

## SEM 538 – Sistemas de Controle II - 2016

Prof.: Adriano Almeida Gonçalves Siqueira

**Descrição:** Sistemas discretos no tempo, equações a diferenças. Transformada Z e transformações de sistemas contínuos para discretos. Estabilidade e mapeamento do plano complexo. Controladores PID discretos. Análise em espaços de estado para sistemas contínuos e discretos. Projeto e implementação de controladores em sistemas dinâmicos reais.

### Referências:

1 - Digital Control of Dynamic Systems - Gene F. Franklin / J. David Powell  
Addison-Wesley Pub. Co., 1998. 3 ed.

2 - Digital Control System - Rolf Isermann  
Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, 1988.

3- Discrete-time Control Systems - Katsuhiko Ogata  
Prentice Hall, 1995.

4 - Digital Control Systems - Benjamin C. Kuo  
Holt, Rinehart & Winston, Inc., 1980.

5 - Digital Control Systems Analysis and Design – Charles L. Phillips/ H. Troy Nagle  
Prentice Hall, 1984.

6 – Modelagem da Dinâmica de Sistemas e Estudo da Resposta – Luiz Carlos Felício Rima, 2007.

7 - Controle Digital - Plinio Castrucci / Roberto Moura Sales  
Ed. Edgar Blücher Ltda. 1990

8 - Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos  
Elder M Hemerly  
Ed. Edgard Blücher Ltda., 1996

**Avaliação:** A nota final (NF) será dada por:

$$NF = [ NP + NR ] / 2$$

NP - Nota da prova

NR - Notas dos trabalhos e práticas

**Programa Preliminar:**

Fevereiro	
15	Introdução e Exercício – Revisão Sistemas de Controle I
17	Exercício – Revisão Sistemas de Controle I – Lab.
22	Espaço de Estados
24	Espaço de Estados – Controle Ótimo LQR
29	Espaço de Estados – Controlador/Observador
Março	
2	Euações a diferença, sistemas discretos, Transformada Z
7	Estabilidade e mapeamento do plano complexo
9	Transformações de sistemas contínuos para discretos
14	Lugar das Raízes – Aula Laboratório
16	Lugar das Raízes – Aula Laboratório
21	Não haverá aula – Semana Santa
23	Não haverá aula – Semana Santa
28	Controladores PID Discretos
30	Espaço de Estados – Sistemas Discretos
Abril	
4	Prática 1 - Turmas A – 4 grupos de 3 ou 4 alunos
6	Prática 1 - Turmas B
11	Prática 1 - Turmas C
13	Exercícios
18	<b>PROVA</b>
20	Aula da Prática 2 - Elo e Junta Flexíveis
25	Prática 2 – Grupos 1 e 2 – grupos de 5 alunos
27	Prática 2 – Grupos 3 e 4
MAIO	
2	Prática 2 – Grupos 5 e 6
4	Prática 2 – Grupos 7 e 8
9	SEMATRON
11	SEMATRON
16	Aula da Prática 3 - Pêndulo Invertido
18	Prática 3 – Grupos 1 e 2
23	Prática 3 – Grupos 3 e 4
25	Prática 3 – Grupos 5 e 6
30	Prática 3 – Grupos 7 e 8
JUNHO	
1	Prática 4 - Levitação Magnética
6	Prática 4 - Levitação Magnética
8	Prática 4 – Grupos 1 e 2
13	Prática 4 – Grupos 3 e 4
15	Prática 4 – Grupos 5 e 6
20	Prática 4 – Grupos 7 e 8
22	
27	

# 1. Espaço de Estados

Considere o sistema dinâmico:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f,$$

a função transferência entre a posição  $x$  e a força  $f$  é dada por:

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k}.$$

Na representação em espaço de estados, considere o estado, a entrada e a saída como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = f, \quad \mathbf{y} = x,$$

Então:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -b/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix} f,$$
$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix},$$

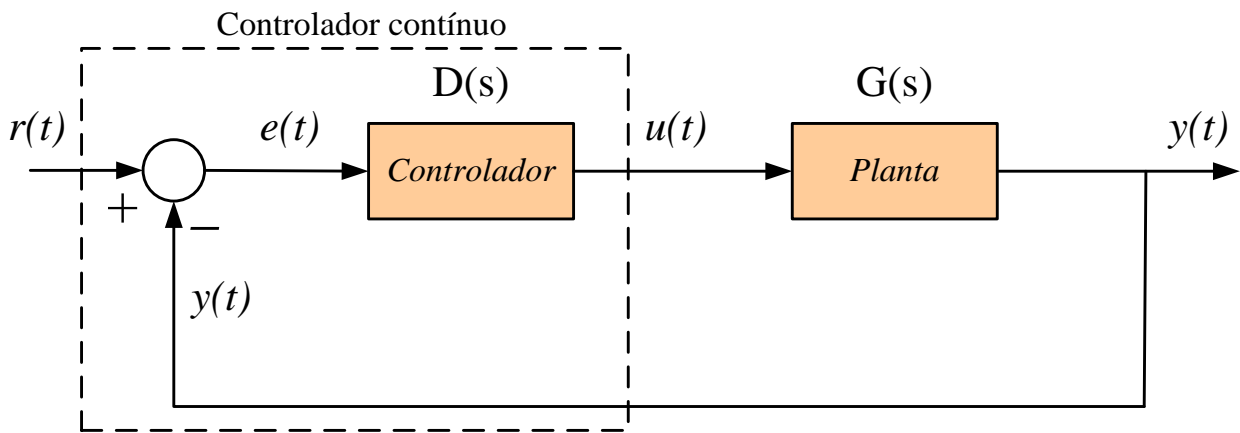
Ou

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u},$$
$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}.$$

A análise de estabilidade do sistema é obtida calculando-se os autovalores da matriz dinâmica  $A$ . Se todos os autovalores de  $A$  possuírem parte real negativa, o sistema é estável.

## 2. Introdução a Sistemas Discretos

### 2.1. Sistema dinâmico (planta) e controlador contínuos



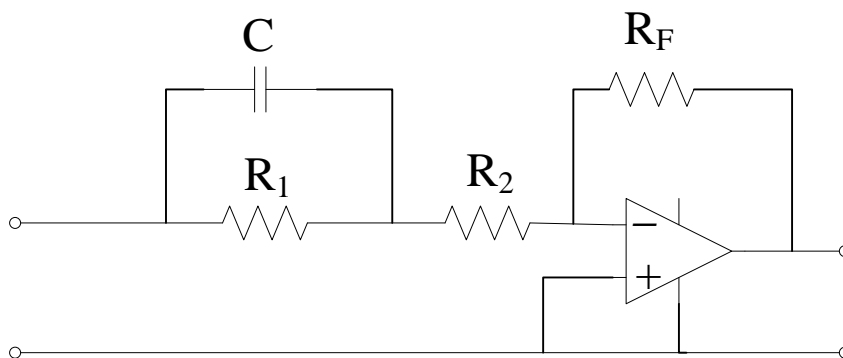
Controladores contínuos podem ser implementados com circuitos eletrônicos analógicos. Por exemplo, para um compensador em avanço da forma:

$$D(s) = \frac{s + z}{s + p}, \quad z < p$$

ou, de forma equivalente:

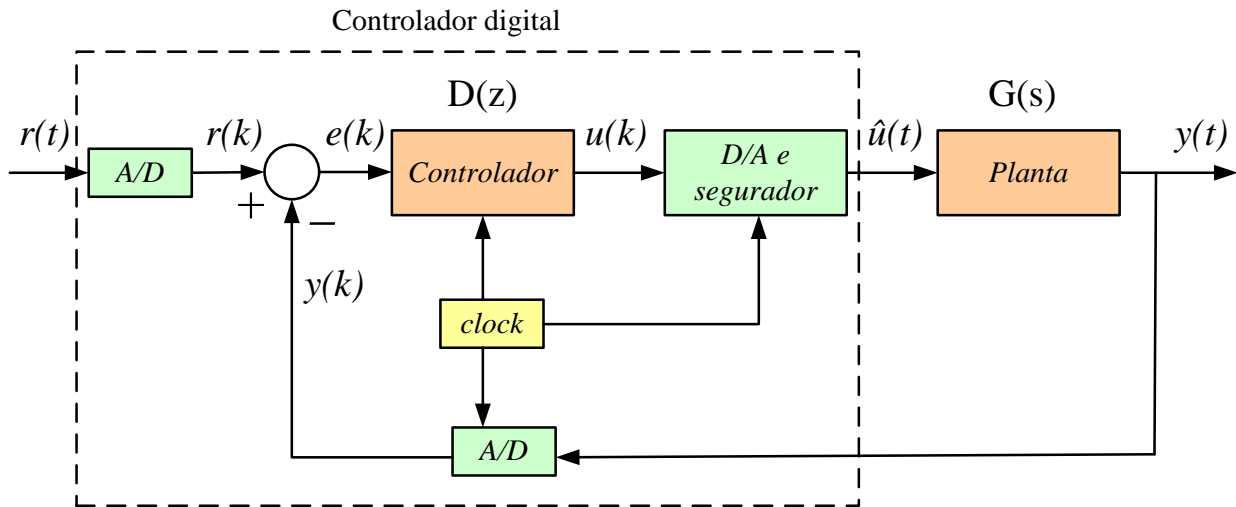
$$D(s) = -K \frac{T_1 s + 1}{\alpha T_1 s + 1}, \quad 0 < \alpha < 1$$

pode ser implementado com o seguinte circuito elétrico:

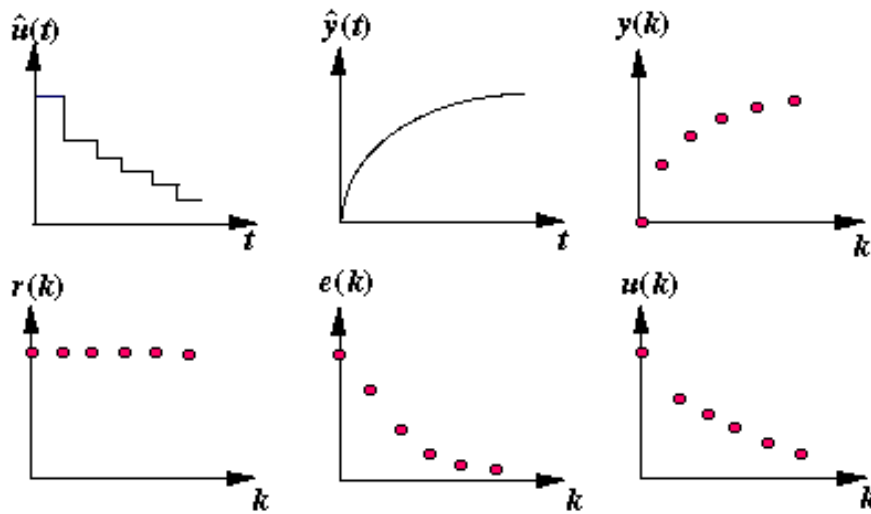


sendo  $K = \frac{R_F}{R_1 + R_2}$ ,  $T_1 = R_1 C$ , e  $\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ .

## 2.2. Sistema dinâmico (planta) contínuo e controlador digital

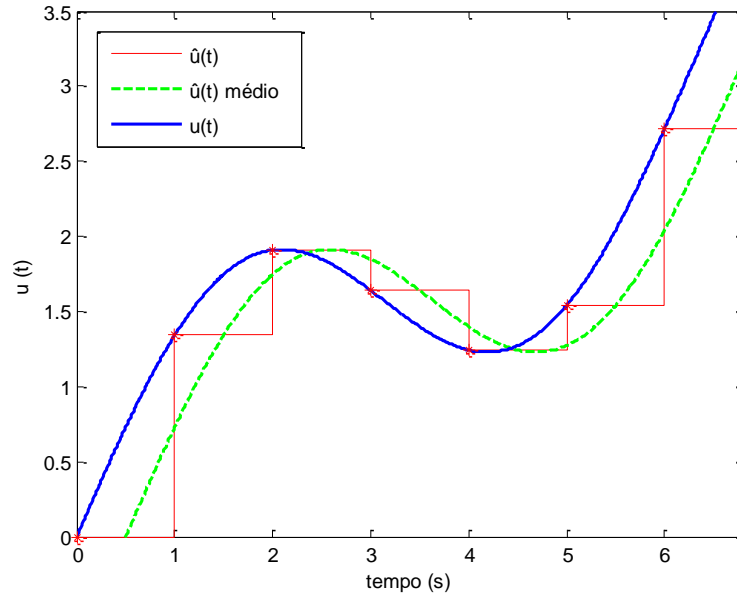


Controladores digitais operam com sinais discretos (amostras dos sinais contínuos). Os sinais do diagrama de blocos acima são mostrados abaixo:



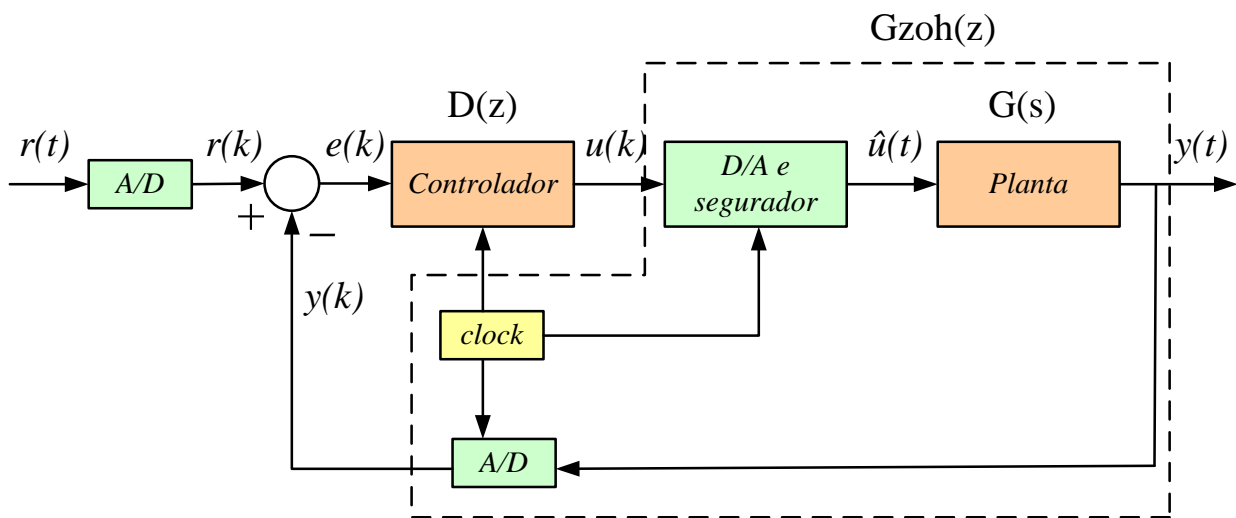
O *clock* conectado aos conversores D/A e A/D fornece um pulso a cada  $T$  segundos e cada conversor envia o sinal apenas quando recebe o pulso.

Suponha que  $u(k)$  represente um sinal de entrada discreto. Existem técnicas para transformá-lo em um sinal contínuo  $\hat{u}(t)$ . Uma forma é manter  $\hat{u}(t)$  constante e igual a  $u(k)$  no intervalo  $kT$  a  $(k+1)T$ . Este procedimento é chamado **segurador de ordem zero (zero-order holder)**. Entretanto o segurador de ordem zero apresenta em média um atraso de  $T/2$ , veja figura abaixo.

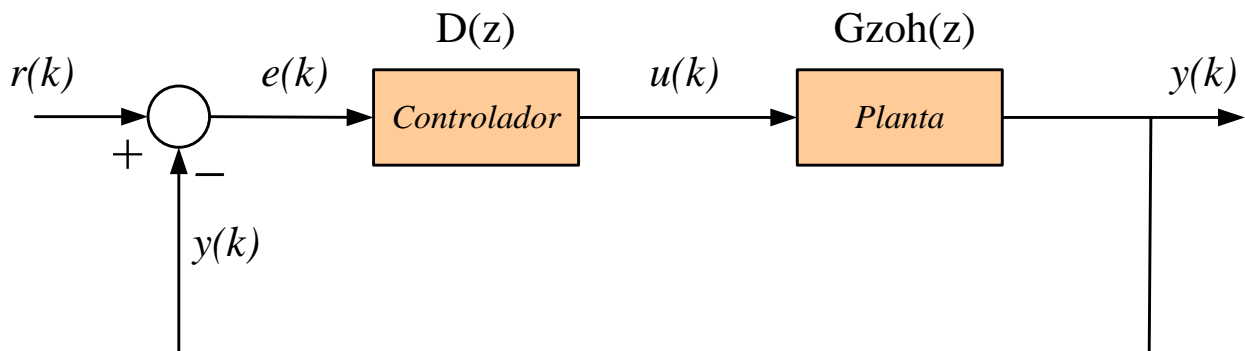


### 2.3. Equivalência do Segurador de Ordem Zero

Para incluir o atraso do segurador no projeto do controlador, uma solução é encontrar a equivalência discreta para a parte contínua (planta), permitindo trabalhar apenas com funções discretas.



## 2.4. Sistema dinâmico e controlador discretos



O objetivo do curso é fornecer ferramentas para o estudo de funções discretas e o projeto de controladores digitais.