



Sistemas Complexos

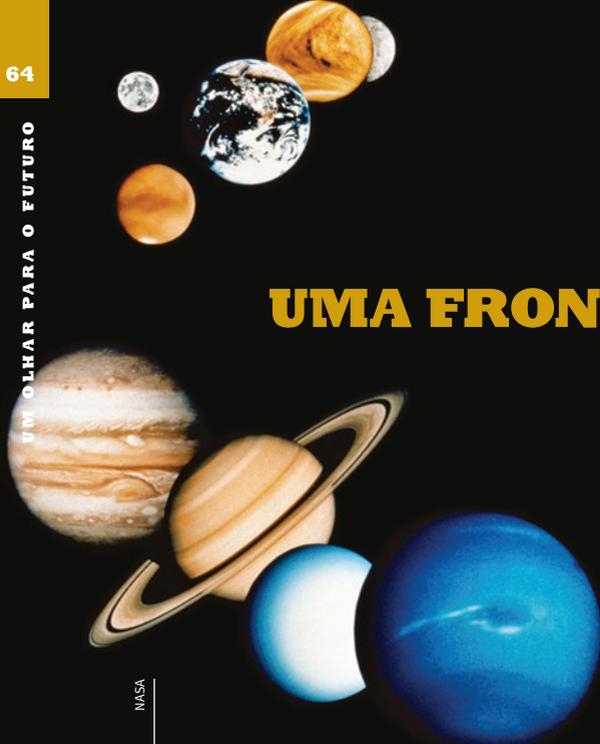
A fronteira entre a ordem e o caos



Os sistemas complexos são uma área interdisciplinar que ganha cada vez mais importância na busca incessante da ciência pela expansão dos limites de nosso conhecimento e das leis que regem os fenômenos da natureza.

O estudo de sistemas complexos é um dos campos de pesquisa mais importantes na atualidade, tendo vários grupos de excelência dedicados ao assunto, inclusive no Brasil. Foi aqui que nasceu uma generalização da mecânica estatística que hoje é estudada em dezenas de países e aplicada com sucesso a sistemas complexos nos quais a tradicional estatística de Boltzmann-Gibbs perde sua aplicabilidade natural – como é o caso de sistemas em que há o fenômeno da turbulência.

- 64. | **UMA FRONTEIRA SUTIL** | ENTRE A ORDEM E O CAOS
- 65. | **NO PRINCÍPIO... A ORDEM** | DE PEDRAS A COMETAS
- 66. | **E FEZ-SE... O CAOS** | TRÊS CORPOS | O QUE É O CAOS?
- 67. | **E O MUNDO FICOU... COMPLEXO** | O QUE É COMPLEXIDADE?
| COMPLICADO É COMPLEXO? | SELVAGEM E CIVILIZADO
- 70. | **DO SABER INCOMPLETO** | DAS PARTES AO TODO
| RELAÇÃO COM OS VIZINHOS | NÃO EXTENSIVOS | NOVA MECÂNICA
ESTATÍSTICA | O GRAU DE ORGANIZAÇÃO
- 73. | **NÃO EXTENSIVA** | CAVALOS CEGOS E AEROPORTOS



NASA

UMA FRONTEIRA SUTIL

Da Antigüidade até o final do século 19, o homem enxergou uma natureza regulada pela ordem, da Terra à esfera celeste. Há cerca de cem anos, porém, espantou-se com a imprevisibilidade dos fenômenos caóticos. Supôs serem exceções num universo quase perfeito. Enganou-se. Eram a regra. E, aos poucos, a imagem de um universo exclusivamente determinístico se desvaneceu.

ENTRE A ORDEM E O CAOS

Da persistente monotonia da órbita de um planeta à pura erraticidade de bilhões e bilhões de partículas enfurecidas de um gás, praticamente todos os sistemas – caóticos ou não – aparentavam estar essencialmente sob controle – o homem aprendeu até a domar estruturas caóticas, utilizando vestígios de ordem que sobrevivem dentro delas. E, então, se apontou para uma fronteira sutil, até então uma penumbra entre a ordem e o caos. Lá estavam – posando como um novo desafio – os sistemas complexos. Para entendê-los – ainda que minimamente –, é preciso visitar os dois extremos dessa fronteira: a ordem e o caos.

NO PRINCÍPIO... A ORDEM

Depois de vencer criaturas gigantes, Zeus – o deus supremo do Olimpo – instaurou seu reinado de ordem. E, assim, se fez um cosmo subjugado por leis, belo e harmônico, regular e racional. No mundo dos homens – que atende por realidade –, acreditava-se que a natureza não era diferente: ela foi lida, ao longo dos vinte séculos da Era Cristã, como um livro escrito por Deus. E, portanto, obra perfeita.

DE PEDRAS A COMETAS

A crença no determinismo era representada pelas idéias do físico inglês Isaac Newton (1642-1727). Sua mecânica explicava da trajetória de uma pedra atirada para cima ao movimento de planetas e cometas. Pêndulos, cronômetros, máquinas a vapor: o homem reproduzia em suas criações o determinismo estrito. Para o matemático e astrônomo francês Simon de Laplace (1749-1827), o universo de hoje era o efeito daquele de ontem e a causa do que virá.



E FEZ-SE... O CAOS

Por quase três séculos, a hegemonia da mecânica newtoniana manteve-se suprema, inabalável. Não havia problemas sem solução, apenas aqueles que ainda não haviam sido resolvidos. Porém, o final do século 19 traria surpresas.

TRÊS CORPOS

Para comemorar os 60 anos do rei Oscar II (1829-1907), da Suécia e Dinamarca, foi oferecido um prêmio cujo tema era a estabilidade do sistema solar. O matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) encarou o desafio. Porém, ao perceber a dificuldade do problema, reduziu-o a apenas três corpos interagindo pela gravidade. Com esse trabalho, Poincaré não só ganhou o prêmio, em 1889, mas descortinou o caos. E este, arrastando consigo a imprevisibilidade, maculou uma natureza até então “bem-comportada”.



O QUE É O CAOS?

Para que um sistema tenha comportamento imprevisível – ou caótico –, ele deve obedecer a pelo menos três regras: a) ser dinâmico, ou seja, se alterar à medida que o tempo passa – um carro se movendo numa estrada; b) ser não linear, isto é, sua resposta não é proporcional à perturbação – uma simples declaração pode causar uma revolução de estado; c) ser muito sensível a perturbações mínimas de seu estado, ou seja, uma alteração desprezível no presente pode causar, no longo prazo, uma mudança imprevisível – uma leve variação na trajetória de uma sonda espacial pode levá-la para longe de seu destino.



E O MUNDO FICOU... COMPLEXO

Até a década de 1980, cada campo do conhecimento, isoladamente, dava um tratamento específico a seus sistemas complexos. Isso valia da física à antropologia, da economia à biologia. Porém, de lá para cá, percebeu-se que todos os sistemas complexos tinham propriedades universais. Nasceu, assim, uma nova disciplina científica e, talvez, a mais interdisciplinar delas: os sistemas complexos, teoria que usa conceitos de áreas tão diversas quanto caos, termodinâmica (estudo do calor), autômatos celulares (estudo da vida artificial) e redes neurais (estudo das ligações entre as células nervosas cerebrais). Sua principal ferramenta será o computador.

O QUE É COMPLEXIDADE?

Ainda não há resposta definitiva para essa pergunta. Pode-se dizer que um sistema é tão mais complexo quanto maior for a quantidade de informação necessária para descrevê-lo. Porém, essa é uma entre muitas definições. Sabe-se que a complexidade só emerge em sistemas com muitos constituintes. Por exemplo, no cérebro humano, com 100 bilhões de células nervosas. Porém, um gás, com bilhões de constituintes, é um sistema simples. Por quê? Basta estudar uma pequena parte dele para entender o todo, o que é impossível em sistemas complexos.

FOTO: ADRIANA MARTINS/SXC



COMPLICADO É COMPLEXO?

Não. Uma máquina sofisticada, com grande número de partes, é complicada, mas não complexa, pois terá comportamento previsível. De um avião, por exemplo, não vai emergir – ironicamente – nada semelhante ao sofisticado movimento que faz uma ave alçar vôo. Importante: a reunião de elementos complexos pode gerar um comportamento simples e previsível. Por exemplo, a Terra girando em torno do Sol.

SELVAGEM E CIVILIZADO

Sistemas caóticos e complexos têm um aspecto em comum: são não lineares. Mas, no caótico, a imprevisibilidade é “selvagem”; no complexo, “civilizada”. Além disso, as propriedades abaixo podem estar presentes em sistemas complexos tão diversos quanto um ser vivo, um ecossistema ou a economia de um país:

- partes que se relacionam entre si;
- interação com o meio; adaptação ao meio;
- tratamento da informação em vários níveis;
- ordem emergente (criação espontânea de ordem a partir de estados desordenados);
- propriedades coletivas emergentes (novos comportamentos causados pela interação entre as partes);
- criticalidade auto-organizada (estado crítico, na fronteira entre a ordem e o caos, em que a mais leve perturbação pode causar uma reação em cadeia; por exemplo, um simples floco de neve desencadeando uma avalanche)
- estrutura fractal (formatos que não se tornam mais simples quando observados em escalas cada vez menores).

DO SABER INCOMPLETO

Na segunda metade do século 19, o físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) e o austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) juntaram a mecânica newtoniana à estatística para estudar gases. Pouco depois, o norte-americano Josiah Willard Gibbs (1839-1903) deu a essas idéias formulação mais abrangente. Nasceu, assim, a mecânica estatística (ME).

DAS PARTES AO TODO

A ME de Boltzmann-Gibbs – como ficou conhecida – aplica-se a sistemas nos quais é impossível saber com precisão como cada um dos constituintes vai se comportar – nos gases, os átomos; no cérebro, os neurônios; nas galáxias, as estrelas etc. Por esse predicado, tornou-se uma ferramenta adequada ao estudo dos sistemas complexos.

RELAÇÃO COM OS VIZINHOS

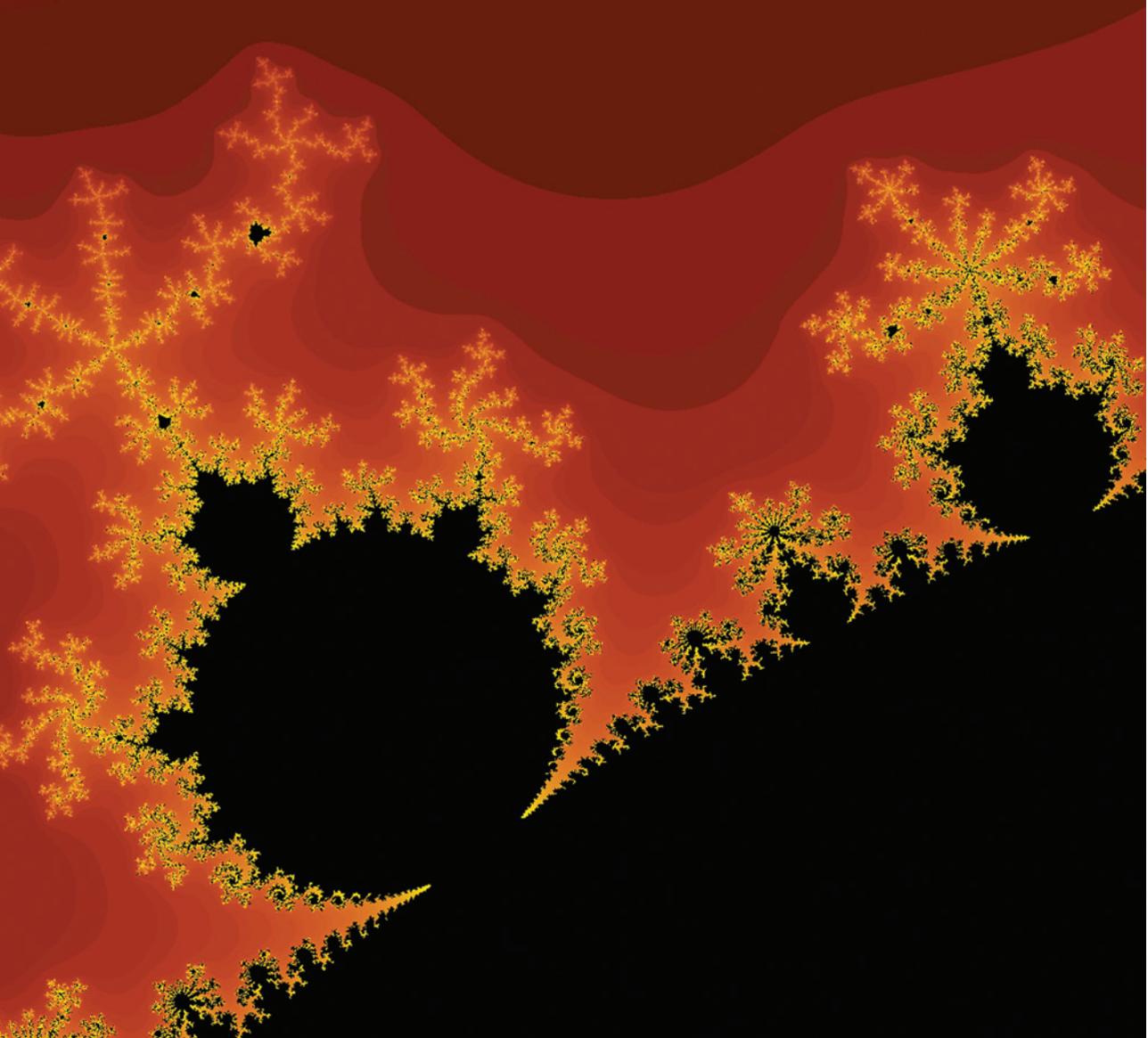
No entanto, a ME de Boltzmann-Gibbs tem suas limitações. É basicamente aplicada a sistemas que não trocam mais calor com o meio – estão, portanto, em equilíbrio térmico – e cujos constituintes se relacionam apenas com seus vizinhos (interação de curto alcance). São os sistemas extensivos.



Ludwig Boltzmann

NÃO EXTENSIVOS

Mas há vários sistemas com correlação de longo alcance (espacial ou temporal). Neles, o comportamento de uma parte depende de outra distante no espaço e no tempo. Exemplo: um ciclone, no qual volumes de ar, mesmo distantes, precisam estar correlacionados – caso contrário, não atingiriam o grau de organização suficiente para gerar aquele cone de ar que rodopia no espaço. Esses são sistemas não extensivos.



NOVA MECÂNICA ESTATÍSTICA

Em 1988, uma nova ME foi idealizada pelo físico Constantino Tsallis, do CBPF. Ela vem sendo usada com sucesso para explicar o comportamento de sistemas complexos não extensivos, como materiais magnéticos e vítreos, galáxias, choque de partículas, processamento de imagens, grandes moléculas como o DNA, bolsa de valores e até aspectos da lingüística. Denominada mecânica estatística não extensiva – ou, por vezes, estatística de Tsallis –, ela generaliza a ME de Boltzmann-Gibbs, abrangendo assim fenômenos não extensivos e fora do equilíbrio.

O GRAU DE ORGANIZAÇÃO

Na ME, um conceito fundamental é o de entropia, comumente designado pela letra S . A partir dele, é possível caracterizar o nível de organização de um sistema e, com isso, deduzir propriedades importantes como pressão, volume e temperatura em um gás, ou analisar a frequência de disparo de impulsos elétricos entre as células nervosas do cérebro de um mamífero. No entanto, a entropia utilizada na ME de Boltzmann-Gibbs ($S_{BG} = k \ln W$, onde k é uma constante e W o número de microestados do sistema) se aplica basicamente a sistemas em equilíbrio térmico. Já a chamada entropia de Tsallis ($S_q = k W^{1-q} - 1/(1-q)$, onde q é o índice de não extensividade) vale para situações de metaequilíbrio. Ou seja, nas quais os sistemas estão rumando ao equilíbrio, tal como um ser vivo envelhecendo, sendo a morte a situação de equilíbrio com o meio.

NÃO EXTENSIVA

Em 1991, outro trabalho ampliou as idéias da ME não extensiva e se tornou o artigo da física brasileira mais citado mundialmente na década de 1990. Hoje, são cerca de 700 pesquisadores, em 45 países, trabalhando com a ME não extensiva. Mais de mil artigos já foram publicados, e ocorreram vários encontros sobre o tema no Brasil e exterior.

CAVALOS CEGOS E AEROPORTOS

A ME não extensiva carrega em seu bojo o fator “ q ” (índice de não extensividade), que guarda muito da essência dessa nova estatística. Mas o que ele significa? É a isso que seu criador se dedica no momento. E ele já tem uma idéia, que pode ser retratada em analogias. Imagine uma criança que foi fadada a um destino cruel: passar a vida montada em um cavalo cego vagando pelo Brasil. Depois de décadas e décadas nessa árdua empreitada, ela, já adulta, terá praticamente passado o mesmo número de vezes por cada cidade do território brasileiro – sistemas com esse comportamento, gases, por exemplo, são ditos altamente caóticos. Agora, outro cenário: essa criança vai viajar o resto da vida por uma grande companhia aérea. É muito provável que ela passe muitas vezes pelo aeroporto de São Paulo e poucas pelo de Rio Branco, no Acre – um sistema fracamente caótico. Guardada as limitações dessas analogias, suspeita-se que o índice de não extensividade (q) tenha a ver com um comportamento semelhante de sistemas complexos que preferem certos estados a outros.

FOTO ZECA GUIMARÃES/ACERVO CBPF

Uma das torres do edifício do CBPF, no Rio de Janeiro (RJ)