Auto-Organização, org. por M. Debrun, M.E.Q. Gonzales & O. Pessoa Jr., *Coleção CLE 18*, Campinas, 1996, pp. 129-161.

6

Medidas Sistêmicas e Organização

OSVALDO PESSOA JR.
Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, UNICAMP, C.P. 6133, Campinas, SP 13081-970
osvaldo@turing.unicamp.br

1. Introdução

O conceito de "auto-organização" tem sido muito usado em diversas áreas para descrever processos de aumento de organização em sistemas, sem que o princípio organizador seja um agente externo ao sistema ou um elemento privilegiado dentro dele. Esta definição, no entanto, traz pelo menos dois problemas: 1) Como definir a "organização" que aumenta no processo? 2) Como justificar o uso do prefixo "auto"?

Neste trabalho focalizaremos o primeiro problema. Após tecer considerações a respeito da definição de "sistema", examinamos várias "medidas sistêmicas" apresentadas na literatura. Argumentamos que para diferentes autores o que aumenta durante o processo de auto-organização são medidas sistêmicas diferentes. Implementamos em um computador um exemplo concreto de sistema, as "redes booleanas" exploradas pelo biofísico S.A. Kauffman como modelo para a ação regulatória dos genes. Definimos duas medidas numéricas para a organização em redes conexionistas, que chamamos "integração" e "pluralidade". Estudamos como que estas grandezas se relacionam com outras medidas sistêmicas, encontrando uma correlação entre a pluralidade e o número de ciclos atratores na rede. Como próximo passo, procuraremos implementar um ambiente em torno do sistema de forma a definir a adaptabilidade e procurar esclarecer o segundo problema mencionado acima.

2. Definição de Sistema

Sistema é usualmente definido como "um conjunto de elementos que mantêm relações entre si". Esta definição, no entanto, precisa ser elaborada em vários aspectos, alguns dos quais são mencionados a seguir.

a) O que são as *relações* entre elementos de um sistema? O que são *elementos*? Uma maneira conveniente de tratar estas questões é supor que um elemento é uma entidade primitiva que a cada instante está em um dentre vários estados possíveis ou, colocado de outra forma, possui um dentre vários atributos possíveis. Diferentes elementos possuem relações entre si quando o estado de um depende do estado de outro; quando o estado de um condiciona o do outro, em um mesmo instante ou em um instante posterior.

Por exemplo: no sistema solar os elementos (sol, planetas) se relacionam através de forças gravitacionais. O estado de cada elemento pode ser caracterizado por sua massa, sua posição e sua velocidade. A posição da terra em um certo instante será influenciada pela posição do sol, da lua e dos outros planetas no instante anterior. De fato, toda a evolução do sistema será regida pelas relações existentes entre os elementos. Nesse sentido, o conjunto de relações fornece a dinâmica do sistema.

b) No plano *teórico* ou abstrato, define-se um sistema especificando-se os elementos e seus estados possíveis, as relações entre os elementos, e o estado inicial do sistema. Neste plano a definição de sistema é precisa.

No entanto, no plano *prático*, material (em sistemas que encontramos no mundo material: seres vivos, suas células, máquinas, grupos sociais), tais relações e estados podem não ser muito bem definidos. As relações neste caso são inferidas a partir da observação ou de um conhecimento teórico a respeito do objeto.

Em um caso extremo, é possível que as partes de um objeto sejam indiscerníveis, assim como suas relações, mas devido à observação de diferentes estados do objeto como um todo, em função de sua resposta a estímulos externos, chama-se o objeto de "sistema". O uso deste termo para "caixas pretas" (sem elementos e relações internas discerníveis), dentro de uma corrente da Engenharia de Sistemas (PADULO & ARBIB, 1974), não satisfaz a definição de "sistema" dada acima (ver ASHBY, 1962, p. 258).

c) No plano material, os elementos de qualquer sistema também mantêm relações com o ambiente que cerca o sistema. Daí surge um problema com relação à definição do sistema. Definimos "sistema" como um conjunto de elementos que mantêm relações entre si, mas os elementos de um sistema *aberto* também mantêm relações com o ambiente externo. Como então distinguir um sistema aberto do seu ambiente? Na prática, observam-se contornos que separam o sistema do ambiente, ou então verifica-se que alterações ambientais não afetam muito o sistema. Pode-se então dizer que as relações entre os elementos de um sistema aberto são muito mais intensas ou restringentes do que as relações entre sistema e ambiente.

d) Em geral, na Teoria dos Sistemas, é o tipo de "estrutura" ou "organização" (conjunto de relações de condicionalidade) que caracteriza um sistema, e não a identidade de seus elementos. Além disso, é concebível que um sistema não tenha um número fixo de elementos, como é o caso típico de sistemas sociais, cujos elementos são pessoas.

e) Boa parte dos sistemas materiais se apresentam à nossa observação como objetos cujos elementos mantêm uma certa proximidade espacial. Esta manutenção de proximidade espacial pode fazer parte do conjunto de relações que definem o sistema. Temos assim que, para um "sistema espacial", a posição de um elemento define seu estado, e as correlações entre as posições dos elementos constituem o conjunto de relações do sistema.

f) É importante considerar também os *níveis* nos quais o sistema pode ser caracterizado. Para sistemas físicos, tais níveis podem ser definidos para diferentes dimensões espaciais (micro, meso e macroscópica) ou temporais (processos rápidos e lentos). Em Termodinâmica, o estado de um sistema é definido a nível macroscópico a partir de um conjunto de "variáveis macroscópicas" (ou propriedades observacionais). Uma tese reducionista simplificada afirma que em um dado instante o estado macroscópico do sistema é determinado pelos estados de cada um dos elementos atômicos (a nível microscópico).

g) No plano teórico, quando existe uma lei de evolução, expressa matematicamente por uma função de solução única, que fornece o estado de um sistema isolado em um certo instante a partir do estado em um instante anterior (as *condições iniciais*), dizemos que o sistema é *determinista*. Se isto não ocorrer, e a lei de evolução do sistema especificar apenas a *probabilidade* do sistema estar neste ou naquele estado, dadas condições iniciais precisas, então o sistema é dito indeterminista ou *estocástico*. Se o "universo" composto pelo sistema, pelo observador e pelo ambiente tiver uma evolução determinista, mas o sistema considerado como uma unidade pelo observador for indeterminista, então pode-se falar em uma evolução "cripto-determinista" (determinismo escondido).

3. Definição de Organização

As relações entre os elementos de um sistema expressam como os estados dos elementos influenciam ou condicionam uns aos outros ao longo do tempo. Ora, mas essa é justamente uma das principais definições dadas para a *organização* de um sistema. Nas palavras do cibernético W. Ross Ashby:

> 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.
> Conseguimos um outro ângulo à 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 "redutibilidade" (também chamado de "separabilidade") (ASHBY, 1962, pp. 255-6).

A organização de um sistema é assim o conjunto de relações de condicionalidade definidas no sistema. De acordo com as definições aqui expostas, não teria sentido falar em um "sistema sem nenhuma organização". Se um sistema fosse completamente "não-organizado", não haveria relações entre seus elementos (nem mesmo relações espaciais), e escapar-se-ia assim à própria definição de sistema.

Consideremos agora a demarcação entre sistema e ambiente partindo de um "universo" que engloba tanto o sistema quanto seu ambiente externo. Tal universo seria assim um sistema isolado, composto de elementos que se condicionam mutuamente. Se um grupo de elementos dentro deste universo deixar de ter seus estados influenciados pelos estados do restante dos elementos do universo, então teremos um (sub)sistema isolado que se formou no seio do universo.

Um sistema aberto não estaria completamente separado do ambiente, mas as relações de condicionalidade entre sistema e ambiente teriam "pouca" influência no estado dos elementos do sistema. É preciso, no entanto, explicitar melhor o que significa as relações terem "menos influência" ou serem "mais fracas" do que outras. Faremos isso para um caso específico mais adiante.

4. Categorias de Medidas Sistêmicas

A definição de organização dada por Ashby é um exemplo do que chamamos de "medida sistêmica", ou seja, uma propriedade ("*figure of merit*") de um sistema, figura esta que pode ser quantificada ou não, e que usualmente é expressa por termos como "organização", "ordem", "complexidade", "funcionalidade", "inteligência" etc. Na seção seguinte examinaremos diferentes medidas sistêmicas apresentadas na literatura, mas antes vale a pena sublinhar quatro categorias gerais, nas quais cada uma das medidas sistêmicas pode ser enquadrada.

I) Uma medida sistêmica 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) Uma medida sistêmica 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) Uma medida sistêmica 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.

A tese de que a organização de um sistema é uma propriedade subjetiva foi defendida por Pask (1961, pp. 47-8) e por Ashby (1962, pp. 258-60), e a chamaremos de "tese da relatividade da organização". Tal tese nos é paradoxal. O projeto do presente trabalho é definir as medidas sistêmicas que caracterizam aqueles seres vivos que são objetivamente melhor adaptados do que outros, aquelas máquinas que são objetivamente mais eficientes do que outras, etc. Tais características de adaptabilidade e eficiência ~~podem~~ dependem do ambiente, mas em geral não dependem do sujeito que observa os sistemas e nem da representação teórica que é feita deles. Aceitamos que certas acepções do termo "organização" ou "ordem" possam depender do estado do sujeito, mas não que *qualquer* definição de organização dependa do observador. Iremos procurar uma definição "objetiva" de organização que dependa apenas do estado dos elementos do sistema e do ambiente, e das relações entre eles. Deixaremos a crítica mais aprofundada ao argumento de Ashby para outra oportunidade.

5. Um Exame das Medidas Sistêmicas

Como caracterizar de forma precisa a intuição que temos de um sistema organizado, ordenado ou complexo? Arrolamos abaixo quinze definições dadas na literatura para tais medidas sistêmicas. O leitor que quiser apenas ler os nomes dessas medidas e passar adiante não perderá o fio da meada. Por vezes, medidas bastante próximas são colocadas em ítens diferentes (a,b; f,g), enquanto que outros ítens individuais agrupam várias medidas próximas mas diferentes (m).

a) *ORGANIZAÇÃO enquanto CONDICIONALIDADE*: A organização é definida por ASHBY (1962, pp. 255-7) a partir das relações de condicionalidade entre os elementos (o estado do elemento A no tempo t depende do estado de B no instante t-1) (categoria II). A condicionalidade seria uma função das relações entre os elementos, e o oposto a essa integração entre as partes seria uma "separabilidade". A condicionalidade pode ser expressa de maneira simples através de "conexões" entre elementos, como veremos na seção 6. A organização enquanto condicionalidade engloba tanto a "organização estrutural" (dada pelas conexões) quanto a "organização funcional" (dada pela função que define um autômato finito), definidas por ATLAN ([1979] 1992, pp. 39-40). O termo *estrutura* talvez fosse mais adequado aqui, já que esta organização enquanto condicionalidade não faz referência à "finalidade" do sistema. Na presente acepção, um sistema "complicado", integrado, mas pouco eficiente poderia ser considerado altamente organizado (comparar com o item c).

b) *ORGANIZAÇÃO enquanto RESTRIÇÃO*: Ashby também caracteriza a organização pela *correlação* existente entre os estados dos diferentes elementos do sistema (o estado de A em t depende do estado de B em t, e vice-versa), o que equivale a uma *restrição* no espaço de estados possíveis do sistema. Para os autômatos finitos deterministas considerados por Ashby, esta definição equivale à condicionalidade (item a), mas é possível definir sistemas indeterministas sem conexões causais que satisfaçam certas restrições no espaço de estados.

c) *ORGANIZAÇÃO enquanto ADAPTABILIDADE*: Um sistema pode ter uma elaborada rede de condicionalidade mas não se adaptar ao seu ambiente, não ser eficiente. O que ASHBY (1962, pp. 262-6) chamou de "boa organização" é assim mais do que alta organização (enquanto condicionalidade), é também eficiência no cumprimento de metas (por exemplo, de uma organização empresarial), é boa adaptação ao ambiente (por exemplo, um ser vivo em um ambiente ecológico), é conservação ou otimização das "variáveis essenciais" que garantem a sobrevivência do sistema enquanto tal (categoria III). Esta é uma característica marcante de seres vivos, e o termo "comportamento complexo" pode ser associado a esta adaptabilidade. Em Administração e em Sociologia, o termo "organização" é sempre definido levando-se em conta uma *finalidade* para o sistema (ver EMERY, 1969, parte 4; BRESCIANI, 1996).

d) *ORDEM enquanto REGULARIDADE*: Em geral, os físicos definem a "ordem" como a existência de *regularidades* no espaço (categoria I) ou no tempo (categoria II), ou de *padrões* que permitam a descrição de um sistema complicado em termos de poucas variáveis (ARECCHI, 1986, p. xi; WEISBUCH, 1983, p. 66). Um sistema caracterizado por tal ordem se opõe a um sistema em estado homogêneo, sem diferenciação, e também se opõe a um estado com heterogeneidades espalhadas de maneira não regular (ver item k). Uma dificuldade com esta caracterização de ordem é que a definição de regularidade parece depender da maneira em que são definidas as variáveis do sistema.

e) *ORDEM enquanto SIMETRIA*: Uma abordagem próxima à anterior é associar a ordem à simetria do sistema (LUZZI & VASCONCELLOS, 1996, p. 205). A Teoria dos Grupos, que descreve as simetrias em Matemática, forneceria uma definição rigorosa desta medida sistêmica de ordem. O surgimento de ordem em uma célula de Rayleigh-Bénard (ver BERGÉ *et al.*, 1984) estaria associado a uma quebra de simetria. Por outro lado, nossa intuição estética parece considerar que quanto mais lados tiver um polígono regular, ou seja, quanto maior for sua simetria (pois o grupo de simetria de um quadrado é um subgrupo do grupo de simetria do octágono, por exemplo), mais ordenado ele é. Qual seria então a relação entre ordem e simetria?

f) *ORDEM enquanto NEGUENTROPIA*: Em Física, costuma-se associar a desordem térmica às funções termodinâmicas entropia e energia livre. A ordem seria assim medida pela "neguentropia", ou entropia S com sinal negativo (categoria I). Nessa linha, VON FOERSTER (1960, pp. 37-40) definiu a ordem como a "redundância" $R = 1 - S/S_{max}$, onde S_{max} é a entropia máxima atingível pelo sistema. Apesar desta associação entre ordem e entropia ser usual na literatura, vários autores argumentam que ela nem é sempre correta (ver DANCHIN, 1978; TONNELAT, 1979).

g) *ORDEM enquanto IMPROBABILIDADE*: Já no século XIX a mecânica estatística mostrou que a função termodinâmica entropia podia ser expressa a partir da probabilidade de ocorrência de diferentes estados macroscópicos, através da equação $S = \log W_e$, onde W_e é o número estados microscópicos diferentes que a nível macroscópico resultam no estado e. Combinando esta interpretação probabilista da entropia com a medida sistêmica de ordem como neguentropia (item f), obtém-se a noção de que quanto menos provável é a ocorrência de um estado de um sistema, mais ordenado ele é (categoria I).

h) *ORDEM enquanto CONFIABILIDADE ("reliability")*: Um sistema que permanece ou retorna a um mesmo estado macroscópico após alterações aleatórias em seus elementos possui alta confiabilidade, resistência a erros, inércia ante modificações (ATLAN, 1992, pp. 47, 61-2; MCCULLOCH, 1960; COWAN, 1962). A noção de auto-organização na Termodinâmica enfatiza esta resistência do estado do sistema a alterações ambientais. KAUFFMAN (1969) identifica a ordem ao tamanho médio das bacias de atração de um sistema no espaço de estados (ver seção 7). Comparar com a adaptabilidade (item c).

i) *ORGANIZAÇÃO enquanto AGRUPAMENTO*: Uma medida sistêmica associada à organização considera a maneira na qual os elementos de um conjunto se agrupam em subconjuntos (categoria I). Um sistema pode se estratificar em uma "hierarquia" de diferentes níveis de subconjuntos imersos dentro de outros subconjuntos. Se, para todos os níveis, as relações entre elementos dos subconjuntos for mais intensa que as relações entre subconjuntos, o sistema é dito "quase-decomponível" (SIMON, [1962] 1981, p. 310) ou "modular". TOULOUSE & BOK (1978) (ver também BOK, 1983, p. 78-80) cunharam o termo "dificuldade" (D) para a medida sistêmica que é uma soma ponderada do quadrado do número $N_{\alpha i}$ de elementos de cada subconjunto i no nível α: $D = \sum_{\alpha} c_{\alpha} \sum_{i} N_{\alpha i}^{2}$ (ver Figura 1). A dificuldade se reduz à medida de ordem enquanto regularidade (item d) (por exemplo, em um sistema no qual se formam "domínios" de elementos em um dentre dois estados; ver WEISBUCH, 1983, p. 68), desde que se restrinja a medida de dificuldade a apenas um nível de subconjuntos.

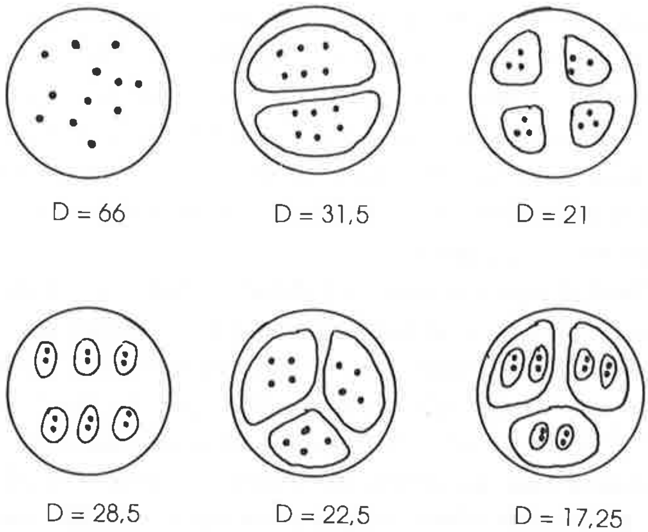

Figura 1: Exemplo de organização enquanto agrupamento, com diferentes maneiras de agrupar os 12 elementos de um sistema. A medida sistêmica "dificuldade" (D) é calculada neste caso supondo que os pesos das conexões para níveis superiores aumenta por um fator $c_{\alpha+1}/c_{\alpha} = 1{,}5$ *(ver definição de D no item i). Neste exemplo, a dificuldade mínima é obtida para um agrupamento em três níveis. Segundo* TOULOUSE *&* BOK *(1978), grupos sociais que minimizam a dificuldade tendem a ser mais eficientes.*

j) *COMPLEXIDADE enquanto NÚMERO DE ELEMENTOS* . A "teoria da complexidade" em Engenharia de Sistemas procura calcular o número mínimo de componentes necessário para realizar uma tarefa, como a transmissão telefônica. Neste campo, a complexidade é definida simplificadamente pelo número de componentes do sistema, sem levar em conta quão intricadas são as interconexões entre os componentes (a noção intuitiva de complexidade levaria isto em conta) (PIPPENGER, 1978). DENBIGH (1975, p. 87) propôs uma medida sistêmica semelhante para a organização que chamou de "integralidade": o produto do número de elementos e do número de conexões entre os elementos.

k) *COMPLEXIDADE enquanto QUANTIDADE DE RETROALIMENTAÇÃO*. Um refinamento da noção precedente leva em conta não somente o número de conexões, mas principalmente a quantidade de conexões de retroalimentação ("*feedback loops*") do sistema. Um sistema complexo neste sentido possuiria uma diversidade de atividades funcionais que ultrapassaria a diversidade dos processadores constituintes do sistema (LE MOIGNE, 1990, pp. 119, 257).

ℓ) *COMPLEXIDADE enquanto HETEROGENEIDADE.* Uma outra noção simplificada de complexidade é de que ela é função do número de tipos diferentes de elementos, como por exemplo o número de espécies em um ecossistema. Esta é a noção de "variedade" de Ashby, o número de elementos difererntes em um coletivo, que ATLAN (1992, p. 61) associa a uma "ordem por improbabilidade". Esta variedade de elementos é chamada de "heterogeneidade" por MARUYAMA (1982), que a estuda em sistemas sociais.

m) *COMPLEXIDADE enquanto DIFICULDADE DE DESCRIÇÃO.* Para ATLAN (1992, p. 66) a "complexidade" exprime a informação que nos falta a respeito de um sistema (categoria IV), enquanto que a "complicação" seria dada pelo número de etapas necessárias para se descrever o sistema. Esta última definição é próxima à "complexidade computacional" de um problema (a dificuldade intrínseca de um problema, medida por exemplo pelo tempo (ou tamanho, ver item j) requerido para a sua resolução pelo melhor algoritmo) (TRAUB *et al.*, 1983), à "complexidade algorítmica" de um número (o tamanho do código binário do menor programa computacional que gera o número) (CHAITIN, 1987), e à "profundidade lógica" de um número (número de ciclos da máquina de Turing com o menor programa que gera o número) (BENNETT, 1986). "Complexidade" para LLOYD & PAGELS (1988, pp. 186-9; ver também uma resumo das definições precedentes nas pp. 196-9) é uma medida de quão difícil é pôr algo junto (categoria III), não sendo uma propriedade de um objeto mas do *processo* para se compor o objeto.

n) *COMPLEXIDADE enquanto NÃO-COINCIDÊNCIA DESCRITIVA.* Sistemas biológicos podem ser descritos sob várias perspectivas teóricas (anatomia, tipos celulares, bioquímica, cibernética etc.), cada qual fornecendo uma diferente "decomposição" do sistema em subsistemas. Se tais decomposições não tiverem fronteiras que coincidam espacialmente, o sistema é *descritivamente complexo*, seguindo WIMSATT (1974). Se coincidirem, o sistema é descritivamente *simples* (por exemplo, uma rocha de granito decomposta segundo composição química, condutividades térmicas e elétrica, densidade etc.). No caso em que a decomposição é feita segundo as relações causais, obtém-se a *complexidade interacional*, que pode se afastar das hierarquias simples consideradas no item (i).

o) *COMPLEXIDADE enquanto BEIRA DO CAOS.* Uma maneira de se caracterizar a complexidade dos seres vivos foi expressa no título da obra de ATLAN (1992): "Entre o cristal e a fumaça". A complexidade seria assim algum meio termo entre a ordem do cristal e o caos da fumaça. Mais recentemente Langton e Kauffman (FORREST, 1991) caracterizaram um regime de máxima evolutibilidade para sistemas vivos como estando em um ponto crítico entre a ordem e o caos, "à beira do caos". Este estado mais complexo surgiria espontaneamante de maneira semelhante ao regime de "criticalidade auto-organizada" (BAK & CHEN, 1991).

6. Redes Booleanas Aleatórias

Para um dado sistema, qual é a relação entre suas diferentes medidas sistêmicas? Um aumento de complexidade está sempre associado a um aumento de organização? Qual a relação entre a complexidade e a ordem de um sistema, supondo que o máximo daquela corresponda a um valor intermediário desta? Como que os diferentes conceitos de ordem se relacionam (ver questão levantada por Atlan in DUMOUCHEL & DUPUY, 1983, p. 88)?

Nosso objetivo a médio prazo é tentar responder a tais perguntas de maneira razoavelmente rigorosa. Para tanto, comecemos investigando um problema simples, relativo a um sistema formal particular. Escolhemos, para este propósito, um sistema no qual as relações de condicionalidade que definem a organização se expressem de maneira simples: uma *rede conexionista booleana*.

Uma rede conexionista (com estado de ativação binário) é composta por N nodos, sendo que a cada instante cada um pode estar ativado ou não. O estado de cada um dos nodos é atualizado a cada geração (instante do tempo discretizado) (ver Figura 3). O que determina se na geração seguinte (t+1) um certo nodo estará ativado ou não é o estado de ativação (no instante *t*) de todos os nodos a ele conectados. Vamos supor que cada nodo recebe K conexões (representadas por flechas na Figura 2). Cada nodo então tem associado a ele uma "tabela de verdade" que estabelece qual é seu estado de ativação (em t+1) dado os estados de ativação (em *t*) dos nodos a ele conectados (tais tabelas estão representadas na Figura 2). Para K conexões, existem 4^K diferentes tabelas de verdade possíveis. Como os valores destas tabelas são apenas 0 e 1, elas representam as chamadas "funções booleanas". O biofísico Stuart Kauffman considerou redes nas quais as funções booleanas associadas a cada nodo eram estabelecidas aleatoriamente no início, sendo que, uma vez escolhidas, as funções em cada nodo permaneciam as mesmas com o passar do tempo. Tais redes são conhecidas como "redes booleanas aleatórias" ou "redes de Kauffman".

Qual é a relação entre uma rede booleana e uma rede neural? Uma rede neural possui uma estrutura de conexões semelhante à da rede booleana, mas o que determina se um nodo ficará ativo ou não na geração seguinte é se a soma das "eficiências sinápticas" provenientes de nodos ativos supera um limiar ou não. Diremos que duas redes deterministas são *equivalentes* se elas possuírem o mesmo número de nodos, e se para o mesmo estado inicial de ativação, ambas evoluirem exatamente da mesma maneira. No caso de uma rede neural com eficiências sinápticas fixas, é possível substituir, para cada nodo, o conjunto das eficiências sinápticas das conexões que chegam a este nodo por uma tabela de verdade booleana, obtendo assim uma rede booleana equivalente. No caso em que uma rede booleana for dada, em geral não é possível construir uma rede neural equivalente; no entanto, se nodos adicionais forem introduzidos para dar conta de tabelas de verdade do tipo XOR (a função "ou exclusivo", que fornece 0 se as duas entradas forem iguais e 1 se elas forem diferentes), então uma rede neural que se comporte exatamente como a rede booleana pode ser construída (ignorando-se os estados de ativação dos nodos adicionais).

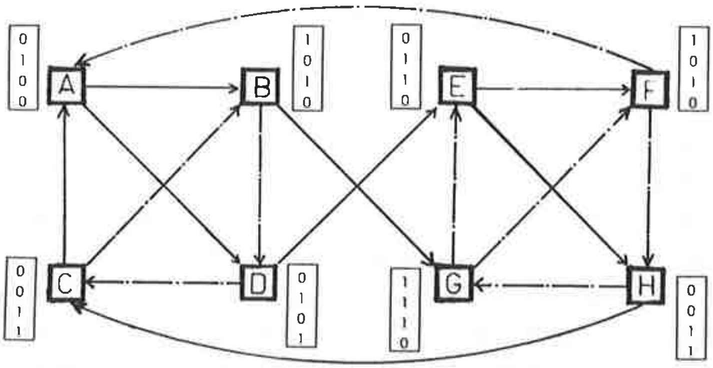

Figura 2: Rede booleana (espaço de conexões). Exemplo de uma rede booleana aleatória com N=8 elementos e K=2 conexões chegando em cada elemento. Ao lado de cada elemento ou nodo mostra-se a tabela de verdade booleana associada. A tabela booleana do nodo A está disposta ao lado. A conexão proveniente de C é desenhada com linha cheia, correspondendo à primeira coluna da tabela; a conexão vinda de F é tracejada, indicando a segunda coluna. A convenção usada para dispor os valores de verdade das primeiras duas colunas foi escolhida para facilitar a computação do processo de redução (ver Figura 7).

C	F	A
0	0	0
1	0	1
0	1	0
1	1	0

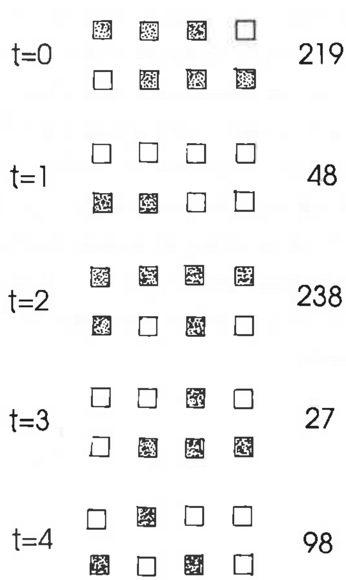

Figura 3: Evolução de estados em uma rede booleana. Se a rede da Figura 2 estiver inicialmente no estado de ativação 219, indicado ao lado em t=0, então seus estados sucessivos são 48, 238, 27, 98 etc., conforme mostrado na figura. O número associado a cada estado é a representação decimal do número binário cujos dígitos são os estados de ativação de cada elemento (0 = desativado; 1 = ativado).

As redes de Kauffman são de interesse em Biologia porque elas fornecem um modelo simples para estudar a ação dos genes entre si. Em 1961, Jacob & Monod descobriram que um gene pode atuar ativando ou desativando outros genes, através das proteínas produzidas. No final da década de 60, KAUFFMAN (1969) passou a modelar esta regulação genética por meio de redes booleanas aleatórias.

O que se observa quando uma rede parte de um certo estado inicial de ativação é que após um tempo relativamente curto o sistema entra em um ciclo de estados, e no caso de um sistema determinista, não sai mais deste "ciclo atrator". Para um estado inicial diferente o sistema pode se dirigir para este mesmo ciclo atrator, ou para um outro (Figura 4).

No modelo estabelecido por Kauffman, *cada ciclo atrator corresponde a um tipo de célula*. Ele mostrou que para um sistema de N nodos, no qual cada nodo recebe duas conexões (K=2), o número de ciclos atratores diferentes é aproximadamente $\sqrt{N}$. Um ser humano possui em torno de 100.000 genes que produzem proteínas, então tomando cada gene como um nodo de uma rede booleana aleatória com K=2, prevê-se a existência de 370 ciclos atratores, o que está relativamente próximo ao valor 255 de tipos diferentes de células conhecidas em nosso corpo! As previsões também são boas para outras espécies.

7. Duas Noções de Auto-Organização em Kauffman

O termo "auto-organização" pode ser definido como um processo de aumento de organização em um sistema, sendo que o "princípio organizador" (a "causa formal" no sentido aristotélico) *não* é um agente externo e nem um elemento privilegiado do sistema.

Dois problemas surgem de imediato com esta definição: 1) Como identificar um "aumento de organização"? Como medir a organização? 2) Como determinar de onde provém o "princípio organizador"? Como justificar o prefixo "auto"?

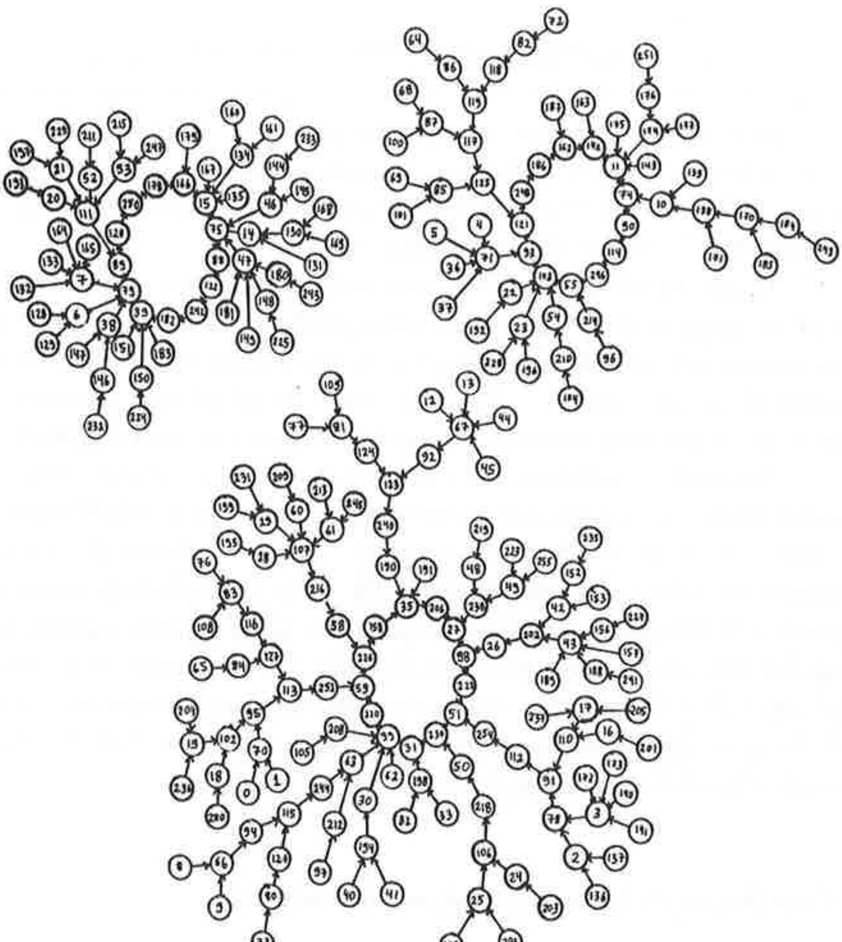

Figura 4: Rede booleana (espaço de estados). Esta figura mapeia todas as evoluções possíveis da rede booleana da Figura 2, sendo que cada estado do sistema é representado por um número entre 0 e 255 (para 8 elementos), conforme convenção apresentada na Figura 3. Existem neste exemplo três ciclos atratores, cada qual com 13 elementos. Existe uma semelhança razoável entre os ciclos e entre diferentes ramos de um mesmo ciclo, o que pode ser constatado considerando-se a "distância binária" (o número de nodos em estados diferentes) entre pares de estados em diferentes ciclos ou ramos. No modelo da rede regulatória entre genes introduzida por Kauffman *(1969), cada ciclo corresponde a um tipo diferente de célula; a figura indica que, de acordo com este modelo, cada tipo de célula passa por um ciclo semelhante ao de outro tipo.*

Em Kauffman encontramos duas noções de auto-organização. No caso em que o número de conexões chegando a cada nodo é baixo (K=2), ou em que algumas funções booleanas ocorrem com maior freqüência do que outras ("*biasing*"), o número de ciclos atratores é relativamente baixo ($\sqrt{N}$). Isso foi considerado por KAUFFMAN (1969) como uma manifestação de "ordem" (no caso, seria uma ordem enquanto confiabilidade, item 5h), que surgiria de maneira espontânea após se estabelecer (de maneira aleatória) as conexões entre os nodos. A este surgimento espontâneo de ordem Kauffman chamou de "auto-organização".

Uma crítica básica a esse uso do termo "auto-organização" é que o que se verifica é um aumento de *ordem*, e portanto o mais correto teria sido usar a expressão "auto-ordenação". É verdade que quando o termo "auto-organização" é usado, a palavra "organização" é usualmente tomada em um sentido geral (como sinônimo do que chamamos "medida sistêmica") que engloba a ordem. No entanto, este uso pouco preciso das palavras pode trazer confusão. Por exemplo, quando ASHBY (1962, pp. 267-9) argumentou que nenhum sistema isolado pode se auto-organizar, ele se referia à organização enquanto condicionalidade, e não à ordem (enquanto confiabilidade) a que Kauffman se refere, ou à ordem (enquanto regularidade) da Termodinâmica. O uso preciso das palavras é mais do que uma pirraça de filósofo analítico, ele é condição para que certas conclusões consensuais sejam obtidas.

Consideremos agora o uso do prefixo "auto". A definição de auto-organização (leia-se auto-ordenação) de Kauffman se baseia na existência de dois níveis aparentemente desconexos, o "espaço das conexões" (onde se define a organização, Figura 2) e o "espaço dos estados" (onde se define a ordem, Figura 4). Kauffman postula que as conexões são estabelecidas aleatoriamente, diríamos desorganizadamente, mas em outro nível estabelece-se uma ordem. "Ordem a partir do caos": traço característico dos processos considerados auto-organizativos (DELATTRE, 1981).

Concluímos então que o prefixo "auto" está adequadamente empregado já que a ordem se estabelece sem imposição externa. Mais especificamente: (i) o sistema é constituído a partir de um nível I (o das conexões) que é diferente do nível II (dos estados) no qual o sistema passa a ser considerado; (ii) no nível I em que o sistema é constituído, não existe a seleção de um sistema com alta organização (ou com um alto valor de outra medida sistêmica) (caso contrário, poderia-se explicar o aumento da medida sistêmica no nível II a partir do aumento da medida sistêmica no nível I).

Mais recentemente, Langton e Kauffman (ver FORREST, 1991) chegaram à conclusão de que existe um regime "à beira do caos" no qual a evolução biológica se processa de maneira mais eficiente (item 5o). Este regime de alta "evolutibilidade", à beira do caos, se situa entre dois extremos: entre o regime ordenado e o caótico. Se uma rede booleana for muito "ordenada", pequenas variações em sua estrutura (ou seja, em suas funções booleanas ou em suas conexões) não alterarão significantemente o comportamento do sistema (uma forma de "estabilidade estrutural"); assim, ele não evoluirá de maneira eficiente. Se o sistema for muito "caótico", pequenas variações estruturais levam a enormes alterações no comportamento do sistema, e o sistema alterado raramente manteria as adaptações ao ambiente. Sistemas que se encontram no regime intermediário à beira do caos evoluiriam de maneira mais eficiente.

Temos aqui um processo de "auto-organização" diferente do anterior. O que aumenta no processo é a "evolutibilidade". Esta medida sistêmica poderia ser considerada um tipo especial de organização enquanto adaptabilidade (item 5c) se sua definição dependesse das propriedades do meio ambiente (categoria III). Este parece ser o caso (KAUFFMAN, 1990), o que nos leva a concluir que um grau alto de evolutibilidade é atingido por seleção natural. Temos pois um exemplo de "auto-organização por seleção natural".

A tese de Kauffman segundo a qual a auto-organização é um princípio biológico que complementa o princípio da seleção natural não se aplicaria assim neste caso (ao contrário do que ele defende), apesar de ser aplicável no primeiro modelo de auto-organização ("auto-ordenação") apresentado acima. (Características que seriam explicadas pela auto-organização e não pela seleção natural seriam: o número de tipos de células em um organismo, a estabilidade de tipos de célula e o número restrito de tipos celulares nos quais cada tipo de célula pode se diferenciar; ver KAUFFMAN, 1990, p. 175.)

8. Medidas de Organização em Redes Conexionistas

Seria bastante interessante definir um sistema cuja organização (enquanto condicionalidade) aumentasse a partir de um processo definido em um outro nível que não o espaço das conexões (de maneira semelhante ao descrito no item i da seção anterior). Iniciamos esta investigação através de uma modelagem computacional das redes booleanas em linguagem SCHEME (um dialeto de LISP que incorpora vantagens do ALGOL 60). O primeiro passo é definir precisamente medidas de organização que possam ser calculadas pelo computador. A seguir procuraremos verificar se um processo que leve a um aumento de complexidade a nível do espaço de estados leva também a um aumento de organização a nível do espaço de conexões. Nossa intuição é de que um processo deste tipo deva ocorrer, já que é o que acontece na evolução biológica, onde as formas de vida selecionadas por sua adaptabilidade (a nível fenotípico) tendem a se tornar mais organizadas a nível genético e neurológico.

Em nossa pesquisa, definimos várias medidas sistêmicas, mas somente as mais interessantes serão apresentadas abaixo. Duas delas expressam características das relações de condicionalidade entre os elementos do sistema, sendo portanto medidas de organização, que chamaremos de "integração" (ORG_1) e "pluralidade" (ORG_2). Uma terceira medida, considerada por Kauffman, é a medida de ordem enquanto "confiabilidade" (ORD_1) no espaço de estados, da qual se pode derivar uma medida de complexidade COMPL_1. Uma definição mais interessante de complexidade enquanto "adaptabilidade" requer a implementação de um ambiente, o que deixaremos para um trabalho posterior.

Antes de apresentar as definições das medidas de organização, consideremos a Figura 5 que mostra dois grupos de redes booleanas. A Figura 5a mostra um sistema com duas partes separadas; esta separabilidade deve fazer com que a organização seja menor do que a de um sistema modular (Figura 5b), que por sua vez deve ser menor do que a de um sistema integrado, como o da Figura 5c. À direita desenham-se as orientações das conexões, e vê-se que a Figura 5d é "hierárquica" (num sentido diferente daquele empregado por SIMON, 1962; ver seção 5, item i), com um "centro de poder", ao contrário de 5e, que é "pluralista", sem um centro de poder. Seria útil derivar uma medida de organização que distinguisse entre sistemas hierárquicos e pluralistas.

Consideremos agora a Figura 6, que trata das funções booleanas. Apesar de haver duas conexões chegando no nodo C, é possível que uma delas (ou ambas) seja supérflua. Isso sugere que o primeiro passo para se calcular um grau de organização do sistema é fazer uma *redução*, eliminando conexões supérfluas. Na Figura 7 apresentamos um exemplo de redução.

A primeira medida de organização a ser considerada é a seguinte:

ORG$_1$ (integração, anti-separabilidade): Após fazer a redução, considere o conjunto de todos os subconjuntos (o "*power set*", ou conjunto das partes) dos elementos do sistema (isto é, dos nodos da rede). Para cada um desses subconjuntos P, atribui-se um número G_P, calculado da seguinte maneira:

i) Considere apenas os elementos de P e as conexões existentes entre eles. Se os elementos estiverem separados em dois ou mais grupos que não possuem conexões entre si, então $G_P = 0$.

ii) Se o caso (i) não se aplicar, isso significa que todos os elementos do subconjunto fazem parte de uma única rede de conexões. Conta-se agora o número de conexões C entre os elementos de P e os elementos fora deste subconjunto. Se $C = 0$, então $G_P = 0$.

iii) Se $C \neq 0$, então $G_P = 1 + \frac{1}{2}\log_2 C$.

O grau de organização ORG$_1$ é a soma dos G_P para todos os subconjuntos dos elementos do sistema:

$$\mathrm{ORG}_1 = \sum_P G_P \qquad (1)$$

Esta definição de grau de *integração* examina todas as maneiras de se agrupar (em subconjuntos) os elementos do sistema. Sempre que a característica de separabilidade se manifestar, quer dentro de um agrupamento (i), quer entre o agrupamento e o resto do sistema (ii), a contribuição para ORG$_1$ é nula. Se um agrupamento possui uma única conexão com o resto do sistema, o grupo está "quase" separado, e a contri-

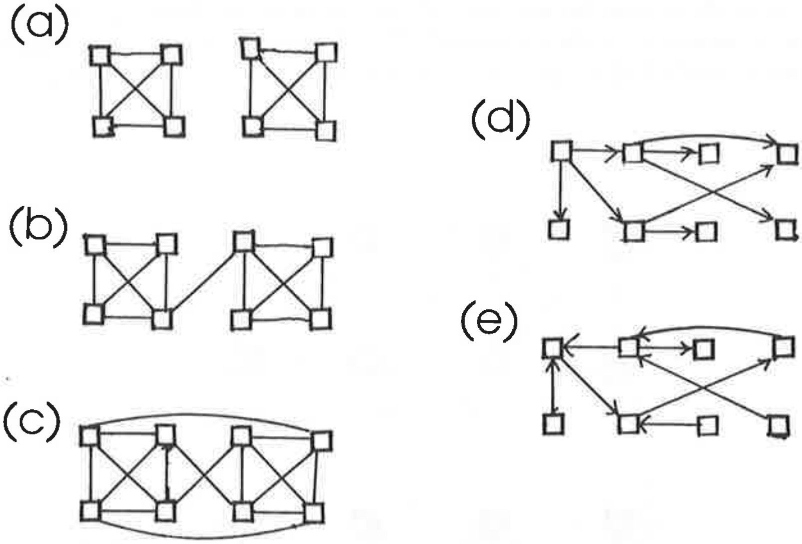

Figura 5: Algumas classes de organização. À esquerda mostram-se três classes gerais de organização que independem da direção das conexões: em (a), o sistema está separado; em (b), ele é modular (quase-decomponível); em (c), ele é integrado. À direita, consideram-se as orientações das conexões, e têm-se em (d) um sistema hierárquico, e em (e) um sistema pluralista.

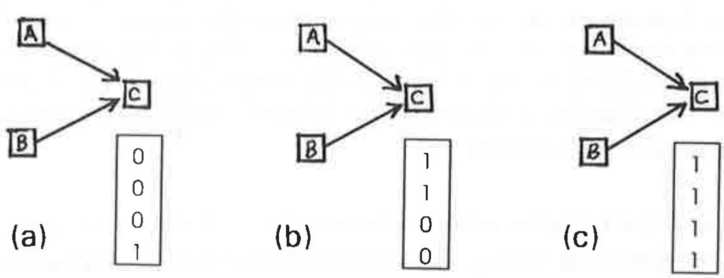

Figura 6: Condicionalidade e funções booleanas. Considere um elemento C que recebe duas conexões, de A e de B, tendo pois uma tabela de verdade com quatro dígitos. Se três destes dígitos forem iguais, e um for diferente, então tanto A quanto B condicionam C. Se os dois primeiros dígitos forem iguais, e se eles forem diferentes dos dois últimos dígitos, então um dos nodos de onde partem conexões não condicionará C (no exemplo do meio da figura, seguindo a convenção da Figura 2, o nodo A não influencia em nada o estado de C). Se todos os dígitos forem iguais, então o estado de C independe de A e B, não havendo condicionalidade.

buição para ORG_1 é 1. Se houver duas conexões com o resto do sistema, a contribuição é 2; se houver 3, é 2,3; etc.

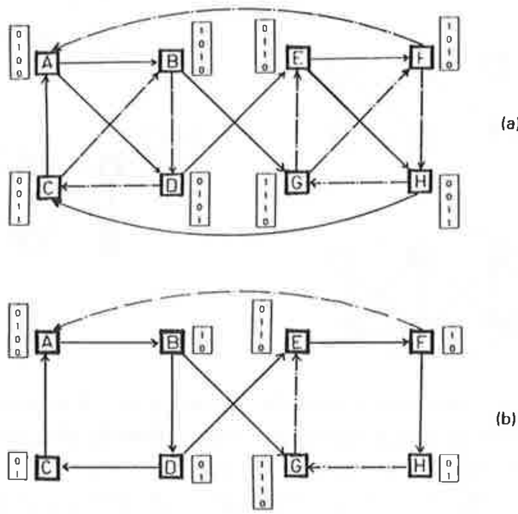

Figura 7: Exemplo de redução. As constatações expostas na Figura 6 permitem que se eliminem algumas das conexões na rede booleana (a) usada como exemplo na Figura 2. Esta redução para (b) é mostrada na figura acima. Vê-se que cinco nodos passaram a receber apenas uma conexão, e as tabelas de verdade associadas a cada um deles diminuiram de tamanho.

Na Figura 8 apresentamos várias redes de 8 elementos, com suas respectivas medidas de ORG_1. Uma característica básica desta medida é a aditividade, o que explica o uso da função logarítimo. Assim, a rede 8h tem um valor de ORG_1 que é o dobro do da rede 8g. Por outro lado, a ligação que é feita na rede 8i dos dois subsistemas separados da rede 8h aumenta bastante a organização do sistema. Devido à aditividade, atribui-se um valor 0 de ORG_1 para um sistema sem conexões.

Esta medida de integração poderia ser refinada, atribuindo-se pesos diferentes para as contribuições de subconjuntos de diferentes tamanhos. Com isso poderia-se definir uma medida sistêmica de "modularidade", que assume um valor alto quando há diversos grupos unidos por apenas uma conexão (ver Figura 5b). Por outro lado, a medida ORG_1

apresenta uma limitação grave que é a de não considerar a orientação das conexões, requisito necessário para se expressar uma condicionalidade. Em sistemas onde as conexões são simétricas, como as redes estudadas por HOPFIELD (1982), esta limitação desaparece.

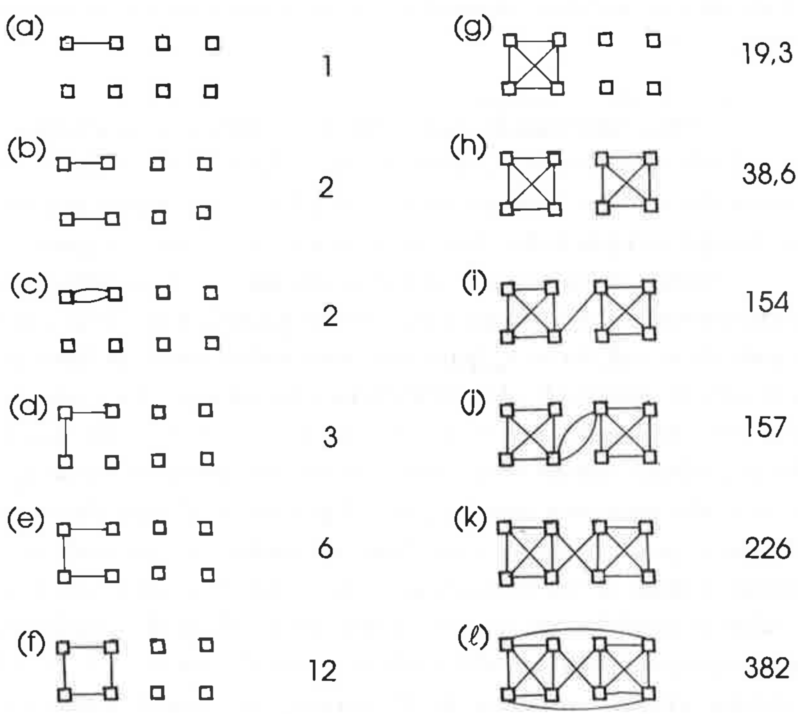

Figura 8: Exemplos da medida de integração. A medida de organização que mede a "integração" (oposta à separação) ORG_I *de um sistema conexionista é uma medida aditiva. Isto significa que se o sistema for separado em duas ou mais partes desconexas, a integração do todo será igual à soma das integrações das partes. Isso pode ser visto nas redes (g) e (h). Além disso, se dois sistemas separados forem unidos por uma conexão, a integração aumenta bastante (comparar as redes (h) e (i)). Os valores na coluna à direita estão arrendondados.*

A segunda medida sistêmica que iremos considerar leva em conta justamente as orientações das conexões, atribuindo um valor mais elevado para sistemas onde as causas e os efeitos estão igualmente distribuídos, sem um "centro de poder", ou seja, sem um grupo de elementos que causa bastante efeitos em outros elementos mas que não recebe muita influência causal dos outros.

ORG$_2$ (pluralidade, anti-hierarquia): Após efetuar a redução da rede, calcula-se a "potência causal" P_n de cada nodo n. Uma maneira grosseira de estimar esta grandeza seria simplesmente contar o número de conexões que saem do nodo. Uma maneira mais refinada é a seguinte:

Atribui-se inicialmente ao nodo n um valor v_n=1 (os outros nodos têm inicialmente valor 0). Para cada nodo m ligado a n por uma conexão que parte de n, calcula-se v_m para este novo nodo como o produto de v_n pelo inverso do número k_m de conexões que chegam a m. Por exemplo, se 3 conexões chegam no nodo m, e v_n=1, teremos v_m=1/3. Feito isso para todas as conexões saindo de n, cancela-se o valor original do nodo v_n (ou seja, se n não tiver uma conexão para si próprio, v_n é ajustado para 0). Repete-se o processo agora para todos os nodos. Se um nodo recebe conexões de mais de um nodo ativado, então seu novo valor será a soma dos valores calculados (da maneira acima) para cada nodo ativado. Após reiterar o procedimento um número de vezes igual ao número N de nodos do sistema, chega-se ao valor de P_n, através da soma de todos os v_m daquela geração.

A pluralidade ORG$_2$ simplesmente mede quão homogênea é a distribuição de P_n, usando uma medida semelhante à que expressa a entropia em mecânica estatística e na Teoria da Informação:

$$\mathrm{ORG}_2 = -\sum_n \frac{P_n}{P} \log_2\left(\frac{P_n}{P}\right) \qquad \text{onde } P = \sum_n P_n \tag{2}$$

Na Figura 9 apresentam-se várias redes reduzidas cujos valores de ORG_1 são os mesmos, diferindo apenas na distribuição do poder causal (isto é, nas orientações das conexões). Uma sistema pluralista como 9f, por exemplo, tem um valor de ORG_2 mais alto do que a rede hierárquica de 9a.

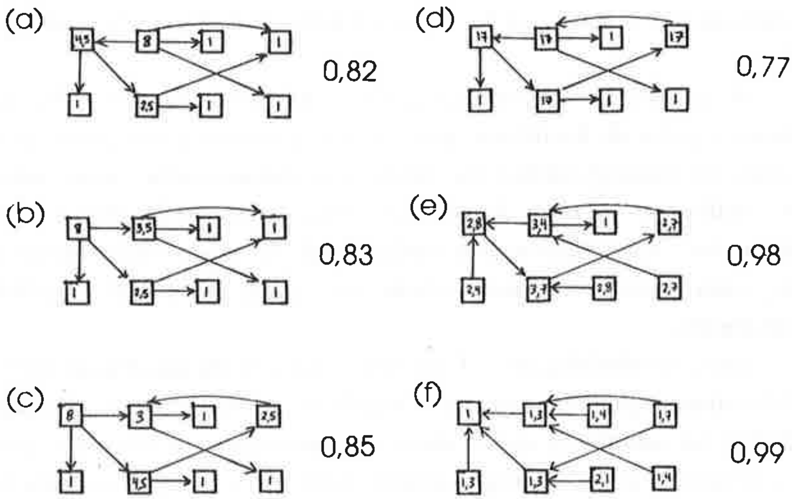

Figura 9: Exemplos da medida de pluralidade. As redes acima têm o mesmo valor de integração (102), mas diferem nas orientações das conexões. Dentro de cada nodo n está escrito o "poder causal" P_n calculado de acordo com a receita dada acima. As redes (a) e (b) são bastante hierárquicas, tendo um valor de pluralidade ORG_2 relativamente baixa. A rede (c) é igual à (b), com uma conexão invertida. A rede (d) mostra uma propriedade interessante, e talvez indesejável, da medida de pluralidade. Esta rede é igual a (a) a menos de uma inversão de conexão, que tornou a rede menos hierárquica, mas a medida de pluralidade diminuiu bastante. Isso ocorreu porque se formou um ciclo fechado de conexões (contendo os nodos com um poder causal de 17). As redes (e) e (f) são bastante pluralistas, sem um centro com grande poder causal.

Seria interessante unificar ORG_1 e ORG_2 em uma medida sistêmica mais completa. Deve-se destacar também que diferentes medidas sistêmicas têm sido definidas na Teoria dos Grafos, em especial em grafos direcionados (ver HARARY *et al.*, 1965, pp. 51,69,189-91,339-52). Talvez seja possível exprimir uma medida equivalente à ORG_1 em termos da "conectidade" definida na Teoria dos Grafos (ver HARARY, 1969, pp. 43-56).

A medida de ordem (enquanto confiabilidade, item 5h) que definimos a partir de Kauffman não se refere à estrutura das conexões da rede, mas ao comportamento da rede, considerado como uma *média* sobre todos os estados de ativação iniciais possíveis destas redes deterministas. Para estimar esta média, "roda-se" o sistema centenas de vezes, cada uma com um estado de ativação inicial escolhido aleatoriamente.

ORD_1 (confiabilidade): Uma rede conexionista que possui apenas um ciclo atrator, qualquer que seja o estado inicial de ativação, é bastante "confiável" no sentido de que nenhum erro aleatório *nas ativações* pode levar o sistema a ter um "comportamento diferente", ou seja, a ir para um outro ciclo atrator (pois só há um ciclo). Uma rede com um baixo número de ciclos atratores é mais confiável do que uma com muitos, e para KAUFFMAN (1991) isto é sinal de "ordem". Uma medida sistêmica que expressa isto é simplesmente o número N de nodos da rede dividido pelo número A de diferentes ciclos atratores da rede:

$$\mathrm{ORD}_1 = N/A \tag{3}$$

Um sistema com poucos ciclos atratores é confiável mas tem a desvantagem de ser pouco "versátil", podendo assumir poucos "comportamentos" diferentes (baixa variedade de comportamentos). Na analogia com o sistema genético, tais "comportamentos" corresponderiam aos diferentes tipos de células. Por outro lado, em um sistema muito *versátil*, com muitos ciclos atratores possíveis (isto é, muitos estados macroscopicamente diferentes que são acessíveis), a falta de confiabilidade seria prejudicial em um ambiente que induzisse alterações aleatórias nos estados de ativação dos elementos. Assim, pode-se definir uma medida de complexidade enquanto um meio termo entre confiabilidade e versatilidade (no espírito do item 5o), que chamaremos COMPL_1.

Uma vez implementadas as medidas sistêmicas no nível das conexões (ORG_1, ORG_2) e no nível dos estados (ORD_1), podemos investigar a possibilidade de haver um processo de aumento de organização no sentido especificado na seção 7 (item i): se houvesse algum mecanismo que selecionasse, no nível de estados, sistemas com alguma medida sistêmica mais alta (por exemplo a adaptabilidade), resultaria isto concomitantemente na seleção de sistemas com um maior grau de organização no nível das conexões? Se um exemplo deste tipo fosse encontrado, teríamos um exemplo de um mecanismo de *aumento de organização a partir de uma ordenação em um outro nível* (e não a partir do caos). Este processo talvez não qualificasse como sendo "auto-organizado", mas mesmo assim seria bastante interessante como modelo explicativo para processos de aumento de organização, como é a filogenia.

Com um computador, procuramos uma correlação entre as medidas ORG_1, ORG_2, de um lado, e ORD_1 de outro (uma possível correlação com COMPL_1 seria observável a partir de ORD_1), a partir da construção de 100 redes booleanas aleatórias. Não se encontrou nenhuma correlação entre ORG_1 e ORD_1 (uma correlação direta forneceria o valor 1 para o coeficiente R definido em estatística, mas o que obtivemos neste caso foi $R = 0{,}07$). A única correlação obtida foi a seguinte:

Para redes com a mesma estrutura de conexões, variando-se apenas as orientações das conexões (o que faz o valor de ORG_1 ser o mesmo para todos), observou-se que a ORD_1 é inversamente proporcional a ORG_2 para 10 redes, $R = 0{,}97$).

Em outras palavras, quanto *menos hierarquizado* é o sistema, mantendo-se fixa a integração, *mais versátil* ele é (mais ciclos atratores ele possui). Isto sugere que a organização hierárquia em redes conexionistas aumenta a sua ordem (enquanto confiabilidade), diminuindo o número de ciclos atratores. Relações de condicionalidade distribuídas de maneira pluralista levam a uma versatilidade maior das redes conexionistas (a uma maior capacidade de representação, ao preço de uma menor confiabilidade).

Este resultado é interessante, mas é menos do que nossa intuição esperaria. Afinal, um aumento de integração deveria levar a um aumento de "complexidade", mas isto não foi observado. E não ficamos sabendo se em geral a pluralidade aumenta ou diminui a complexidade. Mas como na fábula da raposa e as uvas, este resultado negativo não é muito decepcionante, já que as medidas de ordem definidas acima para as redes booleanas (e conexionistas em geral) são ruins, não fazendo juz à analogia com as redes genéticas introduzida por Kauffman.

Para tornar o trabalho mais relevante teremos que considerar uma medida de complexidade mais pertinente para sistemas biológicos. Para tanto, é preciso antes de mais nada introduzir uma representação para o ambiente da rede booleana (que também poderia ser uma rede booleana). Uma vez feito isso, pode-se definir uma complexidade enquanto *adaptabilidade*, e esperar observar (na tela do computador) alguma correlação com as medidas de organização.

9. Conclusão

O presente trabalho, como se vê, mal começou. Interessados em comparar as várias definições de auto-organização dadas na literatura, nos concentramos em diversas definições de organização e de outras medidas sistêmicas. Vimos de imediato que, para diferentes autores, o que aumenta durante o processo de "auto-organização" são medidas sistêmicas diferentes, e que portanto eles estão tratando de processos qualitativamente diferentes. Propomos então a definição precisa de duas medidas sistêmicas relacionadas com a organização (enquanto condicionalidade) em redes conexionistas, a integração e a pluralidade, e preparamos o terreno para a definição de uma terceira medida, a modularidade (ou quase-decomponibilidade). Imaginamos que qualquer processo de auto-organização, no sentido estrito do termo "organização", envolva um aumento de uma medida sistêmica semelhante às que definimos.

Quanto à questão da justificativa para o uso do termo "auto", ainda não avançamos muito. Concentramo-nos em um problema mais simples, no qual o aumento de ordem em um nível (o espaço de estados) leva a um aumento de organização em outro nível (o espaço das conexões). Encontramos uma correlação apenas entre a pluralidade (o oposto da hierarquia) e a versatilidade (o número de ciclos atratores) em redes conexionistas com o mesmo valor de integração. Mas já vislumbramos uma maneira mais interessante de definir uma medida sistêmica, a adaptabilidade, cujo aumento (por seleção natural) poderia levar a um aumento na organização. Após a implementação desta situação, teremos melhores condições para avaliar o papel do acaso nos processos ditos auto-organizados, e para avaliar, nas palavras de M. Debrun, se o conceito de auto-organização se refere aos fenômenos de uma maneira "rica", ou seja, se ele os ilumina mais do que se o conceito não fosse utilizado.

Partindo de um estudo de clarificação de conceitos, na área que se costuma chamar "Filosofia da Ciência", exploramos as relações entre diferentes conceitos usando a linguagem de programação em computadores. Usando as redes booleanas como estudo de caso para sistemas em geral, adentramos sem querer no terreno da "Filosofia da Biologia". Esperamos que o uso de computadores em Filosofia da Ciência não seja visto como "mero trabalho técnico", mas como uma técnica legítima de auxílio para o pensamento analítico, uma maneira de introduzir precisão nas definições, de testar hipóteses e de facilitar a formação de intuições a respeito de sistemas complexos.

Agradecimentos

Agradeço ao prof. Michel Debrun, que nos colocou toda a problemática, e a todos os membros do Grupo de Auto-Organização do CLE pelas críticas e discussões do texto e do seminário apresentado em setembro de 1993, assim como ao prof. José Lino Bueno e colegas do Departamento de Psicologia e Educação, FFCL-USP, Ribeirão Preto. O trabalho foi financiado por uma bolsa de Pós-Doutorado da Fapesp e uma bolsa de Pesquisador Associado do CNPq.

Referências Bibliográficas

ARECCHI, F.T. ([1984] 1986), "Introduction", in: SERRA, R.; ANDRETTA, M.; COMPIANI, M. & ZANARINI, G. (org.), *Introduction to the Physics of Complex Systems.* Oxford: Pergamon, pp. i-xi. (Tradução de *Introduzione alle Fisica dei Sistemi Complessi.* Bologna: CLUEB.)

ASHBY, W.R. (1947), "Principles of the Self-Organizing Dynamic System", *The Journal of General Psychology 37*: 125-128.

—— (1962), "Principles of the Self-Organizing System", in VON FOERSTER, H. & ZOPF, JR., G.W. (org.), *Principles of Self-Organization.* Oxford: Pergamon, pp. 255-278. (Reimpresso in ASHBY, W.R. (1981), *Mechanisms of Intelligence.* Seaside (EUA): Intersystems, pp. 65-89.)

ATLAN, H. ([1979] 1992), *Entre o Cristal e a Fumaça.* Rio de Janeiro: Zahar. (Tradução de *Entre le Cristal et la Fumée.* Paris: Seuil.)

BAK, P. & CHEN, K. (1991), "Self-Organized Criticality", *Scientific American 264(1)*: 26-33.

BENNETT, C.H. (1986), "On the Nature and Origin of Complexity in Discrete, Homogeneous, Locally-Interacting Systems", *Foundations of Physics 16*, 585-592.

BERGÉ, P.; POMEAU, Y. & VIDAL, C. (1984), *L'Ordre dans le Chaos.* Paris: Hermann. (Tradução para o inglês: *Order within Chaos.* Nova Iorque: Wiley, 1984.)

BOK, J. (1983), "Un Modèle d'Auto-Organisation: le Principe de Moindre Difficulté", in DUMOUCHEL, P. & DUPUY, J.-P. (org.), *L'Auto-Organisation: de la Physique au Politique.* Paris: Seuil, pp. 75-85.

BRESCIANI Fº, E. (1996): "Organização Informal, Auto-Organização e Inovação", neste volume, pp. 365-380.

CHAITIN, G. (1987), *Algorithmic Information Theory.* Cambridge (Ingl.): Cambridge University Press.

COWAN, J. (1962), "Many Valued Logics and Reliable Automata", in VON FOERSTER, H. & ZOPF, JR., G.W. (org.), *Principles of Self-Organization*. Oxford: Pergamon, pp. 135-180.

DANCHIN, A. (1978), "Entropie et Ordre Biologique", *La Recherche 9*: 788-791.

DELATTRE, P. (1981), *Teoria dos Sistemas e Epistemologia*. Lisboa: A Regra do Jogo Edições. (Tradução do texto francês publicado pela CNRS-ATP, Paris.)

DENBIGH, K.G. (1975), "A Non-Conserved Function for Organized Systems", in KUBÁT, L. & ZEMAN, J. (org.), *Entropy and Information in Science and Philosophy*. Amsterdam: Elsevier; Praga: Academia, pp. 83-91.

DUMOUCHEL, P. & DUPUY, J.-P. (org.) (1983), *L'Auto-Organisation: de la Physique au Politique*. Paris: Seuil.

EMERY, F.E. (org.) (1969), *Systems Thinking*. Harmondsworth (Ingl.): Penguin.

FORREST, S. (org.) (1991), *Emergent Computation*. Cambridge (EUA): MIT Press.

HARARY, F. (1969), *Graph Theory*. Reading (EUA): Addison-Wesley.

HARARY, F.; NORMAN, R.Z. & CARTWRIGHT, D. (1965), *Structural Models. An Introduction to the Theory of Directed Graphs*. Nova Iorque: Wiley.

HOPFIELD, J.J. (1982): "Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Activities", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA 81*, 6871-6875.

KAUFFMAN, S.A. (1969), "Metabolic Stability and Epigenesis in Randomly Connected Nets", *Journal of Theoretical Biology* 22: 437-467.

—— (1990), "Requirements for Evolvability in Complex Systems: Orderly Dynamics and Frozen Components", in ZUREK, W.H. (org.), *Complexity, Entropy and the Physics of Information*. Redwood City (EUA): Addison-Wesley, pp. 151-192.

—— (1991), "Antichaos and Adaptation", *Scientific American 265(2)*: 64-70.

LE MOIGNE, J.-L. ([1977] 1990), *La Théorie du Système Général - Théorie de la Modélisation*. Paris: PUF.

LLOYD, S. & PAGELS, H. (1988), "Complexity as Thermodynamic Depth", *Annals of Physics 188*: 186-213.

LUZZI, R. & VASCONCELLOS, A. (1996), "Estruturas Dissipativas Auto-Organizadas: Um Ponto de Vista Estatístico", neste volume, pp. 191-238.

MARUYAMA, M. (1982), "Four Different Causal Metatypes in Biological and Social Sciences", in SCHIEVE, W.C. & ALLEN, P.M. (orgs.), *Self-Organization and Dissipative Structures*. Austin: University of Texas Press, pp. 3-39.

MCCULLOCH, W.S. (1960), "The Reliability of Biological Systems", in YOVITS, M.C. & CAMERON, S. (org.), *Self-Organizing Systems*. Oxford: Pergamon, pp. 262-281.

PADULO, L. & ARBIB, M.A. (1974), *System Theory*. Philadelphia: Saunders.

PASK, G. (1961), *An Approach to Cybernetics*. Londres: Hutchinson.

PIPPENGER, N. (1978), "Complexity Theory", *Scientific American 238(6)*, 90-100.

SIMON, H.A. ([1962] 1981), "A Arquitetura da Complexidade", in SIMON, H.A., *As Ciências do Artificial*. Coimbra: A. Amado, pp. 285-338. (Tradução de "The Architecture of Complexity", in *Proceedings of the American Philosophical Society 106*: 467-482. Republicado in SIMON, H.A., *The Sciences of the Artificial*. 2ª ed. Cambridge, EUA: MIT Press, 1969, pp. 192-229.)

STENGERS, I. (1985), "Les Génealogies de l'Auto-Organisation", in *Génealogies de l'Auto-Organisation* (*Cahiers du CREA 8*). Paris: Centre de Recherche Épistemologie et Autonomie, École Polytechnique, pp. 7-104.

TONNELAT, J. (1979), "Qu'est-ce qu'un Être Vivant?", *La Recherche 10*: 614-622.

TOULOUSE, G. & BOK, J. (1978), "Principe de Moindre Difficulté et Structures Hiérarchiques", *Revue Français de Sociologie 19*: 391-406.

TRAUB, J.F.; WASILKOWSKI, G.W. & WOZNIAKOWSKI (1983): *Information, Uncertainty, Complexity*. Reading (EUA): Addison-Wesley.

VON FOERSTER, H. (1960), "On Self-Organizing Systems and their Environments", in YOVITS, M.C. & CAMERON, S. (org.), *Self-Organizing Systems*. Oxford: Pergamon, pp. 31-50. (Reimpresso in VON FOERSTER, H. (1984), *Observing Systems*. 2ª ed. Seaside (EUA): Intersystems, pp. 2-22.)

WEISBUCH, G. (1983), "Quelques Approches Physiques de l'Organisation", in DUMOUCHEL, P. & DUPUY, J.-P. (org.), *L'Auto-Organisation: de la Physique au Politique*. Paris: Seuil, pp. 64-74.

WIMSATT, W.C. (1972), "Complexity and Organization", in SCHAFFNER, K.F. & COHEN, R.S. (org.), *PSA 1972 (Boston Studies in the Philosophy of Science 20)*. Dordrecht (Holanda): Reidel, pp. 67-86.

(Recebido em agosto de 1993.)