

# **Auto-Organização e Complexidade: Uma Introdução Histórica e Crítica**

**Oswaldo Pessoa Jr.**

O presente texto contém as Notas de Aula da disciplina FIS-731, *Auto-Organização, Complexidade e Emergência*, do Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências, UFBA/UEFS, 2º semestre letivo de 2001, ministrada entre janeiro e maio de 2001 no Inst. de Física da Universidade Federal da Bahia, em Salvador.

A ementa do curso se propunha a explorar aspectos técnicos (matemáticos e científicos) relacionados com o tema de auto-organização e complexidade. Definiríamos de maneira precisa conceitos como “ordem”, “organização”, “complexidade”, “adaptabilidade”, etc., que caracterizam sistemas em geral. Faríamos uma apresentação que acompanhasse a evolução histórica do assunto, examinando a entropia, teoria da informação, sistemas com realimentação, auto-organização, redes neurais com aprendizado, caos determinístico, autômatos celulares e definições contemporâneas de complexidade.

Na prática, deixamos de fora muito destes tópicos, cobrindo a área só até 1970. Uma continuação natural do curso seria acompanhar o livro de SOLÉ, R. & GOODWIN, B. (2000), *Signs of Life – How Complexity pervades Biology*. Nova Iorque: Basic Books. Espero poder retomar esta disciplina e completar o texto, dobrando o seu tamanho. Por hora, aviso que o texto contém muitas imprecisões e que se trata de um texto preliminar.

Boa parte do material apresentado surgiu dos estudos realizados entre 1991-96, nos “Seminários sobre Auto-Organização e Informação” realizados no Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência (CLE) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), e coordenados por Michel Debrun até seu falecimento, em 1997.

# Sumário

<b>Cap. I: Ordem a partir da Desordem</b>	
1. Ordem	1
2. Ordem pode emergir da Desordem?	1
3. O Retorno ao Mecanicismo	2
4. Seleção Natural	3
5. Conservação de Energia	4
6. Sistemas Abertos	5
<b>Cap. II: Entropia</b>	
1. Entropia na Termodinâmica	6
2. Energia Livre	7
3. Primeiras Tentativas de Definição Microscópica de Entropia	8
4. Definição Probabilista de Entropia	8
5. O Efeito de Grandes Números	10
<b>Cap. III: Teoria da Informação</b>	
1. A Noção de Informação	13
2. Teorema Fundamental para Fontes sem Ruído	15
3. Ruído na Teoria da Comunicação	16
4. Teorema Fundamental para Fontes com Ruído	18
5. Transmissão de Informação e Informação Mútua	19
<b>Cap. IV: A Cibernética</b>	
1. Homeostase e Retroação	20
2. A Cibernética	21
3. Computação e Lógica	22
4. Década de 1950: Da Primeira à Segunda Cibernética	24
<b>Cap. V: Análise dos Conceitos de Ordem e Organização</b>	
1. Organização, Determinismo e Auto-Organização	26
2. Ordem enquanto Neguentropia	27
3. Categorias de Medidas Sistêmicas	29
4. Ordem a partir do Ruído	29
5. Organização e Adaptação	31
6. A Tese da Relatividade da Organização	33
<b>Cap. VI: Sistemas e Emergência</b>	
1. Teoria Geral dos Sistemas	35
2. O Todo é Maior do que a Soma das Partes?	38
3. A Noção de Emergência como Não-Linearidade	39
4. Emergência e Reducionismo	40
<b>Cap. VII: Auto-Organização em Seres Vivos</b>	
1. A Questão da Auto-Organização na Embriologia	41
2. Prigogine e as Estruturas Dissipativas	42
3. Células de Rayleigh-Bénard	45
4. Estruturas Dissipativas se aplicam aos Seres Vivos?	46
5. A Origem da Vida	47
6. Auto-Organização na Biologia: Henri Atlan	49

## Capítulo I:

# Ordem a partir da Desordem

### 1. Ordem

O que é *ordem*? Os físicos<sup>1</sup> em geral chamam um fenômeno ordenado quando:

- i) Há *regularidades* no espaço, como as listras da zebra.
- ii) Há regularidades temporais, como as batidas de nosso coração.
- iii) Há padrões que permitem a descrição de um sistema complicado em termos de poucas variáveis. Esta “ordem escondida” aparece claramente no caos determinístico.

Seria preciso refinar melhor esta definição, caracterizar o que seja “regularidade”, investigar se este conceito é “objetivo” ou se depende do sujeito (observador). No entanto, deixaremos este refinamento para mais tarde.

O que faremos agora é passear pela história das idéias, examinando diferentes opiniões a respeito de *se a ordem pode surgir da desordem*, ou, pelo contrário, se haveria uma “conservação” de ordem, de forma que a ordem só pode surgir da ordem.

### 2. Ordem pode emergir da Desordem?

Nada mais agradável do que começar pelos filósofos gregos pré-platônicos, com sua busca de princípios explicativos da natureza isentas dos deuses da mitologia.

A ordem pode surgir da desordem? Anaximandro de Mileto (c. 555 a.C.) parece ter defendido que sim, apesar de haver um preço a ser pago por isso. A origem de todas as coisas seria um “ilimitado” de onde tudo nasceria e para o qual tudo retornaria. Se este ilimitado for identificado com uma desordem primordial, teríamos “ordem emergindo da desordem” por um tempo limitado, ao final do qual a ordem se dissolveria novamente na desordem.<sup>2</sup>

Parmênides de Eléia (480 a.C.) via as coisas de outra maneira. Colocando a razão acima da observação, defendeu que qualquer mudança é impossível: “o que é não pode deixar de ser”. A ordem não poderia emergir da desordem, pois “do não-ser não pode surgir o ser”. Essas idéias foram muito influentes, e estimularam diversas tentativas de solução ao “problema da mudança”. Duas boas soluções salientaram que as substâncias não mudam, mas que seu *grau de ordenamento* sim.

---

<sup>1</sup> ARECCHI, F.T. ([1984] 1986), “Introduction”, in SERRA, R.; ANDRETTA, M.; COMPIANI, M. & ZANARINI, G. (orgs.), *Introduction to the Physics of Complex Systems*, Pergamon, Oxford, pp. i-xi. (Tradução de *Introduzione alle Fisica dei Sistemi Complessi*. Bologna: CLUEB.) Ver p. xi. Ver também a p. 66 de: WEISBUCH, G. (1983), “Quelques Approches Physiques de l’Organisation”, in DUMOUCHEL, P. & DUPUY, J.-P. (org.), *L’Auto-Organisation: de la Physique au Politique*, Seuil, Paris, pp. 64-74.

<sup>2</sup> Este resumo das opiniões dos gregos não foi elaborada com muita precisão. Referências mais precisas, como a coleção *Pensadores* (Abril, São Paulo), são facilmente encontradas em bibliotecas. Utilizei os manuais de G.E.R. LLOYD, *Early Greek Science: Thales to Aristotle* (1970) e *Greek Science after Aristotle* (1973), Norton, Nova Iorque, cujo resumo se encontra em <http://www.fis.ufba.br/~opessoa/cg/ci-grega.htm>. Na internet há um sítio excelente sobre Platão, <http://plato.evansville.edu>, que inclui cópia do livro clássico de JOHN BURNET (1920), *Early Greek Philosophy*, 3ª ed.

Empédocles de Acragas (445 a.C.) afirmava que haveria quatro elementos primordiais, terra, água, ar e fogo, e que eles se recombinariam em diferentes proporções para produzir todas as coisas (por exemplo, o osso consistiria de fogo, água e terra na proporção 4:2:2, ao passo que o sangue consistiria dos quatro elementos em iguais proporções). Em sua cosmogonia, Empédocles imaginou a origem dos animais utilizando uma noção tosca de *seleção natural*. Inicialmente, diferentes partes de corpos de animais teriam brotado do barro, separadamente. Pela força do “amor”, eles teriam se unido ao acaso. Aquelas combinações que “funcionavam” acabariam sobrevivendo, ao passo que as que tinham uma engenharia ruim pereceriam.

Demócrito de Abdera (410 a.C.), assim como Leucipo de Mileto (435 a.C.) antes dele, resolveram o problema da mudança postulando que no mundo só haveria átomos e vazio. Qualquer diferença que observamos no mundo seria devido a modificações na forma, arranjo e posição dos átomos. Concebiam que os átomos rumariam aleatoriamente em todas as direções, formando agregados ao *acaso*. O atomismo foi posteriormente desenvolvido por Epicuro de Samos (300 a.C.) que postulou que eles teriam tamanho, partes e também peso. Imaginava que inicialmente os átomos “desciam” com a mesma velocidade no vácuo, todos paralelamente. Os objetos do mundo teriam se formado devido a um pequeno movimento aleatório lateral (“clinamen”), um movimento *sem causa*, que explicaria a progressiva agregação da matéria. Tal movimento sem causa seria também usado para explicar a liberdade da alma. Epicuro era um materialista, e explicava eventos mentais por meio de átomos-espirituais.

Os geômetras gregos concebiam a existência de *formas puras*, como fazia Platão de Atenas (380 a.C.). As formas teriam uma existência autônoma, em um “mundo das idéias”. Platão via o universo de maneira “teleológica” (finalista), pois haveria um “demiurgo” (artesão divino) que *importa ordem à matéria*. Por outro lado, ao tratar do movimento um tanto irregular dos planetas, buscou um modelo mecânico baseado apenas nas formas mais simples, os círculos. Isto acabaria levando ao modelo dos epiciclos, que salvava os fenômenos de maneira acurada.

Aristóteles de Stagira (340 a.C.) herdou a ênfase no finalismo, mas a “causa final” não estaria na esfera divina mas sim na terrena. Para explicar qualquer coisa, salientava as quatro ‘causas’: i) matéria; ii) forma; iii) causa eficiente; iv) causa final. A forma de um objeto, que não era mais concebida como existindo de maneira pura em um mundo das idéias, era criado por algo exterior ao objeto (assim como a forma de uma mesa é imposta por um carpinteiro com a finalidade de usá-la em uma sala de jantar). Não temos mais uma abordagem mecanicista para a origem da ordem (como em Empédocles e nos atomistas), mas uma abordagem teleológica (“telos” = meta).

### 3. O Retorno ao Mecanicismo

Com a ascensão das religiões monoteístas, a questão da origem da ordem dissolveu-se mais ainda na solução teleológica. A ordem intrincada do mundo seria criada por Deus, arquiteto perfeito.

No Renascimento, porém, a abordagem mecanicista à natureza retornou. A ordem subjacente ao movimento aparente dos planetas seria o movimento elíptico em torno do Sol. Newton encontraria na gravitação universal um princípio unificador para explicar o movimento dos planetas, da queda dos corpos e das marés. Não investigaremos aqui a questão

da ordem na mecânica clássica<sup>3</sup>, mas mencionaremos o impacto que o microscópio teve na biologia, tornando mais admirável ainda a ordem inerente aos seres vivos.

O séc. XVIII foi marcado pelo Iluminismo francês, que levou adiante a abordagem mecanicista. Julien la Métrie, por exemplo, propunha em seu *O Homem-Máquina* (1747) que o homem consistia apenas de matéria em movimento. Surgiram nessa época as primeiras tentativas de explicar a *origem da ordem* presente nos seres vivos (aqui talvez fosse mais completo falar em origem da “complexidade”, que definiremos mais adiante). Duas foram as idéias centrais.

A primeira foi a noção de *evolução das espécies*, apresentada pelo Conde Buffon (em torno de 1780) em face da evidência dos fósseis, e posteriormente desenvolvida por Lamarck, etc.<sup>4</sup> A noção de evolução implicava que os seres vivos que conhecemos descenderam de ancestrais comuns. Se pudéssemos perceber o tempo como uma dimensão espacial, veríamos uma única “árvore da vida” (talvez apenas os vírus brotassem fora desta árvore), partindo de seres mais simples. Esta concepção levanta as seguintes questões, que nos acompanharão ao longo do curso. A evolução tende a produzir indivíduos mais complexos? Sistemas ecológicos mais complexos? Parece claro que o grau de adaptabilidade não é necessariamente proporcional ao grau de complexidade. Qual é a origem da complexidade dos seres vivos? Há de fato uma tendência para maior “complexificação” dos organismos?

Estas perguntas podem ser parcialmente respondidas determinando-se o *mecanismo* para a evolução das espécies. Lamarck havia proposto o mecanismo da herança de caracteres adquiridos. Darwin e Wallace propuseram em 1858 o mecanismo da *seleção natural*.

#### 4. Seleção Natural

A seleção natural ocorre em um sistema qualquer se forem satisfeitas algumas condições. Estas podem ser agrupadas em quatro pontos<sup>5</sup>:

1) REPLICAÇÃO.

- a) Populações orgânicas fazem parte de uma *história* com *ancestrais* e *descendentes*.
- b) Os membros de tais populações *herdam* traços de seus ancestrais e os *passam* para seus descendentes.

2) VARIAÇÃO.

- a) Os membros também *variam* com relação a esses traços herdados.
- b) As variações dos traços herdados ocorrem de maneira *aleatória*, ou seja, não são influenciadas pelo meio ambiente. (Contra Lamarck)

<sup>3</sup> Um livro clássico sobre a ascensão do mecanicismo é: DIJKSTERHUIS, E.J. (1961), *The Mechanization of the World Picture*, Oxford U. Press.

<sup>4</sup> Uma boa referência histórica é NORDENSKIÖLD, E. (1949), *Evolución Histórica de las Ciencias Biológicas*, Espasa-Calpe, Buenos Aires, pp. 24-38 (original em sueco: 1918). Um sítio sobre a história do pensamento evolutivo é <http://www.ucmp.berkeley.edu/history/evothought.html>.

<sup>5</sup> Estamos seguindo, com modificações, a análise de LENNOX, J.G. (1992), “Philosophy of Biology”, in SALMON, M.H. *et al.* (orgs.), *Introduction to the Philosophy of Science*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp. 269-309. Ver p. 271. Vale mencionar que o mecanismo de seleção natural tem sido identificado em outros sistemas que não o da evolução das espécies. Hull examinou três outros sistemas: mudança conceitual na ciência, reação do sistema imune a antígenos, e aprendizado operante. HULL, D.L. (2001), *Science and Selection*, Cambridge U. Press.

## 3) COMPETIÇÃO.

- a) Há uma tendência de tais populações de aumentarem geometricamente (exponencialmente), ao passo que os recursos necessários à sua sobrevivência aumentam aritmeticamente (linearmente). (Malthus)
- b) Por causa disso, os membros de tais populações *competem* entre si pelos recursos limitados.

## 4) ADAPTAÇÃO.

- a) O meio ambiente é altamente *complexo*, assim como as relações do organismo com o meio.
- b) Cada organismo tem um *grau de adaptação* (ou de aptidão = “fitness”) que é dado por sua estrutura, por sua engenharia, por sua bioenergética.
- c) O meio ambiente *muda constantemente* (fornecendo “oportunidades adaptativas”), em geral numa escala de tempo longa em relação ao tempo de vida de um organismo.

Dadas estas condições, segue-se que a *probabilidade é alta* de que:

- 1) Algumas variações tornam seus possuidores mais bem adaptados (no sentido estrutural) em comparação aos outros, ou seja, tais variações seriam “vantajosas”. (Diferencial de adaptação)
- 2) Os organismos com estas variações vantajosas (no sentido estrutural) terão maior chance de sobreviver.
- 3) Eles tenderão a deixar um número proporcionalmente maior de descendentes com estas variações nas gerações seguintes. (Diferencial de transmissão)

Conseqüentemente, tais variações vantajosas tenderão a se fixar na população, em detrimento de outras variações, levando a uma *mudança adaptativa da população*.

Este mecanismo torna-se mais acentuado com as mudanças ambientais.

## 5. Conservação de Energia

Paralelamente a estes desenvolvimentos na Biologia do séc. XIX, a Física também passava por grandes transformações. Entre 1820 e 1850, diversos processos de conversão entre fenômenos elétricos, magnéticos, ópticos, mecânicos e térmicos foram descobertos, levando à formulação do *princípio de conservação de energia*.

O que é energia? Na Mecânica, energia é uma quantidade associada a qualquer *movimento* atual (a energia cinética de um corpo de massa  $m$  em translação com velocidade  $v$  em relação a um referencial é  $T = \frac{1}{2}mv^2$ ) ou a qualquer movimento potencial (um corpo de massa  $m$  situado a uma altura  $z$ , em relação ao solo da Terra, tem uma energia potencial  $U = mgz$ , onde  $g$  é uma constante bem conhecida perto da superfície da Terra). A conservação de energia se exprime da seguinte forma:  $T + U = \text{cte}$ . Galileu observou que uma bola que rola para baixo em um plano e sobre novamente por outro atinge praticamente a mesma altura inicial. Isto sugere fortemente que algo está se conservando.

No entanto, se ao invés de soltar o corpo elástico em queda livre, fizermos uma pedra rolar morro abaixo, ao chegar no fundo do vale o movimento da pedra cessará. A energia mecânica não se conservou, mas se “dissipou”. A pedra cessou seu movimento *no valor mais baixo de energia potencial*.

Guiados pela noção de que *calor* é uma forma de *movimento desordenado* das moléculas constituintes das coisas, Mayer (1842) e Joule (1843) perceberam que, no caso da pedra que rola morro abaixo, o movimento da pedra havia sido transformada em movimento desordenado das moléculas (envolvidas nos choques da pedra com outras pedras). Ou seja,

energia mecânica se transformou em energia térmica. Eles calcularam o fator de conversão entre estas formas de energia, e Helmholtz (1848) tratou de estender matematicamente esta conversão para outras formas de energia. O resultado foi o princípio de *conservação de energia*, válido agora para todas os tipos de processos.

A 1ª lei da Termodinâmica exprime esta conservação de energia. Considere um sistema como um pistão móvel que contém um gás a uma certa temperatura, e ao qual é adicionado energia térmica. O *calor adicionado* ao sistema é denotado por  $Q$ . Esta energia transferida terá dois efeitos (poderia ter mais): fará o pistão se mover, produzindo trabalho  $W$ , e aumentará a *energia interna*  $E$  do gás. A 1ª lei pode assim ser expressa como:

$$Q = W + \Delta E. \quad (\text{eq. 1})$$

A energia interna  $E$  é a soma da energia cinética e potencial envolvendo todas as moléculas do corpo. Num gás, a energia potencial é praticamente constante e pode ser ignorada. A energia cinética, que pode ser de translação, rotação ou vibração, é proporcional à temperatura  $T$ : para um gás monoatômico como o hélio,

$$E = (3/2)NkT, \quad (\text{eq. 2})$$

onde  $N$  é o número de moléculas e  $k$  é a chamada constante de Boltzmann.

Mas o que é energia? Ela é uma “coisa” que sai de um lugar e chega a outro? Pensemos numa lanterna que emite um raio de luz. Neste caso, podemos pensar que a energia luminosa (associada a um campo eletromagnético) está se propagando com uma velocidade  $c$ . Se “modularmos” o feixe de luz, tapando ocasionalmente a lanterna, para enviar uma mensagem em código Morse, podemos pensar que esta mensagem está sendo “carregada” pelo transporte de energia do feixe. Tal maneira de pensar não é muito rigorosa, mas ela nos será útil mais para frente.

Por fim, vale mencionar que qualquer lei de conservação está associada a uma “simetria”, conforme provou a matemática Emmy Noether, no início do séc. XX. A conservação de energia é uma expressão da simetria de translação temporal: qualquer que seja o instante de tempo que considerarmos, as leis da física são as mesmas.

## 6. Sistemas Abertos

Imagine um sistema que esteja completamente *isolado* do meio ambiente. Por exemplo, uma amostra de hélio líquido, resfriado a  $-270^\circ\text{C}$ , colocado dentro de uma garrafa térmica (feita de duas paredes separadas por vácuo, para impedir que o calor seja conduzido para fora da garrafa). Se, no grau de resolução em que estamos trabalhando, o sistema puder ser considerado isolado, então *a energia será conservada* no interior da garrafa.

Mas o que aconteceria se o calor de fora entrasse na amostra de hélio líquido? Naturalmente, neste caso, a energia do hélio *não* se conservaria. Isso ilustra o fato de que o princípio de conservação de energia em geral *não vale para sistemas abertos*, apenas para sistemas isolados. Um ser vivo é um sistema aberto: se sua energia é constante, é porque a quantidade de energia que entra no sistema (em forma de alimento, por exemplo) é igual à quantidade que sai (em forma de calor ou na execução de trabalho).

Quando o sistema aberto troca *apenas* calor com o ambiente, e não troca matéria, é costume dizer que o sistema está “fechado”.

## Capítulo II:

# Entropia

### 1. Entropia na Termodinâmica

A conservação de energia é a 1ª lei da Termodinâmica. A 2ª lei exprime o fato de que quando energia mecânica (ou elétrica, etc.) é convertida em energia térmica, apenas uma parte desta energia térmica pode ser reconvertida em energia mecânica.

Em 1824, Sadi Carnot apresentou uma teoria para o funcionamento de máquinas térmicas, como a máquina a vapor. Em seu modelo, trabalho é realizado quando calor passa de um corpo quente para um corpo frio. O trabalho máximo que pode ser realizado<sup>6</sup> depende da diferença de temperatura  $T_2 - T_1$ . Se a máquina e os corpos quente e frio estiverem isolados do ambiente, a passagem de calor irá diminuir paulatinamente a diferença  $T_2 - T_1$ , até que ela se anule. No momento em que a temperatura de todos os corpos forem iguais, não há mais energia disponível para realizar trabalho.

Este é um exemplo de um processo *irreversível*. Clausius (1854) definiu uma grandeza  $S$ , posteriormente chamada por ele de “entropia”, que aumenta em processos irreversíveis até atingir um valor máximo:

$$\Delta S \geq 0. \quad (\text{eq. 3})$$

O valor máximo da entropia é obtido quando todos os corpos (do sistema fechado) estiverem à mesma temperatura.

A expressão numérica para a mudança de entropia é:

$$\Delta S = Q/T, \quad (\text{eq. 4})$$

onde  $Q$  é a quantidade de calor que entra (ou sai) do sistema. Tomemos um exemplo para ilustrar esta fórmula. Um corpo frio à temperatura  $T_1$  é conectado momentaneamente a outro mais quente, à temperatura  $T_2$ . Uma certa quantidade de calor  $Q$  (que tem valor positivo) passa do corpo quente para o frio, mas (para simplificar) as temperaturas não se alteram significativamente. A variação de entropia do corpo quente é  $-Q/T_2$ , ao passo que a do corpo frio é  $Q/T_1$ . Somando as duas contribuições, obtemos a variação total de entropia:  $\Delta S = Q/T_1 - Q/T_2$ . Como  $T_2 > T_1$ , vemos que  $\Delta S$  é positivo, conforme requerido.

Notemos que este aumento de entropia foi calculado comparando-se dois estados *em equilíbrio*, ou seja, estados que não se modificam com o tempo (que são os estados antes da conexão e depois da conexão). Essa definição termodinâmica de entropia *não* se aplica para situações *fora do equilíbrio* (por exemplo, quando o calor está passando de um corpo para outro).

Clausius (1865) terminou enunciando as duas leis da Termodinâmica para o universo como um todo, que pode ser considerado um sistema isolado: “a energia do universo é

---

<sup>6</sup> Se  $Q_i$  for o calor que entra na máquina, o trabalho  $W$  realizado pelo ciclo de Carnot é  $W = Q_i (T_2 - T_1)/T_1$ . Um texto bom e sucinto de Física, que acompanha uma excelente série televisiva, e que faz uso da história de maneira interessante mas não rigorosa, é: OLENICK, R.P.; APOSTOL, T.M. & GOODSTEIN, D.L. (1985), *The Mechanical Universe*, vol. 1: *Introduction to Mechanics and Heat*, Cambridge University Press.

constante”, e “a entropia do universo tende para um valor máximo”. Esta última afirmação está associada à controversa noção de “morte térmica do universo”: como o calor tende a ir de corpos quentes para corpos frios, o universo tenderia para uma situação futura em que sua temperatura seria uniforme, estando assim “condenado a um estado de repouso absoluto”.

Vale mencionar que a 3ª lei da Termodinâmica afirma que “a entropia de todos os sistemas é zero na temperatura de zero absoluto” (Nernst, 1908).

## 2. Energia Livre

Mencionamos a diferença entre sistemas “isolados” e “fechados”. Em geral, os sistemas estudados na ciência não são completamente isolados, mas estão em equilíbrio térmico com seu ambiente. O que acontece com a energia e a entropia destes sistemas? Há um truque para analisar esta situação que é a seguinte: considere um sistema maior, isolado, que engloba tanto a amostra de interesse quanto o ambiente (banho térmico) ao seu redor. Para este sistema *composto* (amostra + banho), isolado, a energia é conservada e a entropia é maximizada.

Partamos da situação em que a amostra está isolada do banho térmico em equilíbrio. Ambas são então postas em contato, e um novo equilíbrio é atingido. A temperatura inicial do banho é  $T$ , e este valor é o valor final da temperatura do sistema composto (pois o banho é muito maior do que a amostra). Suponha que uma quantidade de calor  $Q$  entra na amostra, aumentando sua energia interna numa quantidade  $\Delta E$ . A entropia *do banho* diminui numa quantidade  $\Delta S_b = -Q/T = -\Delta E/T$  (onde utilizamos as eqs.1 e 3, e o fato de que  $W = 0$ ). A variação  $\Delta S$  da entropia da amostra é desconhecida, mas, pela 2ª lei, a variação de entropia do sistema composto tem que ser positiva:  $\Delta S + \Delta S_b \geq 0$ . Assim:  $\Delta S - \Delta E/T \geq 0$ . Rearranjando esta desigualdade, temos:  $T\Delta S - \Delta E \geq 0$ . Finalmente, como a temperatura não varia, podemos escrever  $\Delta(TS - E) \geq 0$ .

Definindo a *energia livre* de Helmholtz como:

$$F \equiv E - TS, \quad (\text{eq. 5})$$

temos então que a *energia livre da amostra tende para um valor mínimo*, quando ela é mantida em um banho térmico de temperatura  $T$ :

$$\Delta F \leq 0. \quad (\text{eq. 6})$$

Em um sistema isolado, a entropia  $S$  tende para um máximo; em um sistema “fechado”, o que é maximizado é  $TS - E$ . Para altas temperaturas, a contribuição da entropia é mais importante, mas para baixas temperaturas uma diminuição da energia interna  $E$  é mais efetiva para minimizar a energia livre. Isso “explica” porque, a temperaturas baixas, uma substância como a água tende a se solidificar num cristal ordenado, o que diminui a energia potencial entre as moléculas. Este processo pode diminuir a entropia da amostra, mas irá *aumentar* a entropia do sistema composto (ou do universo).

A *energia livre* na Termodinâmica tem um papel análogo ao da *energia potencial* na Mecânica. Uma pedra que rola e dissipa energia acaba se estabilizando em um mínimo de energia potencial. Um sistema qualquer que dissipa energia para um banho térmico se estabiliza no mínimo de energia livre.

### 3. Primeiras Tentativas de Definição Microscópica da Entropia

Após o estabelecimento da Termodinâmica, diversos autores passaram a estudar como relacionar grandezas macroscópicas, como temperatura e pressão, com grandezas *microscópicas* que descrevem o movimento mecânico de átomos. A eq.(2), por exemplo, indica que a energia cinética média  $\langle E_i \rangle$  de uma molécula monoatômica  $i$  de um gás é proporcional à temperatura:  $\langle E_i \rangle = \frac{1}{2}m\langle v^2 \rangle = (3/2)kT$ , de forma que a temperatura é uma medida macroscópica da média do quadrado das velocidades das moléculas:  $T = (1/3k)m\langle v^2 \rangle$ , conforme obtiveram (sem indicar médias) Daniel Bernoulli (1738) e James Waterston (1845).

Esta Teoria Cinética dos Gases viria a se desenvolver bastante na segunda metade do séc. XIX, nas mãos de Clausius, Maxwell e Boltzmann. Um dos problemas mais interessantes foi o de descrever a *entropia* de maneira microscópica.

Em 1860, Maxwell havia derivado a fórmula estatística para a *distribuição de velocidades*  $f(v)$  em um gás a pressão constante. Em 1866, ele rederivou esta fórmula, considerando colisões entre duas moléculas com certas velocidades, e como estas velocidades se modificam após a colisão. Supôs que a velocidade de uma molécula antes do choque era independente da velocidade da outra molécula, suposição conhecida como *independência estatística*.

Boltzmann assimilou estes métodos e os desenvolveu para o problema do aumento de entropia, em 1872. Considerou novamente os choques entre moléculas e o número médio de colisões de diferentes tipos. Considerou que a probabilidade de uma colisão seria igual à da colisão inversa, o que é consistente com a *reversibilidade* da Mecânica Clássica. Supôs uma hipótese estatística de probabilidades iguais “a priori” no espaço de fase. Fez também a suposição (mencionada acima) de independência estatística, sem imaginar que ela seria crucial nas controvérsias posteriores. Obteve então uma equação de transporte envolvendo a derivada temporal da função de distribuição de velocidades:  $\partial f(v)/\partial t$ . Definiu então uma função  $H$ , e provou que esta função é sempre decrescente, salvo quando  $f(v)$  é igual à distribuição de equilíbrio de Maxwell. Boltzmann então identificou a função  $-H$  no equilíbrio com a entropia termodinâmica. Além disso, sua função  $-H$  fornecia uma expressão para a entropia mesmo fora da situação de equilíbrio.<sup>7</sup>

O teorema-H foi apresentado por Boltzmann como uma derivação da 2ª lei da Termodinâmica a partir somente da Mecânica Estatística. Kelvin (1874) e Loschmidt, porém, chamaram atenção para a inconsistência de se partir de uma Mecânica reversível e obter uma lei irreversível. Após muita discussão, percebeu-se que a suposição de independência estatística era responsável pela introdução da irreversibilidade na demonstração de Boltzmann. Para justificá-la, ter-se-ia que introduzir uma “hipótese de caos molecular”, ou seja, algum mecanismo físico que equivalesse à suposição matemática de independência estatística. O escocês Burbury propôs que tal hipótese exprimiria os efeitos das *flutuações térmicas do ambiente* na amostra, que nunca estaria completamente isolada, na prática.

### 4. Definição Probabilista de Entropia

Em parte devido aos problemas do teorema-H, Boltzmann procurou uma outra maneira de exprimir a entropia de maneira microscópica, chegando em 1877 a sua

<sup>7</sup> Uma boa referência histórica é BRUSH, S.G. (1976): *The Kind of Motion We Call Heat*, North-Holland, Amsterdã.

*interpretação probabilista da entropia*. A idéia básica é a seguinte. Dado um estado macroscópico  $i$ , considere o número  $\Omega_i$  de estados microscópicos distintos que são consistentes com este estado macroscópico. A entropia associada a este estado macroscópico é dada então por<sup>8</sup>:

$$S_i = k \log_{10} \Omega_i . \quad (\text{eq. 7})$$

O macroestado que possui o maior número de microestados associados – ou seja, o que tem maior entropia – é o macroestado mais *provável*. Esta associação do conceito de entropia com o de probabilidade é notável: esta associação está ausente na definição puramente termodinâmica. Nesta, a irreversibilidade leva o sistema inexoravelmente para um único estado final de equilíbrio; na definição probabilista de Boltzmann, no entanto, é possível que haja diferentes estados finais de equilíbrio, com diferentes probabilidades. Haveria uma contradição entre estas duas definições? Na prática não, por duas razões.

Primeiro, em sistemas físicos macroscópicos, que envolvem um número imenso de moléculas – heptilhões de partículas, ou seja,  $N=10^{24}$  – o macroestado mais provável é *mitíssimo* mais provável que qualquer outro macroestado. Este fato foge à nossa intuição primeira, mas podemos nos convencer disso examinando um exemplo, como faremos na seção seguinte.

Segundo, mesmo que um macroestado menos provável subsista por alguns instantes, nossa observação de sistemas macroscópicos envolve um intervalo de tempo relativamente grande (digamos da ordem de milissegundos) em comparação com essas flutuações para fora do estado mais provável. Ou seja, nossa observação faz um média das propriedades macroscópicas do sistema, algo que matematicamente é representado por um procedimento chamado *grão grosso* (“coarse graining”).



Figura 1: Ludwig Boltzmann (1844-1906), antes de sua famosa barba.

Para fundamentar apropriadamente a definição probabilista de entropia, dois pontos tiveram que ser salientados por Boltzmann. Primeiro, para “contar” o número de microestados associados a cada macroestado, é preciso introduzir uma maneira de *discretizar* os microestados, que são tratados pela física clássica de maneira contínua. Isso pode ser feito considerando células finitas no espaço de fase, ou considerando que a energia é discretizada em múltiplos de um quantum fundamental. Este procedimento boltzmanniano foi fundamental na descoberta de Planck (1900) da Teoria Quântica.

O segundo ponto a ser salientado envolve a suposição de Boltzmann de que cada microestado diferente tem a mesma probabilidade de ocorrer. Para justificar esta suposição Maxwell e Boltzmann introduziram a *hipótese ergódica*: “um sistema físico passa por todos os microestados possíveis”. Às vezes

um sistema mecânico (uma bolinha elástica ricocheteando em uma caixa) percorre trajetórias cíclicas que não passam por todos os pontos. Mas se houver algum fator que introduza leves

<sup>8</sup> A constante  $k$  é hoje-em-dia chamada “constante de Boltzmann”, e já a encontramos no início da seção 10. Nos cálculos que faremos suporemos unidades tais que  $k=1$ . A função logaritmo  $y = \log_{10}(x)$  é definida de tal forma que  $10^y = x$ . Mais tarde passaremos a usar a função  $\log_2(x)$ , que é igual a  $\log_{10}(x) / \log_{10}2$ , ou seja:  $\log_2(x) = \log_{10}(x) / 0,301$ . Tanto faz a base da função logarítmica usada.

desvios desta trajetória, como flutuações externas (como as postuladas por Burbury, que vimos acima<sup>9</sup>) ou perturbações ocasionadas pelos choques com as paredes do recipiente, então tais trajetórias não ocorrem.

### 5. O Efeito de Grandes Números

Examinaremos agora um exemplo que ilustra a definição probabilista de entropia, mostrando que a *probabilidade do macroestado mais provável aumenta exponencialmente (ou mais) com o número de partículas*.

Considere um gás em um recipiente. Temos um dispositivo capaz de medir o número de partículas do gás em quadradinhos de certo tamanho. Neste exemplo fictício, um macroestado é distinguido por meio deste dispositivo, contando-se o número de partículas por célula. Para simplificar, o número de partículas  $N$  é igual ao número de quadradinhos  $M$  distinguidos pelo aparelho. Comparemos a entropia de dois macroestados diferentes. O primeiro macroestado, que chamaremos “heterogêneo” apresenta *todas* as partículas em um quadradinho específico (na Fig. 2, os da esquerda); o segundo macroestado, “homogêneo”, é aquele para o qual *cada* quadradinho contém exatamente uma partícula.

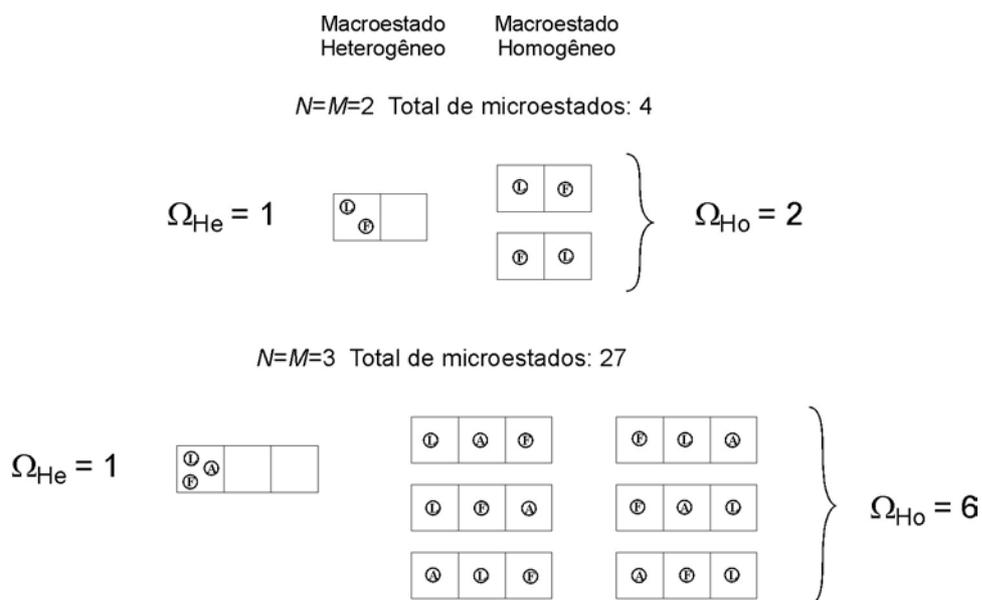


Figura 2: Comparação do número de microestados  $\Omega$  para macroestados heterogêneo e homogêneo

Tomemos  $N=M=2$ , e chamemos as partículas de LÉO (L) e FÁBIO (F). Há quatro microestados possíveis (Fig. 2): L e F juntos no quadrado 1; juntos no quadrado 2; L no quadrado 1 e R no 2; R no 1 e L no 2. Neste exemplo, o aparelho distingue três macroestados, sendo que aquele para o qual cada quadrado tem uma partícula (o macroestado homogêneo)

<sup>9</sup> Esta hipótese de que “perturbações aleatórias do ambiente garantem ocupação fracional igual de todos os microestados de um sistema fechado – ou seja, *desordem máxima*” é adotada no livro-texto de CALLEN, H.B. (1985), *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*, 2<sup>a</sup> ed., Wiley, Nova Iorque, pp. 379-82.

corresponde a dois microestados. Este então é o macroestado mais provável: sua entropia é  $S_{Ho} = k \log_{10} 2$ , ou  $S_{Ho} = 0,30$  (tomando  $k=1$ ). O macroestado heterogêneo só tem um microestado associado:  $S_{He} = 0$ . A razão entre o número de microestados (para  $N=2$ ) é  $\Omega_{Ho}/\Omega_{He} = 2$ .

Tomemos agora  $N=M=3$ , adicionando a partícula ANTÔNIO CARLOS (A). O macroestado heterogêneo continua tendo entropia  $S_{He} = 0$ , mas agora há seis maneiras diferentes de distribuir L, F e A entre os três quadradinhos. Assim,  $S_{Ho} = \log_{10} 6 = 0,78$ . A razão mencionada acima subiu (no caso  $N=3$ ) para  $\Omega_{Ho}/\Omega_{He} = 6$ .

Em geral, esta razão será dada por  $N!$  (“ $N$ -fatorial”), ou seja,  $N \cdot (N-1) \cdot (N-2) \cdot \dots \cdot 3 \cdot 2$ . Esta função  $\Omega_{Ho}/\Omega_{He}(N)$  cresce mais rápido do que exponencialmente. Para  $10^{24}$  partículas (que é o que encontraríamos em uma amostra macroscópica de gás), ela é mais do que astronômica: a probabilidade do estado homogêneo é 1, se comparado ao do heterogêneo.

Este exemplo ilustra como, para  $N$  muito alto, o macroestado de equilíbrio é muitíssimo mais provável do que qualquer outro macroestado.

Este exemplo serve para ilustrar o efeito de grandes números, mas os macroestados considerados são ridículos. Isso porque os “macro-observáveis” são geralmente grosseiros, ou seja, não conseguem distinguir muita coisa. Um exemplo mais realista seria um recipiente de gás dividido por um pistão (parede) leve e móvel. O observador macroscópico não consegue distinguir partículas, mas apenas a posição do pistão. Qual é o estado de equilíbrio (o de maior entropia)?

Para realizar nossos cálculos, consideremos um exemplo simples<sup>10</sup>. O recipiente é dividido em dez células dispostas conforme a Fig. 3. Do lado esquerdo do pistão há duas partículas (chamadas DENISE D e ZEZÉ Z), enquanto que do lado direito estão nosso três conhecidos, L, F e A. Há apenas quatro macroestados, dependendo da posição do pistão.

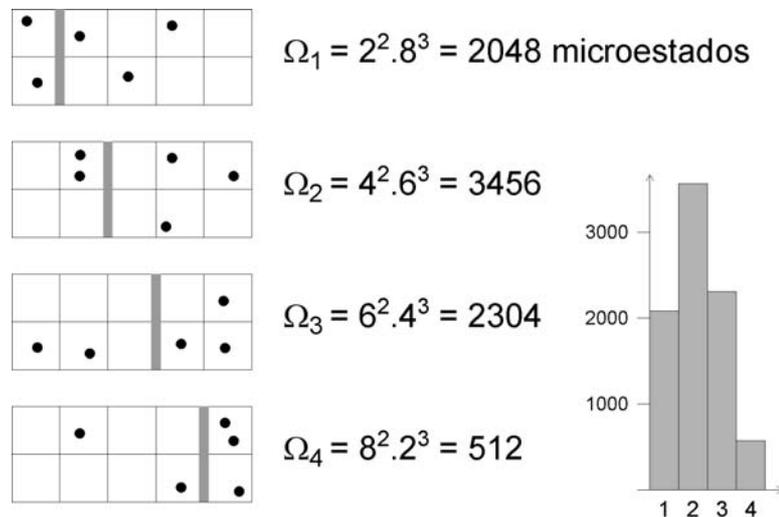


Figura 3: Quatro macroestados do gás separado por pistão.

<sup>10</sup> Este exemplo foi tirado, se não me engano, do livro de Reif de *Introdução à Mecânica Estatística*, Apêndice B, pp. 315-20.

Para o macroestado 1, o número de casas à esquerda é  $M_E = 2$  e à direita é  $M_D = 8$ . A partícula D pode ser colocada em uma de duas casas, e a Z também. Partícula L pode ser colocada em uma de oito casas, e o mesmo para F e A. Multiplicando todas estas possibilidades temos:  $\Omega_1 = 2^2 \cdot 8^3 = 2048$  microestados. Seguindo a fórmula  $\Omega_i = M_E^2 \cdot M_D^3$ , obtemos para os outros macroestados indicados na figura:  $\Omega_2 = 4^2 \cdot 6^3 = 3456$ ;  $\Omega_3 = 6^2 \cdot 4^3 = 2304$ ;  $\Omega_4 = 8^2 \cdot 2^3 = 512$ . Vemos claramente que o estado mais provável é  $\Omega_2$  (supondo-se a hipótese ergódica). Este é exatamente o estado em que a razão dos volumes de cada lado do recipiente é igual à razão do número de partículas, 2:3. E, de fato, esta conclusão se verifica em amostras reais de gases, onde o efeito de grandes números faz com que o pistão fique imóvel, dentro da resolução de nossas observações.

Uma regra prática que pode ser usado para as flutuações em torno do estado de equilíbrio é a seguinte. Consideremos o recipiente com gás dividido em duas partes. O número de partículas em cada lado será *em média*  $N/2$ , ao passo que as flutuações serão da ordem de  $\sqrt{N}$ . O lado esquerdo, assim, terá um máximo de número de partículas em torno de  $N/2 + \sqrt{N}$ , e um mínimo em torno de  $N/2 - \sqrt{N}$ . Para  $N = 10^{24}$ , tais flutuações são da ordem de  $10^{12}$ , ou seja, uma parte em um trilhão! Nossos equipamentos não distinguem macroestados com tal resolução. Isso explica porque observamos um gás atingir de maneira irreversível o macroestado de equilíbrio e de lá não sair. Não explica?

## Capítulo III:

# Teoria da Informação

### 1. A Noção de Informação

Claude Elwood Shannon começou a publicar trabalhos importantes em matemática aplicada em 1938, no MIT, em Boston, quando escreveu uma das mais importantes teses de mestrado da história. Estimulado por problemas de telefonia, ele mostrou como implementar operações lógicas (de álgebra booleana, envolvendo apenas os números 0 e 1) em circuitos eletrônicos. Um interruptor ligado corresponderia a “1”, desligado a “0”.

Indo trabalhar no AT&T Bell Telephones, começou a perceber que os dígitos binários poderiam ser usados na comunicação. Ninguém tinha explorado esta idéia porque a teoria da transmissão telefônica e telegráfica envolvia o eletromagnetismo, com seus campos que variam continuamente. Após alguns anos de trabalho, publicou em 1948 seu famoso artigo “Teoria Matemática da Comunicação”.<sup>11</sup>



Figura 4: Claude Shannon (1916-2001)

A noção central de sua teoria é a “informação”, que para ele é um atributo de uma *fonte* (e não de uma mensagem), e é medida pelo *número de mensagens* diferentes possíveis que podem ser enviadas. Para o receptor da mensagem, a informação da fonte irá determinar (no caso sem ruídos externos) o grau de sua *incerteza* sobre qual será a mensagem enviada (ou seja, se o receptor sabe tudo sobre a situação e não há ruído, sua incerteza será medida pela informação da fonte).

Em seu famoso artigo de divulgação da teoria de Shannon, Warren Weaver<sup>12</sup> salienta que a noção de “informação” deve ser distinguida da de “significado”. Com efeito, o significado de uma mensagem, para um receptor, tem a ver com os *atos* que o receptor pode realizar no mundo; além disso, o significado de um conceito depende da *rede* de conceitos relacionados a ele.

Voltando à teoria de Shannon, no caso de mensagens equiprováveis, a informação é definida como o *logaritmo na base 2* do número de mensagens possíveis. Se há apenas uma

<sup>11</sup> SHANNON, C.E. (1948), “The Mathematical Theory of Communication”, *Bell System Technical Journal*, julho e outubro. Republicado in SHANNON, C.E. & WEAVER, W. (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, U. Illinois Press, Urbana, pp. 29-. Este livro foi traduzido para o português: *Teoria Matemática da Comunicação*, Difel, São Paulo, 1975, trad. O. Agueda. O artigo com os resultados principais da tese de mestrado é: SHANNON, C.E. (1938), “A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 57, 1-11. Um curto mas interessante necrológio de Shannon é: JOHNSON, G. (2001), “Claude Shannon, Mathematician, dies at 84”, *New York Times*, Feb. 27, disponível pela internet.

<sup>12</sup> WEAVER, W. (1949), “Recent Contributions to the Mathematical Theory of Communication”, in SHANNON & WEAVER, op. cit. (nota 12), pp. 1-28.

mensagem possível, a informação é zero, pois  $\log_2 1 = 0$ . Se há duas alternativas equiprováveis, como na comunicação do resultado do lançamento de uma moeda ( $C$  para cara e  $c$  para coroa), então há 1 “bit” de informação associado a cada lançamento, pois  $\log_2 2 = 1$ .

A idéia de se usar o logaritmo para exprimir informação foi antecipada por dois precursores de Shannon, H. Nyquist e R. Hartley. Um traço interessante do logaritmo é que ele torna a informação *aditiva*. Se consideramos três lançamentos de dados, é natural que a informação associada seja 3 bits (1 para cada lançamento). No entanto, o número de possibilidades aumenta para 9:  $CCC, CCc, CcC, Ccc, cCC, cCc, ccC$  e  $ccc$ . Para transformar 9 possibilidades em 3 unidades de informação, é necessário usar a função logaritmo.

Para  $N$  mensagens possíveis (e equiprováveis), a informação  $H$  seria:

$$H = \log_2 N \tag{eq. 8}$$

Notamos a semelhança entre esta definição de informação e a definição probabilista de entropia, de Boltzmann (eq. 7). É devido a esta semelhança formal que Shannon utilizou o termo “entropia da fonte” para exprimir a informação gerada na fonte. Conforme vimos na seção 11, a entropia de Boltzmann mede o logaritmo do número de estados microscópicos consistentes com um estado macroscópico específico. No caso de Shannon, a entropia mede o logaritmo do número de possíveis mensagens (estados microscópicos) consistentes com uma determinada fonte (o análogo ao estado macroscópico).

A eq.(8) pode ser expressa em termos das probabilidades  $p_i$  de cada uma das mensagens possíveis, onde o índice  $i$  vai de 1 até  $N$ . No caso de  $N$  mensagens equiprováveis, a probabilidade da cada mensagem é  $1/N$ . Podemos assim escrever a eq.(8) da seguinte forma:

$$H = \log N = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \log N = - \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \log \frac{1}{N} = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i$$

A beleza desta nova maneira de escrever a entropia  $H$  em termos de probabilidades é que ela é mais geral que a eq.(8), pois vale também no caso em que as diferentes mensagens (microestados) têm probabilidades diferentes:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i , \tag{eq. 9}$$

Esta definição pode ser aplicada ou a mensagens completas ou aos signos que compõem a mensagem. (1) No primeiro caso,  $p_i$  é a probabilidade de ocorrência de cada uma de  $N$  mensagens diferentes. (2) No segundo caso, esta fórmula pode se aplicar para os diferentes signos (ou símbolos, de um total de  $N$ ) enviados a cada unidade de tempo. No caso do lançamento de 3 moedas, a transmissão de cada signo “ $C$ ” ou “ $c$ ” está associado a um valor de entropia, que irá depender das probabilidades  $p_i$  de ocorrência de cada signo.

Nós não vamos provar a validade da eq.(9) no caso geral, mas vamos ilustrar com um exemplo. Consideremos novamente o exemplo em que o emissor da mensagem joga uma moeda e comunica o resultado para o receptor. Suponhamos agora que a moeda tem uma assimetria que a faz ser “viciada”: ela cai com cara  $\frac{3}{4}$  das vezes, e com coroa apenas  $\frac{1}{4}$  das vezes. Como calcular a informação associada a cada lançamento?

Usamos a eq.(9). A probabilidade de cair cara é  $p_1 = \frac{3}{4}$ , de cair coroa é  $p_2 = \frac{1}{4}$ . Temos assim:  $H = - \frac{3}{4} \cdot \log \frac{3}{4} - \frac{1}{4} \cdot \log \frac{1}{4} = - \frac{3}{4} \cdot (-0,415) - \frac{1}{4} \cdot (-2) = 0,81$  bits por arremesso de moeda. Ora, isto é menos do que a informação de 1 bit por arremesso para o

caso da moeda com possibilidades equiprováveis. Isto faz sentido: no caso equiprovável, a ignorância do receptor é máxima; no caso da moeda viciada, o receptor tem uma expectativa maior de que caia cara (pois a probabilidade é maior), de forma que sua incerteza é menor. Isto ilustra então o que dissemos antes: a informação ou entropia da fonte está associada ao grau de incerteza sobre a mensagem que será emitida.

Façamos algumas comparações entre o caso da teoria da comunicação e o da termodinâmica. Entropia mede o grau de incerteza sobre qual será a mensagem da fonte. No caso termodinâmico, dado um macroestado, a entropia também mede nossa incerteza sobre qual é o microestado exato em um dado instante. Há diferenças, porém, entre estas duas situações. No caso termodinâmico, nunca ficamos sabendo qual é o microestado exato, ao passo que na teoria da comunicação ficamos. Além disso, o caso físico envolve um sistema que percorre todos os microestados possíveis, inclusive aqueles pertencentes a outros macroestados (apesar da probabilidade desta ocorrência ser baixíssima). Esta situação não ocorre para o caso da teoria da comunicação: a fonte (ou seja, o macroestado) é uma só. Na Física, há uma lei de maximização da entropia, ao passo que na teoria da comunicação não há.

Há porém outra semelhança entre a entropia termodinâmica e a entropia da teoria da comunicação. Vimos na seção 11 que a entropia é máxima para estados térmicos *homogêneos*. Com efeito, a energia térmica de um corpo (com uma parte quente e outra fria) tende a se homogeneizar com o passar do tempo (o corpo fica todo à mesma temperatura). No caso da Teoria da Comunicação, algo semelhante também ocorre: a entropia da fonte é máxima quando as probabilidades das diferentes mensagens forem iguais, ou seja, forem homogêneas. A eq.(9), portanto, é uma excelente medida de homogeneidade ou de heterogeneidade.

## 2. Teorema Fundamental para Fontes sem Ruído

Por que será que a teoria de Shannon teve tanta importância? Nesta seção apresentaremos um exemplo ilustrativo do que é chamado de teorema fundamental para fontes sem ruído, e na seguinte consideraremos o efeito do ruído externo.

Dois astronautas, ÂNGELO e CONCEIÇÃO, estão explorando a misteriosa superfície do planeta Marte. Eles terão que visitar 100 locais previamente escolhidos e informar à MARINA, na base da Terra, se eles encontraram rochas ígneas (I), rochas metamórficas (M), rochas sedimentares (S) ou gelo (G). Supomos que estas alternativas são mutuamente excludentes. Um levantamento prévio, realizado com telescópios na Terra, indicam que a probabilidade de cada alternativa é a seguinte: I: 0,50 ; M: 0,30 ; S: 0,15 ; G: 0,05 . Infelizmente, ÂNGELO e CONCEIÇÃO comemoraram em excesso a descida perfeita em Marte, deram entrevistas demais para os canais de televisão terrestres, e sua bateria ficou com carga baixíssima. Eles utilizam um sistema diferente de comunicação com a Terra baseado na emissão de um pulso de luz que, conforme o filtro colocado em sua frente, pode ter coloração Vermelha (que representaremos pelo dígito “0”) ou Azul (“1”). Cada pulso destes será chamado de um “signo”. A geração e emissão de cada signo gasta *uma* unidade de energia da bateria. Infelizmente, restaram apenas 180 unidades de energia para eles enviarem toda a informação a ser coletada.

Será que eles conseguirão enviar toda informação? Podemos dizer que cada signo enviado carrega um bit de informação (“0” ou “1”). Os 180 bits que poderão ser enviados podem ser entendidas como a *capacidade* do canal de comunicação. Segundo Shannon, a capacidade de um canal é a quantidade de informação que pode ser transmitida por unidade de tempo. Neste exemplo, estamos ignorando a expressão “por unidade de tempo”.

Inicialmente, ÂNGELO e CONCEIÇÃO pensaram em adotar a seguinte codificação, usando apenas *pares de signos*: I=00, M=01, S=10, G=11. Como eles visitariam 100 locais, teriam que enviar 200 bits de informação, o que suplantaria a capacidade do canal de comunicação. O que fazer? Será que há uma maneira mais inteligente de codificar as mensagens para gastar menos energia? Shannon mostrou que há, e que o número *mínimo* de signos necessários para enviar as mensagens é dada pela entropia da fonte. Qual é a entropia da fonte? Usando a eq.(9) e as probabilidades para I, M, S e G, obtemos:  $H = -0,30 \cdot \log_2(0,30) - 0,50 \cdot \log_2(0,50) - 0,15 \cdot \log_2(0,15) - 0,05 \cdot \log_2(0,05) = 1,65$  bits. Multiplicando isto pelo número de mensagens, que são 100, obtemos 165 bits. Isto significa, segundo o teorema fundamental de Shannon, que ÂNGELO e CONCEIÇÃO *não* poderão enviar todas suas mensagens utilizando *menos* do que 165 signos binários. Felizmente, eles ainda têm 180 unidades de energia, que dá para enviar 180 signos!! Há portanto uma esperança!

Como codificar, então, estas mensagens? A maneira mais eficiente foi proposta por Huffman, e no nosso caso fornece: I=1, M=01, S=001, G=000. A idéia é codificar as mensagens mais prováveis com um menor número de signos. Quantas unidades de energia ÂNGELO e CONCEIÇÃO gastariam para enviar a informação relativa aos 100 locais visitados, supondo que as probabilidades correspondam exatamente à frequências relativas das rochas encontradas? Gastariam 1 signo · 50 locais + 2 signos · 30 locais + 3 signos · 15 locais + 3 signos · 5 locais, o que fornece 170 signos. Sucesso!!! Conseguiram!! Chegam na nave, pegam sua lista de rochas encontradas, IMIISIMGMI..., e enviam sua mensagem inequívoca: 10111001101000011... MARINA agradece.

O *teorema fundamental para fontes sem ruído* diz o seguinte<sup>13</sup>. Considere um canal que tenha uma capacidade de  $C$  bits por segundo, aceitando sinais de uma fonte com entropia (informação) de  $H$  bits por símbolo. Através de uma codificação eficiente, é possível transmitir símbolos pelo canal a uma taxa média máxima próxima de  $C/H$  símbolos por segundo, mas nunca superior a isso.

### 3. Ruído na Teoria da Comunicação

Toda mensagem enviada está sujeita a interferências provindas do meio externo no qual ela é transmitida. Uma transmissão transatlântica de rádio é afetada por tempestades e outros fenômenos atmosféricos, gerando no aparelho receptor um monte de ruídos estranhos que muitas vezes tornam impossível a compreensão da mensagem. Uma parte importante da teoria de Shannon é a descrição deste *ruído* e como ele afeta a capacidade de um canal de comunicação.

Tomemos um exemplo simples. Um par de signos binários (“0” e “1”) podem ser emitidos pela fonte, com probabilidade  $p_0$  de gerar “0” igual a  $\frac{3}{4}$  e probabilidade  $p_1$  de gerar “1” igual a  $\frac{1}{4}$ . Já calculamos a entropia  $H(x)$  da fonte  $X$  (seção 13), que é 0,81 bits por signo. Usamos a eq.(9), que reescrevemos aqui com notação levemente diferente<sup>14</sup>:

<sup>13</sup> Nesta seção estamos seguindo o livro do PIERCE sobre teoria da informação (depois coloco a referência), cap. V. O enunciado deste teorema (p. 98) se encontra também nas obras originais de Shannon e de Weaver (p. 17).

<sup>14</sup> Seguimos PEIRCE, op.cit. (nota 14), cap. VIII, mas invertemos sua notação para probabilidades e entropias condicionais, para ficar de acordo com a convenção majoritária na literatura. Assim, por exemplo, onde ele escreve  $p_x(y)$ , escrevemos  $p_y(x)$ .

$$H(x) = - \sum_{x=1}^N p(x) \log p(x) , \quad (\text{eq. 10})$$

A entropia da fonte  $H(x)$  mede a incerteza sobre  $x$ , ou seja, sobre qual signo será transmitido.

O ruído é descrito na teoria matemática da comunicação através da *probabilidade condicional*  $p_x(y)$  de, dado um signo  $x$  emitido pela fonte, ocorrer o recebimento do signo  $y$ . Em nosso exemplo, vamos supor que a probabilidade de erro é 0,1, ou seja, em 1 de cada 10 vezes (em média) que um “0” for emitido, um “1” é recebido (e vice-versa).

A primeira questão é: qual é a entropia  $H(y)$  do receptor  $Y$ ? A resposta é dada simplesmente pela eq. (9), que reescrevemos como:

$$H(y) = - \sum_{y=1}^M p(y) \log p(y) . \quad (\text{eq. 11})$$

A entropia do receptor  $H(y)$  mede a incerteza sobre  $y$ , ou seja, sobre qual signo será recebido. Como encontrar os valores de  $p(y)$ ? Ora, para o caso de recebimento de “0”, é só considerar os valores de  $p_x(0)$  ponderados pelas probabilidades  $p(x)$ :

$$p(y) = \sum_{x=1}^N p(x) p_x(y) . \quad (\text{eq. 12})$$

Em nosso exemplo, obtemos  $p(0) = \frac{3}{4} \cdot 0,9 + \frac{1}{4} \cdot 0,1 = 0,7$  e  $p(1) = \frac{3}{4} \cdot 0,1 + \frac{1}{4} \cdot 0,9 = 0,3$ . Podemos agora usar a eq.(11) para encontrar a entropia do receptor:  $H(y) = -0,7 \cdot \log_2(0,7) - 0,3 \cdot \log_2(0,3) \cong 0,88$ . Neste caso, a entropia do receptor (0,88) é maior do que a da fonte (0,81).

Para se estudar o efeito do ruído, é preciso que haja um observador que perceba, sem erro, cada signo emitido pela fonte, e que perceba também cada signo que chega no receptor. Com isso, ele pode computar as probabilidades condicionais  $p_x(y)$  e conhecer tudo o que se pode conhecer sobre as estatísticas do ruído. Uma maneira de fazer isso é anotar as *probabilidades conjuntas*  $p(x,y)$  de que  $x$  seja emitido e  $y$  recebido. A soma de todos os  $p(x,y)$ , para toda combinação de  $x$  e  $y$ , é igual a 1. A relação entre probabilidades conjunta e condicional é simples (ver eq. 12):

$$p(x,y) = p(x) \cdot p_x(y) . \quad (\text{eq. 13})$$

O observador que mencionamos acima pode muito bem resolver encarar o sistema composto por  $X$  e  $Y$  como a fonte de comunicação (Atlan faria isso, como veremos), e então se perguntar qual é a entropia (informação) desta fonte composta. A resposta será dada pela *entropia conjunta*:

$$H(x,y) = - \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M p(x,y) \log p(x,y) . \quad (\text{eq. 14})$$

A entropia conjunta  $H(x,y)$  mede a incerteza sobre as situações em que  $x$  é transmitido e  $y$  recebido.

Vamos agora definir uma grandeza, chamada *equivocação*:

$$H_x(y) = - \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M p(x)p_x(y) \log p_x(y) . \quad (\text{eq. 15})$$

A equivocação  $H_x(y)$  mede a incerteza de que  $x$  foi transmitido, dado que  $y$  foi recebido. Ou seja, ela é a incerteza média do receptor sobre qual mensagem foi de fato enviada. Vista desta maneira, é natural considerá-la uma medida da *informação perdida na transmissão*.

Trocando-se os índices  $x$  e  $y$ , obtém-se  $H_y(x)$ , que às vezes é chamada de *ambigüidade*. Para simplificar a linguagem matemática, não daremos muita atenção ela.

#### 4. Teorema Fundamental para Fontes sem Ruído

Se tomarmos  $H(x)$  e  $H_x(y)$  como entropias em bits por segundo, mostra-se que a taxa de transmissão de informação  $T$  através do canal é dada, em bits por segundo, por:

$$T = H(x) - H_x(y) = H(x) + H(y) - H(x,y) . \quad (\text{eq. 16})$$

Vemos que a taxa de transmissão  $T$  depende tanto da fonte da mensagem,  $H(x)$ , quanto do canal de transmissão,  $H_x(y)$ . A partir destas definições, Shannon pôde definir a *capacidade*  $C$  de um canal ruidoso como o valor máximo da taxa  $T$ . Seu teorema fundamental para uma fonte ruidosa diz que se  $H(x) < C$ , então há uma codificação tal que a mensagem possa ser enviada com um erro desprezível. Se, no entanto,  $H(x) > C$ , então não há como conseguir uma equivocação menor do que  $H(x) - C$ .

Voltemos ao exemplo simples introduzido nesta seção, em que há uma probabilidade de 1/10 de haver um erro de transmissão, devido ao ruído. A equivocação é calculada pela eq.(15), que em nosso exemplo envolve  $p(y=0) = 0,7$ ,  $p(y=1) = 0,3$ ,  $p_0(0) = p_1(1) = 0,9$ ,  $p_0(1) = p_1(0) = 0,1$ , fornecendo:  $H_x(y) = -0,7 \cdot 0,9 \cdot \log(0,9) - 0,7 \cdot 0,1 \cdot \log(0,1) - 0,3 \cdot 0,1 \cdot \log(0,1) - 0,3 \cdot 0,9 \cdot \log(0,9) \cong 0,47$ . A taxa de transmissão, então, seria  $T = H(x) - H_x(y) = 0,81 - 0,47 = 0,34$  bits por signo. Se cada signo é gerado em um segundo,  $T$  seria 0,34 bits por segundo.

A capacidade do canal é calculada de maneira semelhante, mas considerando o valor de  $H(x)$  que maximiza  $T$ . Nós sabemos que a entropia da fonte é máxima para probabilidades equiprováveis, que fornece  $H(x) = 1$  bit por segundo. A capacidade do canal, portanto, é  $C = 1 - 0,47 = 0,53$  bits por segundo. Ou seja, um erro de 1 em 10 reduz para praticamente a metade a capacidade do canal (que no caso sem ruído é 1 bit por signo). No nosso exemplo, em que  $H(x) = 0,81$ , fica claro que  $H(x) > C$ , e o erro por ruído é inevitável.

O que fazer? Como enviar uma mensagem em que o receptor entenda tudo que o emissor quis dizer? Uma solução simples é repetir cada mensagem três vezes. Isso introduz o que é chamado de “redundância”. Se repetirmos cada signo três vezes, a taxa de informação gerada se reduzirá 3 vezes, e será  $0,81 / 3 = 0,27$  bits por segundo. Agora  $H(x) < C$ , e poderemos enviar uma mensagem com um erro insignificante. Neste exemplo, se um “0” for codificado como 000 e enviado, e um dos signos (o segundo, por exemplo) sofrer uma alteração pelo ruído, o receptor observará a seqüência 010, e saberá que isso significa um “0”. O problema é que em 1 em cada 33 trincas (em média) acontecerão duas alterações por ruído, e o receptor se enganará quanto à mensagem enviada. Há porém códigos corretores de erros mais eficientes que o proposto aqui, e é sempre possível reduzir o erro para quanto se queira, usando codificações inteligentes envolvendo blocos grandes de signos. Esta é uma das conclusões surpreendentes do teorema de Shannon para canais ruidosos.

A redundância  $R$  é definida da seguinte maneira:

$$R = 1 - \frac{H(x)}{H_{\max}(x)} . \quad (\text{eq. 17})$$

$H_{\max}(x)$  é a entropia máxima da fonte, que no exemplo acima era 0,81 bits por signo. Na mensagem com repetição tripla dos signos, a entropia  $H(x)$  caiu para um terço do valor máximo, ou seja, 0,27 bits por signo. A redundância é pois  $R = 0,67$  (dois terços).

## 5. Transmissão de Informação e Informação Mútua

Notamos que estamos falando em *transmissão* de informação, que em termos físicos sempre envolve transporte de energia. Há uma relação de *causalidade* entre a fonte, cujo operador em princípio tem a liberdade de escolher ou “intervir” na mensagem sendo enviada, e o receptor, que lendo a mensagem é capaz de saber qual foi a escolha da fonte (sujeito às incertezas introduzidas pelo ruído). No exemplo da seção 14, a mensagem enviada por ÂNGELO, em Marte, para MARINA, na Terra, é carregada por um pulso de luz, cuja velocidade não pode exceder um certo limite  $c$  (a velocidade da luz no vácuo), segundo a Teoria da Relatividade Restrita de Einstein. Ou seja, não é possível transmitir informação a uma velocidade maior do que  $c$ , ou, o que é equivalente a isso (segundo a Teoria da Relatividade), não é possível transmitir informação de maneira instantânea.

Suponha, porém, que CONCEIÇÃO estivesse visitando o cinturão de asteróides, do lado oposto de Marte, e que ÂNGELO tivesse mandado, simultaneamente, a mesma mensagem para MARINA e CONCEIÇÃO. Suponha que elas estivessem à mesma distância de ÂNGELO, de forma que elas recebessem a mesma mensagem no mesmo instante. Neste caso, é seria possível comparar os signos recebidos por MARINA e por CONCEIÇÃO, e chamar o primeiro de fonte e o segundo de receptor. Todo o formalismo da Teoria da Comunicação poderia ser usado, mas neste caso, a rigor, não há transmissão de informação entre MARINA e CONCEIÇÃO. Com efeito, MARINA não tem escolha sobre qual a mensagem enviada (ela não pode “controlar” ou “intervir” na mensagem). Neste caso, a grandeza  $T$  da eq.(16) é chamada de *informação mútua* entre  $x$  e  $y$ . Na terminologia da Estatística, ela exprime a “correlação” entre dois eventos, e não necessariamente uma relação de causalidade. Se os signos que aparecem em  $x$  e  $y$  forem, na maioria dos casos, iguais, então a informação mútua é alta.

## Capítulo IV:

# A Cibernética

### 1. Homeostase e Retroação

Na seção 4 mencionamos a tradição mecanicista que imperou na Física do século XIX, e que influenciou alguns pesquisadores na Biologia. A seleção natural forneceu parte de uma explicação mecanicista para a origem das espécies, mas as questões sobre o que é a vida gerava debates agudos na passagem para o século XX. De um lado, um mecanicista como o fisiologista Jacques Loeb procurava descrever as ações intencionais (ou teleológicas) dos animais e dos humanos meramente como combinações complicadas de reações de tropismo (como aquelas que fazem uma planta se dirigir para a luz solar), influenciado pela descoberta das ações reflexas. Do outro lado, vitalistas como Hans Driesch sustentavam que os seres vivos distinguiam-se da matéria inanimada não pelo grau de complexidade de seus mecanismos internos, mas pela presença de um “élan vital”, algo semelhante a um espírito.

Um conceito importante desenvolvido pelo francês Claude Bernard (1813-78) e, após a 1ª Guerra Mundial, pelo norte-americano Walter Cannon (1871-1945), foi o de *homeostase*. O organismo dos seres vivos é capaz de manter variáveis fisiológicas dentro de certos limites, mesmo ante as mudanças do meio ambiente. A chave para tal estabilidade viria a ser descoberta na década de 1940, e são os processos chamados de *retroalimentação* ou *retroação* (*feedback* em inglês).<sup>15</sup>

Um dos primeiros exemplos de construção de um mecanismo retroação ou “servo-mecanismo” foi o regulador de bolas inventado por James Watt e Matthew Boulton (1788) para manter constante o fluxo de vapor em sua máquina à vapor. James Maxwell (1868) fez um estudo teórico deste mecanismo de regulação. O problema de Watt era manter o fluxo de vapor através de um tubo constante, mesmo com variações na pressão da caldeira de vapor. Como conseguir isso? Primeiro, desviava-se uma pequena parte do fluxo de vapor para um tubo secundário, no qual se localizava um dispositivo com duas bolas balanceadas que girava conforme o fluxo de vapor no tubo secundário. Se este fluxo aumentasse, as bolas se afastavam devido à força centrífuga; se o fluxo diminuísse, as bolas se aproximavam. Este movimento das bolas resultava na subida ou descida de um pequeno eixo, que estava acoplado a uma válvula no tubo principal de vapor. Assim, o aumento de fluxo resultava num fechamento da válvula, reestabelecendo o fluxo desejado; uma diminuição do fluxo levava a uma maior abertura da válvula. Este mecanismo de retroação garantia a estabilidade da máquina a vapor. Note que apenas uma pequena parcela de energia era retirada do fluxo principal, mas quando seu efeito era re-alimentado à tubulação principal, a consequência era uma alteração possivelmente grande no fluxo de energia.

Na década de 1910, surgiram os primeiros circuitos eletrônicos osciladores, que exploraram o princípio de retroação de diversas maneiras. Uma distinção que seria posteriormente feita seria entre *retroação negativa*, quando qualquer variação de fluxo levava a uma correção no sentido oposto, mantendo a estabilidade, e *retroação positiva*, que envolve um mecanismo que se auto-amplifica, levando a uma instabilidade.

---

<sup>15</sup> Uma boa introdução ao assunto é dada por EPSTEIN, I. (1986), *Cibernética*, Ática, São Paulo, pp. 34-46.

## 2. A Cibernética

O princípio de retroação negativa foi utilizado durante a 2ª Guerra Mundial, na tentativa de construir armas capazes de prever automaticamente qual seria a posição de um avião inimigo dentro de um certo intervalo de tempo (suficiente para um disparo atingi-lo), baseado nas posições anteriores do avião. Esta pesquisa era liderada pelo matemático norte-americano Norbert Wiener (1894-1964) e pelo engenheiro Julian Bigelow (1913-?), no MIT em Boston.<sup>16</sup> Em suas investigações, dois fatos chamaram-lhes atenção. Em primeiro lugar, as máquinas que estavam construindo comportavam-se de maneira aparentemente “inteligente”, pois usavam a experiência passada para fazer previsões sobre o futuro. Em segundo lugar, no entanto, elas apresentavam certas “doenças”: às vezes, quando tentava-se reduzir o atrito na máquina, o sistema passava a ter oscilações incontroláveis.

Impressionado com isso, Wiener contactou seu amigo, o neurofisiologista mexicano Arturo Rosenblueth (1900-70, da Harvard U.), que trabalhara com Cannon (que mencionamos acima), e que Wiener conhecia desde 1919, quando começou a trabalhar no MIT. Wiener perguntou se tal comportamento acontecia no ser humano, e Rosenblueth respondeu que sim: em certos ferimentos do cerebelo, o paciente não consegue levar um copo d’água à boca, pois seus movimentos são amplificados e a água cai ao chão. A partir disso, Wiener inferiu que para realizar uma ação com propósito (com um fim, com controle; o termo “intencional” se restringe aos propósitos conscientes de seres vivos), é necessário que haja circulação de informação em um circuito fechado, com retroação. Isso permitiria que o sistema avaliasse os efeitos de suas ações e fizesse alterações para ações futuras. Tal retroação acontece tanto nos sistemas de guiamento de armamentos antiaéreos quanto em nosso sistema nervoso, quando um comando de movimento é dado aos músculos e em seguida os efeitos do movimento são percebidos pelos sentidos e retroalimentados para o cérebro.

Rosenblueth formou um grupo de pesquisa multidisciplinar, cujo objetivo era estudar os organismos vivos do ponto de vista do engenheiro de servomecanismos e, de maneira inversa, estudar servomecanismos a partir da experiência de um fisiologista. Um primeiro encontro aconteceu no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, em 1942. Devido ao seu sucesso, uma série de encontros passou a ser organizado pela Fundação Josiah Macy, totalizando dez conferências entre 1946 e 1953, todas em Nova Iorque exceto a última, em Princeton. Estes encontros reuniam matemáticos, lógicos, engenheiros, fisiologistas, neurofisiologistas, psicólogos, antropólogos e economistas (ver seção 21).

O termo “cibernética” passou a designar os trabalhos do grupo. Ela foi cunhada por Wiener em 1948 a partir da palavra grega, *kubernetan*, que denota um piloto, ou leme. Platão usara o termo, ao se referir à arte de pilotar um navio e à arte de governar em geral, e, curiosamente, foi usada pelo físico André Ampère, em seu livro de filosofia da ciência escrito em 1843, para designar este segundo sentido platônico. De fato, “cibernética” e “governo” provêm da mesma raiz grega, e ambas designam arte de pilotar sistemas altamente complexos.

---

<sup>16</sup> Uma introdução sucinta à história da cibernética é dada por J. de Rosnay, na página “History of Cybernetica and Systems Science”, <http://pcp.vub.ac.be/CYBSHIST.html>. A referência mais completa a esta história é HEIMS, S.J. (1991), *The Cybernetics Group*, MIT Press, Boston, o qual não tive ainda acesso. Um livro interessante que trata desta história é DUPUY, J.-P. (1996), *Nas Origens das Ciências Cognitivas*, Trad. R.L. Ferreira, Editora UNESP, São Paulo (original em francês, *Aux Origines des Sciences Cognitives*, Éd. La Découverte, Paris, 1994). Dupuy, que já veio ao Brasil, foi fundador do Centre de Recherche Épistemologie et Autonomie (CRÉA), de Paris.

O artigo seminal de Rosenblueth, Wiener & Bigelow<sup>17</sup> foi publicado em 1943. Em 1948, Wiener<sup>18</sup> publicou seu livro *Cibernética*, que definiu como a disciplina que estuda a comunicação e o controle em seres vivos e em máquinas construídas pelo homem. Lembremos que este foi também o ano em que Shannon publicou sua teoria matemática da comunicação (seção 11).

### 3. Computação e Lógica

Além de Rosenblueth, o principal organizador das Conferências Macy foi o neurofisiologista Warren McCulloch (1899-1969), da Universidade de Illinois. No mesmo ano de 1943 em que Rosenblueth *et al.* publicaram seu artigo, em que salientaram que o mecanismo essencial do comportamento com propósito envolve o retorno de informação para fomar um circuito fechado de controle (retroação), McCulloch e seu colega matemático Walter Pitts (1923-?) publicaram um artigo igualmente importante em que descrevem a operação da mente a partir de operações lógicas envolvendo neurônios simplificados.<sup>19</sup>

O trabalho de McCulloch & Pitts veio na esteira de uma verdadeira revolução ocorrida na lógica matemática do início do século. Um ponto marcante desta revolução foram os trabalhos do boêmio-austríaco Kurt Gödel, que em 1931 provou seu teorema da incompleteza: dado um sistema lógico com o qual se poderia deduzir proposições da aritmética, prova-se que há certas proposições tais que nem uma delas nem sua negação são demonstráveis pelo sistema formal. Em 1936, Emil Post, nos Estados Unidos, e Alan Turing, na Inglaterra, desenvolveram uma teoria da computabilidade, mostrando entre outras coisas que há certos problemas computacionais os quais não se pode decidir se são solucionáveis ou não. Em sua demonstração, Turing definiu as regras de uma máquina abstrata, conhecida como “máquina de Turing”, que computa todas as funções “efetivamente” computáveis. Segundo uma tese (não provada) de Alonzo Church, toda função efetivamente computável é uma função dita “recursiva”, e mostra-se que as funções computáveis pela máquina de Turing são as recursivas. Apesar do pequeno impacto que esta teoria teve na construção de computadores reais, eles tiveram alguma influência sobre os ciberneticistas, e em especial sobre McCulloch & Pitts.

Já mencionamos o trabalho de mestrado de Shannon, que em 1938 mostrou como implementar portas lógicas por meio de circuitos elétricos. Por exemplo, uma porta “E” é tal que resulta numa voltagem positiva em *S* apenas quando as duas entradas *A* e *B* estão com voltagens positivas. No caso, as voltagens em *A* e *B* fecham interruptores que estão em série, levando a voltagem para *S* (se estivessem em paralelo, implementariam a porta “OU”).

<sup>17</sup> ROSENBLUETH, A.; WIENER, N. & BIGELOW, J. (1943), “Behavior, Purpose, and Teleology”, *Philosophy of Science* 10, 18-. Tradução para o português, “Comportamento, Propósito e Teleologia”, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 2, 1981, pp...

<sup>18</sup> WIENER, N. (1948), *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, MIT Press, Cambridge. Mais tarde ele publicou: WIENER, N. (19..), *Cybernetics and Society*,... Tradução para o português: *Cibernética e Sociedade*, Cultrix, São Paulo, 1968.

<sup>19</sup> MCCULLOCH, W.S. & PITTS, W.P. (1943), “A Logical Calculus of the Ideas immanent in Nervous Activity”, *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5, 115-33; reimpresso em MCCULLOCH, W.S. (1965), *Embodiments of Mind*, MIT Press, Cambridge, pp. 19-39. Este trabalho foi continuado em MCCULLOCH, W.S. & PITTS, W.P. (1947), “How we know Universals: The Perception of Auditory and Visual Forms”, *Bulletin of Mathematical Biophysics* 9, 127-47; reimpresso em MCCULLOCH (1965), *op. cit.*, pp. 46-66.

McCulloch & Pitts fizeram um estudo semelhante, mas consideraram portas lógicas implementadas por neurônios simplificados. As ligações entre neurônios eram de tipo excitatórios e inibitórios, como se sabia desde o início do século, e tinha sido comprovado por neurofisiologista David Lloyd entre 1939-41. Consideraram também conexões “circulares” (com retroação), que são essenciais para a formação da memória. Consideraram notável que em tais “redes neurais” o passado pode ser apagado (com os circuitos reentrantes), apesar de em seu modelo o futuro ser sempre previsível, pois seu funcionamento é determinista (trata-se de um sistema irreversível). Afirmaram que as relações fundamentais em nosso cérebro são descritíveis por uma lógica bivalente (booleana), com valores 0 ou 1. Concluíram que a classe de funções computáveis por um organismo está contido na classe de funções recursivas, ou seja, aquelas computáveis por uma máquina de Turing.

Em 1952, McCulloch e toda sua equipe se transferiram para o MIT, que se tornou o grande centro de pesquisas em cibernética e neurofisiologia.

Dois outros pesquisadores geniais, próximos das áreas de lógica e da computação, fizeram trabalho relevante neste período para a questão da auto-organização. John von Neumann (1903-57) era um importante matemático húngaro, que se destacou na Alemanha trabalhando nos fundamentos matemáticos da mecânica quântica, antes de imigrar para os Estados Unidos. Em 1944, publicou suas pesquisas (que haviam iniciado no final da década de 20) sobre a *teoria dos jogos*, juntamente com o economista austríaco Oskar Morgenstern, abrindo assim um novo campo da matemática aplicada. Passou então a trabalhar no projeto de computadores, tendo um papel central na elaboração da arquitetura geral dos computadores. Interagiu bastante com o grupo cibernético, tendo criticado a proposta de McCulloch & Pitts de fundar o funcionamento da cognição humana em uma lógica simples. No fim da vida inaugurou a pesquisa com “autômatos celulares” (que estudaremos mais adiante), publicadas postumamente.<sup>20</sup>

Fora do grupo cibernético norte-americano, Alan Turing (1912-54), que já mencionamos, também trabalhou na construção de um computador, na Inglaterra. Em 1948 publicou um dos primeiros trabalhos sobre o que hoje chamamos “redes neurais” (que examinaremos mais à frente). Em 1950, discutiu em que condições uma máquina poderia se considerada inteligente. E em 1952, propôs um modelo de sistema químico com difusão, no qual surgiriam padrões espaciais (voltaremos a este modelo bem mais à frente).<sup>21</sup>

#### 4. Década de 1950: Da Primeira à Segunda Cibernética

---

<sup>20</sup> VON NEUMANN, J. & MORGENSTERN, O. (1944), *Theory of Games and Economic Behavior*. VON NEUMANN, J. (1966), *Theory of Self-Reproducing Automata*, U. Illinois Press, Urbana. Tenho em mãos uma boa biografia de von Neumann e de Wiener: HEIMS, S. (1980), *John von Neumann and Norbert Wiener – From Mathematics to the Technologies of Life and Death*, MIT Press, Cambridge. No cap. 4, o autor descreve as idéias básicas da teoria dos jogos, contando que ela se iniciou com um artigo de Émile Borel (1921) e outro de von Neumann (1928).

<sup>21</sup> TURING, A.M. (1948), “Intelligent Machinery”, National Physical Laboratory Report; reproduzido em MELTZER, B. & MICHIE, D. (orgs.) (1969), *Machine Intelligence 5*, Edinburgh U. Press, pp. 3-23. TURING, A.M. (1950), “Computing Machinery and Intelligence”, *Mind* 59, 433-60; reproduzido em BODEN, M. (org.) (1990), *The Philosophy of Artificial Intelligence*, Oxford U. Press; tradução para o português: “Computadores e Inteligência”, in EPSTEIN, I. (org.) (1973), *Cibernética e Comunicação*, trad. M. Epstein, Cultrix, São Paulo, pp. 45-82. TURING, A.M. (1952), “The Chemical Basis of Morphogenesis”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, series B, 237, 37-72.

Mencionamos na seção 19 que entre 1946 e 1953 foram realizadas dez Conferências Macy, sendo que existem atas das cinco últimas. Duas outras conferências sobre a cibernética foram realizadas no período, com atas: “Teleological Mechanisms”, na Academia de Ciências de Nova Iorque em 1946, e o Simpósio Hixon, no California Institute of Technology, em 1948.<sup>22</sup> Além de Wiener, Rosenblueth, Bigelow, McCulloch, Pitts e von Neumann, vale a pena mencionar três outros membros regulares ou convidados do grupo cibernético, que contribuíram de alguma forma para a noção de “auto-organização”.

Gregory Bateson (1904-80) era um antropólogo inglês, radicado nos Estados Unidos. Envolveu-se com o grupo cibernético e passou a estudar problemas de comunicação e aprendizado em mamíferos aquáticos e em esquizofrênicos. Interessou-se pela aplicação da teoria dos jogos (ver seção 20) em antropologia. Uma coletânea bastante conhecida de seus trabalhos é *Steps to an Ecology of Mind* (1971), que se inicia com “metálogos”, ou seja, diálogos sobre o diálogo. Desenvolveu uma explicação para a esquizofrenia baseada na noção de *double bind* (ligação dupla), que pode ser considerada uma instância de auto-organização no nível da constituição da personalidade. Ele casou-se com a conhecida antropóloga Margaret Mead (1901-78), que também participou do grupo cibernético.

Heinz von Foerster (1911- ) era um físico austríaco que imigrou para os Estados Unidos em 1949, e que chamou a atenção de McCulloch por causa de uma descrição da memória humana em termos de física quântica. Em 1956, passou um ano trabalhando com McCulloch no MIT e com Rosenblueth no México, e retornou para a Universidade de Illinois para fundar o famoso Biological Computer Laboratory (BCL), que existiu até sua aposentadoria em 1975. Salientando o papel do observador na cibernética, von Foerster desenvolveu a distinção entre a “cibernética de primeira ordem”, que trata dos sistemas homeostáticos (“morfofostase”) fundados em mecanismos de controle baseados em retroação, e a *cibernética de segunda ordem*, ou *auto-organização* (“morfogênese”), que envolve mudança e evolução em sistemas, mudanças essas que não são impostas de por um agente organizador mas que ocorrem de maneira espontânea. O princípio da “ordem através do ruído” (que estudaremos na seção 25) é atribuído a von Foerster.

O britânico W. Ross Ashby (1903-72) é reconhecido como um dos mais importantes cibernéticos. Originalmente um psiquiatra, foi aparentemente o primeiro a usar o termo “auto-organização”, em 1947. Em seu livro *Design for a Brain* (1952), defendeu explicações mecânicas para atividades cerebrais, mostrando que sistemas mecânicos podem ser adaptativos. Nesta época construiu uma máquina de comportamento inteligente chamada “Homeostat”, que exibia o que chamava de “ultra-estabilidade”, ou seja, podem atuar em diferentes patamares de homeostase, conforme a ação do ambiente sobre ele. Escreveu também uma *Introdução à Cibernética* (1956), tendo ido trabalhar no Biological Computer Laboratory durante dez anos, a partir de 1960. Formulou a “lei da variedade requerida” para um sistema de controle (cujo propósito é manter-se num número pequeno de estados ou metas). Esta lei diz que a “variedade” de um sistema de controle, ou seja, o número de estados diferentes, tem que ser maior ou igual à variedade das alterações do ambiente.

Vemos assim que do tronco da cibernética, na década de 50, surgiu um ramo que se intitulou “cibernética de segunda ordem”, e que gerou três conferências no início da década de 60<sup>23</sup>. A palavra-chave destes encontros era *auto-organização*, que é de interesse especial em

<sup>22</sup> Ver detalhes em DUPUY (1996), *op. cit.* (nota 17), pp. 17-18, 83-98, para quem conseguir o livro, em HEIMS (1991). O professor não tem cópia de nenhuma dos anais mencionados, mas seria interessante tê-los.

<sup>23</sup> Os anais destas conferências existem na biblioteca do IPEN-SP, com cópia no CLE-Unicamp. O professor tem cópia de alguns artigos. As referências são: YOVITS, M.C. & CAMERON, S. (orgs.) (1960), *Self-Organizing Systems*, Pergamon, Oxford (conferência realizada em Chicago em maio de 1959); VON FOERSTER, H. & ZOPF,

nosso curso. Assim destacamos destas conferências dois artigos para leitura, um de von Foerster e outro de Ashby. Antes de adentrarmos no conteúdo desses artigos, destacaremos mais dois pesquisadores que participaram destas novas conferências e que são relevantes para a caracterização do conceito de “auto-organização”. Alguns outros participantes dos encontros serão enfocados em momentos apropriados.

Gordon Pask (1928-96) trabalhou na década de 50 na construção de uma máquina para corrigir erros de datilógrafas e outra para interagir com músicos através de cores. Seu trabalho mais importante foi na área de ensino, através de um algoritmo para propiciar o aprendizado construtivista de um certo conteúdo por meio de diálogos (“conversation theory”). Este trabalho foi um dos primeiros a ser enquadrado na segunda cibernética.

Stafford Beer (1926- ) ficou conhecido por aplicar as idéias da cibernética (de segunda ordem) para a organização de empresas, como no livro *Cybernetics and Management* (1959), resultando num modelo chamado “viable systems model”.

---

JR., G.W. (orgs.) (1962), *Principles of Self-Organization*, Pergamon, Oxford (conferência realizada na U. Illinois, Urbana, em junho de 1961); YOVITS, M.C.; JACOBI, G.T. & GOLDSTEIN, G.D. (orgs.) (1962), *Self-Organizing Systems 1962*, Spartan, Washington (conferência realizada em Chicago em maio de 1962).

## Capítulo V:

# Análise dos Conceitos de Ordem e Organização

### 1. Organização, Determinismo, Auto-Organização

A primeira ocorrência da palavra “auto-organização” no contexto da cibernética se deu em um artigo do inglês W. Ross Ashby, que em 1946, quando o artigo foi escrito, era ainda um psiquiatra<sup>24</sup>. Este artigo se inicia assim:

“Tem sido amplamente negado que uma máquina possa ser ‘auto-organizativa’, isto é, que ela possa ser determinada e mesmo assim sofrer mudanças espontâneas de organização interna. A questão de se isso pode ocorrer não é de interesse apenas filosófico, pois este é um problema fundamental na teoria do sistema nervoso. Há bastante evidência de que este sistema é (a) um sistema físico-químico estritamente determinado [ou seja, determinista], e (b) que ele passa por reorganizações internas ‘auto-induzidas’ que resultam em modificações de comportamento. Às vezes sustenta-se que estas duas exigências são mutuamente exclusivas.” (p. 125)

Ashby descreveu a evolução temporal das variáveis  $x_i$  que definem o estado do sistema através de um conjunto de equações diferenciais de 1ª ordem no tempo:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (\text{eq. 18})$$

onde o tempo não aparece no lado direito da equação. Este tipo de descrição foi herdada da “teoria geral dos sistemas” de Bertalanffy, que veremos numa seção próxima. Ashby (ver nota 31, p. 261) citaria também Poincaré (1890) e Lotka (1925) como tendo reconhecido o caráter “fundamental” deste tipo de representação.

Notem que a descrição fornecida por Ashby é de um sistema *determinista*. Num mundo determinista, a estipulação do estado completo do sistema (ou seja, das variáveis  $x_i$ ) em um instante  $t_0$  assegura que o estado em qualquer instante futuro  $t$  seja bem determinado, com valores unívocos para as variáveis  $x_i$ . “Determinismo” é um conceito que deve ser entendido “ontologicamente”, ou seja, ele se refere ao mundo, ao real, ao sistema sendo considerado, e não ao nosso conhecimento, à nossa capacidade de previsão. Um sistema determinista pode ser imprevisível, como veremos adiante com o chamado “caos determinista”.

A eq. (18) também supõe que o processo seja *não-markoviano*, ou seja, basta conhecer os estados  $x_i$  em um certo instante para poder calculá-lo no instante seguinte. Todo sistema determinista é não-markoviano. Este último conceito torna-se importante para distinguir entre diferentes processos estocásticos (aleatórios, probabilistas).

Por “organização”, Ashby entendia as funções  $f_i$ . Essas funções indicam como uma variável  $x_i$  é *restringida* pelas outras variáveis (em um instante anterior). A *organização* pode então ser definida como *o conjunto de restrições que governam as partes (elementos) de um sistema*. Notem a diferença entre o conceito de organização e o de ordem, que definimos na seção 2. No exemplo de Ashby, a *ordem* seria dada pelo conjunto dos *valores* das variáveis  $x_i$ ,

<sup>24</sup> ASBHY, W.R. (1947), “Principles of the Self-Organizing Dynamic System”, *Journal of General Psychology* 37, 125-8.

ao passo que a organização seria o conjunto de funções  $f_i$  que regem a mudança dos valores de  $x_i$ .

Voltemos à argumentação de Ashby. Como seria possível um sistema determinista mudar “espontaneamente” sua organização interna? Ora – argumentou Ashby – basta que algumas das variáveis que determinem o sistema, por exemplo  $x_n$ , não seja observável! Neste caso, o sistema *parecerá* se comportar de forma espontânea, quando na verdade ele não se comporta! Portanto, no caso do nosso sistema nervoso (ASHBY 1947, p. 128), atribuímos um comportamento auto-organizativo pelo simples fato de que não conhecemos todas as variáveis do sistema nervoso com precisão! Seríamos (podemos dizer), de fato, uma máquina determinista feita de células macias!

A segunda ocorrência da palavra “auto-organização”, na cibernética, se deu em um artigo de B.G. Farley & W.A. Clark, “Simulation of self-organizing systems by digital computer” (1954), que trata do que hoje se chama “redes neurais”. Estes e outros autores<sup>25</sup> mostraram que tais redes poderiam aprender a classificar (e portanto reconhecer) padrões, sendo que a única intervenção externa seria “informar” à rede se ela acertou ou não ao classificar um padrão. Já que o sistema fazia quase tudo sozinho, deu-se a este *aprendizado supervisionado* o nome de “auto-organização”, termo que seria abandonado após 1962.

## 2. Ordem enquanto Neguentropia

Antes de prosseguirmos com a 2ª cibernética, devemos amarrar um pouco melhor a relação que há entre desordem e entropia, ou, usando uma terminologia introduzida na década de 50, entre ordem e “neguentropia” (entropia negativa).

Vimos anteriormente que há duas definições diferentes de entropia. A definição termodinâmica de entropia (seção 8), que podemos chamar de “entropia-1”, é essencialmente macroscópica, e se maximiza quando a temperatura (ou outra variável) se distribui homoganeamente entre as partes de um corpo. Ora, na seção 2 definimos ordem como *regularidade* espacial, temporal ou como padrão de outro tipo. Chamemos esta definição de “ordem-1”. Esta ordem é mínima para um estado homogêneo, sem padrões, o que sugere que a entropia seja uma medida da desordem. Em outras palavras, a ordem de um sistema termodinâmico poderia ser medido por sua neguentropia. Podemos escrever:

$$\text{ordem-1} \longleftrightarrow \text{neguentropia-1}$$

Vimos porém (na seção 11) que há também uma definição probabilista da entropia, que Boltzmann e outros mostraram ser equivalente à definição termodinâmica. A entropia neste caso, que podemos chamar de “entropia-2”, também se aplica a um estado macroscópico, mas ela é calculada a partir de uma relação entre o nível macro e o micro, sendo proporcional ao logaritmo do número de estados microscópicos consistentes com um certo estado macroscópico (na linguagem da filosofia da mente, o estado macro é “superveniente” nos estados micros consistentes com ele). Para que esta definição forneça a mesma grandeza “entropia” que a primeira, é preciso fazer certas suposições, como a hipótese ergódica (ou, equivalentemente, a hipótese do caos molecular, que pode ser reduzida a flutuações térmicas ou ruído provenientes do ambiente). Na seção 11 demos um exemplo grosseiro para ilustrar

<sup>25</sup> Obtivemos esta referência de FARLEY, B.G. (1960), “Self-Organizing Models for Learned Perception”, in YOVITS & CAMERON (orgs.), *op. cit.* (nota 24), pp. 7-30.

que esta entropia-2 também mede heterogeneidade de maneira adequada (afinal, ela é equivalente à entropia-1, sob as hipóteses mencionadas), ou seja, também mede a ordem-1.

$$\text{ordem-1} \longleftrightarrow \text{neguentropia-2}$$

Quando Boltzmann concebeu a definição probabilista de entropia, surgiu uma nova maneira de caracterizá-la, a partir do grau de incerteza que o observador teria a respeito de qual seria o estado microscópico real (num dado instante) por trás do estado macroscópico observado. Esta caracterização pode ser tomada como uma terceira definição de entropia, que chamaremos *definição epistêmica de entropia* (“entropia-3”).

Esta definição epistêmica reapareceu de maneira mais clara ainda com a Teoria da Comunicação de Shannon. A entropia da fonte mediria a incerteza que o receptor tem (no caso sem ruído) com relação a qual mensagem seria enviada. O termo “epistêmico” se refere a conhecimento, e ele se contrapõe a “ontológico”, que se refere à coisa real, independente da presença de um observador. A entropia-1 é claramente objetiva (corresponde a uma definição de tipo ontológico), pois sua definição independe do observador. Já a entropia-3 é definida de maneira epistêmica. Se esta grandeza é objetiva ou “subjativa” (significando que o valor da grandeza dependeria do estado do observador) depende de se o conhecimento do receptor é obrigatoriamente máximo (como Shannon parece ter suposto) ou não.

Não parece muito relevante dar uma nova definição de ordem a partir da entropia-3. Esta é uma medida da incerteza do observador com relação a qual é a mensagem ou qual é o microestado. Por que eu chamaria uma situação em que só há uma mensagem de ordenada? Outro exemplo: tomemos um sólido amorfo, que todos considerariam desordenado, cujo microestado exato conhecêssemos em consequência de um estudo cristalográfico. Este conhecimento adquirido tornaria o sólido amorfo ordenado? Não, não parece ser pertinente uma definição epistêmica de desordem, baseada na nossa ignorância do estado microscópico exato do sistema. Isso não significa, porém, que não possamos utilizar a definição de entropia-3, em um sistema para o qual esta definição é equivalente à entropia-1, e então equacionar (sob as hipóteses usadas) desordem com ignorância.

Há porém uma definição de ordem que faz referência ao conhecimento do observador, podendo porisso ser chamada de definição “epistêmica” de ordem, mas num sentido diferente do “epistêmico” da entropia-3. Considere um gás, e suponha que conheçamos a posição exata de um pequeno número de moléculas. O que sabemos sobre o estado das outras moléculas (além do fato de estar contido dentro do recipiente)? Nada! Ignoramos! Isto então caracterizaria a desordem máxima. Por outro lado, considere um cristal perfeito, destes que existem na natureza ou que podem ser fabricados em laboratórios de alta precisão. Se conhecermos as posições dos átomos que formam uma célula básica do cristal, o que sabemos sobre as posições dos outros átomos? Tudo! Podemos determinar com exatidão essas posições, pois o cristal repete espacialmente sua célula básica de maneira periódica. Esta é uma ilustração corriqueira do que chamaremos *definição epistêmica de ordem* (“ordem-2”): o cristal é ordenado enquanto que o gás é desordenado.

$$\text{ordem-2} \equiv \text{conhecimento do todo a partir da parte}$$

Outra maneira de exprimir isto é dizendo que a ordem é a *correlação* entre os elementos do sistema<sup>26</sup>. Coincidentemente, já vimos uma medida de correlação, na seção 17,

<sup>26</sup> Na Física, esta definição, medida por “funções de correlação”, é comum. Ver por exemplo CARERI, G. (1984), *Order and Disorder in Matter*, Benjamin/Cummings, Menlo Park, p. 36.

dada pela informação mútua  $T$  entre dois sistemas. Vista por esta óptica, eu diria que a definição epistêmica de ordem pode ser expressa de maneira objetiva, ontológica, como o grau de correlação entre as partes do sistema.

### 3. Categorias de Medidas Sistêmicas

Uma *medida sistêmica* (seção 1), como “organização”, “ordem”, “complexidade”, pode ser classificada em uma de quatro categorias gerais, a saber<sup>2728</sup>:

I) Ela pode ser uma *propriedade instantânea do sistema*, possuindo um valor a cada instante, valor este que depende apenas do estado do sistema. Ou seja, a medida depende apenas dos estados dos elementos do sistema, e não de suas relações mútuas e nem do estado do ambiente.

II) Uma medida sistêmica pode ser uma *propriedade dinâmica do sistema*, ou seja, pode depender do conjunto de estados do sistema ao longo de um intervalo de tempo, ou pode ser função das relações definidas no sistema.

III) Ela pode ser uma *propriedade conjunta do sistema e do ambiente*, em oposição às duas categorias anteriores. Os exemplos que se enquadram aqui tendem a ser propriedades dinâmicas e não instantâneas.

IV) A medida pode ser uma *propriedade subjetiva*, ou seja, pode depender do estado do sujeito que observa o sistema. Neste caso supõe-se que o sujeito é um subsistema do universo que também se encontra sempre em um dentre vários estados possíveis, e que ele faz parte do ambiente externo ao sistema em questão.

### 4. Ordem a partir do Ruído

A primeira tentativa de relacionar o conceito de auto-organização às definições de “ordem” e “entropia” da Termodinâmica foi feita em uma palestra de 1959 de Heinz von Foerster<sup>29</sup>. O autor inicia este influente trabalho perguntando o que torna um sistema auto-organizativo. Responde então que não há tal coisa como um sistema auto-organizativo (no sentido preciso da palavra)! Por quê? Porque ele está pensando em sistemas isolados, e sabemos, pela 2ª lei da Termodinâmica, que em tais sistemas a entropia – e a desordem – aumenta até um valor máximo. Como ele está pensando no grau de “ordem” do sistema, podemos rephrasing sua tese simples dizendo que *não há sistemas isolados auto-ordenados*. Auto-organização só em sistemas abertos. Nesta altura, von Foerster cita a terminologia de Erwin Schrödinger, que em 1947 publicou um influente livro chamado *O Que é Vida? Sistemas abertos, como os seres vivos, se “alimentariam” de entropia negativa proveniente do*

---

<sup>27</sup> Uma primeira publicação do grupo foi o livro: DEBRUN, M.; GONZALES, M.E.Q. & PESSOA JR., O. (1996), *Auto-Organização – Estudos Interdisciplinares em Filosofia, Ciências Naturais e Humanas, e Artes* (Coleção CLE 18), CLE-Unicamp, Campinas. Neste livro encontra-se um artigo do professor: PESSOA JR., O., “Medidas Sistêmicas e Organização”, pp. 129-61.

<sup>28</sup> Esta distinção é feita num artigo escrito por mim, artigo este que eu *não* quero que vocês leiam, pois senão vocês saberão me “desconstruir”! :) Mas a coletânea vale a pena ser conhecida. Ver PESSOA (1996), *op. cit.* (nota 1), pp. 133-4.

<sup>29</sup> VON FOERSTER, H. (1960), “On Self-Organizing Systems and their Environments”, in YOVITS & CAMERON (orgs.), *op. cit.* (nota 24), pp. 31-50.

ambiente. Esta afirmação é interessante e parece fazer sentido, pois podemos imaginar que a entropia seja uma “coisa” que saia do sistema aberto para o ambiente (ou sejam que a ordem possa entrar no sistema, vindo de fora). Voltaremos a este ponto ao falarmos sobre os trabalhos sobre a Termodinâmica de Sistemas Abertos no início da década de 50.



Figura 5: Heinz von Foerster (1911- ).

Von Foerster, então, coloca uma segunda pergunta: “Quanta ordem um sistema pode assimilar de seu ambiente?”. Argumenta primeiramente que existe, na realidade, um ambiente e, em seguida, que este ambiente possui “estrutura”, ou seja, possui ordem, já que a entropia do Universo ainda não é máxima. A seguir, nota que a definição de “sistema” pode não ser muito clara, quando não houver uma membrana separando o sistema de seu ambiente. Ou seja, se quisermos justificar o uso do prefixo “auto”, às vezes pode ser difícil definir o que é “dentro” do sistema.

Von Foerster então faz sua grande contribuição para a discussão, propondo que uma medida adequada de ordem seja dada pela *redundância*, definida na Teoria da Comunicação de Shannon pela eq. (17), e que repetimos aqui com referência à entropia termodinâmica  $S$ :

$$R = 1 - \frac{S}{S_{\max}} . \quad (\text{eq. 19})$$

A diferença com a definição na Teoria da Comunicação é que aqui  $S$  é a entropia do sistema físico, e não de uma fonte de comunicação, e  $S_{\max}$  a entropia máxima que o sistema pode atingir (e não da fonte). Assim, um sistema totalmente desordenado, no qual  $S=S_{\max}$ , teria  $R=0$ ; já um perfeitamente ordenado, no qual o conhecimento de um elemento levasse ao conhecimento de todos (como em um cristal perfeito; von Foerster adota aqui a “entropia-3” da seção 23), teria  $S=0$ , ou seja,  $R=1$ .

Um sistema “auto-ordenativo” (usando nossa terminologia) teria que satisfazer a exigência de que  $\partial R/\partial t > 0$ , ou seja, o valor de  $R$  aumentaria com o tempo.

A princípio, parece que a definição de ordem de von Foerster apenas repete a definição usual de ordem como neguentropia (seção 23), distinguindo-se apenas por utilizar uma escala diferente ( $R$  está restrito entre 0 e 1,  $S$  não). No entanto, ela tem um traço adicional interessante, que é o de depender não só da entropia  $S$ , mas também da *entropia máxima*  $S_{\max}$ . Um exemplo simples disso é quando o número  $N$  de elementos de um sistema aumenta. Von Foerster não forneceu nenhum exemplo interessante, mas veremos mais adiante uma situação que lembra esta, quando consideramos a passagem do código genético com 4 bases nitrogenadas para o código protéico que envolve 20 amino ácidos.

Von Foerster então anuncia seu princípio de “ordem a partir do ruído”: um sistema aberto auto-organizativo (isto é, auto-ordenativo) não só se “alimentaria de ordem” proveniente do ambiente, como também se “alimentaria de ruído”! Por quê?

Ele forneceu um exemplo de cubos magnéticos dentro de uma caixa. Inicialmente os cubos estão largados no fundo da caixa desordenadamente. Alguém então chacoalha a caixa, e os cubos vão se grudando, formando uma estrutura rígida que chamaríamos de “ordenada”. Von Foerster calculou o valor de  $S$  (a entropia-2, ver seção 23) das duas situações e constatou que ela de fato diminuiu. Isso mostraria, segundo von Foerster, que o *ruído* (a agitação aleatória) pode desempenhar um papel essencial no aumento de ordem.

O exemplo dado pelo autor é análogo ao fenômeno da supersaturação, que ocorre por exemplo com nuvens, e no detector de partículas conhecido como “câmara de nuvem de Wilson”. Conforme a concentração de vapor d’água no ar, chega-se a um ponto (que depende da pressão) em que o vapor condensa, formando gotas líquidas. Se a transição for feita de maneira apropriada (no caso da câmara, ocorre uma expansão adiabática), é possível passar o ponto de saturação sem que o vapor de fato condense. Neste estado “metaestável”, “supersaturado”, qualquer flutuação maior (como a passagem de uma partícula carregada eletricamente) provoca a condensação de gotas. Um problema com a análise do von Foerster é que o estado inicial não é de equilíbrio termodinâmico, de forma que a definição “entropia-1” não se aplica. Além disso, ele conclui que a agitação seria a *causa* do ordenação, mas nos fenômenos supercríticos o que desempenha o papel causal essencial na ordenação do sistema é o processo que leva à saturação. No exemplo dado por ele, diríamos que ele esqueceu de considerar o papel ordenador desempenhado pela pessoa que colocou os cubos magnéticos dentro da caixa!

O exemplo de von Foerster talvez não seja muito bom, mas princípios semelhantes à sua “ordem pelo ruído” viriam a ser aceitos. Quando examinarmos o caos determinista, veremos que as flutuações de origem ambiental têm papel causal relevante na explicação de fenômenos (como o da bifurcação termodinâmica). Podemos pensar também na evolução biológica, e o papel essencial que as mutações e outros mecanismos probabilistas (deriva genética, colônias fundadoras, etc.) têm no aumento de complexidade e adaptabilidade dos seres vivos.

Ao formular, de maneira um tanto imprecisa, um princípio de “ordem a partir do ruído”, von Foerster veio a influenciar muitos pesquisadores (como Henri Atlan), sendo citado como o descobridor deste princípio aparentemente fundamental. No entanto, pelo menos no campo da cibernética, o primeiro a formular semelhante princípio parece ter sido o inglês D.M. Mackay<sup>30</sup>, em 1953.

## 5. Organização e Adaptação

Olhemos agora para um outro artigo de Ashby<sup>31</sup>, em que ele explora as definições de organização (que já vimos na seção 22) e de adaptação (que chama “boa organização”), critica novamente a noção de “auto-organização” e explicita a tese da relatividade da medida organização. Ele inicia perguntando o que é organização, e dá a mesma resposta que antes:

“O cerne do conceito é, na minha opinião, o de ‘condicionalidade’. Tão logo a relação entre duas entidades *A* e *B* torna-se condicionada pelo valor ou estado de *C*, então uma componente necessária de ‘organização’ está presente. Assim, a teoria da organização é parcialmente coextensiva à teoria das funções de mais de uma variável.

“Enfocamos um outro ângulo da questão nos perguntando ‘qual é o seu contrário?’. O contrário de ‘condicionado por’ é ‘não condicionado por’, portanto o contrário de ‘organização’ deve ser, como a teoria matemática mostra claramente, o conceito de ‘reduzibilidade’ (também chamado de ‘separabilidade’).” (p. 255-6).

Um sistema não organizado, ou com um grau mínimo de organização, seria aquele em que os elementos são independentes uns dos outros. Adotaremos o termo *separabilidade*

<sup>30</sup> MACKAY, D.M. (1953), “Generators of Information”, in JACKSON, W. (org.), *Communication Theory*, Academic, Nova Iorque, pp. 475-85.

<sup>31</sup> ASHBY, W.R. (1962), “Principles of the Self-Organizing System”, in VON FOERSTER & ZOPF (orgs.), *op. cit.* (nota 24), pp. 255-78.

como o contrário de organização, o que, por sua vez, sugere o nome “integração” como medida do grau de organização de um sistema. Mesmo que se possa definir uma medida numérica de integração, a “organização” de um sistema será mais do que isso, será o conjunto de todas as relações de condicionalidade ou restrição entre os elementos do sistema, ou seja, de todas as funções  $f_i$  da eq. (18).

Voltando ao texto de Ashby, ele nota que uma relação de condicionalidade (ou causação) é semelhante à de comunicação. Assim, um sistema em que as partes se comunicam e, com isso, se modificam, seria organizado. A seguir (p. 257), salienta novamente que a organização pode ser vista como o conjunto de restrições no espaço de todas as possibilidades. Isso desemboca na sua tese da relatividade da organização, que discutiremos na seção 27. Ashby retoma sua definição formal de máquina finita determinista, que examinamos na seção 22, apontando para definições equivalentes dadas na literatura de então (como os “autômatos finitos” de R.C. Jeffrey, que englobam as máquinas de Turing e outras máquinas lógicas).

O próximo ponto salientado pelo cibernético inglês é que sua definição de organização não implica que tal organização seja benéfica para o sistema, como ocorre por exemplo para organismos biológicos. Um subconjunto dos sistemas organizados seriam os sistemas “bem organizados”, que chamaremos de *adaptados*. A “boa organização”, para Ashby, é aquela que preserva a sobrevivência do organismo. Em termos mais gerais, uma organização “é considerada ‘boa’ se e somente se ela age de maneira a manter um conjunto específico de variáveis, as variáveis ‘essenciais’, dentro de determinados limites” (p. 263), o que remonta a diferentes definições de homeostase. O autor então salienta que uma organização só pode ser “boa” relativo a um ambiente (caso III da seção 24, em oposição à “organização”, que recairia no caso II, definida de maneira interna ao sistema), ou relativo a algum critério em relação ao qual julgamos uma organização boa ou não. Nesta última oração Ashby recai em sua tese da relatividade da organização (seção 27), ao contrário de sua proposta anterior de definir adaptação (“boa organização”) de maneira objetiva (capacidade de sobrevivência do sistema, caso III).

Ao examinar se haveria alguma propriedade de um sistema que pudesse ser “boa” de maneira absoluta (o que ele vai negar), Ashby considera a interessante questão de se a própria integração ou grau de conexão entre as partes (essencial na definição de organização) não seria boa num sentido absoluto. Sua resposta é “não, não *em geral*; só no caso em que o ambiente também é conectado de maneira rica. Quando as partes do ambiente *não* forem conectadas de maneira rica, a adaptação acontecerá mais rapidamente se o cérebro também for altamente redutível [separável], ou seja, se sua conectividade for baixa” (p. 265). Cita em apoio a esta tese seu livro *Design for a Brain* (1952). Esta tese interessante merece um estudo mais aprofundado. Ashby conclui este assunto citando uma formulação de G. Somerhoff (1950), que define a “boa organização” especificando um propósito e um conjunto de distúrbios que tendem a desviar o sistema deste propósito.

Com relação ao conceito de “auto-organização”, Ashby fornece duas definições gerais. (1) Ela estaria associada a sistemas que passam de baixa integração (partes separadas) para alta integração das partes, como exemplificado pelo sistema nervoso de um embrião. Um sinônimo disso, segundo o autor, seria “auto-conexão”. (2) Ela poderia ser também associada à passagem de baixa adaptação para alta adaptação (no sentido de “boa organização”). Em ambos os casos, porém, salienta (pp. 267-8) que nenhuma máquina pode ser, a rigor, auto-organizativa, pois isso implicaria em alterar as próprias funções  $f_i$  que definem a máquina (lembramos da seção 22). Apenas se houver uma outra máquina que implemente esta alteração nas  $f_i$  é que se poderia atribuir o conceito ao sistema original, mas aí o prefixo “auto” perde seu sentido exato. Notamos que esta conclusão de Ashby para sistemas artificiais

conflui com a de von Foerster, para quem só um sistema físico aberto poderia ser auto-organizado (seção 25).

Tomando assim a “auto-organização” num sentido menos rigoroso, Ashby defende que “todo sistema dinâmico determinista e isolado, seguindo leis que não mudam, irá desenvolver ‘organismos’ que estão adaptados aos seus ‘ambientes’” (p. 270-3), desde que seja suficientemente complexo. Neste sentido menos exato, então, (3) toda máquina complexa seria auto-organizativa. Só após estipularmos, arbitrariamente, quais seriam os organismos desta máquina complexa é que podemos determinar o que seria “bom” para estes organismos.

## 6. A Tese da Relatividade da Organização

Ashby defendeu em seu artigo de 1962 (nota 31) que a organização de um sistema não é algo real, objetivo, mas depende da maneira pela qual o sujeito observa o sistema (item IV da seção 24). Ele apresenta diferentes argumentos em favor desta tese.

Seu primeiro argumento é o seguinte (pp. 257-8). A organização de um sistema é dada pelas relações de causalidade ou de restrição entre os elementos. Ao estipular tais relações, imaginamos todos os estados possíveis das partes e determinamos qual é o efeito disso em um elemento em questão. Ora, na realidade, em um certo instante, o sistema está apenas em *um* desses estados, não todos. Assim, a realidade atual é diferente de uma lista de todas as possibilidades; a realidade é diferente da “organização”. Este argumento depende de uma escolha metafísica, a respeito da realidade ou não das causas. Ashby estaria adotando uma postura próxima à de Hume e Kant, segundo a qual a causa estaria em nossas mentes, não nas coisas em si.

Ele acopla este primeiro argumento a um segundo, que introduz o sujeito (p. 258). Se a organização envolve um conjunto de possibilidades, então ela exprimiria também as *incertezas* do observador com relação a qual é o estado atual do sistema. Se as probabilidades subjetivas do observador mudarem, afirma Ashby, mudaria também a organização do sistema. (Mesmo aceitando o primeiro argumento, não me parece que este segundo ponto siga do primeiro.)

Um terceiro argumento invoca a noção de “caixa preta”. Uma *caixa preta* é um sistema cujas partes (e seus estados) são desconhecidas. O observador tem acesso apenas aos estados do sistema como um todo. Naturalmente, é possível estudar uma caixa preta através de uma observação de seus estados e de como ele responde a estímulos experimentais (este é o método do behaviorismo, que dominava a psicologia experimental na década de 50). Ashby argumenta (p. 258) que dois observadores diferentes podem atribuir organizações diferentes a uma mesma caixa preta, o que provaria que a organização depende do estado do observador. Este argumento, porém, também envolve uma escolha metafísica, pois Ashby adota uma postura positivista ao supor que não faz sentido estipular qual é a realidade dentro da caixa, dado que ela é inacessível. Uma postura “realista” com relação à organização afirmaria que ela existe de uma forma definida, independente de se algum sujeito é capaz de observá-la ou não.

O quarto argumento de Ashby (p. 259) é mais interessante, e envolve a noção de “modos normais” em um sistema de osciladores. Considere um sistema consistindo de dois pêndulos que oscilam de maneira independente. Tomaríamos cada elemento do sistema como sendo um dos pêndulos, e eles não imporiam restrições mútuas, de forma que a organização entre eles é nula. Se agora introduzirmos uma mola entre os pêndulos, teremos uma relação de condicionamento mútuo (um acoplamento) entre os elementos, ou seja, uma organização. Ora, para sistemas regidos por forças lineares como pêndulos simples e molas (dentro de certas

aproximações), é possível encontrar movimentos que, uma vez iniciados, perdurariam para sempre se não fosse a dissipação de energia pelo atrito. No caso dos dois pêndulos acoplados simetricamente, um destes modos normais consiste dos dois pêndulos oscilando de forma idêntica, “em fase” (note que a mola entre eles nunca seria esticada, e não haveria força entre eles), ao passo que o outro modo normal consiste dos pêndulos oscilando “fora de fase”, sempre em sentidos opostos (neste caso a mola se estenderia e se contrairia de maneira periódica, mas os movimentos dos pêndulos individuais não se alteraria). Agora vem a parte importante: *qualquer* movimento do pêndulo acoplado pode ser descrito como uma soma linear, constante no tempo, dos dois modos normais. Como o peso relativo de cada modo normal não se altera com o passar do tempo, podemos dizer que não há uma restrição entre os modos normais, não há uma relação de condicionalidade. Ora, conclui Ashby, no caso em que os elementos são os pêndulos há restrição, no caso em os elementos são os modos normais não há; logo, *a organização depende de como o sujeito divide o sistema em partes*. Este é o enunciado mais interessante do princípio de relatividade da organização.

Por fim, Ashby retoma este argumento (p. 259-60), de que a própria definição das partes de um sistema está sujeito à arbitrariedade do observador, exemplificando com uma máquina abstrata finita discreta. Este ponto é importante, mas não adentraremos nele agora: em geral, a divisão do sistema em diferentes elementos é arbitrária.

Por outro lado, a conclusão de que a *descrição da organização* depende de como o sujeito reparte o sistema também é correta. Note, porém, que isso não implica, por si só, que a organização do sistema não possa ser definida de maneira unívoca, objetiva. Um objeto geométrico, por exemplo, pode ser definido objetivamente, apesar de a descrição de suas propriedades depender do sistema de coordenadas sendo escolhido pelo sujeito. O mesmo poderia estar acontecendo com a noção de “organização”.

## Capítulo VI:

# Sistemas e Emergência

### 1. Teoria Geral dos Sistemas

Nas seções anteriores, enfocamos o surgimento da cibernética e da teoria da informação, nas duas décadas após a 2ª Guerra Mundial. Paralelamente a isso, porém, uma tradição um pouco diferente dava ênfase na elaboração de uma *teoria geral de sistemas*, que se aplicaria a qualquer sistema no mundo real: físico, biológico, ecológico, social, econômico, administrativo, etc. Esta tradição assimilou todos os avanços da cibernética e da informática, mas se diferencia da cibernética por dar mais ênfase ao “todo” (como fazia Bertalanffy), indo contra o mecanicismo e o reducionismo (que muitos cibernéticos adotavam)<sup>32</sup>, destacando assim a noção de “emergência”. Essa distinção de postura filosófica, porém, não se aplica a todos os membros de ambos os grupos, de forma que podemos nos contentar com uma distinção mais de origem histórica. Talvez possamos dizer que a sistêmica é mais geral, incluindo a cibernética (vista como a engenharia de servomecanismos e de sistemas auto-organizativos) como caso particular.

A ênfase em *sistemas* vem desde a Antigüidade. Platão se referia ao “sistema de mundo” (epinomis), e Aristóteles desenvolveu o “sistema lógico” no *Analítico Posterior*. Bertalanffy cita o filósofo alemão medieval Nicolau de Cusa (1410-64) como um pensador que trabalhou a idéia de “sistema”, assim como o filósofo francês Condillac (1750). Na Biologia, o conceito de “organismo” sempre foi central (lembramos do título de uma obra de Lamarck, *Pesquisas sobre a organização dos corpos vivos*, 1802)<sup>33</sup>. No século XIX, podemos mencionar também o enfoque sistêmico dada pelo suíço Ferdinand de Saussure para a lingüística (c. 1890).

No século XX, um notável pioneiro da teoria de sistemas (e da cibernética) foi o russo Alexander Bogdanov (1873-1928)<sup>34</sup>, com sua “tectologia” (1912-17), derivado da palavra grega *tekton* (construtor), significando uma “ciência da organização”. Bogdanov era um filósofo, economista e médico, que morreu estudando as transfusões de sangue em seu próprio corpo. Era um bolshevik heterodoxo, sofrendo críticas arrasadoras de seu amigo Lenin à sua tendência idealista (sensorialista, machiana). Seu ponto de partida era de que há leis gerais de organização aplicáveis para quaisquer sistemas, vivos, inorgânicos ou abstratos. Definiu

<sup>32</sup> DUPUY (1996), *op. cit.* (nota 17), pp. 175-7, toca nesta distinção.

<sup>33</sup> SCHILLER, J. (1978), *La Notion d'Organization dans l'Histoire de la Biologie*, Meloine-Doine, Paris. No livro de divulgação de CAPRA, F. (1996), *A Teia da Vida*, Cultrix, São Paulo, pp. 37-40 (original em inglês, *The Web of Life*, 1996), uma pequena seção (pp. 37-40) é dedicada à biologia organísmica. A obra cobre bem as idéias sistêmicas na biologia moderna. A abordagem deste interessante livro é semelhante à nossa, mas ele é bem menos crítico do que tentamos ser. Ele menciona (p. 36) que Kant foi o primeiro a utilizar a expressão “auto-organizador”, em sua *Crítica do Juízo* (1790).

<sup>34</sup> BOGDANOV, A.A. (1912-17), *Vseobshchaya Organizatsionnaya Nauka (Tektologia)*, vols. I-III, Moscou. [Uma Ciência Organizacional Universal (Tektologia)]. Há uma tradução alemã (1928) e uma tradução parcial em inglês. Capra (*op.cit.*, nota anterior) cita o seguinte artigo de revisão: GORELIK, G. (1975), “Principal Ideas of Bogdanov’s ‘Tektology’: The Universal Science of Organization”, *General Systems* 20, 3-13. Baseio-me nos resumos de Capra (pp. 51-3) e do interessante livro: BLAUBERG, I.V.; SADOVSKY, V.N. & YUDIN, E.G. (1977), *Systems Theory – Philosophical and Methodological Problems*, Progress Publ., Moscou, pp. 26-7.

organização como “a totalidade de conexões entre elementos sistêmicos” e, nos sistemas que chamou de “complexos organizados”, defendeu que “o todo é maior do que a soma das partes”. Destacou dois mecanismos organizacionais: formação e regulação. Procurou descrever a dinâmica de formação por meio de detalhadas articulações, e descreveu a regulação interna de um sistema a partir de ciclos de realimentação, que chamou “bi-regulação” (antecipou assim a idéia da cibernética de que a homeostase se baseia em mecanismos de *feedback*). Aplicou o princípio de seleção natural para todos os tipos de sistemas, inclusive para processos mentais. Seu trabalho foi basicamente ignorado, tendo sido reavaliado somente a partir de 1967.

Quem divulgou de maneira mais efetiva a idéia de uma teoria geral dos sistemas foi o biólogo e filósofo austríaco Ludwig von Bertalanffy (1901-72). Estudando a questão do reducionismo e vitalismo em biologia, sob a orientação dos filósofos Robert Reininger e Moritz Schlick, desenvolveu uma abordagem intermediária que denominou “teoria do sistema orgânico” para entender a morfogênese (surgimento da forma). Passou a destacar o fato de que sistemas biológicos são necessariamente abertos, sendo descritos como “estados estacionários” e possuidores de “equifinalidade”. Em 1938, passando uma temporada no grupo do biofísico russo Nicolaus Rashevsky, em Chicago, fez sua primeira conferência sobre uma teoria geral dos sistemas. Após a Guerra, começou a publicar sobre o assunto, imigrando para o Canadá em 1949.

Um *sistema* é definido por Bertalanffy<sup>35</sup> como um conjunto de elementos que possuem interrelações. Distinguiu entre o seu caráter “somativo”, dado pelo número de elementos e suas espécies, e seu caráter “constitutivo”, dado pelas relações mútuas entre os elementos. O comportamento de um elemento é dado por suas relações, e isto pode ser representado matematicamente por um “princípio geral da cinemática”, que são as equações diferenciais de 1ª ordem que vimos na seção 22 (eq. 18). Bertalanffy passa então a analisar propriedades gerais destas equações, por exemplo a condição de equilíbrio (que ocorre quando todas as funções  $f_i$  se anulam, de forma que não há mudança nos estados dos elementos  $x_i$ ). Em torno do equilíbrio define soluções estáveis (periódicas ou convergentes) e instáveis. Examina o crescimento de uma variável  $x_i$ , que pode ser de maneira exponencial ou logística, e considera casos de competição, como os examinados por Lotka e Volterra. O “finalismo” pode ser concebido como a tendência do sistema em atingir um estado de equilíbrio.

Quando os elementos de um sistema são interdependentes, tem-se um holismo (“wholeness”), se forem independentes, fala-se em “soma”. A transição de uma situação holística para uma soma é chamada de processo de “mecanização”. Se o valor do estado de um elemento predomina sobre os outros, fala-se em “centralização”, com uma parte comandante. Bertalanffy menciona que o filósofo Nicolai Hartmann demanda a centralização de toda “estrutura dinâmica” (isto parece se opor à definição de “auto-organização”). O indivíduo se definiria a partir de uma progressiva centralização, oposto ao processo de mecanização. Por fim, é concebível que os elementos de um sistema também sejam, por seu turno, sistemas.



Figura 6: Ludwig von Bertalanffy (1901-72).

<sup>35</sup> BERTALANFFY, L. VON (1968), *General System Theory*, George Braziller, Nova Iorque, cap. 3. Este capítulo, que estamos resumindo, se baseia em artigos escritos entre 1945-50, em específico um publicado no *British Journal for the Philosophy of Science* 1 (1950) 139-64. CAPRA (1996), *op. cit.* (nota 32), faz um resumo de sua obra nas pp. 53-5, ao passo que a seguinte homepage apologética traz mais detalhes: BRAUCKMANN, S. (1999), “Ludwig von Bertalanffy (1901-1972)”, <http://www.iss.org/lumLVB.htm>.

Em 1954, Bertalanffy participou da criação da “Society for General Systems Research” (hoje “International Society for the Systems Sciences”), juntamente com o biólogo Ralph Gerard, o matemático Anatol Rapoport e o economista Kenneth Boulding. O periódico *General Systems Yearbook* passou a ser publicado anualmente, tendo um papel relevante na aplicação da cibernética para sistemas sociais e empresas. Os objetivos da Sociedade eram: “(1) investigar o isomorfismo entre conceitos, leis e modelos de vários campos, e prestar auxílio nas transferências frutíferas de um campo para outro; (2) encorajar o desenvolvimento de modelos teóricos adequados em campos que carecem deles; (3) minimizar a duplicação de esforço teórico em diferentes campos; (4) promover a unidade da ciência através do melhoramento da comunicação entre especialistas”<sup>36</sup>. Alguns filósofos da ciência, como C. Hempel (1951) e R. Buck (1956), criticaram a utilidade de se estabelecerem isomorfismos entre dois campos, o que estimulou Bertalanffy a elaborar uma resposta mais detalhada.

Na década de 50, diferentes abordagens para a teoria dos sistemas foram desenvolvidas mais ou menos independentemente por diferentes autores, como Ashby, Beer, Rapoport, Boulding, Gerard, M. Mesarović, R. Ackoff (um dos pioneiros da “pesquisa operacional”), L. Zadeh (que mais tarde descobriria a lógica fuzzy), o polonês O. Lange, J. Klir, entre outros. A década de 60 viu um fortalecimento da área. Em 1960, fundou-se no Case Institute of Technology, nos Estados Unidos, o Systems Research Center, liderado por Mesarović e Ackoff, entre outros, que organizou quatro conferências entre 1960 e 68, e passou a publicar o periódico *Mathematical Systems Theory* em 1967. A abordagem de Mesarović partia da teoria dos conjuntos para construir sistemas de múltiplos níveis e múltiplos propósitos. Em 1965, a associação de engenheiros norte-americanos (IEEE) fundou o Grupo de Ciência de Sistemas e Cibernética, publicando a *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. Na União Soviética, um grupo de pesquisa em Estudos Sistêmicos na Ciência foi fundado em 1967 na Academia de Ciências de Moscou (I. Blauberg, V. Sadovsky, E. Yudin, etc.), e outros foram estabelecidos em Odessa, Berlim Oriental e Sofia. Em 1972, em Laxenburg (perto de Viena), fundou-se o Instituto Internacional para a Análise de Sistemas Aplicados, com o periódico *International Journal of General Systems* (a partir de 1974).

Mencionaremos agora o trabalho de dois outros co-fundadores do Society for General Systems Research, Rapoport e Boulding. Anatol Rapoport (1911- ) nasceu na Rússia mas emigrou com a família para os Estados Unidos. Trabalhava com Rashevsky, na Universidade de Chicago, onde conheceu Bertalanffy. Rapoport trabalhava neste período com biofísica matemática, especificamente em problemas de conflito e cooperação (seu primeiro trabalho foi um modelo de parasitismo e simbiose). Após a fundação da Sociedade para Pesquisa em Sistema Gerais, foi para a U. de Michigan, onde se concentrou na teoria dos jogos. Mostrou sob que condições a cooperação entre indivíduos pode ser estável ou instável, e em que condições há a geração de “dividendos”. Estudou o jogo do “dilema do prisioneiro”, e elaborou uma famosa estratégia, chamada a “tit-for-tat”, que combina cooperação, retaliação e perdão entre os participantes. Em embates com outras estratégias, ela em geral sai perdendo, mas na interação com uma população de diferentes estratégias, é ela que se sai melhor, mostrando o valor que a cooperação tem na evolução das espécies biológicas.<sup>37</sup>

<sup>36</sup> BERTALANFFY (1968), *op. cit.* (nota 35), p. 13. Tirei a citação de BLAUBERG *et al.* (1977), *op. cit.* (nota 34), pp. 78-9. O relato do parágrafo seguinte é também retirado deste livro, pp. 69-83.

<sup>37</sup> A biografia de Rapoport foi obtida na internet: SCHWANINGER, M. (1998), “Anatol Rapoport (\*1911)”, <http://www.iss.org/lumrapo.htm> ; e a de Boulding também: DOPFER, K. (1994), “Kenneth Boulding: A Founder of the Systems Sciences and of Evolutionary Economics”, *Journal of Economic Issues* 28, 1201-4, reproduzido em <http://www.iss.org/lumbould.htm> .

Kenneth Boulding (1910-93) era um economista inglês que se radicou nos Estados Unidos. Discordando da abordagem em teoria econômica de encontrar situações de equilíbrio (que prometia unificar as teorias da micro e da macroeconomia), salientou que um sistema econômico é aberto, interagindo com um ambiente (como na ecologia) e desenvolvendo-se de maneira irreversível. Tal evolução da economia não se daria pessimisticamente em direção a uma “morte entrópica”, mas envolveria processos de aumento de complexidade e de morfogênese. Sua abordagem sistêmica recebeu o nome de Economia Evolutiva. Dentre os economistas que foram influenciados por ele está o sueco Gunnar Myrdal, que já tinha usado o conceito de retroação na análise econômica, por exemplo em seu estudo sociológico dos guetos (1944).

## 29. O Todo é Maior do que a Soma das Partes?

Uma das intuições fundamentais da teoria geral dos sistemas e de abordagens “holistas” (aquelas que priorizam o “todo”) é a frase “o todo é maior do que a soma das partes”. O que significa isso? Muitas vezes, esta frase vem acompanhada da afirmação de que a ciência tradicional, com seu método de isolar os elementos de um sistema (“análise”) – por exemplo, isolar e estudar as células de um organismo – para depois montá-los novamente, somando-os uns aos outros (“síntese”), cairia presa à ilusão de que somando-se as partes obter-se-ia o todo.

Seguindo as definições de Bertalanffy e Ashby, podemos identificar as “partes” como os elementos  $i$  do sistema, que podem se encontrar em diferentes estados, representados por diferentes valores  $x_i$  a cada instante. Lembremos da eq. 18:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) .$$

Ora, o que significaria a “soma das partes”? Se for meramente uma lista dos estados  $x_i$  em um certo instante, obviamente não seríamos capazes de derivar os estados para outros instantes futuros (essencial para obtermos o todo), pois faltariam as funções  $f_i$  que exprimem as relações de condicionalidade (restrição) do sistema (sua organização). Assim, dizer que “o todo é maior do que a soma das partes” é um truismo (uma obviedade). Nenhum cientista que analisa um sistema e o monta novamente poderia ignorar as restrições mútuas que as partes se impõem. E, de fato, a etapa mais difícil do método de análise e síntese seria descobrir quais são as relações de condicionalidade entre as partes (isso envolve também determinar precisamente quais são os estados possíveis de cada parte, qual é o efeito do ambiente sobre elas, etc., uma tarefa certamente hercúlea ou até impossível em sistemas complicados).

Uma nova questão que podemos colocar é estabelecer se “o todo é maior do que as partes e sua organização”, ou seja, se “o todo é maior do que as partes e suas relações de condicionalidade”. A situação em que o sistema é determinista é mais fácil de estudar. Supondo-se o determinismo, a eq. (18) parece inatacável pelos holistas. Ela é muito geral: o estado de um elemento  $x_i$  em um certo instante depende dos estados de *todos* os elementos no instante anterior, de uma maneira que não sofre restrição alguma.

Por outro lado, poderíamos supor que as restrições entre as partes do sistema fossem *lineares*. Neste caso, as funções  $f_i$  teriam uma forma mais específica:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n \quad . \quad (\text{eq. 20})$$

Esta expressão parece se aproximar mais da idéia de “soma das partes”, sendo na verdade uma soma “ponderada” das partes. Se este for o sentido da frase “soma das partes”, então podemos concluir, em acordo com os holistas, que, em geral, *o todo é mais do que a soma linear das partes*. Voltaremos a este ponto ao tratar do caos determinista, que só pode ocorrer para sistemas regidos por equações não-lineares.

### 30. A Noção de Emergência como Não Linearidade

Em meados do séc. XIX, o filósofo John Stuart Mill<sup>38</sup> (1806-73) investigava a noção de causalidade e se debateu com a seguinte questão, que rephrasearemos. Considere duas forças externas que atuam como causas para acelerar um corpo, uma delas direcionada para o leste, que representaremos pelo vetor  $ax$ , a outra para o norte, representado por  $by$ . Os símbolos em negrito representam vetores unitários, e os coeficientes em itálico são as intensidades da forças. A variação da velocidade  $dv/dt$  (que é a aceleração) é dada pela soma vetorial das duas forças:  $dv/dt = ax + by$ . Esta equação se encaixa no esquema de Bertalanffy (eq. 18), desde que suposermos que os elementos do sistema sejam identificados simplificadamente com  $x$ ,  $y$  (forças de valor unitário) e  $v$  (velocidade com valor variável). Interpretando assim o exemplo de Mill, vemos que o sistema é *linear*, pois satisfaz a eq.(20).

Mill então argumentou que neste caso há o que chamou de “composição das causas”: “o efeito conjunto de diversas causas é idêntico à soma de seus efeitos separados”. Ou seja, se considerarmos um sistema em que atua apenas a força para leste, teríamos:  $dv_L/dt = ax$ ; apenas a força para norte, teríamos:  $dv_N/dt = by$ . O que se chama de *linearidade* é a propriedade de que  $dv/dt = dv_L/dt + dv_N/dt$ , ou seja, o efeito de uma causa composta é a soma dos efeitos de cada causa elementar.

Logo a seguir, porém, Mill explica que este princípio “de maneira nenhuma prevalece em todas as partes do domínio da natureza”, pois “a combinação química de duas substâncias produz uma terceira substância, com propriedades diferentes, quer das duas substâncias separadas, ou de ambas tomadas conjuntamente”. Este tipo de lei foi chamada de “heteropática” por Mill, em oposição ao caso “homopático”. Se as grandezas químicas envolvidas puderem ser quantificadas, teríamos uma lei do tipo da eq.(18), que *não* satisfaz a linearidade. Nas palavras de George H. Lewes: “Quem poderia prever que o ouro se transformaria num cloreto se mergulhado numa mistura de dois líquidos (hidrocloro e ácido nítrico), dado que em cada um separadamente ele permanece inalterado?”<sup>39</sup>

O que temos aqui com estes dois filósofos ingleses é a noção que viria a ser chamado de “emergência” pelo biólogo inglês C. Lloyd Morgan (1923). Stephan caracteriza a noção de emergência em Mill e Lewes como sendo uma (i) “emergência como não-aditividade”, que em nossa terminologia significaria *emergência como não-linearidade*. Outras definições apresentadas pela resenha histórica de Stephan são (ii) “emergência como novidade”, o que ocorre tipicamente na evolução biológica, com o surgimento de novas espécies; (iii)

<sup>38</sup> MILL, J.S. (1843), *A System of Logic*. Trad. parcial para o português: “Sistema de Lógica Dedutiva e Indutiva”, in *Os Pensadores*, trad. J.M. Coelho, Abril Cultural, São Paulo, 1979. Ver Cap. VI.

<sup>39</sup> Lewes (1875), citado em STEPHAN, A. (1992), “Emergence – A Systematic View on its Historical Facets”, in BECKERMANN, A.; FLOHR, H. & KIM, J. (orgs.), *Emergence or Reduction?*, W. de Gruyter, Berlim, pp. 25-48. Este volume é um excelente apanhado sobre o conceito de emergência. Com relação ao exemplo de Lewes, trata-se da reação do ouro com a “água régia” (água com forte concentração de HCl e HNO<sub>3</sub>):  $Au + 3Cl \rightarrow AuCl_3$ , que ocorre quando o meio é extremamente ácido (muito H<sup>+</sup>).

“emergência como imprevisibilidade”, que pode ser exemplificado com o caos determinista; (iv) “emergência como não-dedutibilidade”, aplicáveis a leis de um nível macroscópico que não pudessem ser reduzidas às leis microscópicas; (v) “emergência como causalidade descendente”, segundo a qual uma propriedade macroscópica teria influência causal em partes microscópicas do sistema, sem que se pudesse atribuir uma equivalente influência causal a outras partes microscópicas temporalmente anteriores (Donald Campbell 1974, Roger Sperry 1976).

### 31. Emergência e Reduccionismo

O exemplo de Lewes sobre a emergência do cloreto de ouro não é muito sofisticado, mas ajuda a refletir. Se levarmos em consideração a teoria quântica, poderíamos explicar de uma forma bastante completa o surgimento desta propriedade emergente, reduzindo-na a propriedades microscópicas. Tal teoria, porém, envolve leis não-lineares.

Ao tratarmos do caos determinista e da noção de auto-organização nas chamadas “estruturas dissipativas”, veremos que a não-linearidade é essencial para o surgimento de propriedades emergentes. Neste contexto da Física, propriedades emergentes são associados a propriedades *coletivas* de um sistema contendo septilhões de elementos. Um exemplo seria a propriedade de ser molhado (uma molécula de água não é “molhada”), ou de um muro vibrar coletivamente com uma frequência baixa (ou de um laser funcionar). Este tema, tratado também pela tradição da “sinegética” (conforme veremos), não é inconsistente com uma atitude reducionista. Uma concepção plausível e bastante popular entre físicos é que “ontologicamente” uma propriedade macroscópica seja redutível a propriedades microscópicas, apesar de, na prática, “epistemologicamente”, ser impossível deduzir a propriedade macro a partir do micro, devido à complicação intratável dos cálculos matemáticos.<sup>40</sup>

Se nos colocarmos do lado dos biólogos e dos psicólogos, porém, o reduccionismo é visto com maus olhos. Como é possível considerar que um sapo seja redutível a meros mecanismos, e desprezar a presença de um código genético que incorpora milhões de anos de evolução biológica? Como é possível reduzir a mente ao cérebro físico, dado que nosso ponto de partida para conhecer o mundo físico é justamente a nossa mente? Nesses campos, um bom número de pesquisadores salienta que há uma diferença entre *fisicalismo* e *reduccionismo*. O fisicalismo aceita que a base dos fenômenos biológicos e mentais seja a física e a química, mas considera que não pode haver uma redução entre níveis devido a presença de conteúdos informacionais, significações, causalidade descendente, etc.

O estudo da auto-organização tende a nos comprometer com o fisicalismo (em oposição a um vitalismo ou espiritualismo), mas permanece em seu seio o debate entre reducionistas e não-reducionistas.

---

<sup>40</sup> ANDERSON, P.W. (1972), “More is Different”, *Science* 177 (4 de agosto), 393-6. SCHWEBER, S.S. (1993), “Physics, Community and the Crisis in Physical Theory”, *Physics Today* 46(11) (nov.), 34-40.

## Capítulo VII:

# Auto-Organização em Seres Vivos

### 1. A Questão da Auto-Organização na Embriologia

Examinamos, nas décadas de 50 e 60, o surgimento de uma das tradições de estudo da noção de “auto-organização”, associada à “2ª cibernética”. Nesta época, porém, havia uma outra tradição igualmente importante, que segundo Isabelle Stengers<sup>41</sup> iria influenciar bastante Prigogine. Trata-se da idéia de auto-organização na embriologia, idéia esta que recebeu diferentes nomes, como “autonomização”, “emancipação”, “morfogênese”, “segregação”.

No final do século XIX, experimentos foram realizados mostrando que após a primeira divisão do ovo, se uma das células fossem mortas, apenas metade do feto se desenvolveria. Isso parecia apoiar a teoria da “pré-formação”, segundo a qual as partes do organismo adulto já teria precursores no ovo. Hans Driesch, no início do séc. XX, mostrou, porém, que se as duas células fossem separadas, cada uma se desenvolveria em um feto normal. Isso o levou a propor que haveria uma “força vital” responsável pelo desenvolvimento do feto, mesmo quando apenas metade do ovo original (após a primeira divisão) estivesse presente.

O embriologista alemão Hans Spemann tirou uma conclusão diferente. Para ele, estes experimentos mostravam que as células de um embrião geravam um efeito causal nas células vizinhas. Além de levar adiante tais experimentos de separação, comprovou em 1921 que um grupo de células *induz* um efeito em outra. Por exemplo, a pupila do olho é gerada a partir das células cerebrais, e se junta à lente que é produzida a partir das células epiteliais próximas. Spemann fez com que a nascente pupila encostasse em células epiteliais distantes, e descobriu que o crescimento de uma lente era ali induzida. Sua conclusão foi que haveria *centros organizadores* nas células, não de natureza vitalista mas de natureza química, que seriam os hormônios. Em outro experimento, retirou um centro organizador de células nervosas de um sapo e o enxertou em um embrião de salamandra, conseguindo induzir células nervosas nesta. Conseguia induzir o surgimento de um intestino em uma área previamente destinada a um cérebro! Seu programa de pesquisa, então, era o de identificar os centros organizadores que surgiam no desenvolvimento do embrião.

Em torno de 1936, embriologistas como os ingleses Needham e Waddington e o belga Brachet começaram a criticar este programa de pesquisa. O problema era que não havia uma substância específica que gerava a indução: até o azul de metileno o fazia. Uma primeira conclusão então era de que o segredo da indução estaria na célula viva que reage ao estímulo externo. Esses cientistas propuseram que haveria “evocadores mascarados” dentro das células, que seriam liberados pelos agentes indutores externos.

Radicalizando esta proposta, alguns embriólogos como Paul Weiss (1898-?) e os belgas Dalcq & Pasteels passaram a considerar os tecidos “organizador” e o “organizado” como fazendo parte de um “campo morfogenético”. A aplicação da noção de “campo” fora da Física estava em voga na época, e podemos mencionar o trabalho de Paul Lewin na psicologia social (tanto Lewin quanto Weiss participaram de congressos cibernéticos). Tal paradigma

---

<sup>41</sup> STENGERS, I. (1985), “Les Généalogies de l’Auto-Organisation”, *Cahiers du CREA* 8, Centre de Recherche Epistemologie et Autonomie, École Polytechnique, Paris. Esta história da auto-organização analisa de maneira corriqueira a tradição cibernética, mas brilha ao considerar as origens das idéias de Prigogine e a influência da embriologia, nas pp. 59-78. Ela faz algumas citações de Waddington, Allen e Weiss, que incorporamos em nosso texto.

teve um papel explicativo benéfico para toda uma geração de embriologistas, mas não produziu descobertas novas sobre o problema da diferenciação.

O termo “auto-organização” parece ter surgido em artigos de Lehman (1942) e de Holtfreter & Hamburger (1955), mas foi Weiss o seu principal defensor, sob o termo “autonomização”. Reconhecia a ação da indução externa, mas salientava que uma auto-organização dentro da célula embrionária também desempenhava um papel importante. Além disso, salientava a ocorrência de uma espécie de auto-organização no nível do embrião como um todo, envolvendo uma “ecologia molecular”, conforme expresso em um trecho citado por Glansdorff & Prigogine<sup>42</sup>: “Considerando a célula como uma população de elementos de tamanhos diversos, a ordem reinante é objetivamente descrita pelo fato de que o comportamento resultante da população no seu conjunto é infinitamente menos variável de um instante para outro do que as atividades de seus elementos”.

## 2. Prigogine e as Estruturas Dissipativas

Ilya Prigogine (1917- ) nasceu em Moscou mas emigrou para a Bélgica ainda menino. Na Universidade de Bruxelas, estudou química e passou a trabalhar no grupo fundado por Théophile de Donder, onde vários físico-químicos estudavam a questão de como descrever teoricamente sistemas termodinâmicos fora-do-equilíbrio.



Figura 7: Ilya Prigogine (1917- ).

Vimos na seção 8 que a termodinâmica clássica se aplica para sistemas “em equilíbrio”, nos quais as variáveis macroscópicas não se modificam com o tempo, e nos quais não há fluxos de matéria, calor, etc. Sistemas para os quais as variáveis macroscópicas são constantes em cada ponto, mas nos quais há um fluxo, são chamados de *estacionários*. Um cano no qual a água flui com velocidade constante em cada ponto (escoamento laminar) está em um regime estacionário; se o escoamento se torna turbulento (a velocidade em cada ponto muda com o tempo), não é mais estacionário.

Na década de 1920, alguns cientistas passaram a se preocupar com a descrição termodinâmica de sistemas biológicos, e a constatação básica era de que tais sistemas são abertos, como salientou o belga R. Defay em sua *Introduction à la Thermodynamique des Systèmes Ouvertes* (1929), idéia esta que encontrou eco em Bertalanffy a partir de 1932. Sistemas vivos estão fora do equilíbrio, podendo, no máximo de simplificação, serem considerados estacionários.

Um resultado importante na termodinâmica de sistemas fora do equilíbrio foi obtido pelo norueguês Lars Onsager em 1931 (rendendo-lhe um Prêmio Nobel de Química em 1963). Para pequenos desvios do equilíbrio, em que se preserva a *linearidade* das equações de movimento, ele mostrou que valem certas “relações de reciprocidade”. Um exemplo é dado pelo fenômeno da termodifusão. Dois gases diferentes (um leve, como o hidrogênio, e um mais pesado, como o gas sulfídrico) estão misturados em duas câmaras interligadas. No

<sup>42</sup> GLANSDORFF, P. & PRIGOGINE, I. (1971), *Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations*, Wiley, Nova Iorque.

equilíbrio, a concentração de um dos gases é a mesma em cada câmara, naturalmente. No entanto, se uma das câmaras for aquecida, criando-se um fluxo de calor entre as câmaras, observa-se que a concentração relativa de moléculas pesadas fica maior na câmara fria, e menor na câmara quente (ou seja, o hidrogênio fica mais concentrado onde é mais quente). Se considerarmos o gradiente de temperatura como sendo uma “força termodinâmica”, o que temos é que esta força provoca um fluxo não só de calor mas também na concentração dos gases. (Estamos no regime linear, em que uma duplicação da força duplica os fluxos.) As relações de reciprocidade prevêm que uma força termodinâmica que mantém uma diferença de concentração irá, por sua vez, levar a um fluxo de calor e à existência de um gradiente térmico!<sup>43</sup>

Diversos físico-químicos trabalhavam na termodinâmica de estados estacionários irreversíveis, como se via nos livros de K. Denbigh (1949) e K. de Groot (1952), mas um resultado particularmente importante foi obtido por Prigogine, em 1947, válido claramente para sistemas perto do equilíbrio (regime linear) e às vezes para sistemas longe do equilíbrio (regime não-linear). Sua abordagem partiu da definição de “produção de entropia por unidade de tempo”  $dS/dt$ . Enfocando o diferencial  $dS$ , Prigogine considerou que a variação de entropia em sistemas abertos é devida a dois fatores. Há uma produção interna de entropia  $dS_i$  (ou seja, um aumento de entropia) devido a processos irreversíveis ocorrendo dentro do sistema, como a difusão, a condução térmica, reações químicas, etc. Haveria também um *fluxo de entropia*  $dS_e$  devido a trocas de energia e matéria com o ambiente. A variação total de entropia é a soma dos dois termos:

$$dS = dS_i + dS_e . \quad (\text{eq. 21})$$

Para um sistema isolado,  $dS_e = 0$ , de forma que vale a 2ª lei da termodinâmica:  $dS_i \geq 0$ . No estado de *equilíbrio*,  $dS_i = 0$ .

Para um sistema aberto no regime *estacionário*, não há variação de entropia,  $dS = 0$ . Ou seja, é possível contrabalançar o aumento interno de entropia de um sistema, mantendo-o em um estado ordenado, a partir de um fluxo suficientemente grande de “entropia negativa”  $dS_e \leq 0$ . Provou então seu *teorema de produção mínima de entropia*: para sistemas lineares (próximos do equilíbrio), no estado de não-equilíbrio estacionário, a produção de entropia se torna mínima, compatível com as restrições impostas no sistema. Este resultado foi muito útil, ao aproximar a termodinâmica de sistemas próximos-do-equilíbrio da teoria clássica, tanto assim que Prigogine acabou recebendo o Prêmio Nobel de Química em 1977.

Com relação às perturbações de origem externa (variações nas condições ambientais) e às flutuações internas (devidas a interações moleculares e movimento térmico aleatório das partículas), Prigogine salientou que no regime linear o sistema tem *estabilidade*, ou seja, as perturbações e flutuações regridem. Em um sistema longe do equilíbrio, porém, isto nem sempre é verdade. Em um sistema *instável*, uma perturbação pode ser amplificada e levar o sistema para um novo estado ordenado (como veremos para a célula de Bénard, na seção seguinte). Seria interessante estabelecer um critério universal para prever se um sistema é

<sup>43</sup> Este exemplo é apresentado por PRIGOGINE, I. & STENGERS, I. (1988), *Entre le Temps et l'Éternité*, Fayard, Paris, p. 50. Ele é reproduzido em COVENEY, P. & HIGHFIELD, R. (1993), *A Flecha do Tempo*, Siciliano, São Paulo, pp. 140-1 (original em inglês: *The Arrow of Time*, 1990). Um resumo é também apresentado em PRIGOGINE, I. & STENGERS, I. (1979), *La Nouvelle Alliance*, Gallimard, Paris, pp. 151-2 (trad. para o português: *A Nova Aliança*, Ed. UnB, Brasília, 1984). Se uma certa força  $X_k$  (gerado por um gradiente térmico  $k$ ) provoca um certo fluxo  $J_n$  (na concentração  $n$ ), então a imposição de uma força  $X_n$  (através de um gradiente de concentração) provoca necessariamente (de maneira recíproca) um fluxo  $J_k$  (da energia térmica). Onsager provou que, dada a relação linear  $J_n = \sum_k L_{nk} X_k$ , tem-se  $L_{nk} = L_{kn}$  para a relação recíproca.

estável ou instável. Foi isso que Glansdorff & Prigogine propuseram em 1971, com o que chamaram de *critério de evolução universal*. Sem entrar em detalhes sobre este resultado formal, vale mencionar que ele foi criticado por Keizer & Fox em 1974, que forneceram um contra-exemplo. Estes autores concluíram que o critério de Glansdorff & Prigogine só se aplica perto do equilíbrio. Segundo eles, a estabilidade em situações longe do equilíbrio requer também considerações cinéticas (além das termodinâmicas), envolvendo características microscópicas das partículas do sistema. Glansdorff & Prigogine inicialmente contestaram estas críticas, mas aparentemente terminaram por aceitá-las, pois Prigogine & Stengers (1979) declararam que “em contraste com situações próximas do equilíbrio, o comportamento de sistemas longe do equilíbrio torna-se altamente específico”<sup>44</sup>.

Apesar das dificuldades de se obter um tratamento matemático geral para sistemas fora-do-equilíbrio, Prigogine e colaboradores desenvolveram um arcabouço conceitual para lidar com estas situações. Mencionamos como o não-equilíbrio pode ser uma fonte de ordem, desde que o fluxo de “entropia negativa” compense a produção interna de entropia. Isso levou Nicolis & Prigogine<sup>45</sup> a falarem de um *princípio de ordenamento de não-equilíbrio*. A destruição da ordem prevaleceria perto do equilíbrio termodinâmico, mas, à medida que o sistema é afastado do equilíbrio, pode haver a “criação de ordem”, desde que o sistema obedeça a leis não-lineares. Falam então de um *surgimento espontâneo de ordem* ou, em outros trechos, de “auto-organização”, que caracterizariam o que Prigogine chamou de *estruturas dissipativas* (“dissipativas” porque a produção interna de entropia é sempre positiva).

Neste ponto, vale a pena relembrar a discussão de Stengers<sup>46</sup> sobre a origem do termo “auto-organização” em Prigogine, entre 1969 e 70. Por que “auto”-organização, e não simplesmente “organização espontânea”, “ordenamento espontâneo”? A resposta de Stengers é que Prigogine recebeu uma forte influência dos embriologistas belgas (A. Dalcq, J. Pasteels e J. Brachet), e de Paul Weiss, que utilizavam o termo “auto-organização”, conforme vimos na seção 31.

Podemos resumir algumas características apresentadas pelas estruturas dissipativas, ou seja, pelos sistemas auto-organizados segundo Prigogine<sup>47</sup>. 1) São sistemas termodinâmicos longe do equilíbrio. 2) Contêm um grande número de elementos interagindo diretamente ou através de uma restrição do meio-ambiente. 3) As interações entre os elementos são de natureza não-linear. 4) Para descrever corretamente o instante e o tipo de transição no sistema, é preciso considerar o comportamento de flutuações, como nas chamadas “transições induzidas por ruído”.

---

<sup>44</sup> A proposta original apareceu em GLANSDORFF & PRIGOGINE (1971), *op. cit.* (nota 42), cap. VI. O debate mencionado envolve os seguintes artigos: KEIZER, J. & FOX, R.R. (1974), “Qualms Regarding the Range of Validity of the Glansdorff-Prigogine Criterion for Stability of Non-Equilibrium States”, *Proceedings of the National Academy of Science USA* 71, 192-6; GLANSDORFF, P.; NICOLIS, G. & PRIGOGINE, I. (1974), “The Thermodynamic Stability of Non-Equilibrium States”, *idem*, 197-9. Um comentário sobre este debate e a citação de Prigogine & Stengers encontram-se na resenha escrita por: PAGELS, H.R. (1985), “Is the Irreversibility we see a Fundamental Property of Nature?”, *Physics Today* 38(1) (jan.), 97-9.

<sup>45</sup> NICOLIS, G. & PRIGOGINE, I. (1977), *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*, Wiley, Nova Iorque.

<sup>46</sup> STENGERS (1985), *op. cit.* (nota 41), pp. 59-67.

<sup>47</sup> Estes pontos aparecem sucintamente em PRIGOGINE, I. & ALLEN, P.M. (1982), in SCHIEVE, W.C. & ALLEN, P.M. (orgs.), *Self-Organization and Dissipative Structures*, University of Texas Press, Austin, pp. 3-39.

### 3. Células de Rayleigh-Bénard

Um dos melhores exemplos de estruturas dissipativas são as células convectivas de Rayleigh-Bénard (RB). O sistema é criado colocando-se um líquido entre duas placas (que sejam bons condutores de calor), separadas por uma distância  $d$ . A temperatura da placa superior é fixada num valor  $T_0$ , e a da inferior é mantida a uma temperatura maior,  $T_0 + \Delta T$ . O que ocorre, a partir de um certo valor de  $\Delta T$ , é que o líquido em contato com a placa inferior se dilata (devido ao aquecimento) e começa a subir, resultando no conhecido fenômeno da *convecção*. Esta ascensão do líquido quente desloca o líquido mais frio – que está encostado na placa de cima – para baixo. O que acaba acontecendo é que este movimento forma pequenas células de circulação do líquido, mostradas a Fig. 8 em corte transversal, cada uma ocupando um quadrado de lado  $d$ . Estas células podem ser consideradas uma manifestação de *ordem* (ver seção I.1), pois exibem uma regularidade espacial, que são as células, cuja orientação de circulação se alterna de célula para célula. Ou seja, se a circulação em uma célula se dá em sentido horário, a de seus dois vizinhos se dará no sentido anti-horário. Vistas de cima, as células também exibem padrões de ordem.

Em experimentos controlados, ajustando-se as condições de contorno laterais, obtêm-se rolos convectivos como os da Fig. 9. Se o experimento for feito entre placas circulares destampadas, o que se vê de cima é a formação de células que normalmente são hexagonais (Fig. 10). Na natureza, fenômenos como o secamento do leito de um lago (Fig. 11) também são explicados como sendo efeitos convectivos do tipo de Rayleigh-Bénard. Um dos comentários que é feito em livros-texto, ao exibir-se esta figura, é que a ordem que surge com as células convectivas é necessariamente compensada – por causa da 2ª lei da termodinâmica, que diz que a entropia do universo sempre aumenta – por um aumento de entropia (desordem) no ambiente.<sup>48</sup>

Um aspecto importante das células de RB é que existem duas maneiras diferentes e igualmente prováveis de surgir os rolos convectivos. Dado uma certa célula, ela pode ter uma convecção que gira em sentido horário ou em sentido anti-horário. A cada repetição do experimento, qualquer uma das duas possibilidades pode ocorrer. O que determina esta “escolha” por parte do sistema? Seriam flutuações tênues ocorrendo dentro do próprio sistema, e que poderiam ser também determinadas por flutuações provindas do ambiente externo ao sistema.

Os teóricos da termodinâmica gostam de exprimir este fato através de diagramas de *bifurcação*, como o da Fig. 12. A abcissa (o eixo horizontal) representa um *parâmetro de controle*, ou seja, um parâmetro que o experimentador pode controlar, como a diferença de temperatura  $\Delta T$ . A ordenada (o eixo vertical) representa um *parâmetro de ordem*, ou seja, uma grandeza mensurável que exprime o grau de ordenamento do sistema. No nosso exemplo, este pode ser a velocidade vertical  $v_z$  de um ponto do líquido.

Notem na Fig. 12 que para diferenças de temperatura  $\Delta T$  muito pequenas as partículas do líquido estão estáticas, ou seja, não ocorre convecção. O calor fornecido pela placa inferior

<sup>48</sup> O efeito que estamos examinando foi descrito de maneira científica pelo francês Bénard em 1900, sendo posteriormente explicado pelo inglês Lorde Rayleigh, em 1916. Bénard observou as células hexagonais que são vistas de cima quando a placa de cima está ausente. Estas células hexagonais surgem devido à dependência da tensão superficial com a temperatura, e são hoje chamadas de efeito Marangoni. Nossa descrição do efeito RB se baseia em BERGÉ, P.; POMEAU, Y. & VIDAL, C. (1984), *L'Ordre dans le Chaos*, Hermann, Paris; tradução para o inglês: *Order within Chaos*, Wiley, Nova Iorque, 1984. Ver pp. 83-9 da tradução. As Figs. 7, 8, 9 e 11 são retiradas deste livro. A Fig. 10 foi obtida de LUZZI, R. & VASCONCELLOS, A.R. (1999), *Algumas Considerações sobre Complexidade, Auto-Organização e Informação*, Notas de Física IFGW 18, Unicamp, Campinas, p. 25b.

é transmitido para a placa superior somente através da condução. A partir de um  $\Delta T$  crítico, ocorre uma bifurcação. O sistema pode rumar ou para o caminho de cima ( $v_z > 0$ ) ou para o de baixo ( $v_z < 0$ ). Além disso, existe um ramo instável, que pode perdurar um pouco acima do  $\Delta T$  crítico, desde que as flutuações sejam minimizadas. Este ramo “super-crítico” é análogo ao exemplo de von Foerster de ordenamento de cubos magnetizados (final da seção 25). O papel que von Foerster atribuiu ao “ruído” se aplica bem a esta situação: aqui também são flutuações aleatórias que determinam qual ramo será seguido pelo sistema.

Por que a célula de RB acima do  $\Delta T$  crítico seria mais ordenada do que a situação abaixo da bifurcação, quando ainda não há convecção? Intuitivamente, nós vemos um movimento circular com periodicidade espacial de  $2d$ , e este padrão é típico do que chamamos “ordenado”. Mas será que isto corresponde a uma situação de menor entropia, ou seja, será que podemos caracterizar esta situação como sendo a “ordem-1” da seção 23? Uma coisa é certa: tal sistema se enquadra na definição de “ordem-2”, que na seção 23 chamamos de “definição epistêmica de ordem”: pois o conhecimento do vetor velocidade de alguns poucos pontos do fluido permite que possamos prever a velocidade de qualquer ponto! Ora, mas se isto é verdade, isto significa que há menos estados microscópicos associados ao macroestado em questão, do que no estado (abaixo do  $\Delta T$  crítico) sem os rolos convectivos. De fato, os termodinamicistas nos dizem que a entropia calculada quando há circulação é menor do que quando não há, para um mesmo valor do parâmetro de ordem (ou seja, comparando o ramo estável com o instável). Na terminologia introduzida por Prigogine, a produção de entropia é compensada pela entrada de entropia negativa (neguentropia), que se dá a partir da manutenção das condições de contorno, ou seja, da diferença de temperatura  $\Delta T$ .

É apropriado chamar este sistema de “auto-organizado”, ou melhor, “auto-ordenado”? Em outros termos, o prefixo “auto” é justificado? Prigogine e físicos próximos a ele dizem que sim. O argumento<sup>49</sup> é que a imposição de condições de contorno rígidas, que “quebram a simetria inicial” do sistema, não é suficiente, por si só, para explicar a emergência da ordem. Para explicá-la, seria fundamental levar em conta as interações não-lineares entre os elementos do sistema (ou seja, o que chamamos de organização). Será que este argumento é bom? Há um problema: a imposição de condições de contorno rígidas é uma das causas necessárias para a emergência de estruturas dissipativas, e isto em geral é uma imposição feita de fora pelo cientista. No entanto, pode-se argumentar que tais condições de contorno ocorrem naturalmente, como nas células aproximadamente hexagonais que se formam na lama no fundo de um lago. Se o solo abaixo do lago for considerado parte do sistema, parece então justificado usar o prefixo “auto” no sentido de “ordenação por causas endógenas”; se não, teríamos que interpretar “auto-ordenação” como “ordenação natural” ou “espontânea”, sem fazer referência ao agente causador da ordenação.

#### 4. Estruturas Dissipativas se aplicam aos Seres Vivos?

Uma questão que acompanhou Prigogine em toda sua carreira foi a relevância de sua teoria físico-química de estruturas dissipativas para a organização biológica. Já mencionamos a influência que sofreu dos embriologistas. Pelo menos desde 1969, vem afirmando que “é muito tentador associar sistemas biológicos a instabilidades químicas que levam à ‘auto

<sup>49</sup> SERRA *et al.* (1986), *op. cit.* (nota 2), pp. 2-4.

organização espontânea' do sistema, tanto do ponto de vista de sua ordem espacial quanto de sua função"<sup>50</sup>.

Todos nós concordamos que a vida, especificamente a origem das espécies (filogênese), é um exemplo paradigmático de "auto-organização", tomada num sentido um tanto vago. A afirmação de Prigogine, porém, é bem mais forte, pois por auto-organização ele entende as estruturas dissipativas. Estas estruturas, conforme vimos na seção anterior, são em geral mantidas com condições de contorno rígidas. Anderson & Stein<sup>51</sup> argumentaram que tais condições não se aplicam a seres vivos: "estruturas dissipativas em um sistema real, físico e aberto, não restritas por condições de contorno arbitrárias, serão inevitavelmente caóticas e instáveis", ao passo que a vida é estável e permanente.

Outra crítica é oferecida por Blumenfeld: "O ordenamento macroscópico significativo da estrutura biológica não surge devido ao aumento de certos parâmetros de um sistema acima de seus valores críticos. Essas estruturas são construídas de acordo arquiteturas complicadas parecidas com programas [de computador], com a informação significativa tendo sido criada durante o uso de muitos bilhões de anos de evolução química e biológica." Pagels acrescenta que "a vida é consequência de organização microscópica, não macroscópica".<sup>52</sup>

## 5. A Origem da Vida

A questão da origem da vida é, sem dúvida, uma das questões centrais relacionadas a auto-organização e complexidade. Podemos ter dúvidas sobre se a ordem pode surgir da desordem, mas não há dúvida de que seres com um tipo de complexidade anteriormente inexistente emergiram ao longo das eras geológicas.

Não há um consenso sobre o mecanismo da origem da vida. Em 1648, o médico belga Jan van Helmont defendeu que toda vida tem origem química. No entanto, em 1806, o químico sueco Jöns Berzelius estabeleceu a distinção entre química inorgânica e química orgânica, sugerindo que o fenômeno da vida envolveria uma "energia vital" proveniente de uma base química específica. Esta distinção foi por terra quando o alemão Friedrich Wöhler sintetizou o composto orgânico uréia a partir de compostos inorgânicos. Mais tarde (1862), Louis Pasteur refutou definitivamente a hipótese da geração espontânea como fenômeno presente em nosso cotidiano, mas a questão da origem das formas de vida passou a se colocar dentro da perspectiva evolucionista que veio a dominar a biologia. Matthias Schleiden (1863) salientou que as condições na Terra, quando a vida teria se originado, deveriam ser outras em relação ao que conhecemos hoje. Ernst Haeckel (1866) lançou a idéia de uma "sopa pré-biótica", de onde teriam surgido microorganismos primitivos.

No século XX, Walther Loeb (1913) sintetizou a glicina, o aminoácido mais simples, a partir de uma mistura gasosa de gás carbônico, amônio e água. O bioquímico russo Alexander Oparin lançou em 1924 a primeira teoria sobre a origem da vida a partir de processos químicos. Destacou que, na sopa orgânica primordial, géis em forma esférica teriam formado

---

<sup>50</sup> Citado por STENGERS, *op. cit.* (nota 41), p. 60. A referência original de Prigogine é *Theoretical Physics and Biology*, North-Holland, 1969, p. 181.

<sup>51</sup> ANDERSON, P.W. & STEIN, D.L. (1984), "Broken Symmetry, Emergent Properties, Dissipative Structures, Life: Are they related?", in ANDERSON, P.W., *Basic Notions of Condensed Matter*, Benjamin/Cummings, Menlo Park, pp. 263-85. Ver pp. 265, 271.

<sup>52</sup> PAGELS (1985), *op. cit.* (nota 44), p. 98. A citação do biofísico L.A. Blumenfeld é feita por Pagels, e o original é: *Problems of Biological Physics*, Springer Verlag, 1981.

espontaneamente, sendo assim os precursores das células. Formas mais complexas de microorganismos evoluiriam por seleção natural. Em 1929, o bioquímico e geneticista escocês John B.S. Haldane lançou idéias parecidas, mas destacava o papel do núcleo celular, em oposição a Oparin. Haldane também via nos vírus uma forma intermediária entre a vida e a matéria inorgânica. Mais tarde, iria abandonar esta tese, sugerindo em 1954 que o RNA seria o precursor da vida.

J.D. Bernal (1949) introduziu a hipótese de que as formas primitivas de vida, necessitando de um ambiente com condições de contorno mais rígidas, teria se originado na argila. Em 1952, o químico norte-americano Harold Urey, trabalhando em Chicago, desenvolveu a teoria de que a atmosfera primordial da Terra consistiria basicamente de metano e amônio. Seu aluno Stanley Miller conseguiu, no ano seguinte, gerar quantidades significativas de vários aminoácidos a partir de uma mistura de metano, amônio, água e descargas elétricas.

A distinção entre as visões de Oparin e Haldane marcam uma discussão que existe até hoje sobre a origem da vida, entre aqueles que defendem um começo *metabólico*, os que defendem o começo *genético*, e os que defendem que houve uma co-evolução entre os dois. A noção de começo genético é defendido, por exemplo, por Eigen e Schuster, na teoria do “hiperciclo” desenvolvida na década de 70 e que é considerada próxima à abordagem de Prigogine. O início da vida teria surgido com macromoléculas replicantes, sem que houvesse necessidade de um metabolismo muito elaborado. A concepção de que teria havido um “mundo de RNA” antes do desenvolvimento das formas conhecidas de vida foi defendida por Crick (1968) e Gilbert (1986). Moléculas de RNA seriam ao mesmo tempo fenótipo e genótipo: seriam auto-replicantes e catalíticos. Esta idéia foi estimulada pela descoberta de que certas enzimas (nos organismos atuais) são feitas de RNA, e não de proteínas. Mais recentemente, descobriu-se que o DNA pode atuar como enzima, e que peptídeos podem se auto-replicar.

As concepções metabólicas baseam-se na noção do “genetic takeover”, ou seja, o RNA teria invadido e substituído um replicante mais rudimentar dentro de estruturas metabólicas previamente existentes. Cairns-Smith (1982) lançou esta idéia, sugerindo que tudo teria começado com minerais e sua cristalização, que teriam sido vítimas do “takeover”. De Duve (1991) defende um ponto parecido, descrevendo um “mundo de tioéster” em que haveria metabolismo antes de surgir a replicação. Wächtershäuser (1992) defende um início metabólico e autotrófico: o metabolismo teria surgido primeiro, em duas dimensões, com autocatálise e construção de membranas. Os moldes a partir dos quais outras membranas seriam copiadas surgiriam naturalmente. Baltscheffsky (1993) sugeriu um “mundo de pirofosfato inorgânico”, que forneceria uma conversão de energia pré-biótica que teria precedido o mundo de ATP (no qual vivemos). Stuart Kauffman (1995) também defende que o aparecimento da vida não depende de moldes (DNA, RNA ou polímeros semelhantes), mas encontra-se na própria catálise e na combinatória química. Formulou um modelo computacional de “autocatálise coletiva”, havendo uma complexidade mínima acima da qual a autocatálise ocorreria espontaneamente. Esta complexidade, segundo suas estimativas, envolveriam 600 polímeros protéicos e 1000 pequenas moléculas (sua visão é próxima à de Eigen e Schuster).

Por fim, a idéia de co-evolução foi proposta por Wang (1975) e Di Giulio (1997): o código genético teria evoluído junto com o aparelho de tradução (isto é, a síntese de aminoácidos).

## 6. Auto-Organização na Biologia: Henri Atlan

Dentre os autores que examinam a questão da auto-organização na Biologia, um dos mais conhecidos é o francês Henri Atlan, com seu livro *Entre o Cristal e a Fumaça*. Este título se refere à posição intermediária nos quais os sistemas complexos se situam, entre a ordem simétrica de um cristal e a desordem e imprevisibilidade da fumaça. Esta noção de ordem e desordem foi o que chamamos de “definição epistêmica de ordem” (ordem-2) na seção 23, ou seja, esta ordem seria medida pelo grau de conhecimento do todo que obtemos a partir do conhecimento de uma parte. Do lado da ordem do cristal, Atlan menciona a repetição, a regularidade e a redundância; do lado da desordem da fumaça, a variedade, a improbabilidade e a complexidade. Numa “organização dinâmica”, haveria uma coexistência destes ingredientes opostos.

Atlan foi um divulgador do “princípio de ordem a partir do ruído”, proposto por von Foerster (seção 25). Em sua leitura da 2ª cibernética, Atlan destaca a constatação de que as máquinas naturais (ou seja, os organismos vivos) são resistentes aos efeitos destruidores do ruído. Isso fascinou von Neumann, e levou Winograd & Cowan (1962) à pesquisa dos princípios de construção de autômatos *confiáveis*, mais confiáveis que suas partes. O estudo destes autores opôs elementos de “determinação” e de “indeterminação”: uma certa dose de indeterminação seria necessária (a partir de um certo grau de complexidade) para permitir que o sistema se adaptasse a um certo nível de ruído. Após examinar os trabalhos de von Foerster e Ashby, Atlan nos apresenta sua teoria da auto-organização.

A “organização” de um sistema seria definida pela dinâmica de variação da quantidade de informação no tempo. Três parâmetros definiriam o grau de organização: (i) a ordem repetitiva ou redundância; (ii) a ordem por improbabilidade ou variedade; (iii) o parâmetro de confiança (reliability), que exprimiria a inércia do sistema ante modificações

Um sistema auto-organizado surgiria a partir de uma evolução. Inicialmente, ele deve possuir uma redundância grande, ou seja, a informação nele contida deve ser repetida, e ao mesmo tempo o sistema deve ser bastante sensível às mudanças provocadas pelo ruído (confiabilidade baixa). À medida que o ruído atua no sistema, a redundância vai sendo destruída, de maneira aleatória, e vai aumentando a variedade (número de componentes diferentes). Ao mesmo tempo, a confiabilidade iria aumentando, mas Atlan não parece nos explicar como a confiabilidade pode aumentar, mas certamente isto poderia ocorrer por seleção natural.

O que aumenta o “grau de organização” do sistema seria o ruído. Desta forma, o prefixo “auto” teria justificativa na expressão “auto-organização”, já que as alterações não surgiriam de nenhum programa pré-estabelecido contido no ambiente e destinado a organizar o sistema, mas de um fenômeno aleatório.

Mas como o ruído poderia aumentar a organização de um sistema? Atlan vai acoplar esta pergunta a outra igualmente problemática: qual é a origem última da informação? A proposta de Atlan é simples. Imagine uma fonte de comunicação e um receptor, ambos dentro de uma célula (ou dentro de um organismo). Suponha que a informação transmitida esteja inicialmente sujeita a pouco ruído. Isto significa que o estado do receptor é muito parecido com o estado da fonte: há grande “informação mútua”  $T$ , há grande redundância (o estado do emissor se repete no receptor). Considere agora a presença de ruído neste canal. Isso degrada a quantidade de informação transmitida. Conseqüentemente, os estados do receptor e do emissor serão mais diferentes, haverá mais variedade na célula como um todo. Em outras palavras, se a célula *como um todo* (incluindo fonte e receptor) for tomado como fonte “global” de informação para um observador (receptor) externo, o ruído terá aumentado sua

informação  $H(x,y)$  (a entropia da fonte global é maior, há mais mensagens possíveis do que antes).

Atlan considera que este modelo encapsula um traço essencial da auto-organização. Não está muito claro, porém, que este modelo seja relevante. Ele faz um pouco mais de sentido ao considerarmos a definição que Atlan nos dá de “complexidade”. *Complexidade* exprimiria a informação que nos falta a respeito de um sistema. Ela deve ser distinguida de *complicação*, que mediria o número de etapas para descrever ou construir um sistema. Na verdade, como veremos adiante, as definições mais aceitas hoje em dia de “complexidade” se enquadram na definição de Atlan de complicação. Atlan explica sua intuição sobre o que seja complexidade de outras maneiras, também. Complexidade seria uma desordem aparente onde há razões para supor uma ordem escondida; seria uma ordem onde não se conhece o código.

Com esta definição de complexidade, como informação que nos falta a respeito de um sistema, fica mais fácil entender a importância que Atlan atribuiu ao seu modelo de aumento de variedade através do ruído. O ruído alteraria o sistema sem que soubéssemos como, e isto corresponderia a um aumento de complexidade, e, portanto, organização. Teríamos que fazer um exame mais cuidadoso das idéias de Atlan, mas a primeira impressão do professor é um tanto negativa. Utilizar a teoria da informação em contextos fora da teoria da comunicação é arriscado. Gostaríamos de medidas de organização que fossem “objetivas”, e não dependentes do conhecimento de um observador.