

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i$$

# Uma nova entropia

A entropia, um conceito tão rico quanto misterioso, explica, por exemplo, como a energia contida em um pedaço de carvão pode mover uma locomotiva, ou por que, para resfriar a água, a geladeira esquentava por fora. Proposta em meados da década de 1980 como caminho para generalizar a mecânica estatística usual, uma nova fórmula generaliza com sucesso a aplicação da entropia a fenômenos tão díspares quanto ciclones e moléculas gigantes.

**A energia** é um dos conceitos da física com aplicação mais visível no dia-a-dia. Para mover um carro, por exemplo, é necessário obter energia através da queima do combustível. Para os eletrodomésticos funcionarem, depende-se da energia elétrica. Mas nem toda a energia gerada está disponível para ser transformada em trabalho útil. Para saber o quanto dessa energia pode ser considerada 'livre' – disponível para consumo –, é necessário conhecer um outro conceito: o de entropia.

A entropia está relacionada à ordem e desordem em um sistema. É ela que caracteriza o grau de organização (ou desorganização) de um sistema físico qualquer. Quanto mais desordenado o sistema, maior será sua entropia.

A imagem de uma caixa que contenha bolas nos fornece uma boa analogia para entender o conceito de entropia. Se as bolas estiverem ordenadas em um canto, a entropia será baixa, pois o grau de desorganização desse sistema é tam-

bém baixo. E para se manter assim será necessário que o nosso sistema imaginário (caixa mais bolas) permaneça isolado do meio externo. Mas é muito difícil evitar que algum tipo de interação com o ambiente ocorra.

Assim, depois de uma interação qualquer com o exterior – por exemplo, uma trepidação ao ser mudada de lugar –, é bem provável que as bolas se desorganizem, pois há muito mais formas de deixar as bolas espalhadas do que de colocá-las arrumadas em um canto. Em outras palavras: o grau de desorganização (ou entropia) de um sistema físico que interage com o exterior tende a aumentar com o passar do tempo.

**UNIVERSO DESORDENADO.** Algo semelhante se passa entre as bolas de nossa caixa e os sistemas físicos do universo: ambos, com o passar do tempo, tendem a se tornar cada vez mais desorganizados – e isso, conseqüentemente, representa aumento da entropia.

&gt;&gt;&gt;

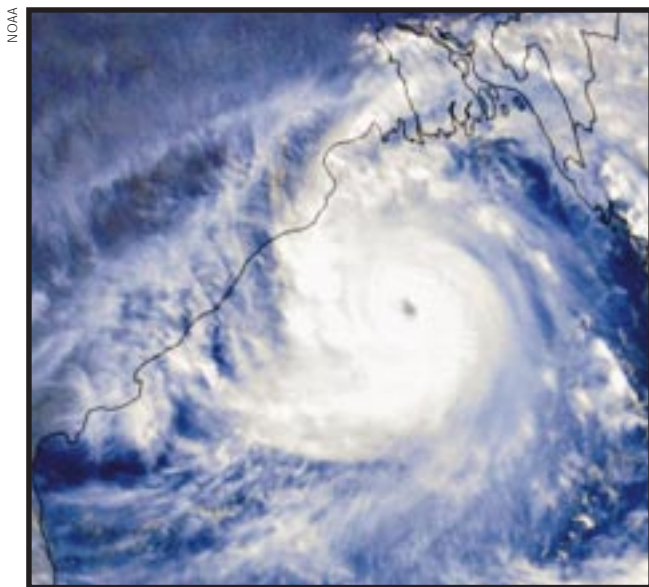


Figura 1. O ciclone, com a turbulência que lhe é associada, é um dos fenômenos naturais ao qual não se pode aplicar com sucesso a fórmula clássica da entropia, que vem sendo utilizada pelos físicos desde o século 19.

Há situações específicas em que a entropia pode diminuir em um sistema físico. No entanto, qualquer redução é imediatamente compensada por seu aumento proporcional – ou até maior – em outra parte do sistema. Em uma geladeira, por exemplo, o resfriamento no interior faz com que entropia desse sistema diminua, pois o calor faz com que os átomos e moléculas fiquem mais agitadas, em maior desordem. Porém, esse fato é amplamente compensado pelo aquecimento do eletrodoméstico por fora, o que representa um aumento de entropia em outra região do mesmo sistema.

**VISÃO HUMANA E CICLONE.** Com frequência, o cálculo da entropia total de um sistema é aproximadamente a soma dos diversos subsistemas contidos nele. Um exemplo simples: a entropia total de duas bolas de sorvete é a soma daquela contida em cada uma delas. Os físicos denominam esse tipo de sistema aditivos (ou extensivos).

No entanto, há fenômenos nos quais a entropia de um subsistema interfere substancialmente na de outro, e nesse caso o total não se resume a uma simples soma das partes – os sistemas agora ganham o nome de não aditivos (ou não extensivos). A visão humana é um caso interessante: em uma parede branca com um ponto vermelho, a percepção fará com que notemos essa marca de imediato. Isso ocorre porque somos descendentes de indivíduos que tinham a capacidade de ver rapidamente um predador (um tigre, por exemplo) e sair correndo com grande rapidez. É muito provável que a linhagem protobiológica dotada de visão ‘aditiva’ – isto é, sem a capacidade de perceber preferencialmente o tigre, bem como o ponto vermelho sobre a parede branca – tenha sido extinta por não ter conseguido se livrar dos predadores ou de outras situações perigosas.

Outro exemplo de sistema não aditivo é a formação de um ciclone (figura 1). Normalmente, as moléculas de ar acima de uma fazenda ou de uma cidade movimentam-se ao

## FÓRMULA CLÁSSICA SURTIU NO SÉCULO 19

O conceito de entropia surgiu na época da máquina a vapor, proposto pelo prussiano Rudolf Emmanuel Clausius (1822-1888) para explicar o máximo de energia que poderia ser transformada em trabalho útil. Mais tarde, a entropia foi relacionada à ordem e desordem de um sistema, idéia aproveitada pelo físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) na elaboração da primeira expressão a descrever microscopicamente o conceito.

Mesmo sem ter certeza da existência de átomos e moléculas – cuja existência só viria a ser confirmada experimentalmente na primeira década do século 20, principalmente pelos tra-

balhos do físico francês Jean Perrin (1870-1942) –, Boltzmann propôs a fórmula baseando-se nas evidências da existência desses elementos. No entanto, sua equação não encontrou apoio imediato. Transtornado pela resistência de alguns colegas em aceitá-la ou mesmo em reconhecer a teoria atômica, Boltzmann suicidou-se em 1906 – a fórmula foi gravada no seu túmulo.

A equação de Boltzmann havia sido retomada pelo professor de física matemática americano Josiah Gibbs (1839-1903), da Universidade de Yale (Estados Unidos). Ele propôs uma nova fórmula, mais abrangente, que inclui certos tipos de interações entre as moléculas.

A chamada fórmula de Boltzmann-Gibbs tem sido usada pelos físicos por cerca de 120 anos. Desde 1988, no entanto, uma nova equação, desenvolvida no CBPF, tem se mostrado extremamente eficiente como uma generalização das idéias dos cientistas pioneiros nessa área.

Em função da repercussão que a nova fórmula obteve e por sua abrangência fenomenológica, o pesquisador do CBPF Constantino Tsallis teve seu nome lançado recentemente ao prêmio Nobel de física.

A candidatura já conta com o apoio de pesquisadores no Brasil e no exterior.



## PROJETO FORMA REDE NACIONAL E INTERNACIONAL DE PESQUISA

O projeto 'Mecânica Estatística de Sistemas Complexos', cuja coordenação está a cargo do CBPF, é um dos projetos do Programa de Núcleos de Excelência (Pronex).

Além da equipe de pesquisadores do CBPF, os trabalhos de pesquisa contam com a colaboração de outros 50 pesquisadores

de várias instituições, sendo 27 delas no exterior.

Essa vasta rede mantém diversas linhas de pesquisa em áreas como autômatos celulares, caos, fractais, genética populacional, magnetismo, redes neuronais e mecânica estatística – nesta última, pesquisa-se a abrangência da nova fórmula.



Sentados: Constantino Tsallis e Aglaé Cristina Navarro de Magalhães; em pé: Evaldo Mendonça Fleury Curado.

acaso e de modo independente – nesse caso, a entropia de dois diminutos volumes de ar pode ser simplesmente adicionada para se chegar à entropia total do sistema. Porém, quando ocorre um rodaminho, a simples adição dos volumes de ar já não é mais capaz de descrever a entropia desse evento – em termos mais técnicos, diz-se que os movimentos das moléculas de ar durante esse fenômeno atmosférico tornam-se altamente correlacionadas, e a entropia de um volume de ar passa a interferir na entropia de outros volumes em sua vizinhança.

**FRACTAIS E DNA.** Assim que foi inicialmente proposto, em 1865, o conceito de entropia foi utilizado para melhorar o desempenho das máquinas necessárias à Revolução Industrial. Ele ajudava a descrever as trocas de calor e o trabalho realizado pelos equipamen-

tos. Mais tarde, o conceito passou a ser aplicado sempre que era necessário basear-se em componentes microscópicos para fazer uma descrição macroscópica de um sistema.

Para calcular a entropia, foi proposta uma equação conhecida como fórmula de Boltzmann-Gibbs (ver 'Fórmula clássica surgiu no século 19'). Porém, a fórmula mostrou ter limitações. Ela falha, por exemplo, ao tentar explicar a complexidade de fenômenos como um ciclone, como já vimos, ou a geometria fractal das moléculas de DNA e de outras macromoléculas (figura 2). Em resumo: a fórmula clássica mostrou-se inadequada quando a quantidade de entropia de um sistema é basicamente não aditiva.

Para determinar a entropia em sistemas não aditivos, foi necessário buscar uma nova fórmula. Várias expressões foram propostas, mas nenhuma se mostrava eficiente do ponto de vista térmico. Porém, a partir de analogias matemáticas, Constantino Tsallis, pesquisador do Grupo de Mecânica Estatística do CBPF, desenvolveu, a partir de meados da década de 1980, uma equação que é uma generalização da fórmula clássica.

Com ela, é possível calcular tanto a entropia de sistemas aditivos quanto de não aditivos. Por algum tempo, a nova fórmula permaneceu sem que fosse comprovada praticamente. Porém, trabalhos recentes têm demonstrado sua eficiência.

Desde então, a nova fórmula tem sido utilizada para calcular a entropia em diversos sistemas, em áreas como turbulência, física de altas energias, estudo dos organismos vivos, física do estado sólido, teoria da informação e até mesmo campos das ciências humanas como a lingüística. ■

Figura 2. Alguns aspectos fractais das moléculas de DNA e de outras macromoléculas têm sido explicada com sucesso usando a nova fórmula para o cálculo da entropia proposta em meados da década de 1980.

