

## Teoria do Caos e Complexidade

*As empresas de hoje não funcionam mais como máquinas e precisam se adaptar às leis do caos se quiserem sobreviver.*

Por Carlos Siffert

A física clássica, de Isaac Newton até o século 19, estabelecia uma exata correspondência entre causa e efeito. Os cientistas tinham certeza de ser capazes de reduzir até as mais complicadas situações a interações de umas poucas leis simples e de, assim, prever o comportamento dos mais complexos sistemas ao longo do tempo. Foi sobre esse arcabouço que Frederick Taylor e outros estudiosos das organizações construíram a teoria de que as empresas funcionam como máquinas.

O modelo do átomo postulado por Max Planck, em seu revolucionário trabalho sobre a teoria quântica, publicado em 1900, e o do universo proposto pouco depois, em 1905, por Albert Einstein, na famosa teoria da relatividade, mostraram que, nos extremos do muito grande (o espaço intergaláctico) e do muito pequeno (o das partículas subatômicas), as leis de Newton, um dos pilares da física clássica, não funcionavam. Longe de ser previsível como um mecanismo de relojoaria, a natureza nos aparecia agora aleatória como um lance de dados.

Mais recentemente, a ciência estendeu essa mensagem de incerteza e imprevisibilidade ao mundo do dia-a-dia. Teoria do caos ou, mais recentemente, teoria da complexidade são termos genéricos pelos quais ficou conhecido o novo modelo de funcionamento das coisas. O principal catalisador da teoria do caos foi o trabalho do meteorologista Edward Lorenz, do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). No início da década de 60, Lorenz desenvolveu um modelo que simulava no computador a evolução das condições climáticas. Dados os valores iniciais de ventos e temperaturas, o computador fazia uma simulação da previsão do tempo. Lorenz imaginava que pequenas modificações nas condições iniciais acarretariam alterações também pequenas na evolução do quadro como um todo. Qual não foi sua surpresa ao descobrir que mudanças infinitesimais nas entradas poderiam ocasionar alterações drásticas nas condições futuras do tempo. Uma leve brisa em Nevada, a queda de 1 grau na temperatura em Massachusetts, o bater de asas de uma borboleta na Califórnia podiam causar um furacão na Flórida um mês depois.

Da previsão do tempo ao mercado de ações, das colônias de cupins à Internet, a constatação de que mudanças diminutas podem acarretar desvios radicais no comportamento de um sistema veio reforçar a nova visão probabilística da física. O comportamento de sistemas físicos, mesmo os relativamente simples, é imprevisível. A idéia de que a natureza seja fundamentalmente aleatória vai contra nossa intuição. Mas a segunda constatação é ainda mais estranha: há padrões, regularidades por trás do comportamento aleatório dos sistemas físicos mais complexos, como a atmosfera ou o mar. Na verdade, o estado final de um sistema não é um ponto qualquer; certos percursos parecem ter mais sentido que outros – ou, pelo menos, ocorrem com muito maior frequência. Os estudiosos os chamam de atratores estranhos (strange attractors). Eles permitem que os cientistas prevejam o estado mais provável de um sistema, embora não quando precisamente ele vá ocorrer. É o que acontece com a previsão do tempo ou de um maremoto, por exemplo.

### O desafio à entropia

O outro pilar da física clássica foi construído no século 19 por Mayer, Joule, Helmholtz e August, que estabeleceram as bases do que foi chamado de termodinâmica, o estudo das relações entre calor, temperatura, energia e trabalho. A obra desses cientistas teve grande repercussão, não somente sobre os estudiosos das organizações (como Taylor e Fayol), mas também sobre os economistas da época. Buscando tornar a economia mais científica, os economistas da chamada escola neoclássica, da segunda metade do século, copiaram a matemática da termodinâmica de Joule e Helmholtz, equação por equação, traduzindo-a metaforicamente – e, segundo muitos físicos, incorretamente – por conceitos econômicos.

Quase 100 anos mais tarde, Ilya Prigogine, que em 1977 ganharia o Prêmio Nobel de Química, desenvolveu seu trabalho sobre a aplicação da segunda lei da termodinâmica aos sistemas complexos, incluindo organismos vivos. A segunda lei diz que os sistemas físicos tendem, espontânea e irreversivelmente, a um estado de desordem, ou de entropia crescente. Ela não explica, porém, como sistemas complexos emergem espontaneamente de estados de menor ordem, desafiando, assim, a

tendência à entropia. Prigogine argumenta que alguns sistemas, quando levados a condições longe do equilíbrio – quando levados à beira do caos –, podem iniciar processos de auto-organização. São períodos de instabilidade, de inovação, dos quais resultam sistemas mais complexos e adaptativos. Exemplos desses sistemas complexos adaptativos são o ecossistema de uma floresta tropical, formigueiros, o cérebro humano e a Internet.

Esses sistemas complexos que se adaptam são redes (networks) de agentes individuais que interagem para criar um comportamento autogerenciado, mas extremamente organizado e cooperativo. Tais agentes respondem ao feedback que recebem do ambiente e, em função dele, ajustam seu comportamento. Aprendem da experiência e embutem o aprendizado na estrutura mesma do sistema. Aproveitam as vantagens da especialização, sem cair na rigidez burocrática.

### **Uma (outra) Nova Economia**

As teses de Prigogine são mais que descobertas científicas interessantes. Um número significativo de economistas afirma que economias são sistemas complexos adaptativos e não sistemas fechados, como se acreditava. Entre os adeptos dessa nova economia estão nomes como Kenneth Arrow, ganhador do Prêmio Nobel, e Brian Arthur, do Instituto Santa Fé. Os leitores devem concordar que a maioria das empresas que conhecemos na vida real se parecem mais com máquinas do que com sistemas vivos, são entes muito mais da física clássica que da física moderna de Planck, Einstein e Prigogine.

Tais máquinas são, para usar a expressão de Richard Pascale, administradas segundo os princípios da engenharia social: “Os líderes são a cabeça, a organização é o corpo – a inteligência está localizada no topo da organização. As mudanças são previsíveis – e podem ser antecipadas, pelo menos no horizonte de implementação dos planos. As decisões tomadas são comunicadas – e executadas fielmente ao longo da cadeia de comando”. Mas e se as organizações humanas pudessem se comportar como sistemas complexos adaptativos? E se, em vez de formigas, abelhas ou neurônios, tivéssemos seres humanos reunidos em redes cooperativas?

Stuart Kauffman, também do Instituto Santa Fé, é taxativo: “Sistemas vivos não é uma metáfora para como instituições humanas funcionam. Não, é o que elas são”. Será que essas idéias sofisticadas vão vingar em culturas empresariais tão arraigadas e estranhas a elas? Em um artigo publicado no número corrente (janeiro de 2001) da Harvard Business Review, os pesquisadores da Faculdade Kellogg de Administração Mohanbir Sawhney e Deval Parikh afirmam: “A convergência da tecnologia da informação e de telecomunicações, as contínuas reduções de custo (por exemplo, o preço do transporte de 1 trilhão de bits caiu de 150 000 dólares em 1970 para 12 centavos de dólar em 1999 — 38% ao ano) alteraram fundamentalmente o funcionamento de todas as redes humanas e tecnológicas. Mudanças radicais ocorreram em vários níveis, e vão da maneira pela qual indústrias inteiras estão estruturadas à forma como as empresas interagem com clientes ou como são executadas suas tarefas básicas. ‘A rede é o computador’ é o conhecido slogan da Sun Microsystems. Nós iríamos ainda mais longe: cada vez mais, a rede é a economia”. E isso não é uma metáfora.

As profundas transformações havidas nos últimos anos deslocaram a intrincada rede, o ecossistema que é hoje a economia, para o limite do caos. Assim se explicam duas características marcantes do comportamento recente da economia:

1. uma onda de inovações que parece se acelerar, levando a ganhos de produtividade sem precedentes no passado recente e, em consequência, à prosperidade da economia americana nos últimos anos;
2. um alto grau de instabilidade (crise mexicana, crise russa, crise asiática, crise do Nasdaq, crise Bush/Gore).

Ora, inovação e instabilidade são, com efeito, propriedades de sistemas que funcionam no limite do caos. Para sobreviver na fronteira do caos onde vivem hoje, as empresas precisam ser capazes de se adaptar, de inovar, enfim de se auto-organizar, para ser o que já são em potência: sistemas complexos adaptativos, redes humanas e tecnológicas. Isso também não é uma metáfora. Dizer é infinitamente mais fácil que fazer. Mas fazer, fazer já é uma questão de vida ou morte para as empresas, no mundo inteiro.

## **A complexidade em ação...**

A natureza está repleta de sistemas complexos que se auto-organizam até atingir um estado de aparente estabilidade, como uma colônia de cupins. Especialistas acreditam que, nas condições turbulentas do mercado atual, as empresas precisam funcionar de modo semelhante.

### **... na natureza**

O naturalista Richard Conniff descreve a maravilha arquitetônica que é um cupinzeiro: arcos perfeitos, escadarias em espiral, acomodações que variam de acordo com o status de cada indivíduo, creches. Túneis, que irradiam a mais de 50 metros do cupinzeiro, em todas as direções, permitem aos cupins procurar grama, madeira e água numa área de mais de 8 000 metros quadrados sem ser expostos a predadores. Dentro do cupinzeiro, um sistema de ventilação – operado por abertura e fechamento de passagens de ar – cria um movimento semelhante ao da respiração. Oxigênio é inspirado, gás carbônico expirado. O sistema também controla a temperatura interna e a mantém dentro de uma faixa de mais ou menos 0,5°C, embora a externa possa variar de 0°C a mais de 40°C. A umidade é mantida constante em 90%.

### **... e na empresa**

Imagine uma grande e bem-sucedida organização global que cresce a uma taxa entre 20% e 50% ao ano nos últimos 25 anos, congrega 23 000 organizações em 200 países e cujos produtos são líderes de mercado, usados por 465 milhões de pessoas, gerando mais de 7 bilhões de transações anualmente, no valor de 800 bilhões de dólares. Essa instituição representa a auto-organização em sua forma quase pura: praticamente inexistem controles centralizados. Ela tomou forma sob a liderança de Dee Hock, um dos primeiros proponentes da aplicação da teoria da complexidade às empresas, no fim da década de 70. Trata-se da maior rede de cartões de crédito do mundo, a Visa.

## **Caos e complexidade: e eu com isso?**

*Não faltam referências sobre aplicações práticas das teorias do caos e da complexidade – inclusive para o mundo dos negócios*

São poucos os locais no mundo onde se conseguem reunir tantas mentes brilhantes e efervescentes para investigar assuntos tão complicados quanto intrigantes. O Instituto Santa Fé, centro de pesquisa fundado em 1984 e sediado no estado do Novo México, Estados Unidos, é um desses lugares. Entender o que é pesquisado no Instituto Santa Fé não é tarefa fácil. O instituto reúne cientistas de todo o mundo. Não existem grupos nem linhas de pesquisa fixos. PhDs e ganhadores do prêmio Nobel trabalham juntos em projetos multidisciplinares que tratam dos mais variados assuntos, de simulações de modelos físicos e econômicos a coisas batizadas com nomes como vida artificial ou algoritmos genéticos. Todos eles são conhecidos pelo nome genérico de sistemas complexos, ou conjuntos de um sem-número de elementos cuja interação resulta num determinado comportamento ou estado para o sistema como um todo. Entender como padrões e ordem emergem de um amontoado de caos aparente é o desafio dos cientistas do Santa Fé.

As teorias do caos e da complexidade podem ser aplicadas a campos tão diversos que logo chegaram à gestão e administração empresarial. Hoje, é consenso entre os especialistas que empresas não podem mais ser mais consideradas máquinas, como foram em outros tempos. A idéia de sistemas complexos e caóticos parece perfeita para descrever o ambiente corporativo contemporâneo. O nome mais freqüente quando se fala nas aplicações da complexidade à economia é o do pesquisador do Instituto Santa Fé, Brian Arthur. As idéias do Santa Fé também têm inspirado novas pesquisas em gestão. No último número da Harvard Business Review, por exemplo, os pesquisadores Mohanbir Sawhney e Deval Parikh descrevem como as empresas devem fazer para se situar em um mundo de instabilidade e incertezas.

Não faltam referências sobre caos e complexidade aplicados aos negócios. Um livro recente é "Surfing the Edge of Chaos: The Laws of Nature and the New Laws of Business" (Crown, 2000), de Richard Tanner Pascale, Mark Milleman e Linda Gioja. O livro faz uma comparação entre os negócios e a natureza (para os autores, uma empresa é um organismo vivo) e traz muitos exemplos de como as idéias podem ser aplicadas, na prática, a empresas como Sears, Monsanto, HP e Sun.

Outra opção para quem se interessa pelas aplicações da complexidade aos negócios são "Leadership and the New Science: Discovering Order in a Chaotic World" (Berrett-Koehler, 2001), de Margaret J. Wheatley, sobre implicações da física quântica, da teoria do caos e de outros ramos emergentes da ciência na liderança e na organização das empresas. "Competing on the Edge: Strategy as Structured Chaos" (Harvard Business School, 1998), de Shona L. Brown e Kathleen M. Eisenhardt, trata da importância da constante mudança e adaptação das empresas no mundo dos negócios. Exemplos são Microsoft, 3M, Nike e Intel, que, segundo os autores, são organizações "previsivelmente imprevisíveis". Por fim, "How Hits Happen: Forecasting Predictability in a Chaotic Marketplace" (Harper Business, 1998), de Winslow Farrell, tenta explicar o sucesso de muitas empresas e sites em atrair uma legião de consumidores. Farrell descreve como a teoria da complexidade pode ser aplicada ao mundo dos negócios para ajudar a prever se um determinado produto ou serviço vai ser um sucesso ou um grande fracasso.

Mas, antes de se aventurar a entender como a complexidade se aplica ao mundo corporativo, talvez seja uma boa idéia seja ler uma boa introdução ao assunto. Em português, a melhor delas pode ser encontrada no livro "Complexidade – Vida no Limite do Caos" (Rocco, 1994), de Roger Lewin. O conteúdo do livro, bastante acessível para leigos no assunto, é baseado em entrevistas de Lewin com as principais estrelas do Instituto Santa Fé, como o próprio Brian Arthur ou Stuart Kauffman, e com celebridades que anteciparam as teorias da complexidade, caso do biólogo americano Edward Wilson e do polêmico cientista britânico James Lovelock.

Outra opção introdutória é "Acaso e Caos" (Editora da Unesp, 2000), do francês David Ruelle, um dos pioneiros na pesquisa da teoria do caos. Ruelle narra a história e o desenvolvimento dessa área de pesquisa e seu impacto em outras áreas do conhecimento, como biologia, economia e ciências sociais. Se você preferir ler em inglês, um livro já considerado um clássico do assunto é "Chaos: Making a New Science" (Penguin, 1988), de James Gleick, ex-colaborador especializado em ciência do The New York Times. O livro enfoca o trabalho dos cientistas imersos na pesquisa do caos. Sem cair em entediadas equações matemáticas, Gleick consegue explicar conceitos e fenômenos complicados, como a formação de fractais e o funcionamento dos chamados atratores estranhos. Segue a mesma linha o livro "Complexity: the Emerging Science At the Edge of Order and Chaos" (Touchstone Books, 1992), de M. Mitchell Waldrop, por muitos anos colaborador da renomada revista científica Science. Waldrop aborda as pesquisas em complexidade feitas pelos pesquisadores do Santa Fé, entre eles Murray Gell-Mann e Kenneth Arrow, dois ganhadores do prêmio Nobel.

No livro "O Quark e o Jaguar" (Rocco, 1996), Murray Gell-Mann, ganhador do Nobel de física de 1969 e um dos fundadores do Instituto Santa Fé, relata suas descobertas das conexões entre as leis básicas da física e a diversidade e complexidade do mundo natural. Também pesquisador em Santa Fé, Stuart Kauffman é autor de "At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity" (Oxford University Press, 1996). Nesse livro, que mereceu elogios de nomes como Stephen Jay Gould ou Carl Sagan, Kauffman explica o intrigante princípio que leva muitos sistemas complexos a se auto-organizar a partir de um estado de puro caos. Outro cientista do Santa Fé, John H. Holland, escreveu "Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity" (Perseus, 1996). Holland é um dos pioneiros na pesquisa dos chamados algoritmos genéticos e da computação evolucionária. O livro é uma compilação de palestras dadas por Holland no Instituto Santa Fé. No Brasil, foi publicado "Caos, Acaso e Determinismo" (Editora da UFRJ, 1995), organizado por Antonio Maria da Silveira, Ildeu de Castro Moreira, Roberto Cintra Martins e Saul Fuks. O livro reúne uma artigos de pesquisadores brasileiros sobre caos e suas implicações para a economia, biologia e ciências sociais.

Para quem se interessar pelas origens da teoria da complexidade, a melhor escolha é "Fire in the Mind: Science, Faith, and the Search for Order", do colaborador do The New York Times George Johnson. Ele traça um paralelo entre as pesquisas científicas e a cultura indígena que coexistem na região de Los Alamos, no Novo México. Com esse paralelo, Johnson mostra que os sistemas complexos podem variar de aglomerados de partículas subatômicas a indivíduos em uma comunidade. E especula sobre o tipo de pensamento abstrato que parece unir a ciência mais moderna às práticas religiosas mais tradicionais.

---

Carlos Siffert é diretor-presidente da Promon Tecnologia e presidente do Conselho de Administração da Promon IP