

# Sistemas Complexos

**Elbert E. N. Macau**

Laboratório de Integração e Testes - LIT  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
e-mail: elbert@lit.inpe.br

**Resumo:** Um "sistema complexo" é um sistema que apresenta um comportamento intrincado, que é difícil de ser modelado através do enfoque reducionista de sucessivas subdivisões em busca de seus constituintes elementares. A pesquisa em sistemas complexos procura buscar padrões e propriedades gerais que ocorrem em classes distintas de sistemas. Os sistemas complexos surgem em campos tão diversos como biologia, química, ciência da computação, geologia, física, astronomia, mecânica dos fluidos. Este trabalho caracteriza dinamicamente os "sistemas complexos" e evidencia como suas propriedades surgem e evoluem.

**Palavras-chave:** sistemas complexos 1, dinâmica não linear 2, complexidade 3, auto-organização 4; entropia 5.

## Introdução

Desde há algum tempo é crescente o interesse científico no estudo dos chamados *Sistemas Complexos*. Estes sistemas, a princípio caracterizados por mostrarem um comportamento de difícil compreensão, se apresentam como derradeiros bastiões que desafiam o esforço da ciência em apresentar uma visão unificada e homogênea do universo que nos rodeia. Antes de verificarmos como o desafio do estudo dos sistemas complexos vem sendo vencido, é importante revermos como o conhecimento científico evolui ao longo do tempo e como ele nos permite desvendar os "mistérios" da Natureza.

O sucesso que a ciência vem auferindo em nos permitir uma gradativa e cada vez mais profunda compreensão da Natureza está ligado a adequada utilização do *Método Científico*. Este método compreende a execução coordenada e criteriosa de quatro itens de ação, abaixo considerados (einstein76):

1. Observação, descrição e classificação de um fenômeno natural ou grupo de fenômenos;
2. Dedução das regularidades e leis que possibilitem a explicação do fenômeno, consubstanciadas na forma de *hipóteses*;
3. Uso destas hipóteses para fazer *previsões* acerca da ocorrência do fenômeno e de fenômenos correlacionados;
4. Comparação das previsões com os resultados de *experimentos* e observações subseqüentes, empreendidos por experimentadores e observadores independentes.

Caso diversos experimentos suportem a veracidade da hipóteses, estas podem vir a serem consideradas como teorias ou leis da Natureza. Se algum experimento indicar resultados que entrem em conflito com as hipóteses, estas devem ser rejeitadas ou modificadas. Neste processo, o que se impõe como chave é o poder de *previsão* associado às hipóteses ou teoria, a ser testado em experimentos ou novas observações. Inclusive, estas hipóteses freqüentemente permitem prever resultados associados a situações novas, não associadas as observações que levaram originariamente a concepção das hipóteses. Por outro lado, se apenas um destes resultados não ocorrer quando da realização do experimento, a hipótese deve ser rejeitada ou, no mínimo, reavaliada. Devido a este fato, diz-se que em ciência as teorias nunca podem ser provadas, mas apenas rejeitadas, uma vez que sempre existe a possibilidade de que novas observações ou experimentos venham a indicar algum conflito mesmo em teorias estabelecidas há tempo.

A *Matemática* tem papel fundamental neste processo de aplicação do método científico. De fato, a Matemática pode ser considerada como sendo a *linguagem da ciência*. Isto pelo fato dos números serem necessários e mesmo imprescindíveis à realização da maioria das observações relacionadas aos fenômenos da Natureza. Além disso, sempre que possível, as leis deduzidas das observações da Natureza são freqüentemente expressas através de *equações matemáticas*. São exatamente estas equações que facultam a realização de previsões acuradas, que podem ser comparadas com resultados de experimentos subseqüentes.

Na aplicação do método científico, é fundamental a definição do conceito de *Sistema*. Define-se como *Sistema* a parte do universo que se está interessado em descrever ou prever e se distingue do resto do universo através de uma "fronteira imaginária". São exemplos de sistema um relógio, o sistema solar, o planeta Terra, a atmosfera, a floresta amazônica, entre outros. Observe que dependendo do interesse que se tenha, o que é um sistema, pode vir a ser parte de outro sistema. Assim, nos exemplos, o planeta Terra pode ser o sistema de interesse, ou ser um dos componentes internos, no caso do estudo do Sistema Solar. Uma vez que o sistema tenha sido identificado, pode-se descrever suas propriedades, as propriedades do *meio ambiente*, i.e., do universo com a exclusão do sistema, e as relações e interações entre o sistema e seu meio ambiente.

Aplica-se o método científico a um sistema com o objetivo de *entender* seu comportamento e permitir a elaboração de *previsões de comportamento*. Um sistema pode apresentar um comportamento uniforme em toda sua extensão, situação que permite a definição de *variáveis de estado* que completamente caracterizem seu comportamento num dado instante de tempo. Tem-se, por exemplo, a velocidade e posição, associados a uma partícula em movimento no espaço. Por outro lado, existem sistemas onde esta uniformidade tipicamente não ocorre, sendo que as variáveis que o caracterizam não só variam ao longo do tempo, com também possuem valores diferentes associados a diferentes partes do sistema. Este é o caso, por exemplo, da temperatura ao longo de uma barra de tamanho finito, que é aquecida numa das pontas. A grandeza temperatura, no caso, variará não só no tempo como também entre posições distintas ao longo da barra. No primeiro caso, diz-se que o sistema apresenta um comportamento essencialmente *temporal*, enquanto no segundo caso, tem-se um comportamento *espaço-temporal*.

Na utilização do método científico, captura-se preferencialmente o comportamento de um sistema através da utilização de um *modelo* (einstein76). Todo modelo é, na verdade, uma abstração, onde apenas os fatores que sejam relevantes para a finalidade que se deseja são considerados. Por conseguinte, na comparação entre modelos, diz-se que um modelo é *mais* ou *menos* adequado que outro em relação aos objetivos que se desejam atingir com o estudo do sistema. Assim, se o objetivo é o de estimar o tempo de chegada de um avião num viagem transcontinental, pode-se considerar um modelo onde o avião se desloque com uma velocidade constante e uniforme. Por outro lado, este modelo

não é suficiente para as considerações que um controlador de vôo precisa fazer em sua missão de guiar com segurança o movimento simultâneo de vários aviões, evitando eventuais situações de colisão.

Em relação a sistemas físicos, usam-se *equações matemáticas* para representar os modelos. Sistemas de comportamento essencialmente temporais podem ser descritos por *equações diferenciais ordinárias* ou *mapas*, enquanto se utilizam *equações diferenciais participais* para sistemas com comportamento espaço-temporal.

A ciência dos séculos XIX e XX assistiu a coroação do método científico, utilizado em associação ao enfoque *reducionista*. Segundo este enfoque, os sistemas devem ser observados com um nível crescente de resolução na busca por seus constituintes “*elementares*”. Em decorrência, a matéria foi sucessivamente considerada como formada por moléculas, átomos, núcleos, quarks, que se constituem nos “tijolos” básicos de tudo que existe na Natureza e cujas iterações são mediadas por apenas três forças de interação fundamentais, que são a nuclear, a eletro-fraca e a gravitacional.

O conceito da utilização de modelos para previsões de comportamento do mundo físico está também ligado a filosofia do *determinismo laplaciano*. No início do século XIX Laplace introduziu o conceito de que “um matemático infinitamente inteligente seria capaz de prever com a certeza que desejasse o estado futuro de um sistema a partir de observações do estado atual e do conhecimento das leis da Natureza”. As conquistas da astronomia na predição dos movimentos futuros dos corpos de nosso sistema solar parecem fornecer sólidas evidências a favor do determinismo laplaciano (einstein76).

Por outro lado, a Natureza é pródiga em situações que levam ao limite o paradigma da utilização de modelos baseados no enfoque reducionista para predição de comportamentos futuros de um sistema. Será que seria possível, por exemplo, entender a origem dos terremotos usando-se modelos obtidos a partir do enfoque reducionista? A princípio, sim. Porém, para tanto, seria necessário atribuir condições iniciais à cada partícula elementar e inseri-las em um sistema de equações diferenciais de ordem extremamente elevada, cuja solução se mostraria inviável, mesmo se fossem usados todos os computadores existentes na busca de soluções numéricas (badii97,bak96).

A termodinâmica estendeu os horizontes dos conceitos de modelos e previsões quando introduziu o paradigma de se utilizar apenas variáveis que se mostrem relevantes para uma “suficiente” descrição do comportamento do sistema. Neste caso, obtém-se a descrição “suficiente” ou entendimento do comportamento do sistema através da utilização de variáveis macroscópicas. Assim, pode-se descrever e mesmo prever o estado de equilíbrio de um gás através da utilização das variáveis macroscópicas de estado pressão, volume e temperatura, que se relacionam através de uma equação, que é a “lei dos gases perfeitos”. Observe que neste situação a mudança do nível de descrição de microscópico para macroscópico permite não só a utilização de um modelo simples, tratável, como também recupera a possibilidade de se prever o comportamento futuro do sistema quando visto em relação a estas grandezas macroscópicas, que são associadas ao comportamento coletivo do sistema.

A termodinâmica se baseia em duas hipóteses fundamentais: (1) o sistema está em equilíbrio térmico e (2) a divisão do sistema em subpartes não ocasiona mudanças nas propriedades locais do sistema e suas subpartes. Esta segunda hipótese significa que se uma pequena parte do sistema for separada, as subpartes resultantes preservam as propriedades locais do sistema. É o caso de se tomar um recipiente com gás em equilíbrio e subdividi-lo com a introdução de uma parede. As partes resultantes preservam o valor de temperatura do sistema original.

Ainda no enfoque da termodinâmica, as propriedades de um sistema são subdivididas em propriedades intensivas e extensivas. As extensivas são proporcionais ao tamanho do sistema, como o volume, no caso do exemplo. Já as intensivas são justamente as que são independentes do tamanho e não variam mediante separações, como no caso da temperatura do exemplo. As propriedades intensivas são também consideradas como “propriedades locais”.

Difícilmente se verifica a hipótese de equilíbrio térmico no mundo que nos real. Este fato, porém, não impede que os princípios da termodinâmica sejam aplicados a sistemas que estão próximos da condição ideal. Como exemplo, considere um copo com água à temperatura ambiente. A este sistema pode-se medir a temperatura. Porém, ele não está em equilíbrio, uma vez que se esperarmos um tempo suficientemente longo, a água se transformará em vapor d’água, que se espalhará por todo o ambiente. O que permite a aplicação da termodinâmica ao mundo real é um outro conceito básico denominado de *separação de escalas de tempo*. Segundo este princípio, nossas observações de um sistema possuem uma resolução limitada de tempo, uma vez que são realizadas sobre um período limitado de tempo. Os processos que ocorrem num sistema podem ser separados em processos rápidos, que são muito mais velozes do que a escala de tempo de nossas observações, e processos lentos, que ocorrem em escalas de tempo muito maiores que a duração da observação. A termodinâmica se aplica apenas aos processos lentos e considera que todos os parâmetros do sistema descritos pelos processos lentos se mantêm fixos. Assim, diz-se que a termodinâmica descreve sistemas macroscópicos sem considerar estruturas ou dinâmica interna. O papel da termodinâmica é o de relacionar entre si poucos parâmetros macroscópicos que nos permitem caracterizar os processos lentos do sistema.

O conceito laplaciano de predição alterou-se de forma substancial com a introdução da mecânica estatística por Maxwell, Boltzman and Gibbs, na segunda metade do século XIX. A motivação para deixar de lado o ponto de vista laplaciano não foi o fato deste conceito estar errado, mas sim de se revelar inútil em vários casos, como no caso do exemplo da previsão de terremoto já mencionado. Quando se estuda este fenômeno do ponto de vista microscópico, seria necessário medir posições e velocidades associados a bilhões e bilhões de partículas e depois computar individualmente a trajetória de cada uma delas. Contorna-se esta dificuldade em determinados sistemas considerando-se que para sistemas compostos por um número muito grande de partículas, praticamente todas as condições iniciais associadas a um valor total de energia conduzem a um mesmo comportamento macroscópico do sistema. Dentro deste contexto, a tarefa de medir o estado associado a cada partícula não só é praticamente impossível, mas também desnecessário e inútil. Se desconsiderarmos as possibilidades associadas a algumas condições iniciais muito particulares – que implicam em comportamentos que ocorreriam com uma probabilidade extremamente baixa – o sistema sempre se comporta da mesma forma. Assim, segundo este enfoque, existem dois tipos de quantidades associadas a sistemas com grande número de partículas: (1) algumas quantidades podem ser previstas com certeza e sempre possuem um mesmo valor dentro de um pequeno intervalo (usualmente da ordem de  $N^{1/2}$  para um sistema com  $N$  graus de liberdade); (2) outras quantidades não assumem sempre um mesmo valor. Neste caso, aplica-se o conceito de *predição probabilística*. Tem-se um distribuição de probabilidade para grandes intervalos de tempo associada a possibilidade de se encontrar o sistema numa dada configuração, sendo que esta distribuição é independente das condições iniciais e pode ser predita. Por conseguinte, para efeito de previsão, calcula-se apenas a distribuição de probabilidade das variáveis e não a solução exata associada ao conjunto de condições iniciais.

Para se descrever um sistema em termos da mecânica estatística, assume-se peremptoriamente que os parâmetros do sistema que variam lentamente se mantêm fixos e que existem condições de equilíbrio associadas aos processos rápidos, i. e., assume-se que todos as possíveis combinações associadas aos processos rápidos ocorrem segundo uma distribuição fixa de probabilidade. Por conseguinte, dada uma certa equação de movimento, dentro da mecânica estatística calcula-se a distribuição de probabilidade associada a esta equação de movimento e suas propriedades.

Infelizmente, de uma certa forma, todos estes conceitos de predição possuem aplicação limitada quando se trata de determinados sistemas que, a princípio, vamos chamar de “complexos”. Na próxima seção vamos analisar o que acontece com alguns destes sistemas.

## Exemplos de Sistemas “Complexos”

Muitos fenômenos que nos rodeiam são ditos “complexos”. Vejamos o caso dos furacões. Um furacão é um intenso *ciclone tropical* de mesoescala, com ventos máximos constantes superiores a 119 km/h e que se forma sobre as águas quentes no nordeste do Atlântico e no leste do oceano Pacífico norte. A temporada de furacões ocorre no Atlântico Norte entre junho e novembro. Os furacões possuem um diâmetro médio de 600 km, podendo chegar até diâmetros de 1500 km. Os ventos giram em sentido ciclônico (em direção anti-horária no Hemisfério Sul e horária no Hemisfério Norte) para o centro do furacão. O centro, chamado de *olho*, caracteriza-se por uma pressão extremamente baixa, ventos leves e até uma calmaria com céu claro e nuvens esparsas em vários níveis. A pressão atmosférica diminui rapidamente para o centro. A velocidade dos ventos, a umidade e chuvas aumentam em direção ao centro, para então diminuir rapidamente. Uma *parede do olho* é um círculo de trovoadas intensas que giram diretamente adjacente ao olho e estende-se até quase a 15 km acima do nível do mar. As precipitações e ventos mais fortes ocorrem dentro de uma parede do olho. Um furacão é composta de uma massa de trovoadas organizadas que são importantes para a circulação da tempestade. Para ocorrer o desenvolvimento de um furacão é necessário a convergência de ventos na superfície. Furacões dependem de calor latente liberado durante a condensação de grandes quantidades de vapor d’água. O calor latente aquece o ar e supre flutuação para o levantamento.

Um ciclone tropical é provável de ocorrer quanto os seguintes fatores ocorrem simultaneamente:

1. Uma forte presença da força de Coriolis (latitudes 5° a 6°);
2. Superfície de água quente (pelo menos 27°) numa área suficiente para suprir ao ar grande quantidade de vapor d’água;
3. Atmosfera instável que se resfrie rapidamente com a altura para que seja potencialmente instável à convecção úmida;
4. Valores baixos de cisalhamento vertical de vento entre a superfície e a alta troposfera;
5. Um distúrbio pré-existente próximo à superfície, com vorticidade e convergência suficientes. Ciclones tropicais se formam a partir de sistemas levemente *organizados*, com rotação considerável e influxo nos baixos níveis.

Um furacão pode durar de poucas horas até três semanas e provocar consideráveis danos, que depende de sua intensidade, tamanho e da densidade populacional da área afetada. Daí ser altamente desejável a previsão da ocorrência de furacões. Entretanto, dado uma tempestade, devido aos complexos fenômenos não lineares presentes, os modelos não permitem prever se esta irá ou não se desenvolver até formar um furacão. Na época do ano onde estes costumam ocorrer (entre junho e novembro no Atlântico Norte), os satélites meteorológicos monitoram com atenção qualquer tempestade tropical, na expectativa de detectar e seguir circulações ciclônicas. Quando se detecta um furacão, ele passa a ser seguido e se utiliza de modelos matemáticos para prever sua trajetória. Entretanto, mesmo aí a capacidade de predição dos modelos é limitada, existindo incertezas num raio de 500 km para um período de antecipação de 5 dias, sendo comum o fato do furacão apresentar uma trajetória de se desvia de forma considerável da trajetória prevista. Assim, as estimativas de trajetória apresentam forte componente probabilística. Tem-se, por conseguinte, um sistema complexo, cuja previsão de comportamento “desafia” os modelos.

Outro exemplo de fenômeno complexo são os *tornados*. Embora ambos sejam vórtices atmosféricos, eles tem muito pouco em comum com os furacões. Os tornados possuem diâmetros de centenas de metros e são produzidos por uma única tempestade convectiva. Já os ciclones tropicais têm diâmetros da ordem de centenas de quilômetros, sendo comparável a dezenas de tempestades convectivas. Além disso, os tornados requerem um forte cisalhamento vertical do vento para sua formação. Eles são fenômenos primariamente continentais, de modo que o aquecimento solar sobre o continente usualmente contribui favoravelmente para o desenvolvimento da tempestade que dá início ao tornado. Os tornados ocorrem em condições violentas de tempestade, onde ventos correm em diferentes direções dentro de um poderoso redemoinho, que joga o ar para longe do centro, deixando no meio um miolo da baixa pressão. Neste miolo de baixa pressão, os ventos podem alcançar 500 km/h ou mais. A violenta rotação do ar cria um funil com forte poder de sucção. A parte de cima de um tornado é esbranquiçada, enquanto a parte de baixo é escura devido as partículas que carrega e os destroços de pedras, árvores e até mesmo pedaços de carros e prédios. Quando a parte de baixo do funil toca o chão, as partículas funcionam como se fossem uma serra, cortando tudo em que toca. Em comum com o furacão está a extrema dificuldade de se prever quando ocorrerá e a trajetória que seguirá, uma vez formado. No caso dos tornados, este problema de dificuldade de previsão é crítico ao extremo, uma vez que são fenômenos que se desenvolvem de uma forma extremamente rápida, ocasionando muita destruição, em especial quando se formam em áreas habitadas. A capacidade de previsão associada aos modelos é extremamente reduzida, sendo, por conseguinte, um fenômeno extremamente complexo.

Já os relâmpagos consistem de uma descarga elétrica transiente de elevada corrente elétrica através da atmosfera. Essa descarga é consequência das cargas elétricas acumuladas, em geral, em nuvens cumulonimbus e ocorre quando o campo elétrico local excede localmente o isolamento dielétrico do ar. Os relâmpagos são classificados segundo suas formas de ocorrência como relâmpagos nuvem-solo, solo-nuvem, entre-nuvens, intranuvens, horizontais e para a estratosfera. Os relâmpagos nuvem-solo podem provocar grandes prejuízos no solo e pode se apresentar constituído de múltiplas descargas consecutivas, que geram efeitos dielétricos recorrentes. Não existem modelos que possam prever o local de ocorrência de um relâmpago. Se existissem, permitiriam que a energia gerada por eles pudessem ser armazenadas. Mesmo os modelos matemáticos revelam formas geométricas que pouca aparência possuem com os relâmpagos reais. Tem-se, por conseguinte, um fenômeno altamente complexo em todos os sentidos.

O planeta Júpiter é um mundo cercado de fenômenos fascinantes. Muitos deste mistérios foram analisados com riqueza de detalhes graças a sonda espacial Galileo que, desde julho de 1995, orbita o sistema formado por Júpiter e

seus vários satélites. Um dos mistérios mais interessantes é o da *Grande Mancha Vermelha*, que é observável no hemisfério Sul do planeta gigante. Esta enorme mancha vermelho-alaranjada foi relatada pela primeira vez em 1664, pelo inglês Robert Hooke. É associada a uma gigantesca tempestade ciclônica que, diferentemente das que acontecem na Terra, parece ser permanente. Estudos recentes evidenciam, contudo, que a forma e a dimensão desta mancha vem se alterando ao longo do tempo, sendo que hoje possui cerca da metade da dimensão que tinha em 1880. Esta diminuição foi evidenciada após vários registros históricos e imagens contemporâneas obtidas, em especial, pelas sondas Voyager e Galileo. Assim, segundo estes estudos, em 1900 a mancha ocupava cerca de 35 graus de largura, o que corresponde a mais de três vezes o tamanho da Terra. Já os dados provenientes das sondas Voyager indicaram que em 1979 a mancha se estendia por cerca de 21 graus. No entanto, a sua dimensão que diz respeito à “altura” não tem sofrido alterações significativas, sendo estimada em aproximadamente 12000 km. Os efeitos que levam a este interessante fenômeno permanecem desconhecidos, muito embora tenham sido desenvolvidos modelos de fluidos que permitem explicar parcialmente a formação deste perene fenômeno. Outro fato interessante é que a cor da mancha se intensifica de tempos a tempos, para depois empalidecer. Algumas observações históricas indicam que a Mancha Vermelha aumenta e diminui de tamanho numa seqüência de décadas. Uma explicação possível para este possível fato residiria no irromper periódico de “tempestades”, causadas pela convecção de material que fornecem energia à camada sobrejacente de nuvens, o que poderia provocar o aumento do tamanho da mancha. Posteriormente, de uma forma gradual, a mancha iria diminuindo à medida que a turbulência abranda.

O sistema de anéis de Saturno faz do planeta um dos mais belos e complexos objetos do nosso sistema solar. Eles estão em 5 partes, denominados de Anel D, Anel C, Anel B, Divisão (ou falha) de Cassini, Anel A (composto por vários anéis e pela divisão de Encke), o Anel F, Anel G e Anel H, sendo o F o mais brilhante. A sua origem é desconhecida. Acredita-se que tenha se formado a partir de satélites destruídos por impactos e colisões com outros corpos maiores, como asteróides e cometas. O sistema de anéis possui menos de 1 km de espessura, porém se estende por cerca de 420000 quilômetros acima da superfície do planeta. Embora pareçam contínuos visto da Terra, são na verdade formado por milhares de pequenas partículas de diversos tamanhos, que variam desde alguns centímetros até vários metros. Estas partículas experimentam um complexo movimento dinâmico, que as faz circular no interior dos anéis, preservando, entretanto, a estabilidade. Esta estabilidade também se deve a presença das chamadas “luas pastoras”, que orbitam nas extremidades dos anéis e cujos efeitos gravitacionais contribuem para manter as bordas dos anéis distintas entre si. Os modelos matemáticos sugerem que sem estas luas, as partículas dos anéis tenderiam a se espalhar. Além disso, quando dois satélites orbitam em ambos os lados de um anel, este se mantém restrito entre eles numa banda estreita. Os anéis apresentam inúmeras estruturas em todas as escalas de ampliação que se observe, estruturas estas cuja formação não é bem compreendida. Dentre estas estruturas destacam-se a presença de ondas de padrões, falhas pequenas e grandes e acúmulos de matéria imersos no interior dos anéis. Júpiter, Urano e Netuno também possuem anéis, mas configuram um sistema bem mais simples e menos impressionante do que o de Saturno.

Todos estes sistemas são exemplos de sistemas físicos que se caracterizam por uma complexidade extrema, que desafiam o emprego de modelos para previsão de comportamento. Outra área marcada pela presença de sistemas altamente complexos é a biologia. Os sistemas biológicos apresentam uma estrutura de hierarquia onde padrões complexos se mostram presentes em todas as escalas em que se estude os sistemas. Estes sistemas são marcados pela existência da auto-organização e da adaptabilidade a modificações ambientais. Tipicamente, estes sistemas se organizam em torno de atratores, que originam a robustez que eles apresentam a alterações do ambiente. Contudo, quando mudanças em ecossistemas ocorrem, podem ser rápidas e ter conseqüências muitas vezes catastróficas. Freqüentemente, o que ocorre é uma situação de multi-estabilidade, onde vários possíveis estados estáveis coexistem. O estado corrente que o sistema ocupa advém de uma certa evolução histórica, o que significa que não existiria um estado correto ou natural, mas uma sensibilidade extrema a condição final. Também estão presentes nos sistemas biológicos padrões que interagem mutuamente, gerando estruturas de uma complexidade marcante, onde espécies coexistem, evoluem, algumas se extinguem outras se adaptam através de transições complexas. Esta diversidade de comportamento indica que a utilização de modelos objetivando previsões de comportamento é extremamente difícil.

Exemplos de sistemas biológicos complexos podem ser encontrados na Floresta Amazônica e sua complexa biodiversidade que, em função dos diversos ciclos das águas e clima, apresentam hierarquias diversas de auto-organização. Este quadro se encontra por várias escalas. Desde as águas-vivas, onde uma diversidade de seres convivem cumprindo funções específicas que se completam, até as vitórias-régias, pássaros e mamíferos. Dentre todos os sistemas complexos, a vida representa a situação superlativa extrema.

O próprio homem contribui para criar sistemas de uma complexidade impressionante, que se adaptam e reagem de diferentes formas às interações como o meio ambiente, gerando padrões, estruturas e comportamentos auto-organizados. Seja o caso dos computadores, onde o sistema operacional responde pela funcionamento e interação entre diversos subsistemas, o caso das sondas espaciais, como a Galileu, onde complexos subsistemas coexistem e se adaptam, perfazendo um sistema admirável que se adapta ao meio-ambiente hostil do espaço exterior e cumpre seu papel de enviar informações à terra em meio a admiráveis manobras em sua trajetória.

Outro exemplo de sistema complexo criado pelo homem que merece ser destacado é o caso da evolução nos desfiles das escolas de samba. Este é um exemplo onde padrões internos geram estruturas que se auto-organizam, compondo uma beleza plástica e artística, que responde ao estímulo harmônico do samba enredo. Tem-se um verdadeiro ser coletivo que resulta da iteração altamente hierarquizada de seus componentes.

## Universalidade por trás dos sistemas complexos

Apesar de apresentarem um comportamento complexo, leis ditas “universais” de comportamento são encontradas nestes sistemas. Todo o esforço da ciência se baseia na convicção da existência destas leis, que seriam aplicáveis a classes de sistemas, independente ou não de serem complexos (badii97). O grande desafio da ciência é o de identificá-las (bak96)

Um exemplo delas é a chamada lei de Gutenberg-Richter. Em 1935 o sismologista Chales Francis Richter introduziu sua agora famosa escala que permite a medição da magnitude dos terremotos. A partir de extensivas medidas, chegou-se a conclusão de que durante determinado período de tempo o número de terremotos de pequena magnitude é muito maior que o de grande magnitude. Além disso, determinou-se que o número de terremotos de magnitude  $M$  é proporcional a  $10^{bM}$ . Esta lei de potência é denominada de lei de Gutenberg-Richter, devido ao nome do próprio Richter e de seu orientador, Beno Gutenberg. Nesta lei de potência, o valor de  $b$  varia de área para área, tendo,

entretanto, um valor próximo de 1. Muito embora esta lei não permita determinar nem quando, nem onde um terremoto irá ocorrer, é possível medir os diversos pequenos tremores em um área e, a partir destes dados, estimar a taxa de ocorrência e a magnitude dos tremores de maior intensidade, que são menos frequentes (stehna01).

No caso dos grande terremotos, a *Lei de Gutenberg-Richter* indica que dentro de um determinado período se houver 1000 terremotos de uma certa energia, ocorrerá também 100 terremotos de intensidade dez vezes maior, 10 de intensidade cem vezes maior e 1 de intensidade mil maior, aproximadamente. Da mesma forma, caso os simologistas detectam a existência de 100 terremotos de uma certa magnitude dentro de um período de 10 anos, pode-se estimar que dentro de um período de 100 anos deve ocorrer um único terremoto de intensidade mil vezes maior, em média.

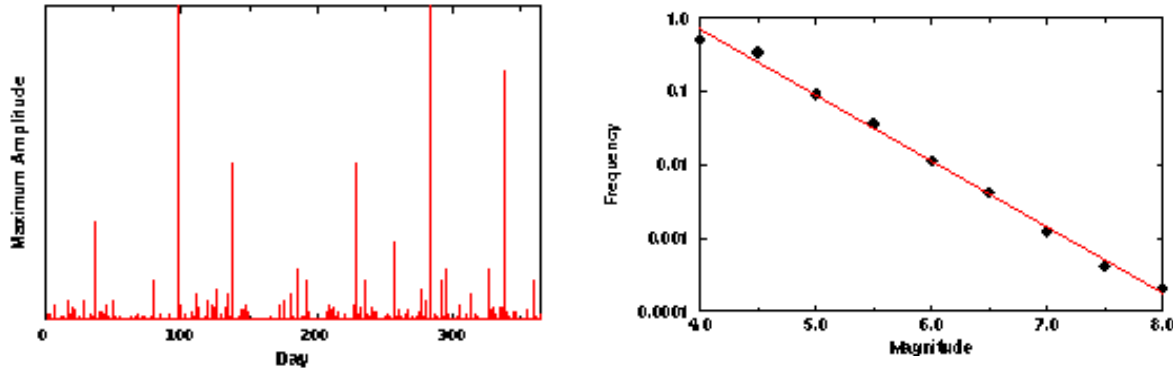


Figura 1. Distribuição de terremotos em São Francisco no ano de 1996.

Estudos subseqüentes determinaram que esta mesma distribuição de potência se aplica no caso da ocorrência de avalanches, relâmpagos, explosões solares, quebras da bolsa de valores e a fenômenos que surgem quando um sistema responde às alterações das condições externas através de eventos discretos e impulsivos que abrangem uma ampla escala de valores.

Outro exemplo da manifestação de leis universais numa ampla classe de sistemas está relacionado ao aparecimento da forma hexagonal na Natureza. Os hexágonos surgem de forma ubíqua a nossa volta. As células das colmeias, agrupamento de bolhas de sabão, filamentos das fibras de cabos supercondutores, entre outros. Isto pode ser explicado pelo fato do empacotamento hexagonal ser a forma mais eficiente de se agrupar um número máximo de objetos num espaço o mínimo possível. Contudo, o formato hexagonal também ocorre no formato das células da parte mais sensível da retina, na organização dos cristais de gelo e aparece em padrões associados a experimentos em óticos não linear, ondas superficiais em fluidos sujeito a determinados níveis de vibrações e experimentos químicos (bak96).

## O Estudo dos Sistemas Complexos

O estudo dos Sistemas Complexos pode ser visto como um esforço concentrado na direção de aumentar nossa capacidade de entender e identificar as propriedades universais que surgem na Natureza. Observe que a crença na existência desta universalidade é uma extensão ou evolução natural da visão do próprio determinismo laplaciano em direção a horizontes mais amplos. Os mesmos blocos básicos que constituem a matéria e cujas interações são regidas por três forças universais, sob determinadas circunstâncias, se organizam e dão origem a classes de sistemas complexos que apresentam comportamentos universais idênticos. Assim, em relação a estes sistemas, ao invés de se procurar por uma teoria onipresente que explique o comportamento dos sistemas complexos, o que se procura é dirigir a atenção para classes bem definidas de sistemas que apresentem características típicas de comportamento. Por conseguinte, uma classificação dos sistemas complexos em classes que revelem comportamento semelhante se revela com uma etapa fundamental e preliminar (badii97,bak96).

No enfoque tradicional da ciência, o entendimento está associado a existência de modelos precisos para a descrição comportamental de sistemas. No caso dos Sistemas Complexos, procura-se utilizar um conjunto de esquemas de redução de informação que permitam não só identificar as uniformidades de comportamento dentro de diversas classes, como também ,a partir do comportamento, classificar os sistemas em diferentes classes de similaridade. A partir destes esquemas, surge a possibilidade de se conceber novas representações que permitam o entendimento dos fenômenos da Natureza. Estes esquemas de redução e consolidação de informações também envolvem o uso de técnicas desenvolvidas nas mais diversas áreas do conhecimento(cvitanovic89), incluindo métodos estatísticos, redes neurais, lógica matemática, teoria da informação, métodos de renormalização, entre outros. O propósito é o de extrair princípios gerais, que podem assumir diferentes formas.

Contudo, o estudo de princípios gerais das classes de sistemas complexos não substitui uma descrição detalhada e particular a cada sistema complexo. Em geral, cada sistema complexo é uma individualidade e, por conseguinte, possui sua dinâmica particular. Porém, os princípios universais guiam e mesmo simplificam as investigações, inclusive no estudo das especificidades. É interessante verificar que em muitas áreas e situações estes princípios universais se apresentam como intuitivos, não formalmente estabelecidos. Uma cuidadosa elaboração deles permite que sistemas específicos sejam perscrutados de uma forma sistemática e unificada que facilite o entendimento.

Todos os enfoques tradicionalmente usados no estudo dos sistemas simples podem ser aplicados no entendimento dos sistemas complexos. Entretanto, deve-se entender, num sistema complexo não apenas o comportamento de suas partes, mas como estas partes agem em conjunto para gerar o comportamento do todo. Isto significa que embora não se possa descrever o comportamento do todo sem a descrição de cada uma de suas partes, o comportamento de cada parte precisa ser descrito em relação a suas interações com as outras partes. Assim, os métodos tradicionais usados no estudo dos sistemas simples devem ser modificados de forma a também captar e de forma adequada os mecanismos de interação presentes nos sistemas complexos.

É interessante verificar que por muitos anos se assistiu a uma crescente especialização profissional, que levou a um progressivo isolamento das diversas áreas da ciência. Em decorrência, foram desenvolvidos métodos e enfoques particulares a cada área. O estudo dos Sistemas Complexos requer e mesmo impõe uma mudança radical neste enfoque isolacionista, pois compreende um esforço conjunto que envolve todas as áreas do conhecimento numa proveitosa interação, de forma a desenvolver métodos de análise particulares para integrá-los em estratégias que mesmo considerando as partes, também consolidem a interação entre elas na diferenciação do comportamento de conjunto do todo. Tem-se, por conseguinte, diante do desafio representado pelo entendimento dos Sistemas Complexos, um verdadeiro movimento de unificação entre as diversas áreas da ciência.

## Surgimento das características de Sistemas Complexos

Para se entender o comportamento dos sistemas complexos, é necessário compreender como suas diversas partes agem em conjunto de forma a produzirem o comportamento do todo. Dentro deste cenário, surgem fenômenos coletivos e propriedades que não estão presentes nas partes quando analisadas em separado.

Muitas destas propriedades são caracterizadas como *padrões* (*badii97, poon95, lodahl00*). De uma maneira geral, um padrão pode ser visto como uma estrutura que se repete no espaço e/ou no tempo e pode servir como uma espécie de molde para a descrição de um comportamento do sistema. Num sistema complexo, as interações locais podem gerar padrões cuja dinâmica se desenvolve por várias escalas de espaço e de tempo. São exemplos deles o surgimento de ondas, ondas espirais, vórtices, formas estacionárias no espaço, entre outros, assim como as transições entre estes diversos modos. Mais adiante apresentaremos com algum detalhe exemplos destes comportamentos. Muito do estudo dos sistemas complexos se relaciona a entender como estes fenômenos se formam e evoluem no tempo.

As interações locais nos sistemas complexos se acoplam tanto de forma direta, como de forma indireta. Surgem complexas *correlações de comportamento*, tanto associadas ao tempo, quanto ao espaço. Como consequência, o conceito da *separação de escalas* em geral não se aplica. Este conceito preconiza que nossas observações dos sistemas da Natureza possuem resolução de tempo definida e são realizadas sobre uma janela limitada de tempo. Em decorrência, captam-se três tipos de processos – os lentos, os dinâmicos e os rápidos – que podem ser tratados de forma diferente e independente entre si. Assim, os processos lentos são vistos como estáticos, sendo que todos os parâmetros a eles relacionados podem ser mantidos fixos. Os processos dinâmicos são aqueles que são tratáveis dentro do enfoque reducionista do determinismo laplaciano. Já os processos rápidos são aqueles que requerem a utilização de médias estatísticas. Num sistema não complexo, usa-se o conceito de separação de escalas de tal forma que se considera a influência das médias oriundas dos processos rápidos sobre os processos dinâmicos, enquanto se assume que os processos lentos implicam em parâmetros considerados fixos. Esta é a forma clássica de tratar a Natureza.

Num sistema complexo o que ocorre é que as diferentes escalas de comportamento presentes se tornam acopladas. Como consequência, podem surgir estruturas auto-similares que se revelam por várias escalas, muitas vezes representadas por uma estrutura fractal. Para que uma propriedade se mostre relevante por várias escalas, esta tipicamente assume um comportamento descrito por uma *lei de potência*  $f(x) \propto x^a$ . Uma função que apresenta um comportamento de uma lei de potência pode também ser caracterizado pela *lei de escala*  $f(ax) = a^a f(x)$ . Isto significa que se caracterizarmos o sistema numa determinada escala, então em uma escala de amplificação de um fator  $a$  o comportamento será semelhante, porém amplificado por um fator  $a^a$ . Quando o expoente da escala é um número não inteiro, a função  $f(x)$  é não analítica. Não analiticidade é frequentemente uma indicação de que uma propriedade não pode ser tratada considerando que se torna suave em pequenas ou grandes escalas. Precisa, por conseguinte, ser considerada em todas as escalas (*badii97*). Entretanto, um expoente de escala fracionário não é necessário para que um escalonamento tipo lei de potência se aplique.

Pode acontecer que uma propriedade siga uma lei de potência, mas que seu comportamento não se mostre presente por sobre uma ampla faixa de escalas. Isto eventualmente ocorre devido ao aparecimento de um novo comportamento numa escala maior. Esta mudança se caracteriza por uma região de superposição de comportamentos nas propriedades da escala de  $f(x)$ . Um exemplo seria um comportamento de escala descrito por  $f(x) = A_1 x^{a_1} + A_2 x^{a_2}$ . Caso  $A_1 > A_2$  e  $a_1 < a_2$ , o primeiro termo domina em escalas menores e o segundo em escalas maiores.

Existem três enfoques relativos a aplicação do conceito de escalas a um modelo ou sistema físico. O primeiro enfoque considera  $x$  como o tamanho físico do sistema ou a quantidade de matéria que ele contém. Em decorrência,  $f(x)$  é uma propriedade que varia à medida que o tamanho do sistema se altera. No outro enfoque, mantém-se o sistema, mas altera-se as escalas de observação. Assume-se que nossa habilidade de observar o sistema possua um limite associado à escala de observação em relação ao discernimento de detalhes. Neste caso,  $x$  representa a menor escala em que se consegue observar variações na estrutura do sistema. No terceiro enfoque, considera-se o relacionamento entre uma determinada propriedade medida num localização física do sistema e esta mesma propriedade quando medida numa outra localização, separada da primeira por uma distância  $x$ . Agora, a função  $f(x)$  representa uma *correlação* associada às grandezas mensuráveis do sistema em função da distância entre diferentes regiões.

As características próprias de sistemas complexos surgem em diversas situações. Estas características muitas vezes aparecem em cenários previsíveis, como quando se formam sistemas a partir da associação de subsistemas que por si só já apresentam comportamentos complexos. É o caso de muitos sistemas criados pelo próprio Homem, como aviões, sondas espaciais, veículos espaciais, computadores, entre outros. Também este é o cenário que se desenvolve em inúmeros sistemas naturais e mesmo no aparecimento da propriedade que chamamos de *vida*. No sentido inverso, muitas vezes as subpartes de um sistema complexo são também complexas. Seja o caso do sistema Terra, que pode ser subdividido em várias partes complexas por si só, tais como clima, oceano, subsistemas ecológicos, florestas, animais etc. Por outro lado, a composição de sistemas de dinâmica simples pode resultar num sistema coletivo de comportamento complexo. Os autômatos celulares talvez representem o melhor exemplo representativo desta categoria.. Eles são constituídos de conjuntos ordenados de “células” que podem assumir cada uma dois estados distintos e interagem com seus vizinhos através de regras simples de mudança dinâmica de estado. A evolução temporal destes sistemas pode gerar padrões impressionantes de comportamento.

No extremo oposto, sistemas descritos por equações bem simples são passíveis de apresentarem comportamentos complexos, com é o caso do que se observa nos conjuntos de Mandelbrot e em sistemas multiestáveis simples sujeitos à presença de ruído.

O que se verifica é que, de alguma forma, surgem comportamentos coletivos que permitem classificá-los como sistemas complexos. Como, quando e de que forma estes comportamentos se desenvolvem são os mais simples e, ao mesmo tempo, mais profundos problemas com os quais o estudo dos sistemas complexos se defronta.

## Emergência Global

O fenômeno do aparecimento de propriedades de comportamento coletivo a partir da interação e relacionamento entre as partes internas do sistema é denominado *emergência*. Existe, contudo, uma diferença fundamental entre *emergência local* e *emergência global*. No primeiro caso, o comportamento coletivo aparece mesmo em pequenas partes em que se subdivide o sistema. Já na *emergência global* as propriedades coletivas resultam do comportamento do sistema como um todo e é justamente o fenômeno que responde pelo aparecimento das características que nos fazem classificar um sistema como complexo.

Fala-se em emergência quando se considera um conjunto de elementos e as propriedades associadas ao comportamento coletivo destes elementos. Na física clássica, estas propriedades são estudadas no contexto da termodinâmica e da mecânica estatística. Considere, como exemplo, um sistema constituído de um gás em equilíbrio térmico contido num recipiente. Tanto a pressão, quanto a temperatura são propriedades emergentes deste sistema. Estas propriedades são consideradas emergentes pelo fato de não resultarem naturalmente da descrição dinâmica das partículas que constituem o gás. Individualmente, estas partículas são descritas em relação as suas posições e velocidades. Porém, tanto a pressão, quanto a temperatura só se tornam relevantes quando se considera um conjunto constituído de muitas partículas de gás. Por outro lado, embora sejam propriedades emergentes, elas o são de uma forma circunscrita, uma vez que podem ser consideradas propriedades *locais* do gás. Se este recipiente for subdividido por uma divisória física, os subsistemas resultantes preservam os mesmo valores de pressão e temperatura do sistema original, independente de quão pequena seja uma destas subdivisões. Em decorrência, estas propriedades, denominadas pela física como *intensivas*, são consideradas *propriedades emergentes locais*. Outros exemplos de comportamento emergente local são os modos coletivos de excitação, tais como ondas sonoras ou a propagação da luz num meio, transição de fase, formação de substância química a partir de seus elementos constitutivos, entre outros.

No estudo dos sistemas complexos, o que se torna de interesse são as *propriedades emergentes globais*. Estas propriedades são associadas ao sistema como um todo e aparecem devido as múltiplas correlações tanto diretas quanto indiretas dos diversos elementos que integram o sistema. Neste cenário, as correlações indiretas e de longo alcance têm uma importância fundamental. Sem elas, as propriedades emergentes globais não surgem.

O clássico exemplo destas propriedades globais é o caso das memórias associativas, constituídas a partir de redes neurais artificiais. Seja o caso de um rede de Hopfield. Forma-se esta rede a partir de elementos binários simples, que admitem apenas ou o estado 1 ou o 0, e que se interligam numa configuração de rede. Estes elementos interagem entre si de forma a criarem correlações nos padrões de mudança de estado. As interações provêm das sinapses entre os diversos elementos da rede. Dado um conjunto pré-selecionado de padrões, é possível configurar as interligações de forma que estes padrões correspondam a estados auto-consistentes da rede, o que significa que a rede transita para um estado estável e atrativo mediante a presença de um destes padrões, funcionando assim como se fosse uma memória. Esta memória é robusta à presença de erros nos padrões previamente armazenados e mesmo a eventuais mudanças em alguns dos elementos constitutivos. Além disso, permite a recuperação do padrão armazenado mesmo se for excitada com apenas uma versão incompleta do padrão armazenado.

Neste exemplo, as informações são armazenadas na rede como um todo. Associados a elas não existem posições de memória endereçáveis. Os padrões não ficam armazenados num elemento particular, mas sim na rede como um todo, como propriedade que surge em decorrência das sinapses. Porém, se tomarmos a rede e dela removermos uma pequena parte, esta pequena parte conteria apenas um fração do número de sinapses da rede original. Além disso, a partir desta pequena parte não se consegue recuperar o padrão que foi armazenado na rede toda, assim como, também pode ocorrer da própria parte da rede maior remanescente ter sua capacidade de recuperar padrões prejudicada.

Este tipo de comportamento caracteriza uma *propriedade emergente global*. Veja que não se consegue estudar estas propriedades subdividindo-se o sistemas e analisando separadamente suas partes, ou seja, o método do reducionismo não se aplica. O sistema precisa ser estudado considerando-o como um todo e o efeito que cada parte tem no contexto do sistema como uma entidade coletiva e global. Assim, quando um sistema apresenta propriedades emergentes globais, o comportamento de uma pequena parte dele quando isolado do todo é diferente de seu comportamento quando atua no contexto do sistema.

Olhando-se o sistema como um todo, ao invés de pequenas partes dele, identifica-se que estas propriedades emergentes globais resultam da *interdependência* entre seus elementos. Note que este termo tem um sentido diferente e mais amplo do que os termos “interconectado” e “interação”, uma vez que engloba tanto os vários efeitos de correlação direta como indireta entre as múltiplas partes do sistema.

## Sistemas Complexos Auto-Gerados

O comportamento de um Sistema Complexo surge, em geral, a partir de dois mecanismos distintos. Num deles, resulta de muitos estímulos quase independentes, tanto internos, quanto externos. É o caso dos sistemas que resultam da associação entre vários elementos, que podem ser iguais ou distintos entre si. Este mecanismo é o responsável, por exemplo, pela complexidade do cérebro, onde vários tipos diferentes de neurônios comunicam-se entre si quimicamente usando um número grande de neurotransmissores. Além disso, os neurônios também se comunicam através da ação de potenciais elétricos, cujo conteúdo da informação possivelmente depende da geometria dos diferentes neurônios. Da mesma forma, este é o mecanismo que responde pelos sistemas complexos vida, satélites, aviões, planeta Terra, entre outros (badii97).

No outro mecanismo, as propriedades de um sistema complexo surgem a partir de condições iniciais genéricas e sem estrutura, como o resultado da ação de regras dinâmicas simples. Nestes sistemas surgem espontaneamente padrões, que evoluem no tempo e no espaço. Sistemas assim são denominados *Sistemas Complexos Auto-Gerados* e são justamente eles que estamos interessados em estudá-los e caracterizá-los neste artigo. Eles surgem em decorrência de vários tipos de quebra de simetria ou correlações indiretas de longo alcance, como se verá nas seções seguinte. Além disso, a relevância dos fenômenos associados a estes sistemas e o fato de muitas de suas propriedades terem caráter de

universalidade faz com que os sistemas complexos auto-gerados sejam estudados como paradigmas para a compreensão e caracterização dos sistemas complexos (badii97).

Na seção seguinte vamos examinar alguns dos exemplos mais citados destes sistemas e analisaremos suas características principais. Todos estes exemplos tem em comum o fato de apresentarem interações com o meio-ambiente. Estas interações tomam a forma de fontes e sorvedouros de energia e implicam no aparecimento de *gradientes* de calor, pressão ou concentração de componentes no interior do sistema. Estes gradientes tiram o sistema de sua condição inicial de equilíbrio e o conduzem através de uma seqüência de diferentes estados, que vão sucessivamente perdendo suas estabilidades frente a alterações de determinados parâmetros de controle. No decorrer desta evolução dinâmica surgem comportamentos espaço-temporais periódicos, aperiódicos e formação de padrões. Todos estes comportamentos são, em última análise, conseqüência das características de não linearidade da resposta destes sistemas a amplitudes de perturbação suficientemente intensas.

## Experimento de Rayleigh-Béarnard

No experimento de Rayleigh-Béarnard (RB), toma-se um recipiente em forma de paralelepípedo de valor de razão de aparência baixo (i.e.,  $I=w/h < 1$ ), conforme descrito na figura 2, e aplica-se um gradiente de temperatura positivo  $\mathbf{b}=(T_0 - T_1)/h$  entre as placas de baixo (0) e de cima (1) do paralelepípedo, que está preenchido com um líquido. Devido a este gradiente de temperatura, pode-se expressar a temperatura ao longo da direção  $x$  como sendo  $T(x)=T_0 - \mathbf{b}x + \mathbf{q}(x)$ , onde  $\mathbf{q}(x)$  descreve as flutuações em torno do valor do campo de temperaturas no regime de *condução pura*. Esta situação é um tanto quanto instável. Isto pelo fato de uma gota quente possuir uma densidade menor do que sua redondeza. Em decorrência, ela bóia para cima. Ao fazer isto, esta gota vai penetrando em regiões cada vez mais frias, cujas densidades são cada vez maiores. Em conseqüência, continua em seu movimento ascendente. Assim, flutuações iniciais de temperatura terminam por serem amplificadas. Este efeito de desestabilização é contrabalançado pela dissipação viscosa do fluido e pela difusão da temperatura da gota para o fluido. Entretanto, se o gradiente de temperatura  $\mathbf{b}$  assumir um valor superior a determinado limite  $\mathbf{b}_c$ , o fenômeno da convecção passa a ser predominante no interior do sistema. Neste novo regime, o fluxo desenvolve padrões na forma de rolos paralelos (cilindros), através dos quais elementos de fluido quentes saem da placa inferior e alcançam a placa superior, onde perdem calor e descem novamente em direção a placa inferior (veja figura 2). Estes rolos possuem um comprimento de onda espacial fixo dado por  $I_c \gg 2h$ , de tal forma que a amplitude  $A(t)$  do campo de temperatura em  $h/2$  pode ser descrito como sendo dado por  $\mathbf{q}(x;t;z=h/2) \gg A(t)\cos(x/I_c)$ . O valor de amplitude  $A$  cresce a partir de zero, quando  $\mathbf{b}$  aumenta além de  $\mathbf{b}_c$ . Se o valor de razão de aspecto  $I$  for pequeno, o que significa que comporta apenas um pequeno número de rolos, o movimento convectivo preserva a coerência espacial, enquanto a evolução temporal se altera, de acordo com o valor de  $\mathbf{b}$  apresentando comportamento que vai de inicialmente periódico até aperiódico, com características de movimento caótico, seguindo a chamada *rota de bifurcação de períodos* para o caos (veja figura 2) (libchaber82,couillet78)). Esta rota de transição para o caos possui a propriedade da universalidade, sendo verificada em sistemas experimentais tão diversos como lasers, circuitos eletrônicos, fluidos, vibrações elásticas, entre outros (feigenbaum78,feigenbaum79).

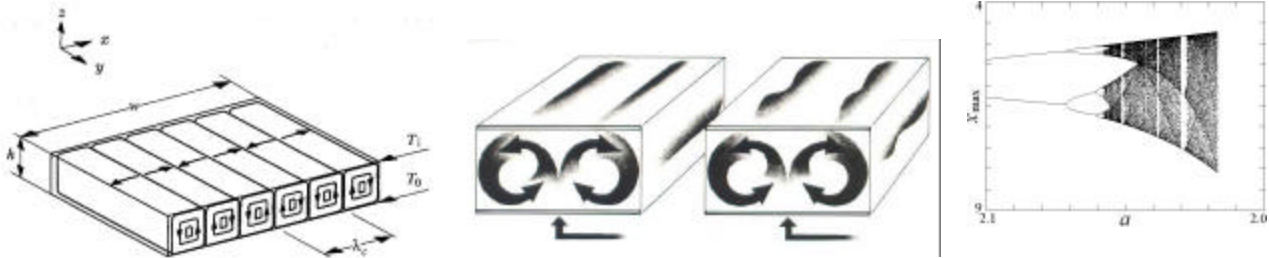


Figura 2. Da esquerda para a direita: esquema do experimento de Rayleigh-Béarnard; aparecimento de comportamento periódico; diagrama de bifurcação do sistema

Neste contexto caracterizado por uma evolução caótica, o comportamento temporal complexo pode surgir associado a coexistência de diferentes possíveis estados assintóticos estáveis (comportamento multiestável) associados a presença de ruído.

## Sistemas Complexos Espaço-Temporais

Sistemas semelhantes ao descrito na seção anterior, porém com um valor de razão de aparência elevado (i.e.,  $I=w/h > 10$ ) são denominados *fracamente confinados* ou *estendidos*. Quando sujeitos a gradientes de energia, eles têm a tendência de desenvolverem movimentos espaço-temporais irregulares mesmo para valores do parâmetro de controle para os quais se verificaria um comportamento estável se o sistema fosse confinado, (i.e.,  $I=w/h < 1$ ). Nestes sistemas, o comportamento dinâmico resulta de uma competição entre diferentes padrões básicos que coexistem no espaço. A forma destes padrões depende de parâmetros de controle próprios do sistema, tais como números de Rayleigh, Prandtl e Nusselt, que se relacionam às propriedades características dos fluidos e do recipiente. Assim, são possíveis transições para vários tipos diferentes de regimes, tais como padrões estacionários de convecção com células hexagonais, cruzamento e interseção de rolos de convecção, compressão-dilatação de comprimentos de onda, deriva, zig-zag, entre outros. A competição entre os diferentes padrões resulta na nucleação de *muros de domínio*, que são fronteiras entre diferentes movimentos ordenados, e de *defeitos*, que são pontos singulares das ondas de padrão que apresentam propriedades semelhante a de partículas. Ao longo do tempo, os defeitos são criados, se movem, interagem entre si e são aniquilados. Já os padrões de movimentos ordenados apresentam comportamentos que parecem independentes uns dos outros, ou seja, sem correlação aparente (lodahl00,thomas98).





Figura 3. Padrões que surgem associados a manifestação do comportamento de caos espaço-temporal

Quando se aumenta mais ainda as forças externas, o sistema tende a evoluir para uma situação de caos espaço-temporal, onde não mais se observam a ocorrência de padrões. Os experimentos físicos e computacionais envolvendo estes sistemas parecem indicar que apenas alguns poucos tipos bem definidos de bifurcações são os mecanismos de transição do regime uniforme para o de caos espaço-temporal.

As características de complexidade aqui não estão apenas associadas à dificuldade em se achar um modelo dinâmico apropriado para estes sistemas, que permita prever o comportamento futuro. O que ocorre é que mesmo uma descrição em termos de grandezas estatísticas é extremamente difícil de ser feita, pelo fato dos padrões, em geral, não apresentarem nem comportamento periódico, nem quaseperiódico e inexistir uma correlação entre regiões cujo comportamento individualmente não se mostra caótico.

## Turbulência

Quando um fluido flui por um tubo com energia crescente, observa-se uma seqüência de transições desde um estado ordenado, denominado laminar ou quiescente, caracterizado por um vetor de velocidade uniforme, até um estado de desordem, tanto espacial, quanto temporal, denominado de *turbulência*. Num estado intermediário entre estes dois regimes denominado de *turbulência fraca*, as flutuações não se estendem por um ampla extensão de freqüências e escalas de comprimento. Já no regime de *turbulência* observa-se um movimento onde ocorre uma notável transferência de energia até pequenas escalas de comprimento, de forma que as flutuações adquirem uma relevância fundamental. Neste regime de movimento, o padrão de fluxo parece se manter em constante alteração durante todo o tempo. A interação entre ordem e desordem é especialmente intrincada devido a inexistência de separações claras entre as diversas escalas de evolução do fenômeno. Surgem flutuações de velocidade aparentemente aleatórias que parecem nunca se repetirem. Neste cenário de aparente desordem, brotam estruturas coerentes macroscópicas como conseqüência do processo de transferência de energia, onde processos que ocorrem em escalas curtas fornecem energia aos que ocorrem em escalas maiores de espaço e tempo. Este processo de transferência de energia também ocorre no sentido inverso, realimentando os processos das escalas curtas de espaço e tempo, até que a energia termina por se dissipar termicamente, devido ao arrastamento viscoso do fluido. Assim, no interior do fluxo, aparecem vórtices de todos os tamanhos e grande parte da energia do sistema é consumida na formação destas estruturas. Acompanhando a dinâmica deles, verifica-se que ao longo do tempo os vórtices grandes, de comprimento  $l$ , tornam-se instáveis e decaem em vórtices de comprimento  $l/2$ , que decaem para vórtices de comprimento  $l/4$ , e assim por diante, até que eles se tornam tão pequenos que suas energias terminam dissipadas como energia térmica e desaparecem. Este processo se repete de uma forma aproximadamente auto-similar, até que atinja vórtices de tamanho mínimo  $l_d = (v^3/\epsilon)^{1/4}$ , denominado de *comprimento de Kolmogorov*, onde  $\epsilon$  é a taxa média de dissipação de energia e  $v$  é velocidade média do fluxo. Este processo dinâmico de aparecimento de estruturas de diferentes tamanhos, devido ao fluxo de energia entre diferentes escalas, exibe característica de universalidade que independem das características específicas do fluido.

Experimentos com fluidos revelam que um fluxo laminar no interior de tubos ocorre em condições de baixa velocidade, diâmetros pequenos do tubo, baixa densidade e alta viscosidade do fluido, enquanto o fluxo se torna turbulento em condições opostas, isto é, na presença de altas velocidades, grandes diâmetros, alta densidade e baixa viscosidade. Dado um fluido com velocidade  $v$ , viscosidade  $\mu$  densidade  $\rho$  que flui por um tubo de diâmetro  $d$ , define-se a grandeza adimensional  $Re = \rho v d / \mu$  denominada *número de Reynolds*, em homenagem a Osborne Reynolds, que empreendeu estudos sistemáticos sobre a turbulência. Estes estudos revelaram que para um fluido que flui por um tubo, este fluxo é sempre laminar, independentemente dos valores individuais de  $\rho$ ,  $v$ ,  $\mu$  e  $d$ , quando  $Re$  for aproximadamente menor do que o valor 2300 (Badii97). Acima deste valor crítico a turbulência pode ocorrer. Assim, a turbulência está ligada a valores elevados do número de Reynolds.

O valor exato onde ocorre a transição do fluxo no interior de um tubo de laminar para turbulento depende dos distúrbios e perturbações que se encontrem presentes no interior do fluxo. No caso de se usar um tubo com superfícies bem suaves e se não existir nenhuma perturbação na velocidade do fluxo, a transição para a turbulência pode se dar para valores bem mais elevados de  $Re$ . De qualquer forma, se  $Re$  for menor do que 2300, o fluxo será laminar mesmo na presença de perturbações. Por outro lado, se a geometria do fluxo for diferente, como no caso de um fluxo por um duto de seção transversal retangular ou por uma turbina, a transição se dará para valores diferentes, porém, sempre elevados de  $Re$ .

Interpreta-se o número de Reynolds como sendo a razão entre a força de inércia pela força de viscosidade no fluido. Assim, quando se tem valores baixos de  $Re$ , a força de viscosidade é bem maior do que a força de inércia. Como conseqüência, as pequenas perturbações que venham a ocorrer, devido, por exemplo, as imperfeições ou a vibrações na parede do tubo, terminam por serem dissipadas no interior do fluido. Por outro lado, à medida que  $Re$  cresce, o amortecimento viscoso vai se tornando menor e, a partir de determinado ponto, o efeito das perturbações eventuais pode crescer, desenvolvendo a turbulência. Para valores elevados de  $Re$ , o fluxo é sempre turbulento, pois as menores perturbações terminam por serem consideravelmente amplificadas.

O movimento do ar na atmosfera é sempre turbulento. Seja o caso de uma fumaça. Caso se tenha um tubo de 3 m, por exemplo,  $v$  precisa ser menor do que 6.6 mm/s para que o fluxo seja laminar, o que é uma velocidade extremamente baixa. Em conseqüência, como os fluxos de fumaça oriundos de combustão sempre possuem velocidade mais elevada, resulta sempre em turbulência.

## Características de Sistemas Complexos

Os exemplos vistos nas seções anteriores servem para ilustrar o comportamento típico dos Sistemas Complexos. Muitos outros exemplos poderiam ser citados, com é o caso do surgimento destas características em reações biológicas e químicas, instabilidades óticas, fenômenos de crescimento por agregação de partículas, vibração de corpos granulares,

entre outros. Em todos estes sistemas pode-se identificar a ocorrência de fenômenos universais, que medeiam o aparecimento do comportamento complexo e ocorrem independentemente da composição particular do sistema.

Refletindo sobre estes exemplos, chega-se a conclusão de que o comportamento complexo pode aparecer tipicamente em sistemas que possuem muitos graus de liberdade. Neste caso, ao invés de existir um único conjunto atrativo que atrai para si as trajetórias e afeta a dinâmica de forma a se ter um comportamento uniforme, o que tipicamente ocorre nos sistemas com vários graus de liberdade é a coexistência de um grande número de conjuntos atrativos, caóticos e instáveis. Em conseqüência, ao atravessar estes conjuntos, uma trajetória apresenta diferentes comportamentos associados a dinâmica do conjunto em que estiver mais próximo. Assim, observa-se um comportamento que apresenta episódios de regularidade, que são sucedidos por comportamentos que parecem aleatórios e assim sucessivamente, num cenário que se alterna constantemente e de forma surpreendentemente imprevisível. O aparecimento de estruturas coerentes está ligado a trajetórias que evoluem próximas aos atratores, enquanto as características específicas de cada conjunto atrativo, combinado com sua localização em relação aos conjuntos instáveis respondem pelo aparecimento de hierarquias nas estruturas.

Além disso, a região de influência destes conjuntos, no caso do comportamento de sistema complexo, tipicamente não estão nem suavemente, nem uniformemente delimitadas no espaço. Muito pelo contrário. As regiões de influência destes diferentes conjuntos se misturam, se embaralham de um forma intricada, muitas vezes numa geometria fractal, o que leva ao aparecimento do fenômeno de *sensibilidade extrema a condição final*. Este fenômeno significa que condições iniciais tão próximas quanto de desejo podem apresentar comportamentos dinâmicos totalmente diferentes, gerando efeitos totalmente não correlacionados entre si. É justamente este fato que faz com que a previsão do comportamento de um sistema complexo através de modelos matemáticos se transforme num desafio de grandes proporções.

É oportuno lembrar as características de previsibilidade dos sistemas caóticos e suas relações com os sistemas complexos. A dinâmica caótica pode se manifestar em sistemas não lineares de baixa dimensão, sendo sua principal característica a sensibilidade extrema a variações de condições iniciais. Devido a esta característica, as trajetórias não podem ser preditas por longos intervalos de tempo a partir de medidas experimentais. Isto se deve pelo fato de uma medida apresentar um limite de resolução definido e, em conseqüência, uma região de incerteza estatística a sua volta. Considere, pois, que existe uma incerteza de valor  $\epsilon$  associada a diferença entre as condições iniciais de duas trajetórias, i.e.,  $X_1(0) - X_0(0) \mu \epsilon$ . Num sistema caótico esta diferença cresce em média exponencialmente com o tempo característico  $t$ , associado aos expoentes de Lyapunov positivos do sistema. Assim, após um tempo  $t$ , a diferença entre estas duas trajetórias  $X_1(t) - X_0(t)$  cresce em média exponencialmente como  $\epsilon \exp(t/t)$ , o que significa que aproximadamente após um certo intervalo de tempo a diferença entre as trajetórias será razoavelmente grande. Em conseqüência, as predições determinísticas de trajetória a partir de medidas experimentais são apenas possíveis dentro de escalas de tempo menores do que  $t$ .

Num sistema complexo (poon95), coexistem movimentos com característica de ordem e, por conseguinte, previsíveis, com regiões marcadas por uma dinâmica com propriedades de evolução caótica. Individualmente, muitos padrões parecem evoluir no tempo de forma previsível. Entretanto, o comportamento da dinâmica entre duas estruturas diferentes não guardam tipicamente a menor correlação entre si, de forma que a partir da evolução de uma estrutura, não se consegue prever a evolução da outra, mesmo se elas se encontrarem espacialmente próximas. Além disso, estas não correlações acontecem tanto no tempo, quanto no espaço. Por conseguinte, tudo se passa como se as características da dinâmica caótica em relação a previsibilidade fossem levadas a um grau superlativo de limite extremo, tanto em relação a variações temporais como espaciais. Devido a este cenário, pode-se afirmar que um sistema é complexo se seu comportamento *depende crucialmente dos detalhes* do sistema, sendo que esta dependência é, em geral, muito difícil de ser entendida e quantificada. Isto significa sensibilidade extrema às menores perturbações que possam existir, de tal forma que estas perturbações levam mesmo em escalas curtas de tempo a um distanciamento entre o comportamento do sistema real e o comportamento previsto por um eventual modelo matemático determinístico.

Todos estes argumentos nos levam a um conjunto de características que nos permitem identificar o comportamento de um sistema como complexo. Estas características de comportamento aparecem enumeradas abaixo (poon95, macau98):

1. Um comportamento ao longo do tempo que não se mostra nem completamente ordenado e previsível, nem completamente aleatório e imprevisível;
2. A evolução espaço-temporal do sistema revela padrões e estruturas coerentes, que se desenvolvem em várias escalas, sem que apresentem um relacionamento elementar entre si;
3. Estas estruturas podem apresentar um relacionamento hierárquico, o que significa que o aparecimento de estruturas não triviais que se estendem por um ampla gama de escalas de espaço e de tempo.

Trabalhos recentes (poon95, macau98) mostraram que estas características de sistemas complexos não são exclusivas de sistemas com muitos graus de liberdade, podendo aparecer mesmo em sistemas de baixa dimensão, como no caso do rotor simples com pequena dissipação e na presença de ruído. Sob determinadas condições, este sistema apresenta um padrão de comportamento que permite classificá-lo como Sistema Complexo apesar de ter dimensão dois. Esta situação simples parece ser uma forte evidência em favor da possível ubiquidade destes sistemas na Natureza, mesmo mediando fenômenos que se mostram simples.

Os sistemas complexos se apresentam como desafios. Técnicas precisam ser desenvolvidas que permitam entendê-los e caracterizá-los do ponto de vista quantitativo. Da mesma forma, espera-se por novas ferramentas que possibilitem desvendá-los de forma mais unificada suas características de universalidade. Em paralelo ao avanço do estudo destes sistemas, prevê-se a criação de técnicas que explorem de forma oportuna a dinâmica destes sistemas para controlá-los eficientemente. Eventualmente este seja o caminho que nos vai conduzir a importantes conquistas nas mais diversas áreas de ciência.

## Referências

- Badii, R. e Politi, A., 1997, "Complexity – Hierarchical structures and scaling in physics", Cambridge, UK.  
 Bak, P., 1996, "How Nature Works", Springer-Verlag, New York, 1996.  
 Couillet, P. e Tresser, J., 1978, "Iterations of Endomorphisms and Renormalization Group", C. R. Hebd Séances Acad. Sci. Series A, Vol. 287, pp. 577-580.

- Cvitanovic, P., 1989, "Universality in Chaos", Institute of Physics Publishing.
- Einstein, A. e Infeld, L., 1976, "The Evolution of Physics: From Early Concepts to Relativity and Quanta", Simin & Schuster, US.
- Feigenbaum, M. J., 1978, "Quantitative Universality for a Class of Non-Linear Transformations", J. Stat. Phys, Vol 19, pp. 25-52.
- Feigenbaum, M. J., 1979, "Onset Spectrum of Turbulence", Phys. Lett A, Vol 75, pp. 375-378.
- Grossmann, S. e Thomae, S., 1977, "Invariant Distributions and Stationary Correlation-Functions of One-Dimensional Discrete Porecesses", Z. Naturforsch A, Vol 32, pp. 1353-1363.
- Libchaber, A., 1982, "Convection and Turbulence in Liquid Helium-I", Physica B & C, Vol. 110, pp. 1583-1589.
- Lodahl P., Bache, M. e Saffman, M., 2000, "Spiral Intensity in the Internally Pumped Optical Parameter Oscillator", Vol. 85, pp. 4506-4509.
- Macau, E. E. N. e Grebogi, C., 1998, "Driving trajectories in complex systems", Phys. Lett E, Vol. 57, pp. 5337-5346.
- Poon, L. e Grebogi, C., 1995, "Controlling Complexity", Phys. Rev. Lett., Vol 75, pp. 4023-4026.
- Stehna J. P., Dahmen, K. A. e Myers, C. R., 2001, "Crackling Noise", Naure, Vol. 410, pp. 242-250.
- Thomas, L., Pesch, W., e Ahlers, G., 1998, "Rayleigh-Bérnard convection in a homeotropically aligned nematic liquid crystal", Vol. 58, pp. 5885-5897.