

AUTO-ORGANIZAÇÃO E CRIAÇÃO

ITALA M. LOFFREDO D'OTTAVIANO

Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência – Grupo de Lógica Teórica e Aplicada, CLE/GLTA-UNICAMP e Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, IFCH-UNICAMP, Campinas (SP)

ETTORE BRESCIANI FILHO

*Faculdade de Engenharia Mecânica, FEM-UNICAMP, Campinas (SP) e
Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, PUC-Campinas, Campinas (SP)*

RESUMO

Neste trabalho são inicialmente discutidas as noções e conceitos que fazem parte da ciência dos sistemas, a sistêmica. A seguir são apresentados alguns aspectos fundamentais dos sistemas dinâmicos denominados caóticos, com o objetivo de analisar os possíveis processos de auto-organização a eles inerentes, particularmente o processo de criação.

PALAVRAS CHAVE: auto-organização, criação, organização, sistema, sistema dinâmico, sistema caótico.

INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo estudar o fenômeno de auto-organização, no contexto dos sistemas dinâmicos caóticos e, particularmente, o processo de criação. O texto inicia com uma discussão sucinta das noções, conceitos e definições básicas que fazem parte da teoria do sistema geral, recentemente denominada sistêmica (Bertalanffy, 1968; LeMoigne, 1990). No artigo Bresciani & D'Ottaviano (2000) são tratadas essas noções e é iniciado o estudo dos fenômenos de organização e auto-organização, sob o prisma da teoria de sistemas (Atlan, 1979; Debrun, 1996a, 1996b; Morin, 1977-1991, 1990). Em Bresciani & D'Ottaviano (2004), dando continuidade ao artigo mencionado, é analisado o comportamento dos sistemas

dinâmicos caóticos, também sob o enfoque da auto-organização (Ferrara-Prado, 1994; Lorenz, 1993).

O sistema é considerado como sendo concebido pelo sujeito, que também pode lhe atribuir finalidade. Mas entende-se que esse sujeito pode não ter existência atual podendo, entretanto, vir a tê-la, o que o caracterizaria, portanto, como um sujeito disposicional. Nesse sentido, a interpretação da existência de sistemas, independentemente de um sujeito, não é incompatível com a existência de sistemas como decorrência de interpretação por um determinado sujeito.

Algumas das principais noções básicas introduzidas em Bresciani & D'Ottaviano (2000), sob a perspectiva da sistêmica – tais como as de elemento, conjunto, fronteira, relação, ordem, estrutura, complemento e universo – se adequam aos conceitos lógico-matemáticos correspondentes (Halmos, 1960; Mendelson, 1964). Por outro lado alguns termos, tais como os de campo e força, são utilizados apenas como recurso intuitivo aos termos da bibliografia da ciência física.

Este texto contém partes dos artigos acima mencionados e é fruto de discussões sistemáticas, a partir de 1995, nos Seminários Regulares do “Grupo Interdisciplinar CLE - Auto-Organização” do Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência (CLE) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

1. SISTEMA, COMPLEXIDADE E SUJEITO

Um sistema pode ser inicialmente definido como uma entidade unitária, de natureza complexa e organizada, constituída por um conjunto não-vazio de elementos ativos que mantêm relações, com características de invariança no tempo, que lhe garantem sua própria identidade. Nesse sentido, um *sistema* consiste de um conjunto de elementos que formam uma estrutura, a qual possui uma funcionalidade. O conjunto não-vazio de elementos, subjacente a um sistema, é denominado *universo* do sistema. Entretanto, observa-se que não se deve confundir um sistema com o seu universo.

Os *elementos* do sistema são considerados como sendo as partes, os componentes, os atores ou os agentes que realizam atividades. Os elementos possuem características, propriedades, atributos, predicados e qualidades, que podem ser expressos por parâmetros

variáveis ou constantes. O sistema também desenvolve atividades (funções, processos, ações, etc.), assume estados e possui características (propriedades, etc.) próprias.

Subconjuntos do universo do sistema podem, por sua vez, constituir *subsistemas* do sistema geral. Isso significa que tais subconjuntos, sob o ponto de vista de algumas relações que caracterizam o sistema, constituem *subestruturas* da estrutura subjacente ao sistema; e, além disso, tais subestruturas possuem funcionalidade, que é parte integrante da funcionalidade do sistema geral.

Devido às relações estabelecidas entre os elementos, as características do sistema não são obrigatoriamente iguais à soma das características dos seus elementos ou dos seus subsistemas; ou seja, 'o todo é mais, ou menos, do que a soma das partes', e esse fato define a propriedade de sinergia (positiva ou negativa, respectivamente) do sistema.

Entre as características do conjunto de elementos de um sistema, em decorrência da definição de sistema, duas são fundamentais:

- a) As propriedades e o comportamento de cada elemento do conjunto têm efeito nas propriedades e no comportamento do todo, e dependem das propriedades e do comportamento de pelo menos um dos outros elementos - ou seja, não existem elementos isolados, no sistema;
- b) Cada possível subconjunto de elementos apresenta a mesma primeira característica e, portanto, o conjunto não pode ser subdividido em subconjuntos independentes.

As características (propriedades, etc.) do sistema podem ser consideradas como emergências (produtos, resultantes, etc.) desse sistema; e, em particular, a sinergia sistêmica pode ser considerada a primeira propriedade que surge na constituição de um sistema. Contudo, outras propriedades fundamentais são a globalidade (constituição da unidade global com sua invariância) e a possibilidade de novidade (como, por exemplo, no caso extremo, a constituição da própria existência).

Os elementos ativos, no domínio do espaço e do tempo, estabelecem *relações* diretas e indiretas. As relações entre os elementos se manifestam de diversas formas. Os elementos dentro do sistema constituem uma rede de relações que, em geral, se arranjam em relações arborescentes e relações circulares. As relações de hierarquia são casos particulares das relações arborescentes e das relações de ordem. As relações circulares (de anel, de laço, etc.) se apóiam no princípio do círculo recorrente, que se identifica por um processo, no qual os

efeitos de uma relação entre elementos são causas dessa mesma relação; ou, o produto de um sistema afeta o processo de produção desse produto; ou, ainda, o estado final de um sistema gera ou modifica o estado inicial desse mesmo sistema; ou, ainda mais, os efeitos retroagem sobre as suas causas. É oportuno salientar que as noções de relações aqui utilizadas satisfazem o conceito lógico geral de relação.

Um sistema é denominado ordenado quando pelo menos uma das relações que caracterizam sua estrutura é relação de ordem, isto é, quando existe pelo menos uma 'ordem' no sistema. Nesse sentido, um sistema pode ser considerado ordenado sob diferentes enfoques, ou seja, ele pode ter distintas relações de ordem; se uma dessas relações de ordem for total então, sob essa perspectiva, ele pode ser considerado totalmente ordenado. Observa-se que sistemas hierarquizados são sistemas ordenados, isto é, as hierarquias são relações de ordem. Quando o sistema é totalmente hierarquizado, esta hierarquia constitui uma relação de ordem total no sistema.

Neste ponto é fundamental destacar que fazemos distinção entre ordem e organização: a organização é uma característica essencial de cada sistema, enquanto a ordem é uma característica particular de certas organizações e, portanto, de certos sistemas. Nesse sentido, podem existir organizações não ordenadas, e também organizações ordenadas, mas não totalmente hierarquizadas. Isto é, podem existir sistemas organizados, cujas estruturas subjacentes não possuem, entre as relações que as constituem, qualquer relação de ordem.

A *complexidade* pode ser caracterizada a partir do conceito de relação. Sistemas complexos apresentam necessariamente relações circulares, apesar de seus elementos não serem obrigatoriamente numerosos. Os sistemas constituídos de muitos elementos, mesmo com relações arborescentes, podem ser considerados apenas complicados, mas não obrigatoriamente complexos. A complexidade depende da quantidade de elementos, variedade de elementos, quantidade de relações e variedade de relações.

O sistema pode ser considerado como um objeto a ser observado, estudado, abstraído, conceituado, concebido, analisado, simulado, modelado ou representado por um *sujeito*, que pode não ser interno a esse sistema. O sujeito, mesmo não sendo interno ao sistema, estabelece uma relação com o objeto de estudo, através de atividades de reflexão, especulação, observação e experimentação. Essas atividades buscam encontrar qualidades de organização no objeto, que caracterizam a sua existência, estrutura, funcionalidade e possível

evolução. A presença de um sujeito implica inevitavelmente na presença de um ponto de vista subjetivo, não mais apenas objetivo, do sistema. Quando o sujeito é um elemento interno ao sistema, ele se constitui em um participante, que exerce influência sobre os demais elementos do sistema e é influenciado por eles. O universo de fenômenos observados (representados, etc.) se define na relação entre sujeito e objeto, no domínio da forma, do espaço e do tempo.

2. SISTEMA, ORGANIZAÇÃO E FINALIDADES

A *organização* é identificada pelo conjunto das características estruturais e funcionais de um sistema, que representa as relações e as atividades ou funções desse sistema e que tem a capacidade de transformar, produzir, reunir, manter e gerar os comportamentos desse sistema. Essa caracterização traz em si a dinâmica subjacente do sistema.

A estrutura de um sistema é o conjunto articulado de relações entre os elementos do sistema e pode, ou não, se constituir em um invariante desse sistema no tempo. O funcionamento de um sistema é conferido pelo conjunto articulado de atividades dos elementos; esses elementos conduzem o processo de transformação, exercendo funções de forma dinâmica, mas condicionada pela estrutura. Entretanto, a dinâmica do sistema pode também provir de um processo de mudança estrutural.

A organização pode ser vista como uma característica do sistema, fundamentada na capacidade de transformar a diversidade de comportamento (relações e atividades) dos diferentes elementos em uma unidade global; mas, em face de seu comportamento dinâmico e de natureza complexa, pode ser também uma fonte de criação de diversidade, de capacidade e de especificidade estrutural e funcional.

Os campos de forças de atração, ou de cooperação, e de repulsão, ou de competição, são inerentes ao sistema, pois são características típicas de organizações ativas. A organização pode conter uma certa dose de desorganização, a qual pode contribuir tanto para reduzir como para estimular essa organização. Quando as forças de competição criam as condições de desenvolvimento preponderantes da desorganização, propaga-se a desintegração do sistema. Quando as forças de colaboração criam as condições de desenvolvimento preponderantes da organização, propaga-se a integração do sistema. Tanto no primeiro quanto no segundo caso, pode-se dizer que, no limite, a crise sistêmica se materializa, ou

como desorganização plena (mobilidade total), ou como organização plena (imobilidade total). Convém destacar que as origens das forças de cooperação e de competição não são somente internas ao sistema, podendo provir de elementos externos ao sistema ou elementos de fronteira.

Os sistemas podem ter objetivos (finalidades, propósitos, intenções, expectativas e significados) atribuídos pelo sujeito. As atividades desenvolvidas pelos elementos do sistema caracterizam as funções do sistema. O exercício dessas funções caracteriza a funcionalidade do sistema, ou seja, um sistema é uma estrutura cujos elementos exercem funções (atividades); é uma estrutura em funcionamento, caracterizando-se, portanto, como uma estrutura com funcionalidade. Observa-se que não se deve confundir os termos função, funcionamento e funcionalidade.

3. SISTEMA E MEIO-AMBIENTE

Todo sistema tem uma fronteira, que pode ser identificada pelo sujeito, quando da sua observação. Essa fronteira permite reconhecer os elementos que fazem parte e os que não fazem parte do sistema. O *meio ambiente* é tudo aquilo que se convencionou como estando fora do sistema. O universo do meio ambiente é o complemento do universo do sistema, em relação a uma determinada totalidade de elementos.

Cabe destacar que, em geral, um sistema não é completamente isolado do seu meio ambiente (ou fechado ao meio ambiente), pois tudo (matéria, energia ou informação – noções não discutidas neste texto) o que entra ou sai do sistema vem do, passa por ou sai para o meio ambiente, sendo a fronteira o lugar onde se dá essa passagem de importação e de exportação. Contudo, pode-se admitir a existência de sistemas que não interagem de qualquer modo com o meio ambiente - nesse caso, esses sistemas são caracterizados como fechados e isolados. Pode-se admitir também a existência de sistemas com elementos particular e totalmente sensíveis às contingências ambientais - nesse caso, esses sistemas são caracterizados como abertos.

Em decorrência da existência da fronteira, pode-se identificar os elementos internos e externos ao sistema, lembrando que esses elementos podem manter relações entre si e exercer influências mútuas. Os *elementos internos* ao sistema são os elementos do universo do sistema, que mantêm pelo menos uma determinada relação apenas com elementos do

universo do sistema, ou seja, não mantêm essa relação com qualquer elemento do universo do meio ambiente. Os *elementos externos* ao sistema são os elementos do universo do meio ambiente, que mantêm pelo menos uma determinada relação apenas com elementos do universo do meio ambiente, ou seja, não mantêm essa relação com qualquer elemento do universo do sistema.

Assim, pode-se distinguir uma categoria especial de elementos, denominados *elementos de fronteira*, que têm por incumbência estabelecer as relações do sistema com o meio ambiente e do meio ambiente com o sistema, sendo os responsáveis pelas entradas e saídas do sistema. Observa-se que os elementos de importação e de exportação são exatamente os elementos de fronteira do sistema. Os elementos de fronteira não são quer internos, quer externos ao sistema.

Em alguns casos, os elementos de fronteira podem pertencer ao universo do sistema e, em outros, ao universo do meio ambiente. Porém, em qualquer desses casos, o elemento é de fronteira justamente porque mantém relações com elementos internos e externos ao sistema.

Além disso, observa-se que pode acontecer que todos os elementos da fronteira de um sistema sejam externos ao sistema, que neste caso é totalmente aberto. Por outro lado, pode acontecer que todos os elementos da fronteira do sistema pertençam ao universo do sistema, que neste caso é um conjunto fechado. Porém, como ser elemento de fronteira significa manter necessariamente relações com elementos internos e externos, em nenhum desses casos, mesmo nos casos extremos, o sistema se caracteriza como sendo fechado e isolado do meio ambiente (ou fechado ao meio ambiente).

Os elementos internos e externos atuam, inter-relacionando-se ou interagindo.

As noções de elemento interno, externo e de fronteira de um sistema, e a noção de complemento introduzidas neste item decorrem dos conceitos lógico-matemáticos gerais correspondentes.

4. FLUXO E CAMPO

Como já se mencionou, para que um sistema possa desenvolver um fluxo de atividades características de um processo, deve estar presente, como uma característica do sistema, um campo de forças de influência ou de catalisação (positiva ou negativa). Esse campo é subjacente às relações entre os elementos do sistema, às atividades do sistema e também às

alterações funcionais e estruturais. Portanto, admite-se que, além de um fluxo de relações e atividades, pode estar presente também um fluxo de estrutura e funcionamento, ou seja, um fluxo de organização. Então, em um sistema complexo, supõe-se a existência de diversos fluxos, que são afetados por campos diferentes. Esses fluxos são articulados entre si e são responsáveis pelas atividades, podendo alterar a estabilidade organizacional do sistema.

Um sistema pode ser identificado pelos seus estados (ou situações) e a evolução do sistema pode ser identificada pelas mudanças desses estados. A descrição dos estados de um sistema e de suas evoluções permite estabelecer uma perspectiva a partir do exterior do sistema. Esses estados decorrem de comportamentos dos elementos do sistema, e também de suas relações com o meio ambiente, e são caracterizados pelos valores atribuídos a variáveis que se referem às propriedades elementares do sistema e que são denominadas variáveis de estado.

5. MUDANÇA E EQUILÍBRIO

Um sistema pode encontrar-se em um estado de equilíbrio e apresentar a característica de estabilidade, ou encontrar-se em um estado de desequilíbrio e apresentar a característica de instabilidade; mas em ambas situações, em alguns casos, pode-se caracterizar um potencial de instabilidade, quando o sistema se encontra em um estado estável, ou um potencial de estabilidade, quando o sistema se encontra em um estado instável. Um estado de equilíbrio é aquele em que o sistema não se transforma e mantém as suas características organizacionais. Um estado de desequilíbrio é aquele em que o sistema se transforma, com mudanças das suas características organizacionais.

As mudanças organizacionais fazem parte, ou são consequência, de processos do sistema, que podem ser considerados como sendo emergências que ocorrem no (ou que decorrem do) sistema, com exceção da sobrevivência, que é uma condição prévia da existência do sistema. As mudanças de estado podem ser identificadas, em um sistema, pelas mudanças dos comportamentos dos elementos de entrada e de saída do sistema (representados por variáveis de estado); e cada novo estado pode ser considerado como uma novidade no sistema.

As mudanças do sistema podem decorrer de atividades predeterminadas e realizadas por elementos internos, externos ou de fronteira e, nesse caso, são previsíveis. Mas as

mudanças também podem decorrer de atividades não predeterminadas e realizadas, de forma espontânea e autônoma, por elementos internos, externos ou de fronteira e, nesse outro caso, são imprevisíveis. Além disso, as mudanças organizacionais podem ocorrer de modo contínuo ou descontínuo, e também de modo incremental ou radical. A mudança radical pode se dar por uma ruptura total com a organização anterior; em um caso-limite, a partir de um momento considerado crítico ou de crise sistêmica, o evento de mudança radical pode se constituir em uma catástrofe sistêmica.

Duas características dos sistemas, que estão associadas à manutenção ou à mudança de estados, podem ser mencionadas:

- a) Característica da regulação, que se manifesta pela manutenção do estado de equilíbrio e da existência do sistema;
- b) Característica de adaptação, que se expressa pela mudança de um estado em um novo estado de equilíbrio.

Os mecanismos de regulação ou de adaptação fazem parte dos processos que levam o sistema a atingir a condição de equilíbrio e de desequilíbrio, com manutenção de estado ou com mudança de estado. A regulação e a adaptação se dão através de atividades exercidas por elementos externos, internos ou de fronteira do sistema. No caso particular de uma atividade autônoma de elementos internos, com eventual participação de elementos de fronteira, afirma-se que os mecanismos de controle, que mantêm a existência do sistema, são de auto-regulação ou de auto-adaptação.

6. ORGANIZAÇÃO E AUTO-ORGANIZAÇÃO

A organização do sistema pode ser considerada sob os aspectos formal e informal, que se relacionam dinamicamente, no processo de transformação organizacional, e se complementam, entrelaçando-se na constituição do sistema. A organização formal do sistema, como já vimos, é constituída por uma estrutura, predeterminada ou preconcebida – por elementos internos, externos ou de fronteira – para atender a um funcionamento pretendido, em direção a uma finalidade prefixada.

A organização informal do sistema é constituída também por uma estrutura, com um funcionamento correspondente, que não é predeterminada, preconcebida ou planejada, mas

que, pelo contrário, decorre espontaneamente das atividades de elementos internos, e eventualmente de fronteira, do sistema, com elevados graus de autonomia (Bresciani, 1996).

As mudanças organizacionais do sistema podem ser predeterminadas. Porém, as mudanças organizacionais do sistema podem também ser espontâneas e consequência das atividades autônomas de elementos internos, e eventualmente de fronteira, do sistema; bem como, podem ser consequência da interação destas atividades autônomas com as predeterminadas.

Tanto a organização informal quanto as mudanças organizacionais espontâneas podem apresentar propriedades e comportamentos inesperados, imprevistos, imprevisíveis e incertos. Esses comportamentos e propriedades, baseados na existência de relações de sinergia, decorrem dos altos graus de liberdade nas atividades dos elementos, das altas sensibilidades dos elementos às contingências e circunstâncias ambientais ou até dos eventos casuais.

A *auto-organização* se caracteriza como um fenômeno de transformação ou de criação de uma organização, que decorre fundamentalmente da interação das atividades predeterminadas, se as houver, com essa atividade autônoma e espontânea de elementos internos e, eventualmente, de fronteira do sistema, através de processos recorrentes. A atividade espontânea decorre da existência de grau mínimo de autonomia dos elementos atuantes. Por sua vez, os processos recorrentes precisam estar presentes, para que os elementos autônomos, em suas atividades, se integrem em uma organização com auto-referência.

As mudanças predeterminadas podem ser concorrentes ou concordantes com as mudanças espontâneas, ou ainda, complementares e facilitadoras dessas últimas. Contudo, as mudanças predeterminadas também podem ser divergentes, discordantes e antagônicas das mudanças espontâneas e, portanto, podem causar dificuldades ao desenvolvimento dessas últimas, contribuindo para que o sistema apresente um estado de contraposição, contradição e conflito.

A influência de atividades autônomas dos elementos do meio ambiente – ou seja, elementos externos e eventualmente de fronteira – no sistema pode ser caracterizada como ruído, perturbação ou flutuação, que é introduzida no sistema e que pode contribuir também, de algum modo, para a ocorrência do fenômeno de auto-organização.

7. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE SISTEMAS DINÂMICOS

O *sistema linear* é aquele no qual as mudanças sucessivas de estado são caracterizadas por uma constante de proporcionalidade. Pode-se afirmar, de modo menos rigoroso, que as variáveis dos estados subsequentes assumem valores proporcionais aos valores atribuídos ao estado inicial, relativamente a uma variável que caracteriza a evolução dos estados. Em outras palavras, pode-se indicar que o sistema linear é aquele no qual os efeitos dos processos são proporcionais às suas causas; ou ainda, no qual o efeito total dos processos é igual à soma dos efeitos de cada processo individual. Quando se representa um sistema linear com uma equação matemática, verifica-se que uma determinada solução da equação, adicionada a uma outra solução (ou a outras soluções), produz uma terceira solução da equação.

No sistema não-linear essa proporcionalidade pode não ocorrer obrigatoriamente. E, no caso dos sistemas com evolução hipersensível às condições iniciais, uma pequena mudança no valor de uma das variáveis no estado inicial pode causar uma grande mudança nos estados subsequentes do sistema.

Um *sistema dinâmico* é aquele no qual pelo menos uma de suas variáveis de estado depende do tempo, e um sistema dinâmico não-linear é aquele no qual essa dependência do tempo é não-linear. Essas variáveis representativas do sistema, que são quantidades dependentes do tempo, são particularmente denominadas dimensões do sistema.

O *sistema determinístico* é aquele no qual os estados se desenvolvem a partir dos estados anteriores, de acordo com uma determinada lei preestabelecida. Ou seja, conhecendo-se o estado do sistema em qualquer estágio (ou instante) anterior, que pode ser particularmente o inicial, é possível determinar o estado do sistema em um estágio (ou instante) posterior, que pode ser particularmente o final.

O sistema dinâmico pode ser determinístico. Mas um sistema determinístico pode também comportar uma pequena influência de fatores probabilísticos (fatores do acaso, aleatórios, estocásticos ou randômicos), sem que o seu comportamento, quanto à evolução dos seus estados, seja essencialmente afetado, mesmo quando esses fatores são retirados.

Contudo, um sistema pode ter um comportamento que caracteriza tanto o determinismo como o probabilismo. A partir de um dado estado inicial, não identificado de um modo exato, mas segundo uma distribuição de lei probabilística, pode-se deduzir, de acordo com uma lei determinista, um estado posterior, segundo essa lei probabilística.

Sob o enfoque da teoria de sistemas dinâmicos, um sistema é considerado aberto, quando influencia e é influenciado pelo seu meio ambiente, trocando energia e massa com esse meio ambiente; a troca isolada de informação não está sendo considerada, a não ser aquela informação contida na massa e na energia. Nesse sentido, de acordo com o conceito de sistema aberto introduzido anteriormente (item 3), os sistemas dinâmicos abertos são casos particulares de sistemas abertos sob o enfoque sistêmico.

Um sistêmico dinâmico é conservativo quando não perde energia para o meio ambiente ou não ganha energia do meio ambiente. Caso o comportamento do sistema leve à perda de energia para o meio ambiente, o sistema é considerado degenerativo ou dissipativo; e, caso o comportamento comporte ganho de energia do meio ambiente, o sistema é considerado regenerativo.

O *sistema dinâmico caótico* é visto comumente como sendo um sistema com um comportamento aleatório, mas efetivamente tem um comportamento predominantemente conduzido por regras determinísticas, mesmo quando ocorre aleatoriedade. E é esse comportamento que caracteriza o que muitas vezes se denomina determinismo caótico. Desse modo, o caos determinístico se refere a sistemas com processos que são de natureza determinística, mas que têm, muitas vezes, um comportamento que não se pode prever ou predizer.

O *caos determinista* se diferencia do que se denomina caos entrópico, pois o primeiro apresenta periodicamente o aparecimento e o desaparecimento de comportamentos com padrões organizados – com possibilidade de previsibilidade de comportamento ao longo do tempo – e o segundo evolui de modo a provocar a descaracterização da organização do sistema. Neste texto são tratados somente os conceitos referentes ao caos determinista. As múltiplas interações entre as forças ou fatores de influência (representadas por parâmetros constantes e variáveis) de estabilidade e de instabilidade, que atuam no sistema e que desenvolvem processos múltiplos e inter-relacionados, podem promover tanto a organização como a desorganização no sistema. As forças dinâmicas de estabilidade atuam no sentido de criar as condições de equilíbrio e de organização do sistema. Mas a essas forças opõem-se as forças dinâmicas de instabilidade, que podem criar condições de desequilíbrio e de desorganização do sistema. Assim sendo, a convergência e a divergência (ou a cooperação e

a competição) entre as forças de estabilidade e instabilidade criam as condições básicas para o aparecimento do comportamento caótico do sistema.

A observação do comportamento caótico dos sistemas dinâmicos permite a compreensão de processos que podem ser considerados, simultaneamente ou não, em parte organizados, esperados e determinísticos e, em parte, desorganizados, inesperados e aleatórios.

As equações matemáticas não lineares, que representam os sistemas não-lineares, geralmente não apresentam soluções matemáticas analíticas, ou seja, nem sempre apresentam soluções que podem ser descritas na forma de expressões algébricas constituídas de funções matemáticas elementares. Mas o estudo qualitativo dos sistemas (lineares e não-lineares) permite descrever algumas propriedades de resolução de sistemas, ou seja, sem necessidade de obtenção de suas soluções analíticas. Esse estudo se apóia em métodos matemáticos numéricos, isto é, em métodos aritméticos elementares.

Em Bresciani & D'Ottaviano (2004), a partir de exemplos de sistemas dinâmicos físicos elementares, relativos aos movimentos oscilatórios de uma partícula, são introduzidos conceitos fundamentais de sistemas dinâmicos, tais como sistema dissipativo, estado de sistema, atrator e espaço de fases.

Um movimento periódico, ou harmônico, é aquele que se repete em intervalos de tempo iguais. Se o movimento se repete em uma mesma trajetória (vai-e-vem), é denominado movimento oscilatório ou vibratório. Um exemplo clássico de sistema dinâmico físico é o do oscilador ou movimento harmônico simples, que pode ser ilustrado pelo *pêndulo simples*: uma partícula (com massa) é colocada em uma das extremidades de uma haste rígida (idealmente sem massa), que é vinculada pela outra extremidade a uma articulação (idealmente sem atrito). Quando o pêndulo é deslocado, ou seja, é retirado da sua posição de equilíbrio (estável), ele inicia um movimento harmônico simples, devido à ação da força da gravidade. O movimento do pêndulo simples é representado pelo ângulo de deslocamento, e depende da massa (m) da partícula e do comprimento (l) da haste rígida. O diagrama (ou retrato) de fases, construído pelo par deslocamento (x) e velocidade de deslocamento (x') em cada ponto, permite compreender de modo descritivo gráfico o movimento do sistema, que não apresenta uma solução com funções elementares. No caso do pêndulo simples (sem

consideração de atrito), a energia total se conserva e o sistema é denominado conservativo (ou hamiltoniano).

Outro exemplo clássico de sistema dinâmico físico é o oscilador ou movimento harmônico amortecido, que pode ser ilustrado pelo *pêndulo com atrito*. O sistema é descrito por uma equação, que tem um termo conservativo e um termo dissipativo. As trajetórias do par (x, x') constituído por deslocamento e velocidade de deslocamento no espaço de fases, após se estabelecer determinados deslocamentos iniciais, convergem para a origem $(0,0)$, ou seja, para um estado imóvel, após um tempo suficientemente longo. Esse ponto de convergência é denominado *atrator*, e é somente em um sistema dissipativo que se pode introduzir o conceito de atrator.

Outro exemplo, também clássico, é o oscilador ou movimento harmônico amortecido e forçado, que pode ser ilustrado pelo *pêndulo do relógio*. O sistema, além dos termos conservativos e dissipativos de energia, possui um termo de geração de energia que, no caso, provém da ação da força externa aplicada pelo mecanismo de relógio para compensar as perdas de energia por atrito e manter o relógio em movimento. Nesse caso, o atrator evolui para um ciclo-limite, cuja representação gráfica é uma figura circular.

Observe-se que todo o atrator, em qualquer sistema, constitui uma órbita, ou seja, um conjunto de estados. E ainda, um conjunto invariante de órbitas, ou trajetórias, é considerado um atrator quando as órbitas de pontos próximos tendem a fazer parte desse conjunto. Nota-se que, nos sistemas descritos, os atratores podem ser pontuais e também se apresentar na forma de curvas. Os ciclos-limite são soluções periódicas (como nos movimentos regulares, por exemplo, dos osciladores forçados não-lineares) e dependem do balanço entre dissipação e geração de energia. O atrator pode ser considerado como um conjunto de soluções para o qual órbitas (ou seja, conjuntos de estados) próximas dos ciclos-limite convergem, depois de decorrido um determinado intervalo de tempo, e esse fato liga o atrator à noção de estabilidade.

8. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE SISTEMAS DINÂMICOS CAÓTICOS

No estudo dos sistemas dinâmicos caóticos são fundamentais os conceitos de *sistema com atrator caótico* (ou estranho), de sistema com evolução hipersensível às condições

iniciais e de sistema com transição de comportamento organizado para comportamento caótico.

O conceito de atrator se insere no estudo das estruturas (denominadas topológicas) do diagrama de fase de trajetórias dinâmicas. A teoria geométrica do caos e a teoria das bifurcações têm por objetivo explicar a evolução do processo caótico, com verificação dos percursos (rotas, trajetórias ou órbitas) que caracterizam o processo, sendo essa evolução expressa por equações diferenciais determinísticas.

Nos sistemas dinâmicos verifica-se que, além dos atratores pontuais e periódicos (representados por figuras, como ciclos-limite ou como toros), podem existir outros tipos de atratores, denominados *estranhos*, que representam os estados cuja evolução é hipersensível às condições iniciais. Esses atratores podem ser representados por trajetórias de aspecto alongado e dobrado (como ferraduras), e também de aspecto irregular e com dimensões fracionadas (denominadas dimensões fractais).

O aspecto irregular do atrator resulta da dinâmica caótica do sistema, que é de natureza determinística, não sendo causada por perturbações, flutuações ou ruídos externos de natureza estocástica. O aspecto fractal se revela através de uma figura, cuja forma se repete em escalas dimensionais cada vez menores, mantendo, portanto, um padrão de semelhança. A trajetória decorrente de atrator estranho não é de fácil identificação e pode apresentar oscilações irregulares, decorrentes da dinâmica caótica do sistema.

Para ilustrar esses conceitos, pode-se tomar o exemplo de um fenômeno complexo da física, que é o *escoamento turbulento de fluidos*. Abrindo um pouco uma torneira, a coluna de água, formada devido à ação da gravidade, inicialmente apresenta-se como um escoamento uniforme e estacionário. Abrindo um pouco mais a torneira, a coluna passa a escoar com um movimento periódico e não-estacionário. Abrindo ainda mais a torneira, o escoamento passa a ser irregular, caracterizando a turbulência. A abertura da torneira representa o denominado parâmetro de controle do processo de escoamento.

Desse modo, observa-se que o caos é decorrente de uma evolução temporal hipersensível às condições iniciais, e o escoamento caótico é caracterizado pelo atrator estranho. Portanto, na análise do problema do aparecimento da turbulência, nota-se a importância de se considerar a hipersensibilidade às condições iniciais e de se identificar os intervalos de tempo característicos de separação de duas evoluções temporais do sistema, a

partir de condições iniciais próximas (deixando de lado a identificação dos períodos dos modos).

A chamada *bacia de atração* é o conjunto de curvas ou ciclos-limite que atraem as soluções próximas do sistema. Tais ciclos-limite podem ser estáveis ou instáveis e apresentar diferentes formas. Cabe destacar que existem atratores que atraem as soluções próximas, mas podem existir os denominados *repulsores*, que repelem as soluções próximas.

9. CONCEITOS COMPLEMENTARES DE CONTROLE DE SISTEMAS DINÂMICOS

Seria interessante um detalhamento sobre a questão da estabilidade de sistemas, o que não faremos neste texto, sendo que com o conceito de *controle de sistemas* (da cibernética) pode-se complementar o conceito de estabilidade e de instabilidade do sistema dinâmico. Um sistema dinâmico pode se apresentar na condição de estabilidade, na qual é controlado por retroações negativas, que amortecem as influências das variáveis que provocam uma mudança de estado, fazendo com que o sistema retorne ao estado inicial. Mas, um sistema pode também se apresentar na condição de instabilidade, na qual é conduzido por retroações positivas, que reforçam as influências das mudanças originais ocorridas nas variáveis, sendo que essas mudanças nas variáveis causam pequenas mudanças de estado, que se acumulam (de forma exponencial), podendo levar a uma condição explosiva ou de colapso. E também o sistema pode se apresentar nas condições de estabilidade e instabilidade, com retroações negativas e positivas, que podem levar o sistema a ter diferentes situações de comportamentos.

O sistema pode ter um comportamento de estabilidade, com um atrator pontual, que independe do tempo; ou um comportamento de estabilidade periódica, com um atrator periódico, retornando periodicamente ao estado inicial; ou um comportamento de natureza mais complexa e completamente errática, com geração de um ruído determinístico; ou um comportamento de natureza complexa, com um atrator de forma indefinida, com dependência sensível às condições iniciais. Nesse último caso, como já se descreveu, verifica-se que pequenas variações das condições iniciais podem levar o sistema a ter um comportamento denominado de caótico.

O processo de *bifurcação* pode ser considerado como sendo a passagem de um estado de equilíbrio para um estado de comportamento periódico e, a seguir, para um estado de comportamento caótico. Esse processo depende da existência de um crescente número de variáveis de influência, acopladas entre si, com diferentes frequências de mudanças. Exemplo típico é o fenômeno da turbulência já citado, tratado pela mecânica dos fluidos.

Expondo de forma bastante resumida, em um sistema dissipativo de energia a evolução caótica pode levar o sistema a ter uma organização com atratores estranhos - atratores que criam uma nova organização implícita, que surge dentro e a partir do caos - que caracterizam o sistema com comportamento altamente complexo e instável, e que podem ocorrer em diferentes níveis de escalas. Em um sistema com evolução caótica, devido à sensibilidade às condições iniciais, somente se pode prever as conseqüências das mudanças das variáveis de curto prazo, tornando as previsões de longo prazo impossíveis. A dependência hipersensível às condições iniciais produz alterações no sistema, que evoluem aceleradamente com o passar do tempo, não sendo esse o caso de todos os sistemas dinâmicos - por exemplo, o pêndulo (com atrito) caminha inevitavelmente para o repouso. Um sistema de evolução caótica é praticamente irreversível no tempo, pois é muito pequena a probabilidade da condição inicial ser novamente atingida, devido à dificuldade de obter um sincronismo perfeito das variáveis no espaço e no tempo.

10. SISTEMAS DINÂMICOS CAÓTICOS E PROCESSOS DE AUTO-ORGANIZAÇÃO

Como a organização é identificada pelo conjunto das características estruturais e funcionais de um sistema, ela representa as relações entre os elementos e as atividades ou comportamentos do sistema. Nota-se que essa conceituação de organização leva em conta que o sistema possui uma dinâmica estrutural e funcional (ou seja, organizacional) subjacente. E nota-se também que a estrutura e o funcionamento do sistema possuem padrões de formação (ou configuração) e de evolução definidos e que conferem identidade ao sistema.

O processo de auto-organização não possui esses padrões de formação e de evolução de modo predeterminado, pois há a possibilidade de mudança de estado com emergência de novo estado, que caracteriza a *criação* e a *evolução*, através do mecanismo de adaptação

estrutural e funcional. Em alguns sistemas, a evolução para uma forma organizada ocorre na ausência de interação com elementos externos .

Cabe lembrar, como foi descrito no início, que as múltiplas interações entre as forças ou fatores de influência de estabilidade e as forças de instabilidade, que atuam no sistema dinâmico, podem promover tanto a organização como a desorganização no sistema. E a convergência e a divergência, ou mais explicitamente a cooperação e a competição, entre as forças de estabilidade e de instabilidade podem criar as condições para se ter um sistema dinâmico caótico. Esse sistema comporta processos que podem ser considerados, em parte, de organização e, em parte, de desorganização.

Uma condição fundamental do sistema dinâmico caótico é a sua sensibilidade às condições iniciais. Um dado conjunto de condições iniciais pode permitir que se possa prever, com um certo grau de precisão, a evolução dos estados, porém sem a exatidão das soluções analíticas. De fato, um certo conjunto de condições iniciais leva a um conjunto de soluções do sistema, que caracteriza o que já se identificou como atrator do sistema.

A transição de um comportamento organizado para um comportamento caótico, com perda de estabilidade estrutural, é decorrente da evolução temporal hipersensível às condições iniciais, com cenários de transição de um regime estável para um regime instável. Os parâmetros de organização do sistema podem influenciar nas transições de fase, nas quais as alterações estabelecidas podem dar origem a padrões novos ou distintos de organização.

Em qualquer sistema, quando os seus estados se deslocam para caracterizar uma região permanente no espaço de estados, pode-se afirmar que os estados estão sendo atraídos para essa região, denominada atrator. Portanto, o atrator do sistema pode ser considerado como sendo a formação de uma região restrita (no espaço de estados), a partir de uma região mais ampla (no espaço de estados), por meio de uma ação e um controle exercidos predominantemente pelo próprio sistema, com ou sem influência de elementos externos ou de fronteira. Um sistema complexo pode ter muitos atratores, que podem mudar (ou sofrer mutação) em função de determinados parâmetros de controle funcionais e estruturais do sistema.

Nesse sentido pode-se aqui acrescentar que *os sistemas dinâmicos caóticos podem comportar processos de auto-organização*. E em muitos casos o estudo da dinâmica da

constituição e da mudança dos atratores se confunde com o estudo dos processos com auto-organização.

Mas, neste texto, cabe fazer ainda mais algumas considerações complementares. Apesar dos sistemas dinâmicos caóticos poderem ser expressos por sistemas de equações matemáticas e, nesse sentido, serem expressos por equações que são determinísticas, os fenômenos representados por essas equações podem não ser determinados e previsíveis. É sob esse ponto de vista que se pode considerar que os sistemas dinâmicos caóticos podem conter processos que comportam as emergências com auto-organização como os processos de criação. E, além disso, o aperfeiçoamento na exatidão e na precisão dos métodos de avaliação da variabilidade dos parâmetros, que expressam os fenômenos, poderá levar a que esses fenômenos passem a ser representados não mais por sistemas dinâmicos caóticos, mas que eventualmente passem a ser representados por outros sistemas de equações matemáticas determinísticas ou probabilísticas.

11. CRIAÇÃO, EVOLUÇÃO E AUTO-ORGANIZAÇÃO

A criação pode ser resultado tanto de transformações, que levam a mudanças, conduzidas por atividades espontâneas e autônomas quanto de transformações conduzidas por atividades constitutivas e predeterminadas de elementos do sistema, e eventualmente de fronteira, bem como de interação desses dois tipos de transformações. E também a criação pode ser tanto um produto novo, como um resultado de um processo de transformação organizacional, esse caracterizado pela formação de estruturas novas ou de funcionamentos novos. Em ambos os casos, fica evidente que a criação é uma emergência do sistema.

A criação decorre da influência de diferentes fatores, particularmente aqueles relacionados aos graus de autonomia e à natureza constitutiva dos elementos do sistema (eventualmente de fronteira), como elasticidade e plasticidade e, em alguns casos, também capacidade de imaginação e de concepção. Mas é importante também considerar a influência dos fatores relacionados à existência de uma organização no sistema, propícia às transformações, ou à existência de um meio ambiente motivador (incentivador, catalisador e perturbador) do processo de criação.

As relações entre a criação e a organização podem estar contidas em um processo representado por um círculo recorrente, no qual a organização propicia a realização da

criação e essa criação, ao ser realizada, propicia a modificação da própria organização. A recorrência também pode se dar na relação do sistema com o meio ambiente - o meio ambiente propicia a criação no ou do sistema, e esta criação altera as características do meio ambiente.

O processo dinâmico da relação do sistema com o meio ambiente pode garantir a sobrevivência (manutenção e renovação), a reprodução e a evolução do sistema. A criação é um processo que não se identifica simplesmente com esse processo global, porém pode fazer parte dele. Mas uma condição importante deve estar presente: a necessidade do sistema ter uma referência em relação a si mesmo para não se descaracterizar e perder a sua identidade. E essa auto-referência pode estar contida em uma memória do sistema, que registra a existência passada, representada por uma seqüência de estados assumidos anteriormente.

O processo de evolução é caracterizado pela seqüência de estados de equilíbrio e de desequilíbrio, ou seja, pela sucessão de organizações diferentes, que surgem ao longo da transformação do sistema, devido à ação de elementos internos, externos e de fronteira do sistema. Se cada organização (estrutura ou funcionamento) surgida for considerada uma novidade, então pode-se afirmar que a evolução é uma seqüência de inovações organizacionais, o que caracteriza a denominada evolução criativa. Contudo, a evolução não é somente uma manifestação de progresso do sistema com concentração de elementos para a construção de uma nova organização, mas pode ser também um processo de dispersão de elementos ou de degradação em direção à desorganização; além disso, a evolução pode ser geradora de diversidade de organizações.

A auto-organização e a criação também podem estar relacionadas por um processo representado por um círculo recorrente, no qual a auto-organização propicia a realização da criação e a criação, ao ser realizada, propicia a modificação da organização na forma de uma auto-organização.

Muitos modelos tradicionais que explicam o processo de criação, e particularmente de solução de problemas, apresentam um processo com características predominantemente lineares, no sentido de ser um conjunto de atividades conduzidas por etapas em direção a um ponto determinado. Contudo, um determinado grau de características não-lineares

(recorrentes, cíclicas ou iterativas) entre os diferentes passos pode ser admitido nesses modelos (Bresciani & Gonzalez, 2002).

Os dois modelos mais antigos, e ainda freqüentemente citados e estudados, são aqueles que destacam que o processo de criação se constitui de uma primeira etapa de trabalho consciente, seguida de uma etapa de trabalho inconsciente e de uma segunda etapa de trabalho consciente (Poincaré, 1908); ou, de uma forma mais detalhada, de uma etapa inicial de preparação, com as etapas subseqüentes de incubação, iluminação e verificação (Wallas, 1926). Outros pesquisadores, posteriormente, apresentaram modelos mais elaborados, sendo que, de um modo geral, pode-se considerar que apresentam as mesmas características essenciais dos modelos mais antigos.

A natureza dinâmica do processo de criação (mais especificamente do processo de solução de problemas), com a preocupação de identificar a presença de uma dinâmica caótica, é analisada em trabalho mais recente de Torre (1995). Esse autor propõe uma teoria de funcionamento da mente e um modelo dinâmico do processo de solução de problema, considerando que o pensamento envolve um fluxo constante de interação entre processos mentais cognitivos, afetivos, perceptivos e pragmáticos.

Por outro lado Thiértart & Forgues (1995), baseados na teoria dos sistemas dinâmicos caóticos, elaboram um estudo sobre organizações sociais. O modelo apresentado por esses autores para as organizações sociais pode ser adaptado para o estudo do comportamento do indivíduo com atividade de criação: parte-se do princípio de que grande parte dos mecanismos pelos quais se constitui a organização social, que é uma organização (reorganização, auto-organização) de relações de indivíduos, são basicamente os mesmos pelos quais se processa a idéia criativa no indivíduo, que é uma organização (reorganização, auto-organização) de relações de conhecimentos na mente desse indivíduo, em constante interação com o meio ambiente sócio-cultural.

Como nos sistemas dinâmicos caóticos, no processo de criação também estão presentes forças de influências que se opõem e que estão acopladas entre si: forças atuando em direção à estruturação e à estabilidade, associadas às atividades tradicionais de 'administrar' a atividade de criação (forças de cooperação); e forças atuando em direção à desestruturação e à instabilidade, associadas a essa mesma atividade (forças de competição).

Quando se trata de comparação de sistemas físicos com sistemas vivos, particularmente aqueles referentes às mentes humanas, parece que o que se tem obtido é uma descrição qualitativa ou limitadamente quantitativa do comportamento estudado (neste último caso, ver particularmente Kelso, 1995).

REFERÊNCIAS

- ATLAN, H. (1979) *Entre o cristal e a fumaça*. Rio de Janeiro : J. Zahar, 1992.
- BERTALANFFY, L.V. (1968) *General system theory*. New York : Braziller.
- BRESCIANI, F.E. (1996) Organização informal, auto-organização e inovação. In: DEBRUN, M., GONZALES, M.E.Q., PESSOA JR, O. (orgs.) *Auto-organização: estudos interdisciplinares*. Campinas : CLE/UNICAMP, p. 365-380. (Coleção CLE, v. 18)
- BRESCIANI, F.E., D'OTTAVIANO, I.M.L. (2000) Conceitos básicos de sistêmica. In: D'OTTAVIANO, I.M.L., GONZALES, M.E.Q. (orgs.), *Auto-organização: estudos interdisciplinares*. Campinas: CLE/UNICAMP, p.283-306. (Coleção CLE, v. 30)
- BRESCIANI, F.E., D'OTTAVIANO, I.M.L. (2004) Sistemas dinâmicos caóticos e auto-organização. In: D'OTTAVIANO, I.M.L., GONZALES, M.E.Q., SOUZA,G.M. (orgs.) *Auto-Organização: estudos interdisciplinares*. Campinas: CLE/UNICAMP. (Coleção CLE, v. 39) [no prelo]
- BRESCIANI, F.E., GONZALES, M.E.Q. (2001) Um enfoque informacional do processo de criação. In: GONZALES, M.E.Q. et alii. (orgs.) *Encontro com as Ciências Cognitivas*, v.3. Marília: UNESP-Faculdade de Filosofia e Ciências, p.211-228.
- DEBRUN, M. (1996) A idéia de auto-organização. In: DEBRUN, M., GONZALES, M.E.Q., PESSOA JR, O. (orgs.) *Auto-organização: estudos interdisciplinares*. Campinas : CLE/ UNICAMP, p. 3-23. (Coleção CLE, v. 18)
- . A dinâmica da auto-organização primária. In: DEBRUN, M., GONZALES, M.E.Q., PESSOA JR, O. (orgs.) *Auto-organização: estudos interdisciplinares*. Campinas : CLE/UNICAMP, p. 25-59. (Coleção CLE, v. 18)
- FERRARA, N.F.F., PRADO, C.C. (1994) *Caos - uma introdução*. São Paulo : Ed. Blücher.
- FOERSTER, H.V. (1984) *Observing systems*. Seaside, C.A. : Intersystems Pub.
- HALMOS, P.R. (1960) *Teoria ingênua dos conjuntos*. São Paulo : EDUSP, 1973.

- KELSO, J.A.S. (1995) *Dynamic patterns – the self-organization of brain and behavior*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- LEMOIGNE, J.L. (1990) *La modélisation des systèmes complexes*. Paris : Dunod.
- LORENZ, E.N. (1993) *Essência do caos*. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1996.
- MENDELSON, E. (1964) *Introduction to mathematical logic*. Princeton, N.J. : V. Nostrand.
- MORIN, E. (1977-1991) *O Método*: vol. I – *A natureza da natureza* (1977), vol. II – *A vida da vida* (1980), vol. III – *O conhecimento do conhecimento* (1986), vol. IV – *As idéias: a sua natureza, vida, habitat e organização* (1991). Portugal: Ed. du Seuil / Pub. Europa-América, Mem Martins.
- MORIN, E. (1990) *Introdução ao pensamento complexo*. Lisboa : Instituto Piaget.
- POINCARÉ, A. (1908) *La science et l'hypothèse*. Paris : Ed.Flammarion *apud* TORRES *op.cit.*.
- THIÉRTART, R.A., FOGUES, B. (1995) *Chaos theory and organization*. Organization Science, v.6, n.1, p.19-31.
- TORRE, C.A. (1995) Chaos in triadic theory of psychological competence in the academic setting. In: ABRAHAM, F.D., GLGEN, A.R. (orgs) *Chaos theory in psychology*. Westport (CT): Greenwood Publishing Group.
- WALLAS, G. (1926) *The art of thought*. New York: Harcourt Brace.
- EBF-IMLO/25.06.04