

ES710 – Controle de Sistemas Mecânicos

17 – Controle discreto

Eric Fujiwara

Unicamp – FEM – DSI

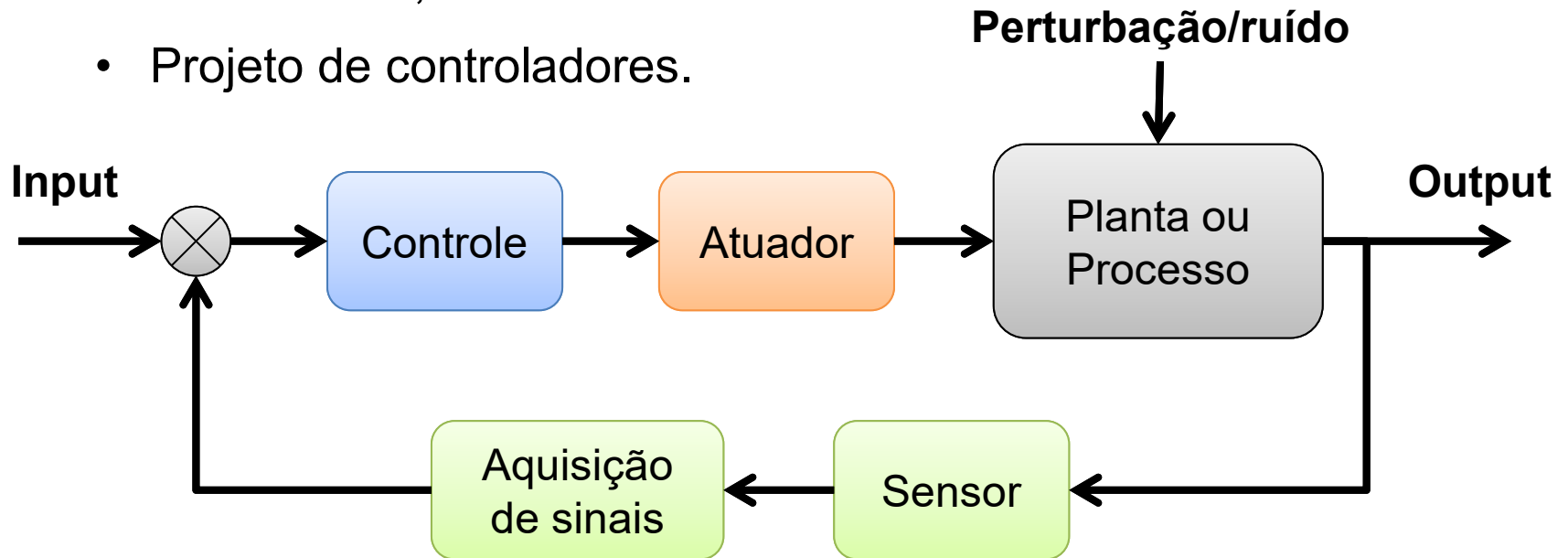
Índice

- **Índice:**
 - 1) Controle discreto;
 - 2) Processamento digital de sinais;
 - Questionário;
 - Referências;
 - Exercícios.

Sistema mecatrônico

▪ Controle contínuo:

- Modelagem e função de transferência;
- Resposta no tempo e em frequência;
- Estabilidade;
- Projeto de controladores.

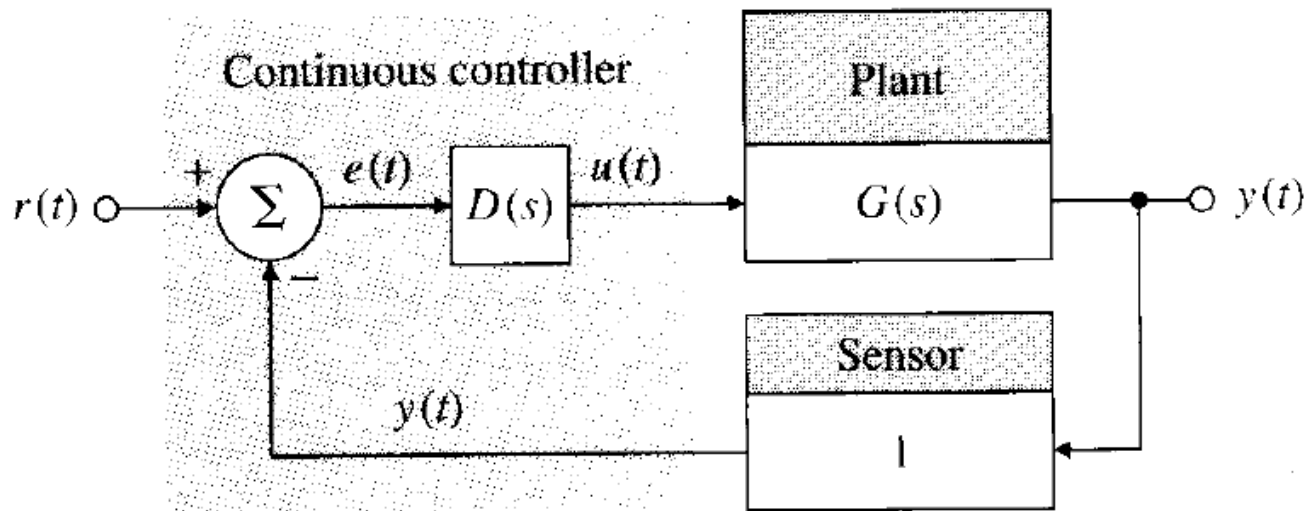


1. Controle discreto

- **1.1. Implementação de controladores:**
 - O objetivo do **controlador** é minimizar a diferença/erro $e(t)$ entre o sinal desejado $r(t)$ e a resposta do sistema $y(t)$;
 - O sinal $y(t)$ é medido por um sensor, enquanto que o controlador processa o sinal de erro e gera um estímulo $u(t)$ para atuação sobre a planta;
 - Embora o controlador possa ser implementado de forma analógica (AMPOPs), faz muito mais sentido utilizar um sistema de aquisição de dados (DAQ) e processamento digital de sinais (DSP) para concretizar a malha de controle;
 - **Pergunta:** o controlador implementado no **domínio discreto** se comporta iguala ao projetado no **domínio contínuo**?

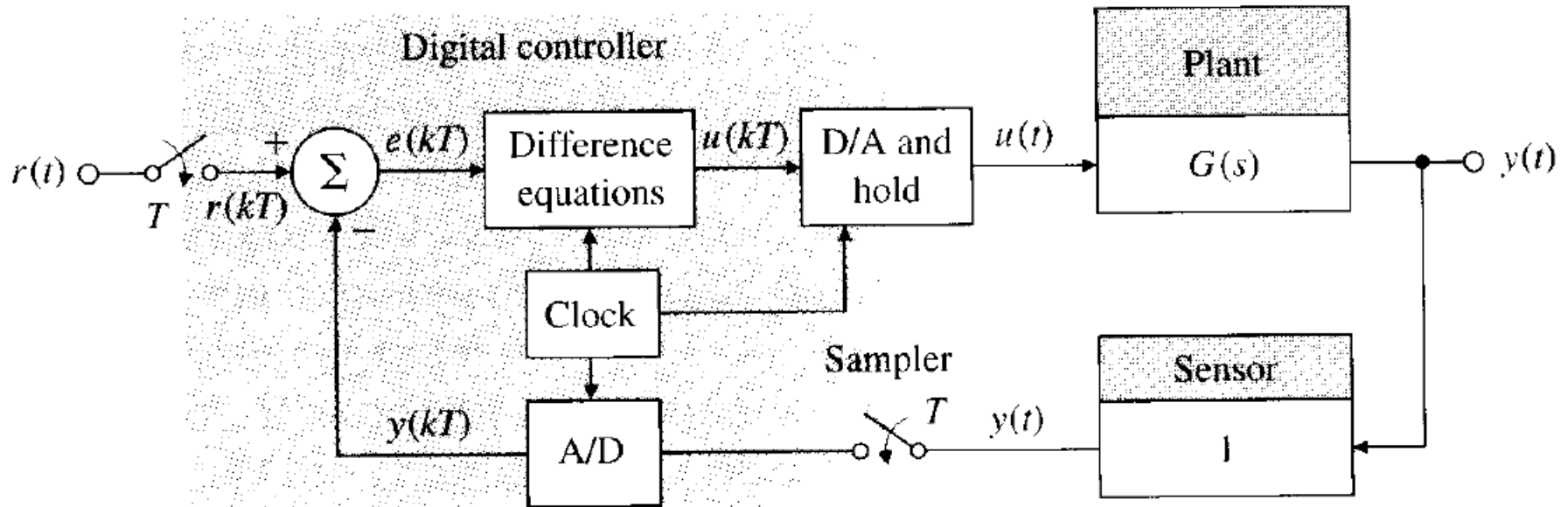
1. Controle discreto

- 1.2. Controle contínuo e discreto:
 - Controle contínuo:



1. Controle discreto

- 1.2. Controle contínuo e discreto:
 - Controle discreto:



1. Controle discreto

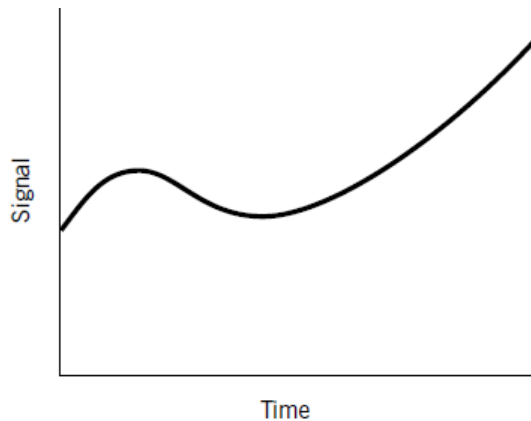
▪ 1.2. Controle contínuo e discreto:

- O **controle contínuo** assume que os sinais são contínuos em tempo e em frequência;
- Em contrapartida, o **controle discreto** funciona com valores finitos de tempo/frequência limitados pela **taxa de amostragem**;
- Ademais, o processo de **quantização** também limita os valores de amplitude possíveis para os sinais;
- Neste curso, será apresentada uma introdução ao processamento digital de sinais, sendo que o estudo será aprofundado em outra disciplina (Aquisição de Sinais).

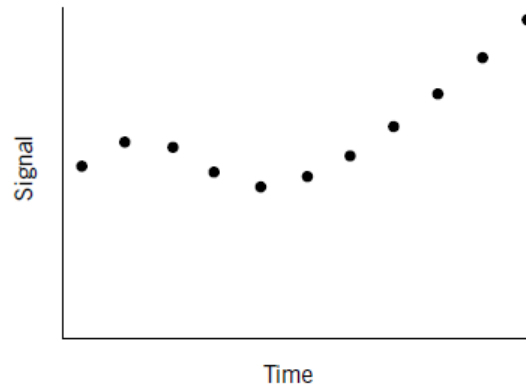
2. Processamento digital de sinais

▪ 2.1. Tipos de sinais:

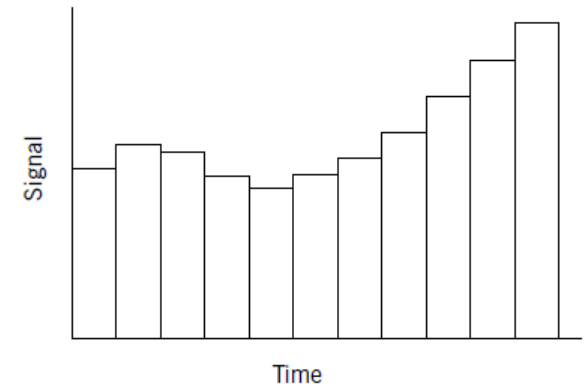
- **Sinal contínuo/analógico:** valores infinitos em tempo e amplitude;
- **Sinal discreto:** valores finitos em tempo e valores infinitos em amplitude (amostrado);
- **Sinal digital:** possui valores finitos em tempo e amplitude (quantizado).



Analógico



Discreto



Digital

2. Processamento digital de sinais

▪ 2.2. Teorema da amostragem:

- Um sinal contínuo $y(t)$ pode ser amostrado em um sinal discreto $y(kT_s) \approx y(k)$:
 - $k = 0, 1, \dots$
 - T_s : período de amostragem (s);
 - $f_s = 1/T_s$: frequência de amostragem (Hz).
- O sistema de aquisição de sinais realiza uma amostragem a cada T_s .

2. Processamento digital de sinais

▪ 2.2. Teorema da amostragem:

- Sinais com frequências maiores do que f_s não são amostrados corretamente;

- Ex: $f_s = 40$ Hz

$$x(t) = \sin(2\pi 10t)$$

$$y(t) = \sin(2\pi 50t)$$

$$x(k) = \sin\left(2\pi 10 \frac{k}{f_s}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} k\right)$$

$$y(k) = \sin\left(2\pi 50 \frac{k}{f_s}\right) = \sin\left(\frac{5\pi}{2} k\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} k\right)$$

- Note que $x(t) \neq y(t) \rightarrow$ Verificar as formas de onda.

2. Processamento digital de sinais

▪ 2.2. Teorema da amostragem:

- Esta ambiguidade de frequências ou perda de informação espectral é denominada **aliasing**;
- **Teorema de amostragem:** para evitar o aliasing, a frequência de amostragem deve ser pelo menos 2 vezes maior que a frequência máxima do sinal f_{\max} :

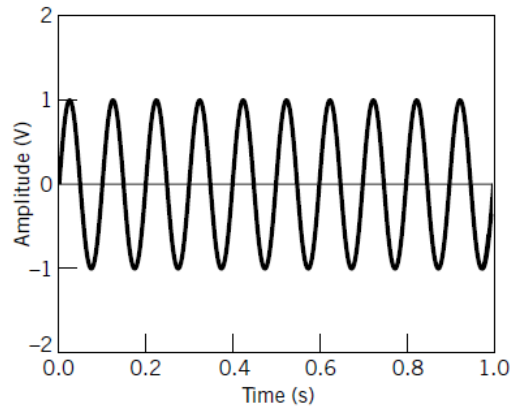
$$f_s \geq f_N = 2f_{\max}$$

(1)

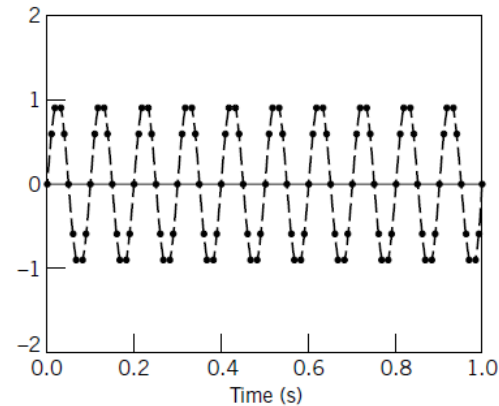
- f_N é denominada **frequência de Nyquist**.

2. Processamento digital de sinais

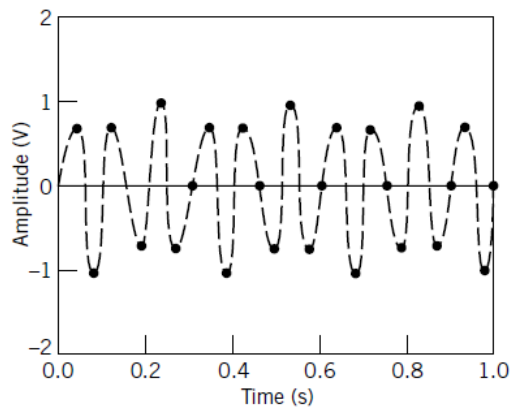
2.2. Teorema da amostragem:



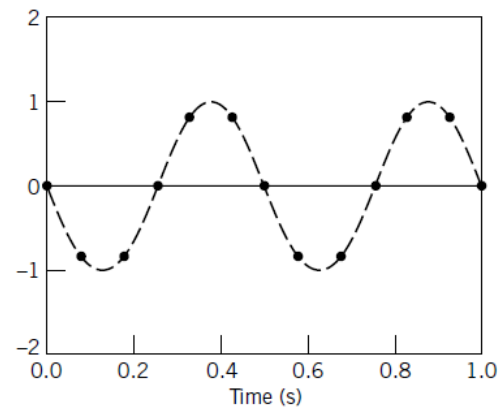
(a) Original 10-Hz sine wave analog signal



(b) $f_s = 100$ Hz



(c) $f_s = 27$ Hz



(d) $f_s = 12$ Hz

2. Processamento digital de sinais

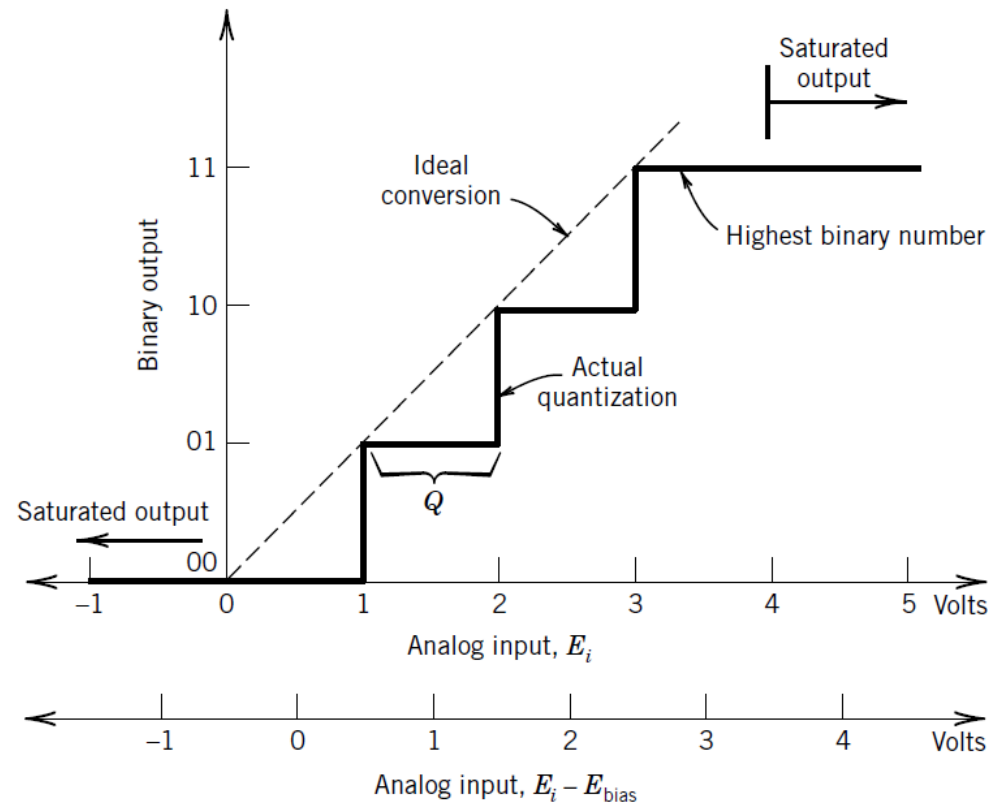
▪ 2.3. Conversor A/D:

- O sinal analógico deve ser discretizado em tempo e amplitude para que seja armazenado de forma eficiente;
 - Quanto menor o passo de discretização, mais o sinal digital se aproxima do sinal analógico, mas aumenta o consumo de memória;
- Discretização no tempo: **amostragem**;
- Discretização em amplitude: **quantização**.

2. Processamento digital de sinais

2.3. Conversor A/D:

- O conversor A/D realiza a transformação de um sinal de tensão contínuo em uma saída binária discreta.
 - Ex: conversor flash, aproximações sucessivas;
- Note que existem erros de quantização, uma vez que os valores contínuos são limitados a intervalos discretos.



2. Processamento digital de sinais

▪ 2.4. Conversor D/A:

- Mesmo que o **processamento de sinais seja digital**, geralmente, a planta é um sistema real e contínuo. Deste modo, é preciso converter a **saída digital do controlador** em um **esforço de controle analógico**;
 - Ex: R/2R, sample-and-hold;
- Devido **aos erros de amostragem e quantização**, o sinal analógico gerado pelo conversor D/A pode ser diferente do desejado;
 - Alternativamente, a atuação pode ser intermediada por drivers, como uma ponte-H (PWM).

Questionário

▪ Questionário:

- 1) Fisicamente, como é implementado um controlador analógico? E um controlador digital?
- 2) Quais são as vantagens de se implementar a malha de controle na forma digital?
- 3) Como escolher a frequência de amostragem do módulo de aquisição de sinais?
- 4) Em sistema de controle discreto, a planta/processo é contínua ou discreta? Justifique.

Referências

■ Referências:

- R. S. Figliola, D. E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, Wiley, 2011.
- G. F. Franklin *et al.*, Feedback Control of Dynamic Systems, Prentice Hall, 2002.
- K. Ogata, Discrete-time control systems, Prentice Hall, 1995.
- A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, Signals and Systems, Pearson, 1996.