Ações de Controle Básicas e Controladores Automáticos Industriais

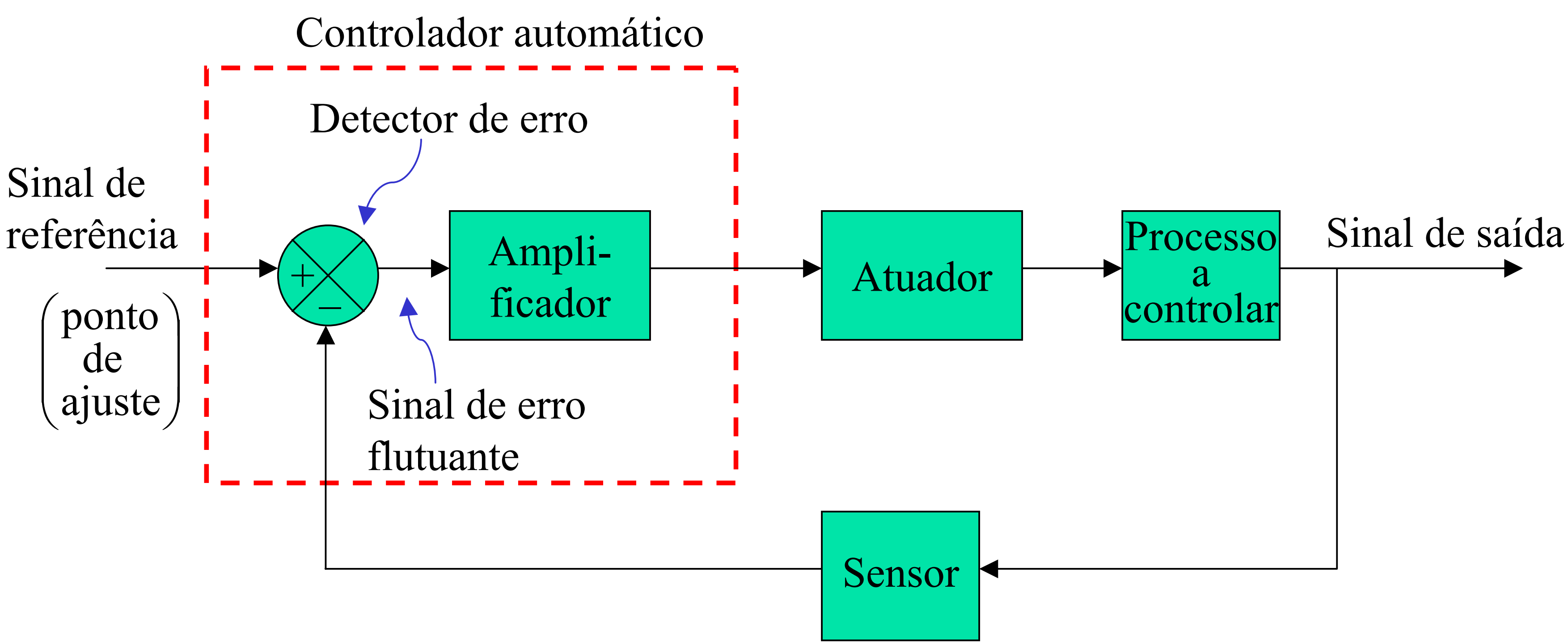
Referência:

- Engenharia de Controle Moderno
- Katsuhiko Ogata

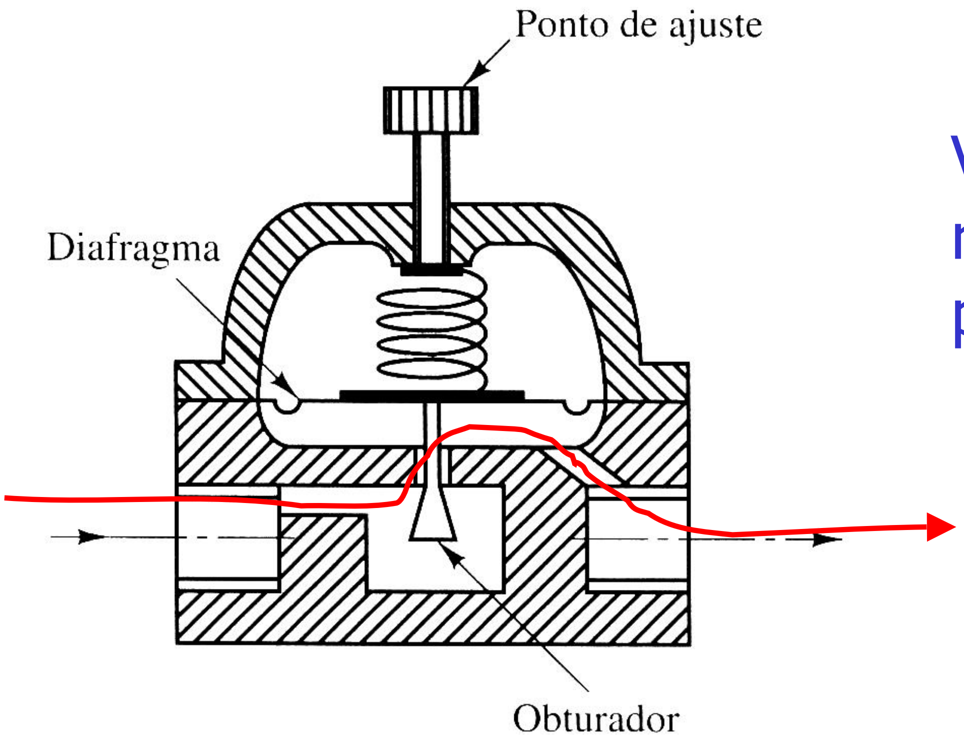
Ações de Controle Básicas

- Controladores de duas posições ou liga-desliga
- Controladores proporcionais
- Controladores do tipo integral
- Controladores do tipo proporcional e integral
- Controladores do tipo proporcional e derivativo
- Controladores do tipo proporcional, integral e derivativo

Controlador automático, atuador e sensor (elemento de medição)



Controladores auto operados

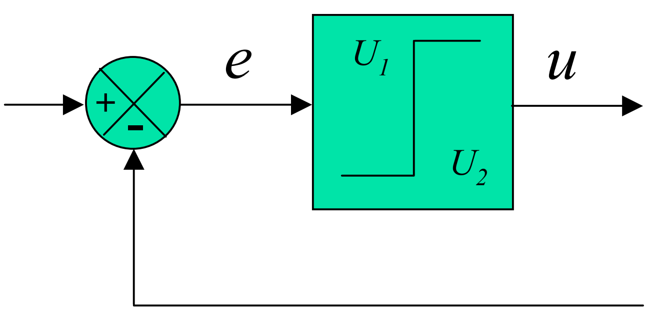


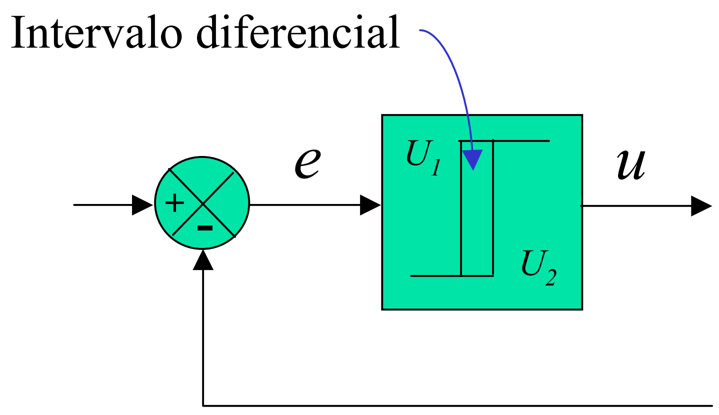
Válvula redutora de pressão

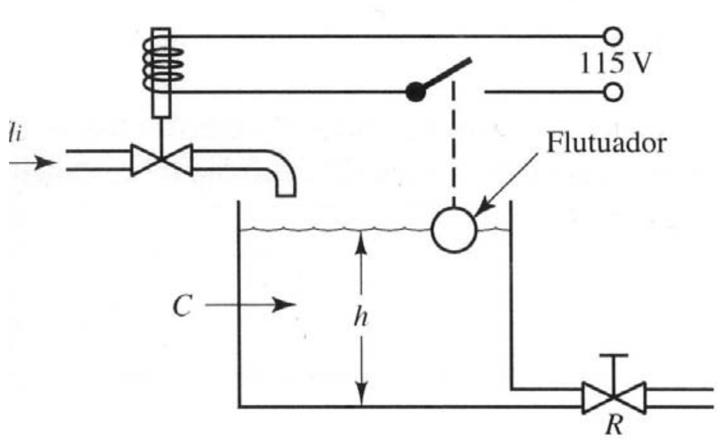
Elemento de medida e atuador integrados em uma única unidade

Ação de controle de duas posições ou liga-desliga (*on-off*)

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & para\ e(t) > 0 \\ U_2, & para\ e(t) < 0 \end{cases}$$

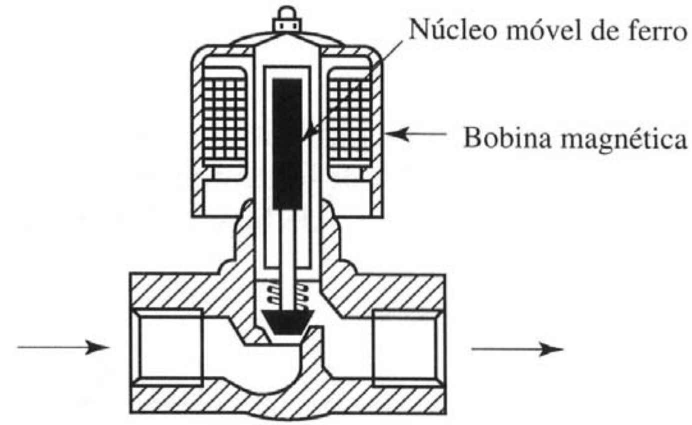






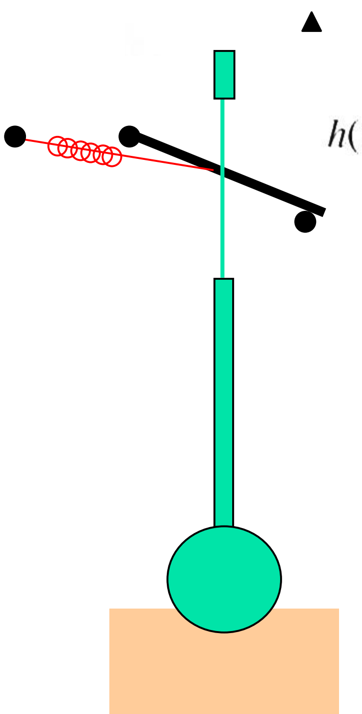
115 V
q_i
Flutuador
C
h
R

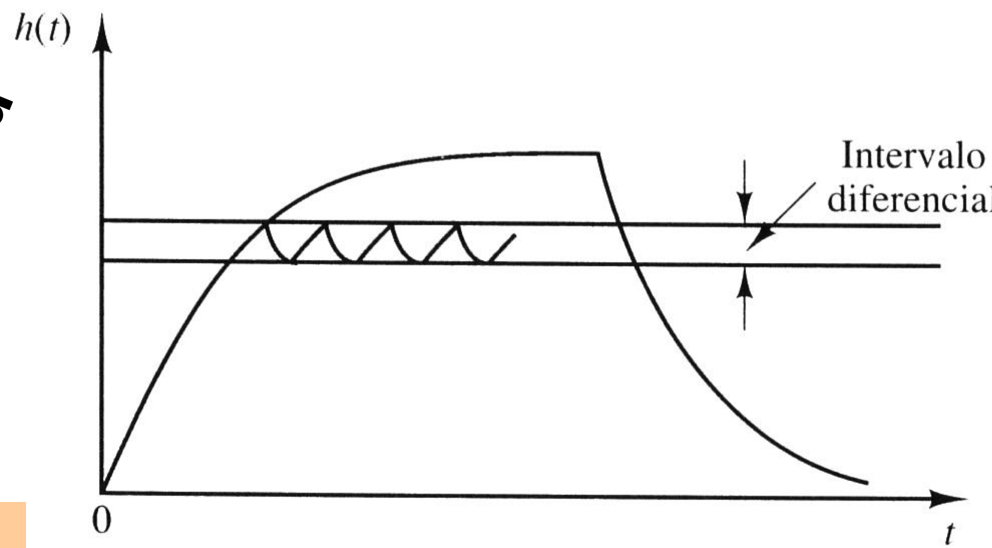
(a)



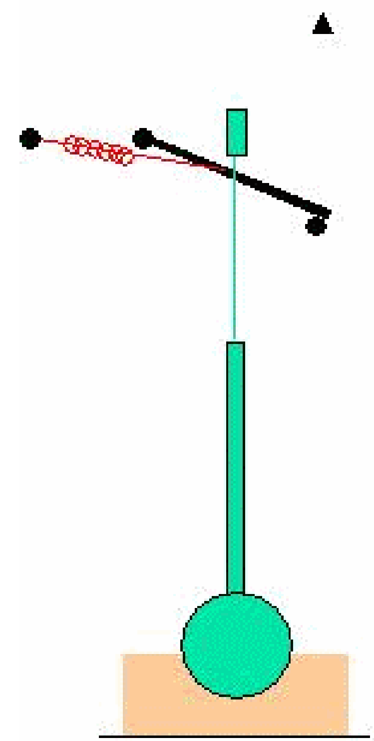
Núcleo móvel de ferro
Bobina magnética

(b)





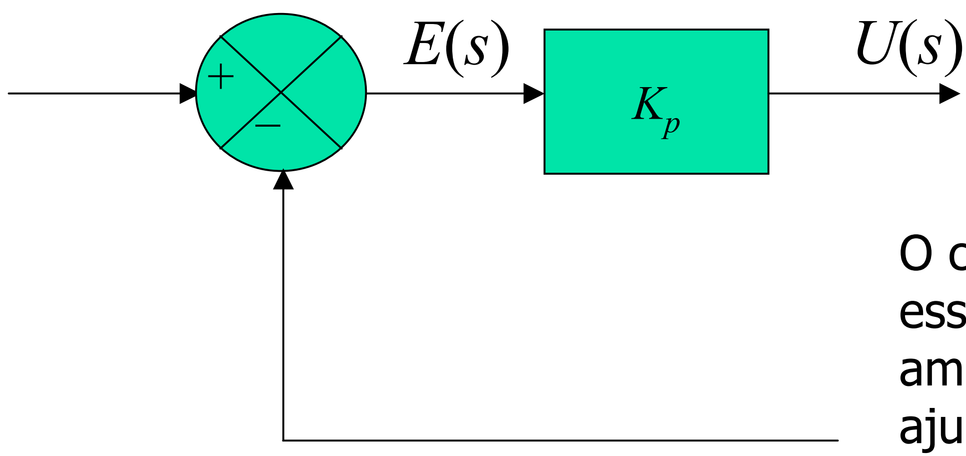
$h(t)$
Intervalo
diferencial
0
t



Ação de controle proporcional

$$u(t) = K_p e(t)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

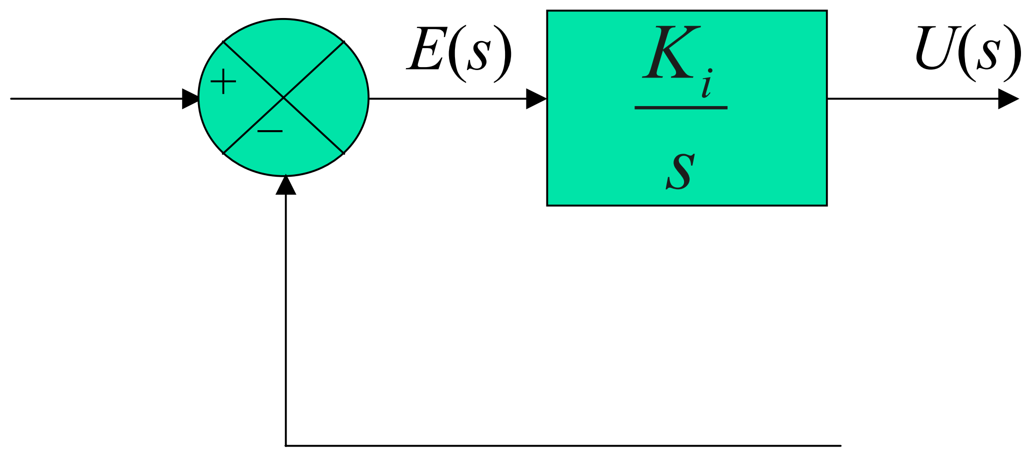


O controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável.

Ação de controle integral

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \qquad \text{ou} \qquad u(t) = K_i \int_0^t e(t)\,dt$$

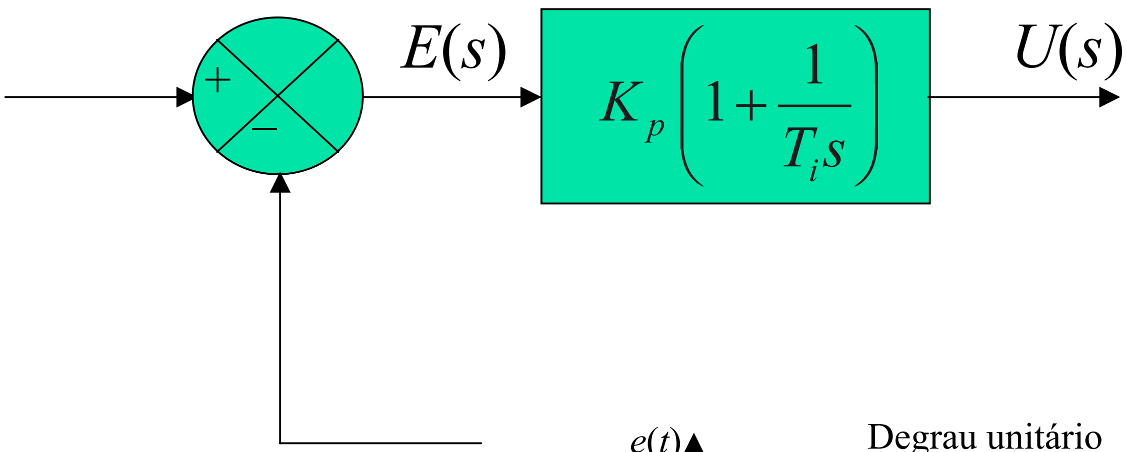
$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

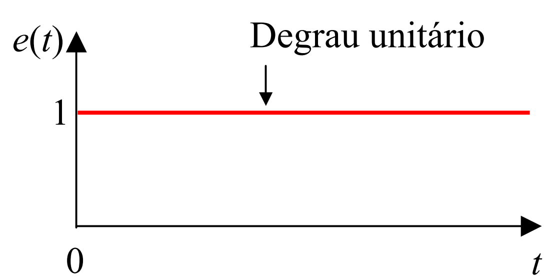


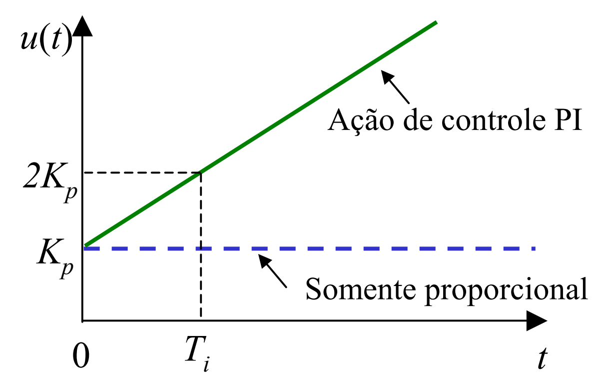
Ação de controle proporcional e integral

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$



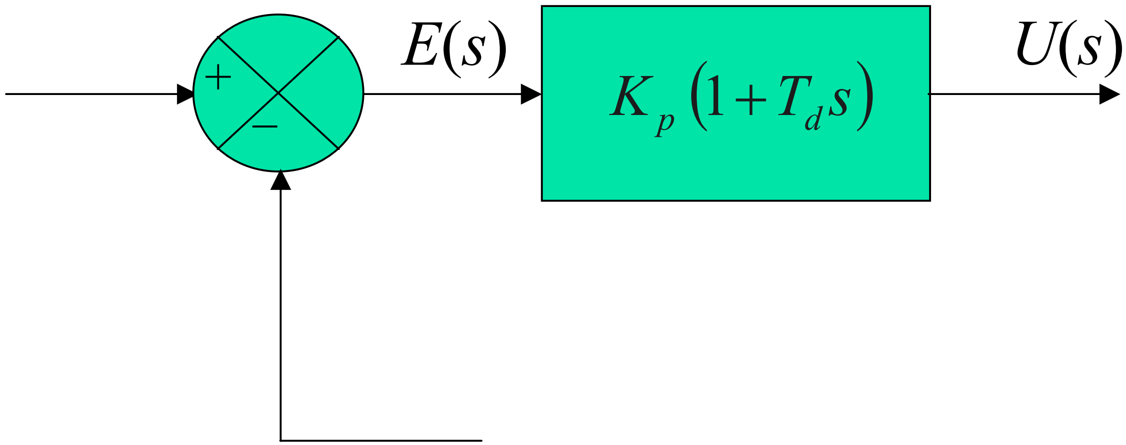


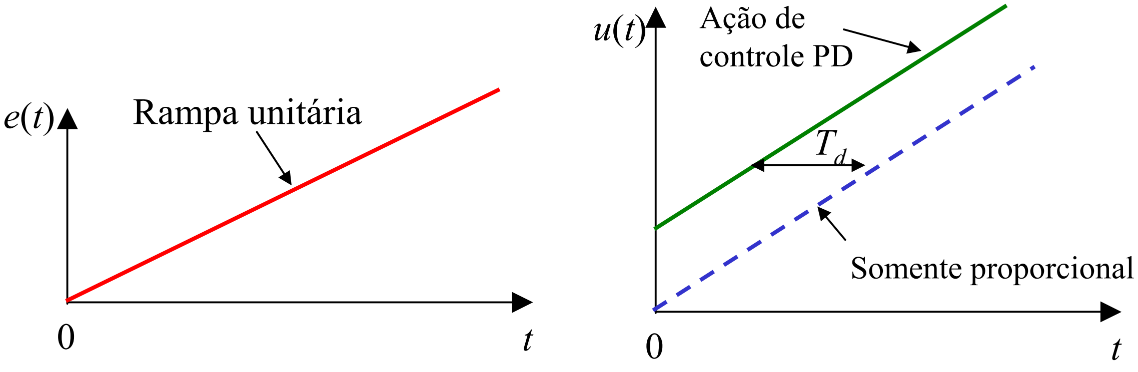


Ação de controle proporcional e derivativa

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + T_d s\right)$$

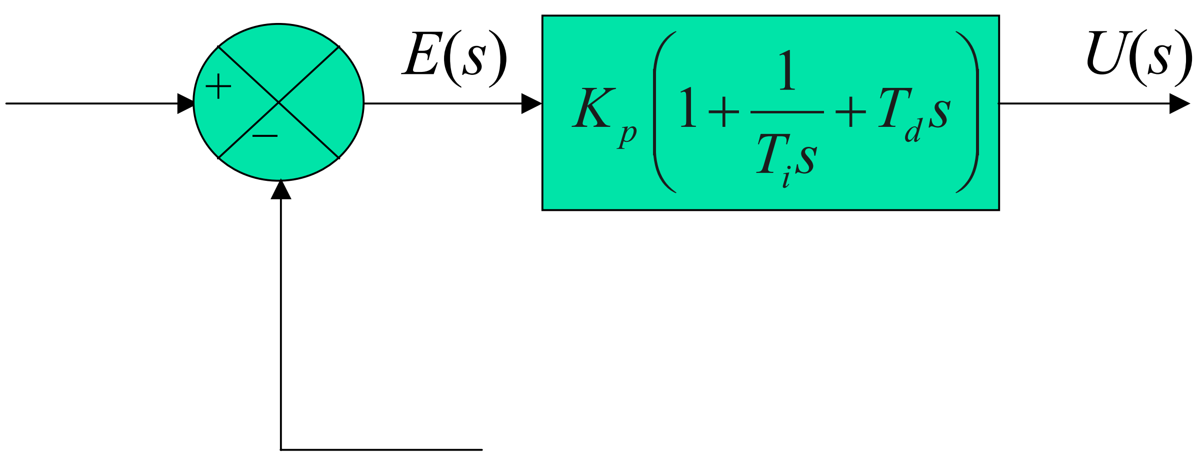


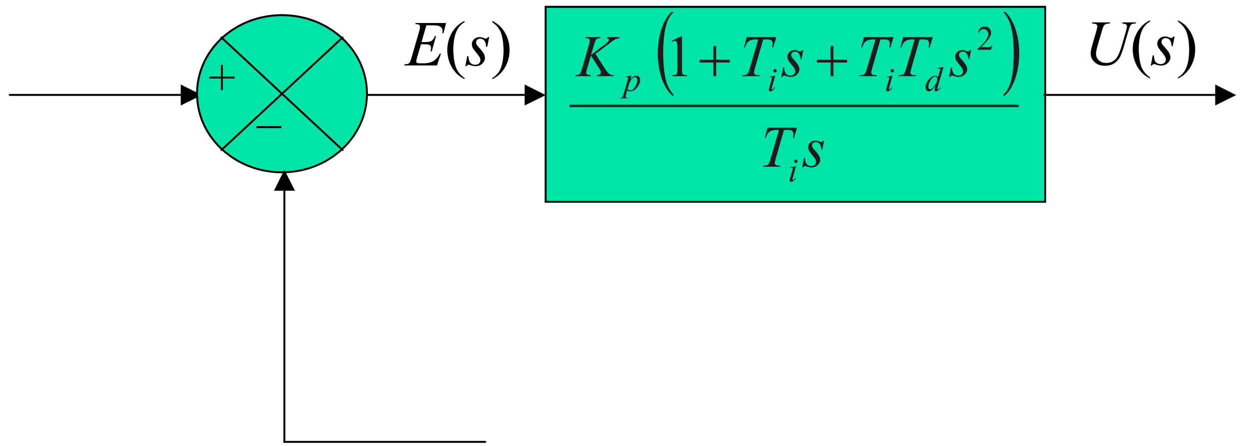


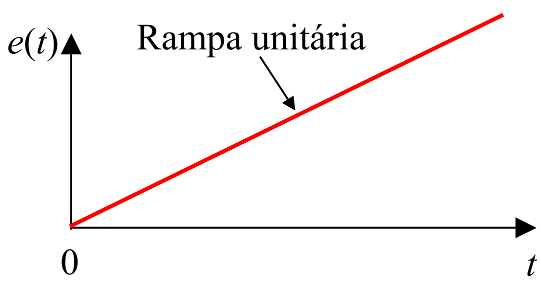
Ação de controle proporcional, integral e derivativa

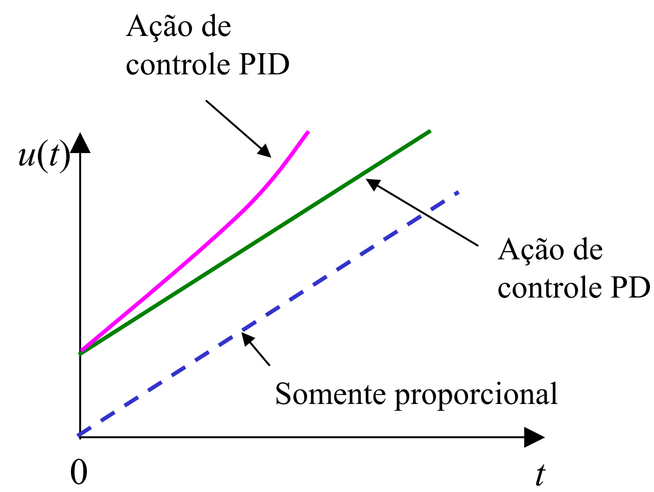
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)\,dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

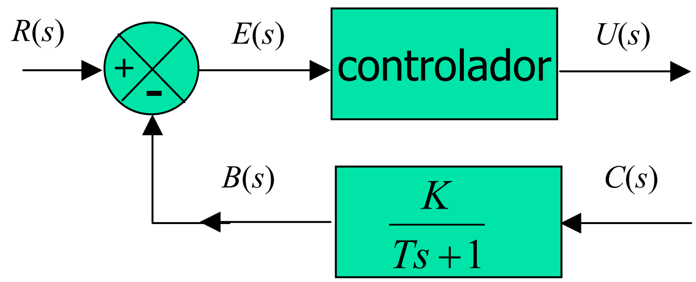



$E(s)$
$\frac{K_p\left(1+T_i s+T_i T_d s^2\right)}{T_i s}$
$U(s)$
+
−

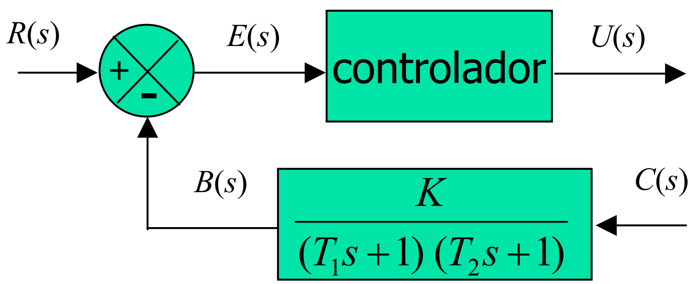

$e(t)$
Rampa unitária
0
t


Ação de controle PID
$u(t)$
Ação de controle PD
Somente proporcional
0
t

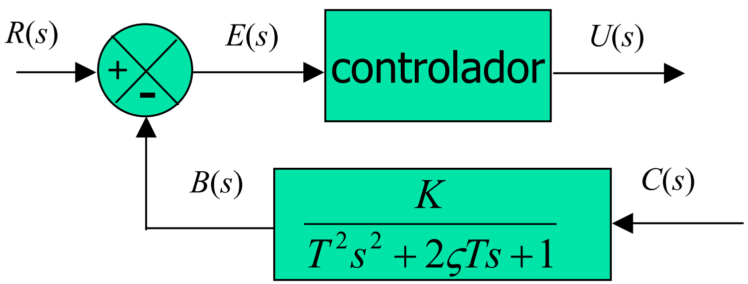
Efeito do sensor (elemento de medida) no desempenho do sistema



1a ordem



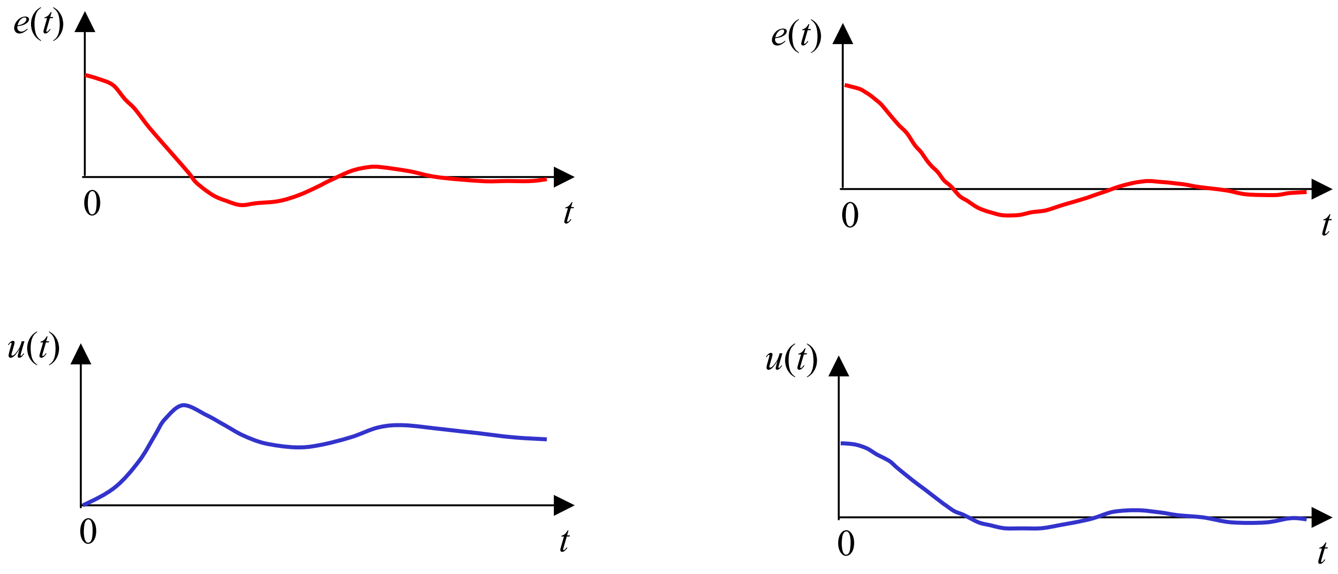
2a ordem superamortecido



2a ordem sub-amortecido

Efeito das ações de controle integral e derivativa sobre o desempenho do sistema

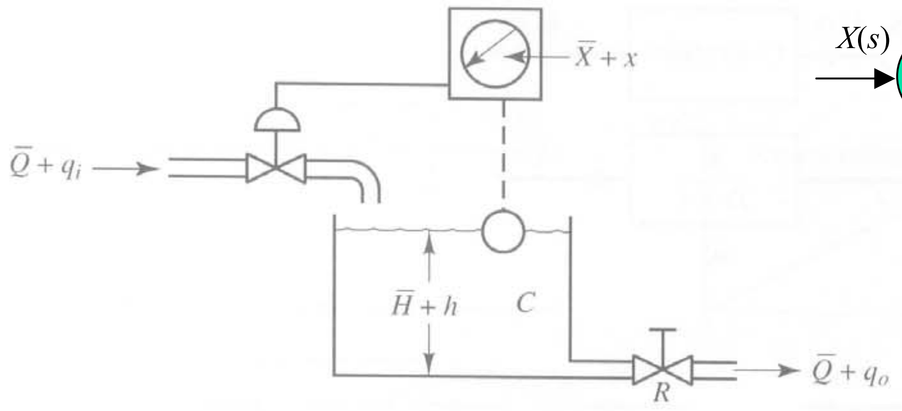
Ação de controle integral

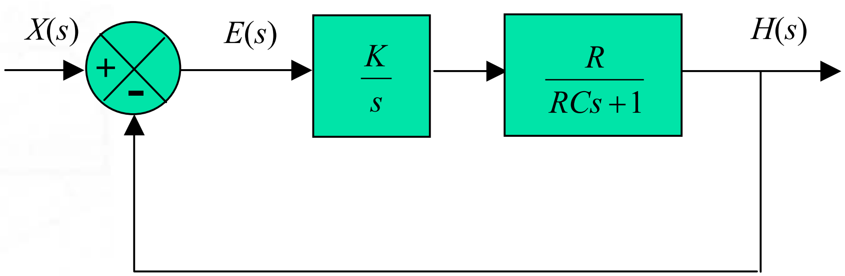


Controle integral

Controle proporcional

Controle integral de sistemas de controle de nível de líquido





$$\frac{H(s)}{X(s)}=\frac{KR}{RCs^2+s+KR}$$

$$\frac{E(s)}{X(s)}=\frac{X(s)-H(s)}{X(s)}$$

$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{X(s) - H(s)}{X(s)} \qquad \frac{E(s)}{X(s)} = 1 - \frac{H(s)}{X(s)}$$

$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{RCs^2 + s}{RCs^2 + s + KR}$$

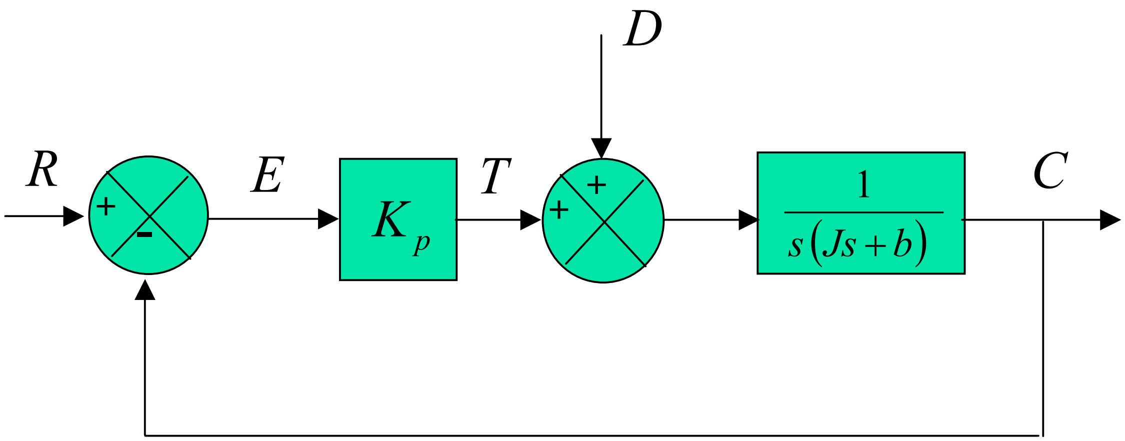
Erro em regime permanente para uma perturbação degrau unitário (O sistema é estável)

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} sE(s)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} \frac{s\left(RCs^2 + s\right)}{RCs^2 + s + KR} \frac{1}{s}$$

$$e_{ss} = 0$$

Resposta a torques de perturbação (Controle proporcional)



$$R(s)=0 \qquad E(s)=-C(s)$$

$$\frac{C(s)}{D(s)}=\frac{1}{Js^2+bs+K_p} \qquad \frac{E(s)}{D(s)}=-\frac{C(s)}{D(s)}=\frac{-1}{Js^2+bs+K_p}$$

$$\frac{E(s)}{D(s)} = -\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{-1}{Js^2 + bs + K_p}$$

Erro em regime permanente devido a um torque perturbador em degrau, de valor T_d:

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} sE(s)$$

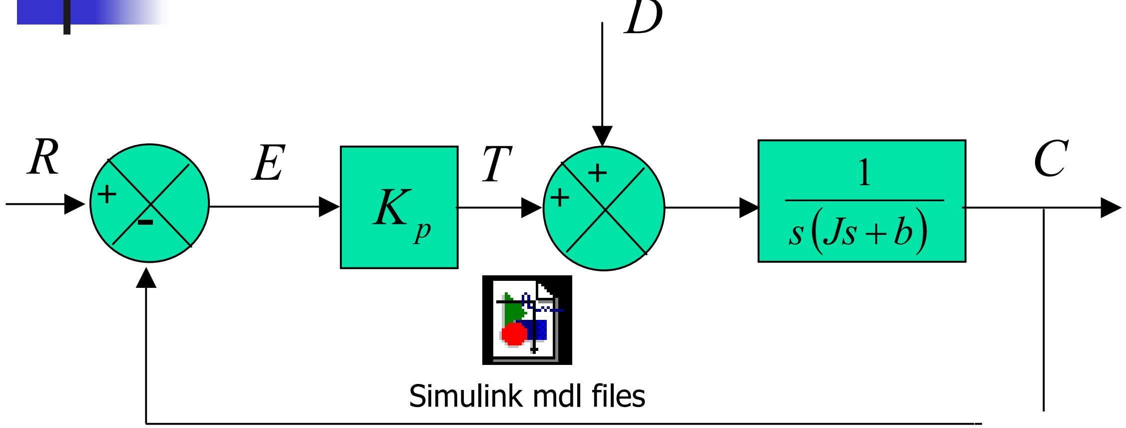
$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} \frac{-s}{Js^2 + bs + K_p} \frac{T_d}{s}$$

$$e_{ss} = -\frac{T_d}{K_p}$$

- O erro pode ser reduzido aumentando o ganho K_p
- O aumento do ganho resultará uma resposta mais oscilatória

Exemplo:

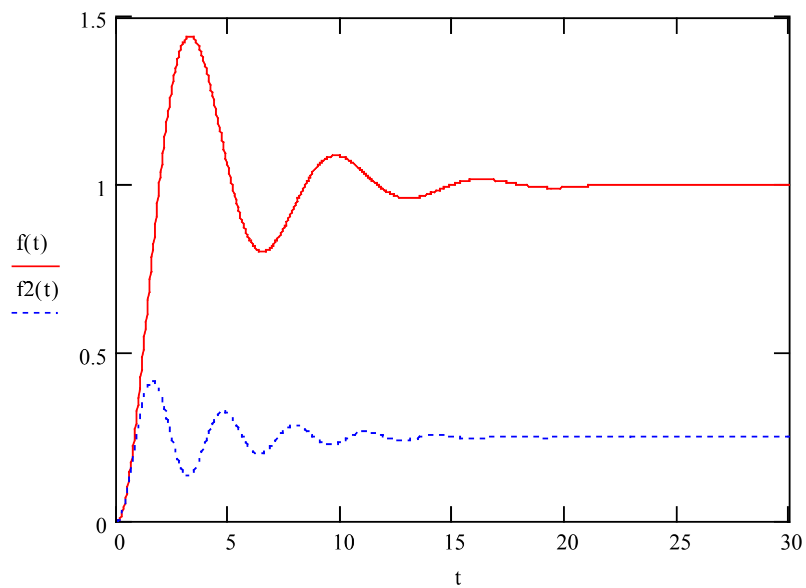
Obter a curva de resposta do sistema mostrado na figura, quando este é submetido a uma perturbação em degrau unitário



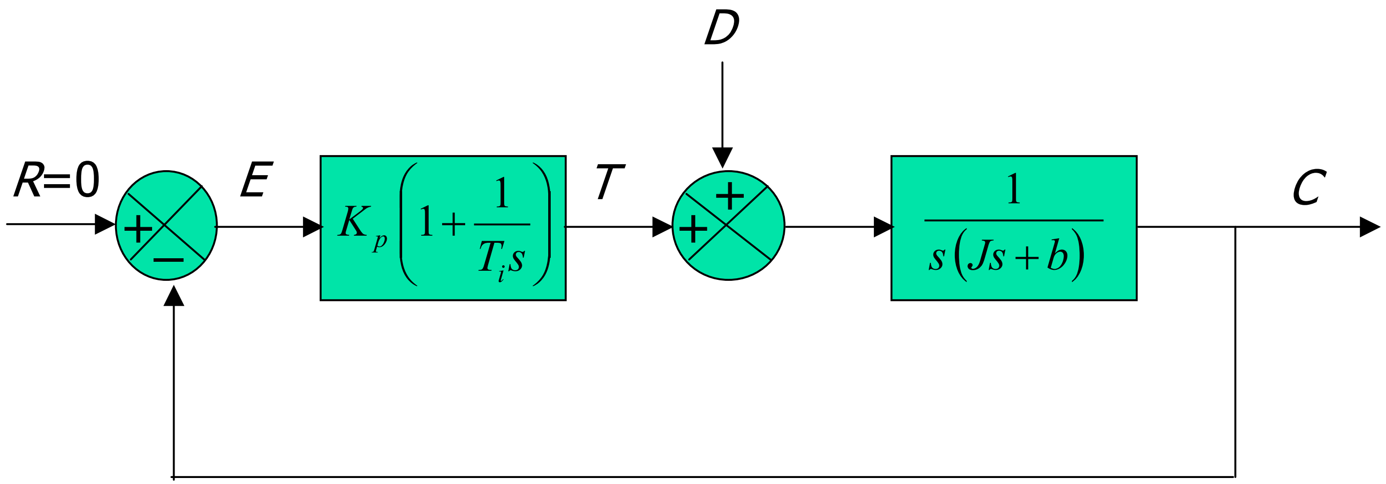
$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{1}{Js^2 + bs + K_p}$$

Caso 1: $\begin{cases} J = 1 \\ b = 0,5 \\ K_p = 1 \end{cases}$ $\quad \frac{C(s)}{D(s)} = \frac{1}{s^2 + 0,5s + 1}$

Caso 2: $\begin{cases} J = 1 \\ b = 0,5 \\ K_p = 4 \end{cases}$ $\quad \frac{C(s)}{D(s)} = \frac{1}{s^2 + 0,5s + 4}$



Resposta a torques de perturbação (Controle proporcional + integral)



$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{s}{Js^3 + bs^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} \qquad E(s) = \frac{-s}{Js^3 + bs^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} D(s)$$

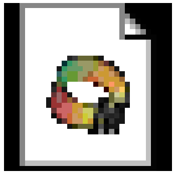
Se este sistema for estável, isto é, se as raízes da equação característica

$$Js^3 + bs^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i} = 0$$

Tiverem partes reais negativas, o erro em regime permanente a um torque perturbador em degrau unitário é

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} sE(s)$$

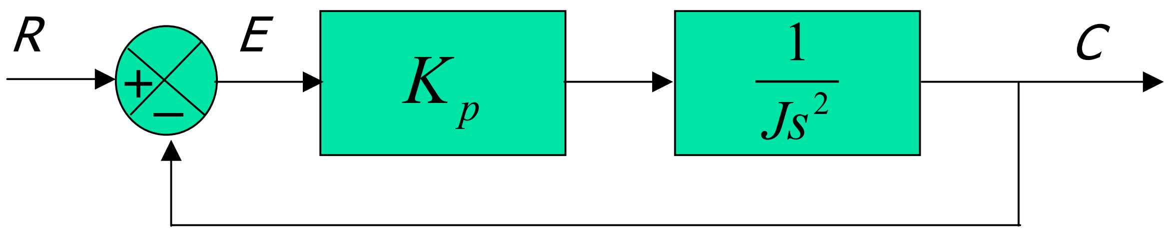
$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} \frac{-s^2}{Js^3 + bs^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} \frac{1}{s}$$



Mathcad Document

$$e_{ss} = 0$$

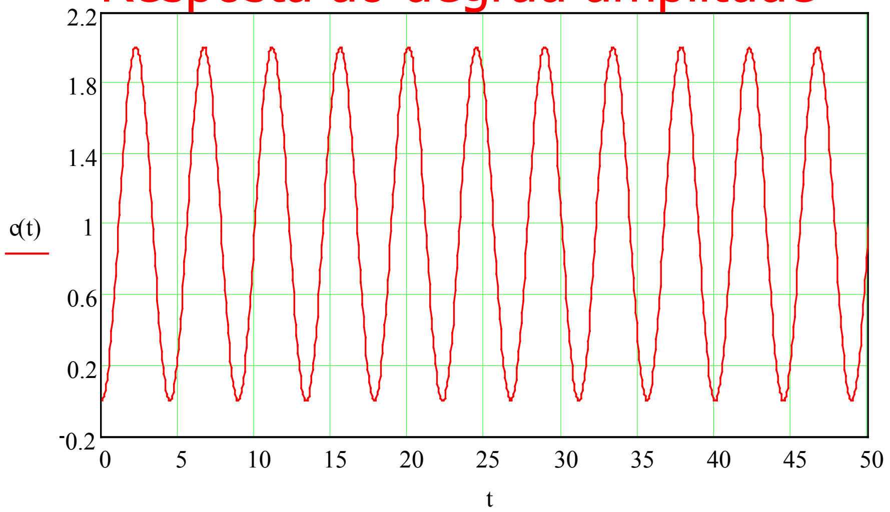
Sistema de controle proporcional com carga de inércia



$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p}{Js^2 + K_p}$$

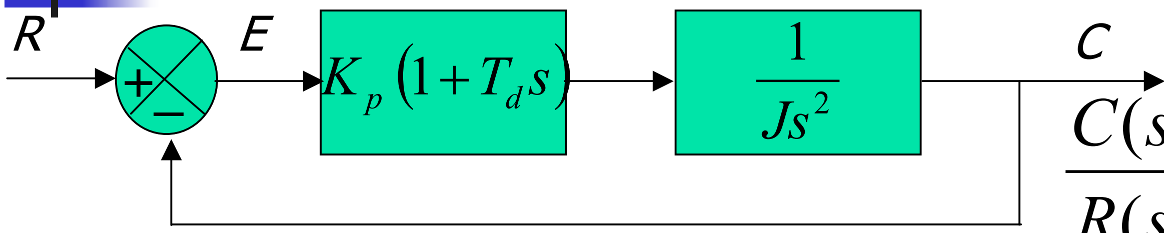
As raízes da equação característica $Js^2 + K_p = 0$ são imaginárias.

Resposta ao degrau amplitude = 2



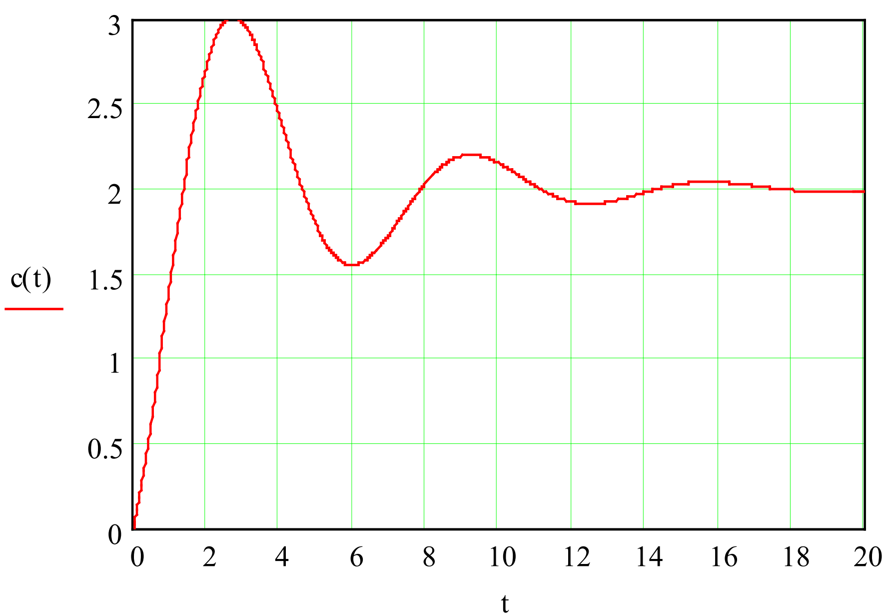
- Esta característica de resposta não é desejável.
- A adição de um controle derivativo estabilizará o sistema.

Controle proporcional-derivativo de um sistema com carga de inércia



$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p(1+T_d s)}{Js^2 + K_p T_d s + K_p}$$

Resposta ao degrau
amplitude = 2



- O controle derivativo é antecipatório.
  - mede a velocidade de erro instantânea
  - prediz grandes valores de ultrapassagem antecipadamente no tempo
  - produz ação de controle apropriada antes que ocorra uma ultrapassagem demasiadamente grande.