

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Conversão Analógico-Digital (ADC)

Prof. Sérgio S Furuie  
LEB/PTC/EPUSP

Abordagem: motivação – intuição - formalização

EPUSP PTC/ LEB - S.Furuie **Bibliografia indicada: cap. 1, Semmlow**

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Resumindo: Discretização, ADC

- Converte valores analógicos em digitais
  - Em geral valores de tensão elétrica, pois a maioria dos transdutores convertem para parâmetros elétricos (efeitos fotoelétrico, piezoelétrico, termistores, strain gauges, ...)

Transdutor → Condicionador/amplificador → ADC → Computador  
-processamento  
-análise  
-controle  
- ...

Quais as características importantes de um ADC ?  
Como construir um ADC ?

EPUSP PTC/ LEB - S.Furuie 2

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Diagrama em blocos – ADC

Sinal = 2 → comparador (>?) → S/N → controlador → Fim conversão

0, 1, 2 → Converter Digital – Analógico (DAC) → Valor digital ...b<sub>3</sub>b<sub>2</sub>b<sub>1</sub>b<sub>0</sub> → computador

$V_{ADC} = \alpha \cdot \sum b_i 2^i$

Como realizar um DAC ?

0	0	0	0
0	0	0	1
0	0	1	0
0	0	1	1

Aproximação sequencial  
Solução mais eficiente?

EPUSP PTC/ LEB - S.Furuie 4

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## ADC: aprox. sucessiva

Exemplo p/ N=3 bits

Flowchart:  $V_{ADC} = 0$ ,  $i = N-1$ ,  $V_{ADC} = V_{ADC} + 2^i$ ,  $V < V_{ADC}$  ? (Yes:  $Bit(i)=0$ ,  $V_{ADC} = V_{ADC} - 2^i$ ; No:  $Bit(i)=1$ ),  $i = i - 1$ ,  $i < 0$  ? (Yes: Fim; No: loop back)

i	b <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	V <sub>ADC</sub>
2	1	0	0	4
1	1	1	0	6
0	1	0	1	5

\* tempo de conversão constante

EPUSP PTC/ LEB - S.Furuie 5

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Como obter um DAC?

- Bits on ou off => níveis TTL
  - Rede de resistores
  - Amplificadores operacionais
  - ...

EPUSP PTC/ LEB - S.Furuie 6

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Rede de resistores

$$V = \frac{V_0}{R_0} + \frac{V_1}{R_1} + \dots + \frac{V_7}{R_7}$$

$$V = \frac{1}{R} + \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_7} \right)$$

$$V = \sum_{k=0}^7 a_k V_k$$

se  $R_k = \frac{R}{2^k}$

e  $V_k = 5b_k$  (b = 0 ou 1)

$$V = \frac{5}{256} \sum_{k=0}^7 b_k 2^k$$

EPUSP PTC/ LEB - S.Furuie 7

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

### DAC com amp.op.

$$V = R \left( \frac{V_0}{R_0} + \frac{V_1}{R_1} + \dots + \frac{V_7}{R_7} \right)$$

$$V = \sum_{k=0}^7 a_k V_k$$

se  $R_k = \frac{R}{2^k}$

e  $V_k = 5b_k$  ( $b = 0$  ou  $1$ )

$$V = 5 \sum_{k=0}^7 b_k 2^k$$

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 8

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

### ADC com múltiplos canais

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 9

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

### Resumindo: Discretização, ADC

- Converte valores analógicos em digitais

Quais as características importantes de um ADC ?

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 10

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

### Características importantes: ADC

- Linearidade
- Frequência de amostragem (discretização temporal) máxima: kHz, MHz, GHz
- Resolução (quantização, número de bits): 8, 12, 14, 16
- Faixa dinâmica (valores mínimos e máximos): [-1,1], [-5,5], [-40,40], ...
- Número de canais simultâneos: 2, 4, 8, 64, ...

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 11

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

### Linearidade e calibração

- calibração

$ADC = a \cdot x + b$

Tendo-se  $a$  e  $b$ , pode-se determinar o valor de  $x$  em mmHg dado o valor do ADC

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 12

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

### Exercício: linearidade, calibração

- Considere um ADC com a resposta abaixo:
  - Obtenha a relação  $y(x)$ , dados  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$
  - Se o valor de saída do ADC para:
    - $x_1 = 50$  mmHg  $\Rightarrow y_1 = 100$
    - $x_2 = 100$  mmHg  $\Rightarrow y_2 = 200$
  - Qual a pressão se o valor do ADC for 150?

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

$$y = (1 - \alpha) \cdot y_1 + \alpha \cdot y_2$$

$$\alpha = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

(combinação linear)

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$b = \frac{x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2}{x_2 - x_1}$$

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 13

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Frequência de amostragem

- Critério de Nyquist da amostragem (teorema de Shannon)
  - A frequência de amostragem deve ser maior do que o dobro da maior frequência do sinal (para evitar *aliasing*)
  - ECG: banda 0 a 100Hz
  - Ultra-som obstétrico: 5 MHz
  - Ultra-som intra-vascular: 40 MHz

$f_A > 2f_{\max}$

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 14

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Exercício sobre ADC (1/2)

Você tem um sinal de ECG analógico  $x(t)$ , amplificado na faixa de  $1V_{RMS}$  para ser analisado/processado digitalmente. Sabendo que:

- Sinal de ECG tem banda em freq.: [0.01 a 100] Hz;
- Existe ruído branco aditivo. SNR é 20dB
- O ADC é de 8 bits e configurado na faixa de -1 a 1V;

Questões:

- 1) Qual a frequência de corte ( $f_c$ ) adequado para o filtro analógico?
- 2) Qual a frequência de amostragem ( $f_s$ ) mínima do ADC desconsiderando o ruído?
- 3) Qual a freq. amostragem ( $f_s$ ) mínima p/  $x(t)$  se o filtro analógico for um passa-baixa com ganho  $G(f)$  e desejarmos que a amplitude do ruído seja menor do que 0.001V em  $f_s/2$  na entrada do ADC?

$$G(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^4}$$

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 15

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Solução p/ 1/2

Filtro passa-baixa com  $f_c = 100\text{Hz}$

$SNR = 20 = 20\log\left(\frac{\text{sinal}=1V_{rms}}{\text{ruído}}\right)$

$\therefore \text{ruído} = 0.1V_{rms}$

$G(f_s/2) = \frac{\text{ruídoSaida}}{\text{ruído}} = \frac{0.001}{0.1} = \frac{1}{1 + \left(\frac{f_s/2}{f_c}\right)^4}$

$\therefore f_s \approx 200 \times 3.16 \approx 632\text{Hz}$

Nível de ruído pré-filtragem para atender 20 dB

Atenuação necessária ao ruído em  $f_s/2$

Interpretar!  
E se Filtro de ordem maior

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 16

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Filtro passa baixa: Butterworth order N

$$G^2(f) = |H(f)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2N}}$$

$f_c$  : frequência de corte

$$H_a(s) = \frac{G}{(s - p_1) \dots (s - p_N)}$$

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 18

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Resolução na quantização

- Está associada ao número de bits do ADC e à faixa-dinâmica da entrada

$$\text{resolucao} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^N - 1}$$

$N$  : número de bits

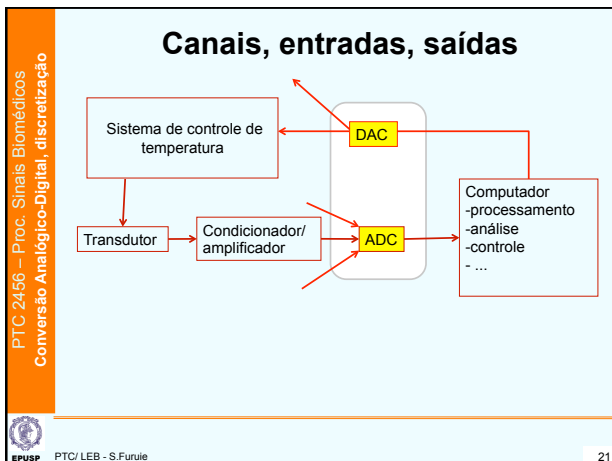
EPUSP PTC/LEB - S.Furule 19

PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização

## Outras características

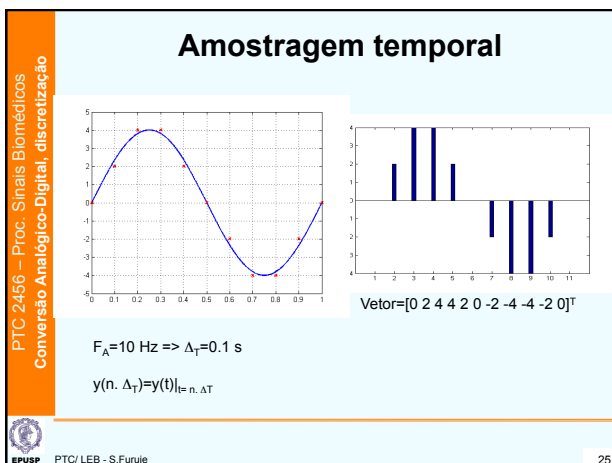
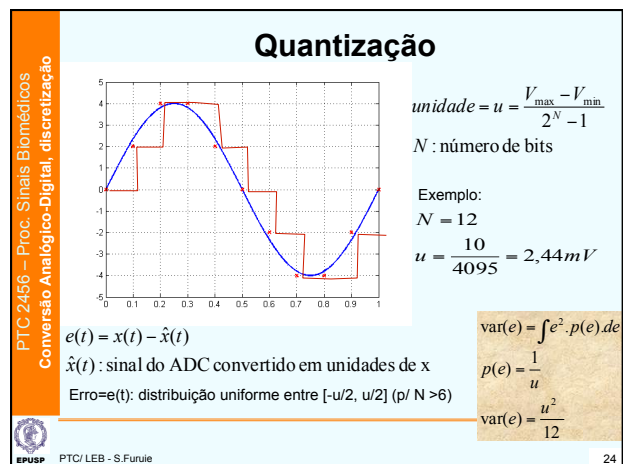
- Saída analógica: DAC
- Entrada digital: DI
- Saída digital: DO
- Conexão: USB, ethernet, socket (PCI, PCX, ...)

EPUSP PTC/LEB - S.Furule 20



- PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização
- ### Exemplos de ADCs
- Lynx (BR)
    - 16 canais de entrada, 12 bits, 20k amostras/s por canal, 16 entradas e saídas digitais
  - National Instruments (EUA)
    - 8 analog inputs at 12 bits, 48 kS/s, 2 analog outputs at 12 bits, 12 TTL/CMOS digital I/O lines
    - 4 SE/4 DI, 10 MS/s/ch, 12 bits, 8 DIO TTL
- EPUSP PTC/ LEB - S.Furule 22

- PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização
- ### Plano de aula
- Motivação
  - Exemplos em sinais e imagens
  - Tipos e características de ADCs
  - **Quantização**
  - Discretização: amostragem temporal
  - Efeito no domínio da frequência
  - Interpolação
- EPUSP PTC/ LEB - S.Furule 23



- PTC 2456 – Proc. Sinais Biomédicos  
Conversão Analógico-Digital, discretização
- ### Exercício sobre ADC (2/2)
- Você tem um sinal de ECG analógico  $x(t)$ , amplificado na faixa de -1 a 1V para ser analisado/processado digitalmente. Sabendo que:
- Sinal de ECG tem banda em freq.: [0.01 a 100] Hz;
  - Existe ruído branco aditivo da ordem de 0.1V;
  - O ADC é de 8 bits e configurado na faixa de -1 a 1V;
- Questões:
- Qual a resolução da quantificação do ADC ( $u$ =valor de uma unidade do ADC em V)?
  - Se o valor amostrado for 100, qual o valor real da amostra em V?
  - Há erro de quantização. Qual a precisão da quantização (desvio padrão do erro)? Suponha que o erro tem distribuição uniforme entre  $[-u/2$  e  $u/2]$ . Variância= $u^2/12$ . Interprete.
- EPUSP PTC/ LEB - S.Furule 26

## Plano de aula

- Motivação
- Exemplos em sinais e imagens
- Tipos e características de ADCs
- Quantização
- Discretização
- **Efeito no domínio da frequência: introdução**  
 – Deslocado p/ aula sobre TDF
- Interpolação



## Lista de exercícios 1

Obs.: a) trabalho é estritamente individual; b) vale 30% da avaliação P3 se entregues no prazo estipulado; c) exercícios fortemente relacionados aos projetos; d) entregar o trabalho, inclusive com listagem dos programas.

Você tem um sinal de ECG analógico  $x(t)$ , amplificado na faixa de -1 a 1V para ser analisado/processado digitalmente. Sabendo que:

- Sinal de ECG tem banda em freq.: [0.01 a 100] Hz;
- Existe ruído branco aditivo da ordem de 0.1V;
- O ADC é de 8 bits e configurado na faixa de -1 a 1V;

Questões:

- Qual o desvio-padrão do erro do conversor (em V)?
- Qual a freq. amostragem ( $f_s$ ) mínima p/  $x(t)$  se o filtro analógico for um passa-baixa com ganho  $G(f)$  e desejarmos que a amplitude do ruído seja menor do que o desvio-padrão do erro do ADC em  $f_s/2$ ?

$$G(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^4}$$



## Bibliografia

- Biosignal and Medical Image Processing. John L. Semmlow. CRC Press, 2009
- Apostila de Processamento de Sinais de Tempo Discreto. C Itiki, V H Nascimento
- Biomedical Signal Analysis. R.M. Rangayyan. Wiley Interscience, 2002
- Signals and Systems (2nd Edition) A.V. Oppenheim, A. S. Willsky, S. H. Nawab  
 Hardcover: 957 pages. Publisher: Prentice Hall; 1996. ISBN-10: 0138147574.

