece adequado reservar o termo *pensamento* apenas para operações cognitivas de alto nível. Dessa forma, este mecanismo computacional deveria ser chamado “*torrente de signos*”.

Em suma, *antecipação* pode ser uma característica distintiva dos sistemas cognitivos; e é resultado direto de operações computacionais na forma de encadeamento de signos. Depois de obter signos, e de codificá-los em sinais

eletroquímicos muito mais rápidos que certos eventos no mundo exterior, sistemas cognitivos podem criar torrentes de signos relacionados de forma causal. Como as torrentes podem antecipar estados de mundo, isso se torna uma enorme vantagem para o organismo. Antecipações podem representar opções e chances para um subsistema de tomada de decisões.

## 2.5 Seleção

O princípio da *seleção* também está intimamente ligado à forma de computação de torrentes de signos. Haverá casos em que uma decisão não será necessária porque o sistema de veto bloqueia outras opções durante o próprio fluxo dos signos; assim, não há opções a selecionar. Contudo, optou-se por separar *seleção* como um princípio à parte em virtude de não existir seleção apenas no processo de decisão; pelo contrário, o princípio da seleção se aplica tanto à entrada dos estímulos quanto aos processos de saída e respostas do sistema.

Quando organismos aplicam seleção aos estímulos de entrada, diz-se que algum mecanismo de "*atenção*" está em uso; por exemplo, por escolher observar um objeto em vez de outros, ou mesmo destacando-o do plano de fundo. O mesmo acontece quando algum processo interno é preferido, por exemplo, quando se tem um pensamento específico em vez de outros. Atenção é um mecanismo presente quando se obtém e classifica signos, quando se cria planos ou metas, e quando a entidade foca na antecipação de algum evento particular. A outra aplicação para o princípio da seleção está relacionada à escolha e execução de respostas ao meio, à geração de saídas. Esta está diretamente relacionada com mecanismos de tomada de decisão, algo parecido com a ideia de "*action selection*" proposta em [108], [109]. Muitas vezes, *atenção* depende da execução de respostas físicas para direcionar o corpo, os olhos, etc. Assim, ambos os mecanismos – *atenção* e *decisão* – estão sobre o mesmo princípio da *seleção* porque, ao final, eles formam um laço (*loop*) relacionado com selecionar algo em detrimento de muitas outras opções.

Desde a Grécia antiga os pensadores tentam explicar como tomamos decisões. Por um longo tempo este assunto foi tratado como pertencendo ao domínio da correta avaliação e julgamento preciso. Decisões foram estudadas como um subconjunto da racionalidade (concisa revisão em [110]). Na abordagem epistemológica, decisão foi relacionada ao conceito de Verdade, o qual propeliu o surgimento da disciplina da lógica formal. A lógica formal (a ciência do raciocínio) é uma capacidade humana que advém como consequência de pensamentos elaborados, criados por meio de linguagem. Não é provável que animais realizem raciocínios lógicos, pelo menos no

sentido que a Filosofia, a ciência da computação e a matemática os utilizam. Animais certamente são capazes de tomadas de decisões (revisão em [111]). Todavia, humanos e animais não nascem “entidades lógicas”. Na verdade, “afetos” (humor, emoções, etc.) alteram consideravelmente a racionalidade e as decisões (ver [112], [113]). Entidades minimamente cognitivas lidam com tomada de decisão em muito baixo nível, bem mais simples que a mais simples das construções lógicas. Mais simples até que as respostas afetivas e emocionais (positivas ou negativas), que são mecanismos que emergiram a partir do surgimento dos mamíferos (ver [114], [115], [116]).

Qual seria a mais simples forma de tomada de decisão? Com o intuito de esclarecer quando provavelmente o problema de tomada de decisão foi introduzido em organismos, uma pequena digressão se faz necessária. Voltemos ao período cambriano, que começou há aproximadamente 542 milhões de anos (*mya*). Paleontologistas encontraram fósseis de caminhos e rastros de animais (*trace fossils*) em rochas a partir do período Ediacaran (580-542 *mya*) ou até mesmo antes (~ 660 *mya*) [117], [118], [119]; apesar de que os traços fósseis do início do período cambriano sejam os mais relevantes para este texto. Durante o início da “explosão cambriana” os traços fósseis aumentaram de variedade, complexidade, e diversidade. Nesta era surgiram vários *phyla* metazoários [120], [121], [122]. Os fósseis de rastros e caminhos revelam quando os animais começaram a se mover, cavar e a se enterrarem. Devido ao tamanho e à complexidade de seus corpos, os fósseis cambrianos revelam algo que não pode ser feito por locomoção puramente ciliar. Portanto, os fósseis indicam o surgimento de músculos e controle neuromuscular [117], [119]. Além disso, na mesma época olhos e sistemas de visão foram desenvolvidos e aprimorados [35], [92], [123], [124], coincidentemente com o surgimento da *predação* carnívora. Esta conjunção de habilidades pode ter levado ao estilo de vida da predação guiada pela visão (*predação visual*) [123], [125], [126].

É possível inferir que organismos, imersos em ambientes onde a predação visual era constante, foram forçadas a encarar um problema de tomada de decisão: “*a estimativa do risco da predação contra oportunidades para adquirir energia ou acasalar*” (daqui para frente ERPxAEA).

Alguém pode arguir que predação existe no mundo procariótico. A literatura científica é cheia de exemplos considerando relações procarióticas de predador-presa (e.g. [127], [128], [129], [130]). Esta é outra armadilha linguística na qual “*predação*”, o conceito e o termo, podem levar a confusões. Num sentido amplo, qualquer interação entre organismos que se alimentam de outros organismos pode ser chamada predação. Neste trabalho, faz-se uma distinção: predação é usada para

denotar apenas o estilo “predação guiada por sentidos de distância” – que descreve um estilo de predação na qual o predador está distante da presa, guiado por representações de mundo. Estímulos vindos de longe do limite de seus corpos permitem ao predador identificar presas. Assim, o predador tem que se mover no sentido da presa seguindo um propósito, guiado por sentidos de distância, executando um plano ou perseguindo uma meta. É quase certo que este estilo de predação entrou em cena no período cambriano, e deve ter sido importante para a emergência dos princípios aqui descritos; ou vice-versa, os princípios podem ter guiado os animais para este estilo de predação.

Por que apenas os animais com capacidade de se guiarem por sentidos à distância? Tomemos por exemplo os organismos unicelulares. Os procariontes não possuem sistemas especializados para tratar com representações. Ao contrário, seus sistemas de entrada traduzem fenômenos externos para dados internos que geralmente são sinais químicos. Isto significa que os procariontes (e.g. bactéria, arqueia, cianobactérias), e muitos eucariontes (e.g. amebas, tripanossomos) operam no domínio dos sinais (domínio do controle – ainda que complexo); enquanto que animais mais desenvolvidos podem operar no domínio dos signos (das representações).

A partir dos períodos Ediacaran e Cambriano, talvez antes, animais desenvolveram tecidos neurais [91], [108], [131], [132]. Cnidários (celenterados - hidras, águas vivas, medusas etc.), atualmente os organismos mais simples a possuir sistemas nervosos, são os animais mais simples nos quais os movimentos são governados por um sistema neuromuscular, e também os mais simples a apresentar um comportamento alimentar ativo. Pelo conhecimento presente, não é possível dizer se cnidários possuem algum tipo de sistema neural que realiza o “*action selection*” de Prescott; dessa forma, eles não são candidatos a terem um sistema de tomada de decisão – é possível que tenham um circuito neural reativo. É plausível inferir que alguns animais, com sistemas nervosos mais complexos, transpuseram o problema ERPxAEA para circuitos neurais, uma vez que este é um dilema onipresente durante todo o tempo de vida de um animal. No passado, algum animal transpôs para os processos neurais (mais flexíveis – *weakly linked*, segundo [81]) o que poderia ser difícil implantar em suas intrincadas redes de controle metabólico.

O problema ERPxAEA pode existir em animais unicelulares? Suponha que moléculas exaladas por ambos, um predador e uma fonte de alimento, atinjam uma membrana de uma bactéria. Tais moléculas causam sinais internos na bactéria, mas o que eles revelam? Eles podem apenas revelar que a membrana foi atingida por tais moléculas. A presença das moléculas revela nada sobre “o que” as emitiu ou “onde”

está sua fonte. A incerteza sobre tais sinais é enorme. A combinação de sinais advindos de muitos canais paralelos de entrada pode resultar milhares de respostas diferentes na bactéria, mas elas ainda assim respondem depois de serem estimuladas; elas não possuem a capacidade de avaliar risco algum. Milhares de sinais atingindo uma bactéria não podem ser evitados antecipadamente, ou perseguidos como uma meta; isso porque as bactérias não possuem aparelhos adequados para obter dados e informações além das fronteiras imediatas de seus corpos. Os sinais internos de uma bactéria podem “disparar” ou “bloquear” e extinguir processos de respostas, mas elas estão longe de computar, antecipar ou decidir por qualquer ação.

Todavia, na medida em que organismos se tornaram capazes de identificar padrões a partir de dados de entrada (visão, audição, cheiro etc.), os signos puderam representar objetos externos (fonte de comida, predador, parceiro sexual etc.) e suas relações e propriedades (distância, tamanho, velocidade, etc.). Além desses, signos internos (fome, sede, impulso sexual etc.) podem impelir o organismo a uma situação que requeira tomar uma decisão. Dessa forma, vários signos devem ser postos juntos em uma torrente e serem processados a fim de compor o contexto. Portanto, por ter detectado, classificado e encadeado signos e suas relações causais, e por obter antecipações virtuais de eventos neste domínio dos signos, é possível para um organismo computar suas chances. Neste caso, é possível argumentar que animais estão realizando *a estimativa do risco da predação contra oportunidades para suprir suas necessidades*. Parece aceitável acreditar que os circuitos neurais para executar esta computação são tão velhos quanto os da visão, quanto a explosão cambriana e quanto o estilo de vida da predação guiada por sistema sensorial a distância.

Em resumo, é plausível acreditar que sistemas de tomada de decisão existam em animais “simples”. Decisão, dentro do princípio da *seleção*, não deve ser entendida como resultado de inferências ou raciocínio lógico. Ao contrário, deve ser visto como o resultado de um conjunto de operações computacionais paralelas, que anteciparam possíveis estados de mundo, e culminaram no disparo de uma resposta estereotípica. Exatamente por simularem, anteciparem ou calcularem riscos é que os organismos puderam incrementar seus processos de tomadas de decisão, selecionando a melhor forma de utilizar seus sistemas efetores; ou selecionando o melhor repertório de respostas corporificadas. A melhor forma de não precisarem sempre passar pelo mesmo processo de simulação e tomada de decisão cada vez que um problema repetitivo se apresenta, foi justamente incorporar as melhores respostas em seus corpos; assunto do próximo tópico.

## 2.6 Corporificação

O princípio *corporificação* pode ser visto mais como uma predisposição do que uma operação computacional. Considerando uma escala de tempo muito longa, organismos tendem a incorporar estruturas e processos recorrentes dentro de suas estruturas organizacionais. Nesses casos, os mecanismos envolvidos seriam os da seleção natural de Darwin. Considerando o tempo de vida dos organismos, em grande parte das espécies, especialmente mamíferos, indivíduos nascem com vários sistemas imaturos, mas com capacidade para treiná-los e adequá-los às respostas exigidas pelo meio; mecanismos descritos por Baldwin. Em ambos os casos, boa parte dos ajustes e calibrações de operações estereotípicas são corporificadas – tornam-se componentes de um repertório. Após aprendizado ou calibração, por meio de treino e experiência, tais “rotinas” ou operações passam a ser executadas autonomamente, da mesma forma que estruturas inatas e plenamente adaptadas.

Tais componentes corporificados podem ser tanto para operações de entradas quanto para saídas. Assim, organismos tendem a corporificar alguns subsistemas como parte permanente de seus corpos, algo parecido com máquinas de estados finitos (FSM, *finite state machine*) que serão utilizados durante sua existência. Vale lembrar que a porção ou o conteúdo “calibrado” das estruturas corporificadas não são transmitidas para a prole. Contudo, indivíduos que nascem com estruturas que permitem calibração podem ter vantagens que os ajudam a sobreviver e procriar; assim, este traço genético (nascer com tal estrutura) será passado para futuras gerações.

Em vários animais, agrupamentos de neurônios formam centrais de geração de padrões de disparos (CPG - *Central Pattern Generators*) que agem como FSM para produzir a maioria dos comandos motores para músculos que executam atividades rítmicas, como o batimento cardíaco, respiração, locomoção, etc. [133], [134], [135], [136], [137]. Em adição a estes, organismos desenvolveram estruturas de redes neurais capazes de detectar padrões a partir dos sistemas sensoriais, como o sistema auditivo, os olhos/retina associados ao córtex visual [92], [95], [96] ou sistema visual similar em outros animais [46], [92], [138]; além de outros sistemas de identificação de padrões.

Assim sendo, uma vez que um organismo tenha um aparelho capaz de tratar dados de entrada, este organismo tem corporificado a estrutura para lidar com tais conjuntos de dados – o que não quer dizer que o indivíduo nasça com a estrutura pronta ou que saiba organizar os dados recebidos. Assim, subsistemas para obter sinais, para retenção, recuperação e para encadear sinais, estão todos corporificados

– apesar de nem sempre estarem calibrados. Eles foram construídos, passo a passo, à medida que os organismos evoluíram no lento processo de seleção natural. Da mesma forma, a maioria das respostas e sequências de saídas (*respostas comportamentais*) também está corporificada. Respostas estão corporificadas tanto dentro das estruturas físicas formadas por ossos e músculos (que permite o indivíduo andar, saltar, correr, etc.; ou seja, realizar a atuação física) quanto em agrupamentos de neurônios e CPGs que geram os padrões de disparo para ativar os músculos; ou ainda dentro de córtex cerebrais e estruturas auxiliares, que refinam movimentos.

Organismos mais “simples”, como os cnidários (e.g. medusas, águas-vivas), geram seus movimentos de nado pela sincronização da rede neural em torno da cavidade de entrada, o “anel do sino”, e pela ativação da estrutura corporificada de seus músculos [139, 140]. Conforme apontado por Menzel e Giurfa (2001), em abelhas uma grande variedade de módulos de processamento de domínio específico são responsáveis por saídas estereotipadas. Em peixes e lampreias, CPGs na *notocorda* geram padrões de disparos que, aplicados à estrutura muscular suportada por ossos e/ou cartilagem, resultam em movimentos na forma de ondas da cabeça à ponta do rabo, o que impulsiona seus nados [141], [142]. Répteis incorporaram a este padrão sinusoidal, novos CPGs que geram padrões sincronizados para movimentação das pernas, resultando no movimento arquetípico das salamandras e outros répteis (ver [137], [143] para abordagem *biomimética* de robôs salamandras comandados por CPGs e redes neurais artificiais).

Neste sentido, aquilo que chamamos de resposta “instintiva” na realidade parece ser uma questão de disparar certas saídas (ou sequências de saídas) corporificadas na estrutura de um organismo. Assim, atuar por instinto parece ser uma questão de disparar certos CPGs a fim de gerar sequências de respostas estereotipadas.

Uma das metas dos sistemas cognitivos é aprender, ou incorporar habilidades. Uma característica básica dos sistemas cognitivos é registrar (permanente ou temporariamente) em sua estrutura e organização novas respostas estereotipadas, adquiridas durante o período de suas vidas. Na maioria das vezes, “aprender” significa transferir para estruturas (mais ou menos) permanentes sequências de respostas adequadas a certos contextos. Portanto, as respostas instintivas (inatas) e as respostas adquiridas (aprendidas) são ambas corporificadas, e em diferentes graus, associadas a algum tipo de estrutura informacional.

A fim de ativar e coordenar tais respostas corporificadas, sequências de padrões de disparos (comandos) são gerados, geralmente por camadas neurais superiores. O propósito das camadas superiores de neurônios é disparar CPGs e estruturas neurais corporificadas de mais baixo nível (ver [144]). CPGs são entendidos como circuitos

fixos (*hardwired*) que geram padrões de atividade neural estereotípica, embora esta visão esteja se modificando. Yuste e colaboradores [145], por exemplo, sugerem que circuitos no neocórtex evoluíram a partir de circuitos rítmicos motores e de CPGs, originalmente presentes na espinha e tronco cerebral. Essa é uma visão revolucionária que faz muito sentido quando pensamos no processamento por assembleias neurais. Há certo consenso acadêmico que neurônios formem assembleias ou coalizões para executar funções cognitivas, embora os mecanismos estejam ainda sobre investigação [105], [146].

Em resumo, treinamento e experiência resultam, na maioria das vezes, em calibração de estruturas corporificadas. Um mamífero quadrúpede aprende a caminhar pouco tempo depois de nascido – a estrutura estava pronta, faltava calibrar; e a partir de então, o ato de caminhar passa a ser parte de suas respostas estereotípicas, corporificadas. Um humano leva um tempo maior para coordenar um grupo maior de estruturas neuromusculares para conseguir se equilibrar na forma bípede; contudo, após o aprendizado, também incorpora esta resposta que passa a ser instintiva. O mesmo ocorre com alguém que aprende a tocar um instrumento musical. Assim, várias respostas são corporificadas durante o tempo de vida do indivíduo, seja em animais de alto nível cognitivo seja em animais simples – novamente, é o tipo de adaptação “*neuro-genética*” apontada por Baldwin [65]. Quanto mais “complexo” ou “evoluído” o animal mais sua estrutura neural será capaz de incorporar respostas novas em sua estrutura informacional. Nas palavras de Yuste et al. “[*o neocórtex pode ser formado por*] um tipo especial de CPG baseado em assembleias hebbianas específico para aprendizado e armazenagem ou recuperação de memórias (um ‘CPG aprendiz’ ou ‘CPG memória’)” [145]. Esta teoria reafirma quatro dos princípios defendidos neste ensaio: CPGs são corporificados, assembleias neurais são as formas como signos existem internamente nas redes de neurônios, são as formas como os signos são codificados e classificados; e memória resulta dos atributos da retenção, em especial alguns tipos de memórias de curto-prazo podem ser resultado de operações de assembleias neurais biestáveis, como demonstramos recentemente em [105], [106].

### 3 Relacionando os princípios

A forma como os princípios estão relacionados pode ser sucintamente descrita como se segue. O princípio *significação* está relacionado com uma operação que os sistemas cognitivos executam sobre um fluxo contínuo de dados a fim obterem representações (*signos*). O princípio da *retenção* está relacionado com a capacidade

de retenção de dados, de estados de mundo, ou *signos* por um período de tempo maior que zero. O princípio da *classificação* está relacionado com organização, codificação e priorização das representações. O princípio da *antecipação* está relacionado com as correlações causais entre signos resultando num continuum. Metaforicamente é possível comparar um encadeamento de signos aos pensamentos, uma operação fluente (contínua) de signos criando correlações causais, temporais e espaciais entre as representações; assim, o princípio da *antecipação* está relacionado com operações sobre representações a fim de antecipar eventos. Este princípio está intimamente ligado à forma de computação fluida das torrentes de assembleias. É possível dizer que as torrentes causam antecipações, cujo objetivo é apresentar alternativas ao aparelho cognitivo. Antecipações em sistemas cognitivos são conseguidas por meio de encadeamento de representações internas, as quais, rapidamente simulam eventos, ações, reações, etc. a fim de obter estados de mundo possíveis que possam ser apresentados para mecanismos de seleção.

O princípio da *seleção* está relacionado com operações de escolha de entradas e saídas, e conseqüentemente, com descarte de inúmeras possibilidades concorrentes. Quando o princípio da seleção se aplica a entradas ou a certos processos, diz-se que organismos estão utilizando mecanismos de *atenção*; enquanto que, quando selecionam um conjunto de saídas, diz-se que estão fazendo uso de mecanismos de *decisão*. O princípio da seleção, geralmente, está ligado a contextos e aos outros princípios, ou ainda a alguns tipos de processos de avaliação.

O princípio, ou a característica da *corporificação* está relacionado à tendência de incorporar (*to embody, to represent in bodily or material form*) as operações, que passam a ser feitas por subestruturas fixas (*hardwired*) do corpo; ou seja, que fazem parte da estrutura e organização que estão incorporadas ao organismo. Algumas respostas ou sequências de respostas são constantemente utilizadas e é importante ter um conjunto de saídas predefinidas, corporificadas, como máquinas de estados finitos (FSM) ou algo parecido, a fim de executar ou gerar saídas automáticas. Outro exemplo pode ser os sistemas de entradas e de detecção de padrões que possuem estruturas corporificadas para executar as detecções de representações (signos).

#### 4 Organismos com comportamentos minimamente cognitivos

A *Vida* surgiu na terra há mais ou menos 3,5 bilhões de anos e permaneceu unicelular até aproximadamente 600 milhões de anos. Em organismos unicelulares matéria e energia transpondo a membrana celular são ambos, *dados* e *componentes* do metabolismo das células. Organismos unicelulares transformam fenômenos

externos em sinais internos, e estes sinais existem dentro dos organismos unicelulares por meio das mesmas substâncias usadas pelas células para manter seus processos metabólicos (e.g. moléculas, fluxos iônicos, marcadores, etc.). Isto significa que, nestes organismos, um subsistema para processar informações experimentais interfere advindas de vários processos metabólicos paralelos. Neste trabalho, classificamos organismos unicelulares como pertencentes ao (ou operantes no) domínio dos sinais. Seus processos operacionais, mecanismos de sinalização, realimentação, etc. podem ser explicados por meio da Teoria do Controle, ou talvez por meio de novas ferramentas matemáticas (ver [49], [147], [148], [149], [150]). Animais unicelulares podem ser vistos como sistemas de controle complexos, nos quais a “coisa controlada” (a *planta*, em termos de controle) é constituída dos mesmos componentes que o próprio sistema de controle; ou seja, controle e planta são feitos de componentes da mesma natureza. Porém, tais organismos operam no domínio do *controle*, reagindo a sinais e estímulos de entrada.

Por volta do período pré-cambriano organismos multicelulares (metazoários) desenvolveram novas células e tecidos, entre eles os neurais e musculares [122], [151], [152]. Isso permitiu que desenvolvessem estruturas capazes de lidar exclusivamente com dados, (até certo nível) desacoplado do processo metabólico que ocorre em cada célula e no indivíduo como um todo [62], [81], [153]. Tais estruturas evoluíram e apresentam ainda hoje algumas características, algumas propriedades, algumas particularidades operacionais às quais demos o nome de cognição.

Seremos capazes de decidir quais são estas características? Em termos puramente filosóficos este pode parecer um esforço desnecessário, pois parece não fazer sentido apenas definir: “cognição é isso” ou “cognição se limita a isto ou aquilo”. Sempre haverá alguém defendendo o livre uso do termo em várias áreas do conhecimento. Porém, por razões pragmáticas, em ciência da computação, engenharia, biologia, ou em outros ramos do conhecimento, talvez essa empreitada seja útil.

O mundo biológico está cheio de organismos que apresentam combinações parciais dos princípios propostos acima. Dessa forma, é difícil definir limites precisos para classificar os organismos como não cognitivos, parcial ou plenamente cognitivos. Os *princípios* (seus graus de interação e suas combinações parciais ou integrais) permitem a criação de um amplo espectro de organizações estruturais, algumas perto de sistemas de controle sofisticados, outras perto de serem sistemas representativos complexos. Transições do domínio do tratamento dos sinais (do controle) para o domínio dos signos (da representação) é central no *framework* descrito neste trabalho. A conjunção dos seis princípios em um espécime (ou uma espécie) é que

propomos ser uma estrutura que ultrapassa o *limiar cognitivo*; ou seja, que é minimamente cognitiva.

Tal conjunção pode ser encontrada em animais tão “simples” quanto os artrópodes, moluscos, quem sabe até em animais ainda mais simples. Os *princípios* podem explicar como operações com signos transformaram os organismos de responsivos em cognitivos. Não se expressa neste texto a intenção de propor uma teoria, apenas um arcabouço (*framework*) que requer e é aberto a futuras discussões. Esta é uma tentativa de compreender quais componentes e quais operações computacionais poderiam descrever o que chamamos “cognição”.

Por meio de uma discussão cuidadosa e melhoramentos que possam ser introduzido ao conjunto e idéias apresentadas neste texto, será possível sugerir, simular, e provavelmente entender as estruturas que levaram organismos à cognição, algo que poderíamos denominar “correlato neural da cognição” (*neural correlate of cognition* - NCCog), a exemplo do que propuseram Crick e Koch no campo da consciência [154]; além promover embasamento para criação de máquinas e personagens virtuais com comportamento mais próximo do que entendemos como cognitivo. Até onde este trabalho pode ser aprofundado em comportamento animal, parece que os candidatos mais sérios a representarem as criaturas com comportamentos minimamente cognitivos são os insetos, uma vez que o conjunto dos atributos (dos *princípios*) pode ser encontrado neles.

## Agradecimentos

O autor agradece Cacilda Vilela de Lima por importantes contribuições, e a Winfred Nöth por valiosas sugestões sobre o texto e sobre o título. Agradece ainda aos colegas do grupo *Cognitio* da Escola Politécnica da USP por incontáveis e frutíferos debates: Marcio L. Netto, J. C. Piqueira, João Kogler Jr., Walter Lima, Daniel Paiva, Júlio Monteiro, Fabius Leineweber, Osvaldo Guimarães, Cesar Miguel, Marcos Cavalhieri, Flávio Yamamoto, Reginaldo I. Filho, Luciene Rinaldi, Ana Contier; e em memória de Henrique Del Nero.

*Correspondência:* jranhel (at) ieee.org

## Referências

- [1] DARWIN, C. The formation of vegetable mould through the action of worms with some observations on their habits. London, UK: John Murray, 1881.
- [2] CRIST, E. The inner life of earthworms: Darwin's argument and its implications. In: BEKOFF, M.; ALLEN, C.; BURGHARDT, G. M. (Ed.). *The Cognitive Animal: Empirical and Theoretical Perspectives on Animal Cognition*. Cambridge: MA: MIT Press, 2002, (Bradford Book). p. 3–8.
- [3] BROWN, G. et al. With Darwin, earthworms turn intelligent and become human friends. *Pedobiologia*, v. 47, p. 924–933, 2004.
- [4] MENZEL, R.; GIURFA, M. Cognitive architecture of a mini-brain: the honeybee. *Trends in Cognitive Sciences*, v. 5, n. 2, p. 62–71, 2001.
- [5] GREENSPAN, R. J.; SWINDEREN, B. van. Cognitive consonance: complex brain functions in the fruit fly and its relatives. *Trends in Neurosciences*, v. 27, n. 12, p. 707–711, 2004.
- [6] MENZEL, R. et al. Honey bees navigate according to a map-like spatial memory. *Proceedings of the National Academy of Science*, v. 102, n. 8, p. 3040–3045, 2005.
- [7] MENZEL, R. et al. Two spatial memories for honeybee navigation. *Proc. Royal Society London Biological Sciences*, v. 267, p. 961–968, 2000.
- [8] MENZEL, R. Searching for the memory trace in a mini-brain, the honeybee. *Learning & Memory*, v. 8, n. 2, p. 53–62, 2001.
- [9] MENZEL, R.; MÜLLER, U. Learning and memory in honeybees: from behavior to neural substrates. *Annual Review of Neuroscience*, v. 19, n. 1, p. 379–404, 1996.
- [10] FABER, T.; JOERGES, J.; MENZEL, R. Associative learning modifies neural representations of odors in the insect brain. *Nature Neuroscience*, v. 2, p. 74–78, 1999.
- [11] STACH, S.; BENARD, J.; GIURFA, M. Local-feature assembling in visual pattern recognition and generalization in honeybees. *Nature*, v. 429, p. 758–761, 2004.
- [12] BENARD, J.; STACH, S.; GIURFA, M. Categorization of visual stimuli in the honeybee *Apis mellifera*. *Animal Cognition*, v. 9, n. 4, p. 257–270, 2006.
- [13] ESCH, H. E. et al. Honeybee dances communicate distances measured by optic flow. *Nature*, v. 411, p. 581–583, 2001.
- [14] DYER, F. C. The biology of the dance language. *Annual Review of Entomology*, v. 47, n. 1, p. 917–949, 2002.

- [15] MARCO, R. D.; MENZEL, R. Encoding spatial information in the waggle dance. *J. Exp. Biol.*, v. 208, n. 20, p. 3885–3894, 2005.
- [16] LEADBEATER, E.; CHITTKA, L. Social learning in insects - from miniature brains to consensus building. *Current Biology*, v. 17, n. 16, p. 703–713, 2007.
- [17] SRINIVASAN, M. V. et al. Honeybee navigation: nature and calibration of the 'odometer'. *Science*, v. 287, n. 5454, p. 851–853, 2000.
- [18] RILEY, J. et al. The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance. *Nat.*, v. 435, p. 205–207, 2005.
- [19] GIURFA, M. et al. The concepts of 'sameness' and 'difference' in an insect. *Nat.*, v. 410, p. 930–933, 2001.
- [20] GIURFA, M. Cognitive neuroethology: dissecting non-elemental learning in a honeybee brain. *Current Opinion in Neurobiology*, v. 13, n. 6, p. 726–735, 2003.
- [21] HORRIDGE, A. Generalization in visual recognition by the honeybee (*Apis mellifera*): a review and explanation. *Journal of Insect Physiology*, v. 55, n. 6, p. 499–511, 2009.
- [22] HORRIDGE, A. What the honeybee sees: a review of the recognition system of *Apis mellifera*. *Physiological Entomology*, v. 30, n. 1, p. 2–13, 2005.
- [23] FRANKS, N. R.; RICHARDSON, T. Teaching in tandem-running ants. *Nature*, v. 439, n. 7073, p. 153, 2006.
- [24] LEADBEATER, E.; RAINE, N. E.; CHITTKA, L. Social learning: ants and the meaning of teaching. *Current Biology*, v. 16, n. 9, p. 323–325, 2006.
- [25] COLLETT, T. S.; LEHRER, M. Looking and learning: a spatial pattern in the orientation flight of the wasp *Vespula vulgaris*. *Proc. R. Soc. Lond. Biological Sciences*, v. 252, n. 1334, p. 129–134, 1993.
- [26] ZEIL, J.; KELBER, A.; VOSS, R. Structure and function of learning flights in ground-nesting bees and wasps. *Journal of Experimental Biology*, v. 199, n. 1, p. 245–252, 1996.
- [27] LIBERSAT, F.; DELAGO, A.; GAL, R. Manipulation of host behavior by parasitic insects and insect parasites. *Annual Review of Entomology*, v. 54, n. 1, p. 189–207, 2009.
- [28] HASPEL, G. et al. Parasitoid wasp affects metabolism of cockroach host to favor food preservation for its offspring. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, v. 191, n. 6, p. 529–534, 2005.
- [29] GAL, R.; ROSENBERG, L. A.; LIBERSAT, F. Parasitoid wasp uses a venom cocktail injected into the brain to manipulate the behavior and metabolism of its cockroach prey. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, v. 60, n. 4, p. 198–208, 2005.

- [30] HASPEL, G.; ROSENBERG, L. A.; LIBERSAT, F. Direct injection of venom by a predatory wasp into cockroach brain. *Journal of Neurobiology*, v. 56, n. 3, p. 287–292, 2003.
- [31] TARSITANO, M. S.; ANDREW, R. Scanning and route selection in the jumping spider *Portia labiata*. *Animal Behaviour*, v. 58, n. 2, p. 255–265, 1999.
- [32] TARSITANO, M. S.; JACKSON, R. R. Araneophagic jumping spiders discriminate between detour routes that do and do not lead to prey. *Animal Behaviour*, v. 53, p. 257–266, 1997.
- [33] WILCOX, S.; JACKSON, R. Jumping spider tricksters: deceit, predation, and cognition. In: BEKOFF, M.; ALLEN, C.; BURGHARDT, G. M. (Ed.). *The Cognitive Animal: Empirical and Theoretical Perspectives on Animal Cognition*. Cambridge: MA: MIT Press, 2002, (Bradford Book). p. 27–33.
- [34] HARLAND, D. P.; JACKSON, R. R. ‘Eight-legged cats’ and how they see - a review of recent research on jumping spiders (Araneae: Salticidae). *Cimbebasia*, v. 16, p. 231–240, 2000.
- [35] LAND, M. F.; NILSSON, D.-E. *Animal Eyes*. New York: Oxford University Press, 2002.
- [36] JACKSON, R. R.; LI, D. One-encounter search-image formation by araneophagic spiders. *Animal Cognition*, v. 7, p. 247–254, 2004.
- [37] DAVIS, R. L. Olfactory memory formation in *Drosophila*: from molecular to systems neuroscience. *Annual Review of Neuroscience*, v. 28, n. 1, p. 275–302, 2005.
- [38] TULLY, T.; QUINN, W. G. Classical conditioning and retention in normal and mutant *Drosophila melanogaster*. *Journal of Comparative Physiology A*, v. 157, n. 2, p. 263–277, 1985.
- [39] LIU, L. et al. Context generalization in *Drosophila* visual learning requires the mushroom bodies. *Nature*, v. 400, n. 6746, p. 753–756, 1999.
- [40] WADDELL, S.; G., Q. W. What can we teach *Drosophila*? What can they teach us? *Trends in Genetics*, v. 17, p. 719–726, 2001.
- [41] GUO, J.; GUO, A. Crossmodal interactions between olfactory and visual learning in *Drosophila*. *Science*, v. 309, n. 5732, p. 307–310, 2005.
- [42] YU, D.; PONOMAREV, A.; DAVIS, R. L. Altered representation of the spatial code for odors after olfactory classical conditioning: Memory trace formation by synaptic recruitment. *Neuron*, v. 42, n. 3, p. 437–449, 2004.
- [43] BREMBS, B.; HEISENBERG, M. Conditioning with compound stimuli in *Drosophila melanogaster* in the flight simulator. *The Journal of Experimental Biology*, v. 204, n. 16, p. 2849–2859, 2001.
- [44] SWINDEREN, B. van; GREENSPAN, R. J. Salience modulates 20–30 Hz brain activity in *Drosophila*. *Nature Neuroscience*, v. 6, p. 579–586, 2003.

- [45] SWINDEREN, B. van; FLORES, K. A. Attention-like processes underlying optomotor performance in a *Drosophila* choice maze. *Developmental Neurobiology*, v. 67, n. 2, p. 129–145, 2007.
- [46] WILLIAMSON, R.; CHRACHRI, A. Cephalopod neural networks. *Neurosignals*, v. 13, n. 1, p. 87–98, 2004.
- [47] ALVES, C.; BOAL, J.; DICKEL, L. Short-distance navigation in cephalopods: a review and synthesis. *Cognitive Processing*, v. 9, n. 4, p. 239–247, 2008.
- [48] MATHER, J. A. Cephalopod consciousness: behavioural evidence. *Consciousness and Cognition*, v. 17, n. 1, p. 37–48, 2008.
- [49] MÜLLER, B. S.; PRIMIO, F. di; LENGELER, J. W. Contributions of minimal cognition to flexibility. In: CALLAOS, N.; BADAWEY, W.; BOZINOVSKI, S. (Ed.). *SCI 2001 Proc. of the 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. (Industrial Systems: Part II, v. 15)*, p. 93–98.
- [50] BEN-JACOB, E. et al. Bacterial linguistic communication and social intelligence. *Trends in Microbiology*, v. 12, n. 8, p. 366–372, 2004.
- [51] DUIJN, M. van; KEIJZER, F.; FRANKEN, D. Principles of minimal cognition: Casting cognition as sensorimotor coordination. *Adaptive Behavior*, v. 14, n. 2, p. 157–170, 2006.
- [52] SHAPIRO, J. Bacteria are small but not stupid: cognition, natural genetic engineering and socio-bacteriology. *Studies in Hist. and Phil. of Science: Biological and Biomedical Sciences*, v. 38, n. 4, p. 807–819, 2007.
- [53] BEN-JACOB, E. Learning from bacteria about natural information processing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1178, p. 78–90, 2009.
- [54] GARZÓN, P. C.; KEIJZER, F. Cognition in plants. In: BALUŠKA, F. (Ed.). *Plant–environment interactions: Behavioral perspective*. Elsevier, 2009. p. 247–266.
- [55] BALUŠKA, F.; MANCUSO, S. Plant neurobiology: from sensory biology, via plant communication, to social plant behavior. *Cognitive Processing*, v. 10, n. 1, p. 3–7, 2009.
- [56] GARZÓN, F. C. The quest for cognition in plant neurobiology. *Plant Signaling & Behavior*, v. 2, n. 4, p. 208–211, 2007.
- [57] MATURANA, H. R. Autopoiesis, structural coupling and cognition: a history of these and other notions in the biology of cognition. *Cybernetics & Human Knowing*, v. 9, p. 5–34, 2002.
- [58] VARELA, F. J. Autopoiesis and a biology of intentionality. In: MCMULLIN, B.; MURPHY, N. (Ed.). *Proceedings of the Workshop Autopoiesis and Perception*. [S.l.]: Dublin City University Press, 1992.
- [59] BOURGINE, P.; STEWART, J. Autopoiesis and cognition. *Artificial Life*, v. 10, n. 3, p. 327–345, 2004.

- [60] BITBOL, M.; LUISI, P. L. Autopoiesis with or without cognition: defining life at its edge. *Journal of The Royal Society Interface*, v. 1, n. 1, p. 99–107, 2004.
- [61] BEER, R. D. Autopoiesis and cognition in the game of life. *Artificial Life*, v. 10, n. 3, p. 309–326, 2004.
- [62] MORENO, A.; UMEREZ, J.; NEZ, J. I. Cognition and life: the autonomy of cognition. *Brain and Cognition*, v. 34, n. 1, p. 107–129, 1997.
- [63] DARWIN, C. *The Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. 6th Edition, with additions and corrections to 1872. London: John Murray, 1859.
- [64] DAWKINS, R. *The Blind Watchmaker: why the Evidence of Evolution Reveals a Universe without Design*. New York, NY: W.W. Norton & Co., 1996.
- [65] BALDWIN, J. M. A new factor in evolution. *The American Naturalist*, The University of Chicago Press for The American Society of Naturalists, v. 30, n. 354, p. 441–451, 1896.
- [66] MORGAN, C. L. On modification and variation. *Science*, v. 4, n. 99, p. 733–740, 1896.
- [67] OSBORN, H. F. Ontogenic and phylogenetic variations. *Science*, v. 4, n. 100, p. 786–789, 1896.
- [68] TURNEY, P. D. Myths and legends of the Baldwin effect. *NPArc / Proc. 13th Int. Conf. Machine Learning (ICML-96)*, 1996, v. 1, p. 135–142, 1996.
- [69] KOCH, C. *Biophysics of Computation: Information Processing in Single Neurons*. New York, NY: Oxford University Press, 1999.
- [70] OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 4a. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2003.
- [71] CRUSE, H. *Neural Networks as Cybernetic Systems*. 3rd and revised edition. Bielefeld, Germany: Brains, Minds & Media, 2009. ISSN 1861-1680.
- [72] NÖTH, W. *Handbook of Semiotics: Advances in Semiotics*. Bloomington, IN: Indiana University Press, 1990.
- [73] SLOCUM, A. C. et al. Further experiments in the evolution of minimally cognitive behavior: From perceiving affordances to selective attention. In: MEYER, J. e. a. (Ed.). *From Animals to Animats 6 (Proc. 6th Int. Conf. Simulation Adapt. Behav.)*. Cambridge, MA: MIT Press, 2000. p. 430–439.
- [74] BEER, R. D. Toward the evolution of dynamical neural networks for minimally cognitive behavior. In: P., M. et al. (Ed.). *From animals to animats 4*. Cambridge, MA: MIT Press, 1996. p. 421–429.
- [75] BEER, R. D. The dynamics of active categorical perception in an evolved model agent. *Adaptive Behavior*, v. 11, n. 4, p. 209–243, 2003.

- [76] KEIJZER, F. Making decisions does not suffice for minimal cognition. *Adaptive Behavior*, v. 11, n. 4, p. 266–269, 2003.
- [77] BARANDIARAN, X.; MORENO, A. On what makes certain dynamical systems cognitive: A minimally cognitive organization program. *Adaptive Behavior - Animals, Animats, Software Agents, Robots, Adaptive Systems*, v. 14, n. 2, p. 171–185, 2006.
- [78] GODFREY-SMITH, P. Environmental complexity, signal detection, and the evolution of cognition. In: BEKOFF, M.; ALLEN, C.; BURGHARDT, G. M. (Ed.). *The Cognitive Animal: Empirical and Theoretical Perspectives on Animal Cognition*. Cambridge, MA: MIT Press, 2002, p. 135–141.
- [79] LYON, P. The biogenic approach to cognition. *Cognitive Processing*, v. 7, n. 1, p. 11–29, 2006.
- [80] PREMACK, D. Human and animal cognition: continuity and discontinuity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 104, n. 35, p. 13861–13867, 2007.
- [81] KIRSCHNER, M.; GERHART, J. Evolvability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 95, n. 15, p. 8420–8427, 1998.
- [82] BARANDIARAN, X. Mental life: conceptual models and synthetic methodologies for a post cognitivist psychology. In: WALLACE, B. et al. (Ed.). *The Mind, the Body and the World: Psychology After Cognitivism?* Charlottesville, VA: Imprint Academic, 2007. p. 49–90.
- [83] SHANNON, C. A mathematical theory of communication. *Bell System Tech. Journal*, v. 27, p. 379–423, 1948.
- [84] DRETSKE, F. I. *Knowledge and the Flow of Information*. Cambridge, MA: MIT Press, 1981.
- [85] LOMBARDI, O. What is information? *Foundations of Science*, v. 9, n. 2, p. 105–134, 2004.
- [86] BATES, M. J. Information and knowledge: an evolutionary framework for information science. *Information Research*, v. 10, n. 4, p. 239, 2005. ISSN 13681613.
- [87] BATES, M. J. Fundamental forms of information: research articles. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, v. 57, n. 8, p. 1033–1045, 2006.
- [88] DAVENPORT, T. H.; PRUSAK, L. *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*. Boston, MA: Harvard Business School Press, 1998.
- [89] ROWLEY, J. The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy. *Journal of Information Science*, v. 33, n. 2, p. 163–180, 2007.

- [90] SONTAG, E. D. Molecular systems biology and control. *European Journal of Control*, v. 11, n. 4–5, p. 396–435, 2005.
- [91] SCHMIDT-RHAESA, A. *The Evolution of Organ Systems*. : Oxford University Press, 2007.
- [92] SMITH, C. U. M. *Biology of Sensory Systems*. West Sussex - England: John Wiley & Sons, 2000.
- [93] SANTAELLA, L. *A Teoria Geral dos Signos: Como as Linguagens Significam as Coisas*. São Paulo: Cengage Learning, 2000.
- [94] SHORT, T. L. *Peirce's Theory of Signs*. New York, NY: Cambridge University Press, 2009.
- [95] BEAR, M. F.; CONNORS, B. W.; PARADISO, M. A. *Neuroscience: Exploring the Brain*. 3rd ed. Baltimore, MD: Lippincott Williams & Wilkins, 2007.
- [96] KANDEL, E. R.; SCHWARTZ, J. H.; JESSEL, T. M. *Principles of Neural Science*. 4th ed. USA: McGrall-Hill Health Professions Division, 2000.
- [97] NÖTH, W. Semiotic machines. *Cybernetics & Human Knowing*, v. 9, p. 5–21, 2002.
- [98] MARTINEZ-CONDE, S.; MACKNIK, S. L.; HUBEL, D. H. The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature Review Neuroscience*, v. 5, n. 3, p. 229–240, 2004.
- [99] NÖTH, W. Representation in semiotics and in computer science. *Semiotica*, v. 115, n. 3–4, p. 203–214, 1997.
- [100] MARR, D. *Vision: a Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. San Francisco, CA: W. H. Freeman, 1982.
- [101] THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. *Pattern Recognition*. Burlington, MA: Academic Press, 2009.
- [102] SCHACTER, D. L.; BUCKNER, R. L. Priming and the brain. *Neuron*, v. 20, n. 2, p. 185–195, 1998.
- [103] MOSCOVITCH, M. Theories of memory and consciousness. In: TULVING, E.; CRAIK, F. I. M. (Ed.). *The Oxford Handbook of Memory*. New York, NY: Oxford University Press, 2000. p. 609–525.
- [104] TULVING, E. Episodic memory: From mind to brain. *Annual Review of Psychology*, v. 53, n. 1, p. 1–25, 2002.
- [105] RANHEL, J. a. *Computação por assembléias neurais em redes neurais pulsadas*. Tese (Doutorado em Ciências) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Depto. Eng. Eletrônica, dez 2011.

- [106] RANHEL, J. et al. Bistable memory and binary counters in spiking neural network. In: PRESS, I. (Ed.). In 2011 IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence. FOCI 2011 Proceedings, v. 1, p. 66–73.
- [107] RANHEL, J.; NETTO, M. L. Computing with spiking neural assemblies. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, v. 1, n. 1, p. 1–7, 2011.
- [108] PRESCOTT, T. J. Forced moves or good tricks in design space? Landmarks in the evolution of neural mechanisms for action selection. Adaptive Behavior, v. 15, n. 1, p. 9–31, 2007.
- [109] PRESCOTT, T. J.; BRYSON, J. J.; SETH, A. K. Introduction. modelling natural action selection. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 362, n. 1485, p. 1521–1529, 2007.
- [110] SOUSA, R. de. Rationality. In: SANDER, D.; SCHERER, K. (Ed.). Oxford Companion to Emotion and the Affective Sciences. New York, NY: Oxford University Press, 2009. p. 329.
- [111] WATANABE, S.; HUBER, L. Animal logics: decisions in the absence of human language. Animal Cognition, v. 9, n. 4, p. 235–245, 2006.
- [112] LOEWENSTEIN, G.; LERNER, J. S. The role of affect in decision making. In: DAVIDSON, R.; SCHERER, K.; GOLDSMITH, H. (Ed.). Handbook of Affective Sciences. NY: Oxford Univ. Press, 2003. p. 619–642.
- [113] HAN, S.; LERNER, J. S. Decision making. In: SANDER, D.; SCHERER, K. (Ed.). Oxford Companion to Emotion and the Affective Sciences. New York, NY: Oxford University Press, 2009. p. 111–113.
- [114] LEDOUX, J. E. Emotion circuits in the brain. Annual Review of Neuroscience, v. 23, n. 1, p. 155–184, 2000.
- [115] LEWIS, M. D. Bridging emotion theory and neurobiology through dynamic systems modeling. Behavioral and Brain Sciences, v. 28, n. 02, p. 169–194, 2005.
- [116] PANKSEPP, J. Affective consciousness: core emotional feelings in animals and humans. Consciousness and Cognition, v. 14, n. 1, p. 30–80, 2005.
- [117] FEDONKIN, M. A. et al. The Rise of Animals: Evolution and Diversification of the Kingdom Animalia. Baltimore, MD: John Hopkins Univ. Press, 2007.
- [118] MARSHALL, C. R. Explaining the Cambrian ‘explosion’ of animals. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 34, p. 355–384, 2006.
- [119] VALENTINE, J. W. Prelude to the Cambrian explosion. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 30, p. 285–306, 2002.
- [120] NARBONNE, G. M. The Ediacara biota: Neoproterozoic origin of animals and their ecosystems. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 33, p. 421–442, 2005.

- [121] SEILACHER, A.; BUATOIS, L. A.; MÁNGANO, M. G. Trace fossils in the Ediacaran-Cambrian transition: behavioral diversification, ecological turnover and environmental shift. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 227, n. 4, p. 323–356, 2005.
- [122] KNOLL, A. H.; CARROLL, S. B. Early animal evolution: Emerging views from comparative biology and geology. *Science*, v. 284, n. 5423, p. 2129–2137, 1999.
- [123] FERNALD, R. D. Evolution of eyes. *Current Opinion in Neurobiology*, v. 10, n. 4, p. 444–450, 2000.
- [124] LAND, M. F.; FERNALD, R. D. The evolution of eyes. *Annual Review of Neuroscience*, v. 15, p. 1–29, 1992.
- [125] PARKER, A. R. Colour in Burgess shale animals and the effect of light on evolution in the Cambrian. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, v. 265, n. 1400, p. 967–972, 1998.
- [126] PARKER, A. In *The Blink Of An Eye: How Vision Sparked The Big Bang Of Evolution*. New York, NY: Basic Books, 2004..
- [127] MARTIN, M. O. Predatory prokaryotes: an emerging research opportunity. *Journal of molecular microbiology and Biotechnology*, v. 4, n. 5, p. 467–477, 2002.
- [128] PERNTHALER, J. Predation on prokaryotes in the water column and its ecological implications. *Nature Reviews Microbiology*, v. 3, n. 7, p. 537–546, 2005.
- [129] SHERR, E.; SHERR, B. Significance of predation by protists in aquatic microbial food webs. *Antonie van Leeuwenhoek*, v. 81, n. 1, p. 293–308, 2002.
- [130] SOCKETT, R. E. Predatory lifestyle of *Bdellovibrio bacteriovorus*. *Annual Review of Microbiology*, v. 63, n. 1, p. 523–539, 2009.
- [131] MOROZ, L. L. On the independent origins of complex brains and neurons. *Brain, Behavior and Evolution*, v. 74, n. 3, p. 177–190, 2009.
- [132] MILJKOVIC-LICINA, M.; GAUCHAT, D.; GALLIOT, B. Neuronal evolution: analysis of regulatory genes in a first-evolved nervous system, the hydra nervous system. *Biosystems*, v. 76, n. 1–3, p. 75–87, 2004.
- [133] BÜSCHGES, A. et al. Organizing network action for locomotion: insights from studying insect walking. *Brain Research Reviews*, v. 57, n. 1, p. 162–171, 2008.
- [134] RABINOVICH, M. I. et al. Dynamical principles in neuroscience. *Reviews of Modern Physics*, v. 78, n. 4, p. 1213–1265, 2006.
- [135] KIEHN, O. Locomotor circuits in the mammalian spinal cord. *Annual Review of Neuroscience*, v. 29, n. 1, p. 279–306, 2006.
- [136] DIETZ, V. Spinal cord pattern generators for locomotion. *Clinical Neurophysiology*, v. 114, n. 8, p. 1379–1389, 2003.

- [137] IJSPEERT, A. J. A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander. *Biological Cybernetics*, v. 84, n. 5, p. 331–348, 2001.
- [138] YOUNG, J. Z. The optic lobes of *Octopus vulgaris*. *Phil Trans of the Royal Society of London: Biological Sciences*, v. 245, n. 718, p. 19–58, 1962.
- [139] GARM, A.; BIELECKI, J. Swim pacemakers in box jellyfish are modulated by the visual input. *Journal of Comparative Physiology A*: v. 194, n. 7, p. 641–651, 2008.
- [140] GARM, A. et al. The ring nerve of the box jellyfish *Tripedalia cystophora*. *Cell and Tissue Research*, v. 329, n. 1, p. 147–157, 2007.
- [141] GRILLNER, S. The motor infrastructure: from ion channels to neuronal networks. *Nature Review Neurosciences*, v. 4, n. 7, p. 573–586, 2003.
- [142] PEARSON, K. G. Common principles of motor control in vertebrates and invertebrates. *Annual Review of Neuroscience*, v. 16, n. 1, p. 265–297, 1993.
- [143] IJSPEERT, A. J. et al. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model. *Science*, v. 315, n. 5817, p. 1416–1420, 2007.
- [144] GRILLNER, S. Biological pattern generation: the cellular and computational logic of networks in motion. *Neuron*, v. 52, n. 5, p. 751–766, 2006.
- [145] YUSTE, R. et al. The cortex as a central pattern generator. *Nat Rev Neurosci*, v. 6, n. 6, p. 477–483, 2005.
- [146] PAUGAM-MOISY, H.; BOHTE, S. Computing with spiking neuron networks. In: ROZENBERG, G.; BÄCK, T.; KOK, J. N. (Ed.). *Handbook of Natural Computing*. 1st Edition. Heidelberg, Germany: Springer 2010. v. 1.
- [147] SONTAG, E. D. Molecular systems biology and control: A qualitative-quantitative approach. In: IEEE, C.-E. . (Ed.). *CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference on Control*. IEEE, 2005. p. 2314–2319.
- [148] SONTAG, E. D. Some new directions in control theory inspired by systems biology. *Systems Biology, IEEE Proceedings*, v. 1, n. 1, p. 9–18, June 2004.
- [149] BORNHOLDT, S. Systems biology: less is more in modeling large genetic networks. *Science*, v. 310, n. 5747, p. 449–451, 2005.
- [150] KLAMT, S.; SAEZ-RODRIGUEZ, J.; GILLES, E. Structural and functional analysis of cellular networks with cellnetanalyzer. *BMC Systems Biology*, v. 1, n. 1, p. 1–13, 2007.
- [151] VICKERS-RICH, P. Body plans, strange and familiar, and the enigma of 542. In: FEDONKIN, M. A. et al. (Ed.). *The Rise of Animals: Evolution and Diversification of the Kingdom Animalia*. Baltimore, MA: John Hopkins Univ. Press, 2007. p. 235–256.

- [152] VALENTINE, J. W. On the Origen of Phyla. Chicago - : The Univ. of Chicago Press, 2006.
- [153] JEONG, H. et al. The large-scale organization of metabolic networks. Nature, v. 407, n. 6804, p. 651–654, 2000.
- [154] CRICK, F.; KOCH, C. A framework for consciousness. Nature Neuroscience, v. 6, n. 2, p. 119–126, 2003.

