

Apesar de o futuro ser imprevisível, devido à presença do acaso na natureza (o que a torna “não-determinística”), vimos que existem situações em que as incertezas são menores ou maiores.

Numa aposta, você tem mais chances de acertar em um jogo de dados ou um jogo de cara-coroa? Você prontamente responde que, nesse caso, a moeda é a sua melhor opção. Apesar disso, *jamais o futuro será determinável*.

Alguns sistemas têm características intrínsecas que os tornam mais ou menos previsíveis. Em alguns casos, o grau de previsibilidade é muito grande. Porém, por axioma, consideramos que *nada é 100% previsível*.

Saberemos onde uma cadeira vai estar amanhã de manhã... Basta trancarmos a sala em que ela se encontra e, quando voltarmos amanhã, a cadeira estará *praticamente* no mesmo lugar. *Praticamente* porque pequenos abalos na estrutura do prédio podem deslocar a cadeira alguns micrômetros para alguma nova localização. Ou, então, um caminhão poderia ter se arrebentado na pilastra do prédio e ele simplesmente ter virado ruína! Assim, digamos que seja possível estimar a posição da cadeira com 99,999999...% de certeza. Daqui a cem anos, não poderemos ter tanta certeza assim, não é? Cupins, ratos, abalos e demolição do prédio... Quanta coisa poderia ter acontecido?

Vamos comparar nosso sistema “cadeira e sala” com outro: “camundongo e sala”. Qual sistema é mais previsível? Onde o camundongo estará amanhã de manhã?

Os seres vivos são sistemas complexos e, também, organizados, pois sem alguma ordem é impossível a vida existir (trataremos futuramente do conceito de homeostase). Porém, os seres vivos são pouco previsíveis, têm um comportamento caótico em comparação com outros sistemas como uma montanha, uma geleira milenar na Antártida ou um rio caudaloso que corta um vale.

Vamos agora discutir alguns conceitos.

Complexidade

Pode-se dizer que um sistema é tão complexo quanto maior for a quantidade de informação necessária para descrevê-lo. Essa é uma de muitas definições. No entanto, sabe-se que a complexidade só emerge em sistemas com muitos constituintes. Por exemplo, o cérebro humano, com 100 bilhões de células nervosas, é um

dos sistemas mais complexos do universo conhecido. Porém, um gás, com bilhões de constituintes, é um sistema bem mais simples. Por quê? Basta estudar uma pequena parte do gás para entender o todo, o que não é tão simples para sistemas complexos.

Complexidade não está correlacionada apenas ao tamanho de um sistema ou ao número de componentes que ele tenha, mas sim à sua riqueza de variáveis. Uma formiga é mais complexa do que um tijolo, por exemplo. Se analisarmos a composição atômica da formiga e do tijolo, poderemos nos surpreender com a notícia de que a variabilidade de átomos no tijolo é bem menor do que na formiga!

Para que isso fique bem entendido, observemos um sistema A com dez dados e um sistema B com dez moedas. Ambos os sistemas A e B têm o mesmo tamanho. Porém o sistema A é mais complexo do que o sistema B, e o estado do sistema A em um momento t é menos previsível que o estado de um sistema B.

Compreenda que *o número de variáveis de um sistema é proporcional à sua complexidade*, a quantidade de variáveis de um sistema é proporcional ao tamanho do sistema (número de unidades do sistema) *vezes* o número de variáveis que cada unidade do sistema pode assumir (ou estados possíveis das unidades de um sistema).

Estabilidade

Os termos estável e instável se referem à probabilidade de um sistema se transformar. Por regra, sistemas complexos são mais dinâmicos e, por isso, mais instáveis. Contudo, os seres vivos são um exemplo de sistema complexo que mantém um grau adequado de estabilidade. *A estabilidade dos seres vivos não é espontânea*, mas sim mantida à custa de trabalho e, assim, consumo de energia. Enquanto isso, a estabilidade de uma rocha incrustada numa montanha é espontânea. Não se gasta um joule sequer para que a pedra seja mantida no mesmo estado ao longo do tempo!

Quanto mais instável o sistema, menos previsível ele é. Quanto mais estável um sistema, mais previsível ele é.

Estabilidade é inversamente proporcional à probabilidade de um sistema se transformar.

Logo,

Quanto menos estável é um sistema, mais dinâmico ele é.

Obviamente, os seres vivos evoluíram da célula primordial e continuam evoluindo ao longo destes quatro bilhões de anos porque, apesar de manterem uma estabilidade intrínseca (não-espontânea!), eles, ao mesmo tempo, são instáveis o suficiente para que alterações estruturais possam ocorrer. Com essas alterações,

os seres vivos se transformaram, e, através da seleção natural, os mais adaptados foram selecionados e espécies diferentes começaram a surgir na terra primitiva, e continuam surgindo até hoje.

1. Que sistema é mais complexo e instável: a caderneta de poupança ou a bolsa de valores?
2. Que sistema é mais complexo e instável: uma folha seca dentro de um livro ou uma folha viva em uma árvore?

Equilíbrio

E o que é equilíbrio? Literalmente, é a *estabilidade espontânea*. Assim, *sistemas instáveis não estão em equilíbrio*. Um sistema em equilíbrio é aquele que atinge a estabilidade passivamente, sem que nenhuma energia necessite ser consumida pelo sistema para que a estabilidade seja atingida.

Um sistema aberto entra em equilíbrio quando não realiza mais trocas com sua circunvizinhança (por exemplo, um gás na mesma temperatura do meio que o circunda, sendo essa temperatura invariável).

Um sistema isolado (hipotético!) entraria em equilíbrio caso a sua energia interna se distribuísse igualmente por todas as partículas e nenhuma transformação adicional fosse possível. Podemos gerar um modelo experimental interessante para estudar o equilíbrio: usaremos uma garrafa térmica cheia de água quente (a 100°C) que tenha um termômetro continuamente medindo a temperatura interna. A água mantém seus 100°C por tempo indefinido. Coloquemos, agora, dentro da água, uma pedra de gelo (a 0°C) e observemos a evolução do sistema. Notaremos que logo a temperatura total começa a cair rapidamente, pois as moléculas de água quente (muito agitadas) estão transferindo energia para as moléculas do gelo (com baixa cinética, presas ao retículo de cristal). Mas, com o tempo, a heterogeneidade implantada vai desaparecendo. Todas as moléculas ganham um novo estado de agitação médio. Notaremos que a queda de temperatura começa a ficar mais lenta até que novamente o sistema interrompa suas mudanças a, digamos, 80°C. Nesse momento, o sistema entrou em equilíbrio.

O universo como um todo ainda não entrou em equilíbrio, pois existem partes do universo repletas de energia (como o Sol) e outras escassas em energia (como Plutão). Ao longo de bilhões de anos, a tendência é o Sol esfriar e Plutão esquentar até que tudo fique, digamos, morno! Isso, é lógico, se o universo parar de se expandir. Nesse momento, nada mais vai acontecer espontaneamente no universo, pois ele vai estar em equilíbrio consigo mesmo, tal qual a garrafa térmica do experimento proposto.

Descobrimos se um sistema estável está ou não em equilíbrio se suprimirmos seu abastecimento energético e observarmos que ele se transforma com isso!

Interessante observar que a regra na natureza é que **a energia tira sistemas do equilíbrio**, independentemente se eles se mantêm estáveis.

Quanto menos energia entrar no sistema, mais próximo do equilíbrio esse sistema estará.

Observe, na Fig. 1.4, que a caixa-d'água está sempre com um nível fixo de água, representado pela altura h . Ela pode se manter nessa condição em uma de duas situações: a primeira, uma condição de equilíbrio (estabilidade espontânea), simplesmente fechando as duas torneiras. A outra é uma condição de estabilidade longe do equilíbrio termodinâmico, quando ambas as torneiras estão igualmente abertas com uma vazão igual. Ou seja, *o que sai da caixa é igual ao que entra na caixa* (com gasto de energia, pois uma bomba-d'água ou então a força gravitacional alimenta a torneira A).

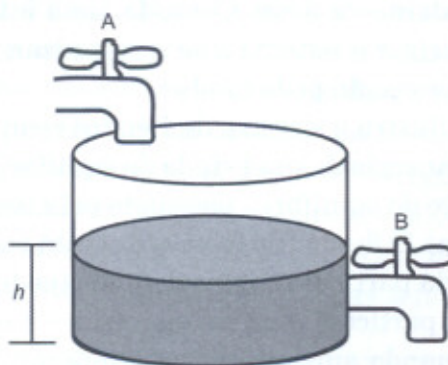


Fig. 1.4 Estabilidade versus Equilíbrio.

Assim, se as duas torneiras estiverem fechadas, teremos um estado de **equilíbrio**, e, se ambas estiverem abertas com a mesma vazão, teremos um estado de **estabilidade** (também chamado de estado **estacionário**).

Os seres vivos são o único exemplo de sistemas estáveis, cheios de energia, longe do equilíbrio? É evidente que não. Outros sistemas ganham a estabilidade longe do equilíbrio. Por exemplo, *os átomos de uma barra de ferro* que outrora estavam em “rotação” caótica se organizam todos em um mesmo sentido quando um campo magnético atinge a barra. Um exemplo clássico experimental é *o sistema de convecção de Bénard*, que é um caso especial das convecções térmicas dos fluidos.

Henry Bénard, um físico francês, concebeu no ano de 1900 um sistema composto por uma fina película de óleo que se estende ao longo de um recipiente metálico plano que recebe calor homogeneamente em sua parte inferior. Por regra, a atmosfera local deve conter o mínimo de perturbações possíveis. Inicialmente, antes de o sistema receber energia, quando o óleo está bem frio, suas moléculas se movimentam pouco, *o sistema está estável e em equilíbrio*. Ao começar a se aquecer,

as moléculas se agitam caoticamente. Torna-se muito difícil prever a posição ou a trajetória de cada uma delas. Assim, o sistema está instável e se afasta do equilíbrio. Contudo, em um determinado momento, quando a temperatura do líquido atinge certo ponto e, obrigatoriamente, o ar contíguo ao óleo mantém-se mais frio, estabelecem-se correntes de convecção no óleo – as moléculas organizam suas trajetórias em movimentos cíclicos dentro de células hexagonais virtuais que se formam na película de óleo. Em cada célula, o líquido mantém um movimento cíclico que pode se dar em um dos dois sentidos: sobe pelas bordas do hexágono e desce pelo seu centro, ou vice-versa. Bénard observou que, mantidas as condições ideais para o experimento, o sistema sempre se auto-organizava para formar os hexágonos de convecção em determinadas temperaturas do óleo e do ar. Contudo, era impossível determinar o sentido da corrente de convecção! A probabilidade de as células estabelecerem determinado sentido da convecção era de exatamente 50%. O sistema é estável o suficiente para não ser perturbado por nenhuma influência extrínseca a ele. Contudo, uma interferência externa suficientemente forte pode obrigar o sistema a se reorganizar, e, com uma probabilidade de 50%, o sentido da convecção pode mudar.

A Fig. 1.5 ilustra o sistema de Bénard composto por um recipiente de óleo para estudo da transição de um estado de equilíbrio estável para outro estado de estabilidade longe do equilíbrio, passando pela tensão de um momento de instabilidade (desordem). O fluido frio (esquerda) está em um momento estável, pois o microestado de cada partícula é mais definido (podemos estimar com certa segurança a trajetória da partícula p no sistema frio) – é um exemplo de ordem no frio. Vendo ao centro, quando aumentamos a temperatura do sistema, o estado do sistema se perde (sai do equilíbrio e se transforma em um estado *instável*), as partículas entram em desordem, seus microestados se tornam indeterminados (impossível determinar com segurança a trajetória de qualquer partícula p no sistema quente) – é um exemplo de instabilidade, pois as menores mudanças alteram as traje-

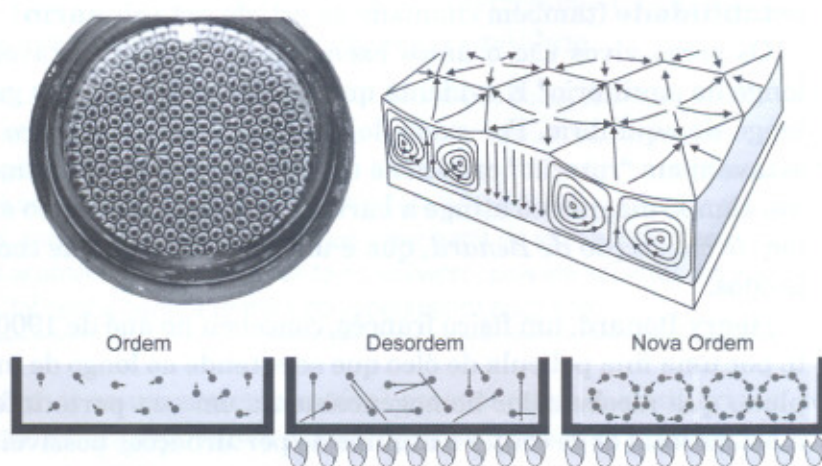


Fig. 1.5 Sistema de convecção de Bénard.

tórias das partículas. À direita vemos a evolução do sistema mediante o acréscimo de calor: o sistema retorna à ordem encontrando um novo estado de estabilidade quando entra em convecção (as pequenas mudanças não interferem mais nos estados das partículas do sistema). Contudo, o sentido da corrente de convecção não pode ser predeterminado (se anti-horário ou horário). Assim, apesar de o sistema encontrar novamente a ordem, o novo estado de estabilidade do sistema é imprevisível – é o caos atuando na reorganização da natureza.

Como qualquer corrente de convecção, esse *padrão* de movimento se estabelece para veicular a transferência de energia da placa inferior do sistema (mais quente) até a lâmina de ar adjacente à superfície do óleo (mais fria). Nesse momento do sistema, ele está *estável, porém bem longe do equilíbrio!*

Claude Bernard foi o primeiro fisiologista da história a conceber conceitos importantes como *homeostase* e *meio interno* para dissertar a respeito do funcionamento dos seres vivos. Na sua época, os cientistas acreditavam que os seres vivos eram uma incoerência da natureza: mantinham padrões extremamente estáveis em sua fisiologia (como concentrações de substância no sangue e citoplasma das células, temperatura corporal, ritmo cardíaco no repouso etc.), porém eram sistemas extremamente “quentes” (ou seja, cheios de energia!). O sistema de convecção de Henri Bénard demonstrou de forma simples como a ordem pode emergir do caos em um sistema quente. E, por incrível que possa parecer, esse pequeno exemplo da física dos fluidos fez o mundo refletir sobre a natureza da vida.

Homeostase é um termo cunhado por Claude Bernard que conceitua os estados estáveis de um ser vivo – condições primas para que toda a gama de fenômenos metabólicos e fisiológicos possa ocorrer dentro desse ser vivo.

Já ficou claro que seres vivos, apesar de manterem sua estabilidade (homeostase), não estão em equilíbrio com o meio ambiente; nem mesmo em seu interior seus compartimentos estão em equilíbrio uns com os outros.

Dissemos anteriormente que o universo ainda não entrou em equilíbrio. Será que ele entrará em equilíbrio um dia? Ou será que há algum mecanismo regenerativo em sua organização que o mantenha estável e longe do equilíbrio? Se esse mecanismo existir, o universo seria um verdadeiro ser vivo! Porém, como sabemos pela nossa própria experiência, seres vivos precisam de alimento, precisam de fonte externa de energia para mantê-los longe do equilíbrio. Então, para o universo ser vivo, ele necessitaria de alimento. Esse alimento deveria vir de fora dele. Ou seja, ele não seria um sistema isolado! Aquele que descobrir se o universo se alimenta será um dos maiores revolucionários da história da humanidade.

Antes de continuarmos esta seção, repetiremos em destaque o nosso conceito de equilíbrio:

Equilíbrio é a estabilidade espontânea.

Ordem

Observando os textos anteriores, intuímos que ordem seja uma consequência da estabilidade de um sistema, quer em equilíbrio ou longe do equilíbrio. Contudo, nem todo sistema estável é organizado. Muitos sistemas estáveis e em equilíbrio não constituem organizações de qualquer espécie.

Um cristal, o sistema de Bénard ou uma bactéria são exemplos de sistemas estáveis (quer próximos ou distantes do equilíbrio) e organizados (portadores de certa ordem). Já um gás em equilíbrio térmico com o meio é um sistema que não estabelece um padrão de ordem em sua estrutura íntima.

A organização de um sistema complexo é mais delicada do que a de um sistema não-complexo. Um sistema complexo, quando perde sua organização, pode ser destruído.

Para que entendamos melhor organização, complexidade e estabilidade, vamos observar dois sistemas: um sistema camundongo (A) e um sistema cubo de gelo (B). Aqueçamos os dois sistemas em um forno de microondas, fazendo a temperatura de cada sistema subir 100 graus Celsius.

O sistema B, mais simples, se desorganiza: a água dissolve-se e até evapora. Porém, ao reduzir novamente a temperatura, o vapor se liquefaz, vira água e, então, vira gelo. Ele está novamente estável, do mesmo jeito que antes, o mesmo sistema de antes. Pode até mudar em algum aspecto: o gelo, em cubo, pode ter se tornado gelo em outro formato. Mas volta a ser gelo.

Já o sistema A (coitado!), complexo, quando vai esquentando, também vai se desorganizando: ele pula, quica, chia e, então, cai “morto”... Começa a fritar, cozinhar, tostar... Então vamos reduzindo a temperatura... Porém ele não “destosta”, não “descozinha”, não “desfrita”, não ressuscita... O sistema A já era. Não há mais camundongo algum! *Ele não recuperou a ordem de antes, não voltou a funcionar, e, muitas vezes, até a sua complexidade se altera.*

De certa forma, a ordem, assim como a estabilidade, é uma aparência.

Um balão de gás demonstra uma estabilidade panorâmica. Porém, se o colocarmos em um microscópio, veremos que as moléculas desse gás mantêm uma agitação impressionante, e é praticamente impossível determinar a posição de qualquer partícula. Tanto que o próprio Einstein, junto com colegas, gerou um modelo para previsão da posição de partículas, o qual determina não pontos locais, mas sim nuvens de probabilidades (regiões do espaço em que seja mais provável encontrar a partícula). A física quântica posteriormente adotou tal modelo. A estabilidade panorâmica do balão somente se altera se as condições do meio circundante mudarem significativamente. Por exemplo, se o balão for aquecido, o volume do balão deverá aumentar.

Chamaremos tais estados panorâmicos de **macroestados**. Os macroestados geralmente podem ser previstos por modelos deterministas. Tanto que foi por

causa dos macroestados que o mundo ganhou uma descrição determinista. Uma vez previstas e controladas as condições experimentais, previsões bastante seguras podem ser feitas. Por exemplo, posso prever quanto irá se alterar o volume de um balão em função da variação da temperatura de seu gás, desde que eu conheça e controle a pressão atmosférica, o coeficiente de elasticidade do balão etc.

As partículas que estão em uma louca algazarra, a despeito dos macroestados, formam o que chamamos de **microestados**. Cada microestado é uma configuração específica do conjunto de partículas considerando-as individualmente. Para que você compreenda bem do que estamos falando, observe as descrições a seguir, levando em conta um conjunto de seis dados (guie-se pela Fig. 1.6):

1. **Microestado** é relativo ao conjunto de todos os estados possíveis de cada uma das partículas (o número de cada dado), que tem uma imensa variabilidade. No exemplo dos dados da Fig. 1.6, são possíveis $6 \times 6 \times 6 \times 6 \times 6 \times 6 = 46.656$ microestados diferentes, ou seja, são possíveis 46.656 configurações de dados.
2. O **macroestado**, por sua vez, é a resultante dos estados de todas as partículas, o qual varia muito menos. Seguindo o exemplo, quantos microestados diferentes podem resultar em 17 pontos (soma dos valores dos dados)? Ora, diversos microestados diferentes podem resultar na soma de 17 pontos. Existem macroestados mais raros que outros. No exemplo, há somente um macroestado que vale 36, que é a resultante de todos os seis dados dando “seis”, cuja probabilidade é de 0,0021%.

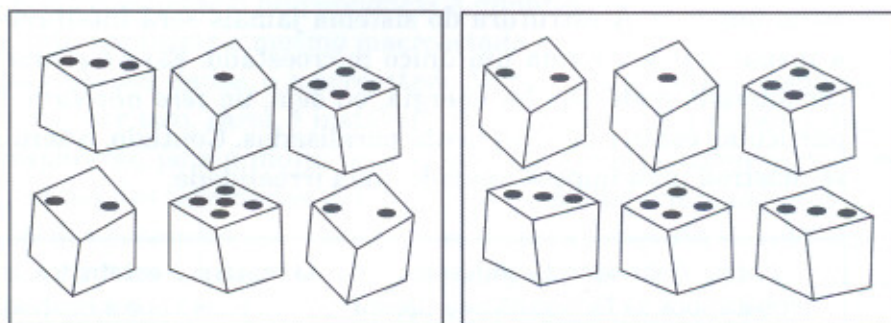


Fig. 1.6 Dois microestados diferentes de um mesmo sistema de seis dados que resultariam em um mesmo macroestado “soma = 17”.

Quanto mais estados diferentes possíveis e quanto mais energia houver para que ocorra uma mudança de estados, mais instável um sistema tende a ser (apesar de que muitas dessas mudanças de microestados não alteram o macroestado). *Quanto mais complexo um sistema (mais microestados diferentes em potencial), mais imprevisível ele deve ser, embora mantenha uma determinada organização.*

Os microestados são bem mais imprevisíveis do que os macroestados.

Ou seja, apesar de existirem muitos microestados diferentes, os macroestados variam muito pouco a despeito deles. Muito bem, qual é, então, a importância dos microestados afinal, se eles não traduzem o aspecto do sistema como um todo? Para que ficar quebrando a cabeça com um mundo cheio de incertezas se, afinal, essas incertezas não definem a realidade dos macroestados?

Não é bem assim. Tudo é uma questão relativa, de ponto de vista. Vamos começar justificando a importância de considerarmos os microestados usando o próprio exemplo de um balão.

Esse nosso balão de gás pode ter um macroestado aparentemente tão estável quanto o de um cristal de quartzo. Sabemos que as moléculas em um cristal de quartzo têm bem menos “liberdade” para se mover do que as do gás. Então, podemos dizer que na matriz do cristal há bem menos microestados possíveis do que no gás do balão. Podemos comparar o quartzo com um conjunto de seis moedas e o gás com um conjunto de seis dados. Obviamente, os microestados possíveis do conjunto de moedas são em menor número que os do conjunto de dados, assim como ocorre com o quartzo e o gás, respectivamente.

Perguntamos a vocês: ao longo do tempo, qual dos dois sistemas é mais estável? Em um futuro, tipo uma semana, qual dos dois sistemas tem mais probabilidade de estar no mesmo macroestado? Lógico que o quartzo. Muito provavelmente em uma semana o balão tenha estourado. E o quartzo vai estar ali, intacto (ou quase!).

O número de microestados possíveis está relacionado à estabilidade do sistema como um todo. A estrutura do sistema jamais será inteiramente determinável, a menos que ele tenha um único microestado. Esse sistema somente pode ser considerado onde não há energia, ou seja, no *zero absoluto*. Nessa situação, as partículas estão completamente paralisadas. Contudo, o zero absoluto até então se mostrou uma impossibilidade, uma irreabilidade.

Ludwig Boltzmann é considerado o pai da **mecânica estatística**, a qual é uma leitura probabilística da Termodinâmica clássica, pois considera que a estabilidade de um sistema está relacionada à probabilidade de ocorrência dos seus macroestados. Dizem que Boltzmann inspirou-se em Charles Darwin, na sua teoria da evolução pela seleção natural, a qual também é essencialmente probabilística.

A mecânica estatística justifica por que os macroestados de sistemas complexos biológicos podem ser pouco sensíveis a diferentes configurações de seus microestados.

Os macroestados mais prováveis são os macroestados mais estáveis.

Auto-organização

O sistema de Bénard é um exemplo de auto-organização. Consideramos auto-organização **a emergência de um estado de ordem estável em um sistema longe do equilíbrio**, sem a intervenção externa, a não ser a energia injetada no sistema. O conceito de auto-organização é moderno e é filho de diversas disciplinas que cunham seus princípios sobre a Termodinâmica. Como acabamos de falar, a emergência é o princípio fundamental da auto-organização. Entendemos que *emergência é o acontecimento espontâneo de determinado evento*, ou seja, é *um evento caótico*, que pode ser mais ou menos provável.

O sistema de Bénard é auto-organizado, pois sua estrutura organizada é uma consequência natural das suas condições iniciais, e, ainda, sua evolução (sentido das correntes de convecção) é imprevisível.

A consideração da auto-organização é uma idéia muito agressiva tanto para pensadores criacionistas (que acreditam em uma divindade como princípio da criação) como para os deterministas. Pois, se considerarmos seres vivos auto-organizados, seus estados de ordem emergiram na natureza de um substrato caótico e instável, assim como as correntes de convecção de Bénard emergiram.

A auto-organização emerge do caos a partir do próprio sistema.

Padrões

Relembramos que alguns macroestados são mais prováveis que outros, e, portanto, são mais estáveis. São mais estáveis porque as alterações dos microestados, as quais são contínuas e proporcionais à quantidade de energia no sistema, vão sempre auto-organizar o mesmo macroestado.

No exemplo dos dados, o macroestado 36 ou o macroestado 6 são muito pouco prováveis e, por isso, raros e instáveis. Se aparecerem no sistema, rapidamente irão desaparecer, pois é muito pouco provável, num próximo sorteio, repetir-se uma sucessão dos seis dados dando seis ou um. Todavia, macroestados como o 17 e o 18 se expressam com muito mais frequência (perto de 50% das vezes) e, portanto, são desestabilizados com mais dificuldade, uma vez que são muitos os microestados diferentes que podem resultar nesses macroestados.

Vamos chamar esses macroestados estáveis de padrões.

Padrões são macroestados estáveis, ou seja, mais prováveis.

Exemplos de padrões na natureza:

1. A orelha humana: varia de tamanho, existem umas mais abanadas, outras mais pontudas, mas são sempre "orelhas". Assim como a orelha, outro padrão é o próprio rosto humano (todos os rostos normais têm um padrão, não têm?,

ou seja, sobrancelhas em uma disposição mais ou menos comum, olhos acima do nariz...). A estrutura do organismo, por si, é um padrão.

2. O amor de uma mãe por seu filhote (umas mais severas, outras mais permisivas, outras menos afitas... mas “a regra” é uma mãe amar seus filhotes). Comportamentos também podem ser padrões na natureza.
3. O formato dos planetas (uns são esferas mais achatadas, mais alongadas, mais regulares... mas são sempre esferas).
4. A forma das laranjas.
5. As memórias em nossos cérebros (representam macroestados estáveis de um conjunto de estados de neurônios).

Contudo, na forma das nuvens se estabelecem padrões? Não cremos em nada menos padronizável do que a forma das nuvens...

Os sistemas mais complexos parecem apresentar maior variabilidade em seus macroestados comuns, embora um determinado padrão seja importante para a sobrevivência do sistema. Uma determinada “ordem” se faz necessária, e, como pudemos ver aqui, de certa forma essa **ordem é natural**, inerente às probabilidades de ocorrência de microestados diferentes que resultem em macroestados iguais ou muito parecidos.

Entretanto, vale lembrar que a estabilidade dos organismos se dá longe do equilíbrio!

Sistemas dissipativos

Na verdade, todos os sistemas abertos, complexos, estáveis longe do equilíbrio, são dissipativos quando consomem energia de outros sistemas para realizar um trabalho. Os seres vivos são sistemas dissipativos. O sistema de Bénard é dissipativo por natureza.

Em um sistema dissipativo, apenas parte da energia obtida é aproveitada para a realização de um trabalho; o resto é perdido em forma de calor para outros sistemas.

Por exemplo, o motor do carro que somente aproveita cerca de 20% da energia obtida com a queima da gasolina para produzir o seu trabalho. Do total dessa energia, 80% vão embora em forma de calor e em forma de “envelhecimento do motor”. Sempre haverá uma perda por dissipação dessa energia. Há, pois, uma limitação à capacidade de trabalho de um sistema térmico. O **atrito** é um dos agentes da dissipação e um dos motivos da irreversibilidade

É possível utilizar toda a energia de um motor para realizar um trabalho?

A resposta é **não**. É impossível aproveitar completamente a energia. Uma parte dessa energia é transformada em calor. Imaginemos uma máquina movida a gasolina cuja função é fazer gasolina. Nenhuma máquina conseguiria fazer a mesma quantidade de gasolina que ela está usando para funcionar. Por quê? Por-

que uma parte da energia se perde em forma de calor. Isso também ocorre no metabolismo celular.