

Um modelo de átomo cognitivo fundamentado em malhas de sincronismo

José Roberto Castilho Piqueira;
Henrique Schutzer Del Nero

Como citar: PIQUEIRA, J. R. C.; DEL NERO, H. S. Um modelo de átomo cognitivo fundamentado em malhas de sincronismo. *In:* GONZALES, M. E. Q. *et al.* (org.). **Encontro com as ciências cognitivas**. Marília: Faculdade de Filosofia e Ciências, 1997. p. 159-169 DOI: <https://doi.org/10.36311/1997.978-85-60810-30-7.p159-169>



All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição- NãoComercial-SemDerivações 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-No comercial-Sin derivados 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

UM MODELO DE ÁTOMO COGNITIVO FUNDAMENTADO EM MALHAS DE SINCRONISMO

José Roberto Castilho PIQUEIRA¹

Henrique Schutzer DEL NERO²

Introdução

Ao se estudar ciência cognitiva, combinação de vários ramos da ciência convencional, em uma tentativa de dar uma versão contemporânea ao problema mente-corpo (Gardner, 1995), várias ferramentas de computação, matemática e física têm sido chamadas a dar suas contribuições, estendendo seu domínio de aplicabilidade e resolvendo de maneira interessante questões de modelagem cognitiva.

Cada ferramenta relaciona-se com a maneira particular do pesquisador estabelecer suas prioridades dentro do múltiplo esqueleto dos estudos cognitivos, ainda em formação.

Assim, aqueles que optam por paradigmas conexionistas propõem modelos de redes neurais como explicativos e preditivos dos processos mentais (Rumelhart & McClelland, 1986). Esses modelos tiveram tanto progresso que, entre outras coisas, revolucionaram a engenharia de controle, sendo aplicados, em larga escala, a situações que envolvem identificação de sistemas e controle adaptativo (Chen, 1995).

A opção por modelos fundamentados em arquiteturas von Neumann e lógica de sistemas especialistas, através do estudo do processamento de linguagens, proporcionou, também, interessantes idéias explicativas. A grande beneficiária desse tipo de postura foi, sem dúvida, a engenharia, que ganhou novos algoritmos e lógicas, biologicamente inspiradas, resolvendo de maneira econômica e precisa problemas tecnológicos importantes (Holland, 1992).

¹ EP-USP - e-mail: piqueira@lac.usp.br

² IEA-USP - e-mail: hdelnero@usp.br.

Nos modelos de redes neurais, a matemática que interessa é aquela originária dos métodos de Física Estatística e na opção por modelos de arquiteturas von Neumann tradicionais, a Lógica dita as normas de modelagem.

Aqui, segue-se uma linha metodológica diferente das duas anteriores, procurando associar os processos cognitivos às Neurociências, entendendo que toda tarefa cognitiva humana expressa um estado do sistema nervoso central (Ruch et al, 1965).

Claro está que este não é um artigo de defesa de um paradigma neurobiológico. Trata, somente, de explicar qual a matemática mais adequada à modelagem dos processos cognitivos, considerando-os como resultantes da expressão coletiva de uma série de mecanismos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no interior do sistema nervoso central, mediados por interações com o ambiente.

Adotado o primado das Neurociências, a matemática mais adequada às modelagens parece ser originária da Teoria dos Sistemas Dinâmicos que tem, quando utilizada nas áreas Biológicas, sido denominada Biomatemática (Murray, 1993).

É desse tópico que este artigo trata. Não pretendendo apresentar teoremas ou métodos de cálculo, mas apresentando os principais contextos de sua aplicação, procura discutir questões relativas à modelagem nas suas diversas instâncias.

A parte inicial compreende alguns dados históricos da evolução desses métodos, com o intuito de relacioná-los com os problemas biológicos mais adequados à sua aplicação.

Em seguida, algumas peculiaridades da modelagem, através da Biomatemática, serão discutidas, ficando evidentes suas adequações e inadequações. A questão do realismo biológico é, então, tratada, numa tentativa de advertir sobre os perigos da transformação desses métodos em alguma espécie de panacéia (Piqueira et al, 1995).

Conclui-se com uma discussão de cuidados a serem tomados, nos diversos estágios de modelagem, e com algumas idéias de quais são os pontos mais críticos do uso de métodos matemáticos e computacionais em problemas de natureza biológica.

Teoria de Sistemas Dinâmicos e Biomatemática

Existe, entre a Teoria dos Sistemas Dinâmicos e a Biologia, uma afinidade teórica natural, uma vez que células, tecidos, órgãos, sistemas, organismos e populações são estruturas que operam, se organizam e evoluem, ao longo do tempo, através de possíveis leis, cujas descobertas são um desafio constante para a inteligência humana.

Os mecanismos oscilatórios dos sistemas cardiovascular, respiratório, digestivo, endócrino e nervoso, as trocas de sinais elétricos envolvidas nos processos de aprendizado de dinâmica de movimentos, as oscilações de comportamento mediadas por sinapses e ações do ambiente, parecem encontrar uma estratégia para sua difícil modelagem nas oscilações não-lineares. (Mittental & Baskin, 1992).

Além disso, a modelização da sazonalidade de propagação de doenças e da sensibilidade bacteriana, problemas de extrema complexidade e envolvendo um incontável número de interações, encontram no processamento e identificação de oscilações simples, quase periódicas e caóticas, boas respostas, tanto no que diz respeito à descrição como a predição e prescrição (Wilson et al., 1994).

Os problemas de dinâmica populacional, com populações e suas taxas de variação representando variáveis de estado, foram modelados através de equações dinâmicas com tanto sucesso que já constituem uma espécie de citação clássica, não se concebendo estudar ecologia sem as equações de Lotka-Volterra (Engel, 1978).

Essas equações são tão interessantes que são usadas em todo o tipo de problema que envolva competição de categorias, quer elas sejam espécies de seres, concentrações de elementos químicos ou, até mesmo neurônios, competindo pelo estabelecimento de sono REM ou não-REM (Hobson, 1988).

Aqui, a preocupação é discutir a modelagem de processos cognitivos conscientes, através do sincronismo de oscilações apresentadas por conjuntos de neurônios, cada um deles encarado como um oscilador individual, cujo padrão de oscilação depende de seus parâmetros constitutivos, da interação com outros neurônios e da interação com o meio ambiente (Aerstsén, 1993).

Esses modelos não serão descritos com detalhes neste artigo, aparecendo em outros trabalhos (Del Nero et al, 1995, Piqueira et al, 1995).

O único ponto importante a ser ressaltado e utilizado na seqüência, relaciona-se com o fato dos modelos serem expressos por equações diferenciais ordinárias, pressupondo duas escalas temporais diferentes : uma relativa à uma dinâmica rápida de variação temporal de estados quando da execução de uma tarefa e outra lenta, relativa ao ajuste de parâmetros durante o aprendizado (Piqueira, 1993).

Partindo do pressuposto que as descrições se fundamentam em malhas de sincronismo de fase acopladas e, portanto, em equações não-lineares, a linha seguida é a da Teoria de Bifurcações que consiste em determinar regiões do espaço de parâmetros associadas a classes de soluções topologicamente equivalentes (Wiggins, 1990), em vez de procurar soluções que explicitem a evolução temporal das grandezas envolvidas.

Isto é, as informações importantes a respeito do sistema modelado são dadas através de seus possíveis atratores, observados nos espaços de estado, podendo, de acordo com os parâmetros, serem representados por pontos de equilíbrio, ciclos-limite, atratores caóticos, atratores estranhos e atratores quase periódicos.

Os diagramas de bifurcação, traçados no espaço de parâmetros, representam as regiões de estabilidade estrutural, correspondentes a execuções de tarefas, e conjuntos de bifurcação, correspondentes ao aprendizado e chaveamento de modos de operação mental (Del Nero et al, 1995 ; Piqueira et al, 1995 ; Jing, 1983).

Breviário de Teoria de Bifurcações

As questões relativas à dinâmica dos sistemas físicos têm fascinado o homem por centenas de anos e seu estudo teve um grande desenvolvimento a partir dos problemas de Mecânica Celeste, especialmente aqueles relativos aos movimentos dos corpos no sistema solar.

Nesse sentido, Newton foi, talvez, o primeiro cientista a estabelecer equações gerais e elegantes para o estudo desses problemas (Fauvel et al, 1988).

Entretanto, apesar da extrema elegância da formulação Newtoniana, as equações diferenciais obtidas, devido a sua natureza não-linear, apresentam grandes dificuldades para solução, sendo que o estudo de tais problemas ocupou os matemáticos durante os séculos XVIII e XIX (Guckenheimer & Holmes, 1983).

Os métodos desenvolvidos, em geral relacionados com a Análise Matemática, revelaram-se ineficientes nos problemas não-lineares, exceto os métodos de perturbação quando aplicados a certas classes especiais desses problemas.

Por essa razão, Poincaré, no final do século passado, iniciou uma tentativa de combinar métodos geométricos com a análise matemática, procurando estabelecer propriedades globais do espaço de estados, associando famílias de soluções a regiões do espaço de parâmetros (Poincaré, 1880, 1890, 1899).

Essa atitude gerou a chamada Teoria Qualitativa de Equações Diferenciais e, a partir dos chamados Teoremas de Índice, uma metodologia adequada para caracterização de estabilidade estrutural e bifurcações foi desenvolvida, principalmente, para sistemas de segunda ordem (Piqueira, 1987).

A metodologia descrita foi desenvolvida e complementada, na primeira metade do século XX, por matemáticos como Andronov, Liapunov, La Sale e Peixoto, resultando em teoremas importantes a respeito de condições necessárias e suficientes para a existência de determinados tipos de solução (Andronov et. al, 1966).

A tentativa de estender esses resultados a sistemas de ordem maior do que dois gerou o problema da chamada *Ferradura de Smale*, espécie de comportamento aleatório, originário de um sistema determinístico e estruturalmente estável (Guckenheimer & Holmes, 1983).

Esses fatos, combinados com o estudo das equações de Lorenz e da dinâmica do mapeamento logístico, criaram uma expectativa nova para o uso da Teoria de Sistemas Dinâmicos em questões fora do âmbito da Física e da Matemática, uma vez que a sensibilidade às condições iniciais, própria dos processos naturais complexos, pode estar prevista nos sistemas de equações, ainda que elas sejam determinísticas (Stewart, 1989).

Assim, a riqueza de comportamentos dos sistemas não-lineares, representada por soluções que vão desde pontos de equilíbrio, globalmente assintoticamente estáveis, até oscilações caóticas, passando por ciclos-limite e oscilações quase periódicas, parece estar de acordo com a variabilidade de comportamento dos sistemas naturais.

Vários métodos de verificação de existência de comportamentos caóticos foram desenvolvidos, voltados, inicialmente, para sistemas conservativos (Melnikov, 1963

; Chow et. al, 1980 ; Chirikov, 1979 ; Holmes & Marsden, 1982).

Além disso, a partir de problemas de Mecânica dos Fluidos, alguns trabalhos de identificação de aparecimento de ciclos-limite a partir de pontos de equilíbrio, passaram a dar uma melhor visão do problema de estabelecimento de turbulência em fluxos de campos de vetores, propondo-se o chamado Teorema de Hopf (Ruelle & Takens, 1971).

Estava, assim, estabelecido o quadro para que os pesquisadores das áreas biológicas e humanas redescobrissem a Matemática e a Física, pois estavam reintroduzidas a imprevisibilidade e a possibilidade de oscilações variadas, tão necessárias para os modelos das ciências ditas não exatas.

O Modelo de Osciladores Acoplados

O modelo, a ser apresentado aqui, visa estabelecer o mínimo módulo de conjunto de osciladores para a execução de tarefas cognitivas, permitindo estabelecer a alternância entre a operação no modo automático e no modo voluntário (Piqueira & Del Nero, 1992).

A metodologia a ser utilizada é a da Biomatemática, tratando-se de seguir caminhos não-reducionistas, uma vez que não há preocupação em tratar fenômenos que ocorrem em um certo nível de organização reduzindo-os a de processos que ocorrem nos níveis de organização inferiores (Engel, 1978).

Os dados experimentais, relativos ao nível de organização observado, constituem o fator determinante na execução do modelo e na análise das séries temporais, verificando eventuais padrões periódicos, quase periódicos, aleatórios ou caóticos, resultando em conjuntos de equações diferenciais ou de diferenças, governadas por parâmetros.

Espera-se que essas equações tenham a capacidade de descrição, predição e prescrição, sem exigir-lhes homeomorfismos de blocos e parâmetros com o sistema biológico real. Isto é, quando se modelam, por exemplo, as oscilações na dinâmica de populações através das equações de van der Pol, não se procuram análogos biológicos de um oscilador eletrônico a válvulas. Importa, apenas, que os resultados numéricos dados pelas equações sejam de acordo com o processo modelado, dentro de uma determinada

precisão.

Essa atitude é produtiva, principalmente, quando o processo modelado envolve um grau de complicação intratável. Por exemplo, ao se estudar modelos epidemiológicos, é muito difícil considerar os processos biológicos, químicos e físicos subjacentes, podendo, entretanto, ser útil construir equações fundamentadas em dados de incidência anteriores, proporcionando alguma ferramenta de predição.

Com essa postura, concebe-se um conjunto mínimo para proporcionar alternância de operação automática e voluntária, constituído por duas malhas de sincronismo de fase (PLL), associadas em cascata, sendo uma de terceira ordem e outra de segunda ordem.

Esse conjunto será, aqui, denominado átomo cognitivo (AC) e sua concepção se fundamenta em evidências reportadas de que o sistema nervoso central opera, fundamentalmente, através do controle e sincronismo mútuo de seus diversos conjuntos de neurônios, encarados como osciladores bioquímicos (Williams, 1992 ; Glass & Mackey, 1979 ; Orpwood, 1994, King, 1991).

Considera-se, então, que tais conjuntos podem ser modelados como PLLs, cujas fases e frequências de oscilação local são coordenadas através de sinais provenientes dos outros conjuntos, considerados também como PLLs.

Cada AC tem, como entrada, o sinal resultante da combinação integrada dos sinais de saída dos outros AC a ele conectados. Essa entrada coordena a operação de um PLL de terceira ordem, com características estáveis de estrutura e que, via de regra, sincroniza-se com seu meio externo.

Nessas condições, a saída do PLL de terceira ordem provoca, também, o sincronismo do PLL de segunda ordem do mesmo átomo. Essa saída funciona como entrada para os AC adjacentes, sincronizando-os, de maneira a constituir o modo automático de operação.

Apesar da estrutura dos PLLs de terceira ordem de cada AC ser estável, alguns sinais particulares provocam-lhes o aparecimento de ciclos-limite, oscilações auto-sustentadas isoladas, resultantes de uma mudança qualitativa, no comportamento do circuito de entrada, chamada bifurcação de Hopf (Piqueira, 1987).

Essa oscilação, no módulo de entrada de um dado AC, propaga-se para o PLL de segunda ordem da saída, produzindo-lhe mecanismos mais finos de comportamento como sinais quase periódicos e comportamentos caóticos. A propagação desses estados, entre os diversos AC, provoca comportamentos peculiares e finamente diferenciáveis um do outro.

Essa mudança qualitativa, experimentada pelo sistema, está sendo tomada como compatível com a passagem do modo automático para o modo voluntário no sistema de átomos cognitivos.

Limitações de Metodologia e de Modelagem

O modelo de átomo cognitivo apresentado contém vários pontos passíveis de análise mais crítica. Conhecê-los é fundamental para um bom prosseguimento do trabalho de pesquisa. Alguns dos problemas são relativos à metodologia geral da Biomatemática; outros, à escolha da modelagem cognitiva através do estudo dos processos neurofisiológicos e outros, relativos à hipótese que os mecanismos neurais são descritíveis por oscilações não-lineares acopladas.

Essas limitações podem ser agrupadas e analisadas de maneira integrada, considerando-se que o processo de modelagem pressupõe as seguintes hipóteses:

- 1 Os processos cognitivos estabelecem-se e operam através da fisiologia do sistema nervoso central.
- 2 A formação e operação do sistema nervoso central são modeláveis através de equações diferenciais ordinárias, cujos parâmetros e variáveis de estado contêm as mudanças temporais correspondentes.
- 3 As equações obtidas, apesar de complicadas, são tratáveis por métodos computacionais.

A hipótese 1 é criticável, pois desconsidera a influência de fatores ambientais, culturais e até mesmo genéticos que, sabidamente, são fundamentais em todo e qualquer processo cognitivo. A resposta a esse tipo de crítica é que, embora procedente, levar em conta todos esses fatores inviabilizaria qualquer ação de modelagem.

Dentre as várias linhas possíveis, uma foi escolhida, não se desprezando as outras e esperando estudar bem pelo menos um recorte do problema.

A hipótese 2 se fundamenta na possibilidade de executar medidas físicas sobre o sistema que expressem homeomorfismo com a realidade biológica, visualizando essa complexa realidade através de medidas físicas simplificadas.

Além disso, escolhido o protocolo de medidas adequado, consideramos existir correspondência homeomórfica entre as evoluções temporais de um sistema físico real e as soluções das equações no abstrato espaço de funções.

A melhoria da correspondência entre o espaço biológico e o físico e entre o físico e o matemático implica a complicação das equações, inviabilizando tratamentos analíticos.

É nesse ponto que se recorre ao computador, passando do abstrato espaço de funções para o concreto mundo de correntes e diferenças de potencial dos circuitos digitais. Aí, podem aparecer pseudo-soluções, inerentes aos processos numéricos mas inexistentes no espaço de funções (Haken, 1987).

Concluindo, não há, aparentemente, como contornar a crítica à hipótese 1, mas supondo os pontos de partida, aqui descritos, as seguintes instâncias de validação dos modelos devem ser consideradas :

- 1) Do biológico para o físico, para garantir que as medidas proporcionadas pelos instrumentos, inerentes aos protocolos experimentais, sejam relevantes.
- 2) Do físico para o matemático, tentando verificar se as abstrações originam boas descrições, predições e prescrições.
- 3) Do matemático para o computacional, evitando as pseudo-soluções originárias dos métodos numéricos.

Agradecimentos

Ao IEA-USP e à EP-USP, onde esse trabalho tem sido desenvolvido e à Prof. Maria Eunice Q. Gonzales da UNESP, que viabilizou nossa participação neste colóquio.

Referências bibliográficas

- AERTSEN, A. *Brain theory*. Amsterdam: Elsevier, 1993.
- ANDRONOV, A. A. VITT, E. A., KHAIKIN, S. E. *Theory of oscillators*. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- CHEN, HAI-WEN. Modeling and identification of parallel nonlinear systems: structural classification and parameter estimation methods. *Proceedings of the IEEE*, v. 66, p. 37, Jan., 1995.
- CHIRIKOV, B. V. A universal instability of many dimensional oscillator system. *Physics Reports* v. 52, n.5, p. 263-379, 1979.
- CHOW, SHUI-NEE, HALE, J. K., MALLETT, PARET, J. An example of bifurcation to homoclinic orbits. *Journal of Differential Equations*, v. 37, p. 351, 373, 1980.
- DEL NERO, H. S., MARANCA, A. P., MACIEL, L. A., PIQUEIRA, J. R. C. Neurodynamics: bifurcations and mental partitions. *International Neural Networks Society* (Washington, D.C.), v. 1, p. 338-342, jul., 1995.
- ENGEL, A. B. *Elementos de biomatemática*. Washington, D.C.: Secretaría General de la OE, 1978
- FAUVEL, J., FLOOD, R., SHORTLAND, M., WILSON, R. *Let Newton Be*. New York: Oxford University Press, 1988.
- GARDNER, H. *A nova ciência da mente*. São Paulo: Editora USP, 1995.
- GLASS, L., MACKEY, M. C. Pathological conditions resulting from instabilities in physiological control systems. *Annals of the New York Academy of Science* (New York) v. 316, p. 214-35, 1979.
- GUCKENHEIMER, J., HOLMES, P. *Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcation of vector fields*. New York: Springer Verlag, 1983
- HAKEN, H. *Computational systems, natural and artificial*. Berlin: Springer Verlag, 1987.
- HOBSON, J. A. *The dreaming brain*. New York: Basic Books, 1988.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. Cambridge: MIT Press, 1992.
- HOLMES, P. J., MARSDEN, J. E. Horseshoes in perturbation of hamiltonian systems with two degree of freedom. *Communications of mathematical Physics*, v. 82, p. 523-44, 1982.
- JING, ZHU-JUN. Application of qualitative methods of differential equations to study phase lock loops. *Journal of Applied Mathematics*, v. 43, n. 6, Dec., 1983.
- KING, C. C. Fractal and chaotic dynamics in nervous systems. *Progress in neurobiology*. v. 36, p. 279-308, 1991.
- MEL'NIKOV, V.K. On the stability of the center for time periodic perturbations. *Transactions of Moscow Mathematical Society*, v. 12, p. 1-57, 1963.
- MITTENTHAL, J. E., BASKIN, A. B. *The principles of organization and organisms*. Santa Fé: Addison-Wesley Publishing Co, 1992.
- MURRAY, J. D. *Mathematical biology*. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- ORPWOOD, R.D. A possible neural mechanism underlying consciousness based on the pattern processing capabilities of pyramidal neurons in the cerebral cortex. *Journal of Theoretical*

Biology, v. 169, p. 403-18, 1994.

- PIQUEIRA, J. R. C. Aplicação da teoria qualitativa de equações diferenciais a problemas de sincronismo de fase. São Paulo, 1987 Tese (Doutorado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.
- _____. Biomatemática: métodos e limitações. *Trans/Form/Ação* (São Paulo), v. 19, p. 141-9, 1996.
- _____. Estabilidade estrutural e organização. *Coleção Documentos*, IEA, USP, set., 1993.
- PIQUEIRA, J. R. C., DEL NERO, H. S. Cognition: determinism, chaos and emergence. *IEEE Systems, Man and Cybernetics*, (Chicago), p. 733-6, 1992.
- PIQUEIRA, J. R. C., MARANCA, A. P., MACIEL, L. A., DEL NERO, H. S. Third-order phaselock loop as a trigger for cognitive tasks. *International Neural Networks Society*. (Washington, D.C.) v. 1, p. 347-351, jul., 1995.
- POINCARÉ, H. Mémoire sur le courbes définies par les équations différentielles. Paris: Gauthier-Villar, 1880. v. I.
- _____. Sur les équations de la dynamique e le problème de trois corps. *Acta Mathematica*, v. 13, n. 1, p. 270, 1890.
- _____. *Les methodes nouvelles de la mecanique celeste*. Paris: Gauthier Villars, 1899. 3v.
- RUCH, T. C., PATTON, H. D., WOODBURY, J. W., TOWE, A. L.. *Neurophysiology*. Philadelphia: W. B. Saunders Company, 1965.
- RUELE, D., TAKENS, F. On the nature of turbulence. *Communications of Mathematical Physics*, v. 20, p. 167-92, 1971.
- RUMELHART, D. E., McCLELLAND, J. L. (Eds.) *Parallel distributed processing*. Cambridge: MIT Press, 1986.
- STEWART, I. *Does God Play Dice?* Oxford: Basil Blackwell, 1989.
- WIGGINS, S. *Introduction to applied nonlinear dynamical systems and chaos*. New York: Springer Verlag, 1990.
- WILLIAMS, T. L. Phase coupling in simulated chains of coupled oscillators representing the lamprey spinal cord. *Neural Computation*, v. 4, p. 546-58, 1992.
- WILSON, M. E., LEVINS, R., SELMAN, A. *Disease in evolution*. New York: The New York Academy of Sciences, 1994.