

Conceitos de Teoria da Complexidade

Luís Alfredo Vidal de Carvalho

A Teoria da Complexidade surge do estudo de alguns sistemas não-lineares nos quais ocorrem fenômenos nunca antes observados (por vários motivos) nos chamados “sistemas lineares”. Assim, a Teoria da Complexidade só pode ser entendida após uma revisão dos conceitos básicos da Teoria dos Sistemas.

1. O Todo não é mais a soma das partes

Se desejássemos realizar um estudo sobre o comportamento da sociedade alemã e, para isto, entrevistássemos um homem alemão estaríamos cometendo um grave erro de pesquisa. Não porque deveríamos ter entrevistado centenas (ou milhares) de alemães, tendo, assim, uma visão maior desta sociedade **estatisticamente** falando mas porque em uma sociedade surgem **comportamentos coletivos** não presentes nos seus indivíduos e, portanto, não detectáveis com entrevistas individuais, seja de dezenas, centenas ou milhares de seus cidadãos.

Uma turba de jovens que inicia um protesto pacífico contra a globalização na Avenida Paulista ou em Davos não sabe porque, ao fim de seu protesto pacífico, conta com um saldo de muitos feridos, vandalismo e até mortes. Cada indivíduo participante do protesto como jovem em sua residência acompanhado de seus colegas e pais não é vândalo, agressor ou assassino mas cometeu atitudes plenamente compatíveis com isto durante o protesto por estar em **um todo coletivo maior que ele** como indivíduo.

Fenômenos coletivos como este sempre existiram mas nunca foram devidamente observados ou explicados por uma questão de existência de um paradigma dominante cientificamente denominado o **Método Analítico**. Não desejando entrar em questões histórico-filosóficas sobre sua origem, podemos afirmar que foi René Descartes (1596 – 1650) que em seu livro “O Discurso sobre o Método” consagrou o

Método Analítico (antes já existente porém não tão bem definido) e tornou-se, assim, o “pai da ciência moderna”.

Basicamente, o método analítico cartesiano advoga que diante dos mistérios de um fenômeno qualquer devemos **dividi-lo em partes** menores (analisá-lo) e **entender** ou explicar o comportamento de **cada parte, unindo**, posteriormente, as **conclusões** sobre cada uma delas para se obter a explicação do **fenômeno como um todo**. O método analítico parte do princípio de que o **todo é a soma das partes**, e assim o foi por muitos séculos antes e depois de Descartes.

À medida que a ciência evoluiu em vários campos, principalmente na engenharia, **máquinas compostas de vários elementos** de origens diferentes, como mecanismos, circuitos elétricos e reações químicas, passaram a ser construídas e seu projeto através do **método analítico** **começou a mostrar as falhas** desta abordagem. O projeto independente de mecanismos, circuitos elétricos e reações químicas e seu posterior casamento mostrava **um todo diferente do que se esperava do comportamento sobreposto ou somado das partes**.

Talvez o grande erro do método analítico fique bem esclarecido através da famosa **Lei de Maltus** que no início do século XX afirmava, baseada em estudo sério e científico dos censos realizados de 1850 a 1900 na Europa, que **“como a população mundial crescia em progressão geométrica e a produção de alimentos aumentava em progressão aritmética, a humanidade morreria de fome em poucas décadas”**. Maltus aplicou o paradigma vigente na época e que até então era aceito como o correto cientificamente. Não errou propositadamente mas não percebeu **que os fenômenos “crescimento populacional” e “produção de alimentos” interagem tão fortemente que não podem ser estudados em separado** pela influência mútua que exercem entre si. O todo passava agora a se mostrar mais do que a soma das partes em alguns fenômenos.

Foram necessários muitos anos de trabalho de alguns, como Bertalanfi, por exemplo, para que se entendesse que o método analítico não era um bom procedimento quando o **fenômeno estudado** apresentava características especiais como **forte interação entre as partes e comportamento das partes não-proporcional aos estímulos** recebidos pelas mesmas.

Era preciso **caracterizar que fenômenos eram passíveis de estudo pela método analítico** e que fenômenos não o eram. A Teoria da Evolução, a Teoria Psicanalítica, os artefatos militares, o automóvel, a eletricidade e o magnetismo foram tornando mais clara para os pesquisadores as diferenças entre estes dois tipos de fenômenos. Aos poucos, o método analítico foi sendo **substituído pelo enfoque sistêmico** no qual **o todo deve ser estudado como um todo** e suas partes separadas com cuidado quando necessário.

2. Conceito Unificador e Formal de Sistema

Definimos um sistema como a **conexão de vários elementos que interagem entre si e cujo comportamento resultante influencia e é influenciado pelo meio que o circunda**.

Esta definição unifica todas as ciências pois o conceito de sistema pode ser aplicado independente da matéria tratada, dando-se atenção apenas à forma dos elementos e suas interações. O estudo matemático (uma linguagem formal) dos fenômenos da Natureza só é possível pela implantação do conceito de sistema.

Os sistemas interessantes são aqueles nos quais comportamentos “novos”, não observados ou previsíveis nos elementos individuais, surgem da coletividade de elementos que interagem. Na realidade, definimos um **sistema complexo** como aquele no qual **comportamentos coletivos não presentes nos, normalmente muitos, elementos do sistema individualmente emergem de sua interação e nos quais a separação destes elementos prejudica ou mesmo nulifica estes comportamentos coletivos**.

O cérebro, o sistema imune, a sociedade, a macro-economia são alguns sistemas complexos com os quais lidamos diariamente.

3. Classificando os Sistemas

Didaticamente, os sistemas podem ser classificados em:

- *Quanto às fronteiras:*
 - **Aberto** – O sistema interage com o meio que o circunda;
 - **Fechado** – O sistema não interage com o meio circundante.

Uma grande questão é decidir se o Universo é um sistema fechado ou aberto. Se fechado, morrerá quando as trocas energéticas não mais forem possíveis devido a equalização das temperaturas de seus elementos (Segunda Lei da Termodinâmica). São as diferenças de temperatura que funcionam como potencial ou mola-propulsora das trocas energéticas. Se aberto, qual o meio circundante do Universo? Seria Deus o grande mantenedor dos potenciais de temperatura que dão vida ao Universo ?

- *Quanto ao comportamento:*
 - **Lineares** – A resposta de cada elemento do sistema é sempre proporcional ao estímulo que o mesmo recebe do meio ou de outro elemento;
 - **Não-Lineares** – A resposta de pelo menos um elemento do sistema não é proporcional ao estímulo que ele recebe do meio ou de algum outro elemento.

O controle de volume de nossa aparelhagem de som é linear pois uma pequena rotação do botão leva a um pequeno aumento de volume enquanto uma grande rotação do botão leva a um grande aumento de volume. Assim são também o acelerador de nosso carro e o funcionamento de nossos músculos. Um sistema não-linear é o trânsito em uma grande cidade. Se sairmos de casa às 7:30 hs, levamos 30 minutos para chegarmos ao trabalho. No entanto, se nos atrasarmos cinco minutos e sairmos às 7:35 hs, levaremos 60 minutos para chegarmos ao mesmo local de destino. Esta não-linearidade surge da coletividade de motoristas e não de algum motorista individualmente. Há aqui o fenômeno de emergência típico de sistemas não-lineares. Como nos sistemas lineares as respostas são sempre proporcionais aos estímulos não surgem fenômenos coletivos inesperados. A não-linearidade é fundamental para a complexidade. No fundo, os sistemas são sempre não-lineares. A linearidade é uma abstração que funciona em alguns sistemas, permitindo seu estudo mais facilitado.

- *Quanto ao tempo:*

- **Estáticos** – São sistemas que não evoluem no tempo;
- **Dinâmicos** – São sistemas que evoluem no tempo.

Uma ponte pode ser considerada um sistema estático pois suas estruturas são permanentes no tempo. Na realidade, o envelhecimento e a passagem de automóveis de diferentes pesos em diferentes velocidades torna a ponte um sistema dinâmico óbvio. No entanto, para fins de projeto, o engenheiro aproxima a ponte como um sistema estático. De novo, sistemas estáticos são abstrações simplificadoras. Sistemas dinâmicos claros são a célula, a sociedade, a economia, a empresa, entre outros.

- *Quanto a forma de evolução no tempo:*

- **Contínuos no tempo** – Evoluem no tempo a todos os instantes;
- **Discretos no tempo** – Evoluem no tempo apenas em instantes determinados.

A sociedade tem seus parâmetros evoluindo o tempo todo mesmo que certos fenômenos evoluam lentamente, eles evoluem continuamente. O crescimento populacional evolui discretamente no tempo pois em um instante temos uma população x e daqui a alguns instantes teremos um novo nascimento e a população passará a ser $(x+1)$. Entre um nascimento (ou morte) e outro, a população não varia. É muito comum aproximarmos sistemas contínuos no tempo por discretos e vice-versa para fins de facilitação de seu estudo.

- *Quanto ao espaço:*

- **Concentrados** – Os parâmetros do sistema podem ser considerados concentrados em algum ponto do espaço ou independente dele;
- **Distribuídos** - Pelo menos um dos parâmetros do sistema está distribuído em uma região do espaço.

Uma ponte é um sistema distribuído no espaço enquanto os elementos de uma sociedade apesar de distribuídos no espaço, para fins de estudo do fenômeno social podem ser considerados concentrados no espaço por serem independentes dele.

- *Quanto à incerteza:*
 - **Determinísticos** – A evolução no tempo é definida a partir de leis bem definidas e do estado inicial do sistema;
 - **Probabilísticos ou Estocásticos** - A evolução no tempo é definida a partir de leis nas quais probabilidades (incertezas) estão presentes.
- O sistema meteorológico que envolve a Terra é claramente probabilístico pois a evolução do mesmo não está comandada por leis de certeza absoluta. A evolução dos planetas em torno do Sol é determinística pois suas leis são bem conhecidas permitindo a previsão de eclipses com anos de antecedência. Permanece a pergunta de não serem os sistemas todos determinísticos e a nossa ignorância acerca dos mesmos o motivo de os considerarmos probabilísticos (Deus joga dados ? Albert Einstein).

4. *A Teoria Geral dos Sistemas*

À medida que o método analítico mostrava-se falho em sistemas mais complexos e o enfoque sistêmico o substituíra, pesquisadores do mundo todo começaram a descobrir **semelhanças (isomorfismos) entre sistemas completamente diferentes materialmente** falando. Em uma parte do mundo, um pesquisador estudando algum sistema biológico chegava a um conjunto de equações matemáticas de um determinado tipo e forma. Enquanto isto, em outra parte do mundo, outro pesquisador, estudando um sistema econômico, convergia para as mesmas equações em tipo e forma, obviamente com as variáveis nomeadas diferentemente. Se os dois pesquisadores unificassem os nomes das variáveis abstraindo seus significados físicos (matéria) e apenas permitindo a apresentação da estrutura (forma) das equações, verificariam a total semelhança de seus modelos e do comportamento de seus sistemas. Isto levou muitos pesquisadores a pensar que **o enfoque sistêmico poderia gerar uma teoria geral dos sistemas** na qual todos os modelos de fenômenos físicos convergiriam para um único grande modelo abstrato e formal. Infelizmente, isto não ocorreu mas a teoria geral dos sistemas possui um ferramental teórico capaz de gerar isomorfismos entre sistemas dos mais diversos e estudá-los unificadamente.

Talvez, o maior problema da teoria geral dos sistemas quanto ao estudo dos sistemas complexos é o fato de que, devido ao grande número de elementos dos sistemas complexos, **a Matemática não apresenta ainda métodos analíticos capazes** de estudar estes sistemas pelo método hipotético-dedutivo, clássico de sua abordagem. Daí, o único meio de estudar os sistemas complexos hoje é através da **simulação computacional**. O estudo da complexidade e a simulação computacional em computadores com muitos processadores velozes (supercomputadores como o CRAY, A10 e PS2) são, no momento, inseparáveis. Os resultados gerais da Matemática para os sistemas complexos, em sua maioria, são válidos apenas para sistemas com, no máximo, cinco elementos. Um sistema complexo com cinco elementos certamente não é o que nos interessa estudar em nosso mundo atualmente.

A teoria dos sistemas pode ser dividida para fins didáticos em sub-áreas como:

- **Modelagem** – Tomar o fenômeno físico e representá-lo abstraindo o significado físico dos elementos e guardando apenas as relações entre seus componentes que são importantes para o estudo do mesmo. **Um fenômeno físico é transformado em um modelo com apenas forma**, um modelo formal ou um fenômeno formal. É, sem dúvida, o mais difícil processo no estudo dos sistemas.
- **Análise** – **Avaliar a resposta do sistema a impulsos** impostos a ele propositadamente.
- **Simulação** – Utilizar **meios artificiais de reprodução** controlada do comportamento do sistema para fins de observação. A simulação pode ser feita por construção de protótipos ou de modelos matemático-computacionais que serão simulados no computador digital (ou analógico em algumas situações possíveis). É a parte mais importante do estudo dos sistemas complexos por ser a única possível nestes casos.
- **Síntese** – **Determinar os parâmetros** do sistema de forma que ele se comporte de uma forma desejada, obedecendo a restrições de projeto. Normalmente, a síntese é o trabalho do engenheiro ou projetista de sistemas.

- **Otimização** – Se existem várias sínteses possíveis para um sistema, otimizar consiste em **determinar qual a melhor delas** segundo um determinado critério pré-estabelecido. Geralmente, o critério é economia, segurança ou tempo de trabalho do sistema que devem ser maximizados ou minimizados, dependendo da situação desejada.
- **Controle** – Modificar o comportamento do sistema de forma que ele se **mantenha dentro de certos limites admissíveis**. Para isto, introduz-se no sistema elementos novos, originalmente não presentes na sua estrutura, que farão o papel de restringir seu comportamento ao desejado. Toda vez que o Banco Central decreta uma nova portaria para o funcionamento do mercado financeiro, ele está introduzindo um elemento novo no sistema capaz de controlá-lo.

5. O Conceito de Ordem

Para que se caracterize um sistema complexo precisamos detectar que algo de novo, emergente da coletividade de seus elementos, surge deste sistema. O conceito de ordem pode ser utilizado como uma métrica da emergência de fenômenos coletivos. Definimos **ordem como qualquer comportamento ou estrutura cuja probabilidade de ocorrência ao acaso em nosso mundo é praticamente nula**. Assim, acharmos uma pedra de formato irregular no meio do deserto não parece ser mais do que uma obra do acaso. No entanto, acharmos uma pedra de formato cúbico e com faces polidas no meio do deserto já não parece ser obra do acaso pois a Natureza não costuma gerar espontaneamente pedras deste tipo. Esta aparição é sinal de ordem. Alguém em algum momento cortou a pedra neste formato específico e poliu suas faces com algum propósito. Mais ordem ainda podemos supor se encontrarmos um conjunto de milhares destas pedras amontoadas em forma de uma pirâmide gigantesca acompanhada de mais duas outras pirâmides menores distantes alguns quilômetros uma das outras. A Natureza não costuma nem gerar milhares de pedras cúbicas polidas nem muito menos amontoá-las em forma de três pirâmides. Sistemas complexos são aqueles

que pela interação entre seus muitos elementos acabam por gerar algum comportamento ou estrutura que ao acaso não seriam produzidos.

6. O Conceito de Entropia

Na Termodinâmica encontramos a afirmação de que qualquer máquina térmica, isto é, **qualquer máquina que gere trabalho a partir de calor, só pode funcionar se houver uma fonte de temperatura mais alta e uma fonte de temperatura mais baixa nas quais a máquina esteja conectada** (Segunda Lei da Termodinâmica). Em outras palavras, sempre é preciso uma diferença de temperaturas entre as quais possa fluir energia (calor) de uma fonte quente para uma fonte fria, sendo parte desta energia em fluxo transformada no trabalho útil realizado pela máquina. Uma vez que a célula dos animais e plantas e as estrelas do Universo são máquinas térmicas, a importância desta Lei não deve ser subestimada pois é a própria essência da vida. Quando estamos em um ambiente quente, nosso corpo transpira eliminando calor, carregado pelo suor, de forma a manter a diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria e permitir o funcionamento das células. O sol e as outras estrelas que emitem calor são fontes quentes de energia. O petróleo é outra fonte quente que usamos em nossas usinas, turbinas e motores. A glicose e os lipídios são outras fontes quentes de energia que nossas células “queimam” para gerar calor e depois trabalho. Muitas são as fontes de calor no Universo e elas possuem diferentes temperaturas. Por isto, o Universo está sempre em constante fluxo energético. Se esta diversidade de temperaturas diminuir, o fluxo energético diminuirá proporcionalmente.

Faz parte do processo de gerar trabalho a partir do calor que sempre alguma parte do calor se perca na própria máquina (atrito, aquecimento das partes, etc) não gerando trabalho útil. **Esta energia perdida nunca mais será recuperada e chamamos de “entropia”.** Entropia é uma medida de degeneração, desordem ou desorganização. A entropia mínima (zero), representando a organização total, é definida como aquela de um cristal de forma geométrica perfeita a uma temperatura de zero absoluto na qual nenhum átomo se “movimenta”. Portanto, a entropia zero

significa inércia, ordem total e morte. A cada dia fluem muitas formas de energia das fontes quentes para as fontes frias do Universo. E, sendo assim, as fontes quentes se esfriam (ou se esgotam) e as fontes frias se esquentam até que as temperaturas se igualem. Estes fluxos de energia têm suas entropias pois sempre há alguma energia perdida, não transformada em trabalho útil. Desta forma, a entropia do Universo aumenta sempre até alcançarmos a desordem ou degeneração total. Neste dia, todas as temperaturas se igualarão e nenhum trabalho poderá ser gerado no Universo. O Universo terá morrido! Concluindo, a entropia é uma medida de desordem e degradação. Seu conceito é muito importante para a Física e também para a Teoria da Complexidade.

O conceito de entropia como energia perdida na Termodinâmica foi elegantemente estendido para o de quantidade de informação na Ciência da Computação. Seja a informação de que “o Sol nascerá amanhã”. Qual seria a “quantidade” ou o “valor” desta informação para qualquer um de nós? Se o Sol nasce mesmo a todos os dias, esta informação não significa nada! O fenômeno do nascer do Sol é tão regular, organizado e entendido que não precisamos de nenhuma outra informação complementar. Portanto, a frase “o Sol nascerá amanhã” possui quantidade de informação nula. Mas e a frase “o Sol nascerá amanhã trinta segundos mais cedo do que hoje”? Esta frase já possui um valor informacional maior pois se o fenômeno do nascer do Sol é regular e organizado a um nível macroscópico, ele não o é a um nível mais detalhado e microscópico. Se o Sol nascerá amanhã trinta segundos mais cedo que hoje, é sinal de que estamos caminhando em direção ao verão. Isto é uma informação adicional que não existia antes! Se medirmos o horário do nascer do Sol todos os dias, veremos que o fenômeno não é tão regular e organizado quanto pode parecer a princípio como na inútil frase “o Sol nascerá amanhã”. Sistemas organizados (como um cristal perfeito a zero grau absoluto) são tão previsíveis que não necessitam de informação nenhuma para seu entendimento. Ou seja, sistemas com entropia zero não necessitam de informação pois já são entendidos. Ou em outras palavras, informação sobre sistemas com entropia zero não valem nada. Porém, se o fenômeno é complexo, como o horário que o Sol nasce a cada dia, torna-se mais difícil entendê-lo e, conseqüentemente, qualquer informação sobre o fenômeno passa a ter

valor. Em outras palavras, sistemas desorganizados, com muita entropia, necessitam de muita informação para seu esclarecimento. Chamamos de *entropia da informação* a quantidade de informação adicional necessária para se entender um fenômeno ou sistema.

A quantidade de informação Q sobre um fenômeno é medida pela sua probabilidade de ocorrência p . Quanto mais improvável o fenômeno (baixa probabilidade de ocorrência), maior o valor da informação capaz de prevê-lo. A relação entre a quantidade da informação Q e a probabilidade p é inversa:

$$Q = -\log_2(p).$$

Se a probabilidade do Sol nascer amanhã é 1 (total certeza do fato), a quantidade Q desta informação é nula pois o logaritmo de 1 é zero. Porém, se tentarmos prever em que horário o Sol nascerá amanhã, nossa probabilidade de acerto será pequena e, conseqüentemente, o valor Q será grande pois o logaritmo de um número pequeno é um número grande --- negativo, é claro, mas que multiplicado pelo sinal de menos presente na definição de Q , resulta em um número positivo e grande. Concluindo, a quantidade de informação necessária para entendermos que o Sol nascerá amanhã é zero pois já sabemos disto. No entanto, a quantidade de informação necessária para sabermos o horário exato do nascimento do Sol é grande pois o fenômeno é dificilmente previsível.

Definimos a entropia da informação como a quantidade média de informação necessária para entendermos um fenômeno. Se um fenômeno depende de n fatores ou eventos $i = 1, 2, 3, \dots, n$, a entropia da informação sobre o fenômeno é a média da quantidade de informação que necessitamos para prever cada evento:

$$H = \sum_{i=1, n} p_i \cdot \log_2(p_i).$$

Se um fenômeno complexo e desorganizado depende de vários eventos de difícil previsão, a quantidade de informação para prevermos cada evento é alta e, certamente, a média destas quantidades também será alta, resultando em uma grande entropia da informação. Por outro lado, um fenômeno que dependa de muitos eventos facilmente previsíveis, terá uma entropia de informação baixa pois a média de baixas quantidades de informação será um número pequeno.

Se na Termodinâmica, a entropia é a perda presente de trabalho útil irrecuperável no futuro, na Ciência da Computação, a entropia é a falta de conhecimento no presente que deve ser suprida no futuro. Na Termodinâmica, a entropia é a desordem por degradação enquanto na Ciência da Computação a entropia é a desordem por falta de conhecimento. Se na Termodinâmica a diminuição da entropia é impossível, na Ciência da Computação ela é uma busca constante e possível. Os métodos científicos têm exatamente o papel de realizar a busca da ordem ou do conhecimento e sua conseqüente diminuição da entropia.

Na mensuração dos fenômenos emergentes de um sistema complexo, a entropia pode ser utilizada. Se o comportamento de um sistema leva à diminuição da entropia, podemos dizer que houve aumento da ordem ou a emergência de um fenômeno mais organizado do que aquele que existia antes desta emergência. Costumam alguns autores utilizar o termo ambíguo e pouco aceito **“negentropia” significando o recíproco da entropia**. Destarte, se a entropia diminui à medida que um processo se organiza mais e mais, a negentropia aumenta. Sistemas que se organizam seriam, então, aqueles que aumentam a sua negentropia.

Note que o conceito de ordem e de negentropia (ou mesmo de entropia) estão fortemente relacionados. Na realidade, **a negentropia (ou entropia) é uma medida de ordem**.

7. O Conceito de Ruído

Designamos como **ruído a qualquer “perturbação” que atua sobre o sistema** seja ela a favor ou contra a ocorrência de algum fenômeno do mesmo. Ruídos são perturbações aleatórias de intensidade pequena em relação aos valores das variáveis do sistema. Ou seja que o **ruído é algum estímulo pequeno e imprevisível do meio-ambiente** sobre o sistema e que pode ou não alterar-lhe o comportamento. Obviamente, certos sistemas são mais sensíveis ao ruído do que outros, como veremos mais adiante.

O termo ruído para nós está mais normalmente associado a algum som indesejável, no entanto, na teoria dos sistemas, o ruído pode ser um boato no

sistema financeiro, uma variação de temperatura em uma máquina devido ao calor ambiente, ou a mutação de um gene na evolução das espécies.

Ruídos são estímulos aleatórios mas que podem ser tendenciosos aumentando com mais probabilidade do que diminuindo o valor de uma certa variável do sistema (ou o contrário). O ruído totalmente imparcial que aumenta e diminui os valores das variáveis do sistema com a mesma probabilidade é chamado de “ruído branco”. Assim como Sir Isaac Newton mostrou no seu “Disco de Newton” que quando todas as cores do arco-íris estão pintadas sobre o mesmo, sua rotação gera a cor branca, **o ruído branco é um ruído que possui todas as perturbações aleatórias possíveis na sua constituição, gerando uma perturbação imparcial, não tendenciosa, do sistema.** O som do ar-condicionado é um típico ruído branco. Como o ruído branco possui todas as perturbações possíveis, sua atuação é sempre imparcial e a informação que ele carrega consigo é nula. Assim, um ruído branco tem uma entropia próxima de zero, não fornecendo nenhuma informação ao sistema. Por isto dormimos com o som de um ar-condicionado enquanto não dormimos com som de uma torneira gotejante cujo padrão de gotejamento é uma perturbação que ocorre com uma certa frequência e não com a combinação de todas as frequências. Já o barulho de uma cachoeira passa a ser um ruído branco pois a soma de todos os ruídos de cada gota da cachoeira forma uma perturbação na qual estão presentes todas as frequências. Como o nosso cérebro é um sistema que busca permanentemente novas informações ou padrões no ambiente, o ruído branco, por não possuir nenhuma informação, nos permite dormir enquanto a torneira gotejante não.

Devido aos conceitos antigos da Teoria da Informação de Shanon, costumamos atribuir ao ruído uma conotação pejorativa. Na Teoria da Informação, um elemento transmissor deseja transmitir uma mensagem através de um canal qualquer para um receptor. O canal está sujeito a ruído e a mensagem chega ao receptor deturpada. Cabe à Teoria da Informação evitar que o ruído deturpe a mensagem, ou se o ruído a deturpa, cabe à mesma recuperar a informação original tão precisamente quanto possível. Na guerra eletrônica, o ruído emitido por um

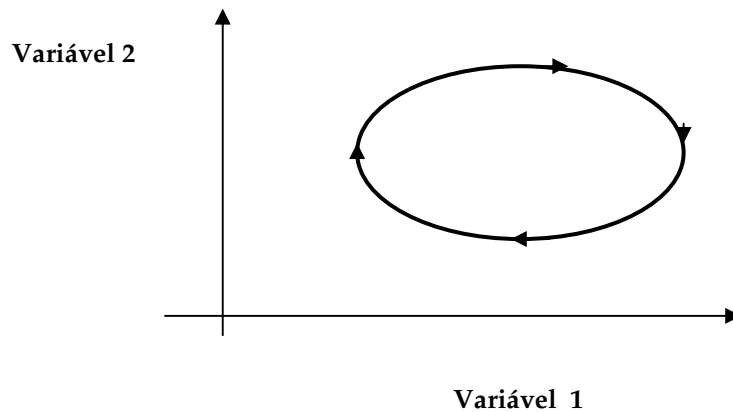
dos partidos em confronto tem o papel de atrapalhar as comunicações inimigas. Este é, talvez, o melhor uso do ruído na Teoria da Informação de Shanon.

Na realidade, o ruído é muito útil e mesmo necessário na Natureza. Nosso cérebro possui ruído sem o qual não funcionaria ou se desenvolveria. A evolução das espécies não ocorreria se o ruído gerado por mutações provocadas por radiações ionizantes ou viróticas não existissem. O papel do ruído é gerar diversidade, criatividade e a fuga de pontos de estagnação dos sistemas. De fato, em alguns sistemas o ruído é tão importante que não podemos separá-lo do comportamento do próprio sistema. Ou seja, o ruído é propriamente uma das variáveis do sistema.

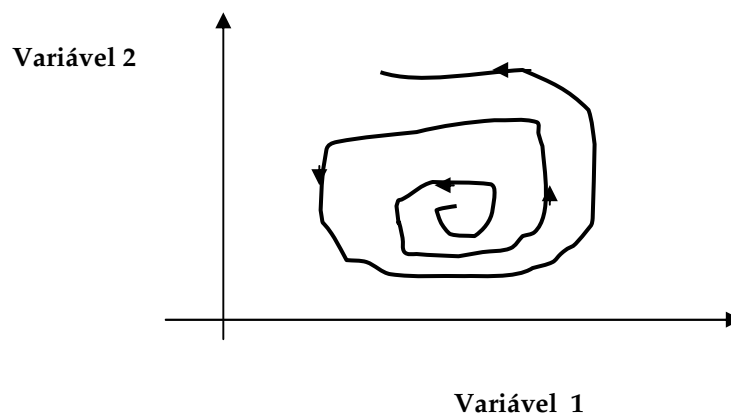
8. *O Conceito de Espaço de Estado*

Chamamos de **espaço de estado** a um conjunto de coordenadas contendo um eixo referencial para cada variável do sistema complexo estudado. Destarte, cada ponto deste sistema de coordenadas representa sem ambigüidade um estado do sistema complexo. No espaço de estado podemos visualizar como o sistema complexo evolui de um estado inicial a um estado final e caracterizá-lo pela trajetória desenvolvida entre estes dois extremos. **No espaço de estado não está representada a variável tempo mas apenas o valor das variáveis do sistema em cada instante.** Se para ir de um estado A a um estado B o sistema consome uma hora ou um segundo, isto não importa. O que importa é o formato da trajetória de estado.

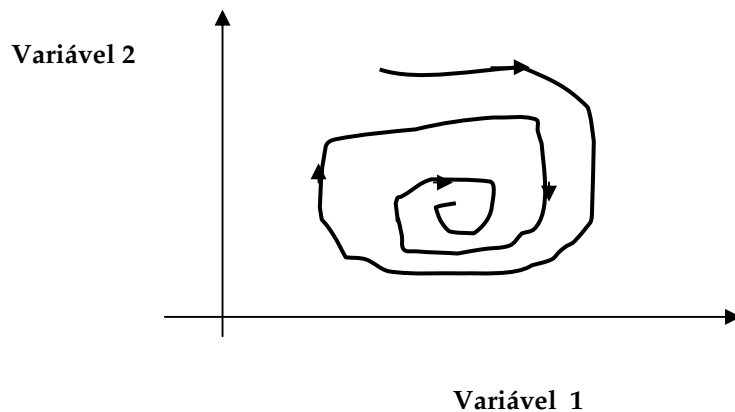
Suponha um sistema dinâmico com apenas duas variáveis. **Algumas trajetórias comuns são, por exemplo, os ciclos.** Todo sistema dinâmico que oscile, sempre passando pelos mesmos estados, como o batimento cardíaco, um sistema ecológico onde predadores devoram presas, um motor de automóvel ou um relógio, terá uma trajetória de estado cíclica com um formato semelhante a:



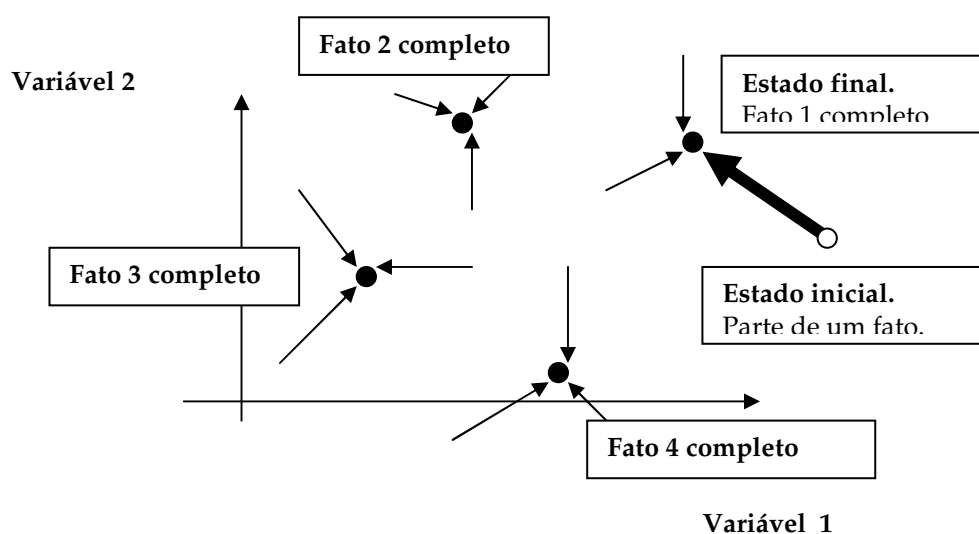
Já um sistema dinâmico que oscile mas não passe exatamente pelos mesmos estados a cada ciclo, como um sistema econômico em crise com instabilidade de preços e hiperinflação, terá como trajetória de estado uma **“espiral inflacionária”** do tipo:



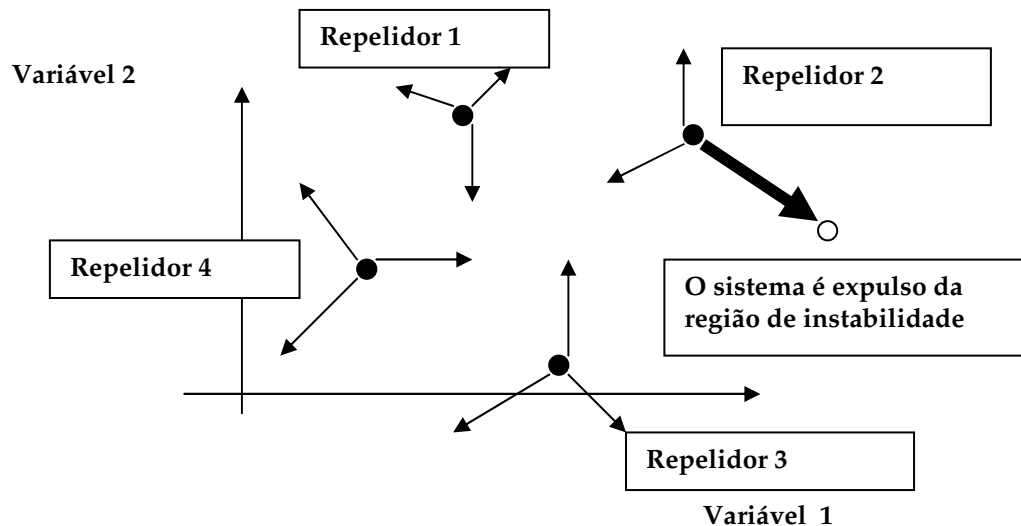
Um relógio quando começa e perder sua corda ou um pêndulo que perde sua energia lentamente devido ao atrito com o ar são sistemas dinâmicos oscilatórios que também não passam pelos mesmos estados a cada ciclo porém passam por estados próximos formando uma **espiral decrescente** que tende a um ponto de equilíbrio, nestes casos o repouso.



Também é comum nos espaços de estado a existência de pontos de atração de trajetórias, os chamados atratores. Os **atratores são pontos de equilíbrio do sistema para os quais inúmeras trajetórias, iniciando-se em diferentes estados iniciais, convergem**. A memória humana pode ser assemelhada a um espaço de estado com inúmeros atratores que representam os inúmeros traços mnêmicos de nossa mente. Quando nos lembramos de uma parte de um fato, é como se nossa mente estivesse em um estado inicial próximo do fato completo. Devido a existência de um atrator representante do traço mnêmico completo, o estado inicial de nossa mente é atraído para este atrator, recordando, assim, o fato completo:



Além de atratores, certos sistemas dinâmicos possuem **repelidores** que são pontos de alta instabilidade que expulsam de si o sistema para qualquer outro local mais estável:



9. As Condições Necessárias à Complexidade

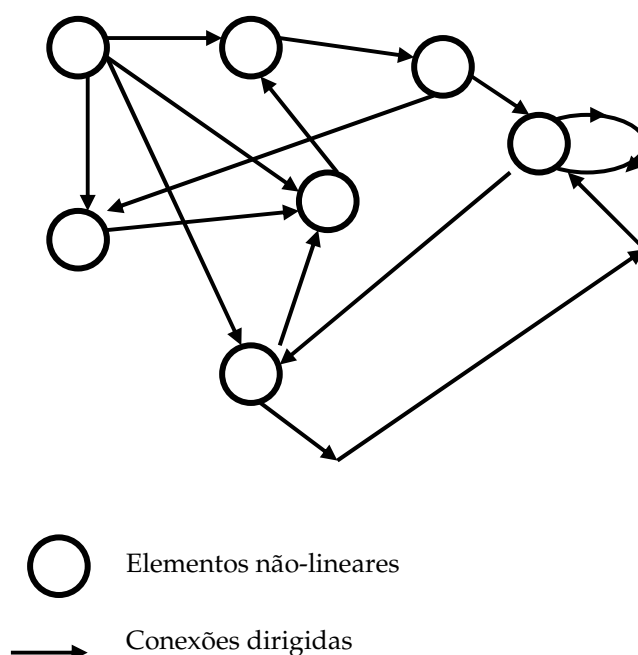
Do que se observa, algumas condições são necessárias para que fenômenos complexos surjam de coletividades de elementos, como:

- **Não-linearidade** - Sistemas compostos exclusivamente de elementos lineares não apresentam emergência de fenômenos pois como as respostas destes sistemas são simplesmente proporções constantes dos estímulos recebidos, todo o sistema acaba por ser substituído por um único elemento com comportamento igual ao produto dos comportamentos dos outros elementos.
- **Interações fortes** - Nos sistemas complexos, os elementos devem ter interações bem-definidas e intensas uns com os outros. É exatamente este acoplamento entre os elementos que gera um todo inseparável que sinergeticamente é mais que a soma das partes. Assim, o comportamento de um elemento altera o comportamento de muitos outros com os quais se conecta. O rompimento destas conexões destrói o fenômeno coletivo emergente. É exatamente por isto que o método analítico cartesiano não funciona pois este parte do pressuposto de que se deve separar os

elementos para estudá-los isoladamente. No entanto, ao separá-los, o sistema complexo perde sua condição necessária à complexidade e se resume em um sistema dinâmico qualquer sem emergências.

- **Retro-alimentação** - As interações entre os elementos de um sistema complexo devem ser ricas em retro-alimentações. Entendemos por retro-alimentação uma forma de conexão entre os elementos na qual um elemento envia sinais ou informação para elementos que também enviam, diretamente ou indiretamente, sinais para ele. Assim, o comportamento de um elemento do sistema altera o comportamento dos outros que, por suas vezes, alteram o comportamento deste elemento em particular. Como muitos elementos estão conectados a outros muitos com conexões fortes e em retro-alimentação, cada um altera o comportamento do outro e sofre alterações dos outros ao mesmo tempo. Um trilhão de neurônios conectados fortemente e em retro-alimentação gera um cérebro inteligente. No entanto, se este mesmo trilhão de neurônios for conectado em série, formando uma linha, teremos simplesmente um fio que dará uma volta no planeta transmitindo um sinal eletroquímico sem nenhum fenômeno emergente surgindo desta coletividade.

Um sistema complexo seria, então, pictoricamente algo como:



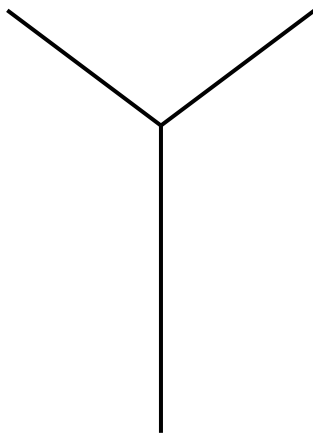
Note os vários tipos de retro-alimentação diretas e indiretas, incluindo a retro-alimentação de um elemento para si mesmo.

10. O Conceito de Fractal

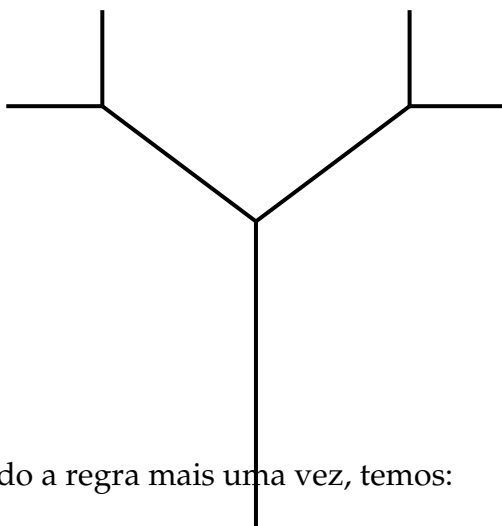
Por toda a história da Humanidade, a Natureza vem sendo imitada ou modelada com curvas ou equações bem comportadas, ditas “perfeitas” pela antigüidade, baseadas em regras abstratas da matemática, especificamente da Geometria, como o círculo, a elipse, a parábola, a hipérbole, a esfera, o cubo, etc. Nota-se porém que a maioria das estruturas da Natureza não possuem estes formatos tão abstratos mas, ao contrário, apresentam formas “irregulares” do ponto de vista matemático e que esta ciência por muitos séculos nunca conseguiu entender e modelar.

Definimos uma estrutura como **fractal se sua geometria é fragmentada, fraturada, não-suave e se repete dentro de si mesma recursivamente**. Normalmente, os fractais são construídos pela Natureza através da execução de regras simples que são aplicadas repetidamente, gerando um padrão de auto-similaridade. **A auto-similaridade se refere ao fato de que se observarmos a estrutura fractal a olho nu vemos a mesma imagem que vemos se observarmos a estrutura utilizando uma lente de aumento**, qualquer que seja a escala de aumento.

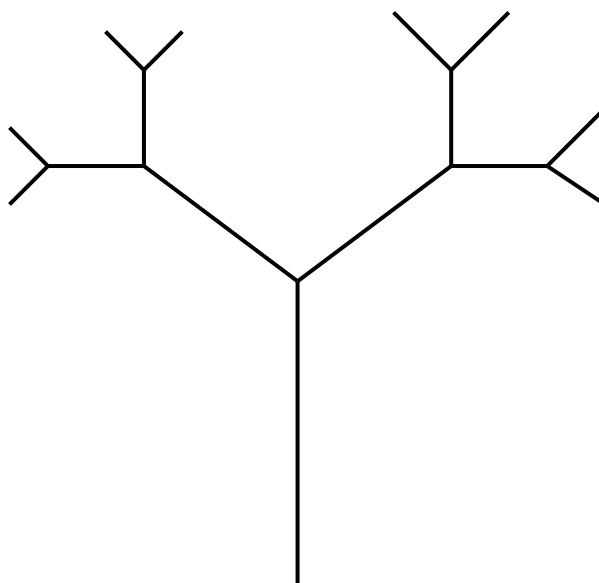
Seja, por exemplo, a simples regra de geração de uma figura geométrica como: “Uma haste central de comprimento L bifurca-se em uma das extremidades em duas hastes de comprimento $L/2$ formando um ângulo de 45° com a haste central”. Assim, teremos em uma primeira aplicação da regra a figura:



Aplicando, agora, a regra pela segunda vez, temos:



Aplicando a regra mais uma vez, temos:



A aplicação sucessiva da regra levará à formação de uma estrutura fractal que muito se assemelha aos alvéolos pulmonares, ou também ao sistema circulatório com as artérias se subdividindo em arteríolas e, posteriormente, em capilares, ou ainda com o “esqueleto” de celulose de uma folha de árvore. Note a auto-similaridade da figura pois se a observarmos com uma lente de aumento, veremos exatamente a mesma estrutura se repetindo em escala menor. Isto é uma óbvia consequência do fato de que a regra de geração da figura é a mesma aplicada recursivamente.

Não só figuras geométricas podem ser fractais mas também a música, a distribuição das galáxias no Universo, entre outros fenômenos. Interessante notar que as fugas de Bach são fractais em alguns trechos, pois neles encontramos um padrão definido por intervalos entre notas sucessivas (terças, quintas maiores ou diminutas, oitavas, etc.) que se repete dentro de si mesmo em um “enrolar” até atingir um final da recursividade a partir da qual a seqüência se “desenrola” retornando à seqüência primeira. Muito da beleza da música de Bach é devida ao seu caráter fractal.

Já é possível programarmos o computador digital para a geração de padrões musicais fractais que resultam em músicas artificialmente geradas com muita semelhança com as obras de Bach.

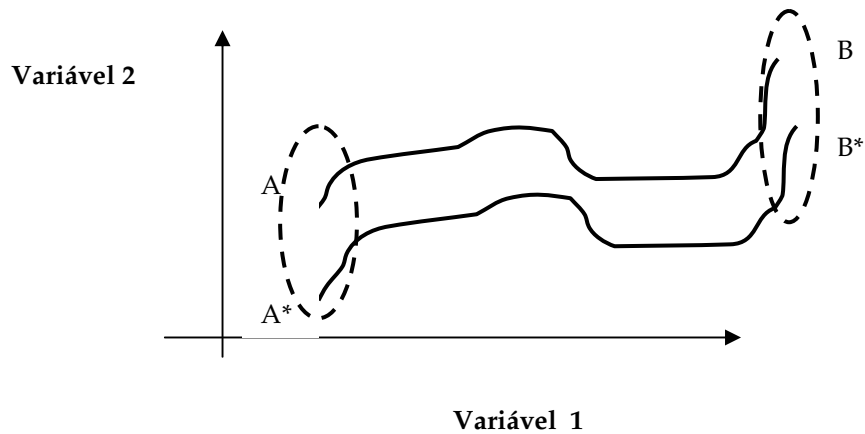
Não mostraremos aqui a relação entre fractais e sistemas dinâmicos mas esta relação importante existe e explica porque é comum na dinâmica da Natureza a formação de estruturas fractais das mais diversas.

11. O Conceito de Caos

A palavra caos vem sendo utilizada correntemente em nossa língua como um processo completamente sem estrutura ou controle. No entanto, na Teoria dos Sistemas, o caos, apesar de possuir um caráter de imprevisibilidade, como veremos, possui sim uma ordem e uma estrutura caracterizável.

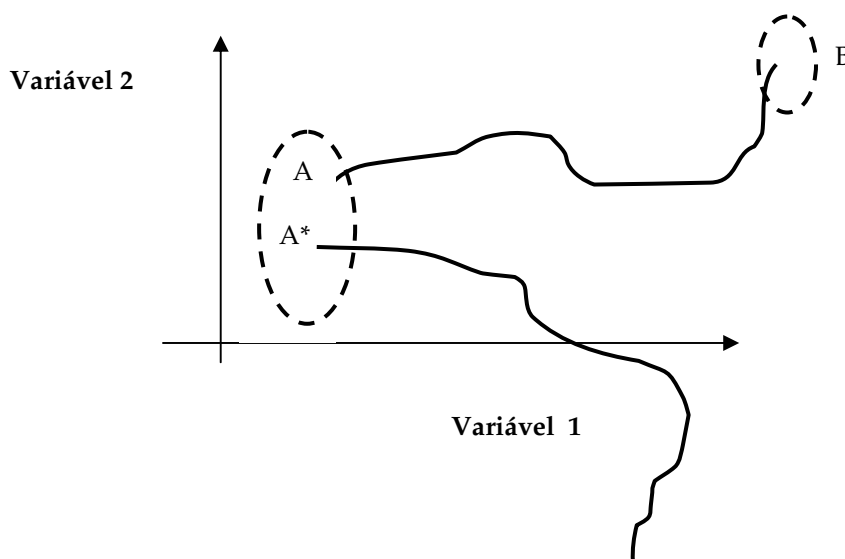
Um sistema não-caótico, bem comportado, é perfilado por trajetórias congruentes e previsíveis no espaço de estado. Se um tal sistema parte de um estado inicial A e evolui até um estado final B, é de se esperar que se ele iniciar sua trajetória em um

estado inicial A^* bem próximo de A , sua evolução se faça no sentido de convergir para um estado final B^* próximo de B :



Em outras palavras, nos sistemas não-caóticos se duas trajetórias se iniciam em uma vizinhança (uma “bola”) no espaço de estado, elas irão terminar previsivelmente em uma mesma vizinhança em outra região do espaço de estado (outra “bola”).

Visto isto, definimos um sistema dinâmico como caótico se este é muito sensível ao seu estado inicial na escolha de seu comportamento futuro. Destarte, se um sistema caótico parte de um estado A e se dirige a um estado final B no espaço de estado, ele, ao partir de um estado A^* muito próximo, porém diferente de A , se dirigirá a um estado final B^* muito distante do estado B . Em outras palavras, estados iniciais dentro de vizinhanças (“bolas”) tão pequenas quanto se deseje, levarão o sistema caótico a estados finais muito distantes, fora de uma única possível e desejada vizinhança (uma única “bola”):



Apesar do sistema ser determinístico, - dado seu estado inicial é possível determinar todos os estados intermediários e o estado final - a intensa sensibilidade ao estado inicial que promove uma grande divergência da trajetória de estado em relação às outras que partem de pontos vizinhos, leva a uma “imprevisibilidade” ou “surpresa” quanto ao comportamento do sistema. Assim, o bater ou não bater das asas de uma inocente borboleta na Amazônia em uma bela tarde de sol pode significar a diferença entre uma tempestade ou uma simples garoa na costa africana naquela noite. Em realidade, esta afirmativa estranha e engraçada foi o argumento dado por um pesquisador que ficou famoso ao demonstrar o fenômeno caótico no sistema meteorológico. Todos nós sabemos o quanto os serviços de meteorologia são importantes para a aviação, por exemplo, e o quanto eles erram em suas previsões. Seus erros se devem ao fato do sistema de massas gasosas da atmosfera ser altamente caótico. Um pequeno erro de medida em uma variável do sistema em seu estado atual pode levar a enormes erros de previsão que aumentam à medida que o tempo escoa e o sistema evolui. A convergência do sistema meteorológico para uma dia de sol ou de tempestade pode depender apenas de um infinitésimo de diferença em alguma variável mal medida.

Nos experimentos da Física, ou em outras áreas como a Biologia, lembremos que o medir de variáveis está sujeito a erros ou mesmo a ruídos, brancos ou não, tornando a previsibilidade de sistemas determinísticos, porém caóticos, impossíveis.

Paradoxalmente, a imprevisibilidade do caos emerge de um determinismo, sensível sim mas ainda assim determinismo. A fatalidade islâmica do Maktub (Tudo Já Está Escrito), não admitida por nós ocidentais livre-arbitrários, pode ser uma

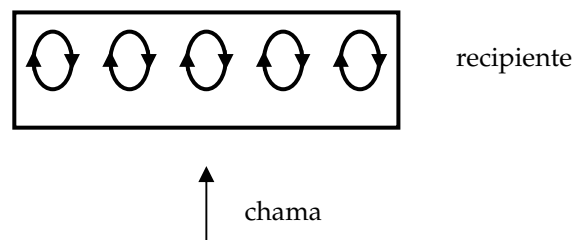
verdade inegável. A vida dos homens e do Universo já está traçada por D'US desde o princípio e suas "surpresas" são meras alterações provocadas pelos pequenos ruídos que nós, pobres mortais, introduzimos neste caótico sistema (só para pensar!).

12. O Conceito de Auto-organização

Designamos como auto-organização o processo no qual a ordem de um sistema aumenta (a entropia diminui) gradativamente através da cooperação entre seus elementos. Este processo de cooperação é disparado por estímulos externos ao sistema ou propriedades naturalmente existentes nos seus elementos. Os elementos cooperantes sustentam-se unidos, pelo menos inicialmente, por recursos retirados dos elementos do sistema que não podem participar da cooperação por algum motivo. Destarte, alguns elementos do sistema continuarão funcionando enquanto outros deixarão de funcionar ou passarão a funcionar precariamente. Isto leva a um processo de cooperação e competição semelhante ao que ocorre nos sistemas vivos, como nos sistemas ecológicos onde predadores e presas interagem por cooperações e competições e também na Teoria da Evolução onde sobrevivem os mais fortes. Em outras situações, quando todos os elementos do sistema estão cooperando para o processo de auto-organização, certamente este é mantido por estímulos externos ao sistema, dispensando a competição por recursos internos.

Um exemplo de cooperação em auto-organização pode ser visto no processo de convecção no qual moléculas de um líquido cooperam entre si gerando turbilhões que se movimentam em um determinado sentido, todas organizadamente. Considere uma panela com água sobre uma fonte quente. Inicialmente, as moléculas estão desorganizadas em movimento aleatório dentro do recipiente, o chamado movimento Browniano. Como a água que se encontra mais perto da fonte quente tem densidade menor e a água que se encontra na superfície tem densidade maior (por estar mais fria), as moléculas da superfície tendem a descer enquanto as moléculas do fundo tendem a subir. Neste processo de descida, as moléculas arrastam ou recrutam, como consequência da viscosidade do líquido, moléculas vizinhas, formando uma corrente de descida. O mesmo ocorre com as moléculas que se movimentam do fundo para a superfície. A corrente de subida perde calor para o ambiente ao chegar à superfície,

aumentando sua densidade e tendendo a descer pelo seu peso maior. Já a corrente de descida ganha calor ao chegar ao fundo do recipiente, diminuindo sua densidade e tendendo, agora, a subir. Um conjunto de correntes em movimento cíclico se forma por todo o líquido e o movimento Browniano, desorganizado, é substituído por um movimento organizado de turbilhões. Neste processo de auto-organização, os elementos são dirigidos por um elemento externo, o calor. Assim, todos os elementos cooperam entre si pois a “energia” sustentadora do processo é externa. Não há a formação de agregados de elementos cooperativos à custa da competição com outros elementos segregados da cooperação por algum motivo.



Estruturas de auto-organização também se formam entre neurônios do cérebro. Na verdade, durante o neurodesenvolvimento neurônios competem por determinadas substâncias químicas. Na formação sináptica, por exemplo, substâncias chamadas genericamente de fatores de crescimento neuronal são liberadas por neurônios excitados pelo ambiente e, através de difusão, alcançam as células vizinhas, promovendo o crescimento sináptico. As células que recebem o fator de crescimento neuronal formam sinapses e sobrevivem, enquanto as células que não entram em contato com tais substâncias morrem. Um neurônio que libera fator de crescimento neuronal guia o processo tri-dimensional de formação de sinapses, tornando-se um centro de convergência sináptica. Quando células próximas liberam diferentes fatores de crescimento neuronal em diferentes quantidades, vários centros de convergência são gerados, sendo estabelecida uma competição por sinapses entre eles. Pelo menos dois processos participam da dinâmica da formação sináptica:

- neurônios pré-sinápticos que competem por fatores de crescimento neuronal para sobreviverem; e

- neurônios pós-sinápticos que liberam essas substâncias competindo por sinapses que os manterão vivos através de seus estímulos aferentes.

Vale notar que, como um único neurônio é capaz de receber e liberar fatores de crescimento neuronal ao mesmo tempo, estes dois processos descritos anteriormente ocorrem efetivamente em cada neurônio. Conseqüentemente, se estabelece uma rede de informação que controla o desenvolvimento dos circuitos neuronais de maneira guiada pela estimulação do ambiente, registrando o mundo e plastificando o cérebro.

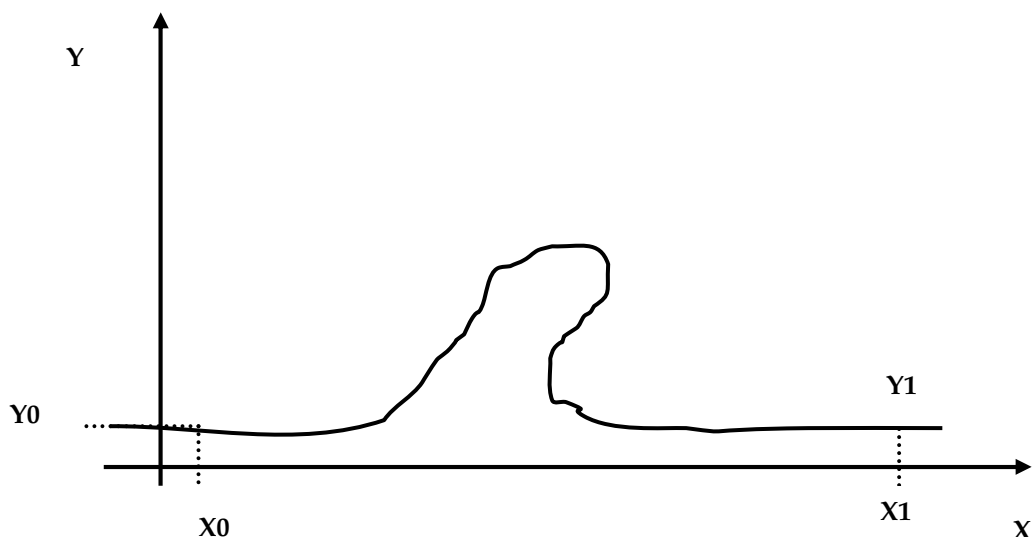
Os processos de competição descritos acima são essenciais para a formação de organizações neuronais chamadas mapas. Um mapa neuronal pode ser descrito como um circuito biológico composto por dois conjuntos de neurônios, denominados domínio e imagem, de tal forma que padrões de ativação similares do domínio são projetados em neurônios vizinhos na imagem. Em outras palavras, um mapa neuronal é uma projeção que transforma similaridades do domínio em relações espaciais na imagem. Estudos dos córtices visual, somatosensorial e associativo mostraram que pequenas regiões destes tecidos respondem a estímulos similares. De fato, estímulos como posição, orientação, cor, frequência espacial, frequência auditiva e significados são representados como mapas nos circuitos neuronais corticais.

13. O Conceito de Catástrofe

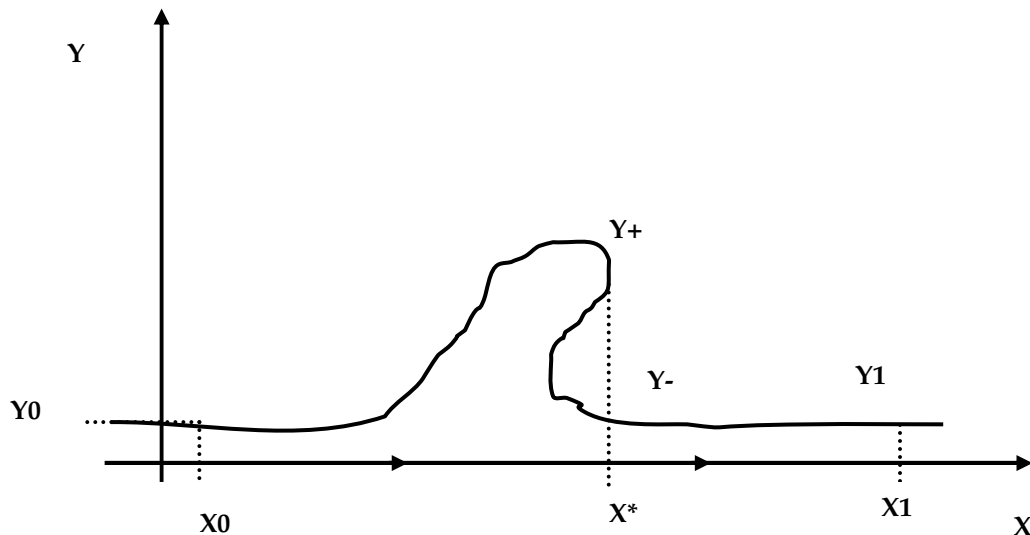
O termo catástrofe é geralmente associado a uma calamidade ou devastação que em comum com a semântica do termo na Teoria dos Sistemas tem o fato de ser algo que ocorre rapidamente. A catástrofe na Teoria dos Sistemas é uma **variação abrupta ou descontínua de uma ou mais variáveis do sistema quando as outras variáveis se alteram continuamente no espaço de estado**. Este caráter saltatório ou descontínuo da catástrofe é muito útil no entendimento de fenômenos que não podem ser estudados pela matemática “convencional” uma vez que a descontinuidade é uma propriedade de difícil tratamento por esta disciplina que assume na maioria de suas técnicas que as funções sejam contínuas e até mesmo deriváveis, i. e., sem mudanças bruscas.

Uma discussão importante sobre as catástrofes prende-se ao fato de **na Natureza podermos ou não considerar que algum fenômeno seja realmente descontínuo** ou saltatório. Seria uma avalanche “instantânea” um fenômeno contínuo ou saltatório em seu início ? O que dizer da descontinuidade da quebra rápida e inesperada de uma peça estrutural ? Ou mais, como classificar um repentino ataque cardíaco com instantânea vaso-constricção ? O que dizer de uma explosão ? Seriam estes fenômenos realmente saltatórios em seu início ou contínuos, em uma escala de tempo muito pequena para ser observada com nossos sentidos ou instrumentos ? Se epistemologicamente não há ainda resposta para estas perguntas, pelo menos como modelo de entendimento a Teoria das Catástrofes nos é muito útil.

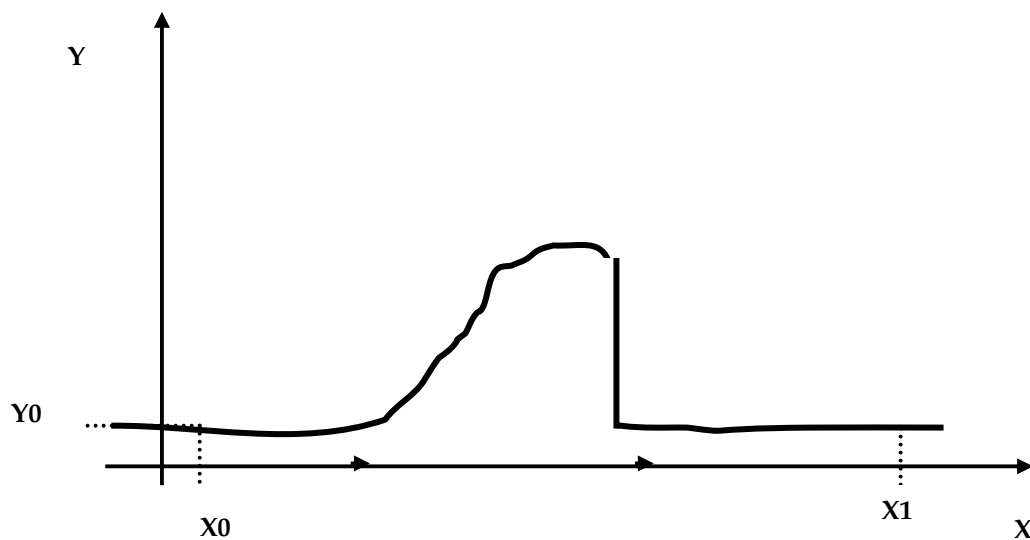
Consideremos um sistema não-linear com apenas duas variáveis, X e Y , para que possamos visualizar um fenômeno catastrófico no seu plano de estado. A trajetória de estado do ponto inicial (X_0, Y_0) ao ponto final (X_1, Y_1) está representada abaixo:



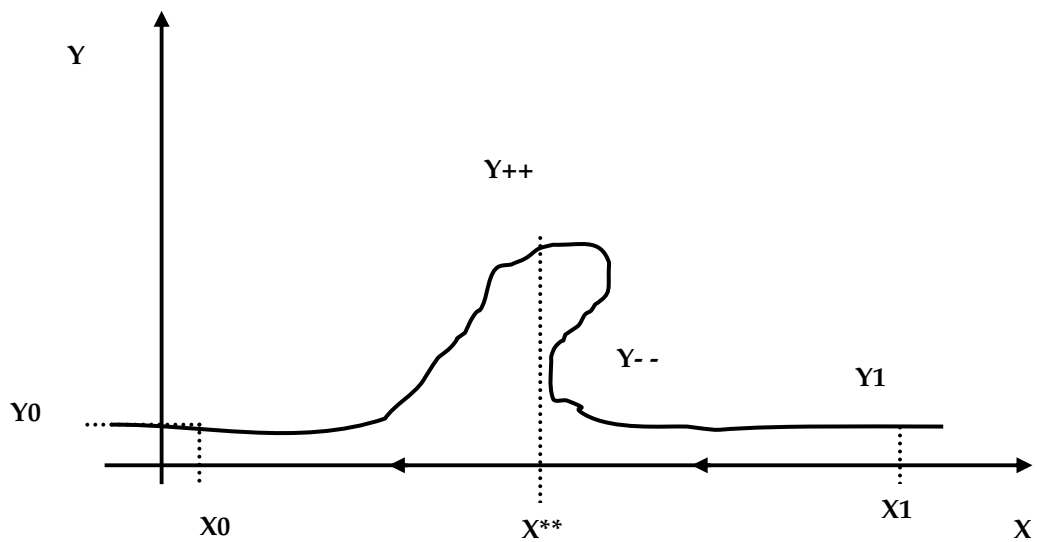
Considere que partindo-se do estado (X_0, Y_0) a variável X é lentamente e continuamente aumentada até atingir o valor X_1 . Neste percurso da variável X , a variável Y também sofrerá alterações. Estas alterações serão contínuas até o ponto X^* onde haverá um salto da variável Y do ponto Y_+ para Y_- :



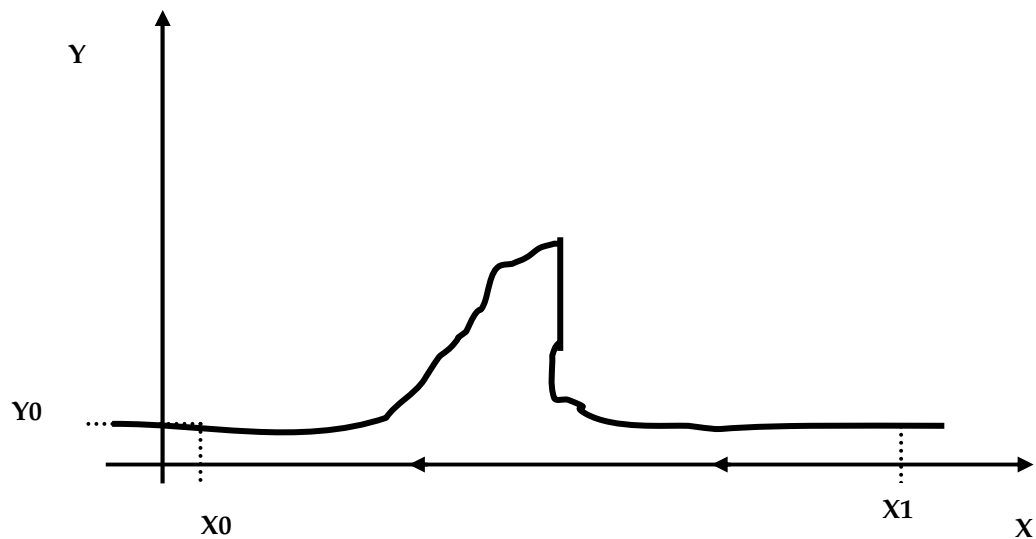
A partir deste salto, as duas variáveis continuarão a evoluir continuamente no espaço de estado. A trajetória de estado efetivamente realizada neste caminho entre X_0 e X_1 pode ser vista a seguir:



Se agora a variável X retorna de seu ponto X_1 para o ponto X_0 , novamente com continuidade e suavidade, ao passar pelo ponto X^* a variável Y sofrerá um salto do ponto Y_- para o ponto Y_+ :

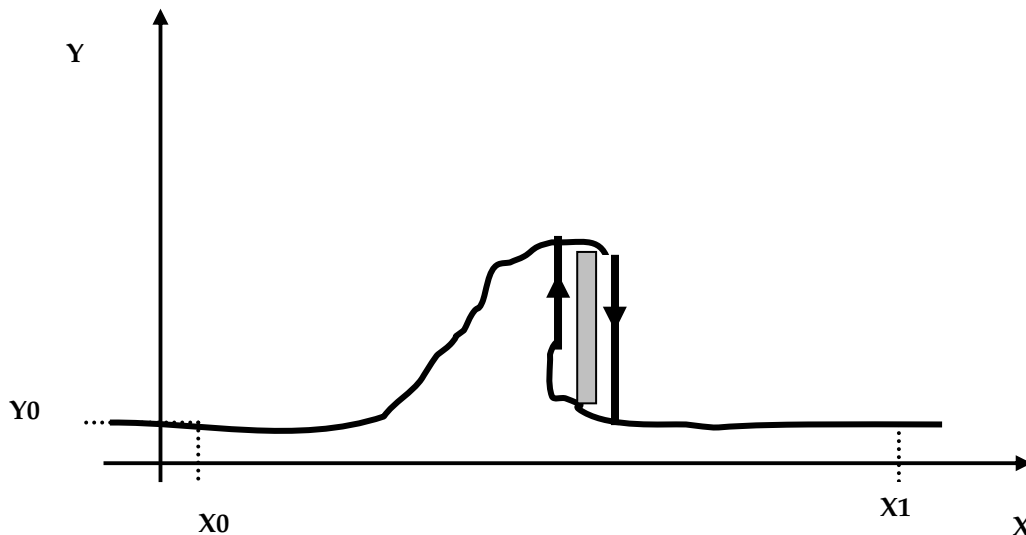


A partir deste salto, as duas variáveis continuarão seu percurso suave em direção ao ponto (X_0, Y_0) . A trajetória efetiva de X_1 para X_0 está representada a seguir:



Note a diferença entre a trajetória de ida de X_0 a X_1 e a trajetória de retorno. Os dois caminhos são diferentes e caracterizam o sentido da variável X , funcionando como um registro ou uma memória do sistema. Basta olhar para a

trajetória que se conclui se esta foi realizada em um sentido ou em outro. Em sistemas não-lineares sem catástrofe as trajetórias de ida e de volta são indiferenciáveis, ou seja, o sistema não possui memória. As duas trajetórias sobrepostas são representadas abaixo:



A área entre os dois saltos representa algum recurso do sistema que é consumido quando o mesmo caminha de x_0 a x_1 e, posteriormente, retorna. No caso de um material como o aço de uma peça mecânica que é tracionado e comprimido, por exemplo, esta área representa a energia de deformação perdida em cada ciclo tração/compressão, ou a entropia gerada neste ciclo. Esta energia acaba por produzir calor e o material, finalmente, após muitos ciclos, romperá. Este fenômeno de perda energética em cada ciclo de reversão de trajetórias em um sistema não-linear é chamado de histerese (termo oriundo da palavra história). Ocorre em materiais mecânicos exigidos em ciclos de tração e compressão, em materiais magnéticos exigidos em ciclos de magnetização e desmagnetização (motivo dos defeitos abruptos em equipamentos eletrônicos) e até em genes de células que entram em contato com certas drogas e depois perdem este contato, como no desenvolvimento de tolerância química e na correspondente síndrome de abstinência.

