

Complexidade e organização biológica

Complexity and biological organization

Daniel Sander Hoffmann

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

daniel-hoffmann@uergs.edu.br

<http://lattes.cnpq.br/4388320562511213>

Resumo

A área de pesquisa conhecida como biologia relacional foi inaugurada por Nicolas Rashevsky, porém foi largamente desenvolvida por Robert Rosen. Neste artigo eu apresento e discuto alguns dos pressupostos subjacentes a essa linha de investigação, adotando a estratégia de focar apenas em alguns dos principais avanços propostos por Rosen, em particular aqueles vinculados às noções de complexidade e organização biológica. Enfatizo também o conceito de “fechamento causal” roseniano, devido à sua relação próxima com a noção de autopoiese de Maturana e Varela. Procuro desenvolver, da melhor forma possível, uma investigação imparcial, apontando tanto as virtudes quanto os pontos críticos dos tópicos por mim selecionados a partir da vasta obra intelectual de Rosen.

Palavras-chave: Biologia relacional; Complexidade; Organismo.

Abstract

The research area known as relational biology was inaugurated by Nicolas Rashevsky, but it was largely developed by Robert Rosen. In this paper I present and discuss some central assumptions behind this line of investigation, pursuing the strategy of focusing only on some of the main advancements proposed by Rosen, particularly those associated to the notions of complexity and biological organization. I emphasize also the Rosenian concept of “causal closure”, due to its close relationship with Maturana and Varela’s notion of autopoiesis. I try the best I can to develop an impartial investigation, pointing out both the virtues and critical points of the topics that I chose among Rosen’s vast intellectual production.

Keywords: Complexity; Organism; Relational biology.

1. Introdução

O grande mentor da “biologia relacional” foi o pesquisador Nicolas Rashevsky, que migrou da física para a biologia nas primeiras décadas do século XX. Possuindo, esse estudioso, forte formação em física, é compreensível a influência que essa área de pesquisas teve em seu trabalho. Segundo Mayr (1998), o fisicalismo (incluindo o reducionismo forte) predominante após a revolução científica influenciou de forma categórica - e durante um grande período de tempo, que se entende até hoje - a formação teórica em biologia. Isso ilustra, conforme o autor, o importante papel desempenhado por influências externas na formação de teorias biológicas. Com base nessas considerações, parece-me que a escola da “biofísica matemática”, inaugurada por Rashevsky nas primeiras décadas do século passado, não foi exceção à regra, principalmente em suas fases iniciais. Isso porque, mais tarde, Rashevsky sentiu a necessidade de abandonar sua linha mais tradicional de investigação, fortemente baseada em métodos da física, após constatar que esta não fornecia subsídios para uma compreensão adequada da organização biológica como um “todo integrado”. Essa mudança de posicionamento resultou no desenvolvimento da biologia relacional, que passou a enfatizar a relação entre componentes de um sistema, em detrimento da estrutura física. O próprio Rashevsky apontou um possível caminho de desenvolvimento,

embora sua proposta original careça de adeptos atualmente.¹ A linha de investigação inaugurada por Rashevsky foi continuada por seus alunos, com especial destaque para o biomatemático Robert Rosen, cujo trabalho me proponho expor e comentar aqui.

Considero imprescindível esclarecer, já de início, que o trabalho de Rosen se distancia consideravelmente daquele do seu mestre, por realizar uma reflexão criteriosa sobre o significado de conceitos tais como complexidade e organismo, bem como por criticar as limitações das práticas de modelagem habitualmente empregadas na ciência em geral, e na biologia em particular. A crítica feita por esse autor abarca, dentre outras coisas, a adoção generalizada, por parte da maioria dos pesquisadores, de modelos mecânicos para a explicação de toda sorte de processos biológicos (o que se estende, evidentemente, aos processos cerebrais). Ao longo do texto, eu me esforço para apresentar e discutir, da forma mais clara possível, alguns dos conceitos e pressupostos centrais à biologia relacional de Rosen, com o intuito de auxiliar na demarcação de suas fronteiras para que se possa, em trabalhos futuros, realizar uma avaliação mais objetiva e focada de seus méritos e de suas falhas. Minha contribuição é assim necessariamente focal e limitada, dada a vastidão da obra desse autor. Não obstante, espero que sirva, no mínimo, para instigar o interesse de filósofos e historiadores da ciência pelo tema.

2. Modelos relacionais, complexidade, modelos mecânicos e experimentação in silico

Rosen enfatizou, em vários de seus trabalhos, a importância do que chamou de “relação de modelagem”, que, para este, constituía a própria “essência” do procedimento científico. Em linhas gerais, segundo a interpretação desse autor, podemos afirmar que fazer ciência é uma combinação da utilização dos sentidos para observar o mundo e da mente para organizar a informação sensorial. Em outras palavras, partimos do pressuposto de que todo e qualquer sistema natural possui vinculações causais, que podem ser apreendidas pelo processo científico. Isso é conseguido através da codificação dessas vinculações em um sistema formal o qual, quando trabalhado, leva a predições que devem ser verificadas através de um processo de decodificação. Quando as etapas de codificação, formalização e decodificação reproduzem de forma adequada os processos de vinculação causal que ocorrem no sistema natural, falamos então que o sistema formal é um modelo do sistema natural. Podemos também afirmar, por consequência, que o sistema natural é uma realização do sistema formal. Rosen chama a atenção para o fato de que codificação e decodificação são processos largamente desvinculados do formalismo em si, e que estes não são, portanto, deriváveis do último de modo automático. Com base nessa constatação, Rosen propôs uma abordagem ao estudo da complexidade que é fundamental, segundo este, para compreendermos adequadamente os fenômenos biológicos em toda a sua extensão (Rosen, 1991).

Considero necessário, neste ponto, fazer uma breve consideração complementar. A posição de Rosen, acima delineada, pode parecer simplista, principalmente quando examinada do ponto de vista do filósofo (isso poderá ser observado novamente em outros pontos da minha exposição do trabalho de Rosen). Parece-me que uma justificativa parcial pode ser encontrada no fato de que boa parte de seus escritos são voltados para cientistas e mesmo, em raras ocasiões, para o leitor ocasional. Por outro lado, não é difícil, para a mente treinada, encontrar fragmentos de ideias, coletadas dos mais diversos pensadores e por vezes reinterpretadas. Algumas vezes, Rosen menciona suas fontes de forma direta, em seus trabalhos publicados. É o caso, por exemplo, das referências por este feitas a Kant, Aristóteles, Rutherford, Hilbert, Newton, Descartes, Bergman e Gödel. Em geral, no entanto, Rosen tem por hábito escrever extensamente sem se preocupar em indicar suas leituras. Independentemente disso, enfatizo que a noção de “relação

¹ Para um estudo mais detalhado da origem da biofísica matemática e da biologia relacional, ver Hoffmann (2013).

de modelagem” é bem mais elaborada do que estou aqui esboçando, sendo formalmente derivada no âmbito da teoria matemática das categorias. Assim, sugiro ao leitor interessado – e com predisposição para a matemática – a leitura das fontes originais, para aprofundamento (Rosen, 1991; 2000).

Podemos agora indagar: no que consiste exatamente a visão geral proposta por esse autor? Buscarei, ao longo dos próximos parágrafos, elucidar este ponto. Segundo a concepção roseniana, existem dois “mundos”, o das coisas simples e o das coisas complexas. O mundo real é constituído de coisas complexas. O mundo dos mecanismos, por outro lado, é um mundo fictício, criado pela física e consolidado em seus sistemas formais. Nesse contexto, o método científico se limita a produzir dados para alimentar o sistema formal. O fato é que, para Rosen, houve aqui uma inversão radical, sendo a relação de modelagem (apresentada acima) esquecida e o sistema formal tomado como sendo a realidade em si. Em outras palavras, o paradigma vigente substituiu o mundo real, e os processos de codificação e decodificação foram largamente esquecidos. A ontologia foi evidentemente alterada a partir do momento em que esse paradigma tomou o lugar do mundo real. O resultado, conclui Rosen, é que muitos pesquisadores simplesmente pressupõem que o mundo real é repleto de mecanismos, ou seja, de sistemas simples, os quais podem ser descritos através de outros sistemas simples. Porém, se o mundo real é “complexo” no sentido roseniano,² então todo e qualquer sistema teórico, formal, pode ser apenas parcialmente bem sucedido (Mikulecky, 2001b).

Para Rosen, um sistema *complexo* possui “algo” de que um mecanismo simples carece. É esse algo que está no centro de toda e qualquer discussão sobre complexidade, em sua opinião. A essência do debate reside, portanto, na existência de uma coisa que é irreversivelmente perdida quando o sistema é reduzido às suas partes estruturais. Rosen adotou, assim, a ideia de que um sistema complexo se caracteriza por possuir um conjunto de componentes funcionais, os quais somente têm significado no contexto do sistema como um todo. Remover esses componentes do seu contexto equivale a promover a perda de seu “significado”. Realizando uma analogia linguística, podemos dizer que os componentes funcionais dão conta de um tipo de “semântica”, surgindo a partir da “sintaxe” provida pelas partes do sistema.

Segundo Mikulecky (2001b), que é um dos promotores das ideias de Rosen, duas concepções de *emergência* devem ser distinguidas para a melhor compreensão das ideias desse autor. A primeira é a descoberta de atributos de um sistema que eram, antes, invisíveis sob a perspectiva do paradigma newtoniano. A outra, de maior importância, é o surgimento de “novidade” legítima, através de processos evolutivos e de ontogenia. Evidentemente, a primeira é uma forma trivial de emergência, simplesmente resultante da complexidade intrínseca do mundo real em conjunção com as limitações da metáfora mecanicista. O debate atual sobre complexidade – argumenta Mikulecky – surgiu quando o paradigma dominante foi levado a seus limites, o que expôs as suas fraquezas. Diversas instituições de pesquisa, devotadas às assim chamadas “ciências da complexidade”, surgiram em decorrência desse debate. Essas ciências, à luz da epistemologia roseniana, não são nada mais do que a exploração do erro (em um sentido técnico) decorrente da adoção de um universo de discurso por demais limitado para responder certas questões fundamentais, tais como “o que é vida?”. Exemplos importantes são o comportamento caótico, apresentado por sistemas de equações não-lineares, e a suposta emergência de novos fenômenos ocorrendo no “limiar do caos” (Kauffman, 1993). O problema aqui, sob a ótica de Rosen, é que os fenômenos caóticos surgem apenas *dentro* do paradigma newtoniano, sendo assim um simples *artefato* resultante da substituição do mundo real por um formalismo mecânico.

² Para uma visão conservadora de complexidade, ver Mainzer (1997).

Considerando o que foi dito anteriormente, poderíamos – no âmbito do quadro delineado por Rosen – questionar fortemente a importância das simulações computacionais, as quais são evidentemente baseadas em modelos mecânicos. Em concordância com essa abordagem, o uso, na biologia, de modelos tais como “redes booleanas aleatórias” e “algoritmos genéticos”, dentre outros, decorre da adoção acrítica do paradigma newtoniano no âmbito das novas tecnologias computacionais – sendo estas, por sua vez, possibilitadas, pela construção de máquinas com grande poder de processamento informacional. A disciplina conhecida como “vida artificial” (Beer, 2004; Langton, 1997) é um claro exemplo dessa tendência, que é particularmente valorizada pelos muitos adeptos da pesquisa em “cognição incorporada” (Beer, no prelo). Toda e qualquer forma de “emergência”, nesse contexto, resulta (para Rosen) apenas do fato de levarmos ao limite o paradigma vigente.

A diferença entre sistemas rosenianos simples e complexos pode ser ilustrada através de uma comparação. Antes de tudo, sistemas simples, ao contrário de sistemas complexos, possuem um “modelo maior”. Além disso, no caso dos sistemas complexos, há uma diferença fundamental entre o processo (matemático) de análise das partes de um sistema em termos de seus componentes, e o processo de síntese, visando recriar o sistema. Essa diferença definitivamente não existe, conforme Rosen, em sistemas simples. Além disso, para Rosen, sistemas simples (diferentemente de sistemas complexos) são fragmentáveis, computáveis, plenamente simuláveis, possuem somente “sintaxe”, não exibem causalidade final, não comportam auto-referência e possuem apenas partes materiais (e não componentes funcionais). Ademais, os sistemas simples se caracterizam pela contexto-independência (Mikulecky, 2001b).

Eu gostaria de destacar que, para Rosen, a dicotomia acima levantada surge, de forma muito clara, a partir da distinção entre sistemas formais e sistemas naturais, realizada no contexto da relação de modelagem. O “mundo substituto” criado pela ciência e cristalizado no paradigma newtoniano, em oposição ao mundo real, possui os atributos de sistemas simples. No paradigma newtoniano existe um “modelo maior”, a *dinâmica*, modelo este ao qual estão vinculados todos os outros modelos concebíveis. Sob esse paradigma, toda informação relevante sobre sistemas naturais pode ser formulada, mesmo que apenas em princípio, em termos da dinâmica de partículas tais como átomos e moléculas. Em sistemas complexos, por outro lado, as propriedades requerem modelos distintos, não deriváveis entre si e irreduzíveis a um único “modelo maior”. No que tange à distinção entre modelos sintéticos e analíticos, é importante salientar que, como o próprio Rosen enfatiza, modelos analíticos diferem de modelos sintéticos em termos de generalidade. O paradigma newtoniano, entretanto, requer que ambos sejam coincidentes em seus formalismos, o que produz um mundo formal extremamente não genérico, incapaz, assim, de recapturar a essência do mundo real (Mikulecky, 2001b). A condição de coincidência entre os dois modos descritivos, exigida pelo paradigma vigente, leva à fragmentabilidade e à ideia de que tudo é reconstituível como um conjunto de algoritmos (Dean, 1997), programáveis em um computador universal. Finalmente, um sistema computável é naturalmente simulável (Pippenger, 1997; Sipser, 1997), e isso se constitui na expressão de que tudo pode ser reduzido à sintaxe, segundo a concepção tradicional.

Eu gostaria ainda de enfatizar um ponto que considero vital no contexto desta discussão. Para Rosen, aqueles modelos analíticos que não apresentam um equivalente sintético possuem um tipo especial de auto-referência, sendo esta manifesta como laços fechados de vinculação causal eficiente, sem um equivalente mecânico. Além da “causalidade eficiente”, chamo atenção para o fato de que, na concepção roseniana, muitos sistemas complexos, tais como organismos vivos, possuem modelos internos preditivos de seu ambiente, o que supostamente daria conta de uma interpretação em termos de “causalidade final” (Rosen, 1985). Assim, através desses modelos, o comportamento atual de um ser vivo pode ser afetado pela *antecipação* de eventos

futuros, o que caracterizaria um tipo de “finalismo” não vitalista. Finalmente, para Rosen, os *componentes funcionais* de sistemas complexos são simplesmente a manifestação das suas “qualidades semânticas”, sendo perdidos em qualquer tentativa de fragmentação. Quero aqui sublinhar que a definição de componentes funcionais é sempre contexto-dependente, equivalendo, sua remoção do contexto, à perda da identidade. Na concepção roseniana, a contexto-dependência tem relação direta com a auto-referência, e conseqüentemente com a existência de um análogo fisicamente realizado de “impredicações lógicas”. Isso porque cada componente funcional deve sua existência ao sistema como um todo, o qual, por sua vez, existe graças aos componentes funcionais. Essa qualidade evidentemente não está disponível para outros tipos de estruturas. Finalmente, na concepção roseniana não existe um mapeamento um-para-um entre os componentes funcionais e quaisquer partes materiais identificáveis, embora os primeiros surjam com base na existência dos últimos (Rosen, 2000).

O biomatemático Robert Rosen foi responsável, como espero ter demonstrado, por uma mudança radical na estrutura teórica e nos conceitos focais da biologia relacional. De fato, Rosen aparentemente percebeu fraquezas e lacunas inerentes à proposta de Rashevsky, passando a desenvolver uma abordagem própria claramente distinta. O primeiro trabalho publicado de Rosen, seguindo a orientação de Rashevsky, constou da introdução de um modelo relacional de um sistema genérico de metabolismo-reparo. Inicialmente formalizado com o auxílio de ferramentas tradicionais da teoria geral dos sistemas, o modelo foi subsequentemente retrabalhado no contexto da teoria das categorias, no segundo trabalho publicado de Rosen. Eu gostaria de enfatizar que essa foi, tanto quanto sei, a primeira aplicação da teoria das categorias no contexto da biologia. Em anos subsequentes, Rosen viria a aperfeiçoar essas e outras ideias, dentre as quais a noção de um organismo como sendo um “repositório de impredicações”, conforme mencionado anteriormente. Essa conclusão foi alcançada após uma longa série de investigações em torno dos modelos de metabolismo-reparo (Rosen, 1991).

Apesar dos esforços acima destacados, a biomatemática se mantém, até hoje, fortemente atrelada a métodos associados à física-matemática e a outras áreas da matemática clássica. Por exemplo, em obras consagradas como *Mathematical Biology*, de Murray (1989), grande ênfase é dada a modelos baseados em equações diferenciais. Esses sistemas são empregados classicamente para o estudo do comportamento de uma ou mais populações de organismos, cinéticas reativas, osciladores biológicos, sistemas de reação-difusão, formação de padrões espaciais, redes neurais, propagação de epidemias, evolução e morfogênese, dentre outros temas – curiosamente, algumas dessas áreas foram inauguradas pelo próprio Rashevsky no início do século passado, antes deste pesquisador desenvolver sua própria concepção de biologia relacional (Hoffmann, 2013). A temática da *organização biológica* está virtualmente ausente na obra de Murray e em outras obras contemporâneas, e de fato as ferramentas matemáticas normalmente descritas na literatura técnica são completamente inadequadas para abordar esse tema. Assim, a teoria matemática das categorias aparentemente apenas encontra lugar, na biologia matemática moderna, nos trabalhos de Rosen (ver e.g., Rosen 1991), de Mikulecky (e.g., Mikulecky, 2001c) e de alguns estudantes de Rosen, notadamente Louie (2009; 2013).

3. A biologia relacional em comparação com outras abordagens

Considero importante apresentar o contexto mais recente do debate em torno das ideias de Rosen, comparando-as com o trabalho de outros autores. Antes de tudo, existe ainda muita discussão sobre o significado de conceitos como o de “fechamento causal” (*causal closure*). Alguns autores identificam fechamento causal com “fechamento semântico” (e.g. Vaneechoutte, 2000), no sentido de que um sistema semanticamente fechado contém toda a “informação” e a funcionalidade para

sua replicação, o que por sua vez é evidenciado nos modelos rosenianos de metabolismo-reparo (e de metabolismo-reparo-replicação). Outros autores salientam, entretanto, que “o fechamento de Rosen sob a causa eficiente significa *para causas eficientes agindo dentro do sistema*” (Salthe, 2000, p. 37 – itálicos adicionados; tradução livre), sendo, portanto, um tipo de “fechamento organizacional”, que deve sempre acontecer *antes* que algum “fechamento semântico” ocorra. Ainda segundo outros autores, esse “fechamento organizacional” precisa ser claramente distinguido da *autopoiese* de Maturana e Varela (Gabora, 2000), estando, esta última, situada em uma concepção de mundo puramente mecanicista, que toma organismos por máquinas (Sheets-Johnstone, 2000), mesmo que estas sejam “máquinas autopoieticas”. Nas palavras de Maturana e Varela: “O fato de que os sistemas vivos são máquinas não pode demonstrar-se apelando a seus componentes. Deve-se mostrar sua organização mecanicista de maneira tal que seja óbvio o modo como todas as suas propriedades surgem dela” (Maturana e Varela, 1997, p. 70). Um indício da origem dessa concepção mecanicista é dado pelo próprio Varela:

A faculdade de ciências, naquela época pioneira, fazia poucas concessões no nível de formação matemática. Em meu primeiro dia de aula, o professor começou a escrever: “Seja *E* um espaço vetorial; os axiomas de *E* são”: [...] Após o choque inicial para colocar-me ao nível, descobri na matemática uma linguagem e uma maneira de pensar que me maravilharam. Ao mesmo tempo descobri, graças a Heinz von Foerster, o mundo da cibernética, os modelos e a reflexão sistemática. Heinz é um dos fundadores de todo esse universo de discurso e, ainda que o tenha conhecido pessoalmente apenas em 1968, se transformou em um personagem de grande importância para mim. Em seus trabalhos, que circulavam pelo laboratório da rua Independência, apareciam títulos que me maravilhavam, como *História natural das redes neurais*. [...] Encontrei nessas ideias um instrumento para expressar as propriedades dos fenômenos biológicos, além de suas características materiais. [...] Era uma forma de pensar que tinha aparecido somente nos anos cinquenta, mais claramente com a publicação do livro *Cybernetics* de Norbert Wiener [...], e sob a influência de outro grande personagem do MIT, Warren McCulloch [...] (Maturana e Varela, 1997, p. 39-40).

Cabe aqui, antes de qualquer outra coisa, entender a importância que a matemática teve no desenvolvimento do pensamento de Varela. Por outro lado, a influência indireta que Varela sofreu da concepção mecanicista de “redes neurais” é decorrente das ideias originais de Nicolas Rashevsky, algumas décadas.³ Rashevsky, por sua vez, acabou abandonando essa concepção mecanicista, vindo a propor uma matemática “holística” radicalmente diferente, onde são as relações entre “qualidades”, “funções” ou “propriedades” biológicas (e não entre estruturas mecânicas) que realmente importam. Rosen mais tarde modificou bastante essa concepção, mas foi igualmente capaz de aplicar a matemática em um contexto não mecanicista, ao contrário de Varela. Com relação a Wiener, mencionado por Varela no transcrito acima, considero interessante reproduzir o seguinte trecho de um comentário seu (citado por Rosen, 1991, p. 112 – tradução livre):

Professor Rashevsky e sua escola de biofísica [...] têm contribuído muito para direcionar a atenção daqueles matematicamente inclinados para as possibilidades das ciências biológicas, embora possa nos parecer que eles estão muito dominados por problemas de energia e potencial e pelos métodos da física clássica para fazer o melhor trabalho possível no estudo de sistemas como o sistema nervoso [...].

³ Discuto esse tema de forma mais aprofundada em outro texto (Hoffmann, 2013).

Esse é claramente um equívoco, e de fato Rosen enfatiza com muita veemência que Wiener realizou esse comentário no âmbito de uma discussão entusiasmada sobre as redes neurais de Walter Pitts, trabalho que, ironicamente, Pitts realizou graças a Rashevsky e que consistia em uma versão Booleana discreta das “redes de dois fatores” deste (Cf. Hoffmann, 2013).

No que tange a Maturana e Varela, evidentemente seu trabalho vai muito além do que a minha breve discussão poderia contemplar. Não há dúvidas quanto ao fato de que o trabalho desses autores encontrou ampla aceitação e aplicação nas mais diversas áreas do conhecimento, da biologia às ciências sociais, passando pela psicologia e pela filosofia. Por outro lado, entendo que, da perspectiva roseniana, a limitação das ideias de Maturana e de Varela reside na manutenção de uma *perspectiva* mecânica, cuja tradição histórica remonta pelo menos a Descartes. Por outro lado, críticas de outros pensadores, tais como “[...] a autopoiese [de Maturana e de Varela], que define unicamente unidades autônomas [...], carece das características essenciais aos organismos vivos, como o fato de que nascem, morrem e sobrevivem através de *phylum* genéticos” (Guattari, 1992, p. 52), embora possam ser em parte pertinentes, estão além do âmbito desta discussão. Não obstante, considero curioso o uso extensivo que Guattari e seus seguidores fazem de expressões tais como “agenciamentos maquínicos”, “maquinizações”, etc., atitude esta que seria facilmente alvo – a meu ver – das duras críticas de Rosen, para o qual os seres vivos definitivamente não são máquinas.

Vou me permitir, agora, tecer algumas considerações um pouco mais detalhadas com referência ao conceito técnico de autopoiese. Antes de qualquer coisa, um sistema autopoietico é *organizado* (ou seja, definido como uma unidade, uma “totalidade integrada”, para usar as palavras de Rashevsky) como uma rede de processos de produção (de transformação e de destruição) de componentes, de modo que (1) através de suas interações e transformações continuamente regeneram e realizam a rede de processos (relações) que os produzem; (2) constituem a *máquina* como uma unidade concreta no espaço na qual os componentes existem, especificando o domínio topológico de sua realização como tal rede. Qualquer unidade atendendo a essas especificações é um sistema autopoietico, e qualquer sistema autopoietico *realizado* em um espaço físico é um sistema vivo (Varela, 1979). As máquinas atuais, por mais avançadas e complicadas que sejam, nem de longe atendem a essas demandas. De fato, não produzem nem repõem seus próprios “componentes”.

Eu gostaria de enfatizar ainda outro ponto, que considero importante. Existe uma diferença bastante sutil entre o conceito de autopoiese e o de “autonomia”, posteriormente introduzido por Varela: sistemas autônomos são definidos como uma unidade composta por uma rede de relações de componentes que, através de suas interações, *recursivamente* regeneram a rede de interações que os produziu, e realizam a rede como uma unidade no *espaço* na qual os componentes existem constituindo e especificando as fronteiras da unidade, destacando-a assim do “plano de fundo” (Varela, 1981). A classe de sistemas autônomos é definida, segundo Varela, por seu “fechamento organizacional”, o que nos remete à breve discussão que fiz, anteriormente, sobre os conceitos de “fechamento”. Segundo Varela, no fechamento organizacional os processos são relacionados como uma rede, de modo que se inter-dependem *recursivamente* para a geração e realização dos processos em si. Além disso, os processos constituem o sistema como uma unidade reconhecível no *espaço* no qual o processo se dá (Varela, 1979).

Qual meu objetivo com as descrições técnicas de definições, realizadas nos últimos parágrafos? O fato é que, uma vez feitas essas considerações, eu consigo agora sinalizar certas diferenças existentes entre as abordagens de Varela e de Rosen, que, em meu entendimento, são importantes. Primeiro, o “fechamento causal” evidenciado nos sistemas rosenianos de metabolismo e reparo não é postulado com referência a um espaço métrico, abstendo-se

efetivamente dessas considerações. Em termos mais concretos, não há menção explícita no trabalho de Rosen – pelo menos até onde pude verificar em minhas investigações – ao fato de redes serem consideradas como unidades no espaço (pelo menos, não como parte central de seus argumentos). Por outro lado, é manifesta a grande importância que Varela atribui à noção de *recursividade*.⁴ Contrariamente a Varela, Rosen convincentemente vincula a noção de recursividade ao uso de um universo de discurso extremamente limitado, incompatível com a descrição de sistemas vivos. Isso é bastante evidente, por exemplo, no extrato a seguir (Rosen, 1991, p. 242 – tradução livre):

[Um Sistema material que não é um mecanismo] não pode possuir um conjunto de estados, construído sinteticamente a partir dos estados de modelos mínimos e fixo de forma definitiva. Se não há um conjunto de estados, certamente não há recursividade, portanto não há dinâmica no sentido ordinário do termo.

Assim, sugiro que, como Varela atribui papel central à recursividade em sua teoria, esta por sua vez permanece atrelada ao plano da computação (isso é evidente também na ênfase que Varela atribui aos sistemas dinâmicos, cujas limitações são igualmente alvo das críticas de Rosen em diversos trabalhos). Mas uma característica central do trabalho de Rosen é precisamente a afirmação de que os processos centrais à organização biológica são em realidade não computáveis. Meu argumento aponta alguns indícios, portanto, de uma dicotomia primária entre o trabalho desses autores. Deixo em aberto, no entanto, a possibilidade de que Rosen esteja equivocado quanto a essa questão.

Para alguns exemplos do uso da interpretação roseniana das categorias causais Aristotélicas em vários contextos, eu sugiro a leitura de Minch (1998) e Lorenzana (1998). Uma excelente discussão sobre a recente “ressuscitação” dessas ideias pode ser encontrada em Van de Vijver (1998). Uma vez feitas essas considerações, chamo atenção para o fato de que, na interpretação de Rosen, a descrição de algo através do que *este* vincula (e não através do que *o* vincula) é uma característica clara da causa final aristotélica (Rosen, 2000). Foi precisamente com o intuito de elaborar uma forma de inclusão da causalidade final em formalismos que Rosen avançou a noção dos sistemas de metabolismo-reparo “fechados à causalidade eficiente”. Nesses sistemas, toda pergunta do tipo “por que *x*?” pode ser respondida dentro do sistema. Em outras palavras, a “finalidade” de determinado componente funcional é precisamente vincular outros componentes do sistema. Em princípio não há indícios de vitalismo (no sentido histórico do termo) nessas proposições, embora essa questão mereça, em minha opinião, uma reflexão mais aprofundada.

4. Considerações finais

Dentro da biologia teórica, o campo de investigação conhecido como “biologia relacional” enfatiza a importância das noções de organização e de função biológica. De fato, existem indícios de que é no contexto das relações entre componentes (não necessariamente estruturais) de um sistema que devemos buscar a compreensão de organizações complexas. Alguns possíveis caminhos foram apontados por físicos, matemáticos e biólogos do porte de Rashevsky (1954), Rosen (1991) e Kauffman (1993), dentre outros.

A escola de pensamento conhecida como biologia relacional foi introduzida por Nicolas Rashevsky na metade do século passado (Rashevsky, 1954) com o intuito de enfatizar o conceito de organização biológica, sendo esta defendida, nas décadas subsequentes, quase que

⁴ Para uma descrição técnica de recursividade, ver Shoenfield (1993).

exclusivamente pelo biomatemático Robert Rosen. Este pesquisador por sua vez acrescentou, ao longo das décadas, diversos avanços importantes (Mikulecky, 2001a), tais como uma nova classe de modelos relacionais para a descrição de processos de metabolismo e reparo, bem como o uso da teoria das categorias na biomatemática. Esses extensos estudos conduziram à necessidade da discussão dos limites impostos pelo assim chamado paradigma newtoniano, bem como – o que, sugiro, pode ser considerado ainda mais importante para uma avaliação crítica do trabalho de Rosen – dos problemas decorrentes da extrapolação desse paradigma visando incorporar a representação de sistemas biológicos.

Vimos ainda que, como decorrência de suas investigações, Rosen acabou derivando uma noção especial de complexidade, a qual considerava mais adequada para a compreensão da vida em si. Sob a ótica da “ontologia da complexidade roseniana”, conforme evidenciado em sua teoria de modelos, que esbocei neste trabalho, todo sistema natural é complexo. Cabe lembrar que complexidade, para Rosen, é a propriedade de um sistema natural que se manifesta na inaptidão de qualquer formalismo em capturá-lo adequadamente. Como decorrência, são necessários muitos modelos bem sucedidos (ou seja, que refletem adequadamente as relações causais do sistema natural), não deriváveis entre si, para que se tenha uma melhor aproximação. Como metáfora, podemos nos imaginar tentando aproximar uma curva sinuosa utilizando apenas linhas retas (quantas desejarmos): quanto mais linhas, melhor a aproximação, porém as ferramentas formais (as linhas retas) nunca substituirão o sistema natural (a linha curva).

Linhas de pesquisa como a assim chamada “vida artificial” (“Alife”) vêm sendo recebidas pela comunidade científica com entusiasmo, o que transparece no grande número de encontros e congressos especificamente organizados para lidar com essa temática (ver e.g. Adami et al., 1998). Sob a perspectiva roseniana, entretanto, esses sistemas computacionais não são capazes de realizar certos modos de vinculação causal centrais à organização biológica, tais como o “fechamento causal” (Rosen, 1991). Creio haver demonstrado, ao longo do texto, que o surgimento da “biologia relacional” foi decorrência precisamente da insatisfação de alguns pesquisadores com as limitações dos modelos matemáticos puramente mecânicos (mais modernamente, na forma de algoritmos computacionais).

Apesar de seus méritos, conforme evidenciado pela discussão acima, proponho que o trabalho de Rosen apresenta limitações importantes. Por exemplo, grande parte de seus argumentos contra concepções mecanicistas e reducionistas decorre precisamente da exploração dos limites dos sistemas lógicos e matemáticos ancorados em fundações tais como a teoria dos conjuntos (Cameron, 1998) ou, alternativamente, a teoria das categorias (Arbid e Manes, 1975). Para mim, fica claro que Rosen não conseguiu abandonar completamente tais formalismos em prol de uma abordagem completamente inovadora, condizente assim com os seus próprios anseios.

O fato de Rosen haver proposto a adoção da teoria das categorias na biologia, como uma alternativa supostamente inovadora, não parece haver alterado significativamente o quadro que esbocei acima, uma vez que este persistiu enfatizando o uso da “categoria dos conjuntos” em muitas de suas exemplificações – o que, faço questão de enfatizar, é uma limitação importante. Não obstante, isso não impede, evidentemente, que a teoria das categorias venha sendo utilizada como uma boa ferramenta para a manipulação de formalismos, embora usualmente a comunidade matemática costume dar mais ênfase à teoria dos conjuntos (Di Prisco, 1997) do que à teoria das categorias.

Finalmente, desejo aqui esclarecer que, apesar de minhas inúmeras reservas à concepção roseniana de mundo, acima delineada, eu considero largamente meritória a investigação detalhada de suas premissas fundamentais e resultados teóricos, e também acredito que estamos

longe de esgotar as possibilidades de análise crítica da biologia relacional como um todo. Em conformidade com meu posicionamento, concluo afirmando que a linha de investigação inaugurada por Rashevsky e amadurecida por Rosen – mesmo que a sua aplicabilidade não tenha sido convincentemente demonstrada por seus idealizadores, e mesmo que possa conter inúmeras inconsistências – exemplifica com elegância a perene busca por estruturas conceituais mais adequadas à compreensão da assombrosa complexidade da vida.

Agradecimentos

O conteúdo deste artigo deriva de trabalho (não publicado) realizado durante o desenvolvimento de minha tese de doutorado na UFRGS. Assim, agradeço ao CNPq pelo suporte financeiro oferecido na época, na forma de uma bolsa.

Referências

- ADAMI, C.; BELEW, R. K.; KITANO, H.; TAYLOR, C. E. (Eds.) *Artificial Life VI: Proceedings of the sixth international conference on artificial life*. Massachusetts: MIT Press, 1998.
- ARBID, M.; MANES, E. *Arrows, structures, and functors: the categorical imperative*. New York: Academic Press, 1975.
- BEER, R. D. Autopoiesis and cognition in the game of life. *Artificial Life*, v. 10, n. 3, p. 309-326, 2004.
- BEER, R. D. Dynamical systems and embedded cognition. In: FRANKISH, K.; RAMSEY, W. (Eds.) *The Cambridge handbook of artificial intelligence*. Cambridge: Cambridge University Press, no prelo.
- CAMERON, P. J. *Sets, logic and categories*. London: Springer-Verlag, 1998.
- DEAN, N. *The essence of discrete mathematics*. London: Prentice Hall, 1997.
- GABORA, L. M. Conceptual closure: how memories are woven into an interconnected worldview. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 901, n. 1, p. 42-53, 2000.
- DI PRISCO, C. A. *Una introducción a la teoría de conjuntos y los fundamentos de las matemáticas*. Campinas: UNICAMP, 1997.
- GUATTARI, F. *Caosmose: um novo paradigma estético*. São Paulo: Editora 34, 1992.
- HOFFMANN, D. S. The dawn of mathematical biology. *Controvérsia*, v. 9, n. 2, p. 53-61, 2013.
- KAUFFMAN, S. A. *Origins of order: Self-organization and selection in evolution*. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- LANGTON, C. G. *Artificial life: an overview*. Massachusetts: MIT Press, 1997.
- LOUIE, A. H. *More than life itself: a synthetic continuation in relational biology*. Frankfurt: Ontos-Verlag, 2009.
- LORENZANA, J. M. Self-organization and self-construction of order. In: VAN DE VIJVER, G.; SALTHER, S.; DELPOS, M. (Eds.) *Evolutionary systems: biological and epistemological perspectives on selection and self-organization*. Dordrech: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 67-78.
- LOUIE, A. H. *The reflection of life: functional entailment and imminence in relational biology*. New York: Springer, 2013.
- MAINZER, K. *Thinking in complexity: the complex dynamics of matter, mind and mankind*. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- MATURANA, H.; VARELA, F. *De máquinas e seres vivos - Autopoiese: a organização do vivo*. Porto Alegre: Artes Médicas, 1997.

- MAYR, E. *Desenvolvimento do pensamento biológico: diversidade, evolução e herança*. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1998.
- MIKULECKY, D. C. Robert Rosen (1934-1998): a snapshot of biology's Newton. *Computers and Chemistry*, v. 25, n. 4, p. 317-327, 2001. (2001a)
- MIKULECKY, D. C. The emergence of complexity: science coming of age or science growing old? *Computers and Chemistry*, v. 25, n. 4, p. 341-348, 2001. (2001b)
- MIKULECKY, D. C. Network thermodynamics and complexity: a transition to relational systems. *Computers and Chemistry*, v. 25, n. 4, p. 369-391, 2001. (2001c)
- MINCH, E. The beginning of the end: on the origin of final cause. In: VAN DE VIJVER, G.; SALTHER, S; DELPOS, M. (Eds.) *Evolutionary systems: biological and epistemological perspectives on selection and self-organization*. Dordrech: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 45-58.
- MURRAY, J. D. *Mathematical biology*. New York: Springer-Verlag, 1989.
- PIPPENGER, N. *Theories of computability*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- RASHEVSKY, N. Topology and life: In search of general mathematical principles in biology and sociology. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, v. 16, n. 4, p. 317-348, 1954.
- ROSEN, R. *Anticipatory systems: philosophical, mathematical and methodological foundations*. Oxford: Pergamon Press, 1985.
- ROSEN, R. *Life itself: a comprehensive inquiry into the nature, origin and foundation of life*. New York: Columbia University Press, 1991.
- ROSEN, R. *Essays on life itself*. New York: Columbia University Press, 2000.
- SALTHER, S. A classification of closure concepts. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 901, n. 1, p. 35-41, 2000.
- SHEETS-JOHNSTONE, M. The formal nature of emergent biological organization and its implications for understandings of closure. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 901, n. 1, p. 320-331, 2000.
- SHOENFIELD, J. *Recursion theory*. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- SIPSER, M. *Introduction to the theory of computation*. Boston: PWS Publishing, 1997.
- VAN DE VIJVER, G. Evolutionary systems and the four causes: a real Aristotelian story? In: VAN DE VIJVER, G.; SALTHER, S; DELPOS, M. (Eds.) *Evolutionary systems: biological and epistemological perspectives on selection and self-organization*. Dordrech: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 243-254.
- VANEECHOUTTE, M. Considerations on the evolution of information, leading to an alternative proposal for explaining the origin of the cell, a semantically closed system. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 901, n. 1, p. 139-147, 2000.
- VARELA, F. *Principles of biological autonomy*. New York: Elsevier, 1979.
- VARELA, F. Autonomy and autopoiesis. In: ROTH, G.; SCHWEGLER, H. (Eds.) *Self-organizing systems: an interdisciplinary approach*. Frankfurt: Campus-Verlag, 1981. p. 14-23.