TECNOLOGIAS & SERVIÇOS MULTIMÉDIA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES E INFORMÁTICA

Departamento de Informática
Universidade do Minho

EQUIPA DOCENTE

- **Bruno Dias**
  bruno.dias@di.uminho.pt
  253 604 436; 919 312 312
  (Docente Responsável)

AVALIAÇÃO

- **Elementos de Avaliação A**
  2 Testes Escritos
- **Elemento de Avaliação B**
  1 Exame de Recurso/Especial
- **Elemento de Avaliação C**
  1 Classificação da Avaliação Contínua
- **Elemento de Avaliação D**
  1 Nota Prática: vários trabalhos práticos
- **NOTA FINAL = 0.3 max(A,B) + 0.1 C + 0.6 D**
- **NOTAS MÍNIMAS: 10 Valores (C,D)**

BIBLIOGRAFIA

- ***Fundamentos das Telecomunicações***
  V. Freitas, Universidade do Minho, 2003.
- ***Multimedia Signals and Systems***
  M. Mandal, Kluwer, 2001.
- ***Multimedia Communications: Applications, Networks, Protocols and Standards***
  F. Halsall, Addison-Wesley, 2000.
- ***Multimedia Communication Systems: Techniques, Standards, and Networks***
  K. Rao, Z. Bojkovic, D. Milovanovic, Prentice Hall, 2002.
- ***Vários artigos, textos e tutoriais fornecidos pelo docente ao longo do semestre***

PROGRAMA RESUMIDO

1. Teoria da Informação.
2. Digitalização.
3. Informação e Comunicação Multimédia.
4. Tipos de aplicações computacionais.
5. Formatos fundamentais.
6. Comunicação Multimédia.
7. Integração audio-visual.
8. Técnicas de codificação.
9. Métodos de compressão normalizadas.
10. Técnicas de compressão não normalizadas e normas para conferência multimédia.
11. Estado da arte.

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Teorema Fundamental da Teoria de informação

"Dado um ***canal de comunicação*** *e uma* ***fonte de informação*** *cujo débito de informação não excede a capacidade do canal, existe um código tal que a informação pode ser transmitida através do canal com uma frequência de erros arbitrariamente pequena, apesar da presença de ruído no canal."*

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Teoria de informação estuda 4 problemas fundamentais:

– A medida de informação produzida por uma fonte ...

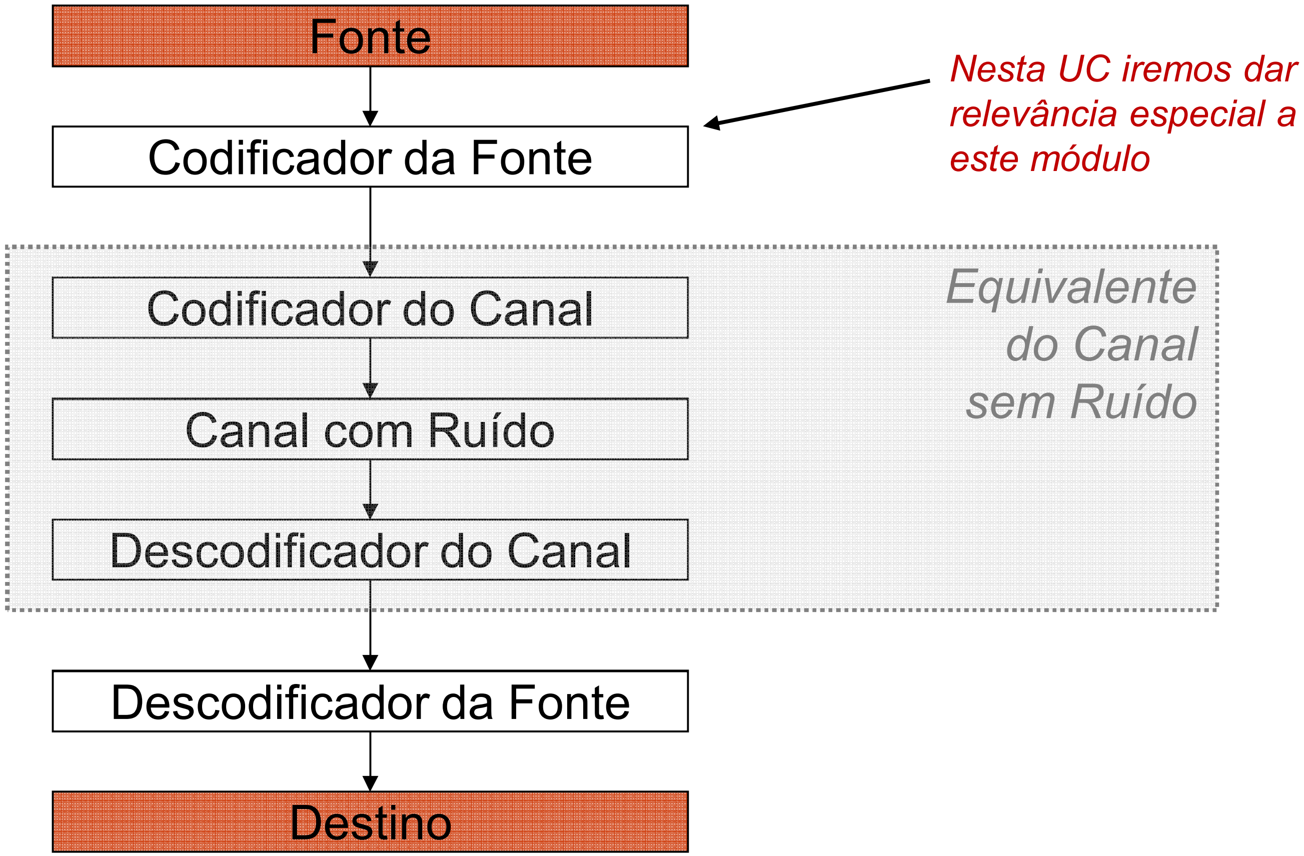
– A codificação eficiente da fonte ...

– A capacidade do canal ...

– A codificação do canal para controlo de erros ...

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Sistema de Comunicação com codificação da fonte e do canal



I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- Estudo da produção e transferência de informação
- Relevância na informação da mensagem em si e não dos sinais utilizados para a transmitir
- **Informação**: (no contexto das comunicações)
  "*objecto imaterial útil produzido por uma fonte que tem de ser transmitido para um determinado destino*"

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- um mais um é igual a dois
- um dia tem 24 horas
- amanhã o sol deve nascer
- as acções da empresa xyz amanhã vão subir 300%

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- Como definir uma **medida de informação** ?
  - relacionada com o grau de incerteza do destinatário relativamente à mensagem que vai receber
  - relacionada com a probabilidade da ocorrência da mensagem
  - vai ser definida como uma função que leva em conta essa probabilidade f(Pi)

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- Informação própria de uma mensagem X_i :

$$\boxed{I_i = f(P_i)}$$

- Propriedades:

$$\text{(i)} \quad f(P_i) \geq 0 \quad \text{para} \quad 0 \leq P_i \leq 1$$

$$\text{(ii)} \quad \lim_{P_i \to 1} f(P_i) = 0$$

$$\text{(iii)} \quad f(P_i) > f(P_j) \quad \text{para} \quad P_i < P_j$$

$$\text{(iv)} \quad f(P_i P_j) = f(P_i) + f(P_j)$$

?

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- Adoptar uma função que satisfaz estas propriedades: $\boxed{-\log_b()}$
- A base adoptada define a unidade de medida de informação
- base=2 na teoria de informação
- logo a unidade correspondente é o *bit*

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Bit como unidade de medida de informação

O bit é a quantidade de informação necessária para escolher uma entre duas alternativas igualmente prováveis ou, a quantidade de informação contida numa mensagem emitida por uma fonte capaz de emitir apenas duas mensagens distintas e equiprováveis.

Portanto, e por definição, a quantidade de informação, ou informação própria, I_i numa mensagem x_i é dada por:

$$\boxed{I_i \stackrel{def}{=} \log_2 \frac{1}{P_i} \quad bits}$$

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- Assumir uma fonte que emite uma série de símbolos X = $\{x_1, ..., x_m\}$ com probabilidades $\{P_1 .....P_m\}$

- **Entropia**: informação média (por símbolo) gerada pela fonte

$$\mathcal{H}(X) \stackrel{def}{=} \sum_{i=1}^{m} P_i I_i = \sum_{i=1}^{m} P_i \log_2 \frac{1}{P_i} \quad bits/símbolo$$

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- Quais os **limites para a entropia** de uma fonte?
- Valor que depende:
  - das probabilidades dos símbolos da fonte e
  - da cardinalidade (m)

$$\boxed{0 \leq \mathcal{H}(X) \leq \log_2 m}$$

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

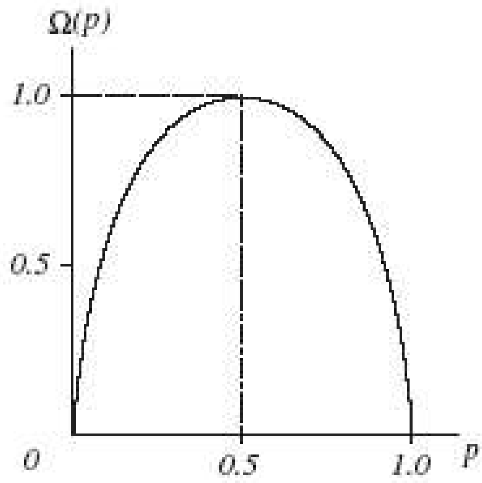
- **Débito de Informação**
  - indica o débito médio de informação por segundo
  - assumindo que a fonte produz r_s símbolos por segundo:

$$\boxed{\mathcal{R} \stackrel{def}{=} r_s \mathcal{H}(X) \quad bits/seg}$$

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- **Exemplo 1**: Fonte binária (m=2); P_1=p e P_2=1 -p ; entropia?

$$\mathcal{H}(X) = \Omega(p) \stackrel{def}{=} p \log_2 \frac{1}{p} + (1-p) \log_2 \frac{1}{1-p}$$



I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- **Exemplo 2**: Fonte emite 2000 símbolos/seg de um alfabeto de 4 símbolos (m=4) com probabilidades:

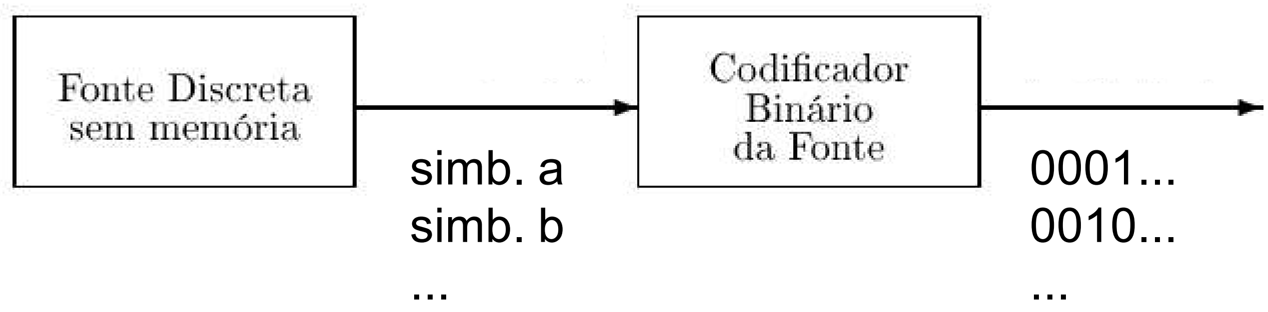
x_i	P_i	I_i
A	$1/2$	1
B	$1/4$	2
C	$1/8$	3
D	$1/8$	3

- Entropia?
- Débito de informação?

$$\mathcal{H}(X) = \frac{1}{2}\times 1 + \frac{1}{4}\times 2 + \frac{1}{8}\times 3 + \frac{1}{8}\times 3 = 1.75 \quad \text{bits/símb}$$

$$\mathcal{R} = 2000 \times 1.75 = 3500 \quad \text{bits/seg}$$

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO



- N_i - comprimento da palavra de código correspondente ao símbolo i
- **Comprimento médio do código**:

$$\overline{N} = \sum_{i=1}^{m} P_i N_i \quad \textit{dig bin/símbolo}$$

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- **Rendimento do código**

$$\rho = \frac{\mathcal{H}(X)}{\overline{N}} \leq 1$$

- **Compressão obtida numa codificação**

$$c = \frac{N_f - \overline{N}}{N_f} \times 100\ \%$$

codificação com um código de comprimento fixo mínimo

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- **Como obter códigos?**
  - existem várias alternativas com diferentes desempenhos
  - os códigos necessitam de ser decifráveis (e.g. desigualdade de kraft apresentada na secção códigos óptimos)

$$\boxed{\mathrm{Kr} = \sum_{i=1}^{m} 2^{-N_i} \leq 1}$$

  - melhores códigos -> melhores rendimentos

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- **Exemplo**: diferentes codificações para uma fonte que gera quatro símbolos (entropia 1.75 bits/símbolo) – Comprimentos médios e rendimentos dos códigos?

x_i	P_i	Código I	Código II	Código III	Código IV
A	1/2	00	0	0	0
B	1/4	01	1	01	10
C	1/8	10	10	011	110
D	1/8	11	11	0111	111
$\overline{N}$		2.0	1.25	1.875	1.75

rendimento 88%

menor que a entropia!!
mas código não decifrável

código em vírgula
melhor que código I

código em árvore
que neste caso
tem rendimento =
100%

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- **Códigos de Shannon-Fano / *Huffman e outras variantes***
  - Podem ser usados para construir códigos decifráveis
  - Geram códigos de comprimento variável
  - Geram códigos com "*bom*" rendimento
  - Algoritmos para geração de códigos? – vamos ver um dos algoritmos mais simples para construção de códigos deste tipo

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

– **Códigos de Shannon-Fano**
(em alguma bibliografia estes códigos são também designados por Códigos de Huffman)

(1) Ordenar os símbolos por ordem decrescente de probabilidade;

(2) Dividir o conjunto assim ordenado em dois subconjuntos tais que a soma das probabilidades em cada um deles seja o mais aproximadamente possível igual a metade da soma das probabilidades no conjunto anterior. Manter a ordenação.

(3) O dígito seguinte do código binário dos símbolos do primeiro dos sub-conjuntos é o **0** e o dos do outro é o **1**;

(4) Se os sub-conjuntos contêm um só elemento, a codificação terminou para esses sub-conjuntos;

(5) Repetir para cada um dos restantes sub-conjuntos (passo 2.)

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Códificação da fonte - **Exemplo**: aplicar o algoritmo anterior para codificar a fonte com oito símbolos (m=8)

x_i	A	B	C	D	E	F	G	H
P_i	0.50	0.15	0.15	0.08	0.08	0.02	0.01	0.01

Entropia?

Código?

Comprimento médio?

x_i	P_i	Passos de codificação 1	2	3	4	5	6	Código
A	0.50	0						0
B	0.15	1	0	0				100
C	0.15	1	0	1				101
D	0.08	1	1	0				110
E	0.08	1	1	1	0			1110
F	0.02	1	1	1	1	0		11110
G	0.01	1	1	1	1	1	0	111110
H	0.01	1	1	1	1	1	1	111111
$\mathcal{H}(X) = 2.15$								$\overline{N} = 2.18$

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

– Codificação por blocos

- agrupar símbolos da fonte e proceder à sua codificação
- daí a noção de "bloco"
- blocos de K símbolos
- normalmente leva a melhorias no rendimento do código...
- ... e na compressão obtida

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

– **Exemplo:**

- Fonte que emite símbolos de um alfabeto X com apenas dois símbolos X={A,B}; $P_A = 0.8$ e $P_B = 0.2$. (entropia = 0.722 bits/símbolo)
- Se se codificarem dois símbolos de cada vez temos um novo alfabeto Y={AA,AB,BA,BB}
- $P_{ij} = P_i * P_j$
  - por se tratar de uma fonte sem memória
  - ou seja, símbolos estatisticamente independentes
- código de *huffman* para Y (blocos de K=2)?

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- Tabela das probabilidades/palavras de código

Código?

Comprimento médio?

y_i	P_{y_i}	Código
AA	0.64	0
AB	0.16	11
BA	0.16	100
BB	0.04	101
$\overline{N}_2$		1.56

- para uma codificação K=1 comprimento médio do código era?

- logo ....

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

y_i	P_{y_i}	Código
AA	0.64	0
AB	0.16	11
BA	0.16	100
BB	0.04	101
$\overline{N}_2$		1.56

$$\overline{N}_2 = 1.560 \;\; dígitos \;\; binários/símbolo_Y$$

$$\overline{N} = \frac{\overline{N}_2}{2} = 0.780 \qquad dígitos \; binários/símbolo_X$$

Rendimento e compressão obtidos com (K=2) ?

$$\boxed{\rho = \frac{\mathcal{H}(X)}{\overline{N}} = \frac{0.722}{0.780} = 0.926}$$

$$\boxed{c = \frac{N_f - \overline{N}}{N_f} \times 100 = \frac{1-0.780}{1} = 22 \;\; \%}$$

Rendimento e compressão obtidos com (K=1) (sem blocos) ?

0.722 **0%**

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- **Rendimento e compressão obtidos com (K=3) ?**
  - experimentar.... melhor rendimento e compressão?

- **O que está a acontecer aos comprimentos médios dos códigos?**
  - à medida que K aumenta $\overline{N}$ tem tendência a diminuir; matematicamente isto é expresso na seguinte expressão:

$$\boxed{\mathcal{H}(X) \leq \overline{N} < \mathcal{H}(X) + \frac{1}{K}}$$

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Um dos teoremas fundamentais da Teoria da Informação

Toda a fonte de informação caracterizada por um valor da entropia $\mathcal{H}(X)$ bits/símbolo, pode ser codificada em binário de tal forma que o comprimento médio do código, $\overline{N}$, é limitado por

$$\mathcal{H}(X) \leq \overline{N} \leq \mathcal{H}(X) + \epsilon$$

Na codificação por blocos está-se a fazer $\epsilon = \frac{1}{K}$.

- código ideal será aquele em que ε=0; na prática nem sempre é possível sendo satisfatório um código que possua bom rendimento

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Fontes com memória

- Por vezes a probabilidade de emissão de um determinado símbolo depende dos símbolos anteriormente emitidos
- Fontes com memória de primeira ordem
  - fonte só se *lembra* do símbolo precedente
  - noção de probabilidade condicional
  - probabilidade de um símbolo ter ocorrido depois de um outro símbolo da fonte

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Fontes com memória de primeira ordem

- $\mathbf{P\ (x_i \mid x_j)}$ - probabilidade de o símbolo x_i ser escolhido depois do símbolo x_j
- $\mathbf{P\ (x_i\ x_j)}$ - se for interpretado como a probabilidade da ocorrência de x_j e posteriormente x_i :

$$\mathbf{P\ (x_i\ x_j) = P(x_j) * P\ (x_i \mid x_j)} \leftarrow$$

...para a construção da tabela de blocos de símbolos

- Como se calcula a entropia para fontes com memória de primeira ordem?

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Fontes com memória

- Entropia condicional relativamente ao símbolo x_j

$$\mathcal{H}(X|x_j) \stackrel{def}{=} \sum_{i=1}^{m} P(x_i|x_j) \log_2 \frac{1}{P(x_i|x_j)}$$

- Entropia real de uma fonte de primeira ordem

$$\mathcal{H}(X) = \sum_{j=1}^{m} P(x_j)\,\mathcal{H}(X|x_j)$$

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

Fontes com memória

- Quando as probabilidades condicionais de uma fonte com memória reduzem significativamente o valor da entropia face ao seu valor máximo:
  - ***a fonte diz-se redundante***

- Possibilidade de codificar a fonte com códigos mais eficientes (i.e. comprimento médio do código próximo da entropia real da fonte)

I. TEORIA DA INFORMAÇÃO

- **Processos de codificação da fonte**:
  - levam em conta o grau de incerteza/ grau de previsibilidade da fonte para tentar:
    - **retirar a redundância** produzida pela fonte
    - daí se designarem por mecanismos de **compressão da fonte**

GRALHA - p. 210:

A codificação por blocos conduz tendencialmente a um código óptimo, isto é, com $K \to \infty$ tem-se $\boxed{\overline{N}}$ $\to \mathcal{H}(X)$, $\rho \to 1$ e $c \to c_{max}$. De facto, para a codificação por blocos, a desigualdade 8.13 escreve-se

$$\boxed{K * \mathcal{H}(X) \leq \overline{N}_K < K * \mathcal{H}(X) + 1}$$

donde, dividindo por K e tendo em atenção que a entropia da fonte não se altera com a codificação, se obtém

$$\mathcal{H}(X) \leq \frac{\overline{N}_K}{K} < \mathcal{H}(X) + \frac{1}{K}$$

ou, visto que $\overline{N} = \frac{\overline{N}_K}{K}$,

$$\mathcal{H}(X) \leq \overline{N} < \mathcal{H}(X) + \frac{1}{K}$$

Podemos agora enunciar um dos teoremas fundamentais da Teoria da Informação embora não procedamos à sua demonstração geral:

Q.1	Alguns dos problemas fundamentais estudados pela Teoria da Informação relacionam-se com a medida da informação produzida por uma fonte e com a codificação (sem perda de informação) dessa fonte com o menor número possível de símbolos. Neste contexto, considere as seguintes afirmações:
A1	A entropia de uma fonte discreta sem memória é uma grandeza que representa a quantidade média de informação gerada por segundo por uma fonte e permite perceber qual o rendimento de uma determinada codificação.
B2	Pretende-se codificar uma fonte de informação com códigos de *huffman* mas sem utilizar codificações por blocos. Neste contexto, se a fonte gerar unicamente dois símbolos A e B com probabilidades P_A=1/5 e P_B=4/5 então nunca será possível comprimir a fonte.
C3	Assuma que a codificação *huffman* de símbolos individuais de uma fonte de informação gerou um *código_a* cujo rendimento é superior a zero e inferior a um. Neste caso, através de codificação *huffman* por blocos é sempre possível encontrar um *código_b* com rendimento superior ao obtido pelo *código_a*.
D4	Suponha que desenvolve um *software* de compressão/descompressão de ficheiros baseado em códigos de *huffman* e pretende aplicar esse *software* a um ficheiro de 10 Kbytes. Podemos afirmar que existe sempre um valor de N ($1 \le N < \infty$) de tal forma que aplicando o *software* de compressão N vezes consecutivas consegue obter um ficheiro resultante com um tamanho inferior a 10 Kbytes.
Z9	Nenhuma das opções anteriores está correcta.

Indique a(s) referência(s) da(s) alternativa(s) que considere correcta(s):

$$c \;=\; \frac{N_f - \overline{N}}{N_f} \times 100\ \%$$

$$\mathcal{H}(X) \;=\; \Omega(p) \;\stackrel{def}{=}\; p\,\log_2 \frac{1}{p} \;+\; (1-p)\,\log_2 \frac{1}{1-p}$$

$$\mathcal{H}(X|x_j) \;\stackrel{def}{=}\; \sum_{i=1}^{m} P(x_i|x_j)\,\log_2 \frac{1}{P(x_i|x_j)}$$

$$0 \leq \mathcal{H}(X) \leq \log_2 m$$

$$\rho \;=\; \frac{\mathcal{H}(X)}{\overline{N}}$$

$$\mathcal{H}(X) \;=\; \sum_{j=1}^{m} P(x_j)\,\mathcal{H}(X|x_j)$$

$$\overline{N} \;=\; \sum_{i=1}^{m} P_i\,N_i$$

$$\mathcal{R} \;\stackrel{def}{=}\; r_s\,\mathcal{H}(X)$$

$$\mathcal{H}(X) \;\stackrel{def}{=}\; \sum_{i=1}^{m} P_i\,I_i \;=\; \sum_{i=1}^{m} P_i\,\log_2 \frac{1}{P_i}$$

$$I_i \;\stackrel{def}{=}\; \log_2 \frac{1}{P_i}$$

$$\mathcal{H}(X) \;\leq\; \overline{N} \;<\; \mathcal{H}(X) \;+\; \frac{1}{K}$$

Q.2	Uma fonte de informação emite oito símbolos independentes entre si de um alfabeto X, com X={A,B,C,D,E,F,G,H}, gerando 1800 símbolos por minuto. Sabe-se que o débito de informação desta fonte é de 75 bits/seg.
A1	Com os dados apresentados podemos afirmar que os oito símbolos gerados pela fonte não são equiprováveis.
B2	O valor máximo de compressão que se poderia obter por codificação da fonte é superior a 20%.
C3	Usando códigos binários de comprimento fixo, para uma codificação por blocos de 2 símbolos (K=2) necessitávamos de um código com comprimento de 6 dígitos binários por par de símbolos_x.
D4	Aplicando uma codificação *huffman* por blocos de 4 símbolos (K=4) obtínhamos um comprimento médio de código inferior a 2.8 dígitos binários por símbolo_x.
Z9	Nenhuma das opções anteriores está correcta.

Indique a(s) referência(s) da(s) alternativa(s) que considere correcta(s):

Q.6 – Considere uma fonte de informação capaz de emitir *n* mensagens distintas e independentes entre si em que metade delas, sendo equiprováveis, ocorre com 1/3 da probabilidade da outra metade, constituída também por mensagens equiprováveis. Mostre que a fonte possui entropia $H(x) = \log_2 n - \frac{3}{4}\log_2 3 + 1$.

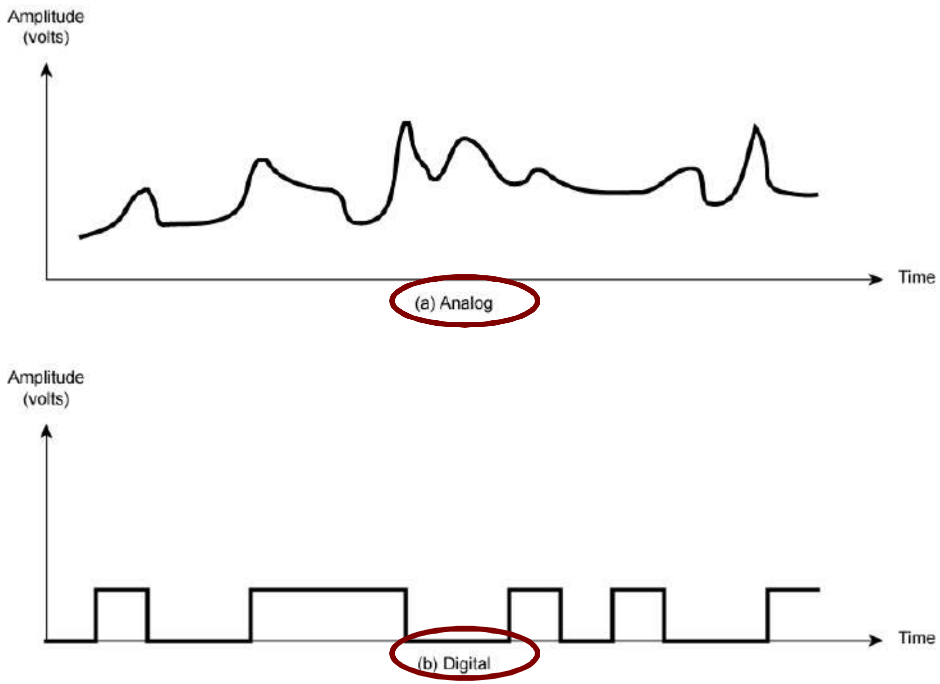
II. DIGITALIZAÇÃO

"Processo que permite transformar os sinais analógicos, contínuos no tempo, em sequências de números com um número limitado de dígitos, que representam a amplitude do sinal em instantes de tempo regularmente espaçados"

– as questões relacionadas com analógico vs digital abrangem os domínios dos dados, dos sinais e dos sistemas de transmissão

II. DIGITALIZAÇÃO

Exemplo: Questões relacionadas com a natureza dos sinais



II. DIGITALIZAÇÃO

Exemplo: Questões relacionadas com a transmissão

Transmissão Analógica

- Sinal analógico é transmitido independentemente dos dados que ele transporta
- Sinal é atenuado ao longo da distância percorrida
- Utilização de amplificadores para aumentar a potência do sinal mas...
- ...também amplificam o ruído existente

II. DIGITALIZAÇÃO

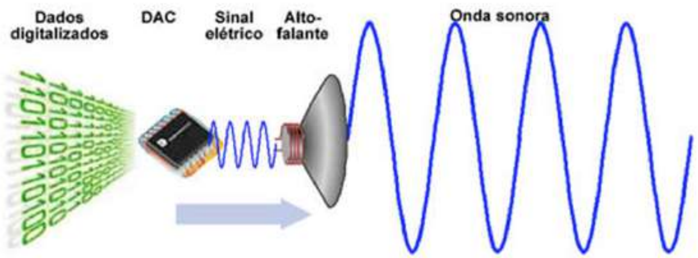
Transmissão Digital

- Preocupação com os dados (mensagem) que o sinal transporta
- Utilização de equipamentos que: recebem o sinal, retiram os dados que eles transportam, e retransmitem o sinal
  - a atenuação do sinal é assim ultrapassada e...
  - ... o ruído não é amplificado
- Possibilidade da utilização de mecanismos detectores/correctores de erros

II. DIGITALIZAÇÃO

Este capítulo foca principalmente...

"Processo que permite transformar os sinais analógicos, contínuos no tempo, em sequências de números com um número limitado de dígitos, que representam a amplitude do sinal em instantes de tempo regularmente espaçados"

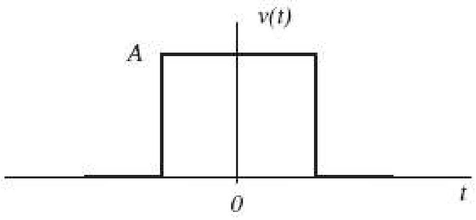


II. DIGITALIZAÇÃO

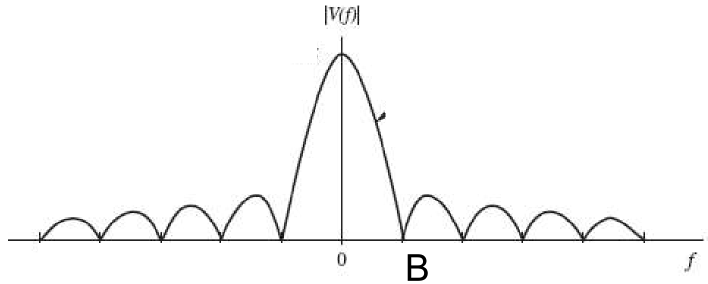
- A base teórica da digitalização requer a compreensão de conceitos adicionais:
  - **espectro** de um sinal
  - **largura de banda** de um sinal
  - **largura de banda de transmissão** de um sistema
  - **ritmo máximo de símbolos** digitais suportado por um sistema de transmissão

II. DIGITALIZAÇÃO - conceitos introdutórios -

Exemplo da representação de um sinal no domínio do tempo



Representação de um sinal no domínio das frequências



- **Espectro de um sinal** - é uma representação do sinal no **domínio das frequências**
- **Largura de Banda (B)** de um sinal é a amplitude de um intervalo espectral positivo onde está *"parte significativa"* da energia do sinal

II. DIGITALIZAÇÃO - conceitos introdutórios -

- **Sistemas de transmissão**
  - Também podem ser representados no **domínio das frequências**
  - Define-se **largura de banda de transmissão** de um sistema (**B_T**) como o intervalo de frequências nas quais o sistema permite uma transmissão com *"aceitável"* qualidade

II. DIGITALIZAÇÃO - conceitos introdutórios -

- **Ritmo de Nyquist** num sistema de transmissão com largura de banda B_T, o ritmo máximo teórico de símbolos (r_s) digitais que por ele se podem transmitir é de:

$$\boxed{r_s \leq 2 * B_T}$$

- **Filtros** sistemas que por alguma razão pretendem alterar o espectro do sinal (modelados da mesma forma que os sistemas de transmissão). Diversos tipos: passa-baixo, passa-alto, passa-banda.

II. DIGITALIZAÇÃO

"Processo que permite transformar os sinais analógicos, contínuos no tempo, em sequências de números com um número limitado de dígitos, que representam a amplitude do sinal em instantes de tempo regularmente espaçados"

> Quais as fases de um processo de digitalização?

II. DIGITALIZAÇÃO

discretização no tempo

discretização na amplitude

1. **Amostragem** – recolha periódica de valores do sinal (amostras);
2. **Quantização** – aproximação do valor das amplitudes das amostras a um número limitado de níveis quânticos;
3. **Conversão AD** – representação do valor aproximado das amplitudes das amostras através de valor numérico/digital (normalmente em binário);
4. **Codificação de Linha** – transformação dos valores numéricos em formas de representação apropriadas ao canal de transmissão.

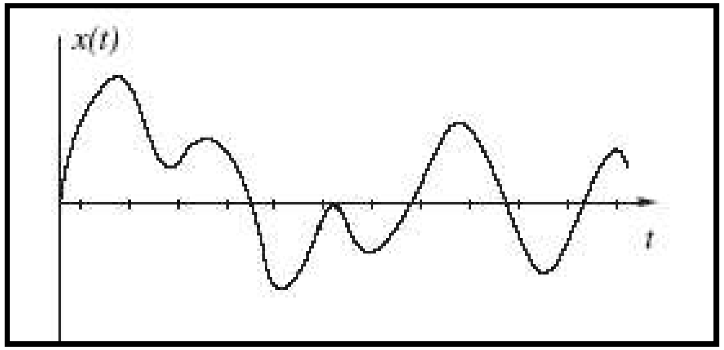
II. DIGITALIZAÇÃO

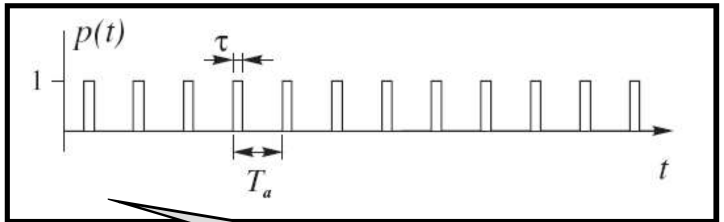
Amostragem

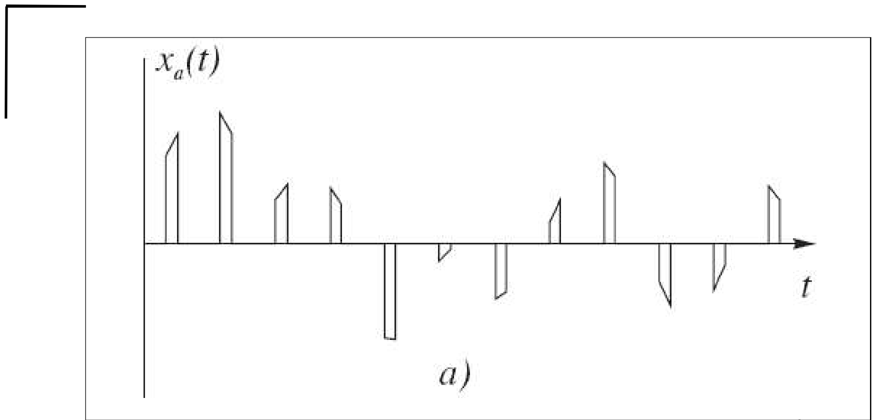
- Processo pelo qual o sinal é amostrado através de uma sequência de pulsos intercalados no tempo
- A quantidade de amostras recolhidas depende de um parâmetro designado por frequência de amostragem
- Que valor para a frequência de amostragem?

II. DIGITALIZAÇÃO

- **Amostragem** $x(t)$ é o sinal original; $p(t)$ representa uma série de pulsos intercalados no tempo; **:** $x_a(t)$ é o sinal amostrado $\mathbf{x_a(t) = x(t) * p(t)}$







Qual a frequência de amostragem (f_a) a ser utilizada?

Sinal também designado por PAM (pulse amplitude modulation)

II. DIGITALIZAÇÃO

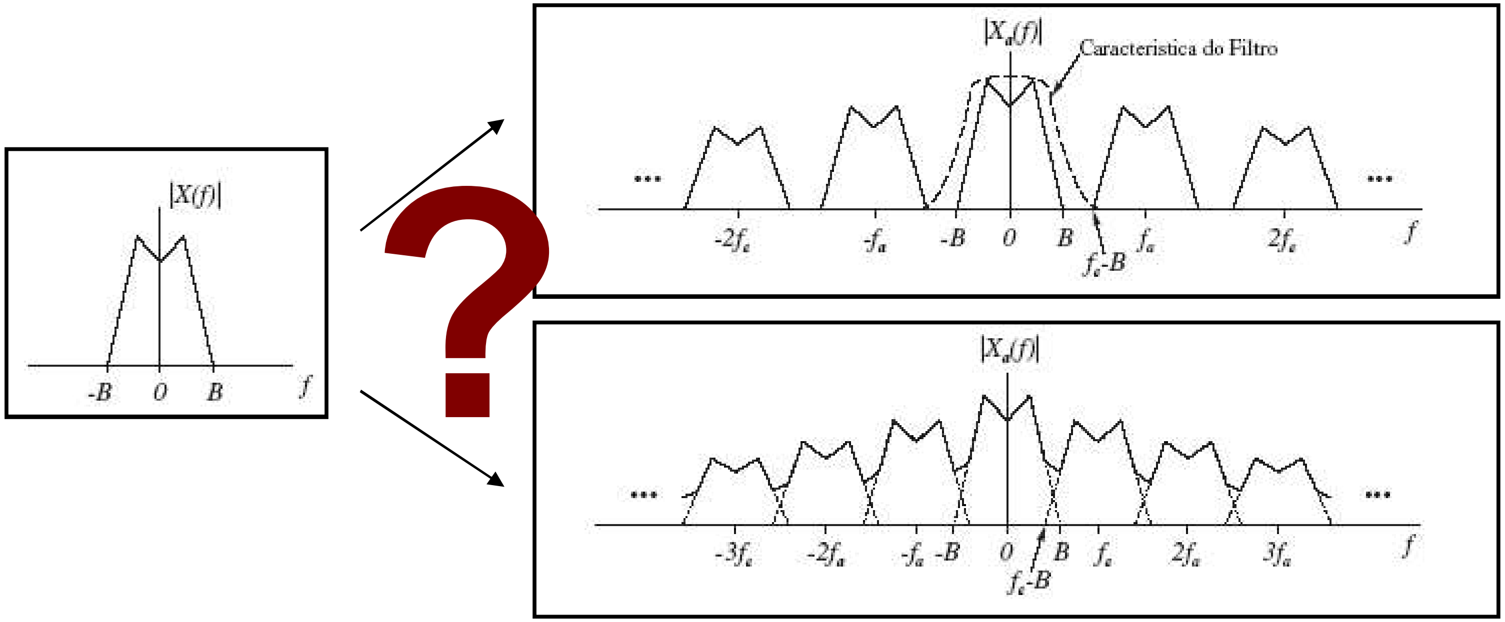
Supondo um sinal limitado à Banda (0..B) quantas amostras precisamos para que $x_a(t)$ represente de alguma forma o sinal x(t)? Seja X(f) o espectro do sinal original e $X_a(f)$ o espectro do sinal amostrado. Prova-se que:

$$X_a(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C(nf_a)\, X(f - nf_a)$$

ou seja, o espectro do sinal amostrado é aproximadamente igual à soma do espectro X(f) com réplicas desse espectro desfasadas em +/- n*fa Hz.

II. DIGITALIZAÇÃO

– Exemplo de **dois cenários de amostragem**...



II. DIGITALIZAÇÃO

Teorema 5.1 (Teorema da Amostragem) *Um sinal de espectro limitado à banda de frequências* $[0, B]$ *fica completamente definido pelas suas amostras desde que recolhidas a uma frequência igual ou superior a* $2B$,

$$f_a \geq 2B \tag{5.6}$$

podendo o sinal ser recuperado a partir das amostras por filtragem passa-baixo com largura de banda do filtro B_T *igual a B Hz.*

- teorema que define um limite mínimo para a frequência de amostragem

II. DIGITALIZAÇÃO

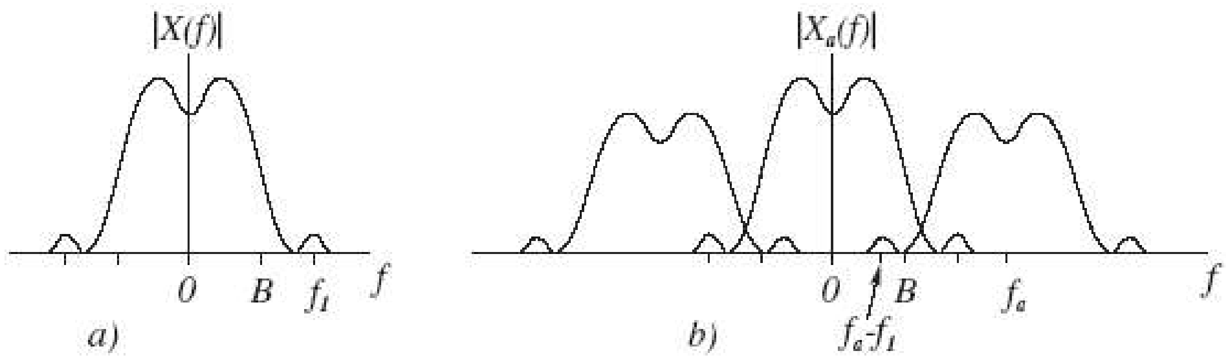
– **Algumas considerações** relacionadas com a operação de amostragem na prática

1. Filtros não são ideais
2. Os sinais, na prática, não possuem espectros limitados

– Devido a isto a frequência de amostragem é normalmente maior que 2*B; (mas em termos teóricos continuamos a assumir $f_a \geq 2B$)

II. DIGITALIZAÇÃO

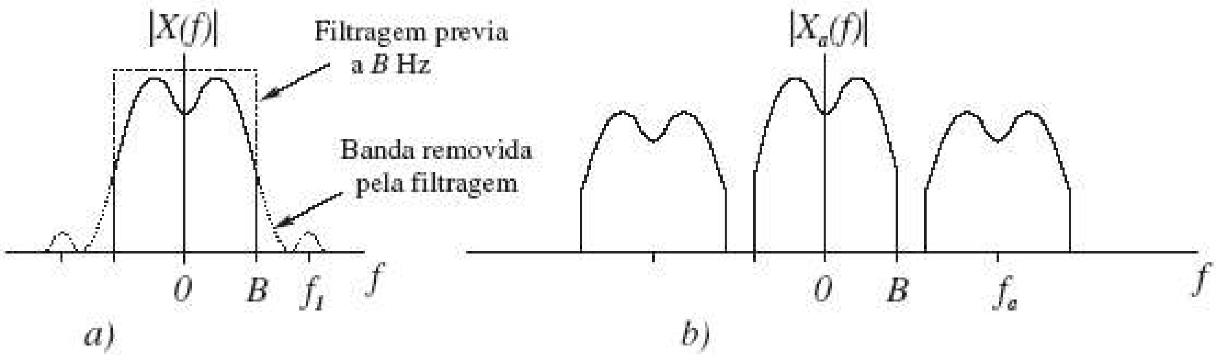
- O sinal, embora tenha largura de banda B, tem um espectro que se estende para além desta banda com componentes não nulas



Aliasing espectral dos sinais da prática mesmo com $f_a > 2B$

II. DIGITALIZAÇÃO

- Exemplo envolvendo a filtragem prévia do sinal por forma a evitar o fenómeno de *aliasing*



Filtragem prévia do sinal evitando o *aliasing* na amostragem

II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização

- as amostras podem ter um valor infinito de valores
- por forma a ser possível a transformação das amplitudes das amostras em números elas precisam de **assumir um número finito de valores**
- esta aproximação **introduz ruído** no processo de conversão analógico/digital
- processo de **discretização das amplitudes** designa-se por quantização

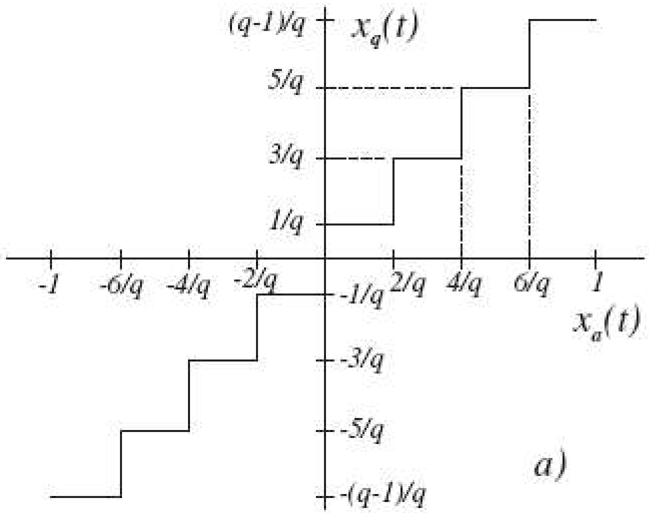
II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Uniforme

- Divisão do intervalo da variação do valor das amostras em níveis quânticos de amplitude fixa (i.e. igualmente espaçados entre si).
- Quantos mais níveis quânticos (número q) maior a precisão na representação da amostra.
- Se K for o número de dígitos a utilizar na representação dos valores dos níveis quânticos, então $K = \log_b(q)$, em que b é a base escolhida (geralmente b=2 pois a codificação binária é a mais frequente)

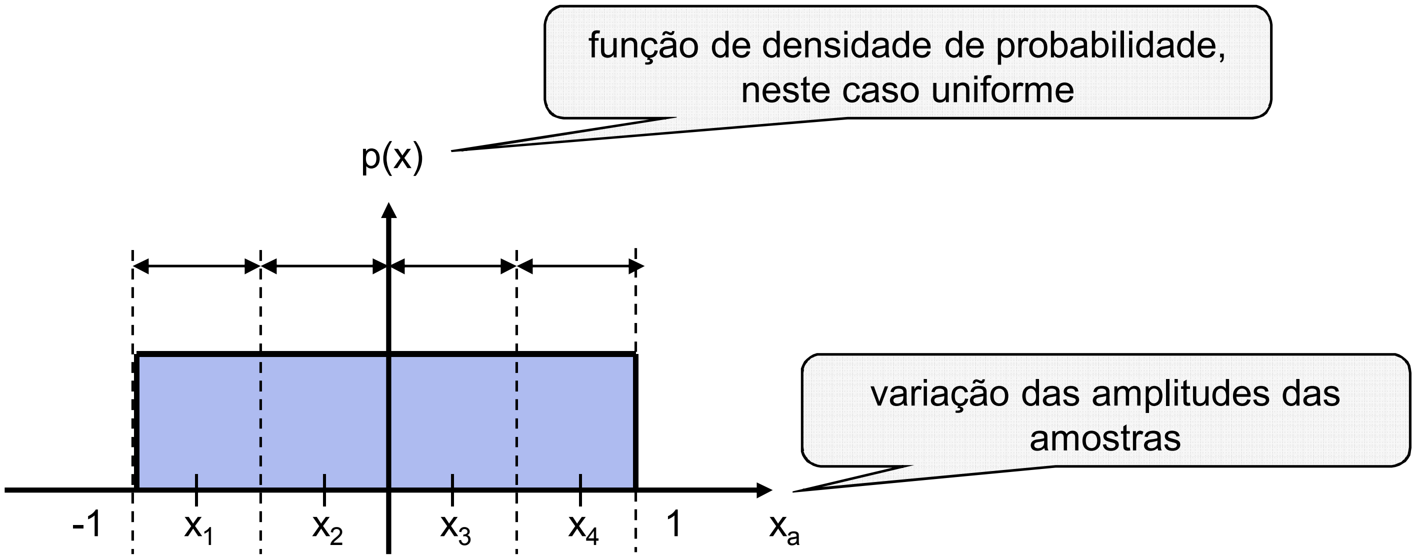
II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Uniforme



II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Uniforme
- exemplo com quatro intervalos -



II. DIGITALIZAÇÃO

Ruído da Quantização Uniforme

- **Erro em cada amostra**

$$\xi_q = | x_a(t) - x_q(t) |$$

- **Potência do ruído de quantização**

$$\overline{\varepsilon_q^2} = N_q = \int_{x\_min}^{x\_max} (x - x_q)^2 \cdot p(x)\, dx$$

$$N_q = 1/3q^2$$

- **Relação entre potência do sinal e do ruído**

$$S/N_q = 3q^2 S \qquad (S/N_q)_{dB} = 10 \log_{10} (S/N_q)$$

$$S/N_q \leq 3q^2$$

$$(S/N_q)_{dB} \leq 4.8 + 6K \text{ dB}, \quad \text{[K dígitos binários]}$$

assumindo S ≤ 1

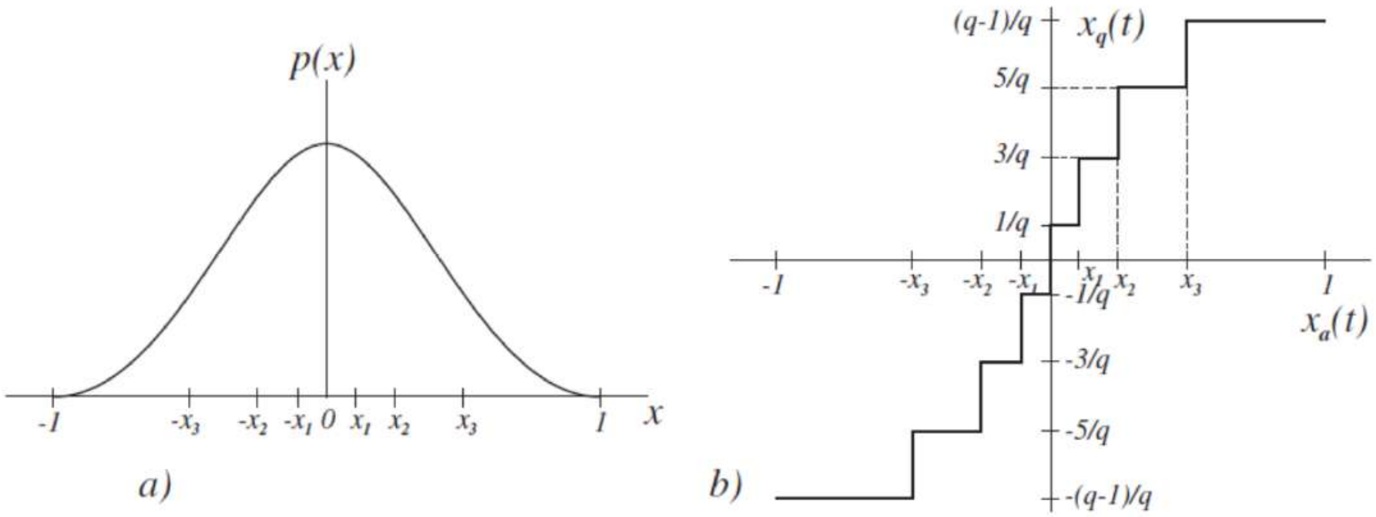
II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Não Uniforme

- Por vezes os sinais analógicos possuem elevados valores de crista
- Amplitude do sinal situa-se mais frequentemente na zona das amplitudes mais baixas
- Objectivo é **diminuir o ruído** total da quantização para fontes com uma **função de densidade de probabilidade** não uniforme
- Quantização não uniforme.... níveis quânticos **não estão igualmente espaçados entre si**

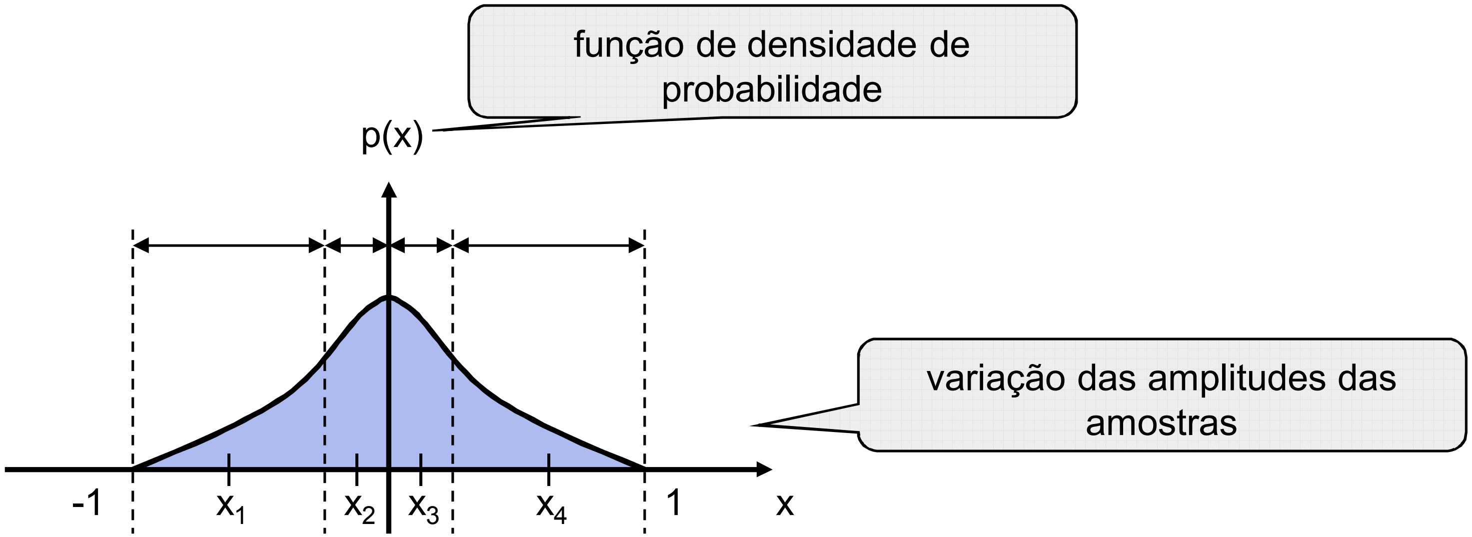
II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Não Uniforme



II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Não Uniforme
- exemplo com quatro intervalos -



II. DIGITALIZAÇÃO

A **Figura 1** mostra a função de densidade de probabilidade *p(x)* das amplitudes das amostras de um sinal. Deve-se definir um quantizador de X níveis quânticos.

1."melhor" qualidade com quantização uniforme ou não uniforme? (...entropia?)

2. como definir "bons" intervalos de quantização?

3. quantizador uniforme com mais níveis que ... vs quantizador não uniforme? .... consequências em termos de qualidade e débito de dados?

4.como estabelecer um quantizador em que as amplitudes quantizadas ocorram com igual probabilidade?

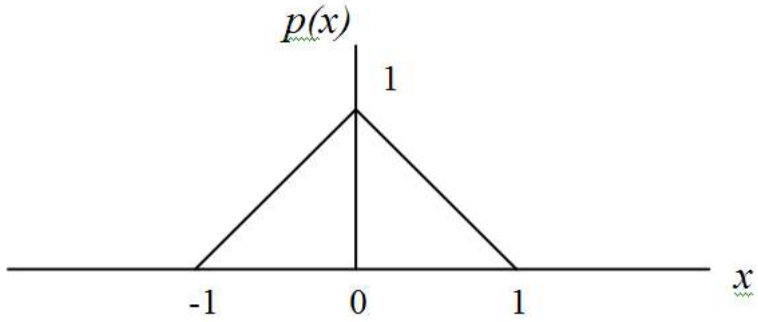


Figura 1

II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Não Uniforme

- Um quantizador não uniforme é **mais complexo** de implementar que um uniforme
- na prática a **quantização não uniforme** pode realizar-se em duas fases:

  1. compressão não linear do sinal
  2. quantização uniforme do sinal comprimido

» prova-se que **1 + 2** corresponde a uma quantização **não uniforme** do sinal original

II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Não Uniforme

- **Qual o objectivo** da compressão não linear do sinal?
  - **uniformizar a densidade de probabilidade** das amplitudes dos sinais
  - diversas formas de o fazer...
- Estudos provam que a **característica do compressor** que melhor uniformiza sinais de audio:
  - linear de zero até um certo valor das amplitudes (1/A)
  - ... e depois logarítmica até ao valor máximo

II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Não Uniforme

- **Companding de Lei-A (Lei de quantização europeia)**

$$y = \begin{cases} \dfrac{Ax}{1+\ln A} & \text{para} \quad |x| \leq \dfrac{1}{A} \\ \dfrac{1+\ln Ax}{1+\ln A} & \text{para} \quad \dfrac{1}{A} < |x| \leq 1 \end{cases}$$

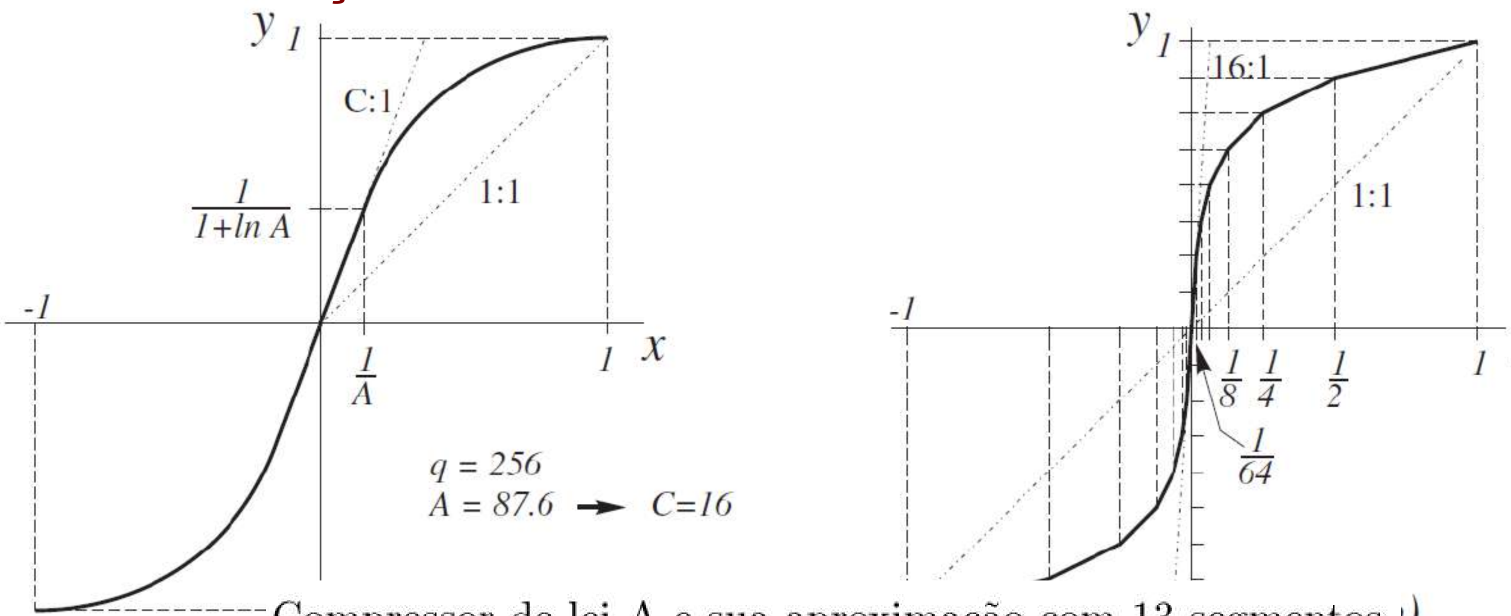
- *x(t) é comprimido segundo esta lei dando origem a y(t); y(t) é amostrado e quantizado uniformemente dando origem a $y_q(t)$; y(t) é recuperado por filtragem (com erro de quantização); y(t) é depois expandido pela função inversa para se obter x(t)*

II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Não Uniforme

com Companding de Lei-A

Qual é a lógica desta transformação !!?



Compressor de lei-A e sua aproximação com 13 segmentos

II. DIGITALIZAÇÃO

Quantização Não Uniforme

- Nos Estados Unidos da América a lei de quantização difere da Lei-A e é designada por **Lei-μ**

$$y = \frac{\ln(1 + \mu x)}{\ln(1 + \mu)}$$

II. DIGITALIZAÇÃO

Conversão Analógico a Digital

- Depois de quantizadas as amostras já se encontram discretizadas a um conjunto de ***q*** valores
- A conversão analógico digital executa a conversão **para uma determinada base** dos valores discretizados das amostras
- Se ***K* for o número de dígitos** a utilizar na representação dos valores dos níveis quânticos, então $K = \log_M(q)$ (M=base da numeração; base 2 normalmente usada)

II. DIGITALIZAÇÃO

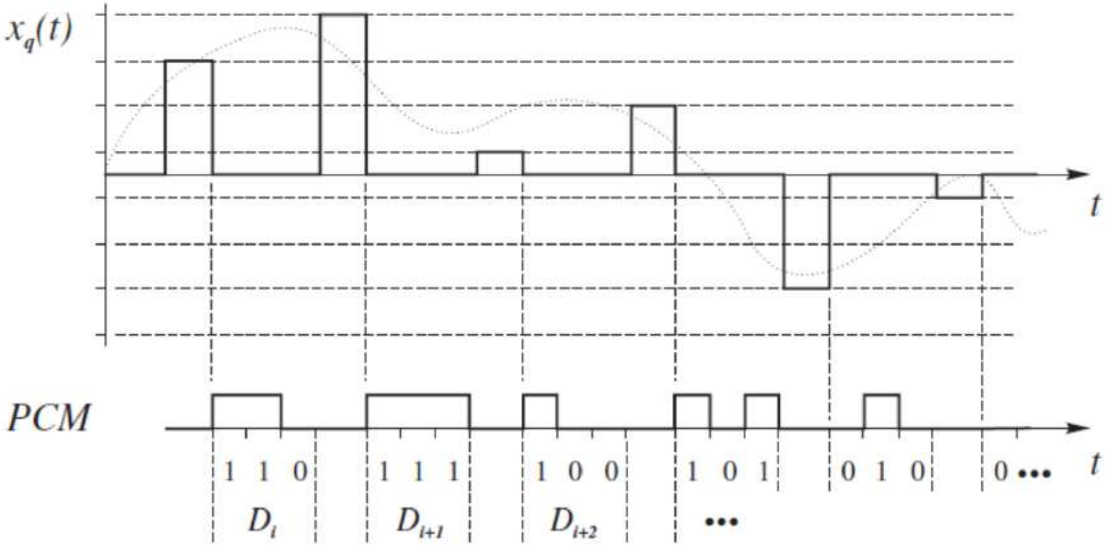
Conversão Analógico a Digital - Codificação PCM

- **PCM (*Pulse Code Modulation*)** - é a designação que se dá à sequência serializada no tempo dos dígitos resultantes da codificação das amostras
- Ritmo de símbolos de um canal PCM codificado a ***K*** dígitos por amostra:

$$\mathbf{r_c = K * f_a}$$ (se base 2 então bits/seg)

II. DIGITALIZAÇÃO

Codificação PCM



II. DIGITALIZAÇÃO

Exemplo de problema:

Um sinal analógico de vídeo com uma potência S=**X**, cuja banda espectral se estende até **Y** MHz, foi digitalizado uniformemente em PCM após amostragem ao ritmo mínimo teórico, com uma relação S/N_q não inferior a **Z** dB. Qual o tamanho do ficheiro em bytes que contém 3 minutos de vídeo?

II. DIGITALIZAÇÃO

Ruído em PCM

– Ruído no canal de transmissão (ou gravação) pode **corromper algum dos bits** de codificação das amostras
– No processo de descodificação o nível quântico em que foi descodificada a determinada amostra **poderá não ser o correcto**
– Prova-se que a **potência do ruído (erro) de descodificação** é:

$$N_d = \frac{4P_e}{3}$$

Probabilidade de erro por bit na transmissão ou gravação

II. DIGITALIZAÇÃO

Ruído em PCM

– Potência total do **ruído no destino** (N_D) será a soma da potência do **ruído de descodificação** (N_d) com a potência do **ruído de quantização** (N_q)

$$N_D = N_d + N_q = \frac{4\,P_e}{3} + \frac{1}{3q^2} = \frac{1+4q^2\,P_e}{3q^2}$$

descodificação quantização

II. DIGITALIZAÇÃO

Ruído em PCM

(relação entre potência do sinal e do ruído)

$$S/N_D = \frac{3q^2}{1 + 4q^2 P_e} \quad * \; S$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_D \leq \frac{3q^2}{1 + 4q^2 P_e}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_D \leq \begin{cases} 3q^2 & \text{se} \quad P_e \ll \frac{1}{4q^2} \\ \frac{3}{4P_e} & \text{se} \quad P_e \gg \frac{1}{4q^2} \end{cases}$$

assumindo S ≤ 1

II. DIGITALIZAÇÃO

Ruído em PCM

Conclusão:

- Em PCM o ruído de quantização é a componente dominante da **qualidade da digitalização** quando $\boldsymbol{P_e}$ na transmissão (ou gravação) é pequena (comparativamente a $1/4q^2$) , mas...
- ....o ruído de descodificação devido a erros de transmissão (ou gravação) é mais significativo quando $\boldsymbol{P_e}$ é grande (comparativamente a $1/4q^2$)

II. DIGITALIZAÇÃO

Exemplos de normalizações PCM

Sinais telefónicos (ITU, Recomendação G.711)	
Frequência de amostragem:	$f_a = 8$ KHz
Quantização:	não-uniforme a $q = 256$ níveis
Palavra PCM:	$k = 8$ bits
Ritmo binário (um canal):	$r_b = k\, f_a = 64$ Kbps
Lei de quantização Europeia:	compressão digital segundo a *lei-A*, com 13 segmentos.
Código:	binário dobrado com inversão dos bits de ordem par.
Lei de quantização Americana:	compressão digital segundo a *lei-μ*, com 15 segmentos.
Código:	binário dobrado com inversão de todos os bits excepto o primeiro (bit do sinal)

Sinais de Vídeo (Televisão)	
Frequência de amostragem:	$f_a = 13.3$ MHz
Quantização:	uniforme com $k = 8$ ou 9 bits

Gravação de Música	
Frequência de amostragem:	$f_a = 44.1$ KHz
Quantização:	uniforme com $k = 16$ bits
Ritmo binário:	$r_b \approx 0.7$ Mbps

Transmissão de Música	
Frequência de amostragem:	$f_a = 32$ KHz
Quantização:	uniforme com $k = 14$ bits
Ritmo binário:	$r_b = 448$ Kbps ou
Quantização:	não-uniforme com $k = 12$ bits
Ritmo binário:	$r_b = 384$ Kbps
Lei de quantização:	*lei-A* com 5 segmentos ou
Quantização:	não-uniforme com $k = 10$ bits
Ritmo binário:	$r_b = 320$ Kbps
Lei de quantização:	*lei-A* com 13 segmentos

II. DIGITALIZAÇÃO

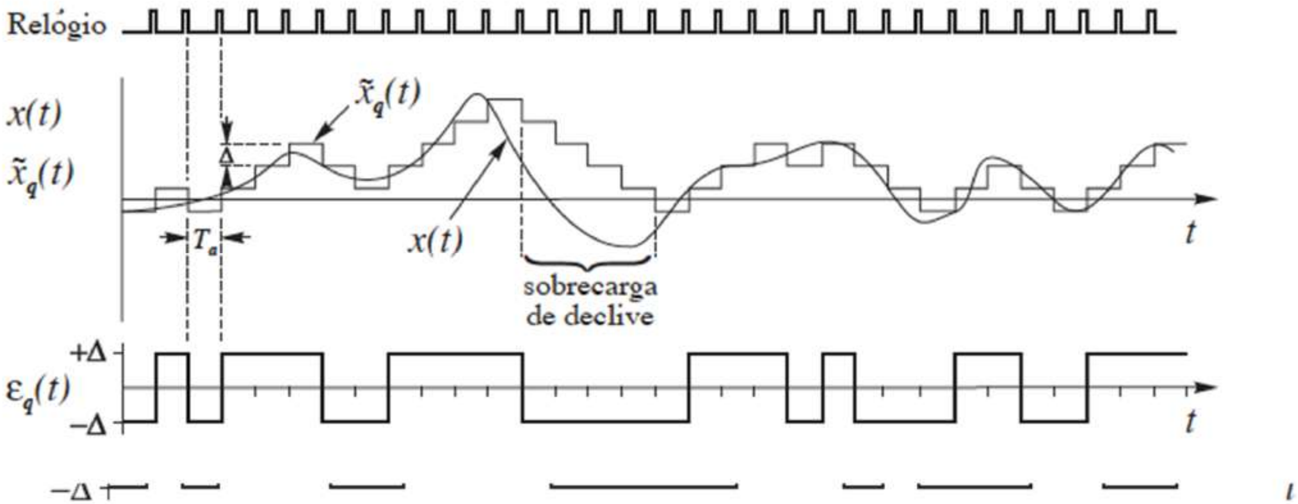
Conversão Analógico a Digital

- Existem outros métodos distintos do PCM
- Alguns baseiam-se no facto de alguns sinais terem algum grau de previsibilidade
  - e.g. as alterações de valor de uma amostra para a amostra seguinte serem relativamente pequenas
  - neste esquemas é transmitido só o erro da previsão realizada
  - Exemplo: modulação delta e modulação delta adaptativa (vantagens: hardware mais simples)

II. DIGITALIZAÇÃO

Codificação Delta Linear

(só breve referência)



II. DIGITALIZAÇÃO

Codificação Delta Adaptativa

(só breve referência)