

---

# Engenharia de Software

Introdução ao Desenvolvimento de Sistemas

**Luís Morgado**

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa  
Departamento de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores

---

# Desenvolvimento de Sistemas

- **Teoria dos sistemas**

- Enquadramento conceptual, baseado no princípio de que as partes constituintes de um sistema podem ser melhor compreendidas no contexto do sistema como um todo
- Um sistema é modelado como uma entidade complexa, resultante da interacção de múltiplas partes, através da abstracção de determinados detalhes do sistema
- Os sistemas partilham características e leis que são independentes da sua natureza física ou lógica

# Teoria dos sistemas

Os conceitos da teoria dos sistemas são úteis para analisar e compreender *sistemas complexos* em diferentes domínios, como a biologia, a psicologia ou a engenharia, nomeadamente na *engenharia de software*

- **Conceitos principais de modelação de sistemas**

- **Fronteira**

- Separação entre o sistema e o seu ambiente que delimita o âmbito do sistema e o distingue do seu meio envolvente
    - Pode ser física ou conceptual

- **Realimentação (*Feedback*)**

- A realimentação é um processo circular em que a saída de um sistema ou parte de um sistema alimenta a respectiva entrada, influenciando o comportamento futuro do sistema
    - A realimentação pode ser positiva ou negativa, reforçando ou atenuando comportamentos
    - É um aspecto fundamental do controlo de sistemas

- **Controlo**

- Refere-se à capacidade de um sistema regular o seu comportamento de modo a manter a estabilidade e apresentar o comportamento pretendido, nomeadamente por meio de realimentação

# O Conceito de Sistema

## Sistema

- Definição tendo por foco o propósito do sistema:

Conjunto de partes interactuantes que formam um todo integrado destinado a realizar um determinado objectivo

[Skyttner, 2001]

- Definição tendo por foco a organização do sistema

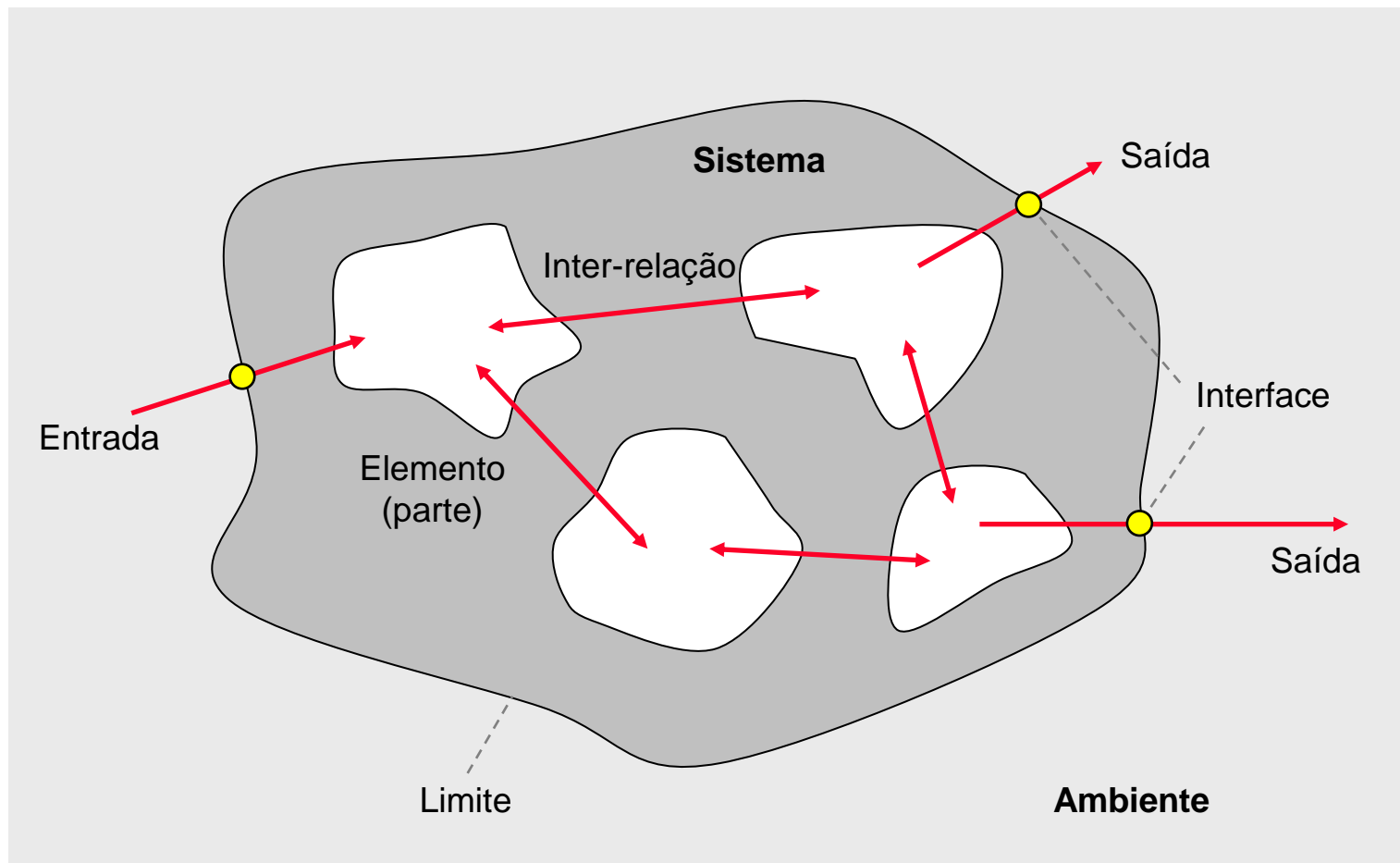
Conjunto de partes inter-relacionadas de tal modo que o conjunto das partes e das suas inter-relações reduz a entropia local

[Hitchins, 1992]

- Entropia como medida de desordem do sistema, o que se traduz na perda de organização necessária à concretização do seu objectivo

# O Conceito de Sistema

Um sistema é envolvido e influenciado pelo seu ambiente e é caracterizado pelos seus limites (fronteira), estrutura (partes e relações entre partes) e objectivo, os quais se expressam no seu comportamento



# O Conceito de Sistema

## Sistema

### – Partes

- Elementos constituintes do sistema

### – Relações

- Associações entre as partes do sistema que determinam as dependências entre partes

### – Objectivo

- Propósito do sistema que determina a sua função

**Um sistema é mais que um  
agregado de partes**

**O todo é mais que a soma das partes**  
resultado da inter-dependência entre partes

# O Conceito de Sistema

- **Relações**

- Interdependências que mantêm os elementos de um sistema ligados entre si (relacionados)
- Podem ser *físicas* ou *lógicas*
- Suportam a operação conjunta das partes através de fluxos de informação
  - A **informação** trocada é determinante para a manutenção do sistema como um **todo**, bem como para a sua **função**

# O Conceito de Sistema

- **Objectivo**

- Define o propósito do sistema expresso na sua função
- Determinante para o comportamento do sistema
- Pode ser *explícito* ou *implícito*
- Expresso através do comportamento do sistema
- Pode estar estruturado a diferentes níveis de organização
  - Sub-objectivos



# O Conceito de Sistema

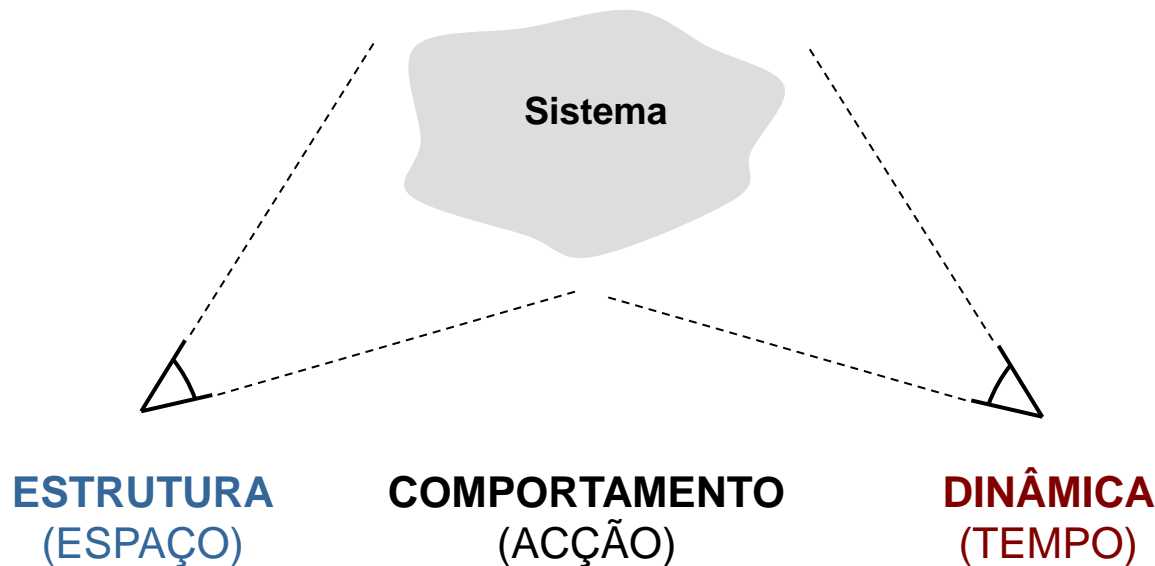
- Efeitos no comportamento de um sistema
  - Mudança das **partes**?
    - Produz um efeito limitado
  - Mudança das **relações**?
    - Produz um efeito significativo
  - Mudança dos **objectivos**?
    - Produz um efeito que pode ser drástico
- Os **objectivos guiam** o comportamento de um sistema

**Todos os  
aspectos são  
essenciais**

# Descrição de um Sistema

Um sistema pode ser descrito com base em diferentes perspectivas, nomeadamente:

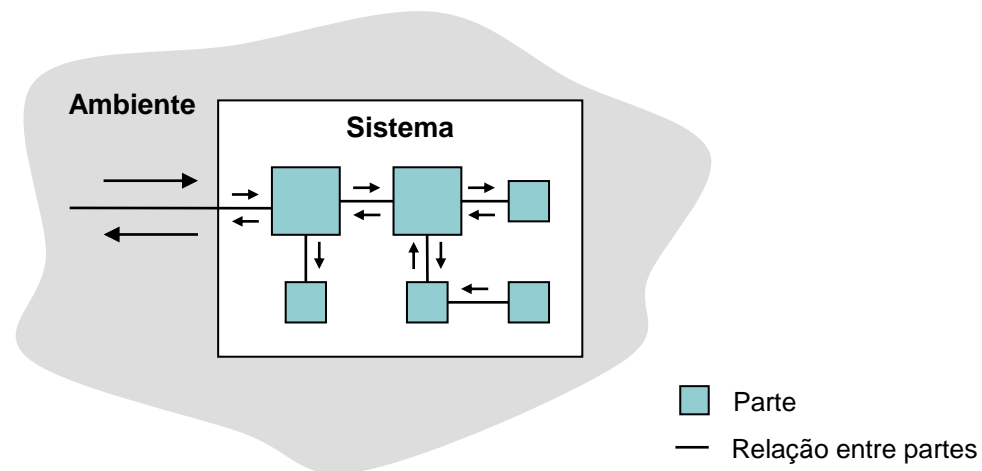
- **Estrutura**
  - Descreve a *organização* de um sistema no *espaço* (físico ou lógico) em termos de partes e de relações entre as partes que compõem o sistema
- **Dinâmica**
  - Descreve a *evolução* no *tempo* do comportamento e das características da estrutura do sistema
- **Comportamento**
  - Descreve a *acção* do sistema na relação com o ambiente envolvente



Perspectivas de descrição de um sistema

# Estrutura de um Sistema

- Organização das partes que constituem o sistema e da forma como se relacionam e interagem entre si para atingir um objectivo específico
- Pode ser *física* ou *lógica*
- É caracterizada pelas suas propriedades, nomeadamente as características específicas das partes do sistema e das relações de interdependência entre essas partes
- Definir a estrutura de um sistema é essencial para o seu desenvolvimento, uma vez que permite compreender os princípios de organização que suportam o funcionamento do sistema, nomeadamente, como as suas partes interagem entre si para atingir um objectivo específico



# Dinâmica de um Sistema

- As *configurações* das partes de um sistema podem mudar e evoluir ao longo do tempo, determinando o comportamento do sistema, essa evolução é descrita com base em dois conceitos principais:
- **Estado**
  - As configurações que um sistema, ou parte de um sistema, pode assumir que determinam os comportamentos possíveis, constituem o seu *estado*
- **Dinâmica**
  - Os vários estados que um sistema pode assumir e a forma como eles evoluem ao longo do tempo para produzir o comportamento do sistema, constitui a *dinâmica* do sistema
- A dinâmica de um sistema resulta de ciclos de realimentação e relações não lineares entre as partes do sistema, nomeadamente, tendo por base mecanismos de memória

# Comportamento de um Sistema

- O comportamento de um sistema refere-se à forma como um sistema funciona e interage com o seu ambiente ao longo do tempo, nomeadamente:
  - Como o sistema responde a estímulos externos e internos, como eventos, acções e mudanças de estado
  - Como o sistema age (gera as saídas) perante a informação proveniente do exterior (entradas)
- É suportado e determinado pela estrutura e dinâmica do sistema
- Realiza o objectivo do sistema

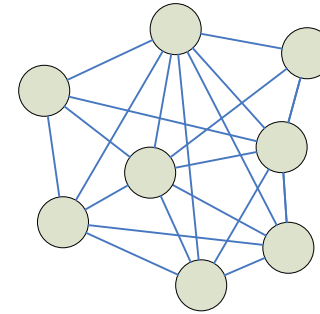
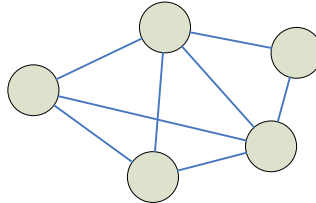
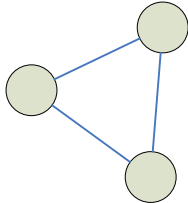
# Complexidade de um Sistema

Grau de **difículdade de previsão** das propriedades de um sistema dadas as propriedades das partes individuais [Weaver, 1948]

- Relacionada com a **informação** que é necessária para a caracterização de um sistema
- Um sistema é tanto mais **complexo** quanto mais **informação** for necessária para a sua **descrição**
- Reflete-se no **esforço** necessário para geração da **organização (ordem)** do sistema
  - Esforço de desenvolvimento

# O Problema da Complexidade

Menos  
complexo



mais  
complexo

- **Um problema de interacção**
  - De partes do sistema
  - De elementos de informação
  - De elementos das equipas de desenvolvimento
- **Explosão combinatória**
  - O número de possibilidades de inter-relação das partes de um sistema cresce de forma exponencial com o número de partes
  - Um sistema com duas vezes mais partes é muito mais do que duas vezes mais complexo

**Crescimento exponencial  
da complexidade**

# Complexidade e Organização

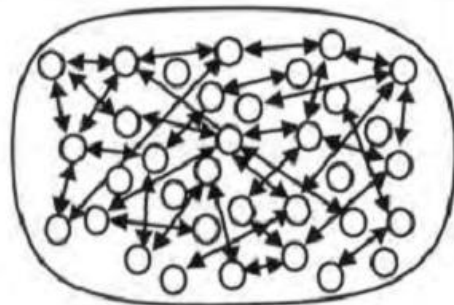
Diferentes tipos de complexidade de um sistema que é composto por múltiplos elementos diversos e interdependentes:

- **Complexidade organizada**

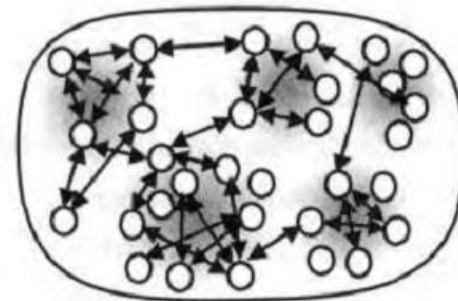
- O sistema apresenta um **elevado grau de organização e coerência**
- Ordem, organização, função, propósito

- **Complexidade desorganizada**

- O sistema apresenta um **baixo grau de organização e coerência**
- Desordem, desorganização, perda de função e de propósito



AN UNSTRUCTURED SYSTEM



AN "ORGANIZED" SYSTEM

[Flake, 1998]



# Tipos de Complexidade

## Complexidade desorganizada

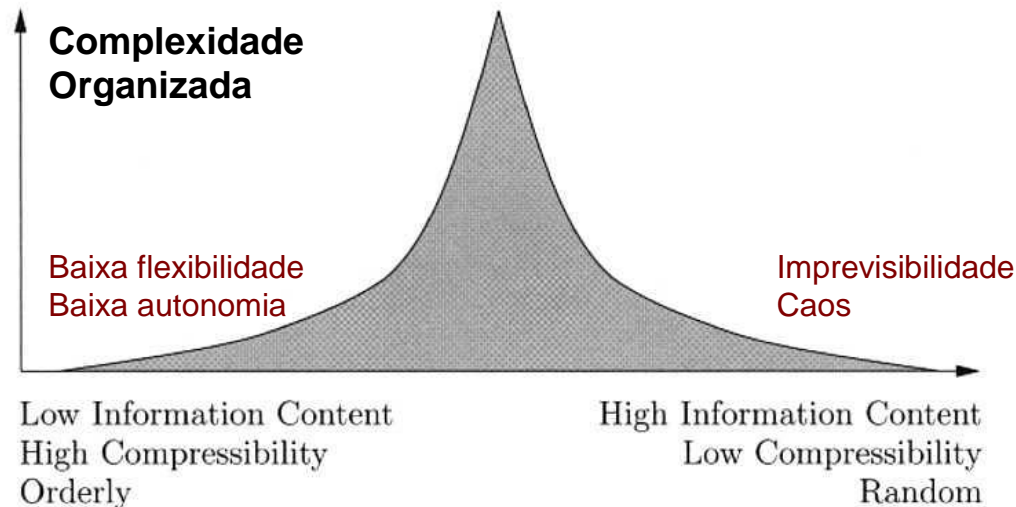
- Resulta do **número e heterogeneidade** das partes de um sistema
- As partes podem interactuar entre si, mas a **interacção é irregular**
- As características globais do sistema podem ser inferidas com base em **métodos estatísticos**

## Complexidade organizada

- Resulta dos padrões de **inter-relacionamento** entre as partes
- As interacções entre partes obedecem a **padrões correlacionáveis** no espaço e no tempo
- **Ordem, Organização**
  - Propósito (finalidade)
  - Função
- **Aspecto principal no desenvolvimento de um sistema:**
  - **Maximizar** a complexidade organizada em relação à complexidade total
  - **Minimizar** a complexidade desorganizada

# Tipos de Complexidade

- **Compromisso entre ordem e flexibilidade**
  - Uma **ordem elevada** e uma **baixa flexibilidade** determinam sistemas de alta previsibilidade, mas com baixa capacidade de adaptação à mudança e gamas limitadas de comportamentos (**baixa complexidade organizada**)
  - Uma **ordem baixa** e uma **alta flexibilidade** determinam sistemas de baixa previsibilidade, tendencialmente caóticos (**baixa complexidade organizada**)
- Obter uma elevada complexidade organizada exige um **equilíbrio entre ordem e flexibilidade**



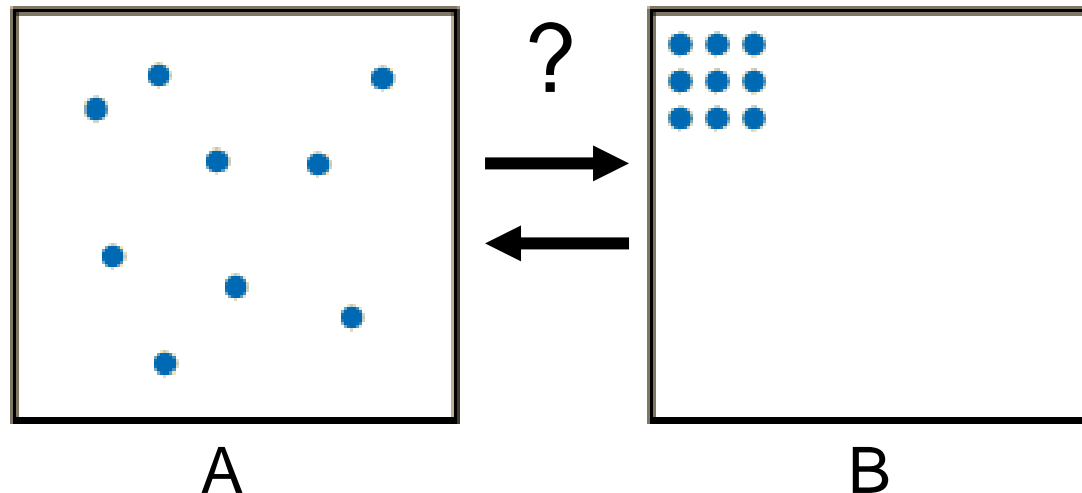
[Flake, 1998]

# Complexidade e Entropia

Consideremos um sistema físico, como é o caso de um recipiente com partículas de um gás (representadas na figura por círculos)

Dadas as duas configurações, A e B, apresentadas, qual a sequência de evolução natural do sistema - sem a intervenção de uma entidade externa?

- $A \rightarrow B$
- $B \rightarrow A$

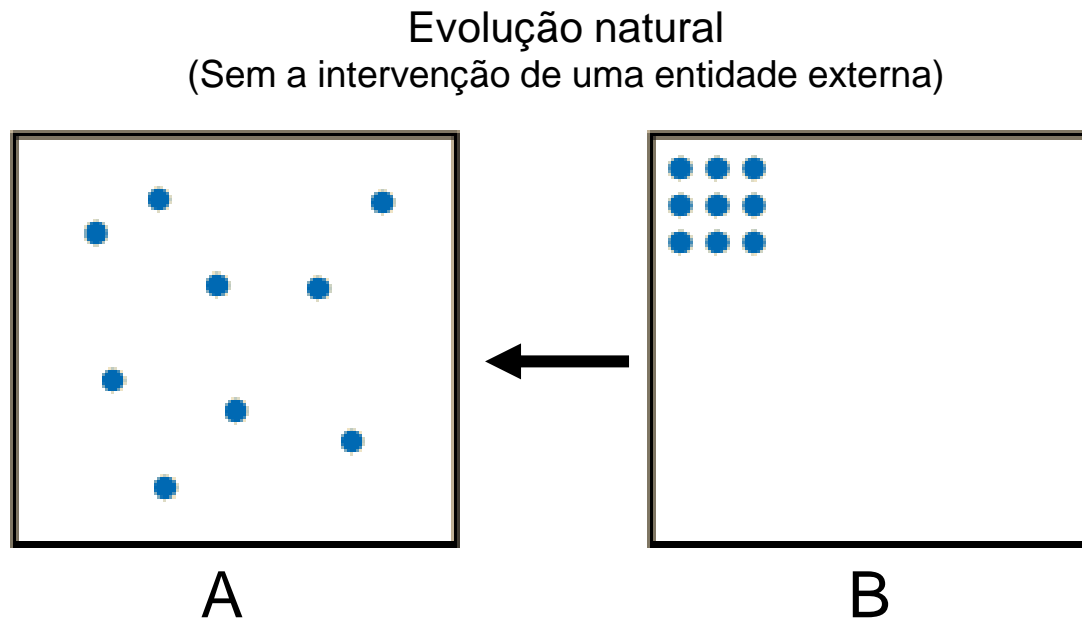


# Complexidade e Entropia

Sem a intervenção de uma entidade externa, o sentido de evolução do sistema é  $B \rightarrow A$

O sistema evolui de um estado de maior ordem, para um estado de maior desordem

**Qual o motivo para que seja assim?**



A resposta a esta questão tem por base um conceito designado **entropia**, o qual é fundamental para a compreensão dos princípios que regem a organização de um sistema

# Complexidade e Entropia

- **Entropia**

- Medida do grau de desordem relativa que existe num sistema fechado num dado instante de tempo  
[Skyttner, 2001]

- Diferentes formalizações consoante o contexto de aplicação (e.g. Termodinâmica, Teoria da Informação)

- Formalização proposta por Boltzmann:

$$S = k \log(W)$$

*k* – Constante de Boltzmann

*W* – Multiplicidade dos graus de liberdade de um sistema

**MULTIPLICIDADE**

Aspecto fundamental subjacente  
ao conceito de entropia

# Multiplicidade e Entropia

- **Estado** (macro)
  - Configuração global (macro) resultante das **partes e relações** entre partes de um sistema
- **Micro-estado**
  - Configuração específica (micro) das partes de um sistema
- **Multiplicidade** de um estado
  - Número de micro-estados admissíveis do estado

# Multiplicidade e Entropia

- **Exemplo**

- Sistema composto por dois dados



- **Estado:** soma dos valores das faces superiores dos dados
- **Micro-estado:** valor da face superior de cada dado

**Existirão estados com maior probabilidade de ocorrência que outros estados?**

# Multiplicidade e Entropia

<b>ESTADO</b> (macro)	<b>MICRO-ESTADOS</b> (2 dados)
2	1+1
3	1+2, 2+1
4	1+3, 2+2, 3+1
5	1+4, 2+3, 3+2, 4+1
6	1+5, 2+4, 3+3, 4+2, 5+1
7	1+6, 2+5, 3+4, 4+3, 5+2, 6+1
8	2+6, 3+5, 4+4, 5+3, 6+2
9	3+6, 4+5, 5+4, 6+3
10	4+6, 5+5, 6+4
11	5+6, 6+5
12	6+6



# Multiplicidade e Entropia

ESTADO (macro) $s$	MULTIPLICIDADE $W$	Prob. Ocorrência $P(s)$
2	1	2,8%
3	2	5,6%
4	3	8,3%
5	4	11,1%
6	5	13,9%
7	6	16,7% ←
8	5	13,9%
9	4	11,1%
10	3	8,3%
11	2	5,6%
12	1	2,8%

## ENTROPIA

Medida da multiplicidade dos estados de um sistema, indicando a tendência para o sistema assumir estados de máxima multiplicidade

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Num processo espontâneo a alteração total de entropia num sistema e no seu ambiente é positiva:

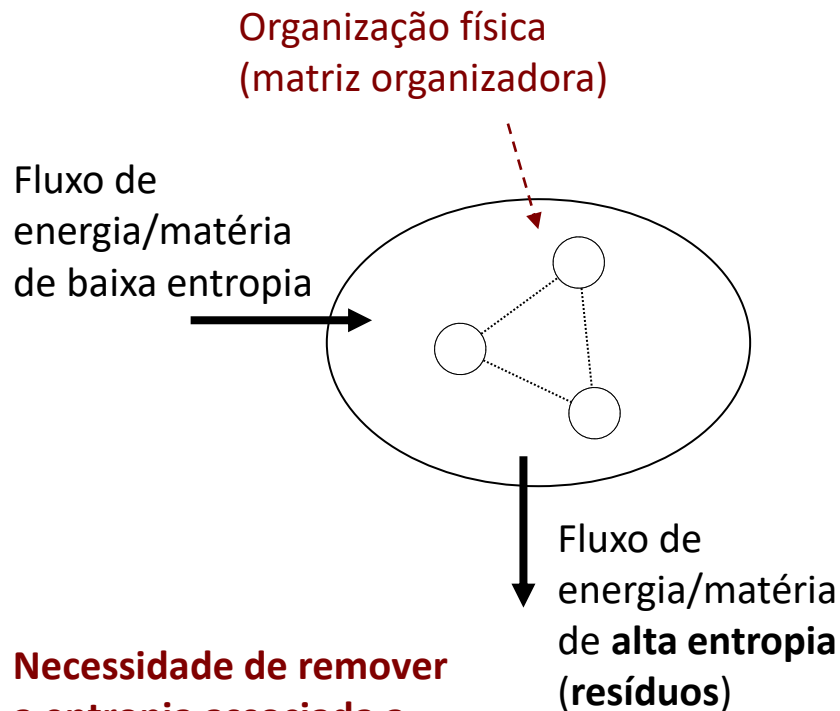
$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{ambiente}} \geq 0$$

- Num sistema fechado a entropia apenas pode manter-se ou aumentar
  - A **acção** de um sistema é inerentemente **geradora de entropia**
    - Redução de ordem
    - Complexidade desorganizada
- Se o **nível de entropia** de um sistema não for mantido dentro de **limites de viabilidade**, o resultado será a **desestruturação e consequente colapso** do sistema

# Sistemas e Entropia

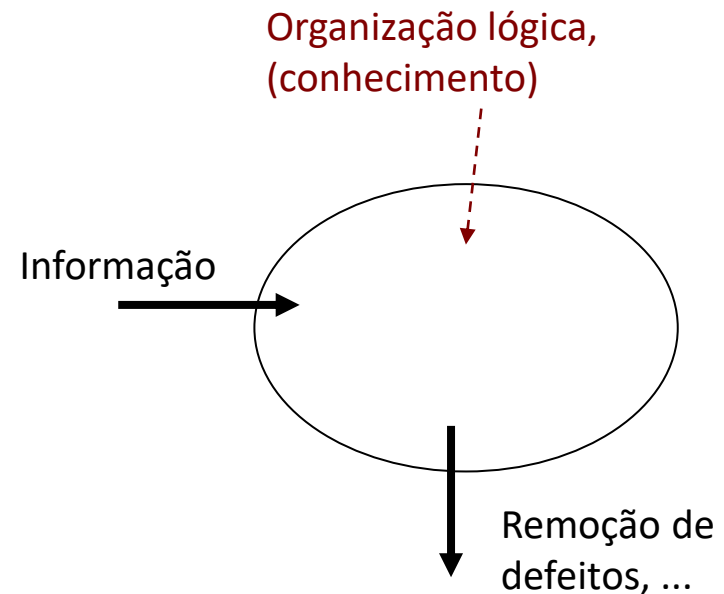
O conceito de *entropia* e as leis que lhe estão associadas, **aplicam-se quer a sistemas físicos, quer a sistemas lógicos**, como é o caso do software, pois dependem apenas do conceito de *multiplicidade* dos estados de um sistema

## SISTEMA FÍSICO



**Necessidade de remover a entropia associada a um sistema para que seja mantida a sua viabilidade**

## SISTEMA LÓGICO



### Entropia afecta o esforço

- Desenvolvimento
- Manutenção
- Evolução

# Desenvolvimento de Sistemas

- Uma outra definição de **Sistema**:
  - Conjunto de partes inter-relacionadas de tal modo que o conjunto das partes e das suas inter-relações reduz a entropia local. [Hitchins, 1992]



**Ordem**  
**Organização**  
**Coerência funcional**  
**Propósito**

# Software como um Sistema

## Software

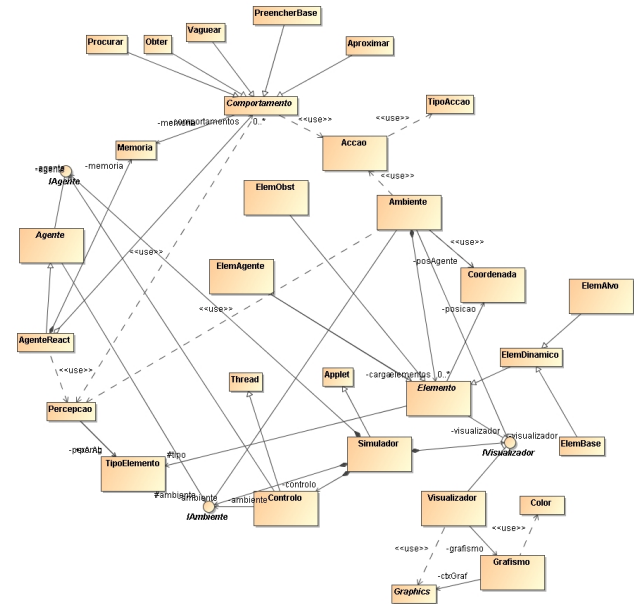
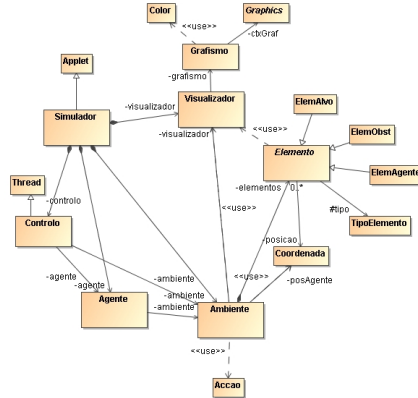
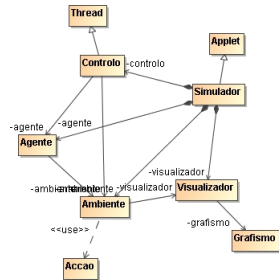
- Especificação que determina a configuração e respectiva operação de um sistema computacional
  - Pode ter diferentes formas, no caso de sistemas capazes de interpretar instruções de uma *linguagem de programação*, consiste num conjunto de instruções e de dados
  - Define *estrutura*, *dinâmica* e *comportamento* do sistema
- Define um sistema computacional numa perspectiva lógica, ou seja, em termos de um modelo de informação
- Sistema computacional especificado numa forma abstracta que descreve o conhecimento acerca do sistema em termos de conceitos lógicos e respectivas relações
  - **Modelo** de um sistema

# Software como um Sistema

## Características do software numa perspectiva de sistema

- Elevado número de partes
- Elevada interdependência entre partes
- Memória, realimentação
  - Dinâmicas complexas
- 2ª lei da termodinâmica
  - Entropia resultante quer do desenvolvimento, quer da operação
- **Complexidade exponencial**
  - **Organizada**: necessária ao objectivo do sistema (criada e gerida)
  - **Desorganizada**: desnecessária (eliminar)
    - Expressa-se sob a forma de erros e *redundância*

# Software e Complexidade



## Como se expressa a complexidade no desenvolvimento de software?

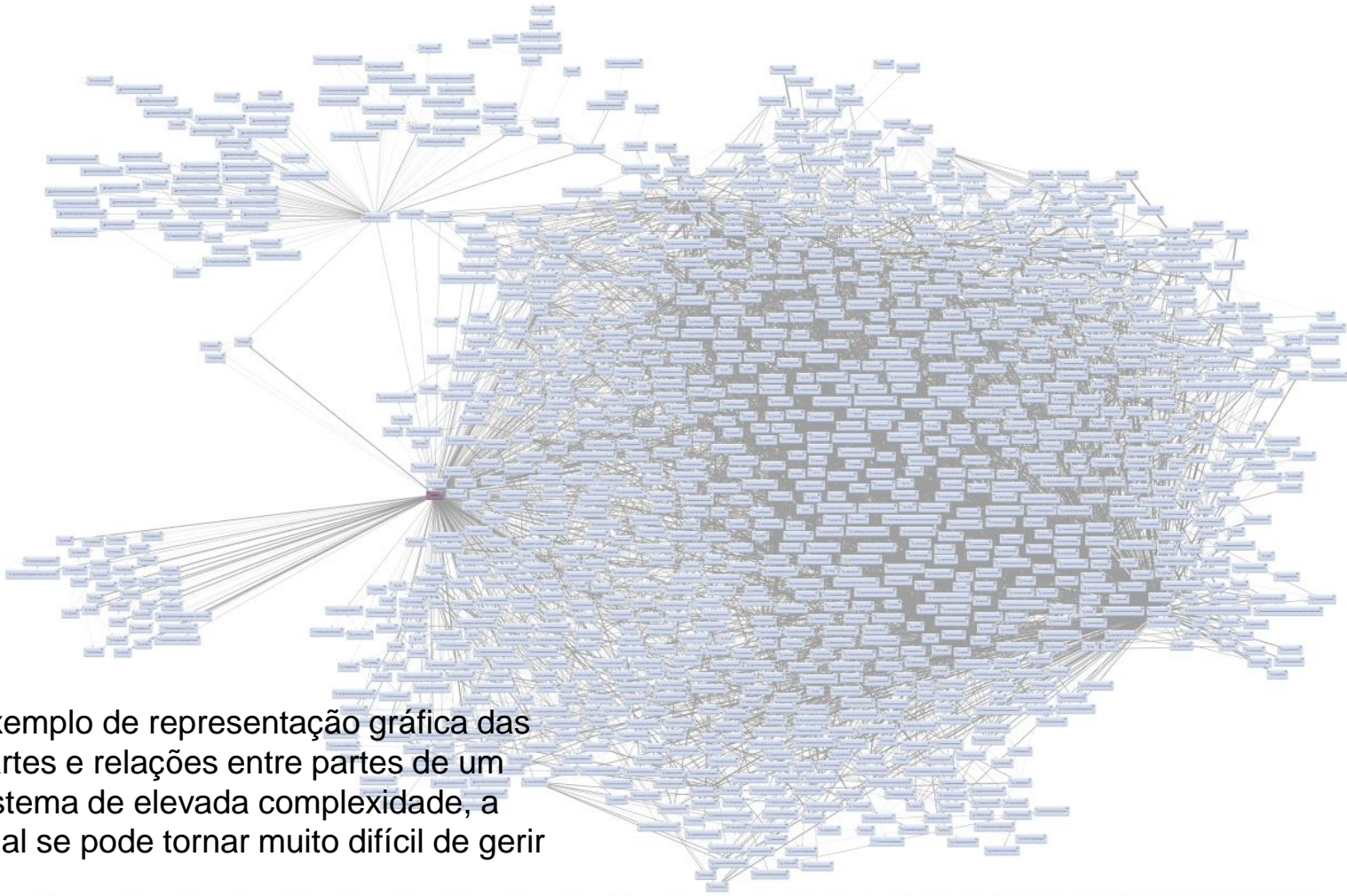
A complexidade expressa-se, entre outros aspectos, numa dificuldade crescente em compreender e gerir as partes e as relações entre partes que constituem o sistema que está a ser desenvolvido, a qual se pode observar numa representação gráfica (num modelo) desse software

Na prática, essa complexidade traduz-se na dificuldade e esforço crescente para a concepção e implementação do software, à medida que vão sendo incluídos mais aspectos do seu funcionamento



# Software e Complexidade

O crescimento da complexidade de um sistema de forma não adequadamente controlada, pode tornar o esforço de desenvolvimento muito elevado, a ponto de comprometer a viabilidade do respectivo projecto



Exemplo de representação gráfica das partes e relações entre partes de um sistema de elevada complexidade, a qual se pode tornar muito difícil de gerir



# Exemplo

Pretende-se representar uma estrutura de dados num sistema computacional, consideremos que esses dados são representados tendo por base o modelo relacional, sob a forma de um esquema de relação  $R$  com atributos  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$

## Esquema de Relação: $R(A, B, C, D)$

### Domínios de valores:

$$D_A = \{a_1, a_2\}$$

$$D_B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$$

$$D_C = \{c_1, c_2, c_3\}$$

$$D_D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8\}$$

Qual a multiplicidade  $W$  do esquema de relação  $R$ ?

$$W = (2 \times 4 \times 3 \times 8)^n = 192^n$$

$n$  = Cardinalidade de uma instância de  $R$

Número não limitado de instâncias de tuplos de  $R$   
(número de linhas na tabela da base de dados)

**Complexidade  
exponencial**

# Exemplo

Consideremos agora informação adicional do domínio do problema, sob a forma de dependências funcionais que devem ser garantidas pelo esquema de relação R

## Esquema de Relação: R(A, B, C, D)

### Domínios de valores:

$$D_A = \{a_1, a_2\}$$

$$D_B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$$

$$D_C = \{c_1, c_2, c_3\}$$

$$D_D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8\}$$

### Dependências funcionais:

$$\{A\} \rightarrow \{B, C, D\}$$

$$\{C\} \rightarrow \{D\}$$



Reflectem **conhecimento**  
do domínio do problema

# Exemplo

Com base nas dependências funcionais identificadas e através de um processo de normalização do esquema de relação R (no exemplo, garantindo a 3ª forma normal – 3NF), é reduzida a redundância, com consequente redução da multiplicidade do esquema (redução de entropia)

**Esquema de Relação:**  $R(A, B, C, D)$

**Dependências funcionais:**

$$\{A\} \rightarrow \{B, C, D\}$$

$$\{C\} \rightarrow \{D\}$$

**Normalização 3NF:**  $\{ R_1(\underline{A}, B, C), R_2(\underline{C}, D) \}$

$$W_1 = (2 \times 4 \times 3)^2 = 24^2$$

$$W_2 = (3 \times 8)^3 = 24^3$$

$$W = W_1 \times W_2 = 24^2 \times 24^3 = 24^5$$

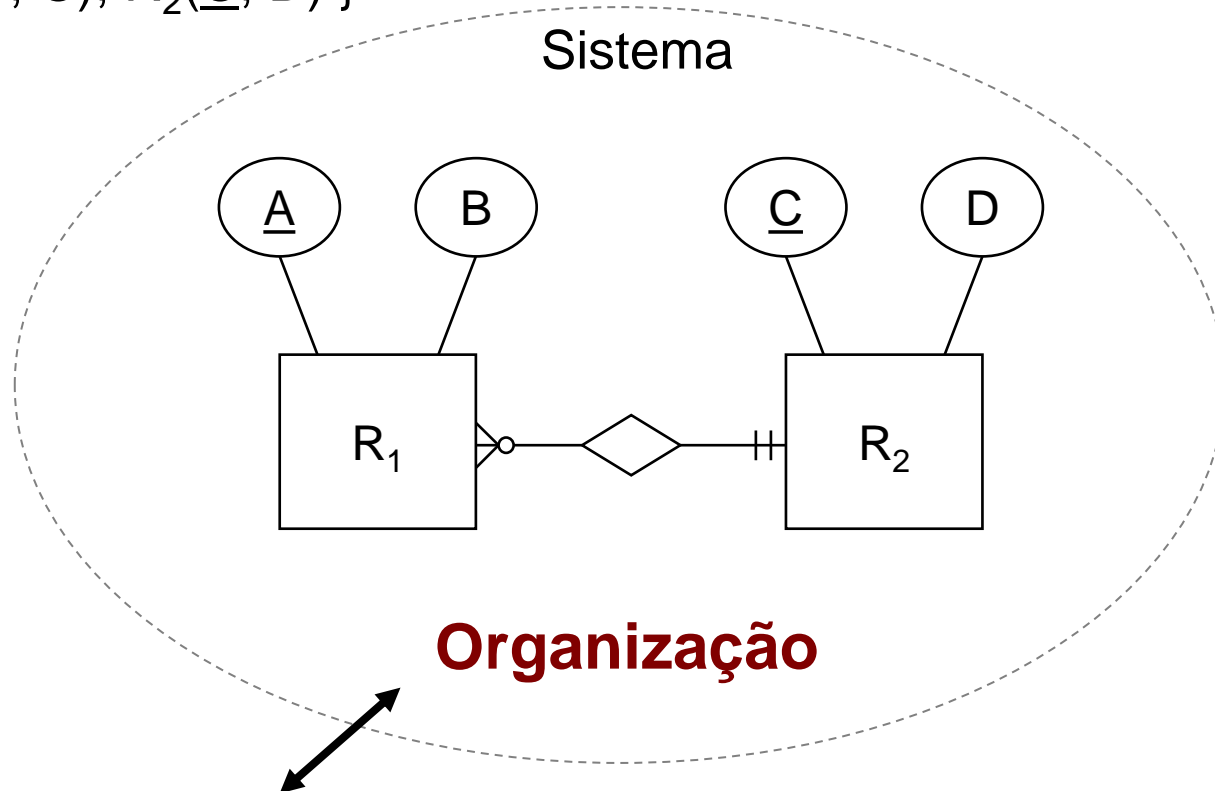
**Complexidade polinomial**  
Redução drástica da complexidade

**Redução da multiplicidade  
(redução da entropia)**

# Exemplo

Através da redução da entropia do sistema (neste caso uma estrutura de dados) foi eliminada complexidade desorganizada e criada complexidade organizada que corresponde à ordem que realiza o objectivo do sistema (representada graficamente sob a forma de um diagrama entidade-associação)

$\{ R_1(\underline{A}, B, C), R_2(\underline{C}, D) \}$



**Redução da entropia** – redução da complexidade desorganizada

# Conhecimento e Organização

O desenvolvimento de um sistema é um processo baseado em conhecimento (do domínio do problema e do domínio da solução), em que esse conhecimento é utilizado para definir a organização (ordem) do sistema a produzir, para que este cumpra o seu objectivo



# Bibliografia

[Booch *et al.*, 2007]

G. Booch, R. Maksimchuk, M. Engle, B. Young, J. Conallen, K. Houston, *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*, Addison-Wesley, 2007.

[Skyttner, 2001]

L. Skyttner, *General Systems Theory*, World Scientific, 2001.

[Meadows, 2009]

D. Meadows, *Thinking in Systems: A Primer*, Earthscan, 2009.

[Pressman, 2003]

R. Pressman, *Software Engineering: a Practitioner's Approach*, McGraw-Hill, 2003.

[Weaver, 1948]

W. Weaver, *Science and Complexity*, American Scientist, 36: 536, 1948.

[Hitchins, 1992]

D. Hitchins, *Putting Systems to Work*, John Wiley, 1992.

[Flake, 1998]

G. Flake, *The Computational Beauty of Nature: Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems, and Adaptation*, MIT Press, 1998