

RUMO A UMA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA AUTONOMIA BIOLÓGICA

Daniel Sander Hoffmann

Engenharia em Sistemas Digitais /UERGS/Guaíba

daniel-hoffmann@uergs.edu.br

Em um pequeno livro, baseado em uma série de palestras públicas realizadas em Dublin no ano anterior à sua publicação, o físico quântico Erwin Schrödinger levantou uma questão crucial, que tem atormentado os filósofos naturais há diversos séculos: *o que é vida?* (SCHRÖDINGER, 1944). Através desse livro, que inspirou toda uma geração de físicos e biólogos na busca da natureza fundamental dos seres vivos, Schrödinger trouxe a mecânica quântica, a química e o então ainda mal formulado conceito de "informação" para a linha de frente da biologia, sendo assim o progenitor da nossa concepção moderna do DNA e do código genético. Alguns autores (e.g. KAUFFMAN, 2000) afirmam que, apesar de seus méritos, Schrödinger atacou o problema da forma errada; outros, ainda (e.g. ROSEN, 2000), creem que ele acertou o alvo em cheio, porém teria sido totalmente mal compreendido por seus pares. Esse tipo de situação ilustra perfeitamente a tumultuada arena na qual se desenvolve a biologia teórica.

Diversos pesquisadores, dentre os quais podemos destacar Robert Rosen, Stuart Kauffman e Gregory Chaitin, têm adicionado fermento ao estudo da biologia, em especial no que tange a seus fundamentos teóricos, introduzindo abordagens que poderiam ser classificadas como pouco ortodoxas, porém que têm tudo para serem extremamente promissoras. Nesse sentido destacam-se, respectivamente, as noções de "fechamento sob a causa eficiente" (cujo análogo epistemológico é a impredicatividade), de "organização propagável" e da possibilidade de desenvolvimento de uma "metabiologia". Aqui, são centrais as noções de autonomia e de indeterminação biológicas, bem como o debate em torno do problema da computabilidade (ou não) de modelos descritivos de seres vivos, dentre outros.

Agentes são entidades que causam eventos através de movimento próprio. Com base nessa definição, podemos afirmar que humanos, golfinhos, baratas e bactérias são agentes. Agentes podem ser diretamente contrastados com *objetos*. Objetos são entidades que não causam eventos através de movimento próprio. Por essa definição, bolas de bilhar e fragmentos de rocha não são agentes. Em certo sentido, a propriedade única dos agentes é a total inescrutabilidade do seu

movimento. Agentes são causas primeiras, ou "causas não causadas" (PRESTON e WEGNER, 2005). Em termos gerais, *autonomia* é auto-determinação, o que implica na habilidade de fazer algo independentemente, sem uma imposição externa. Esse "fazer" pode ser de cunho mental, comportamental, neurológico, metabólico ou autopoietico (BODEN, 2008).

Um sistema capaz de agir por conta própria é, portanto, um *agente autônomo*, sendo que autonomia, nesse caso, não implica em total isolamento do ambiente. Segundo KAUFFMAN e CLAYTON (2006), um agente molecular autônomo minimalista deve possuir as seguintes características: ser capaz de reprodução através de herança com variação, realizar pelo menos um ciclo termodinâmico de trabalho, possuir fronteiras (de forma a ser naturalmente individuável), desenvolver trabalho auto-propagativo (e "construção de restrições") e ser capaz de escolher entre pelo menos duas alternativas. Ainda conforme KAUFFMAN (2000), um agente autônomo como, e.g., uma bactéria, é simplesmente um sistema físico que age por conta própria no ambiente. O grande desafio consiste na caracterização desse tipo de sistema em termos exclusivamente científicos, sem envolver o recurso a ideias já há muito superadas, tais como a existência de uma "força vital".

De acordo com ROSEN (2000), a vida tem relação com padrões invariantes em um grafo de causas formais e eficientes. Todo o resto diz respeito a causas materiais sobre as quais o grafo "atua". Esse é um sistema complexo, que na opinião de Rosen tem necessariamente modelos não-simuláveis e não pode ser descrito como software para uma máquina de estados finitos. A noção de fechamento sob a causa eficiente é considerada por Rosen como necessária à definição de vida: "*um sistema material é um organismo se, e somente se, ele for fechado sob a causa eficiente*". Em outras palavras, se f é um componente qualquer de tal sistema, a questão 'por que f ?' tem uma resposta dentro do sistema, a qual corresponde à categoria de causa eficiente de f (ROSEN, 1991, p. 244). Note-se que f , nesse caso, é um *componente funcional* do sistema. Mas, embora necessária, a noção de fechamento sob a causa eficiente não é aparentemente suficiente para caracterizar um organismo (ROSEN, 2000). Talvez o ponto central de todo o trabalho de Rosen seja a conclusão de que sistemas autônomos possuem uma estrutura muito diferente dos objetos inanimados, e que essa estrutura precisa necessariamente ser representada em seus modelos. Sistemas autônomos são fechados sob a causa eficiente, exigindo assim necessariamente modelos impredicativos (CHEMERO e TURVEY, 2008).

O ponto de partida para a proposta avançada no presente texto é o trabalho do filósofo Randall Dipert envolvendo uma abordagem original ao uso de grafos. Para este, o mundo concreto é

uma estrutura induzida por uma relação diádica simétrica e assim melhor resolvível matematicamente como um grafo assimétrico simples conectado (DIPERT, 1997). Esse objeto matemático é concebido como sendo livre de artefatos, tais como a rotulação dos vértices implícita na teoria dos grafos ordinária e motivada pela teoria dos conjuntos, o que de outro modo acrescentaria uma carga formal desnecessária e mesmo injustificada. Na concepção desse filósofo, cada entidade concreta no mundo físico habita a estrutura mais ampla e equivale a um subgrafo, não necessariamente assimétrico e individuável exclusivamente por suas características estruturais grafo-teóricas. O próprio Dipert vincula as origens de seu pensamento ao relacionismo de Charles S. Peirce, ao holismo metafísico de Baruch Spinoza, ao estruturalismo de teóricos de conjuntos com inclinação metafísica e ao relacionismo metodológico de Karl R. Popper.

Um grafo é uma estrutura matemática contendo *nós* e *linhas*. Se cada nó está ligado, direta ou indiretamente, a cada outro nó (ou seja, se não há nenhum nó "solto"), dizemos que o grafo é conectado. Grafos podem ser rotulados com letras, números ou outros símbolos, ou podem ser não-rotulados. Se uma linha é um par ordenado, temos um grafo direcionado (com setas), caso contrário temos um grafo simples, onde as relações são simétricas binárias. A figura 1 apresenta dois grafos conectados simples com nós rotulados.

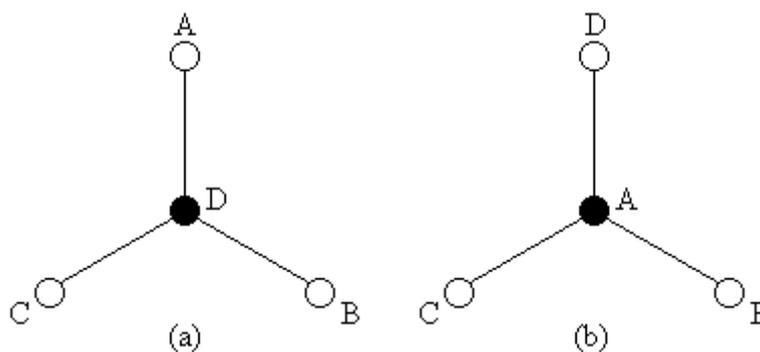


Figura 1 - Grafos idênticos ou distintos?

Fonte: HOFFMANN (2002).

Os grafos (a) e (b) acima são aparentemente distintos porque nós equivalentes têm rótulos diferentes. De fato, em termos de teoria dos conjuntos, os grafos são diferentes. Porém essa diferença é apenas um artefato da rotulação (DIPERT, 1997), uma vez que os dois grafos têm a mesma estrutura fundamental subjacente. Uma forma de lidarmos com isso é usarmos a noção de isomorfismo (explicando de forma simples, dois grafos são isomórficos quando são idênticos ou diferem apenas nos rótulos aplicados aos nós), porém, mesmo quando consideramos apenas grafos

não-isomórficos rotulados em uma teoria, ainda assim estamos presos a uma sobrecarga notacional. Em uma teoria de estrutura pura, toda diferença entre grafos deve refletir apenas uma diferença na estrutura fundamental, contendo grafos conectados simples não-rotulados.

O grau de um nó é o seu número de conexões com outros nós. No grafo (a) da figura 1, o nó D é estruturalmente diferente dos demais, pois é o único nó de grau 3. Os outros nós são todos de grau 1, estão todos conectados ao mesmo nó de grau 3 e se interconectam indiretamente através desse nó. A propriedade compartilhada pelos nós A, B e C é denominada *simetria* grafo-estrutural, e implica no fato de que, em um grafo não-rotulado, esses nós não podem ser individuados por ocuparem posições simétricas (DIPERT, 1997). Na assim chamada "distinção contextual", os nós de um grafo são distinguidos por serem estruturalmente relacionados aos demais de uma forma única, sem a necessidade de uma rotulação arbitrária. Vamos a seguir considerar uma regra provisória, para facilitar a compreensão visual (segundo HOFFMANN, 2002): nós contextualmente distinguíveis são pintados de preto, e nós contextualmente indistinguíveis são pintados de branco. Na figura 1 (acima), como pode ser percebido, o nó central de cada grafo é contextualmente distinguível, e foi portanto pintado de preto. A *ordem* de um grafo é seu número de nós. Seja a figura 2, que apresenta um dos oito grafos puramente assimétricos de ordem seis:

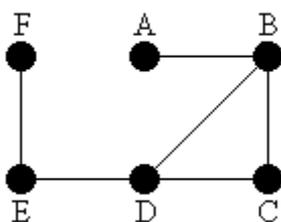


Figura 2 - Um grafo assimétrico de ordem seis.

Fonte: Hoffmann (2006).

Com base nesse grafo, onde os rótulos são utilizados apenas como referência para a visualização, podemos considerar a distinção contextual como segue:

- A: nó de grau 1 adjacente a um nó de grau 3 (B).
- B: nó de grau 3 adjacente a um nó de grau 1 (A).
- C: nó de grau 2 adjacente a dois nós de grau 3 (B e D).
- D: nó de grau 3 adjacente a dois nós de grau 2 (C e E).
- E: nó de grau 2 adjacente a um nó de grau 3 (D).

F: nó de grau 1 adjacente a um nó de grau 2 (E).

Nesse caso, cada nó é distinguido unicamente devido à sua localização específica dentro do grafo, através da noção de adjacência (DIPERT, 2007). Note-se que outras formas de descrever os nós são possíveis. Vamos agora considerar a figura 3.

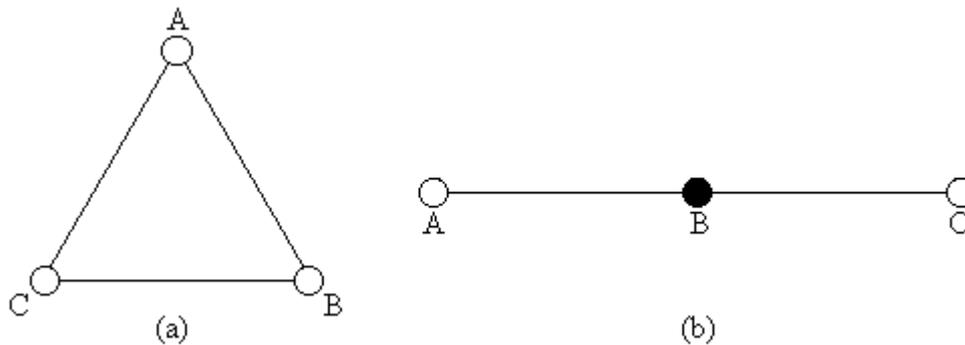


Figura 3. Grafos de ordem três com (a) nenhum nó distinguível e (b) um nó distinguível.

Fonte: HOFFMANN (2002).

O grafo (a) da figura 3 é totalmente simétrico (contém apenas nós brancos), enquanto o grafo (b) é parcialmente simétrico (ou, alternativamente, parcialmente assimétrico), contendo um nó preto e dois nós brancos. Esse último tipo de grafo pode ser denominado de "hemissimétrico". O grafo da figura 2, visto anteriormente, é do tipo totalmente assimétrico. Vamos agora introduzir uma terminologia específica adicional: um *transgrafo* é uma configuração relacional de nós conectados não-rotulados contextualmente distinguíveis (nós pretos) e/ou indistinguíveis (nós brancos). Em outras palavras, um transgrafo é um grafo não-rotulado sujeito à regra de distinção contextual. Quando ambos os tipos de nós estão presentes, falamos de um *transgrafo hemissimétrico*. *Transgrafos assimétricos* possuem nós que são distinguíveis apenas no contexto da totalidade a que pertencem e que concomitantemente ajudam a compor. *Transgrafos hemissimétricos*, por outro lado, consistem tanto de nós contextualmente distinguíveis quanto nós contextualmente indistinguíveis. Estes últimos nós são de fato *indistinguíveis mesmo no contexto da totalidade a que pertencem e que ajudam a compor*. Este resultado, acreditamos, pode ter uma implicação interessante no âmbito da biologia teórica, como veremos adiante.

O presente trabalho pode ser visto como a extensão da combinação do uso de grafos conectados não-rotulados com o critério de distinção contextual – proposta originalmente por DIPERT (1997), em um contexto puramente metafísico – para o âmbito da biologia – como

originalmente sugerido em HOFFMANN (2002) e detalhado em HOFFMANN (2006), porém agora através da *ênfase em uma interpretação dos transgrafos hemissimétricos no âmbito de uma indeterminação contextualmente manifesta*, vinculada à noção de autonomia biológica.

A indeterminação ontológica na física, em oposição à simples incerteza epistemológica, é completamente restrita à redução do vetor de estado (ou "colapso da função de onda") na equação de Schrödinger (PENROSE, 2007). Por outro lado, alguns autores defendem a existência de indeterminação ontológica no âmbito da biologia. ELSASSER (1972) foi um dos primeiros a introduzir explicitamente a noção de indeterminação biológica (R. E. Ulanowicz, comunicação pessoal). Mais recentemente, John D. Collier sugeriu a substituição, no contexto das discussões envolvendo as ciências da vida, da incerteza epistemológica pela *indeterminação ontológica inerente aos seres vivos* (ULANOWICZ, 1997). Na teoria de Robert Rosen, um componente funcional do metabolismo de um organismo, por exemplo, é definido com o auxílio de uma totalidade à qual este pertence, sendo assim um análogo "fisicamente" realizado (embora não haja um mapeamento 1:1 entre estrutura e função) de um termo impredicativo (ROSEN, 1991). De forma similar, e enfatizando que estamos cientes de que se trata aqui ainda de uma especulação proto-científica, postulamos que o análogo realizado dos nós contextualmente indistinguíveis de uma configuração relacional equivalente ao que chamamos de "vivo" implique na indeterminação ontológica defendida por alguns estudiosos. Adicionalmente, hipotetizamos que essa indeterminação apresenta relação, em algum grau, com a autonomia biológica, e sugerimos que o termo *transplexidade* seja adotado para dar conta do emaranhamento irreduzível entre os aspectos determinado e indeterminado do ser vivo.

Não há aqui espaço para analisarmos profundamente o debate em torno da questão da computabilidade/não-computabilidade de modelos biológicos. Cabe salientar que diversos autores vêm crescentemente afirmando a efetiva possibilidade de se computar a noção roseniana de fechamento sob a causa eficiente. Por exemplo, CHERMERO e TURVEY (2008) afirmam ser incorreta a afirmação de Rosen (encontrada em ROSEN, 2000) de que não existem algoritmos para se construir algo que é impredicativo. Como apoio à sua conclusão, esses autores demonstram que sistemas impredicativos são facilmente modelados como grafos de hiperconjuntos, e que esses, por sua vez, são plenamente Turing-computáveis. Por outro lado, MOSSIO *et al.* (2009) propuseram recentemente uma expressão matemática do fechamento sob a causa eficiente em termos de cálculo-lambda, o que demonstra a aparente ausência de impedimentos no que tange à modelagem ou simulação computacional desse tipo de estrutura auto-referente. Assim, a noção de fechamento sob

a causa eficiente talvez não seja tão fundamental para a definição de vida, o que pode indicar a necessidade de abordagens radicalmente diferentes. A extensão em que essas críticas a Rosen podem afetar a hipótese aqui levantada, que guarda certa relação com essas ideias pelo fato de ser relacional e contextual, permanece ainda em aberto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BODEN, M. A. Autonomy: What is it? *Biosystems*, v. 91, p. 305-308, 2008.
- CHEMERO, A.; TURVEY, M. T. Autonomy and hypersets. *Biosystems*, v. 91, p. 320-330, 2008.
- DIPERT, R. The mathematical structure of the world: the world as graph. *J. Phil.* v. 94, p. 329-358, 1997.
- ELSASSER, W.M. A model of biological indeterminacy. *J. Theor. Biol.*, v. 36, p. 627-633, 1972
- HOFFMANN, D. S. *Epistemologia e história da biologia relacional, experimentação in silico com laços de retroalimentação adaptativa e representação de sistemas complexos através de dimetagrafos*. Tese de doutorado. Pós-Graduação em Genética e Biologia Molecular, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2002.
- HOFFMANN, D. S. *Transplexity*. Morrisville: Lulu, 2006.
- KAUFFMAN, S.A. *Investigations*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- KAUFFMAN, S.A.; CLAYTON, P. On emergence, agency, and organization. *Biol. Philos.* 21, 501-521, 2006.
- MOSSIO, M.; LONGO, G.; STEWART, J. A computable expression of closure to efficient causation. *Journal of Theoretical Biology*, v. 257, p. 489-498, 2009.
- PENROSE, R. *The road to reality: A complete guide to the laws of the universe*. New York: Vintage Books, 2007.
- PRESTON, J.; WEGNER, D. M. (2005). Ideal agency: On perceiving the self as an origin of action. In A. TESSER, J. WOOD, & D. STAPEL (Eds.), *On building, defending, and regulating the self* (pp. 103-125). Philadelphia, PA: Psychology Press.
- ROSEN, R. *Life itself: A comprehensive inquiry into the nature, origin and foundation of life*. Columbia: Columbia University Press, 1991.
- ROSEN, R. *Essays on life itself*. Columbia: Columbia University Press, 2000.
- SCHRÖDINGER, E. *What is Life?* Cambridge: Cambridge University Press, 1944.
- ULANOWICZ, R.E. *Ecology, the Ascendent Perspective*. New York: Columbia University Press, 1997.