

Os conceitos de auto-organização e complexidade: uma tentativa de interpretação

José Roberto Castilho Piqueira

Como citar: PIQUEIRA, J. R. C. Os conceitos de auto-organização e complexidade: uma tentativa de interpretação. *In:* GONZALES, M. E. Q.; BROENS, M. C. (org.). **Encontro com as Ciências Cognitivas**. Marília: Unesp Marília Publicações, 1998. 2 v. p. 95-110. DOI: <https://doi.org/10.36311/1998.85-86738-03-4.p95-110>



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).

OS CONCEITOS DE AUTO-ORGANIZAÇÃO E COMPLEXIDADE: UMA TENTATIVA DE INTERPRETAÇÃO

José Roberto Castilho PIQUEIRA¹

Introdução

Há alguns anos, em contato com o Grupo de Auto-Organização do Centro de Lógica Epistemologia e História da Ciência (CLE-HC) da UNICAMP, participo de interessantes discussões sobre as idéias de Auto-Organização e Complexidade, versando sobre uma grande diversidade de sistemas : físicos, biológicos, em diversos níveis de organização, comportamentais, sociais, políticos, econômicos e culturais.

Dentro desse panorama, interessou-me o trabalho sobre sistemas biológicos e, principalmente , a tentativa de estabelecer relações entre conceitos da Matemática e da Física e os fenômenos biológicos, colocando ênfase nos processos e suas explicações, em vez de privilegiar resultados e classificações (Gould, 1977).

Nesse sentido, iniciei escrevendo um artigo sobre o assunto (Piqueira, 1992) , como tentativa de definir organização de um sistema através do conceito de medida entrópica de um sistema dinâmico. A idéia de aplicar a Teoria de Sistemas Dinâmicos a problemas biológicos sempre me pareceu interessante, principalmente, levando em conta a possibilidade de incluir dinâmicas em escalas temporais diferentes, gerando as idéias de dinâmicas rápidas, lentas e intermediárias (Caticha, 1994).

Esse artigo, embora passível de muitas críticas, foi uma tentativa que suscitou debates proveitosos que redundaram em um segundo artigo (Piqueira , 1994), explorando a associação da idéia de complexidade e o conceito de entropia informacional (Shannon & Weaver, 1949).

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

Ambos os artigos têm norteado o trabalho que tenho conduzido ultimamente, em conjunto com alguns companheiros, entre os quais, cito Ana Amélia Benedito-Silva, Gisele Akemi Oda, Henrique Schützer Del Nero e Luiz Henrique Alves Monteiro. A análise de alguns experimentos biológicos tem melhorado minha visão dos problemas, proporcionando-me indícios do tipo de contribuição que a Matemática poderia dar à Biologia.

A tentativa de entender as idéias de complexidade e auto-organização levou-me à leitura de algumas obras clássicas da Biologia (Darwin, 1859; Darwin, 1871), o que, dada minha pobre formação no assunto, gerou uma grande dificuldade e a consciência da necessidade de outra vida para o início de um melhor entendimento da Teoria da Evolução, fundamento básico da Biologia moderna.

Felizmente, tive a oportunidade de ter acesso a um livro que, dada sua clareza e qualidade científica, está me ajudando, bastante, na tarefa que tenho em mente (Dawkins, 1986). No referido livro, acredito ter encontrado algumas idéias de Biologia Evolutiva que me parecem passíveis de formalização através de conceitos originários da Matemática.

É disso que vou tratar aqui. Discutirei os pontos indicados por Dawkins, relativos às condições necessárias para caracterizar complexidade biológica e auto-organização, tentando dar a eles algum formalismo matemático, sempre que me for possível.

Quero ressaltar, além disso, que, em conjunto com as pessoas supracitadas, estou envolvido na compatibilização das idéias teóricas, aqui, expostas com experimentos biológicos, envolvendo processos dinâmicos que, aparentemente, exigem ferramentas teóricas, originárias da Matemática, para seu melhor entendimento.

Todas as interpretações feitas, a seguir, são de minha inteira responsabilidade. Caso alguma idéia esteja incorreta, a origem não é o texto de Dawkins, mas a minha provável incompreensão desses conceitos.

Tratarei, inicialmente, da definição de complexidade, levando em conta que, na linguagem do dia-a-dia, esse termo significa algo difícil de ser descrito, compreendido, montado ou concebido. Nesse sentido, tentarei definir complexidade

através de seus atributos essenciais.

Sigo, então, enumerando esses atributos e juntando o formalismo matemático a eles associado.

Complexidade e heterogeneidade

Nesta seção, procuro estabelecer os fundamentos teóricos da primeira condição necessária, estabelecida por Dawkins, para considerar que um dado sistema é complexo. Essa condição, a heterogeneidade, parte da hipótese que um sistema é composto por partes que, se vistas isoladamente, não dão uma perspectiva do todo.

Aproveitando o exemplo de Dawkins: duas metades de um carro não formam, necessariamente, um carro, quando justapostas, superpostas ou combinadas. Um sistema complexo é passível de decomposições sucessivas, sem que nenhuma delas, isolada, traduza o comportamento do sistema.

A tentativa de colocação desse conceito, em linguagem matemática, deve ser iniciada supondo que o sistema em apreço, embora complexo, é passível de modelização, através de variáveis de estado que, uma vez conhecidas, descrevem o sistema de maneira satisfatória (Piqueira, 1994; Mainzer, 1994).

Em prosseguimento, considerarei que um certo sistema pode ser decomposto em m partes, sendo cada uma delas passível de descrição por variáveis de estado. A cada uma das partes estão associadas n_i variáveis de estado, com i assumindo valores entre 1 e m .

De acordo com esse critério de indexação, a variável de estado $x_{i,j}$ é a j -ésima variável de estado, relativa à i -ésima parte do sistema, com o índice i assumindo valores de 1 até m e o índice j assumindo valores de 1 até n_i . Isto é, a cada i -ésima parte do sistema estão associadas n_i variáveis de estado.

Do exposto anteriormente, é possível concluir que, o número total

de variáveis de estado do sistema, em questão, é dado por:

$$N = \sum_{i=1}^m n_i \quad (1)$$

Esse número, conforme já discuti em meu artigo de 1994, pode expressar o grau de complexidade estrutural que um sistema possui, uma vez que se relaciona com a dimensão do espaço de estados, necessária para descrever o sistema.

Para expressar a questão da heterogeneidade e da emergência de sistemas qualitativamente diferentes das combinações de suas partes, é possível considerar que as equações dinâmicas de uma certa i -ésima parte isolada são dependentes, exclusivamente, das n_i variáveis de estado relativas a essa parte, de seus parâmetros constitutivos e do tempo (von Bertalanffy, 1968).

Matematicamente, as equações relativas às variáveis de estado $x_{i,j}$ são expressas em função das variáveis $x_{i,j}$, fixando-se i e variando-se j , de 1 até n_i . Além disso, entram nas equações l_i parâmetros constitutivos $\lambda_{i,k}$ e a variável temporal t .

Chamando de F_i cada uma das funções do tipo $F_i: \mathbb{R}^{n_i} \times \mathbb{R}^{l_i} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^{n_i}$, cada uma das i partes do sistema é descrita por n_i equações dinâmicas do tipo;

$$\dot{x}_{i,j} = F_i (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n_i}; \lambda_{i,1}, \lambda_{i,2}, \dots, \lambda_{i,l_i}; t) \quad (2)$$

O ponto colocado sobre a variável $x_{i,j}$ indica a derivada temporal dessa variável e as equações, na forma apresentada em (2), relacionam-se com a evolução dinâmica das partes do sistema, quando consideradas isoladamente.

O fato de o sistema ser complexo implica alterações, na forma dessas equações, originárias da reorganização das partes integradas, no sistema, como um todo.

Para tentar expressar esse fato, através de um formalismo matemático, definirei algumas variáveis e parâmetros de maneira vetorial, com o intuito de compactar a notação.

Chamarei de \mathbf{X}_i a variável vetorial de dimensão n_i , cujas componentes

serão as variáveis reais $x_{i,j}$, com j variando de 1 até n_i . Da mesma maneira, chamarei Γ_i o vetor de dimensão l_i , relativo aos parâmetros constitutivos da i -ésima parte do sistema tendo, portanto, componentes $\lambda_{i,k}$, com k variando de 1 até l_i .

De acordo com essa notação estabelecida, quando um sistema é complexo, composto de m partes associadas a variáveis de estado vetoriais X_i , com i variando de 1 até m , com equações dinâmicas relativas às partes do tipo (2), suas equações dinâmicas relativas ao todo são do tipo :

•

$$X_i = G_i (X_1, X_2, \dots, X_m ; \Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_m ; t) \quad (3)$$

Na expressão (3), a função :

$G_i : \mathbb{R}^{n_1} \times \mathbb{R}^{n_2} \times \dots \times \mathbb{R}^{n_m} \times \mathbb{R}^{l_1} \times \mathbb{R}^{l_2} \times \dots \times \mathbb{R}^{l_m} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^{n_1} \times \mathbb{R}^{n_2} \times \dots \times \mathbb{R}^{n_m}$,
que é determinante da dinâmica do sistema contém, em todos os seus componentes, todas as variáveis de estado e parâmetros constitutivos correspondentes a todas as partes.

Assim, é dessa maneira que expresso a primeira condição necessária para a complexidade proposta por Dawkins : o sistema complexo é particionável, suas partes têm a dinâmica descrita por equações do tipo (2) e o sistema como um todo tem a dinâmica descrita por equações do tipo (3).

Neste ponto da argumentação, muitas críticas podem ser feitas, tanto do ponto de vista matemático, como biológico e filosófico. A seguir, relacionarei e discutirei aquelas que consegui perceber.

Do ponto de vista matemático, poderiam ser feitos questionamentos a respeito da continuidade e da diferenciabilidade das funções F_i e G_i e, até mesmo, a respeito do fato de elas serem ou não funções.

Assumo, neste estudo, que isso é irrelevante, pois não estou preocupado em assegurar existência, unicidade, continuidade ou qualquer outra propriedade matemática a respeito das supostas soluções das equações. Prefiro supor que eventuais patologias matemáticas possam estar relacionadas com imprevisibilidades e diversidades dos comportamentos biológicos.

Uma crítica biológica interessante, a esta abordagem, seria se uma

certa variável é indicativa do estado do sistema ou de um certo parâmetro constitutivo. A resposta a esse tipo de questão passa pela adoção de uma certa escala temporal.

Para um engenheiro ou para um físico, esse problema parece não existir. Variáveis de estado são grandezas físicas que variam rapidamente: tensão, corrente, posição, velocidade, aceleração. Parâmetros são grandezas físicas cujas variações são imperceptíveis, em uma certa escala temporal: resistência, capacitância, indutância, massa, densidade, momento de inércia.

Para o biólogo, entretanto, a escala temporal não é, sempre, bem definida. Há processos que devem ser encarados, de acordo com o objeto de estudo, do ponto de vista de uma escala temporal filogenética, ontogenética ou dinâmica de um certo indivíduo. É claro que, uma mesma variável biológica pode ser considerada indicativa do estado em uma certa escala temporal e indicativa de parâmetro constitutivo em outra.

Citarei, a título de exemplo, a questão dos ritmos circadianos estabelecidos na espécie humana. Alguém poderia estudar a filogênese desses ritmos numa perspectiva evolutiva. Outros, entretanto, poderiam se preocupar com o mecanismo ontogenético de variações desses ritmos ao longo da vida e outros, ainda, poderiam ter a preocupação de como um vôo transmeridiano alteraria tais ritmos, em um certo indivíduo, ao longo de uma certa viagem (Benedito-Silva, 1993).

Claro está que o mesmo processo de estabelecimento de ritmos biológicos pode ser estudado em escalas temporais completamente diferentes e, em cada caso, uma certa variável pode ser considerada indicativa de estado ou de parâmetro constitutivo.

Ressalto, entretanto, que isso não invalida o formalismo. Tudo é uma questão de escolher corretamente, em cada caso, os elementos pertencentes ao conjunto das variáveis \mathbf{X} e os pertencentes ao conjunto dos parâmetros $\mathbf{\Gamma}$.

A crítica de um físico seria, talvez, a respeito da observabilidade do sistema, uma vez que o número de variáveis de estado pode ser muito grande, impossibilitando a abordagem nos termos aqui propostos. A essa crítica não sei responder sem usar uma pequena evasiva: talvez pudessem ser definidas variáveis de estado que englobassem outras, assim como a termodinâmica trabalha

macroscopicamente com pressão, volume e temperatura, com o intuito de expressar o estado de movimento de uma infinidade de moléculas de um gás.

Finalmente, um filósofo diria que esta é uma abordagem determinística do problema, o que teria a minha concordância. Entretanto, acrescento que a estocasticidade poderia ser introduzida, tanto nas equações do tipo (2) como do tipo (3), considerando os parâmetros λ como variáveis aleatórias, e as funções F e G como processos estocásticos (Loève, 1963).

Além disso, há a estocasticidade natural, originária da sensibilidade às condições iniciais, passível de aparecimento, uma vez que F e G podem, perfeitamente, ser não-lineares (Bai-Lin, 1990).

Uma outra questão seria física, biológica e filosófica e trataria de considerar, em equações do tipo das propostas, a irreversibilidade, presente em todos os processos naturais e que poderia ser respondida pelo simples fato de as funções F e G poderem ser dissipativas, ou seja, poderem expressar aumento ou diminuição de volume no espaço de estados (Ott, 1993).

O que, talvez, fosse difícil de responder, seria como expressar o fato de um sistema biológico responder de maneira diferente a um mesmo estímulo, caso esse seja aplicado em momentos diferentes. Provisoriamente, deixo a resposta por conta da sensibilidade às condições iniciais e das bifurcações, inerentes a certos processos dinâmicos não-lineares (Ruelle, 1991).

Complexidade, probabilidade, evolução temporal : um pouco de auto-organização

Nesta seção, tratarei de outra condição para que, do ponto de vista biológico, se considere um sistema complexo. Assumirei, para tanto, que a condição expressa, anteriormente, a respeito da heterogeneidade esteja satisfeita. Isto é, o sistema biológico complexo é composto de partes descritas por equações dinâmicas do tipo (2) e está agrupado de maneira a seguir uma evolução temporal governada por equações do tipo (3).

A condição a ser discutida, aqui, refere-se ao agrupamento das partes,

atribuindo a ele um mecanismo que, aparentemente, não segue, apenas, o acaso.

Tomando o texto de Dawkins, existe uma grande quantidade de maneiras diferentes de se agrupar as peças de um avião, mas apenas uma, ou uma pequena quantidade delas, resultaria, efetivamente, em um arranjo capaz de satisfazer aquilo que se esperaria de um avião. Ou seja, por trás do agrupamento das peças, há um projeto a ser satisfeito.

Analogamente, há uma grande quantidade de maneiras de se agrupar as diversas partes de um organismo complexo, mas apenas uma, ou uma pequena quantidade delas, resultaria em algo capaz de exercer certas funções naturais como reprodução, alimentação e adaptação ao meio ambiente.

Seria como se um sistema biológico complexo tivesse sido projetado com uma certa finalidade e de acordo com certas especificações. Entretanto, essas especificações não foram estabelecidas previamente, o que sugeriria as idéias de auto-organização e de seleção natural (Darwin, 1859).

Do ponto de vista da formalização da idéia, haveria duas coisas diferentes a serem combinadas: a grande quantidade de arranjos possíveis das partes e uma espécie de avaliação de quão adequado é um arranjo, visando uma certa finalidade.

Tenho dúvidas se essas idéias seriam matematizáveis mas, apesar disso, tentarei, partindo do pressuposto de que o sistema complexo, constituído das m partes, já citadas, e descrito pelas equações (2) e (3), resulta de uma evolução temporal, no sentido de aumento de complexidade: isto é, resulta, naturalmente, de sistemas mais simples, através de processos de agrupamento e divisão.

A esse processo de aumento de complexidade chamarei de processo de auto-organização do sistema biologicamente complexo.

As idéias que acabei de expor, levaram-me a concluir pela necessidade de se estabelecerem grandezas que possam medir a complexidade de um sistema, de maneira objetiva, associando valores numéricos às situações pelas quais passa o sistema ao longo de sua história.

A evolução temporal desses números deve, em princípio, dar uma

idéia do mecanismo de organização subjacente, sendo aplicável às mais diversas escalas temporais. Assim, será possível estabelecer as variações de complexidade sob três pontos de vista: filogenético, ontogenético e da dinâmica de um processo, ao longo da vida, de um dado sistema.

Considerando as hipóteses anteriores, definirei, inicialmente, a grandeza C_1 , com o intuito de medir a complexidade estrutural do sistema, fazendo uso da idéia de entropia informacional que, em alguns casos, tem definição análoga à de entropia termodinâmica (Denis-Papin & Cullmann, 1976).

A grandeza C_1 será denominada complexidade estrutural parcial e será dada por :

$$C_1 = k \log_b m \quad (4)$$

A constante de proporcionalidade k e a base da função logarítmica b podem ser escolhidas arbitrariamente e, uma vez selecionadas, definem a unidade de complexidade utilizada .

Por uma questão de comodidade, escolherei $k = 1$ e $b = 2$, fazendo com que a complexidade seja medida em bits. Isto é, estou tentando medir a complexidade do sistema através do número de bits que um sistema de computação precisaria memorizar para poder descrevê-lo (Hopf, 1988).

Nesse sentido, fica faltando, na medida da complexidade estrutural, um termo que leve em conta os agrupamentos possíveis das m partes e a probabilidade de ocorrência de cada um desses agrupamentos.

Farei isso, definindo uma grandeza η , que denominarei : índice de correção da complexidade estrutural.

Considerarei, então, que as m partes do sistema possam agrupar-se de Q maneiras possíveis, sendo, a cada uma delas associada uma certa probabilidade p_i . Nessas condições, é possível definir entropia informacional (H_g), relativa aos agrupamentos, pela equação:

$$H_g = \sum_{i=1}^Q p_i \log_2 (1/p_i) \quad (5)$$

Como o máximo valor teórico da entropia informacional relativa aos agrupamentos (H_{gm}) ocorre quando todos eles são equiprováveis (Giuasu & Theodorescu, 1968), ela é dada por:

$$H_{gm} = \log_2 Q \quad (6)$$

A partir disso, definirei índice de correção da complexidade estrutural (η), pelo quociente entre a entropia informacional relativa aos agrupamentos (H_g) e seu máximo valor teórico (H_{gm}). Isto é:

$$\eta = \frac{H_g}{H_{gm}} \quad (7)$$

Antes de completar a definição de complexidade estrutural (C_e), usando as grandezas definidas pelas equações (4) e (7), procurarei discutir o significado de cada uma delas, enfatizando seus mecanismos de evolução temporal.

A complexidade estrutural parcial (C_1) mede a quantidade de partes relevantes em que o sistema pode ser decomposto e, dos pontos de vista filogenético e ontogenético, é uma grandeza que aumenta ao longo do tempo.

O índice de correção da complexidade estrutural (η) é expresso por um número real, compreendido no intervalo [0;1] e pode ser utilizado para expressar a adequação do sistema biológico ao meio.

Assim, à medida que o número de agrupamentos adequados e possíveis diminui, o valor de η diminui, uma vez que as diversas possibilidades deixam de ser equiprováveis.

O raciocínio exposto permite concluir que, quanto mais complexo o sistema, maior o valor de C_1 e menor o valor de η , levando-me a definir complexidade estrutural (C_e) como:

$$C_e = (1 - \eta) C_1 \quad (8)$$

Para completar a definição de complexidade, é necessário levar em conta os processos dinâmicos que podem ocorrer no sistema, através dos atratores possíveis, relativos às equações dinâmicas dadas em (3).

Considerando que o número de atratores possíveis do sistema seja P , a complexidade funcional do sistema (C_f) pode ser definida por:

$$C_f = \log_2 P \quad (9)$$

Agora, é possível definir complexidade global do sistema (C_s) pelo produto de suas complexidades estrutural e funcional:

$$C_s = C_e \cdot C_f \quad (10)$$

A definição dada pela equação (10) permite considerar que a grandeza C_s é variável no tempo e, quando seu valor é crescente, o processo evolutivo será chamado de temporalmente auto-organizado.

Encerro esta seção, ressaltando que alguns pontos importantes das idéias de Dawkins foram discutidos. A idéia de complexidade, associada à grande quantidade de partes envolvidas, foi expressa através da grandeza C_p . Além disso, a diversidade de arranjos possíveis, associada à aparente intencionalidade do arranjo, foi expressa através da grandeza η .

Os comportamentos possíveis do sistema, como um todo, têm sua multiplicidade expressa na definição da complexidade funcional (C_f) sendo que todos esses fatores, agrupados, estabelecem o conceito de complexidade global do sistema (C_s).

Completando o quadro, o aumento da complexidade global do sistema (C_s) implica organização do sistema, nas escalas filogenética, ontogenética e da dinâmica de um processo individual.

A adequação do sistema biológico

Outro ponto central da argumentação, no texto de Dawkins, é que o sistema biológico complexo é, de maneira aparentemente proposital, arranjado de tal forma a ser adequado para a execução de certas tarefas básicas para sua sobrevivência e adaptação ao meio que o cerca.

Usando as palavras de Dawkins, o sistema composto de partes, aparentemente ligadas de acordo com um certo projeto, tem essas partes relacionadas

Nessas condições uma certa complexidade está associada ao sistema, de tal maneira a torná-lo apto a manter sua vida, de maneira bem sucedida, sob certo aspecto.

Ao longo do tempo, o sistema biológico complexo foi mudando seus mecanismos de agrupamento e seus parâmetros constitutivos, criando para si a capacidade de aplicar certos tipos de forças especiais que, sob certas circunstâncias, podem realizar trabalho, provendo a energia necessária para tarefas como nadar, voar ou andar, em busca do alimento essencial para a manutenção da vida.

A tentativa de formalizar a idéia supradescrita considera como pressuposto básico que, embora o sistema, em determinado instante, seja composto por m partes e que sua dinâmica seja descrita por equações do tipo (3), o número de partes, de parâmetros constitutivos e, até mesmo, os mecanismos de interligação podem variar ao longo do tempo, nas suas mais diversas escalas.

Assim, ao longo do tempo, os valores das grandezas C_1 , η , C_e , C_f e C_s , assumem valores variáveis, à medida que o sistema se ajusta ao meio, do ponto de vista filogenético, ontogenético e da dinâmica local de um dado processo.

Todas as grandezas relacionadas com complexidade, aqui definidas, são de utilidade, apenas, para realizar comparações, nas diversas escalas temporais.

Do ponto de vista filogenético, as comparações devem ser feitas entre indivíduos de uma mesma espécie, tomados em situações temporais diferentes. A adequação do sistema ao meio, viabilizando a vida, talvez seja feita com valores de C_1 , C_e , C_f e C_s , que podem ser crescentes ou decrescentes, pois o número de partes e o número de atratores possíveis pode aumentar ou diminuir, à medida que o sistema melhora seus mecanismos de adequação ao meio. O índice de correção da complexidade estrutural (η), entretanto, diminui, uma vez que, nessas condições, alguns arranjos ficam cada vez mais prováveis do que os outros.

Essas mesmas observações são válidas para a escala ontogenética, tratando-se de observar o mesmo indivíduo e seus diversos processos, ao longo da vida.

Considerando, agora, um certo processo dinâmico, trata-se de compará-lo instante por instante sendo, nesse caso, a variável C_p , a mais relevante. Isso se deve ao fato de essa variável relacionar-se com os atratores do sistema,

fundamentais para a descrição do comportamento particular dos processos que têm lugar em determinado indivíduo.

Todas as considerações até aqui feitas, nesta seção, embora sejam de interesse, referem-se, apenas, às medidas comparativas entre sistemas, ao longo de processos de adequação ao meio ambiente. Falta, ainda, expressar o que significa, do ponto de vista formal, o processo de adequação de um sistema ao seu meio.

Esse mecanismo de adequação pode, talvez, ser expresso, nas escalas filogenética e ontogenética, através do conceito de estabilidade estrutural. Na dinâmica de processos particulares, que ocorrem em um certo indivíduo, a adequação ambiental pode ser expressa definindo-se uma função do vetor das variáveis de estado \mathbf{X}_i , de maneira semelhante às funções de Liapunov, utilizadas para expressar a estabilidade de soluções atratoras em sistemas dinâmicos (Guckenheimer & Holmes, 1983).

Para maior clareza, recorrerei, novamente, a um outro exemplo citado por Dawkins. Apesar de vivermos em ambientes das mais variadas temperaturas, nosso sistema termo-regulador mantém nossa temperatura em um valor de, aproximadamente, 36,5 °C.

Isso se dá através de mecanismos internos de conversão de energia química em mecânica e térmica, proporcionando as condições suficientes para que reações químicas adequadas ocorram, caracterizando processos de controle e regulação, retro-alimentados (Segel, 1984).

Assim, considerarei que um processo dinâmico particular, que ocorre em um certo indivíduo, cuja dinâmica é descrita por equações do tipo (3), admite soluções atratoras, em torno das quais é possível definir funções de Liapunov do tipo $V(\mathbf{X}_i)$.

Essas funções, em vizinhanças abertas das soluções atratoras, devem seguir as seguintes condições:

- i) $V(\mathbf{X}_i) = 0$ para todo \mathbf{X}_i pertencente à solução atratora.
- ii) $V(\mathbf{X}_i) > 0$ para todo \mathbf{X}_i fora da solução atratora.
- iii) $V(\mathbf{X}_i) < 0$ para todo \mathbf{X}_i nas vizinhanças da solução atratora.

As condições acima indicam que as soluções atratoras,

correspondentes aos processos dinâmicos que ocorrem em sistemas complexos, são assintoticamente estáveis (Guckenheimer & Holmes, 1983).

O raciocínio descrito significa que os organismos, operando em condições normais, possuem dinâmica determinada por atratores no espaço de estados, correspondentes a condições homeostáticas.

Condições patológicas correspondem a mudanças nos parâmetros Γ_i da equação do tipo (3), que descreve o comportamento do sistema nessa escala temporal. A mudança de parâmetros traz, como consequência, mudanças qualitativas nos atratores do sistema.

Os novos atratores, assim formados, deixam o sistema fora das condições energéticas necessárias para que os processos de controle e regulação ocorram, requerendo, para seu restabelecimento, que os parâmetros voltem aos valores habituais, através de mecanismos endógenos e exógenos.

A ontogênese de tais processos poderia ser pensada supondo-se, também, equações do tipo (3), cujos parâmetros Γ_i , correspondentes aos mecanismos fisiológicos do indivíduo, variam ao longo da vida. Tais variações podem ser acompanhadas de mudanças qualitativas nos processos descritos, correspondendo a bifurcações (Murray, 1993).

Essas bifurcações, do ponto de vista matemático, correspondem a situações de instabilidade estrutural e, do ponto de vista biológico, correspondem à organização ontogenética do sistema complexo.

Exemplificando, um bebê, ao nascer, possui uma grande variedade de ritmos ultradianos na composição do espectro de seu ciclo vigília-sono. À medida que o tempo vai passando, tais ritmos vão diminuindo de importância, estabelecendo-se, como mais significativo, o circadiano.

Essas mudanças qualitativas correspondem a passagens de alguns parâmetros neuro-biológicos por valores de bifurcação, alterando, qualitativamente, a dinâmica do ciclo vigília-sono (Benedito-Silva, 1993).

Na escala filogenética, talvez, seja possível associar mudanças qualitativas, ao longo das espécies, através de bifurcações globais, correspondentes a mudanças na forma das expressões de G_i , representativas dos mecanismos dinâmicos

gerais das equações do tipo (3), utilizadas na modelização dos processos biológicos complexos.

Assim, processos de controle e regulação atuais, descritos por equações do tipo (3) e restritos a certas funções de Liapunov, resultam de adequação de parâmetros Γ_i , ao longo da vida. A forma das equações, entretanto, resulta da filogênese dos mecanismos de adequação do sistema complexo às condições ambientais.

Conclusões

Tentei relacionar as idéias de complexidade biológica, expostas por Dawkins, com alguns conceitos matemáticos da Teoria da Informação e da Teoria dos Sistemas Dinâmicos, procurando dar ao estudo da Biologia algumas idéias de modelização que não sejam limitadas à simples análise de sinais.

A procura é por conceitos que possam dar algum corpo formal aos problemas biológicos, adaptável aos diversos tipos de problemas, nas diversas escalas temporais.

Várias questões deixaram de ser discutidas, como por exemplo a dos níveis de organização biológicos, que são perfeitamente compatíveis com o enfoque deste artigo, e que podem ser objeto de estudo de trabalhos futuros.

Agradecimentos

Muitas pessoas têm sido importantes na minha tentativa de aprender um pouco de Biomatemática. Agradecer a todas, é impossível.

Por isso, deixo por conta do institucional, agradecendo ao Grupo Multidisciplinar de Ritmos Biológicos do ICB-USP, ao CLE-HC da UNICAMP e ao LAC da EP-USP.

Em especial, devo ao IEA-USP a oportunidade de ter desenvolvido os *Seminários de Biomatemática*, fundamentais para a elaboração deste texto.

Referências Bibliográficas

- BAI-LIN, H. *Chaos II*. Singapore: World Scientific Publishing Co, 1990.
- BENEDITO-SILVA, A. A. Ontogênese do ciclo vigília-sono em bebês. São Paulo, 1993. Dissertação (Mestrado) – Escola de Politécnica, Universidade de São Paulo.
- VON BERTALANFFY, L. *General systems theory*. New York: George Braziller, 1968.
- CATICHA, N. From quenched to annealed: a study of intermediate dynamics of disorder. *Journal of Physics A - Mathematical and General*. v. 27, p. 5501-7, 1994.
- DARWIN, C. *The origin of species*. Mentor: Mentor Book, (1859) 1981.
- _____. *The descent of man*. Princeton: Princeton University Press, (1871) 1981.
- DAWKINS, R. *The blind watchmaker*. London: Penguin Books, 1986.
- DENIS-PAPIN, M., CULLMANN, G. *Elementos de cálculo informacional*. Bilbao: URMO S.A. Ediciones, 1976.
- GOULD, S. J. *Ontogeny and phylogeny*. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 1977.
- GUCKENHEIMER, J., HOLMES, P. *Nonlinear oscillations, dynamical systems, and bifurcation of vector fields*. New York: Springer Verlag, 1983.
- GUIASU, S., THEODORESCU, R. *La théorie mathématique de l'information*. Paris: Dunod, 1968.
- HOPF, F. A. Entropy and evolution. In: *Entropy, information and evolution*. Cambridge: MIT Press, 1988.
- LOÈVE, M. *Probability theory*. Berlin: Springer Verlag, 1963.
- MAINZER, K. *Thinking in complexity*. Berlin: Springer Verlag, 1994.
- MURRAY, J. D. *Mathematical biology*. 2. ed. Berlin: Springer Verlag, 1993.
- OTT, E. *Chaos in dynamical systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- PIQUEIRA, J. R. C. *Estabilidade estrutural e organização*. São Paulo, 1992. (Coleção Documentos - IEA-USP)
- _____. Structural and functional complexity: an informational approach. *IEEE Systems, Man and Cybernetics*. (San Antonio), p. 1974-8. Oct. 1994.
- RUELLE, D. *Chance and chaos*. Oxford: Princeton University Press, 1991.
- SEGEL, L. A. *Modeling dynamic phenomena in molecular and cellular biology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- SHANNON, C., WEAVER, W. *The mathematical theory of communication*. 12 ed. Chicago: University of Illinois Press, (1949), 1971.