

A EVOLUÇÃO DOS ALGORITMOS MENTAIS

*Renato Zamora Flores
João Paulo Schwarz Schüler*

*Se permitirmos às máquinas
tomarem suas próprias decisões,
não poderemos fazer nenhuma conjectura
sobre quais seriam os resultados,
uma vez que é impossível adivinhar como
tais máquinas poderiam se comportar.*

Bill Joy, criador da linguagem Java

Ainda que o cérebro utilize métodos e arquitetura diferentes de um computador, os procedimentos para o processamento das informações sobre o mundo se baseiam em regras gerais das ciências da computação. Do mesmo modo que a evolução darwiniana ocorre por meio de um conjunto de algoritmos, a organização da mente humana, também. A idéia central é que, assim como não há separação entre a evolução animal e a evolução humana, não há fronteira explícita entre a evolução humana e a evolução dos computadores.

O cérebro não é um computador e nem se parece com um em sua microarquitetura. O cérebro humano é a estrutura mais complexa conhecida. Tem 30 bilhões de neurônios, 1/3 deles localizado no córtex. Como cada um possui cerca de 10.000 sinapses, é possível estimar-se que o número de sinapses seja da ordem de 10^{15} . Gerald Edelman¹, um dos mais relevantes neurocientistas contemporâneos, calculou que o número de combinações possíveis ultrapassa, em muitos milhares, a quantidade de partículas subatômicas do universo. Por isso, nenhum cérebro é igual a outro, ainda que todos sejam dependentes, para um funcionamento adequado, de uma mesma organização física.

Os circuitos do cérebro não se parecem com quaisquer outros conhecidos. São mais semelhantes às interações de uma floresta tropical do que a equipamentos construídos pelo homem.² Entretanto, isto não significa que as regras que regem o processamento de informações no cérebro sejam impossíveis de serem emuladas em sistemas artificiais.

Desde meados do século passado já se sabia que nem toda capacidade de informação do genoma seria capaz de armazenar instruções para a organização do cérebro. Logo, deveria existir um processo, ou um conjunto deles, que levasse a resultados funcionais semelhantes em todos os indivíduos, ainda que dotados de conteúdos e informações diferentes. Mesmo considerando-se a grande diversidade dos cérebros humanos, eles são todos muito parecidos entre si, quando comparados a cérebros de uma outra espécie.

O objetivo do presente texto é o de examinar alguns modelos de algoritmos que podem contribuir para entendermos o processamento da informação na mente e sua evolução. Uma das hipóteses de trabalho é que todas as funções mentais podem ser algoritmizadas, ou seja, mais cedo ou mais tarde serão realizadas por computadores.

Na primeira parte, examina-se a teoria da seleção natural como um algoritmo. A segunda parte mostra que a evolução da inteligência é uma evolução computacional. A terceira parte apresenta o modelo de organização do cérebro, conhecido como darwinismo neural ou neuronal, que propõe como o algoritmo darwiniano pode ser aplicado às relações entre neurônios ou, mais exatamente, entre conjuntos de neurônio, competindo durante a ontogenia do cérebro. Por fim, a quarta parte examina as técnicas heurísticas que o cérebro usa para lidar com os dilemas do ambiente.

¹ EDELMAN, G. M. Building a picture of the brain. *Daedalus - J. Academy of Arts and Science*, 127: 68-89, 1998.

² EDELMAN, G. M. *Biologia da consciência - as raízes do pensamento*. Lisboa: Instituto Piaget, 1995.

Darwinismo como algoritmo

A percepção de que o processo da seleção natural pode ser definido como uma classe de algoritmos foi disseminada pelo filósofo Daniel Dennett há uma década.³ Segundo ele, as idéias de Darwin poderiam ser vistas, hoje, como tentativas de descrever formalmente um processo de produção da diversidade biológica, a partir de uma origem única. Entretanto, em sua época, não havia uma terminologia adequada para descrever tal processo.

Matematicamente, um algoritmo é um procedimento finito, escrito em linguagem simbólica, composto de passos discretos, não ambíguos, cuja execução não requer “insight”, intuição, inteligência ou perspicácia, e que, mais cedo ou mais tarde, chega a um resultado. Um algoritmo sempre produz um resultado, dentro de sua área de abrangência, como receitas culinárias e cálculos matemáticos: seguindo-se estritamente as regras, não há como dar errado.

Programas de computador e algoritmos não são a mesma coisa. Somente os programas que sempre encontram um resultado, dentro dos limites de sua competência, podem ser chamados de algoritmos.

Além disso, a definição de algoritmo é recursiva no seguinte aspecto: um algoritmo é feito de passos que também constituem, cada um deles, um algoritmo. Este é um aspecto interessante de sua definição matemática, pois apresenta um equivalente neurológico, no cérebro. Como veremos adiante, é o fenômeno da reentrada.

De um modo mais amplo, podemos descrevê-lo como um processo ou como uma seqüência de etapas ordenadas que visam atingir um objetivo pré-definido.⁴ Este processo apresenta algumas características, que podem ser vistas no quadro 1.

Na vida diária, o conceito não parece muito relevante, mas seu papel na estrutura do pensamento é revolucionário. Apresentando-se como um instrumento abstrato de coordenação dos planos para o futuro, ocupa o espaço que se abre entre o desejo e a satisfação.⁵

Se um processo pode ser algoritmizado, não requer mais qualquer habilidade exclusivamente humana para ocorrer. Se for um processo mental, por exemplo, pode ser compartilhado com máquinas e, eventualmente, animais. Vários comportamentos animais podem ser algoritmizados. Um símile eletrônico de uma abelha pode executar a dança de modo a induzir abelhas a procurarem alimento em um local determinado.⁶ O fato de existirem dezenas de modelos

³ DENNETT, D. C. *A perigosa idéia de Darwin*. Rio de Janeiro: Rocco, 1998.

⁴ BERLINSKI, D. *The advent of the algorithm*. Orlando: Harcourt, 2000.

⁵ BERLINSKI, D. *Op. cit.*

⁶ MICHELSEN, A. *Danse techno chez les abeilles*. *Recherche*, 310:52-56, 1998.

robóticos para comportamentos animais – nadar com diferentes tipos de movimento, voar como insetos ou morcegos, regular o funcionamento do corpo e aprender habilidades novas, por exemplo – é um consistente indício de que, pelo menos, algumas funções exercidas pelo cérebro são algoritmos.⁷

⁷ WEBB, B. Can robots make good models of biological behavior? *BBS*, 24(6):1033-78, 2001.

⁸ DENNETT, D. C. *A perigosa idéia de Darwin*. *Op. cit.*

Quadro 1: Características de um algoritmo (segundo Dennett⁸)

| | |
|-----------------------------|--|
| Neutralidade de substrato | Significa que o processo funciona com a mesma eficiência em qualquer substrato. Esta eficiência deve-se às regras lógicas e não à eficiência dos materiais. Por exemplo, o darwinismo é válido para genes, espécies, grupos, linfócitos ou memes. |
| Irrracionalidade subjacente | As etapas do processo não necessitam de nenhuma cognição, pois são uma seqüência de passos bem simples. Qualquer algoritmo, em princípio, pode ser executado por um robô. A resolução de uma equação é um exemplo. Uma vez descoberta a fórmula, qualquer calculadora pode resolvê-la. |
| Resultados garantidos | Como não necessita de inteligência, desde que seguidos os passos que compõem o algoritmo, não há como dar errado, similar à culinária. |

A estrutura do algoritmo darwiniano foi dissecada por Calvin⁹. Inicialmente, há um padrão (introns, genes, conjuntos de genes, conjuntos de neurônios ou memes). Este padrão é copiado – caso não pudesse ser copiado, não seria um padrão, sem dúvida –, entretanto, nele ocorrem variações durante o processo de cópia (erros, mutações ou recombinações). Usualmente essas variações são produzidas ao acaso.

Assim, formam-se populações de diferentes tipos, o padrão e suas variantes, que competem, uns com os outros, pela ocupação de um espaço de trabalho limitado. Entende-se por espaço de trabalho qualquer recurso do ambiente que seja limitado. “Limitado” significa que o espaço de trabalho força escolhas, ao contrário do que ocorre em um nicho aberto, onde qualquer variante encontra recursos suficientes para sobreviver. Note, então, que este algoritmo se aplica a populações e não a indivíduos.

O ambiente costuma ser complexo e múltiplo. Em decorrência disso, variantes alternativas têm graus de sucesso desiguais em porções diferentes desse ambiente. Constituem exemplos de tal fenômeno a especialização dos tentilhões nas ilhas de Galápagos, a variação na coloração da

⁹ CALVIN, W. H. The six essentials? Minimal requirements for the Darwinian bootstrapping of quality. *Journal of Memetics - Evolutionary Models of Information Transmission*, 11. [on-line] Disponível na Internet via WWW. URL: http://jomemit.cfp.m.org/1997/vol11/calvin_wh.html. Arquivo capturado em 25 de setembro de 2002.

pele dos seres humanos ou as múltiplas formas das crenças na vida após a morte: todas adaptativas à sua ecologia.

As variantes novas ocorrem preferencialmente em torno dos mais bem sucedidos padrões pré-existentes e não devem ser vistas como saltos aleatórios a partir de um início comum. São, geralmente, pequenas digressões ou desvios de uma solução eficiente. Embora a maioria seja menos eficiente, alguns desvios podem ser melhores e transformar-se na fonte preferencial de novas variações. E o ciclo recomeça.

Se no início do ciclo há uma determinada proporção de variantes e, no final, outra diferente, tem-se a evolução darwiniana – variação na frequência de variantes com o passar do tempo ou variação na frequência gênica em um intervalo de tempo, no linguajar genético. Em outras palavras, existindo variabilidade e diferencial reprodutivo, existirá evolução. Eis o algoritmo darwiniano em sua versão mais concisa.

Nos livros sobre inteligência artificial, a versão computacional do algoritmo darwiniano pode ser encontrada sob o rótulo de “algoritmo de gerar e testar”: gera-se uma solução para um problema, experimenta-se se ela é melhor do que a solução anterior e, caso seja, é o fim do processo, caso contrário, gera-se outra.¹⁰

A história evolutiva dos seres vivos explica porque alguns seres vivos tomaram o caminho da complexidade, desenvolvendo sistemas cada vez mais sofisticados para manipular a informação que colhiam do ambiente. Curiosamente, como vimos, tais sistemas podem, também, ser algoritmizados. Vamos examinar melhor a idéia.

Inteligência: algoritmos para quê?

O conhecimento atual em biologia molecular nos permite interpretar uma criatura viva como um sistema recombinante. A informação é transportada de um sistema (DNA) para outro (proteínas). Trata-se de uma simplificação, é claro. Organismos vivos existem em um mundo concreto e são objetos tridimensionais, enquanto que algoritmos e informações apresentam-se como entes abstratos e unidimensionais, cuja existência ocorre no universo dos símbolos. Apesar disso é correto afirmar que na essência da vida jaz um algoritmo.¹¹

Bactérias e outras formas de vida simples baseiam suas regras de comportamento em DNA. No momento da evolução em que o comportamento do ser vivo passa a se

¹⁰ RICH, E. *Inteligência artificial*. S. Paulo: McGraw-Hill, 1988.

¹¹ BERLINSKI, D. *Op. cit.*

modificar sem alteração do seu código genético ocorreu um tremendo salto evolutivo.

No início da vida na Terra, todo o conhecimento (informação usada para resolver problemas) dos seres primitivos estava armazenado no seu DNA. Com o aparecimento dos cérebros, a memória dos eventos ocorridos durante a existência de um organismo poderia ser usada como base de conhecimento para resolver novos problemas. No processo evolutivo, surgem seres vivos cada vez mais adaptáveis ao ambiente. Aqueles que possuem neurônios que se modificam ao longo do tempo são dotados de uma ferramenta que incrementa e adapta o seu conhecimento e seu comportamento de forma muito mais dinâmica.

No final do livro *A Origem das Espécies*¹², Darwin especulou:

Entrevejo, num futuro remoto, caminhos abertos a pesquisas muito mais importantes ainda... isto é, sobre a aquisição necessariamente progressiva de todas as faculdades e de todas as aptidões mentais, o que lançará uma nova luz sobre a origem do homem e sua história.

Desde então, o entendimento do que é inteligência evoluiu muito, absorvendo vários conceitos. Lamentavelmente, porém, decorridos um século e meio, ainda não há uma teoria formal sobre a origem da inteligência nos seres vivos. Morais¹³ avalia que o termo “inteligência” é um dos maiores equívocos da filosofia e da psicologia atuais, como exemplifica a plethora de testes psicológicos. Hoje o conceito parece significar entendimento, intelecto, conjunto de funções cognitivas, razão e capacidade de resolver problemas. Originalmente, porém, o termo latino *intelligentia*, registrado um século antes de Cristo, significava penetrar dentro das coisas, captar a sua intimidade, discernir ou entender a essência. Descrevia uma atividade passiva em relação ao meio. Aquele que possuía inteligência apenas captava, entendia e discernia, sem desempenhar um papel ativo. Modernamente, além da atividade passiva, o ser inteligente deve exibir um comportamento ativo, tentando resolver problemas com base em sua memória ou sendo criativo, a partir da análise dos eventos ocorridos durante a sua existência.

Definições tradicionais de inteligência costumam ser muito subjetivas, como o teste de Turing¹⁴. Ao definir biologicamente inteligência, Steels¹⁵ a apresenta com um processo não-linear que compartilha propriedades também encontradas em sistemas físicos, sendo possível formular algoritmos que expliquem fenômenos como a cooperação, a

¹² DARWIN, C. *A Origem das Espécies*. Rio de Janeiro: Tecnoprint, 1987.

¹³ MORAIS, M. *Logos - Enciclopédia Luso-Brasileira de Filosofia*. Lisboa/São Paulo: Editorial Verbo, 1990. p. 1447-1463.

¹⁴ Em 1950, Alan Turing propôs um teste no qual era necessário identificar, por meio de um diálogo (de modo indireto, pelo teclado, por exemplo), se o interlocutor é um humano ou é um computador. Se a identificação não fosse possível, o computador deveria ser considerado inteligente.

¹⁵ STEELS, L. Intelligence: dynamics and representations. In: STEELS, L. (ed.) *The Biology and Technology of Intelligent Autonomous Agents*. Berlin: Springer-Verlag, 1995. STEELS, L. The origins of intelligence. *Proceedings of the Carlo Erba Foundation Conference on Artificial Life*. Milano: Fondazione Carlo Erba, 1996.

coerência entre comportamentos ou a linguagem. O objetivo da inteligência é aumentar a capacidade de sobrevivência e manutenção de um sistema físico ou biológico.

Assim, Steels¹⁶ identificou quatro propriedades da inteligência que são válidas tanto para seres vivos como para sistemas não vivos: 1) manutenção própria (autocatálise no nível bioquímico, autopoiese em organismos, ou autocorreção em redes neurais artificiais); 2) adaptação dos comportamentos frente à variação ambiental; 3) preservação da informação mediada por algum tipo de memória; 4) complexidade incremental – que significa, em certas circunstâncias, a propriedade de poder aumentar as interações entre seus componentes, que é o que ocorre, por exemplo, com o raciocínio de uma criança, à medida em que progride na escolaridade. O darwinismo neural, descrito adiante, mostra como se dá o aumento de complexidade nos cérebros.

Um dos modelos mais adequados sobre a evolução dos processos computacionais relacionados à inteligência animal e humana foi desenvolvido por Dennett¹⁷. Segundo ele, quanto mais precisa for a informação e quanto maior for a região de onde uma criatura coleta informação, mais provável será o seu sucesso. No início da evolução das espécies, apareceu o olfato, que é uma forma de coletar informação do ambiente próximo. Posteriormente, desenvolveu-se a audição, permitindo a coleta de informação a distâncias maiores. A visão possibilitou a coleta de informação de alta qualidade a grandes distâncias. A percepção de eventos a grande distância no espaço contribuiu para a predição de eventos a grande distância no tempo. Por exemplo, avistando o seu predador a grande distância, a presa pôde prever o possível ataque a que estava sujeita.

Assim como ocorreu evolução da coleta de informação, também evoluiu a maneira pela qual os seres vivos processam essa informação. Para Dennett¹⁸, os sistemas de coleta de informação são compostos por um grande número de detectores. Cada detector percebe um determinado evento produzindo resposta do tipo SIM ou NÃO para a pergunta “percebo o evento agora?”. Células fotossensíveis da retina e os corpúsculos de Vater-Pacini e Ruffini, que percebem o calor na pele, são exemplos de detectores. Cada detector apresenta uma intencionalidade mínima: a de detectar um tipo muito específico de evento.

Seguindo o mesmo raciocínio, os neurônios que disparam, ou não, estão respondendo SIM ou NÃO a determinados estímulos, da mesma forma que os detectores respondem SIM ou NÃO. Sendo assim, as células que coletam

¹⁶ STEELS, L. *The origins of intelligence. Op. cit.*

¹⁷ DENNETT, D. C. *Kinds of minds*. New York: Basic Books, 1996.

¹⁸ DENNETT, D. C. *Kinds of minds. Op. cit.*
DENNETT, D. C. *A perigosa idéia de Darwin. Op. cit.*

informação do meio exterior da criatura são funcionalmente semelhantes às células destinadas ao processamento de informação encontradas no cérebro. Diferentes das anteriores, tais células são chamadas de agentes.

Com base nesses conceitos, Dennett classificou os seres vivos, conforme seus processos de manipulação da informação. Um resumo da classificação está no quadro 2, que mostra uma hierarquia de complexidade, na qual cada nova criatura apresenta, além das habilidades das anteriores, um conjunto novo de capacidades.

Quanto à estrutura da inteligência humana, o problema é ainda mais complexo. A divisão mais clara entre tipos de inteligência é a que diferencia uma inteligência geral – o conhecido “g de Spearman”¹⁹ – e inteligências múltiplas. O estudo das múltiplas formas da inteligência, nos seres humanos, ainda beira a pseudociência, devido à quase completa ausência de evidências empíricas que comprovem a adequação de teorias à realidade, a despeito do grande sucesso comercial de livros sobre como ampliar as capacidades intelectuais. Entretanto, é quase um consenso científico o de que a inteligência humana apresenta mais de um componente independente.²⁰

Sternberg²¹ propõe a existência de três componentes na inteligência humana, com regras de processamento diferenciadas: (1) inteligência analítica – responsável pela análise e entendimento dos objetos e suas relações, tradicionalmente medida pelos testes de QI, mas incluindo também habilidades como a metacognição (a capacidade de monitorar seus próprios pensamentos); (2) inteligência criativa – responsável pelas idéias, criações e capacidade de reagir a eventos desconhecidos; (3) inteligência prática – responsável pela resolução de problemas que são diariamente apresentados. Estudos populacionais em diferentes países mostraram que este modelo é um dos mais realistas quando comparado a outras propostas de múltiplas inteligências, inteligências emocionais ou com o modelo de uma única forma de inteligência, usualmente denominado de “g”.

De forma resumida, se a inteligência serve para análise e resolução de problemas, aqueles indivíduos que possuem os três tipos de inteligência mencionados deveriam apresentar sucesso na vida real, caracterizado pelo crescimento do seu valor adaptativo. Surpreendentemente, não há, em relação a populações humanas primitivas, nenhuma evidência direta de que inteligência tenha aumentado o número de filhos.

¹⁹ JENSEN, A. R. Spearman's g: links between psychometrics and biology. *ANYAS*, 702:102-129, 1993.

²⁰ STERNBERG, R. J. Successful intelligence: finding a balance. *Trends in Cognitive Science*, 3:436-442, 1999.

²¹ STERNBERG, R. J. Successful intelligence: finding a balance... *Op. cit.*

STERNBERG, R. J. Confirmatory factor analysis of the Sternberg triarchic abilities test in three international samples. *European Journal of Psychological Assessment*, 17(1):1-16, 2001.

²² DENNETT, D. C. *Kinds of minds*. *Op. cit.*

²³ EDELMAN, G. M. *Biologia da Consciência*. *Op. cit.*

²⁴ SCHULER, J. *Inteligência Artificial Popperiana*. Porto Alegre: PPG em Computação, UFRGS, Dissertação (Mestrado), 2002. Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.schulers.com/jpss/estudos/mestrado.htm>. Arquivo capturado em 5 de janeiro de 2003.

²⁵ WHITEN, A.; GOODALL, J.; McGEW, W. C.; NISHIDA, T.; REYNOLDS, V.; SUGIYAMA, Y.; TUTIN, C. E. G.; WRANGHAM, R. W. & BOESCH, C. Cultures in chimpanzees. *Nature*, 399, 682-5, 1999.

Quadro 2: As criaturas de Dennett²²

| | |
|-----------------------------|---|
| <p>Criatura darwiniana</p> | <p>Nas etapas iniciais da evolução, as criaturas não têm memória do passado e nenhum tipo de aprendizado. Para essas criaturas, a única possibilidade de alteração do comportamento é a mutação genética durante a reprodução. Seu repertório comportamental está inteiramente definido no momento do nascimento.</p> <p>Em diversos aspectos, essas criaturas assemelham-se a um constructo da computação: os agentes reativos, que não possuem memória dos eventos do passado, não constroem representação do ambiente e agem de acordo com a sua percepção instantânea. A diferença marcante está no fato de que tais criaturas se reproduzem, modificam-se por mutação e são selecionadas pelo ambiente. É interessante observar que a reprodução é uma diferença que se aplica mais à estrutura orgânica da criatura do que a sua inteligência propriamente dita.</p> |
| <p>Criatura skinneriana</p> | <p>Posteriormente, apareceram criaturas com plasticidade fenotípica, cujo repertório comportamental não está totalmente definido ao nascimento e podem modificá-lo durante a sua vida. Testam, ao acaso, diversas ações; aquelas que resultarem em sucesso serão reforçadas. As criaturas devem avaliar as suas ações. As que desenvolverem melhores métodos de avaliação terão mais chances de sobrevivência. O reforço de algumas ações, sob determinadas condições, em detrimento de outras, é um tipo de aprendizado que, na bibliografia de inteligência artificial, denomina-se aprendizado por reforço.</p> <p>Uma criatura neste nível é recompensada ao fazer uma ação correta, ou punida, se fizer uma ação incorreta. Com o tempo, o aprendizado por reforço leva a criatura a exercer ações que propiciem recompensa. O perigo deste aprendizado é a realização de uma tentativa que provoque dano físico sério ou mesmo a morte. O sistema não possui nenhum método de predição, para ações não testadas, que possa evitar a morte do indivíduo. Assim, a criatura skinneriana pode fazer uma tentativa e acabar morrendo.</p> |
| <p>Criatura popperiana</p> | <p>Para evitar a morte da criatura em uma tentativa perigosa, um sistema de predição das conseqüências de ações evoluiu. As criaturas constroem, dentro de si, um modelo ou representação de mundo com base nas suas percepções ao longo de sua existência. É o que Edelman²³ denomina de consciência primária. Fazendo uso desse modelo de mundo, elas podem realizar simulações e avaliar as conseqüências antes de realizar as ações no mundo real. Ações testadas, no modelo, competem entre si. As ações vencedoras têm mais probabilidade de serem usadas no mundo real.</p> <p>Essas criaturas sentem medo (ou um equivalente neural) frente a certas situações apresentadas, tanto no modelo quanto na realidade. O medo faz com que muitas ações perigosas sejam descartadas antes de serem testadas empiricamente. Já é possível desenvolver versões, em inteligência artificial, para tais criaturas essencialmente biológicas.²⁴</p> |
| <p>Criatura gregoriana</p> | <p>Este tipo de criatura está no topo da pirâmide evolutiva da inteligência. Apresenta uma percepção de si mesma contínua no tempo (self, eu ou ego, conforme terminologias de diferentes áreas do conhecimento). Também apresenta diversas soluções às debilidades encontradas nas outras criaturas: capacidade para aprender por imitação social, capacidade para usar e construir ferramentas, capacidade para negociar e trabalhar em equipe, desenvolver linguagem complexa, entre outras características.</p> <p>Um traço marcante da criatura gregoriana é a cultura – meio de propagação de informação não genético, conhecimento passado para a geração seguinte por meio de aprendizado. Muitos animais usam ferramentas para resolver problemas, o que os coloca, junto com os seres humanos, nesta categoria. O exemplo mais usual, quer do uso de ferramentas, quer de variação cultural, é o dos chimpanzés.²⁵</p> |

Assim, a evolução oferece uma rota que vai desde tipos de mentes simples até tipos de mentes mais complexas, apresentando características e capacidades que evoluíram ao longo do tempo. Também explica como o indivíduo se desenvolve, desde o nascimento até tornar-se um adulto eficiente.

Como o cérebro se organiza

Nos últimos 30 anos, estudos sobre a organização, desenvolvimento e funcionamento do cérebro levaram à elaboração de um modelo selecionista. Esse modelo é conhecido como *teoria da seleção de grupos neuronais* e abreviadamente chamado de darwinismo neural ou neuronal.²⁶

²⁶ EDELMAN, G. M. *Biologia da consciência... Op. cit.*
EDELMAN, G. M. *Building a picture of the brain... Op. cit.*
EDELMAN, G. M. & TONONI, G. *A Universe of consciousness*. New York: Basic Books, 2000.

O processo de seleção natural produziu, no corpo dos seres humanos, diversos sistemas que, durante o desenvolvimento do indivíduo, passam por um processo de seleção darwiniana. São conhecidos como *sistemas evolutivos somáticos*. O sistema imune e o sistema nervoso são exemplos deste fenômeno e repetem os mesmos princípios do algoritmo darwiniano na organização somática de um indivíduo. Trata-se de uma teoria bastante complexa, mas cujos três princípios básicos são fáceis de entender.

O primeiro deles é a ocorrência de uma seleção darwiniana no desenvolvimento do cérebro. A formação da anatomia inicial do cérebro é condicionada geneticamente. Há, porém, um processo de seleção somática. O genoma provê a estrutura geral, mas o ajustamento detalhado é feito pela eliminação de neurônios e sinapses. Após um período inicial de explosão no número de sinapses, há um período de eliminação de cerca de 40% das células. O fenômeno se passa como se o cérebro soubesse que experiências muito importantes aconteceriam nas primeiras semanas de vida. Prepara-se para elas com uma superprodução de neurônios e sinapses, das quais, seletivamente, apenas uma parte será mantida. O resultado deste processo seletivo chama-se *repertório primário*.

O segundo princípio básico, que também é uma seleção, porém, causada pelas experiências vividas, forma o *repertório secundário* e se sobrepõe, temporalmente, à seleção de desenvolvimento, especialmente durante a infância. Ocorre por meio do enfraquecimento ou fortalecimento seletivos de populações de sinapses, conforme a quantidade de estímulos recebidos ou, mais simplesmente, conforme o seu uso. Este processo é modulado pela atribuição de dife-

rentes valores aos estímulos recebidos, ou seja, os estímulos que chegam ao cérebro – externos ou internos – são tratados com importância diferente: a sensação causada pela destruição da pele de um animal recebe um valor bem maior do que uma simples pressão na mesma área. Da mesma forma, estímulos externos que identificam alimentos recebem um valor maior do que um equivalente não alimentar. Cada espécie tem o seu sistema de valores, que inclui informações do seu corpo e informações do ambiente, por meio dos sentidos. O sistema de valores identifica os sinais mais salientes. Morcegos, cobras e peixes elétricos são exemplos de animais que utilizam informações que seres humanos não percebem. Como os diferentes sistemas cerebrais são interconectados, o cérebro tem a capacidade de categorizar os estímulos, conforme a sua importância. Este é um dos aspectos ainda pouco entendidos do processo de organização cerebral. Entretanto, já se sabe como o indivíduo percebe tais valores: como sentimentos e emoções. Assim, fazem parte do conjunto de heurísticas e algoritmos que o cérebro usa no processamento de informações, como veremos adiante.

Tanto o repertório primário quanto o repertório secundário se organizam por meio de mapas.

O terceiro aspecto básico chama-se *cartografia reentrante* ou, abreviadamente, *reentrada*. Para entendê-lo, é preciso ter em conta que uma idéia, do ponto de vista cerebral, pode ser descrita como um conjunto de neurônios estimulados em conjunto. Este conjunto constitui um mapa. Os mapas anatômicos são fundamentais no funcionamento do cérebro, pois estabelecem a relação entre neurônios em contato com o meio externo (retina, pele, etc) e aqueles relacionados a aspectos internos (como memória, centros motores, centros sensitivos etc.). Um exemplo: o conceito “minhoca” é formado por conjuntos de neurônios com a imagem do animal, outros, com o som da palavra, outros, com as experiências arquivadas na memória, segundo as quais minhocas tiveram relevância. As ligações entre diferentes conjuntos de neurônios tornam-se cada vez mais profundas à medida que mais informações são incorporadas simultaneamente: ver, ouvir, tocar etc. Para se ter uma idéia da complexidade do cérebro, estima-se que uma imagem visual, no cérebro de macacos, é composta por mais de trinta componentes, segundo mapas detectados no córtex visual. Alguns detectam o sentido do movimento, outros, a cor, os contornos etc.²⁷

²⁷ EDELMAN, G. M. *Biologia da consciência...* Op. cit.

Uma definição formal das reentradas é a de correlações espaço-temporais de eventos, que selecionam, no sentido darwiniano, os vínculos entre determinados mapas. Imagine, agora, que alguém participe de uma refeição exótica, na qual sejam servidas minhocas e que, para horror dos convidados, a situação é tal que recusar seria uma grande gafe. A partir desta data, o sabor minhoca, ou o conjunto de neurônios que o representa, passará a ser estimulado sempre que a palavra vier à mente, ou quando ocorrer a visão do animal. Quanto mais o comensal pensar no assunto, mais os conjuntos de neurônios se tornam vinculados: visão de minhoca? aquele tal jantar? lembrança do gosto de minhocas.

Eventos distintos, em diferentes mapas, podem se correlacionar no espaço e no tempo, como o aroma e a imagem de um saboroso prato de comida. Isso ocorre por meio de um grande número de conexões recíprocas e paralelas entre diferentes mapas, neste caso, olfativos e visuais. Estes mapas se tornam ligados em circuitos capazes de respostas coerentes. Podem estar vinculadas a lembranças de sua mãe servindo o alimento que, por sua vez, pode estar ligado a outras lembranças da infância, num ciclo sem fim. Talvez, por isso, seja tão difícil, senão impossível, parar de pensar. Conforme Edelman²⁸, o cérebro está mais em contato consigo mesmo do que com qualquer outra coisa.

O darwinismo neural propõe que as unidades de seleção, no cérebro, não são os neurônios e sim, os mapas e as relações entre eles.

Pensamentos como algoritmos e heurísticas

O darwinismo neural fornece uma descrição física de como o cérebro se organiza. Também vimos exemplos de que alguns comportamentos e processos mentais são algoritmos. Na ausência de qualquer outra hipótese fisicamente sustentável sobre o processamento da informação do cérebro, é razoável a hipótese de que, talvez, todos os processos mentais possam ser algoritmizados.

Animais precisam tomar decisões rápidas e, muitas vezes, uma técnica que procure a melhor decisão, entre milhares, pode levar um tempo maior do que o disponível pelo animal. As técnicas utilizadas pelo cérebro, então, são heurísticas.

Heurísticas são técnicas que se aplicam sobre processos – quer mentais, quer computacionais – que sacrificam a precisão e a perfeição para se conseguir uma resposta medianamente boa, em um tempo aceitável. Evitam o problema da explosão combinatória, que pode ocorrer quando

²⁸ EDELMAN, G. M. *Biologia da consciência...* *Op. cit.*

um algoritmo tentar examinar todas as soluções possíveis. Em um jogo de xadrez, pode haver 10^{120} combinações possíveis. Um programa de computador, com o objetivo de jogar xadrez, não poderá tentar computar todas as opções em um tempo humanamente razoável.

O termo *heurística* descende da palavra grega *heuriskein*, que significa encontrar ou descobrir. Ao contrário do algoritmo, uma heurística não exige que uma solução seja encontrada sempre. Quando isso acontece, não existe garantia de que a solução encontrada seja a única ou seja ótima. Quando uma heurística não encontra uma solução, não há garantia de que a solução procurada não exista. Entretanto, na vida real, raramente necessitamos da solução ótima. Uma solução boa ou mesmo mediana já é aceitável. O custo, em tempo e energia, para procurar o melhor emprego ou o melhor cônjuge da região pode estar além de nossas possibilidades. Um bom cônjuge ou emprego é realisticamente acessível e já provê bastante satisfação.

Em termos de técnica para a procura das melhores soluções possíveis, a evolução funciona como uma heurística. A seleção natural não garante que determinada espécie evoluirá a ponto de garantir a existência de seus descendentes. Diferentemente, processos algorítmicos garantem uma solução para cada entrada de seu domínio, quando esta existe. Supondo que o problema de uma espécie seja evoluir e garantir a descendência, as leis que regem a seleção natural e o processo evolutivo planetário não oferecem garantia de solução para tal problema, ainda que, eventualmente, possam levar a uma solução. Sendo assim, a adaptação baseada na seleção natural é um processo heurístico. Vale observar ainda que espécies que sobrevivem à seleção natural não estão necessariamente em seu nível adaptativo ótimo.

O melhor exemplo de heurística é a procura de um parceiro mais definitivo, após haver tido alguns ou algumas namorado(a)s, na adolescência. Quando se encontra um(a), nada nos garante que seja a melhor escolha e, pior, não há nenhum procedimento infalível conhecido que garanta a obtenção de um(a) bom(a) parceiro(a). Aliás, este assunto é tão importante que há uma ampla literatura científica sobre o tema, como no estudo de Todd²⁹, mostrando que a técnica da procura do melhor parceiro sexual é um meio termo entre a heurística de comprar frutas e legumes no supermercado e a heurística de escolher a melhor universidade para se estudar.

Ao contrário da escolha de alimentos, para a qual se vai a várias lojas para verificar a melhor relação custo-bene-

²⁹ TODD, P. M. Searching for the next best mate. In: CONTE, R.; HEGSELMANN, R. & TERNA, P. (eds.). *Simulating Social Phenomena*. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

fício, a procura de um parceiro envolve gastos consideráveis. Diferente também da escolha de uma universidade, na qual os méritos de cada uma são conhecidos e o problema é saber em qual delas se consegue entrar, a procura de um parceiro não nos permite fazer uma hierarquia de qualidade *a priori*: é preciso namorar para poder classificar corretamente. Além disso, há o risco de que, ao se abandonar um parceiro, todas as próximas escolhas sejam piores.

Voltando-se ao processamento mental, é preciso levar em conta que o cérebro é limitado e o mundo muito complexo. Nessas condições, a seleção natural favorecerá o desenvolvimento de heurísticas simples e rápidas nas inferências feitas sobre o ambiente e nas tomadas de decisões. A mais simples e bastante utilizada é a heurística de reconhecimento, que faz uso da vasta capacidade de reconhecimento para obter inferências sobre aspectos desconhecidos da realidade.³⁰ Um exemplo: qual deve ser a melhor universidade, a Universidade de São Paulo (USP) ou a Universidade de Bossoroca? Se sua resposta foi a USP, você usou a heurística de reconhecimento, cuja estrutura é bem simples: na ausência de informação específica, busque um outro critério, neste caso, a quantidade de vezes que se ouviu falar de cada uma das duas universidades. Como nunca se ouviu falar da Universidade de Bossoroca, pequena cidade do interior do Rio Grande do Sul, e como a USP é bastante conhecida, toma-se uma variável pela outra. O interessante desta heurística é que resulta em maior sucesso quando o desconhecimento é grande. Se a pergunta se referisse à Universidade Federal do Rio de Janeiro versus a da Bahia, a dificuldade seria bem maior.

Há vários exemplos da utilização da heurística de reconhecimento por animais: o uso do cheiro como reconhecimento de parentesco, ou a escolha de alimentos mais parecidos com os que o animal já experimentou, quando exposto a um conjunto de opções desconhecidas. Essa estratégia também pode ser vista, com facilidade, em restaurantes exóticos com sistema de *self-service*.

As potencialidades dessa heurística são ainda mais amplas. Gigerenzer e colaboradores³¹ compararam leigos e especialistas, norte-americanos e alemães, utilizando diversas estratégias para a escolha de ações em bolsas de valores. De cinco estratégias testadas, a heurística de reconhecimento foi a que produziu maior retorno, quer no mercado de origem dos indivíduos testados, quer em mercado estrangeiro. Como se apóia na ignorância, leigos acabaram por se sair tão bem quanto especialistas em mercados de capitais.

³⁰ GIGERENZER, G.; TODD, P. M. & ABC Research Group. *Simple heuristics that make us smart*. New York: Oxford Academic Press, 1999.

³¹ GIGERENZER, G.; TODD, P. M. & ABC Research Group. *Op. cit.*

Uma outra heurística mental bastante empregada é a heurística minimalista, descrita no quadro 3. Existe com diversas variações, especialmente na etapa 1, na qual podem ser colocadas outras regras de procura. A heurística proposta por Todd³² para a escolha de parceiros é uma variante da heurística minimalista, que sugere, particularmente, que se examine quantos parceiros são possíveis durante um certo período. Após este período, escolha o primeiro que for melhor que a amostra examinada. A questão é: qual a proporção de indivíduos que se deve examinar (namorar) antes da escolha definitiva? Um exame de 8% da amostra (conjunto de indivíduos disponíveis para namorar) lhe garante um parceiro entre os 25% melhores da população, em 90% das vezes!

³² TODD, P. M. *Op. cit.*

Quadro 3: Etapas da heurística minimalista (segundo Gigerenzer e colaboradores³³)

| | |
|---------|---|
| Etapa 0 | Se aplicável, use a heurística de reconhecimento, ou seja, se apenas um objeto é reconhecível, faça a predição de que ele é o que tem maior valor, conforme o critério escolhido. Se nenhum for reconhecível, escolha qualquer um, aleatoriamente. Se todos forem reconhecíveis, passe para a etapa seguinte. |
| Etapa 1 | Busca ao acaso: escolha uma característica, ao acaso, e examine os valores desta característica nos objetos a serem avaliados. |
| Etapa 2 | Regra de parada: se um dos objetos tem, para esta característica, um valor igual a "1" e os demais têm valor "0" ou desconhecido, interrompa a busca e vá para a etapa seguinte. Caso isso não ocorra, volte à etapa 1 e escolha outra característica. Se não existirem outras características, faça uma escolha aleatória. |
| Etapa 3 | Regra de decisão: faça a predição de que o objeto com maior valor nesta característica é a melhor escolha nesse critério. |

³³ GIGERENZER, G.; TODD, P. M. & ABC Research Group. *Op. cit.*

³⁴ MCGUIRE W. J. Creative hypothesis generating in psychology: some useful heuristics *Annu. Rev. Psychol.*, 48:1-30, 1997.

³⁵ Jogos de soma zero são aqueles em que sempre há um perdedor e um vencedor, como o xadrez. Naqueles de soma não zero pode haver mais de um vencedor, alguns ou todos podem ganhar alguma coisa, como os pontos obtidos em uma corrida de automóveis.

³⁶ RIDLEY, M. *As origens da virtude*. Rio de Janeiro: Record, 2000.

As pesquisas sobre heurísticas e algoritmos mentais têm-se mostrado bastante fecundas. McGuire³⁴ descreve cerca de 50 heurísticas envolvendo processos criativos na ciência. O estudo das regras mentais para uma importante decisão que tomamos todos os dias – cooperar ou competir? – tem merecido competições entre programas de computador desde a década de 1970. A vida em sociedade é tratada como um jogo de soma não zero³⁵ e o problema é desenvolver o melhor método para decidir quando cooperar ou competir com os indivíduos a nossa volta³⁶.

A que conclusões chegamos, então?

Conclusões

Parece haver indícios suficientes para uma hipótese científica indutiva. Se muitos processos cerebrais (ou mentais) podem ser descritos com heurísticas ou algoritmos, pergunta-se: não seria possível uma generalização, a de que todos os processos mentais são processos dessas categorias e podem emergir – pelo menos em teoria, atualmente – em um computador? Processos mentais, assim como algoritmos e heurísticas, não dependem do material no qual ocorrem, podendo aparecer em substratos biológicos ou artificiais.

Os processamentos mentais mais simples, como o reconhecimento de uma face, ainda apresentam aspectos desconhecidos, mas a estrutura da inteligência, cujo conhecimento paulatinamente se delineia, parece seguir este modelo proposto. Como tais processos apareceram por meio da seleção natural, poder-se-ia concluir que a computação e a inteligência artificiais são símiles de processos naturais. Afinal, não seria uma impossibilidade o cérebro humano produzir algum artefato estranho a sua maneira de funcionar? Dito de outra maneira: o cérebro humano talvez não consiga imaginar uma maneira de processar informação que seja dissimilar à sua própria maneira de estruturar perguntas e respostas sobre o mundo. Deve-se observar que as regras básicas do darwinismo, quer aplicadas a espécies, aos neurônios no cérebro, quer aplicadas aos sistemas artificiais, são as mesmas.

Assim como não há uma separação entre a evolução animal e a evolução humana, não há uma fronteira explícita entre a evolução humana e a evolução dos computadores. Um caminho evolutivo rumo à complexidade, iniciado há milhões de anos atrás, pode estar obtendo um novo alento com a adição de tecnologias de inteligência artificial.

Renato Zamora Flores é graduado em Medicina, doutor em Genética e Biologia Molecular e professor do Departamento de Genética da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. rzflores@ufrgs.br

João Paulo Schwarz Schüler é graduado e mestre em Ciências da Computação e responsável pelo desenvolvimento de *softwares* na empresa Prodttare, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. jp@schulers.com