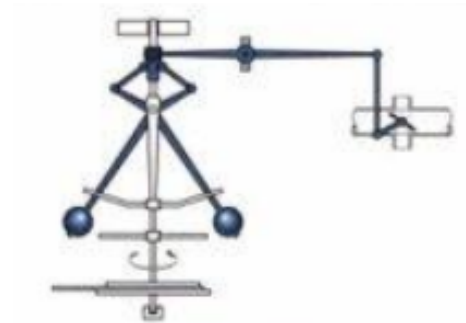


Controle de Sistemas Dinâmicos

CSD9 - Projeto no LGR



Prof. Adolfo Bauchspiess
ENE/UnB

(Material de aula *Complementar*, adaptado parcialmente de Nise 3ª Ed.)

Ações de Controle Básicas

1.P: K

2.I: K/s

3.D: K.s

4.PD: K(s+z)

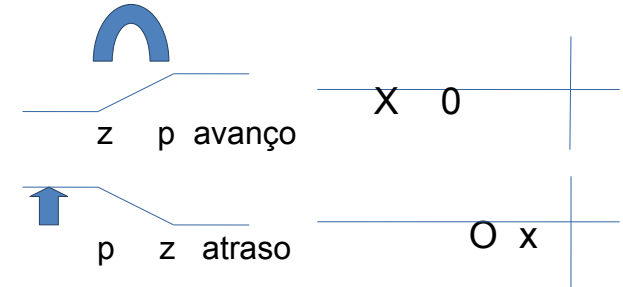
5.PI: K(s+z)/s

6.PID: K(s+z₁)(s+z₂)/s

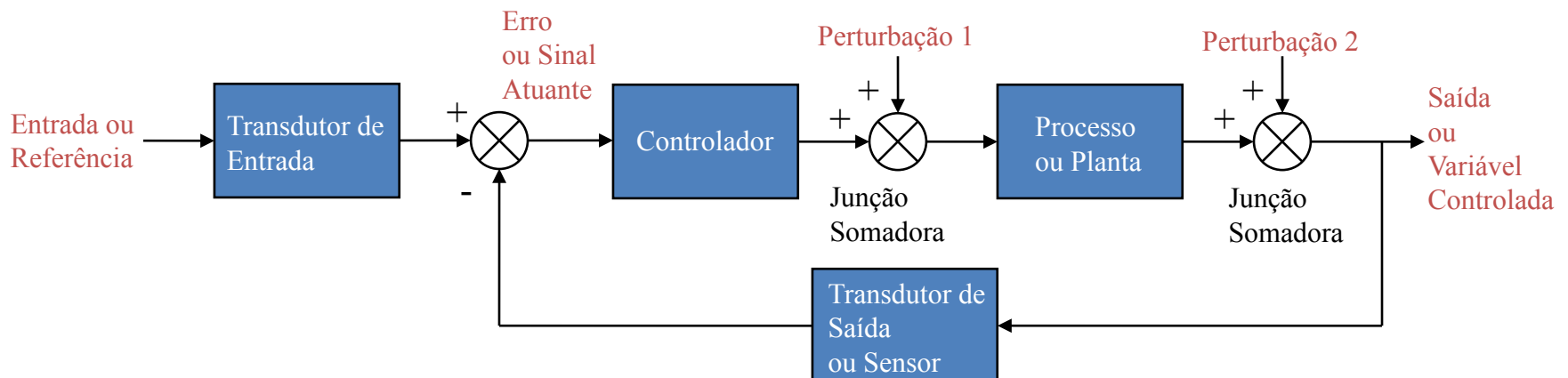
7.Avanço de fase K(s+z)/(s+p)

8.Atraso (e_{ss}) ↓ K(s+z)/(s+p)

9.Avanço-Atraso K(s+z₁)(s+z₁)/((s+p₁)(s+p₂))



Realização
Ativa (Amp.Op.)



Visão Geral: Controlador Dinâmico

1. e_{ss} , t_s
 t_r , M_p , t_p

2. s_0 , polo dom.
Resp. Transitória

3*. $\phi_{av} =$
 $180^\circ - \angle G(s)_{s_0}$

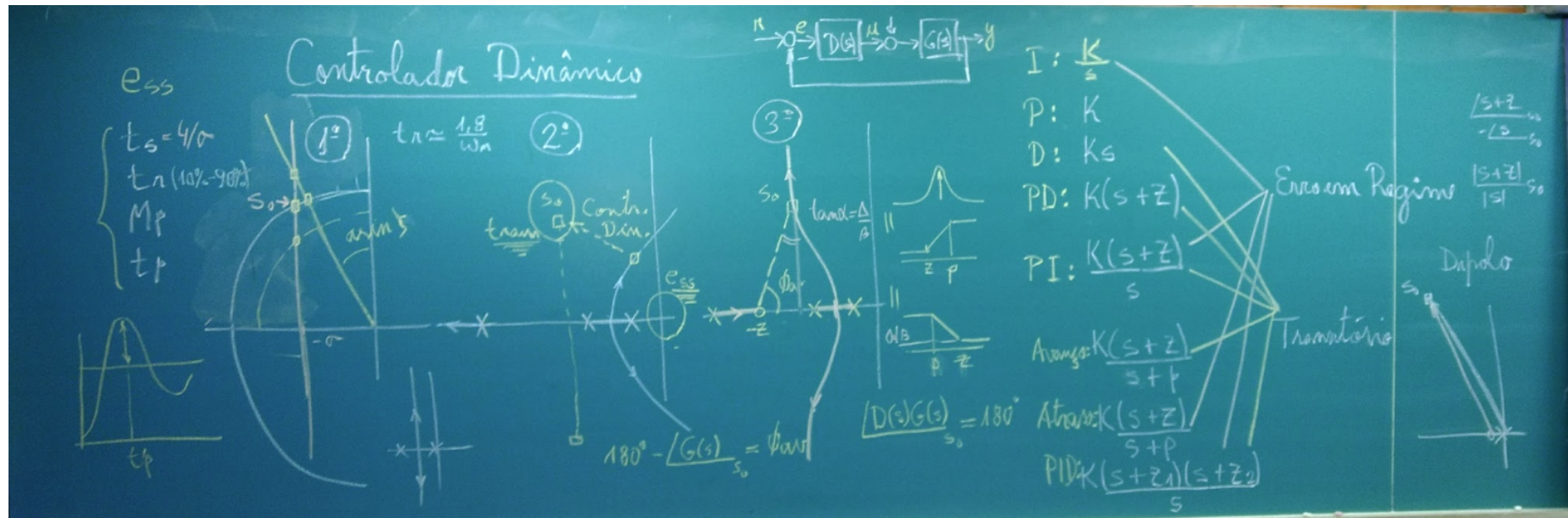
*Se canal I: $\phi_{av} =$
 $180^\circ - \angle G(s)/s_{s_0}$

4. Escolha do
Controlador

5. Fixar z ,
cálculo de p (ϕ_{av})

6. Cálculo de K
(Condição | |)

7. Verificação
step(feedback(D*G,1))



Visão Geral: Controlador Dinâmico

1. e_{ss} , t_s
 t_r , M_p , t_p

2. s_0 , polo dom.
Resp. Transitória

3*. $\phi_{av} =$
 $180^\circ - \angle G(s)_{s_0}$

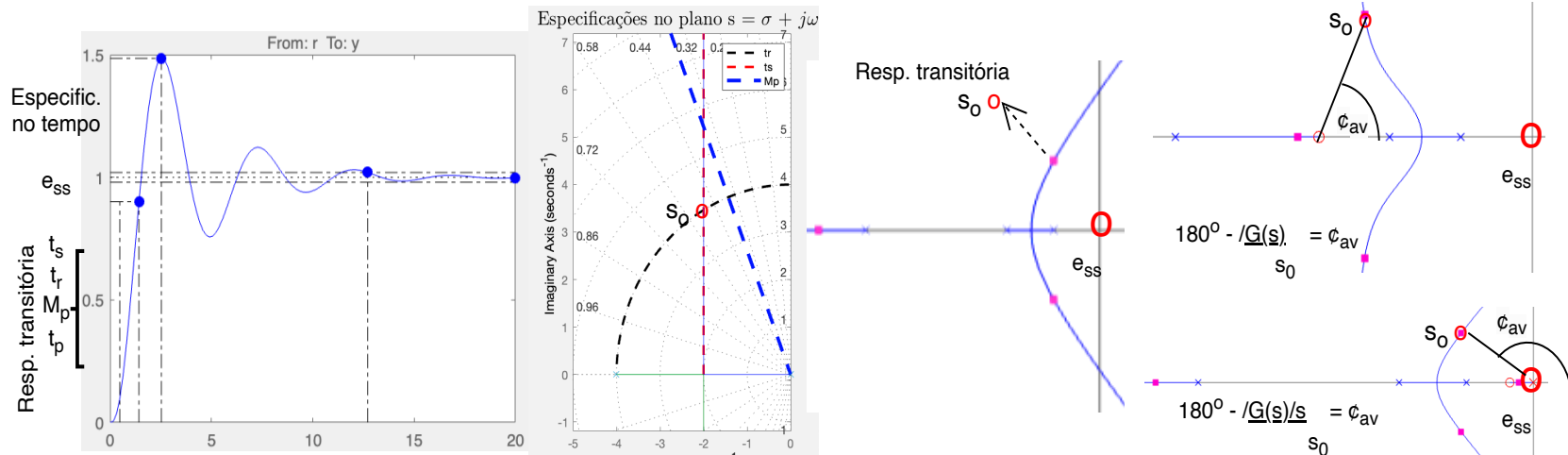
*Se canal I: $\phi_{av} =$
 $180^\circ - \angle G(s)/s_{s_0}$

4. Escolha do
Controlador

5. Fixar z ,
cálculo de p (ϕ_{av})

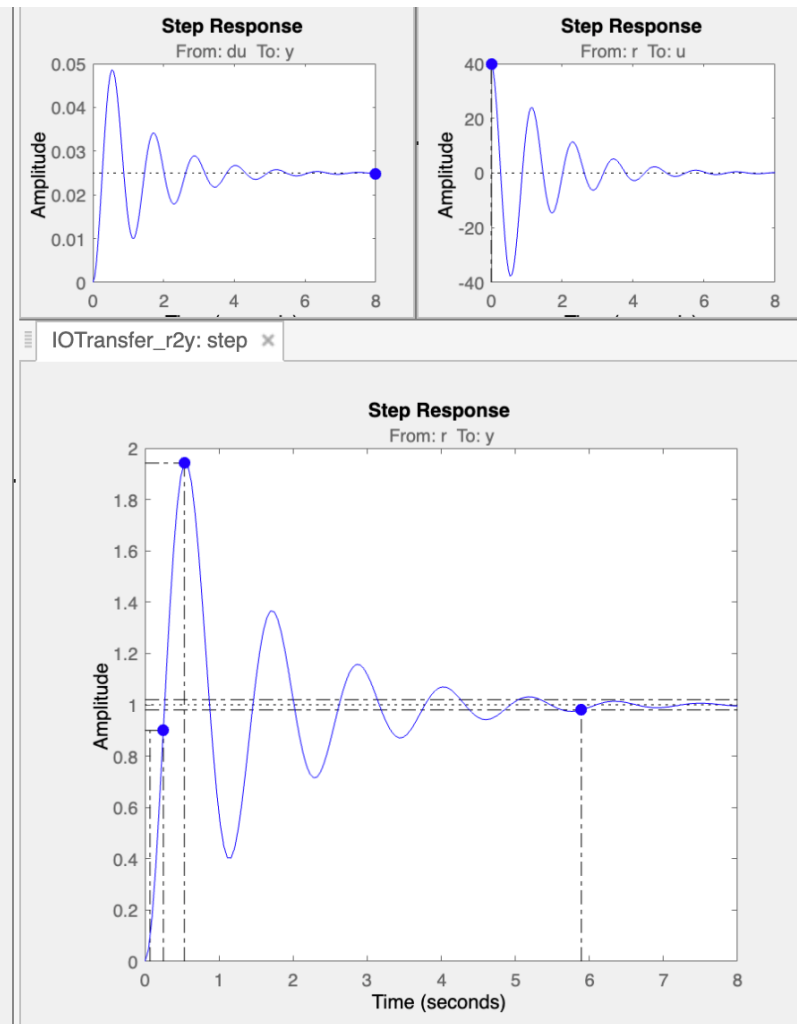
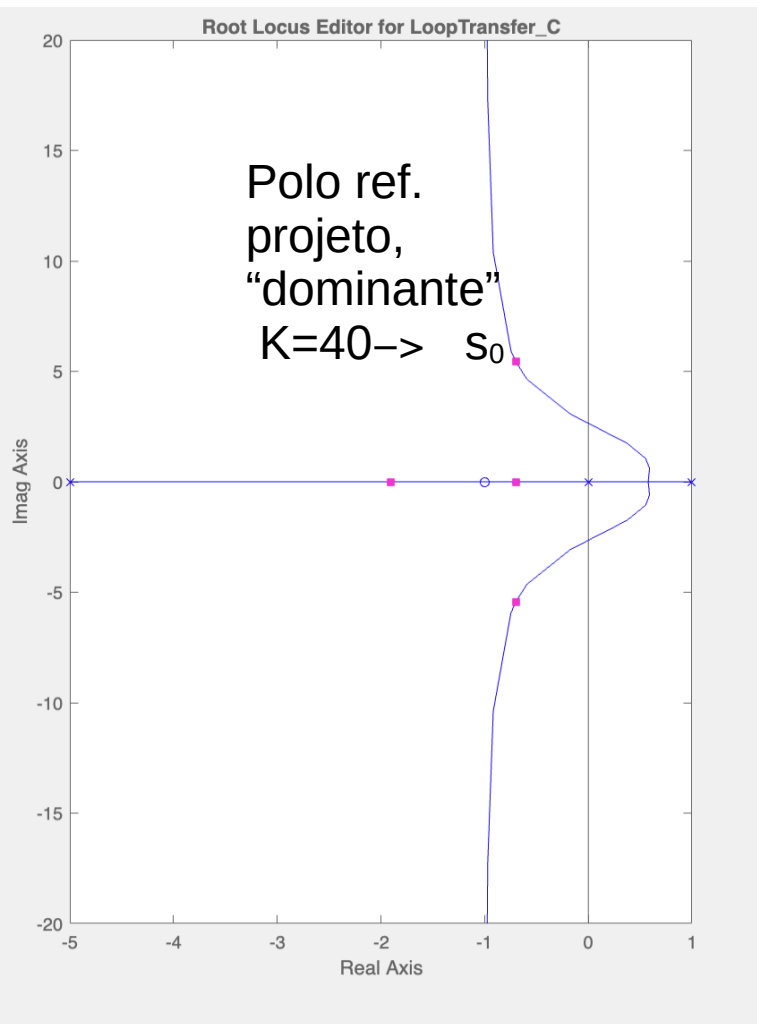
6. Cálculo de K
(Condição $| |$)

7. Verificação
step(feedback(D*G,1))



Controlador Proporcional no LGR

→ $K(s_0)$ atende às especificações



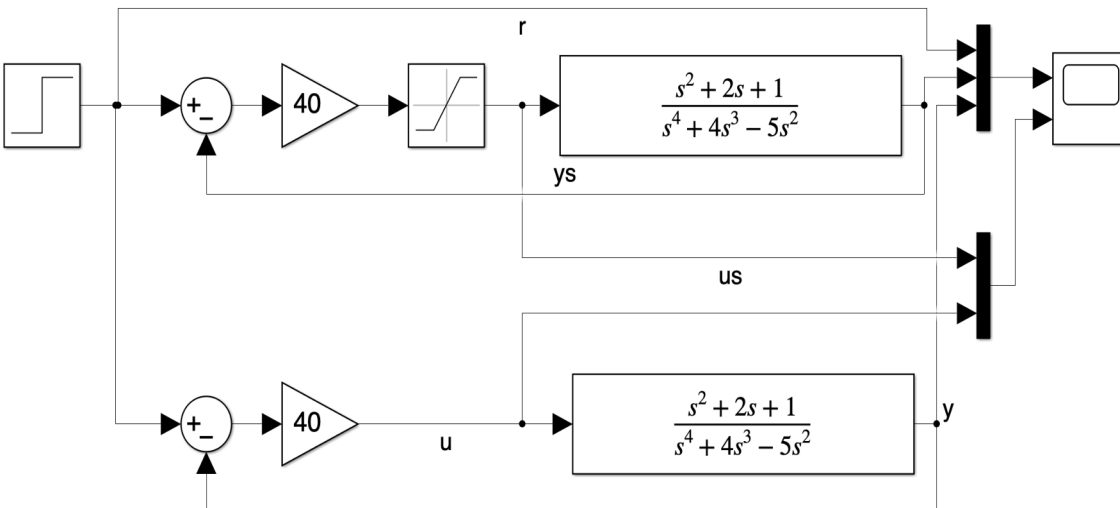
- Estável?
- Y/dU
 $e_{ss} \text{ (perturb.)}$
- U/R
 u_{max}
- Y/R
 $e_{ss} \text{ (ref.)}$
 M_p
 t_r

Controlador Proporcional no LGR

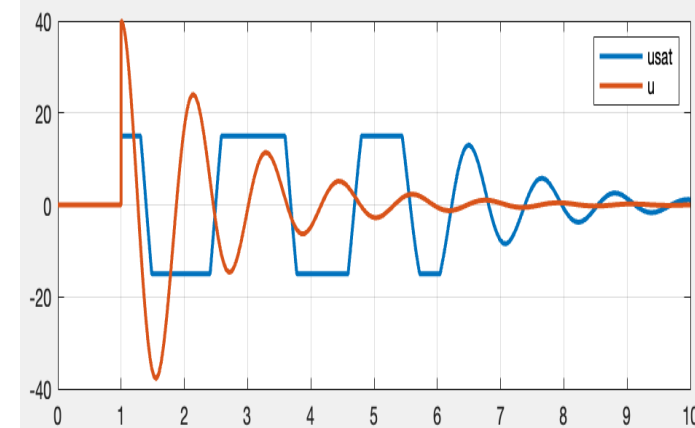
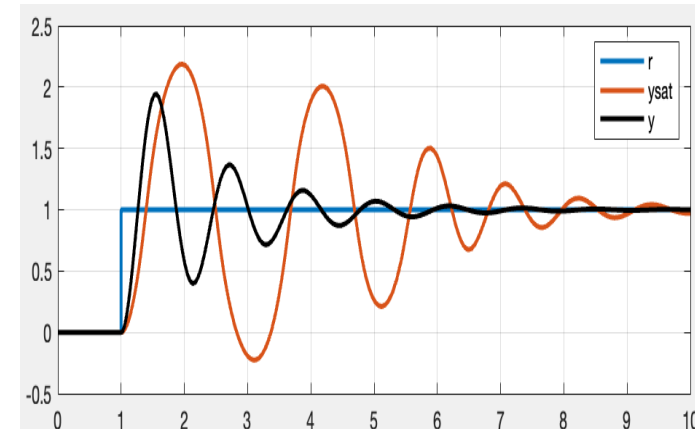
→ $K(s_0)$ atende às especificações

Obs:
LGR é técnica de projeto LINEAR!

Mas, sempre existe SATURAÇÃO → $u_{\max} !!$



Sat: +/-15V



Controlador Dinâmico?

Se $\nexists K$ que atenda às especificações.

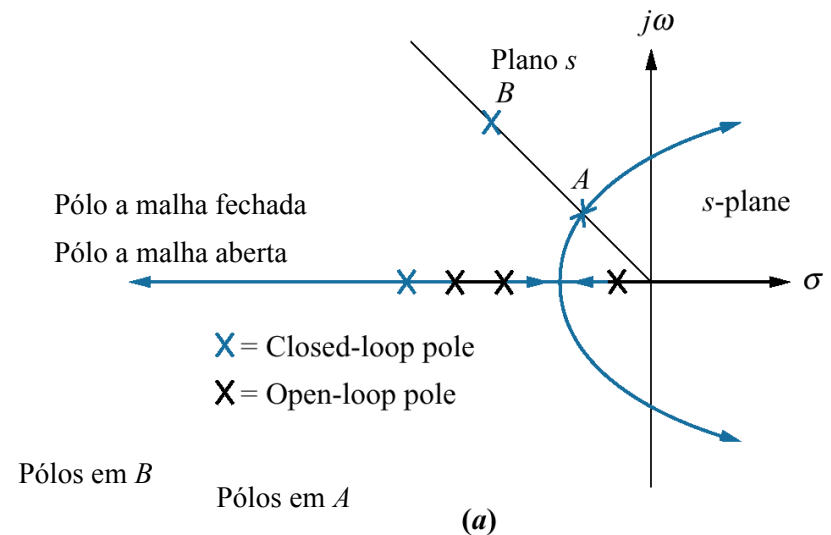
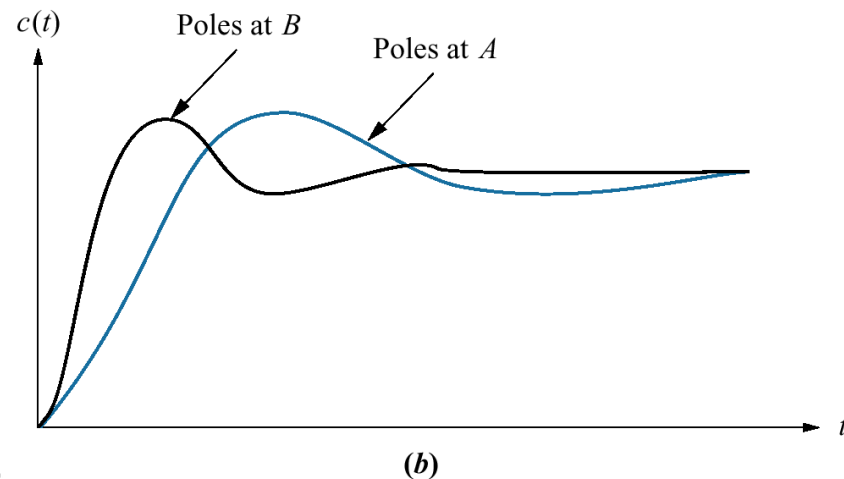


Fig. 9.1

a. Exemplo de LGR

(A) só ajuste de ganho (B) é necessário compensador dinâmico

b. respostas com base nos pólos em A e em B



Arquiteturas de Compensação (Controle) Dinâmica

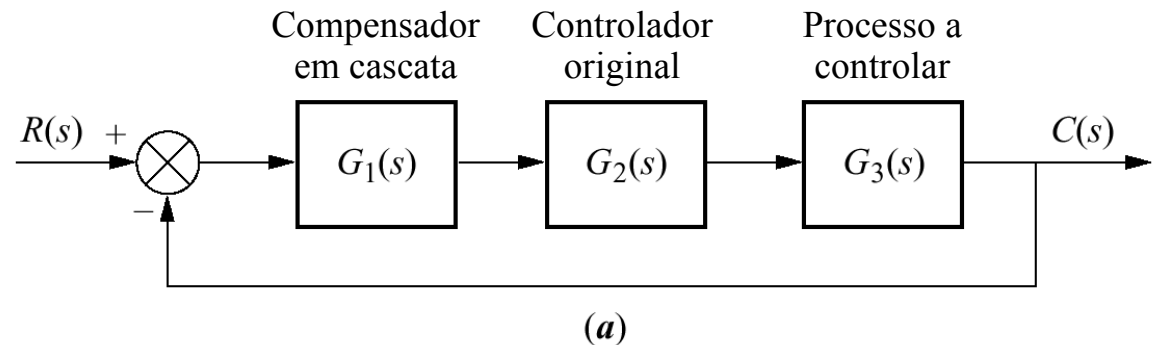
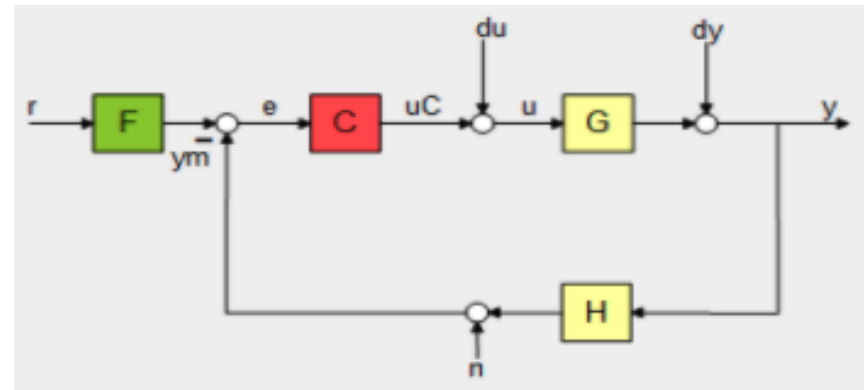


Fig. 9.2

a. Cascata (Série)

b. Retroação

- . Antecipativo
- . Espaço-de-Estados
- . Preditivo
- . Inteligente (RNA)
- . Ótimo

...

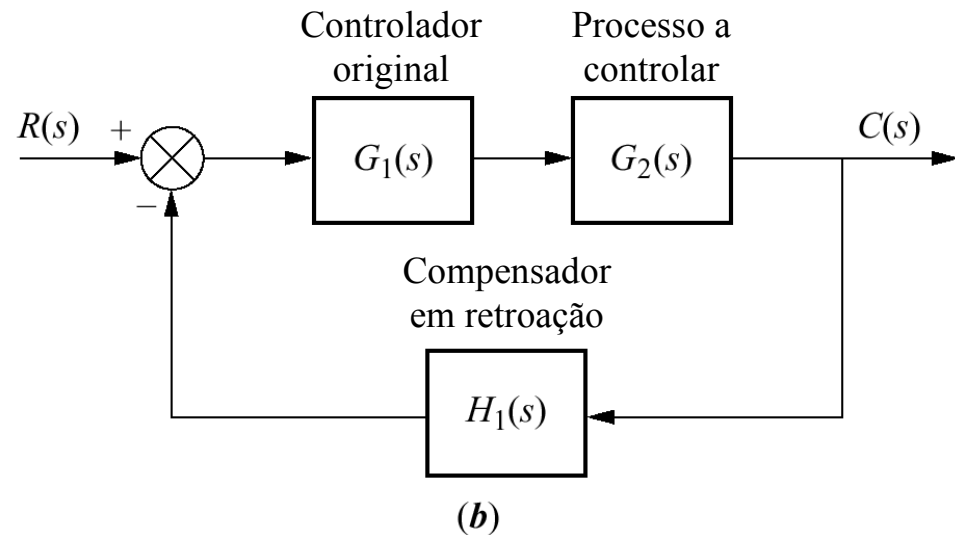


Fig. 9.3

O pólo em A:

a. está sobre o lugar das raízes sem compensador;

b. não está sobre o lugar das raízes com a inclusão do pólo do compensador;
(continua)

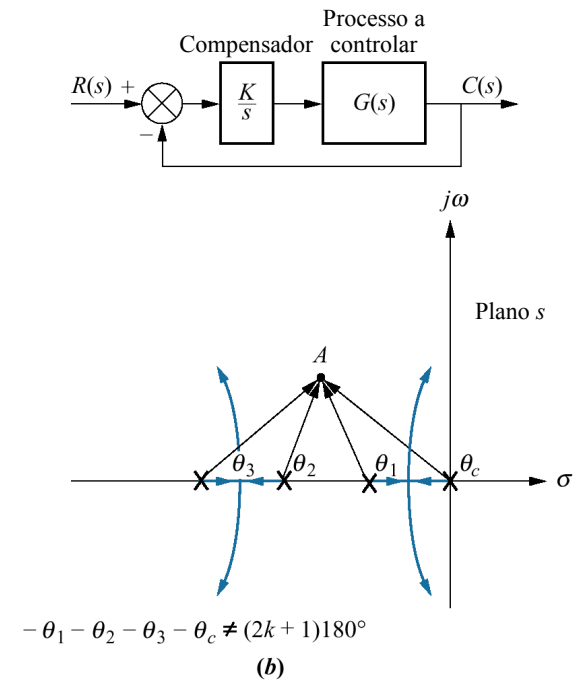
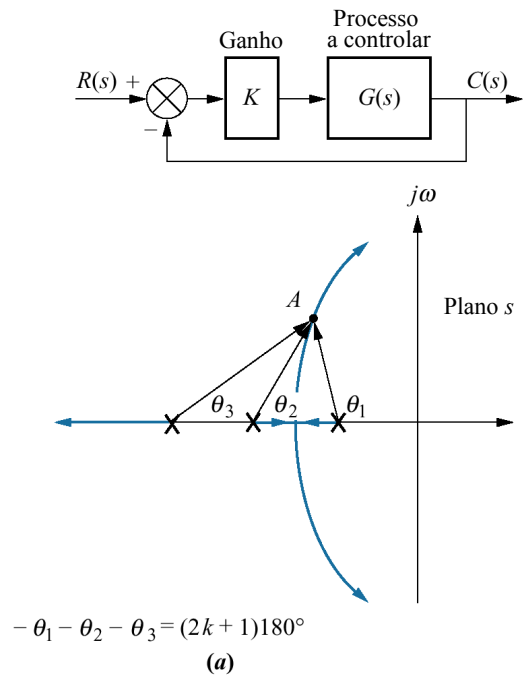


Fig. 9.8
Controlador PI

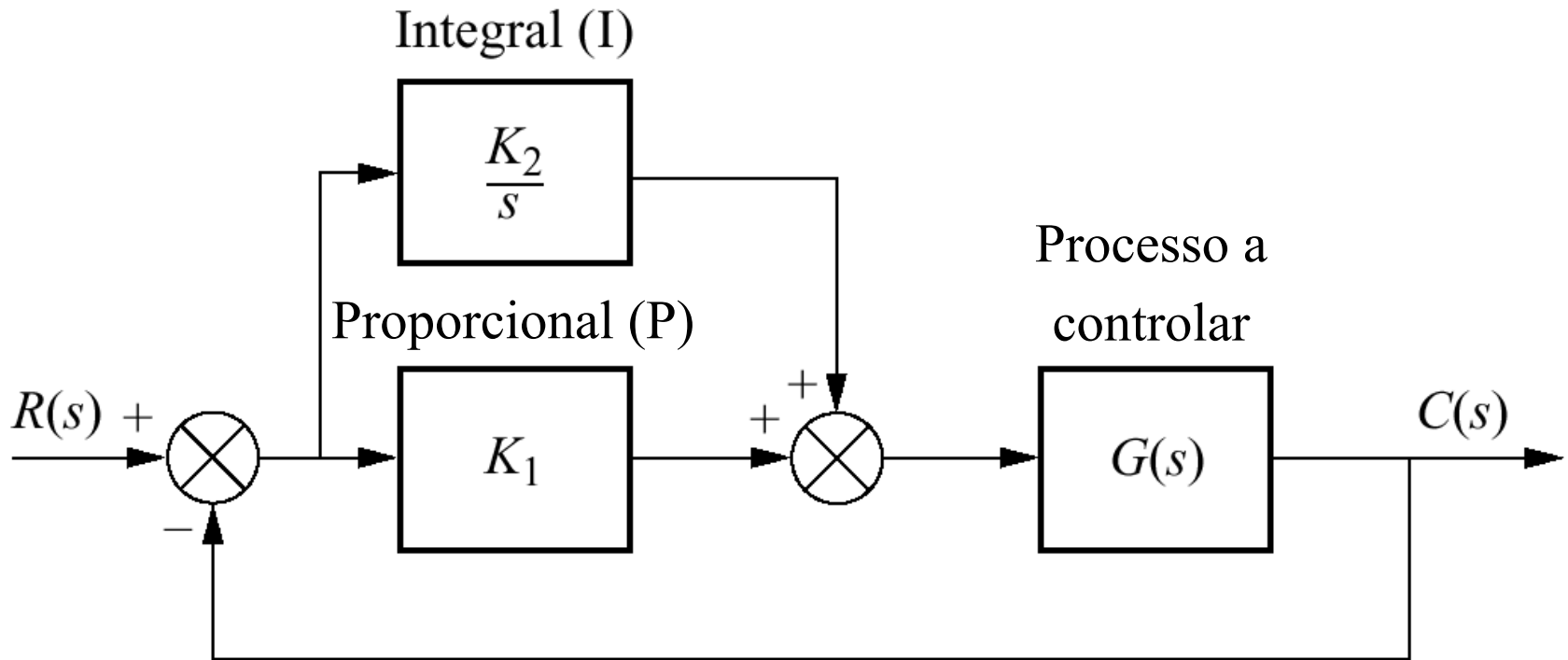
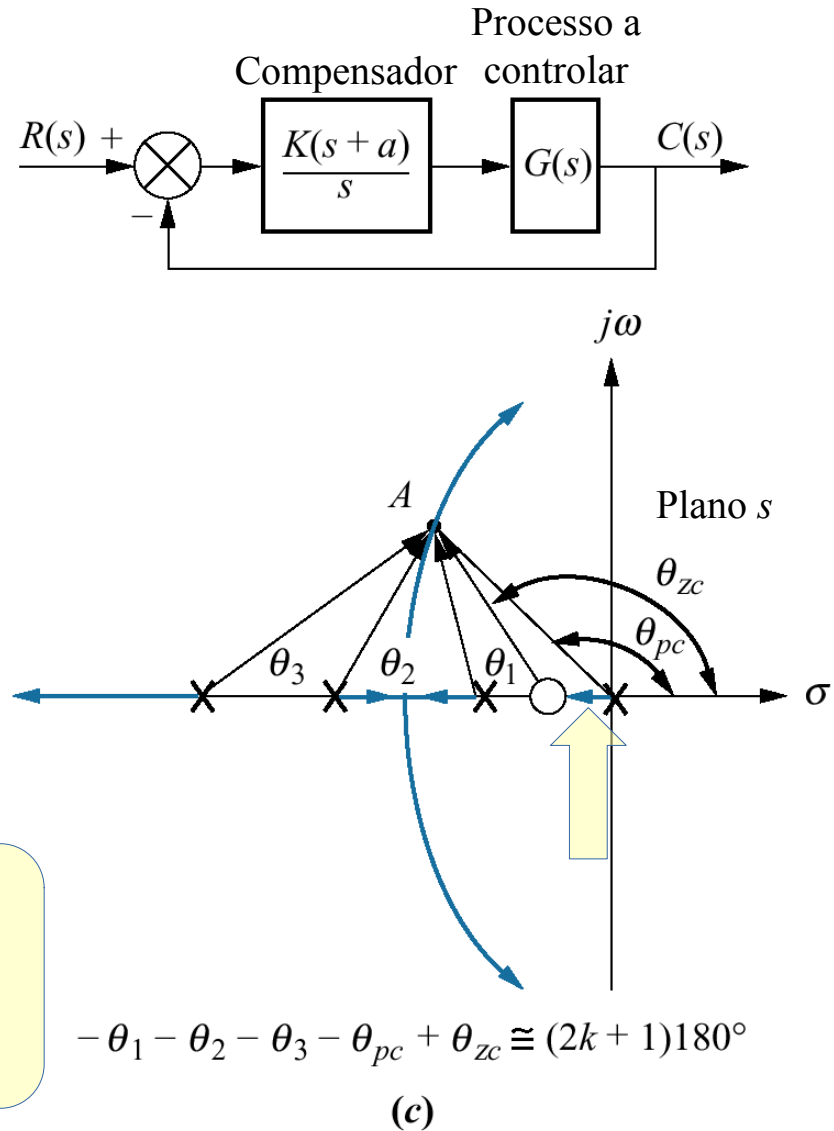


Fig. 9.3

(continuação)

c. aproximadamente sobre o lugar das raízes com a inclusão do pólo e do zero do compensador



Projeto LGR Nise “típico”:

- dipolo mantém ($\sim A$)
- PORÉM $\rightarrow$ polo bem lento, t_s



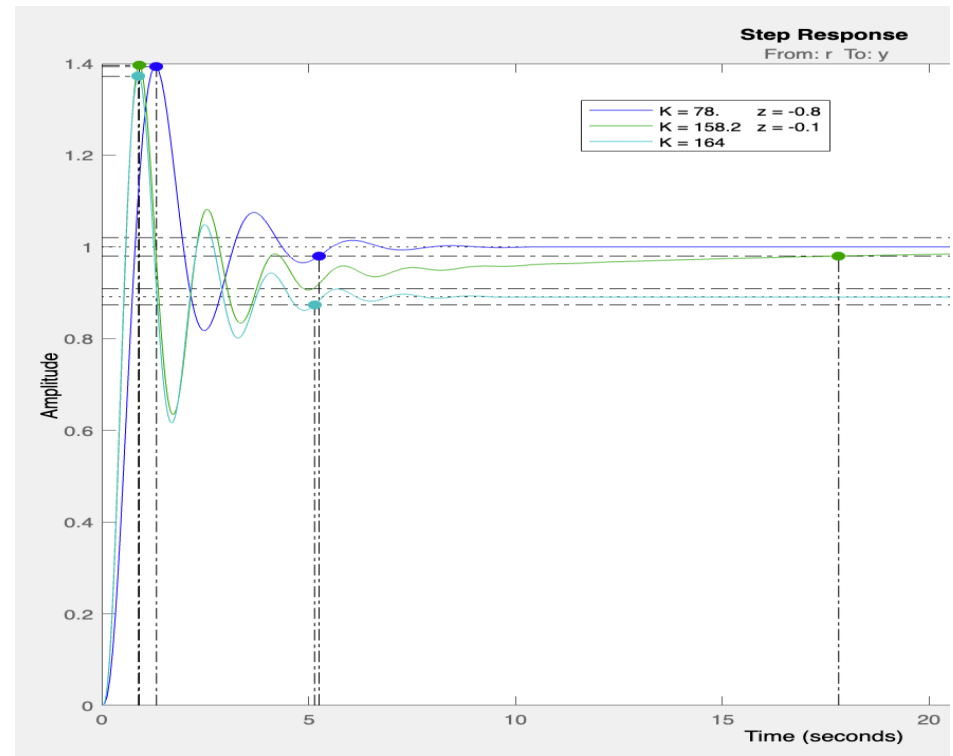
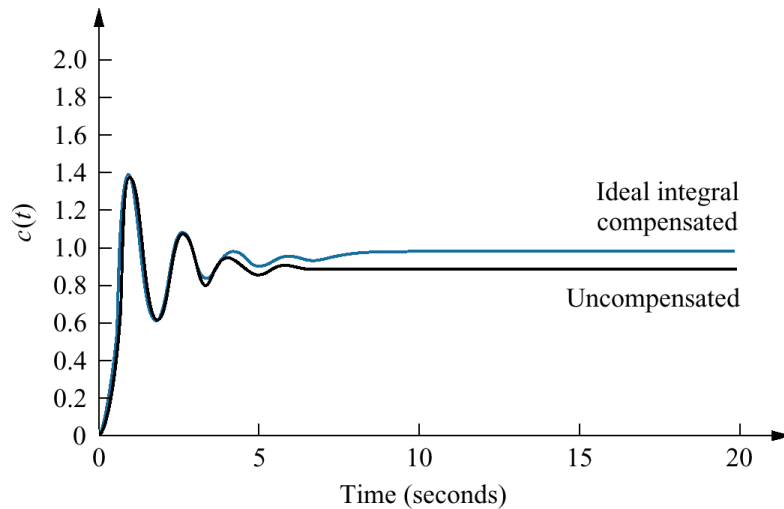
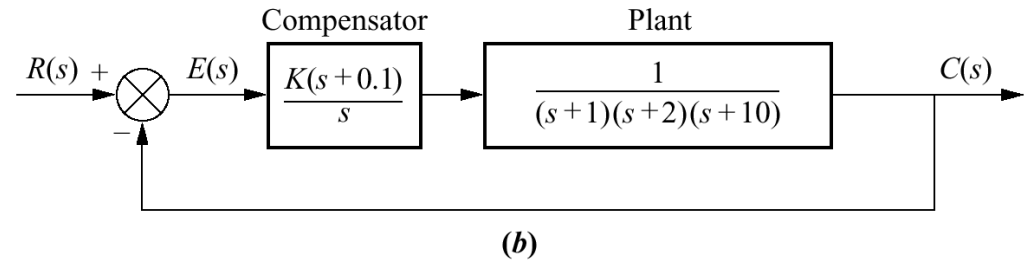
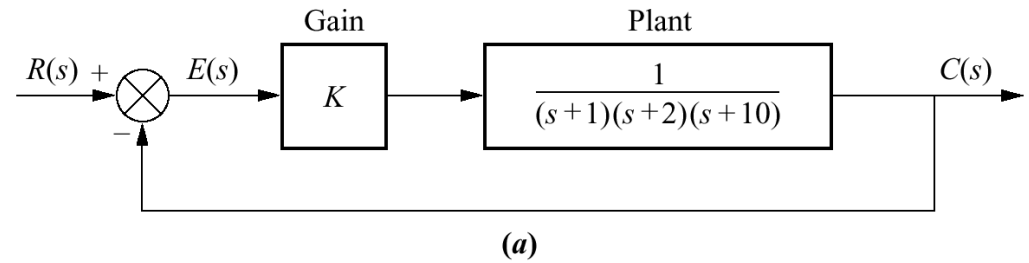
Fig. 9.4

Sistema a malha
fechada do

Exemplo 9.1:

a. antes da compensação.

b. após a compensação
integral ideal

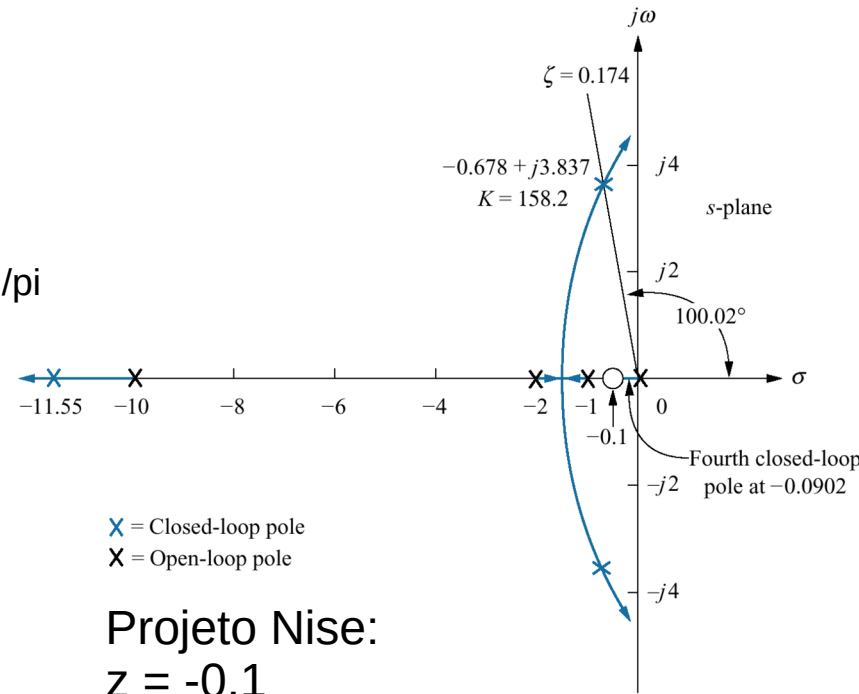


*Se canal I: $\phi_{av} = 180^\circ - \angle G(s)/s_{s0}$

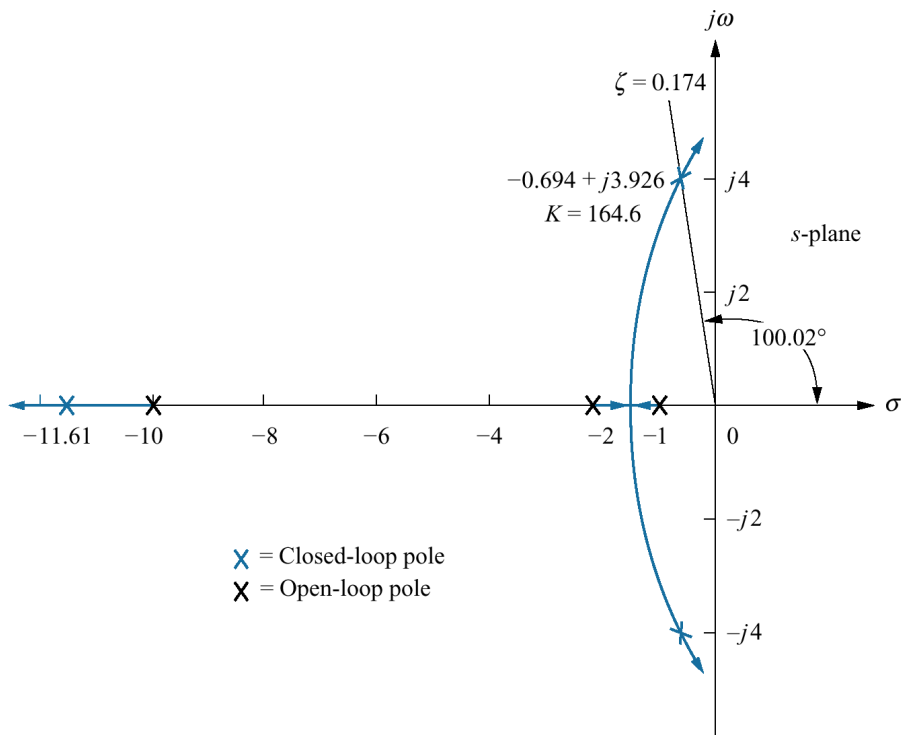
```
>> s=-.694+j*3.926; 180-angle(1/(s*(s+1)*(s+2)*(s+10)))*180/pi
ans = 100.0418
```

Condição $| | \rightarrow K|DG| = 1$

```
>> s=-.678+j*3.837; abs((s*(s+1)*(s+2)*(s+10))/(s+.1))
ans = 158.1846
```



Projeto Nise:
 $z = -0.1$



Projeto Alternativo:
 $z = -0.8$

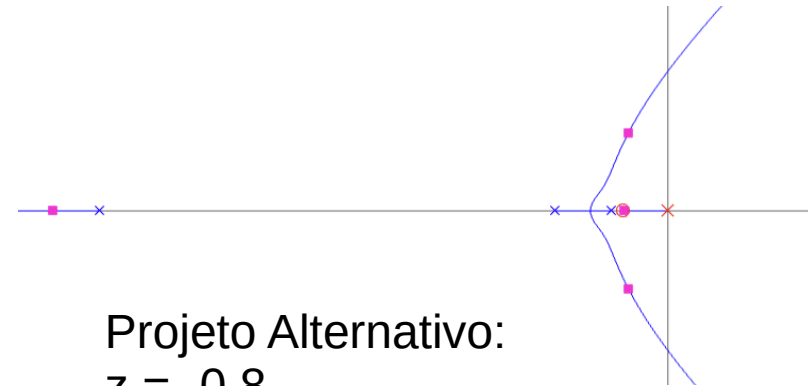
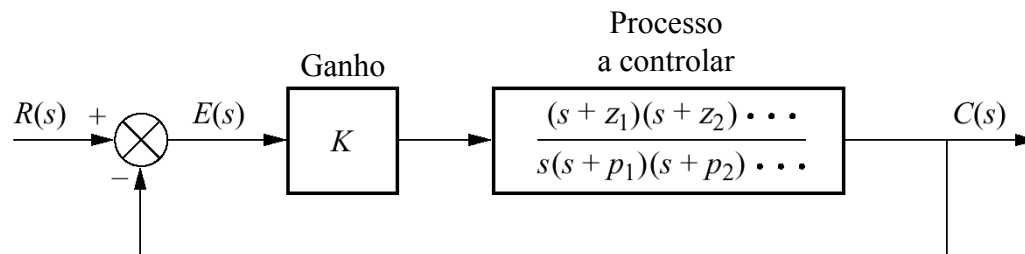


Fig. 9.9

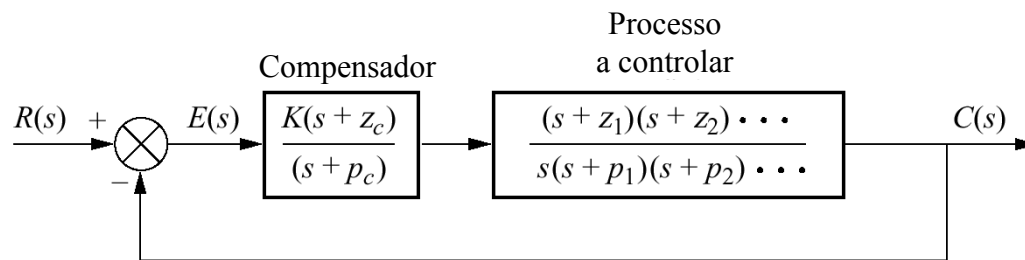
a. Sistema do tipo 1 não-compensado;

b. sistema do tipo 1 compensado;

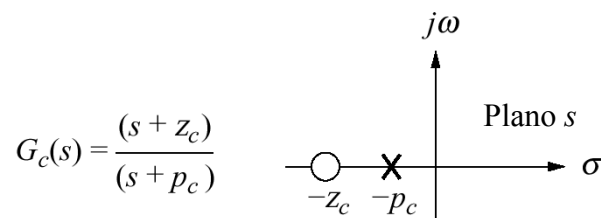
c. diagrama de pólos e zeros do compensador



(a)



(b)



(c)

$$G_c(s) = \frac{(s + z_c)}{(s + p_c)}$$

Fig. 9.10

Lugar das raízes:

- a. antes da compensação por atraso de fase;
- b. depois da compensação por atraso de fase

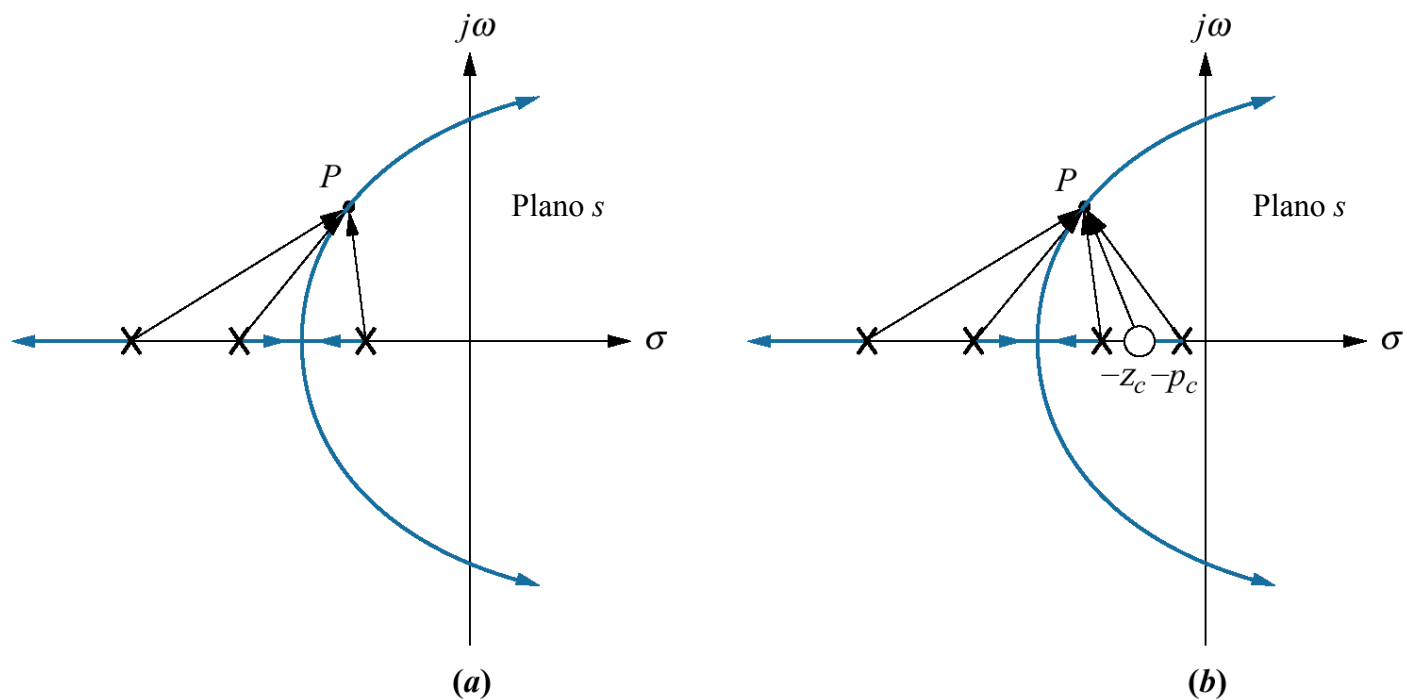


Fig. 9.11

Sistema compensado do Exemplo 9.2

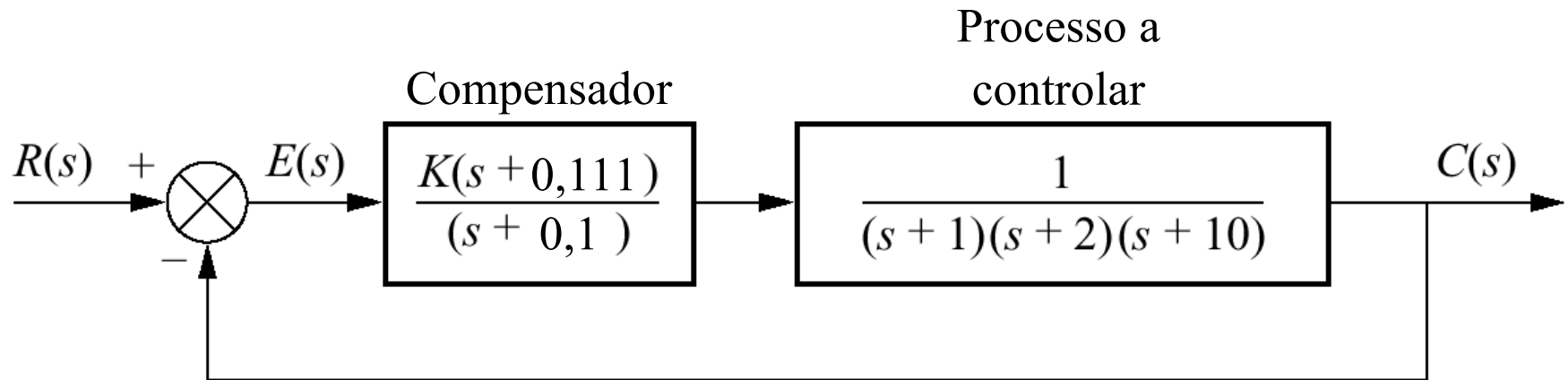


Fig. 9.14

Respostas ao degrau do sistema do Exemplo 9.2 usando diferentes compensadores por atraso de fase

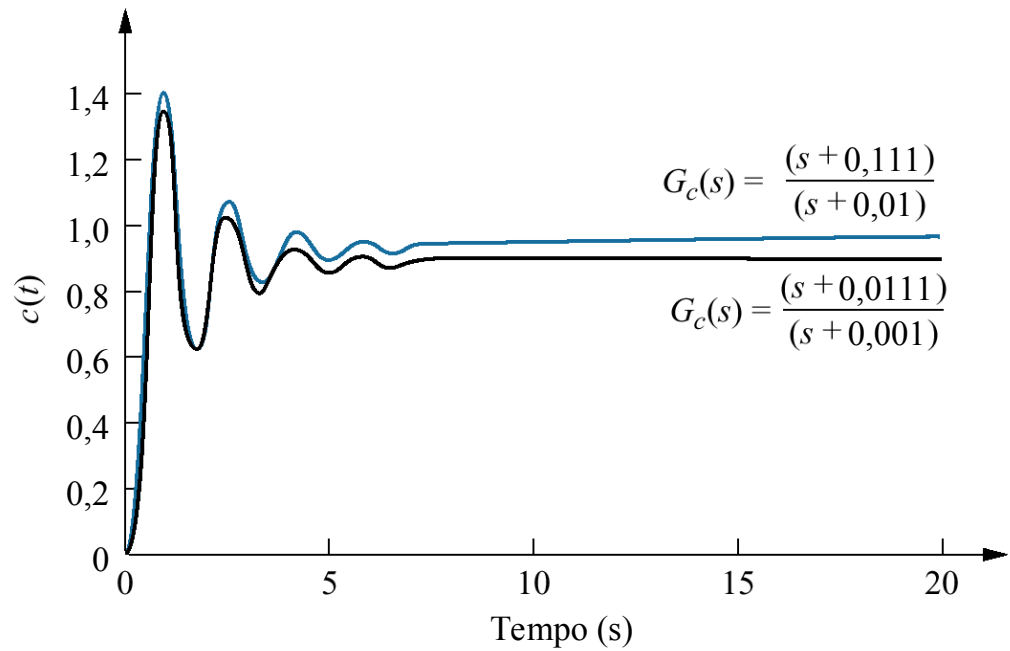
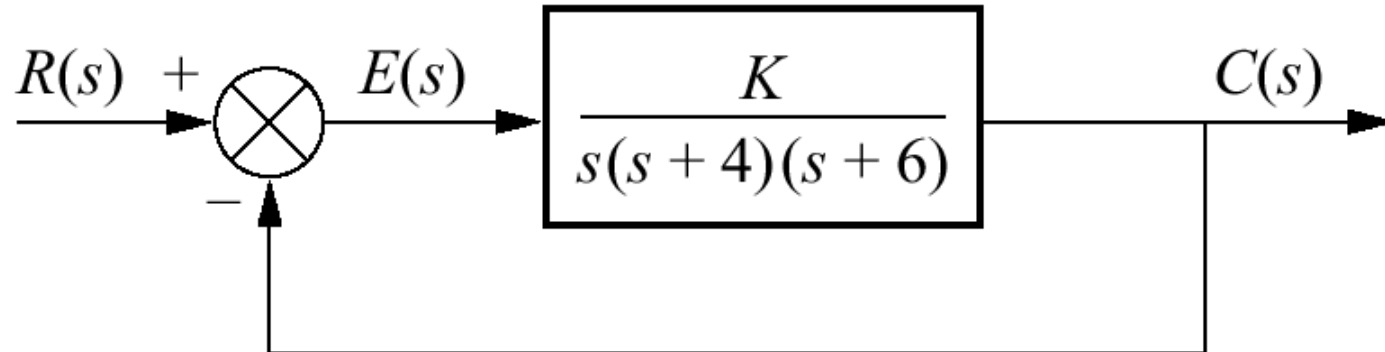


Fig. 9.17

Sistema de controle com retroação
para o Exemplo 9.3



Projeto LGR Nise típico:

- 1- K no LGR original $\rightarrow \zeta$ desejado (A)
- 2- polo dominante em Malha Fechada, s_0 , (B) $\rightarrow$ mantendo ζ

Fig. 9.19

Pólos dominantes do sistema compensado superpostos ao lugar das raízes do sistema não-compensado do Exemplo 9.3

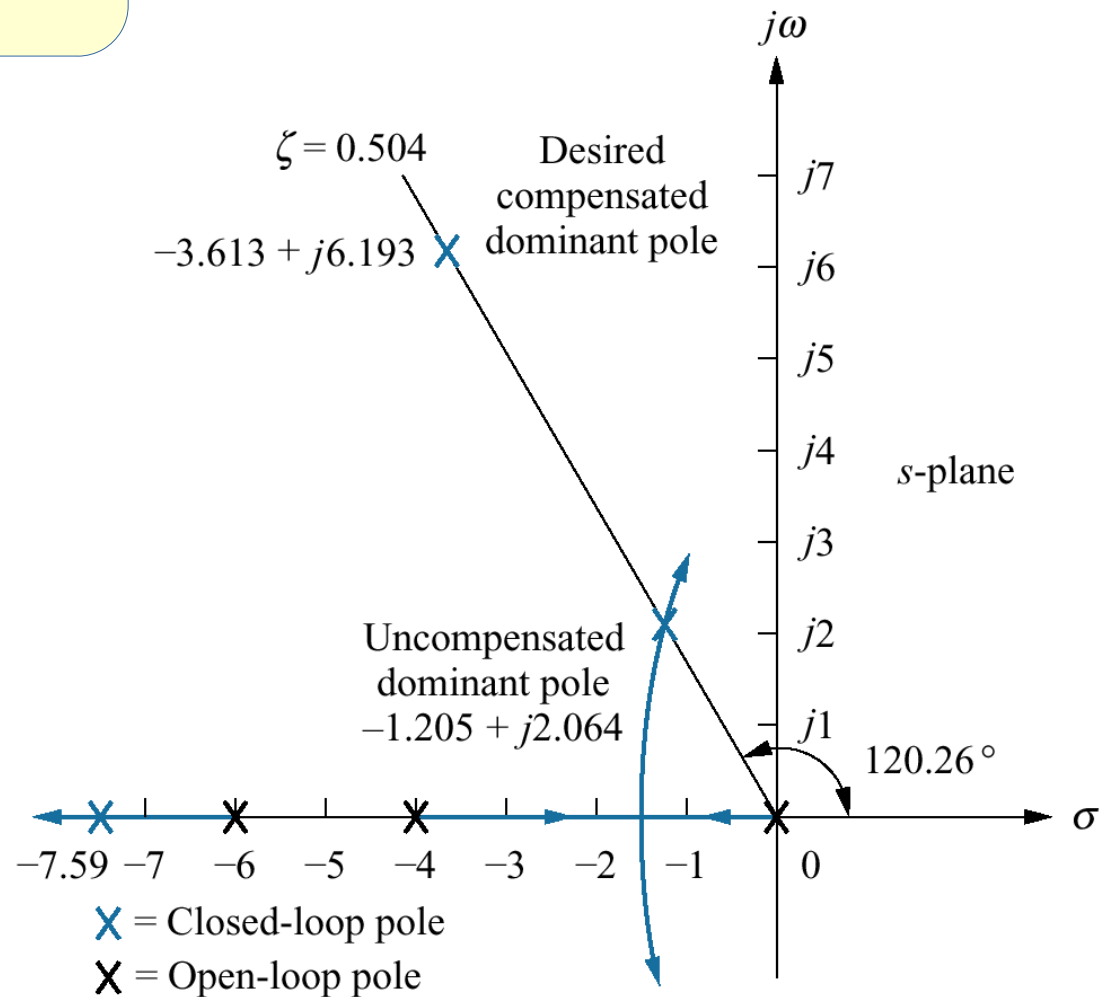


Fig. 9.23
Controlador PD

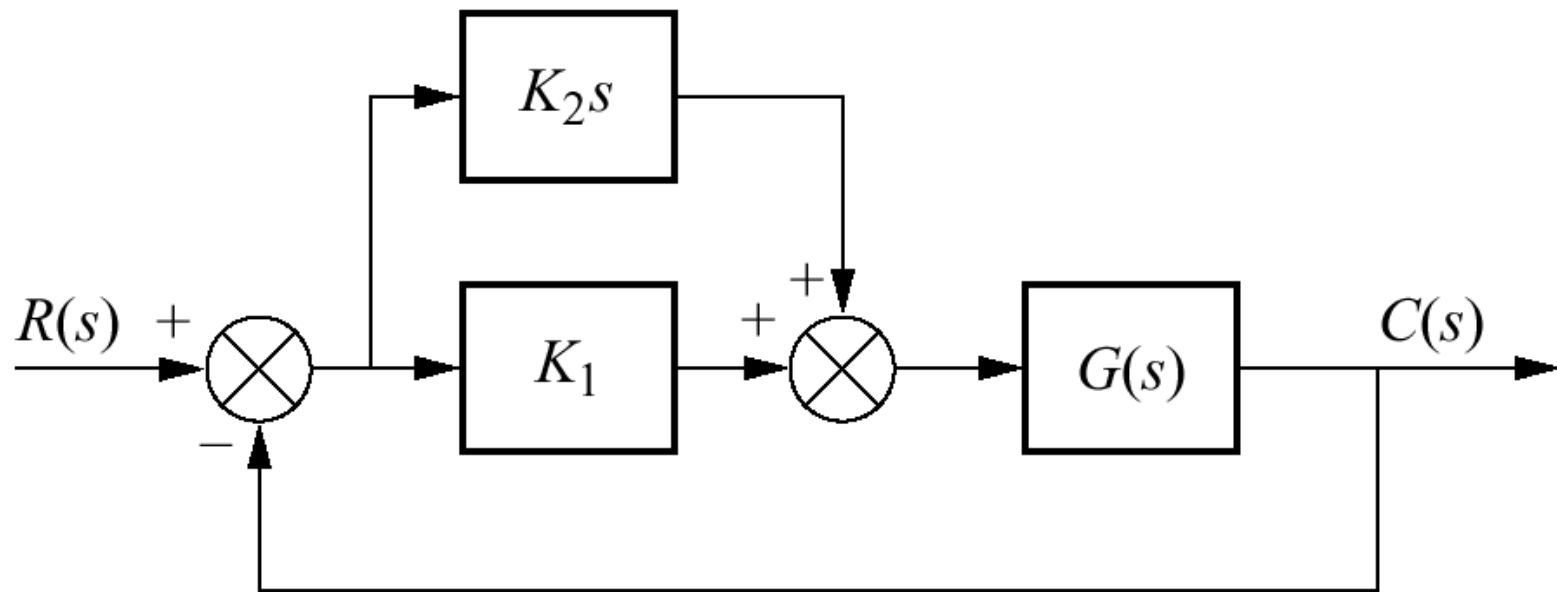


Fig. 9.20

Calculando a localização do zero do compensador para o Exemplo 9.3

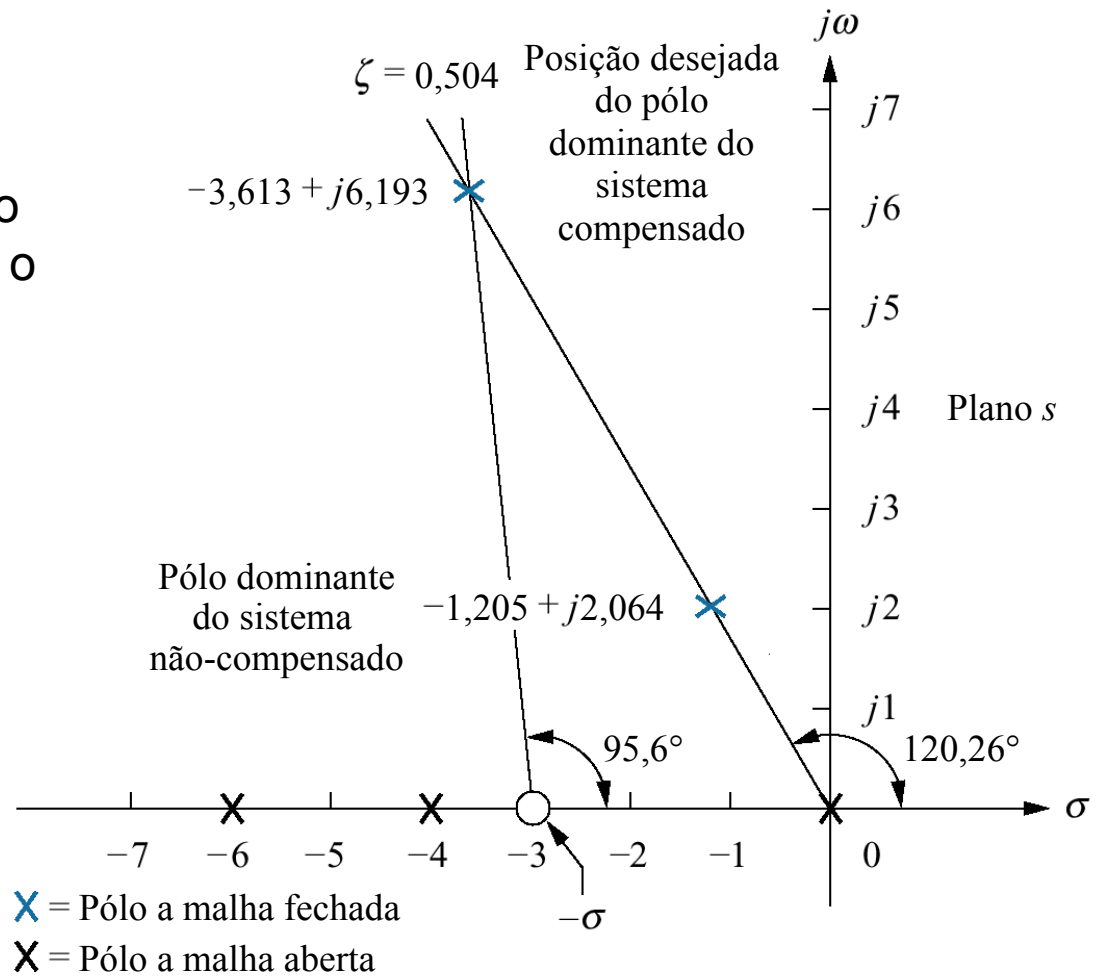


Fig. 9.21
Lugar das raízes do
sistema não-compensado
do Exemplo 9.3

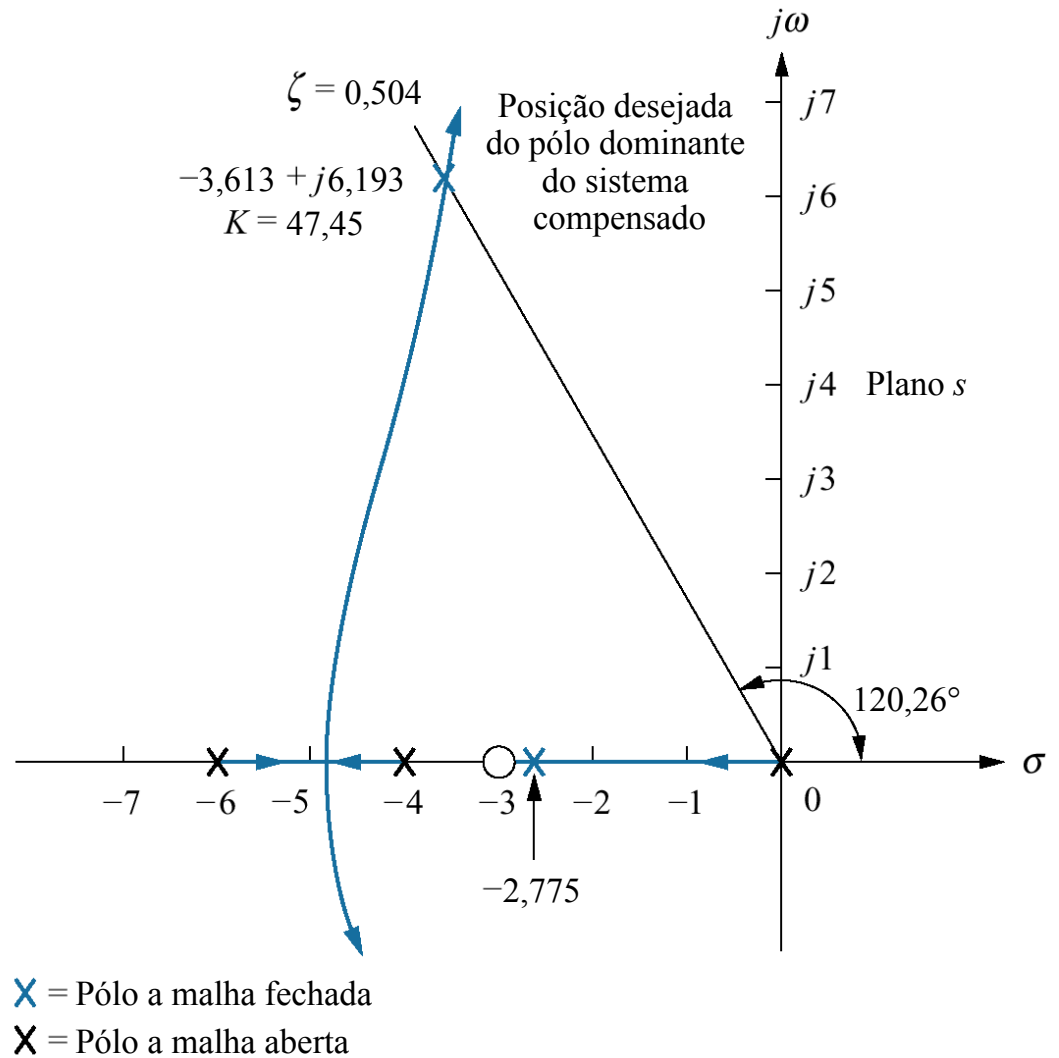


Fig. 9.22

Respostas ao degrau do sistema não-compensado e do sistema compensado do Exemplo 9.3

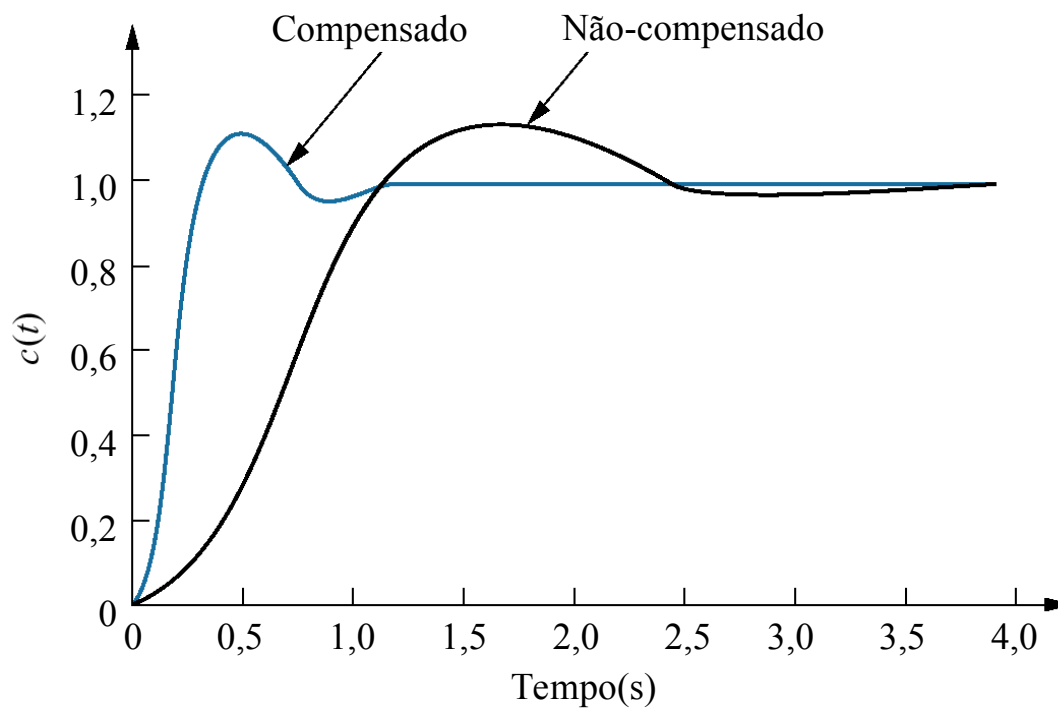


Fig. 9.24

Geometria da compensação por avanço de fase

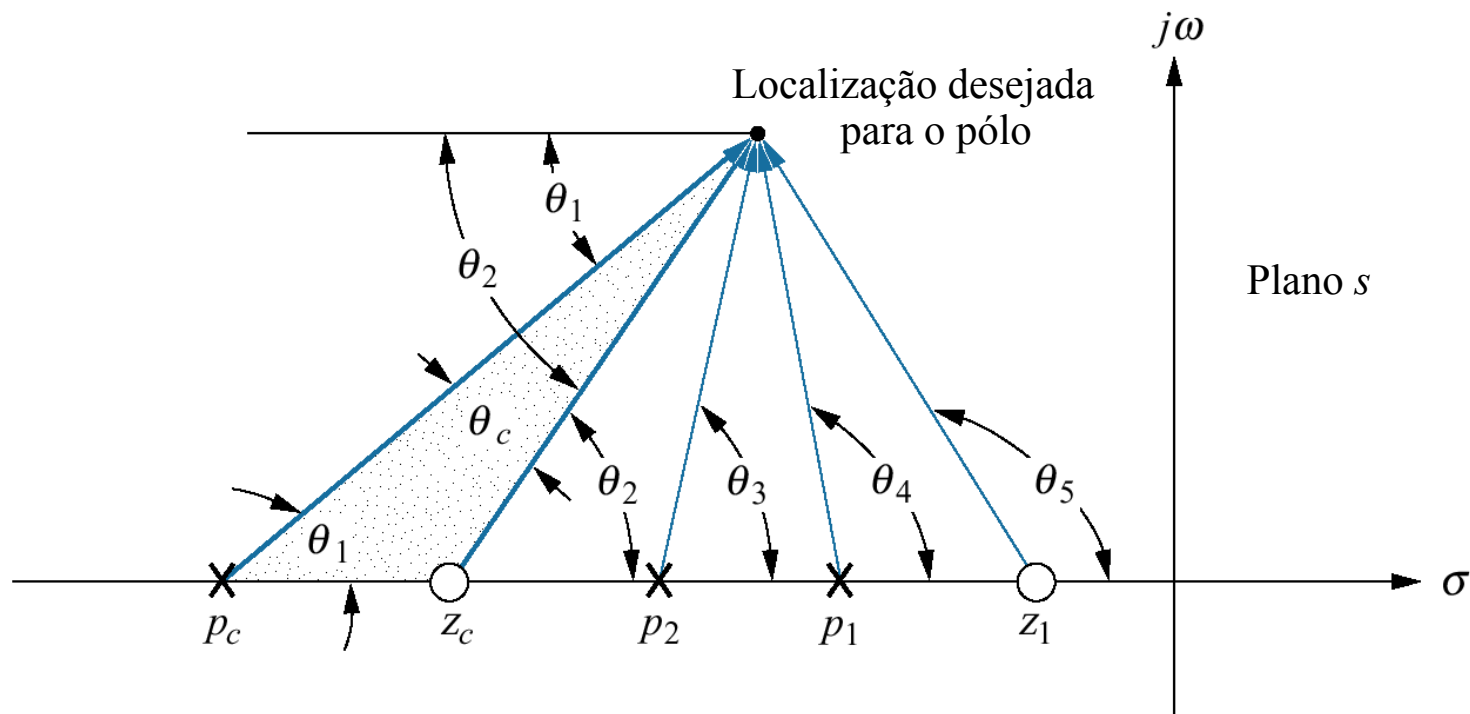


Fig. 9.25

Três dentre uma infinidade de possíveis soluções de compensador por avanço de fase

Figure 9.25

Three of the infinite possible lead compensator solutions

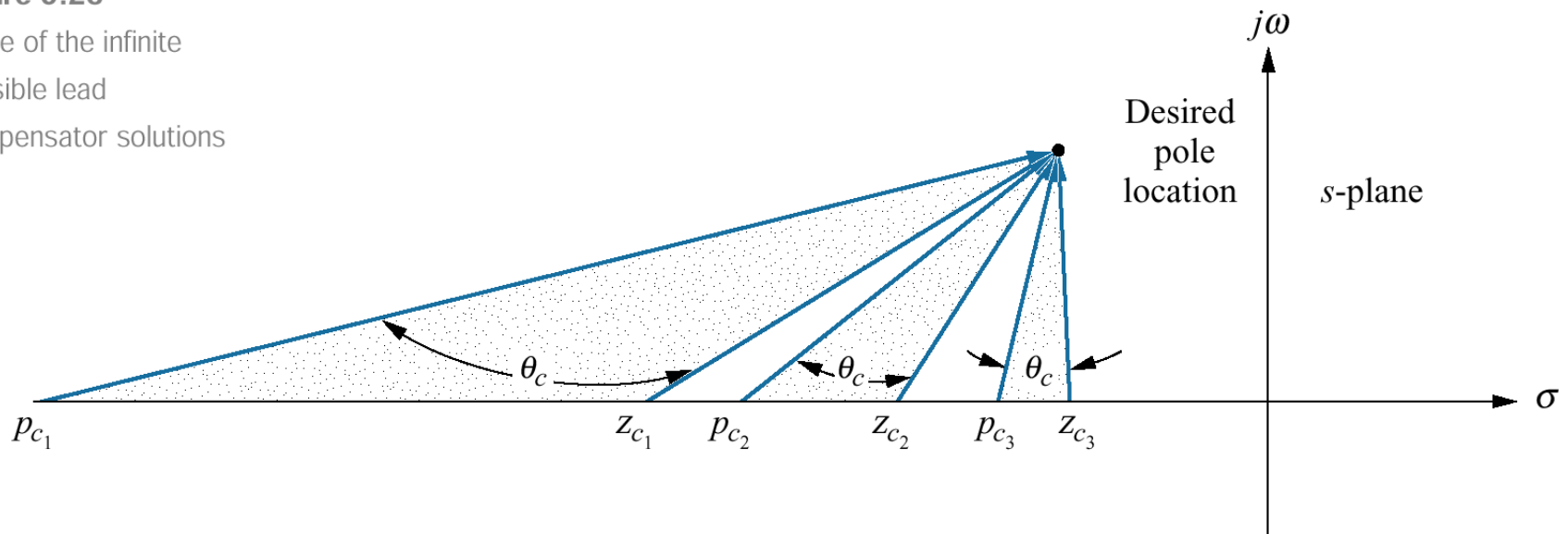


Fig. 9.26

Projeto de compensador de avanço de fase, mostrando o cálculo de pólos dominantes compensados e não-compensados para o Exemplo 9.4

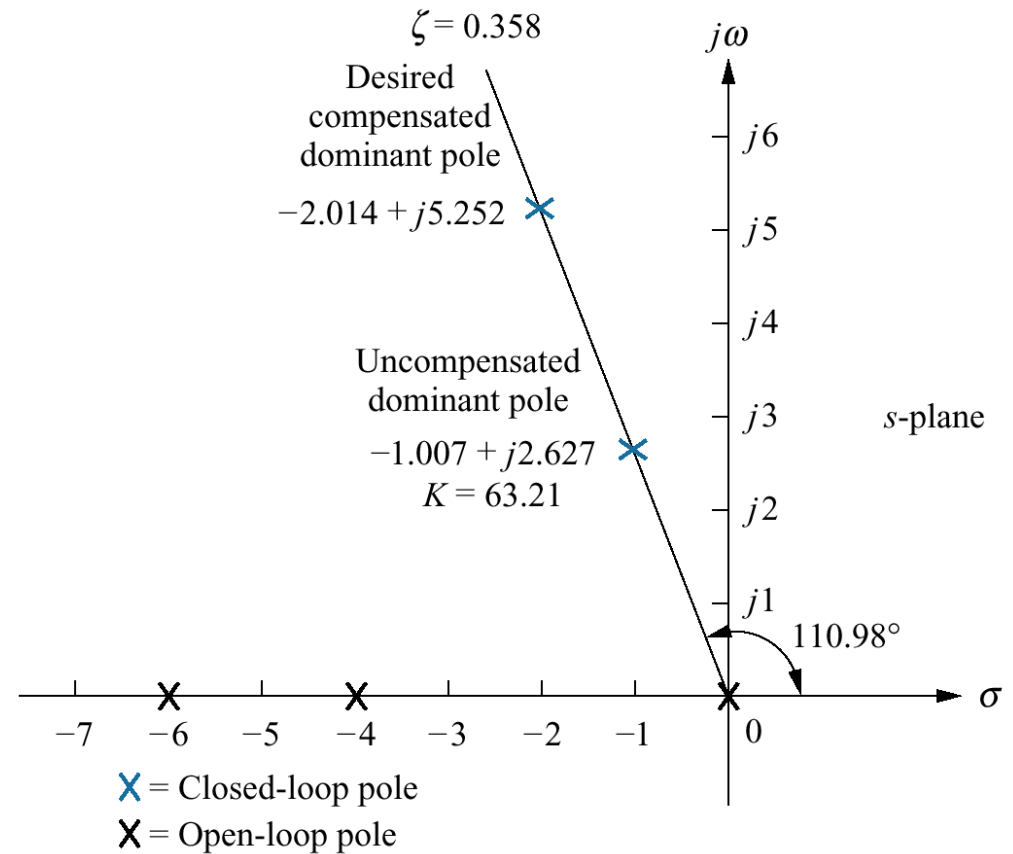
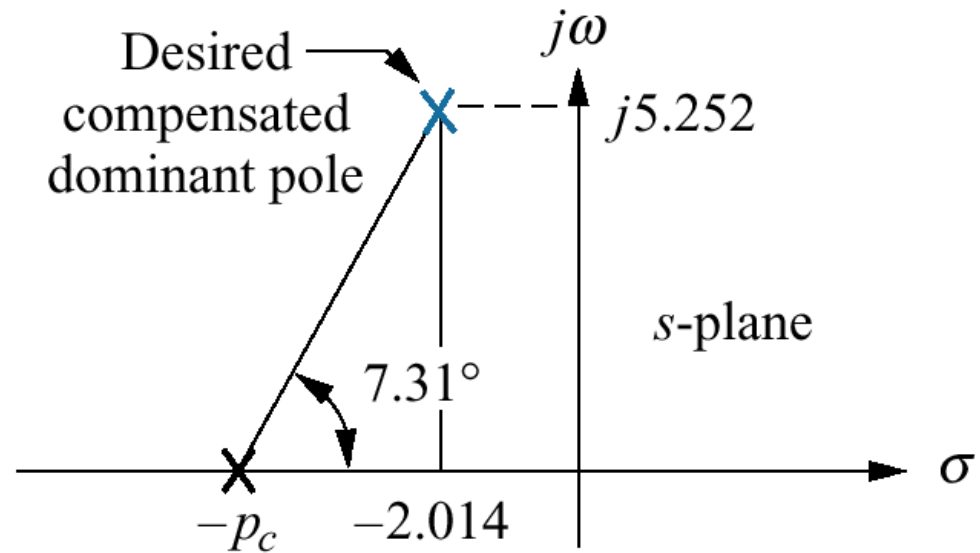


Fig. 9.27

Diagrama no Plano s usado para calcular a localização do pólo do compensador para o Exemplo 9.4



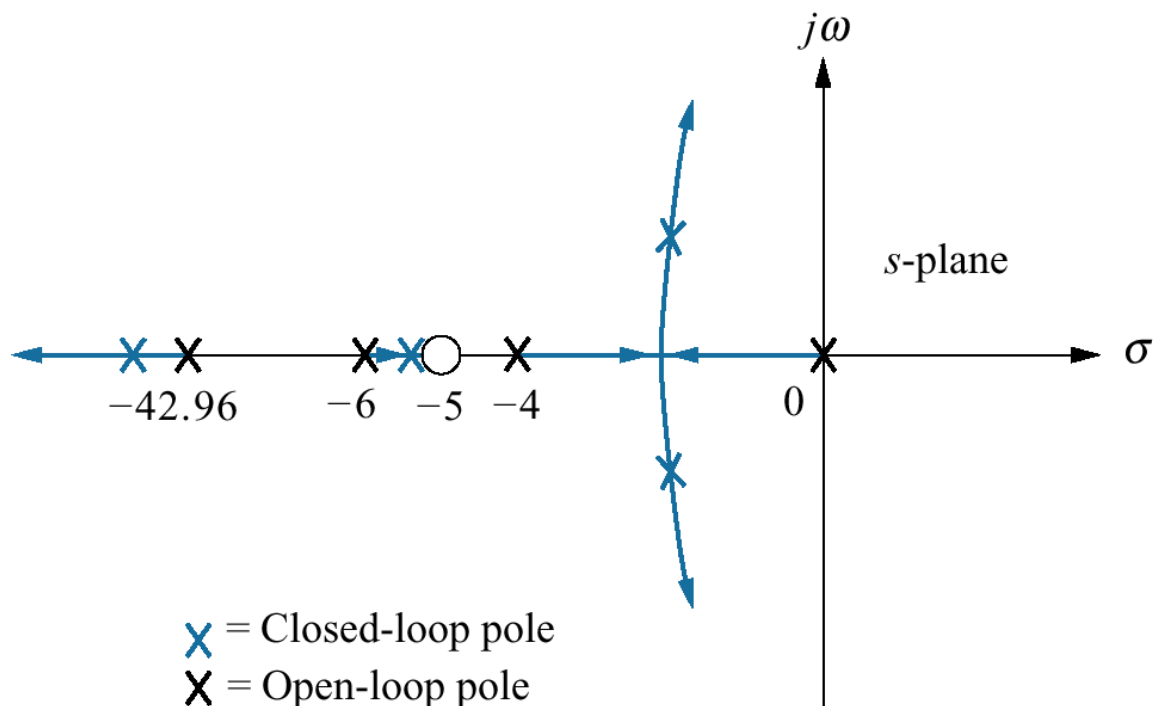
X = Closed-loop pole

X = Open-loop pole

Note: This figure is not drawn to scale.

Fig. 9.28

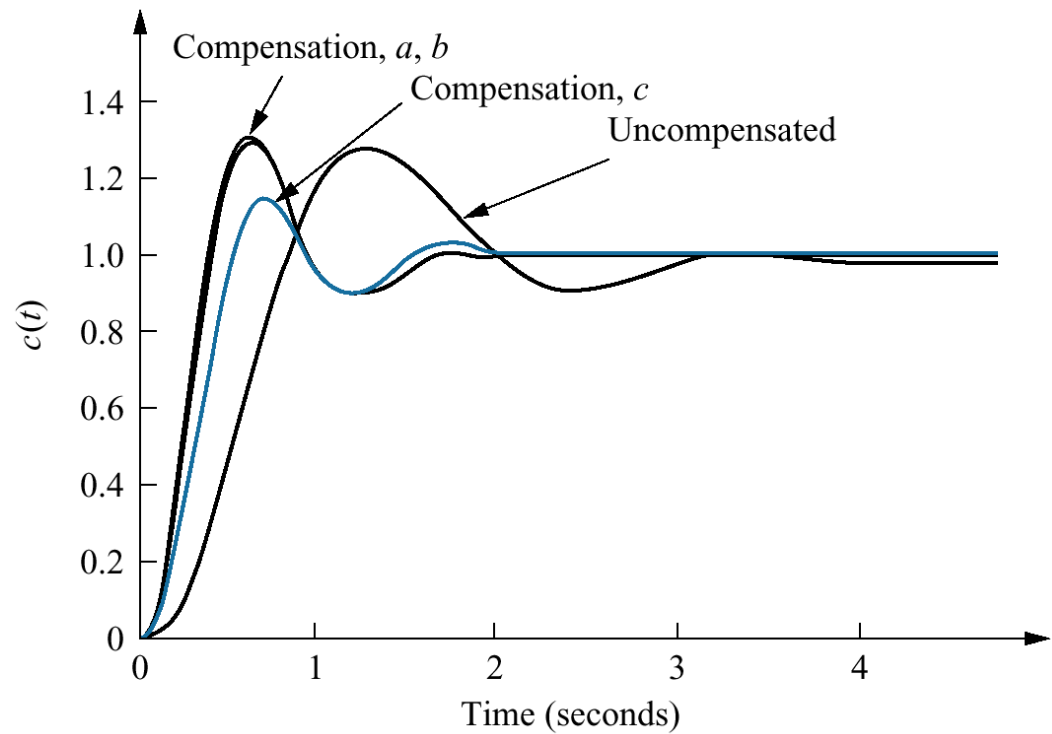
Lugar das raízes do sistema compensado



Note: This figure is not drawn to scale.

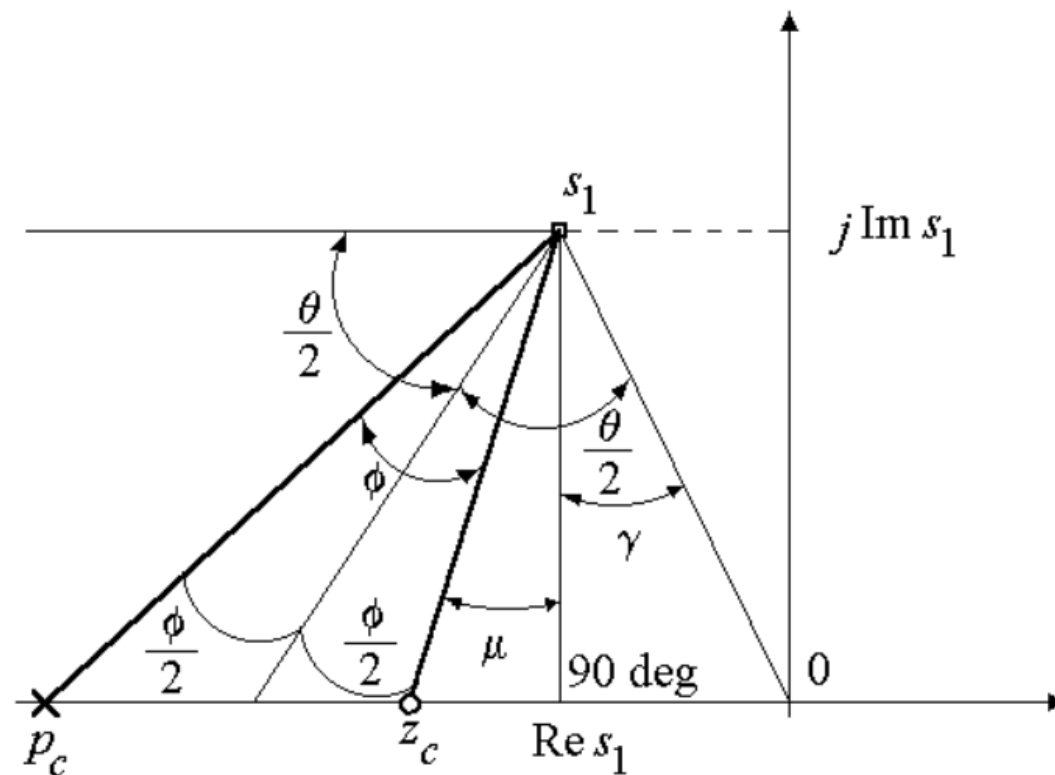
Fig. 9.29

Respostas dos sistemas não-compensado e com compensação por avanço de fase para o Exemplo 9.4



Controlador em Avanço

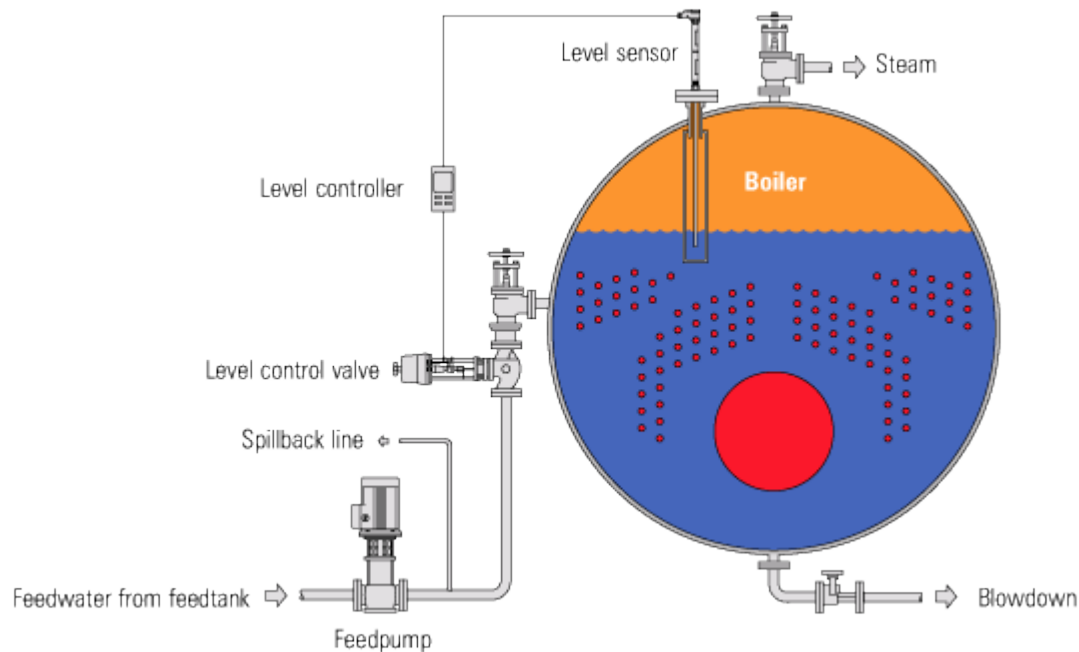
– Método da Bissetriz



Bom compromisso entre
ganho DC e realização

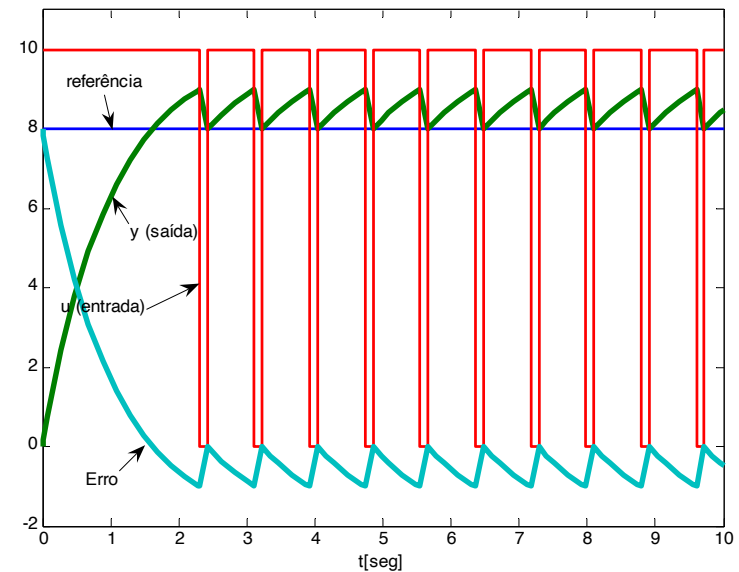
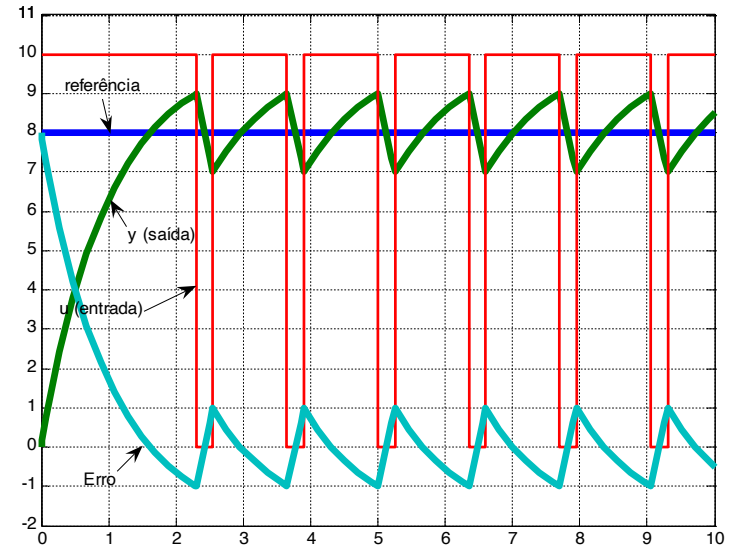
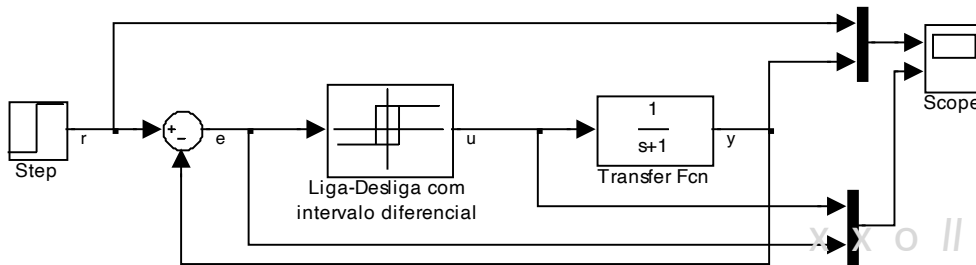
e.g. Q3 rP2CSD223

Sistema de Nível de Líquidos



Controle Liga-desliga com sensor capacitivo

Controle Liga-Desliga



Liga-desliga

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

Liga-desliga
Com intervalo
diferencial

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{para } e(t) > \lambda_1 \\ U_2, & \text{para } e(t) < \lambda_2 \end{cases}$$

Fig. 9.30
Controlador PID

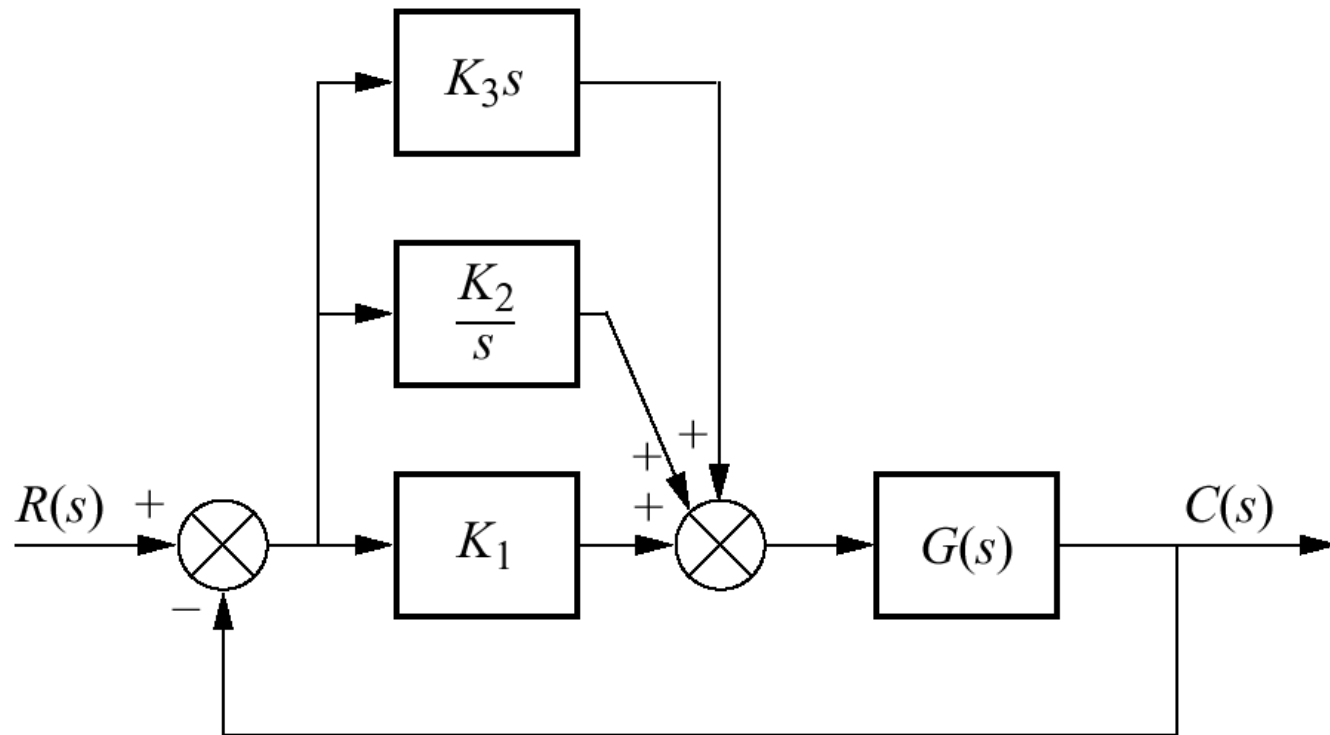


Fig. 9.31

Sistema de controle com retroação não-compensado para o Exemplo 9.5

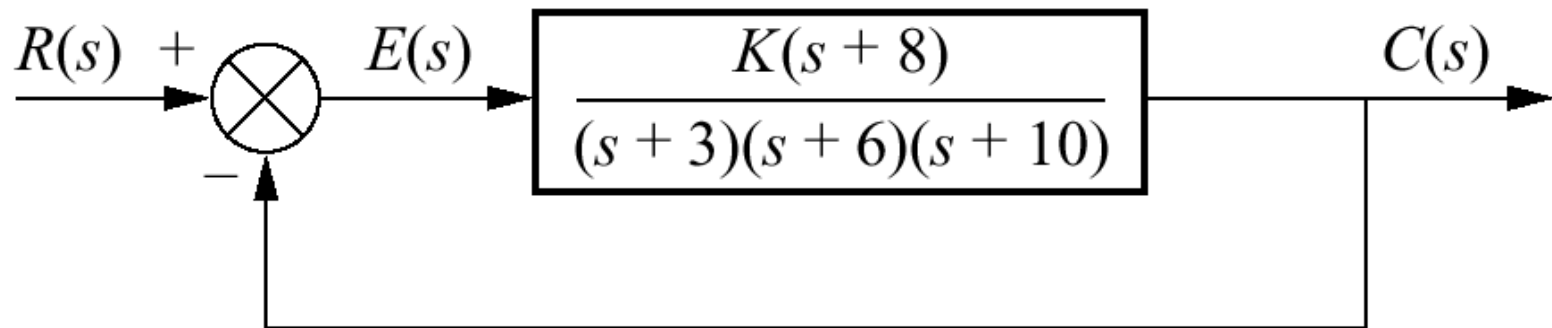


Fig. 9.32

Lugar das raízes para o sistema não-compensado do Exemplo 9.5

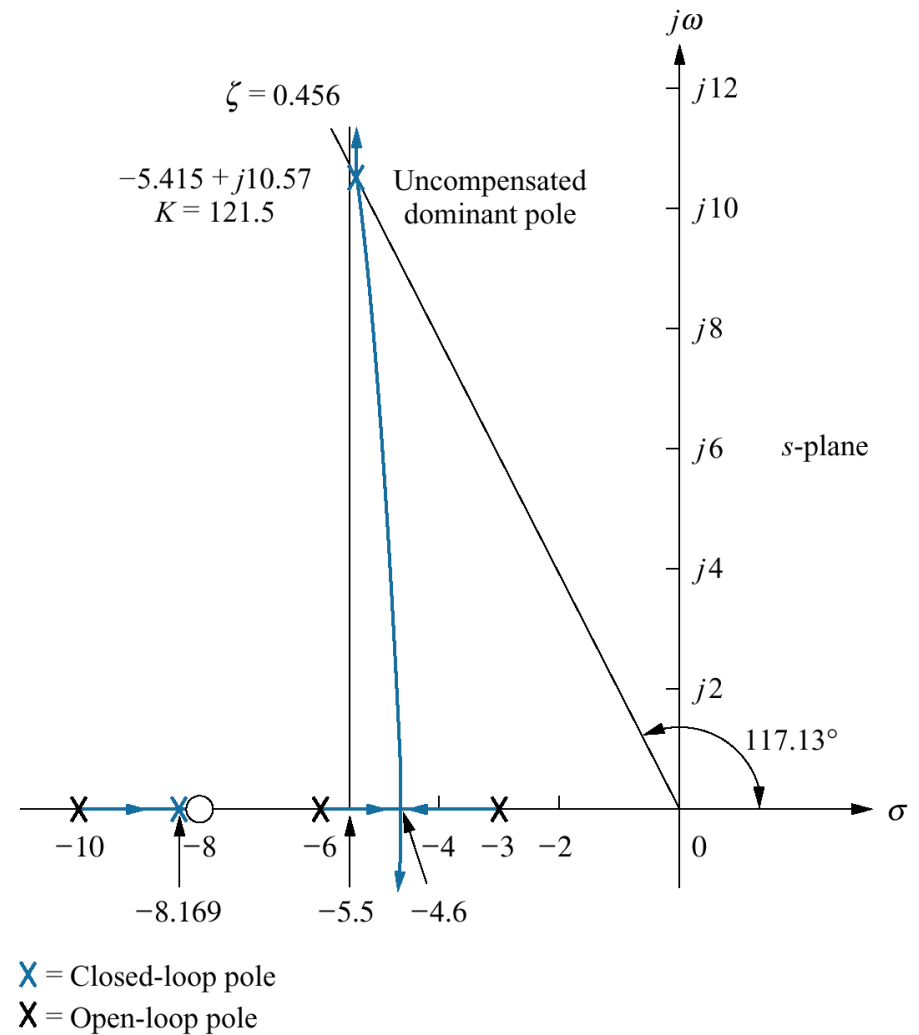
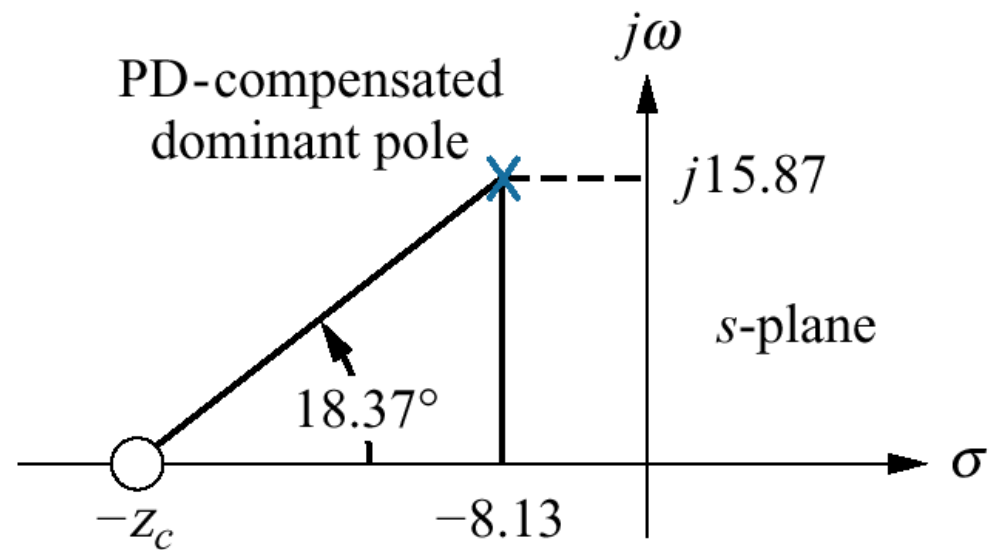


Fig. 9.33

Calculando o zero do
compensador PD para o
Exemplo 9.5

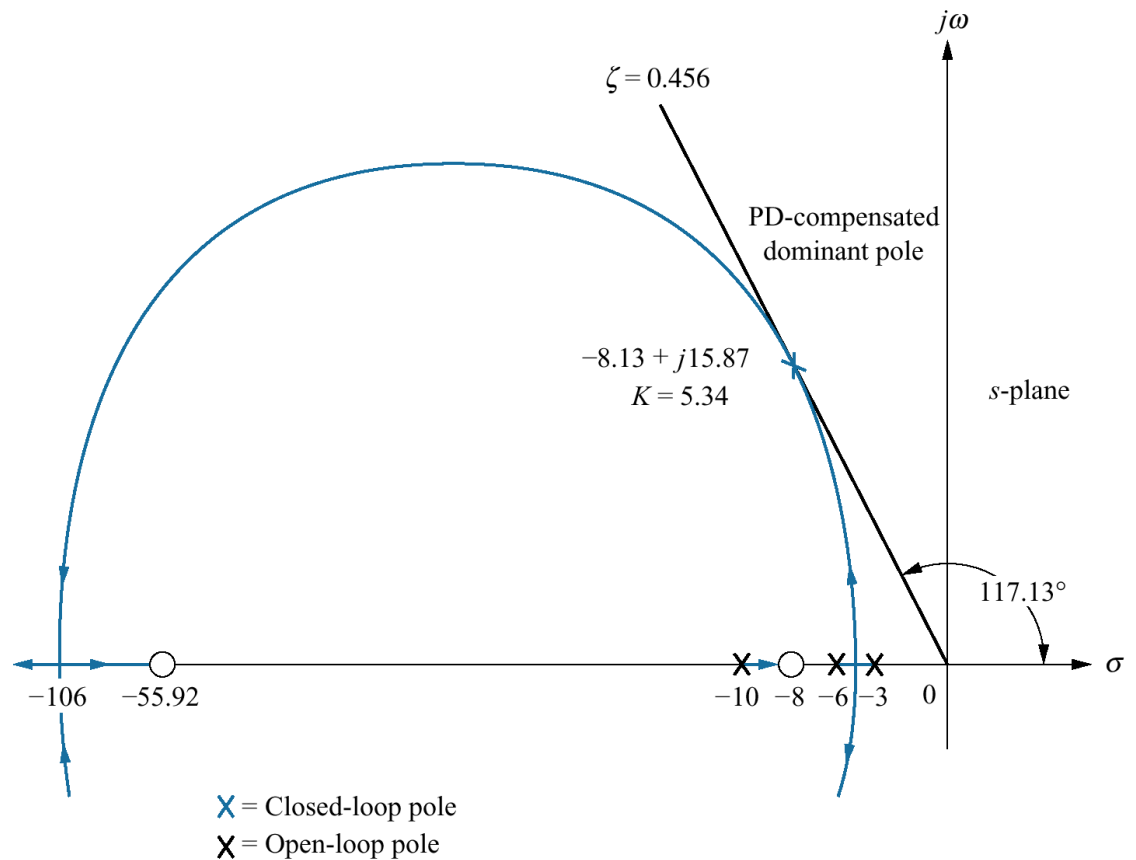


X = Closed-loop pole

Note: This figure is not drawn to scale.

Fig. 9.34

Lugar das raízes para o sistema compensado PD
do Exemplo 9.5



Note: This figure is not drawn to scale.

Fig. 9.35

Respostas ao degrau para sistemas não-compensado, compensado com PD e compensado com PID do Exemplo 9.5

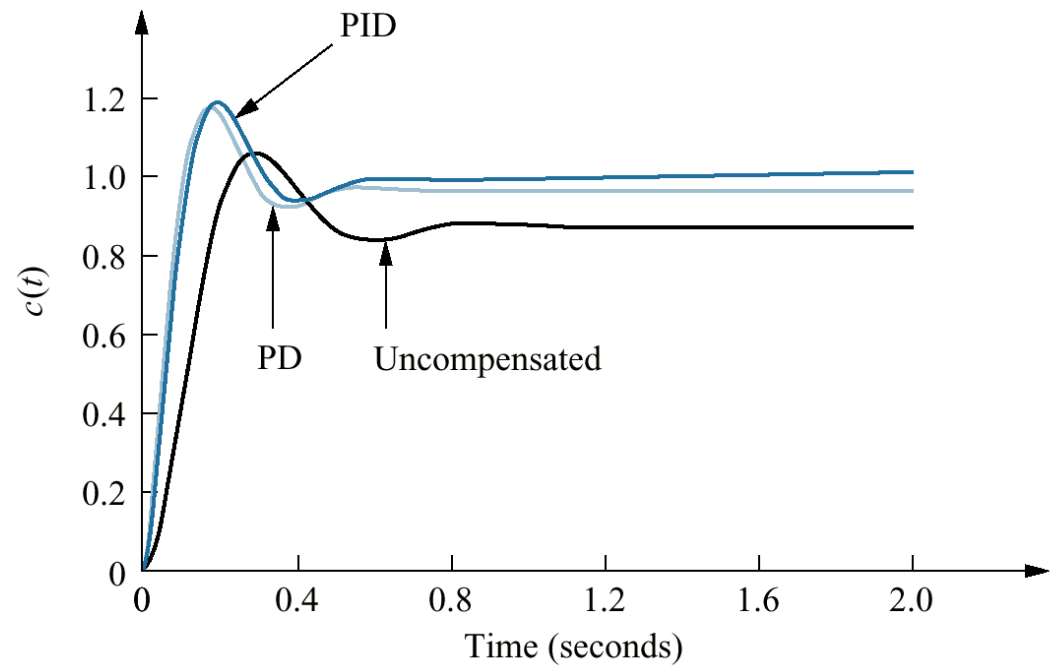
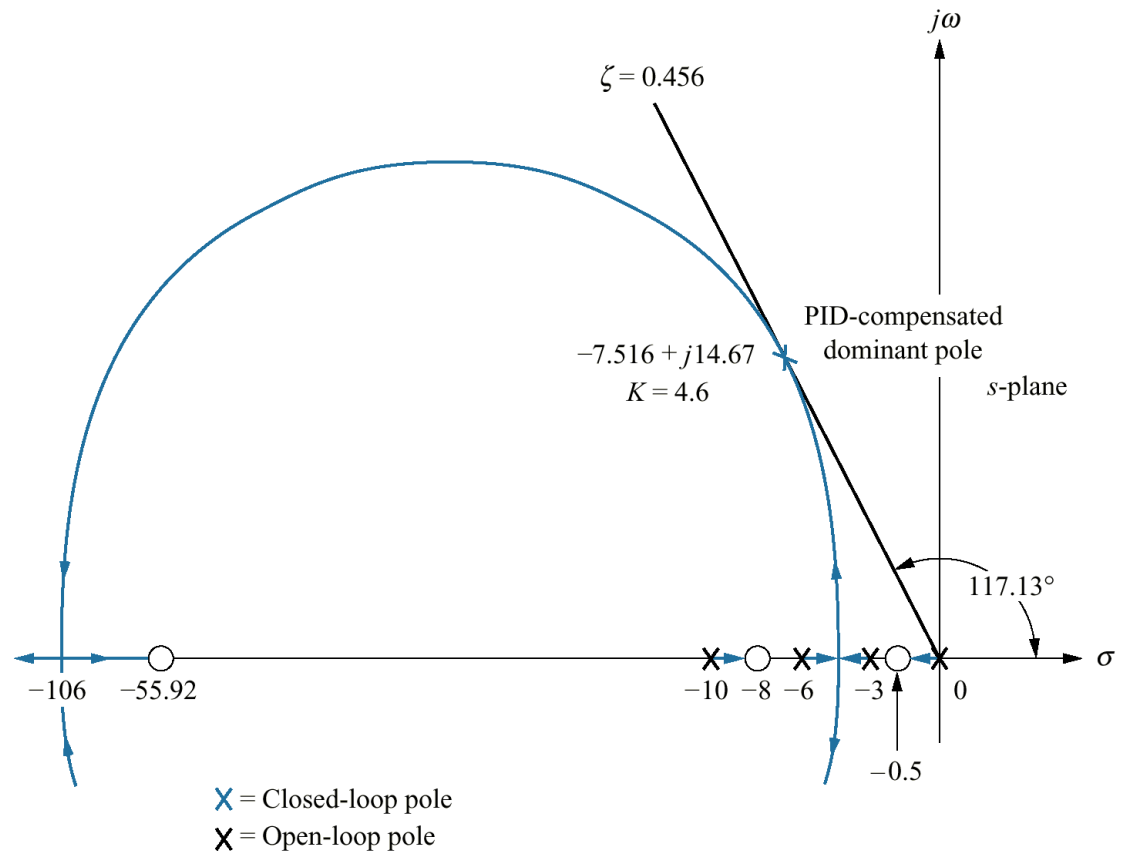


Fig. 9.36

Lugar das raízes para
sistema compensado com
PID do Exemplo 9.5



Note: This figure is not drawn to scale.

Projeto - Controlador PID

$$D(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K(s + z_1)(s + z_2)}{s}$$

PROJETO → escolha de três parâmetros

Método Nise : 1) projeto PD ($K(s + z_1)$) → p / transitório

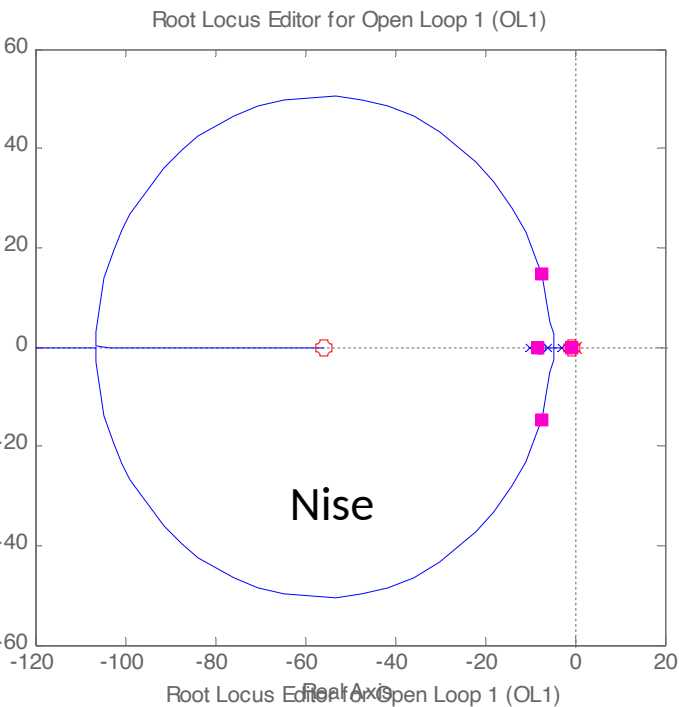
2) projeto PI ($(s + z_2)/s$) → p / e_{ss}

Alternativa 2 : zero duplo

Alternativa 3 : cancelar pólo lento

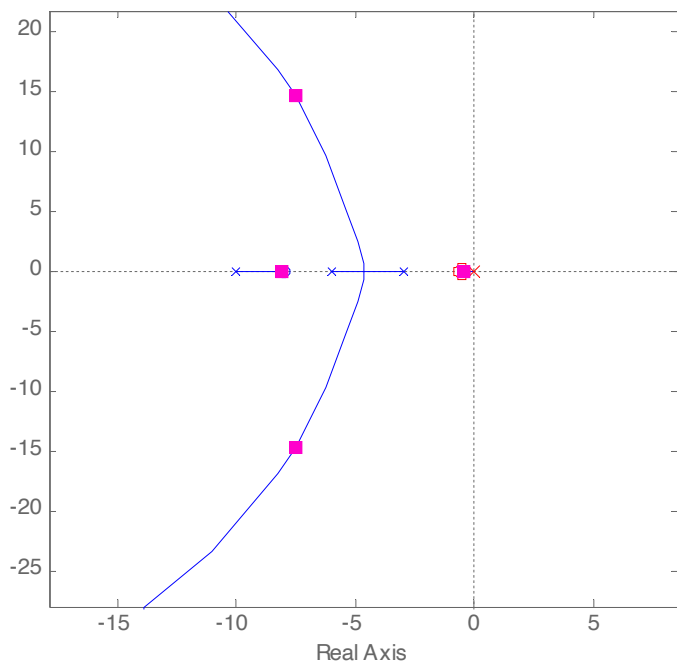
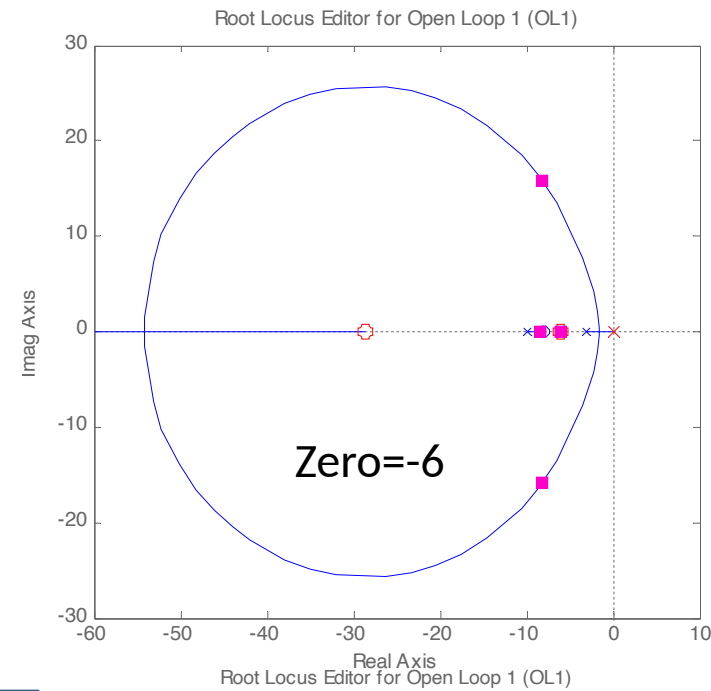
Alternativa 4 : cancelar 2º pólo mais lento (traz LGR p / esq.)

Obs : Versão "Realizável" $D_r(s) = \frac{K(s + z_1)(s + z_2)}{s(s + p)}$



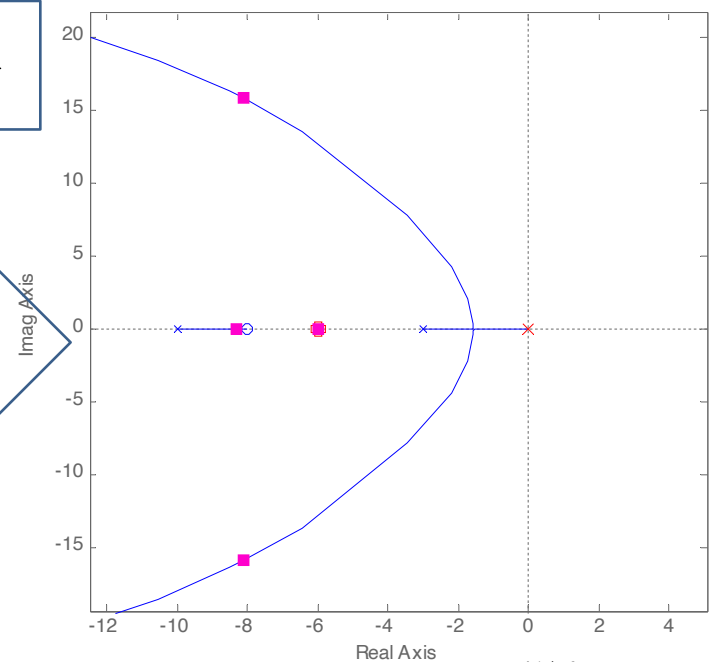
PID

$$G(s) = \frac{(s+8)}{(s+3)(s+6)(s+10)}$$

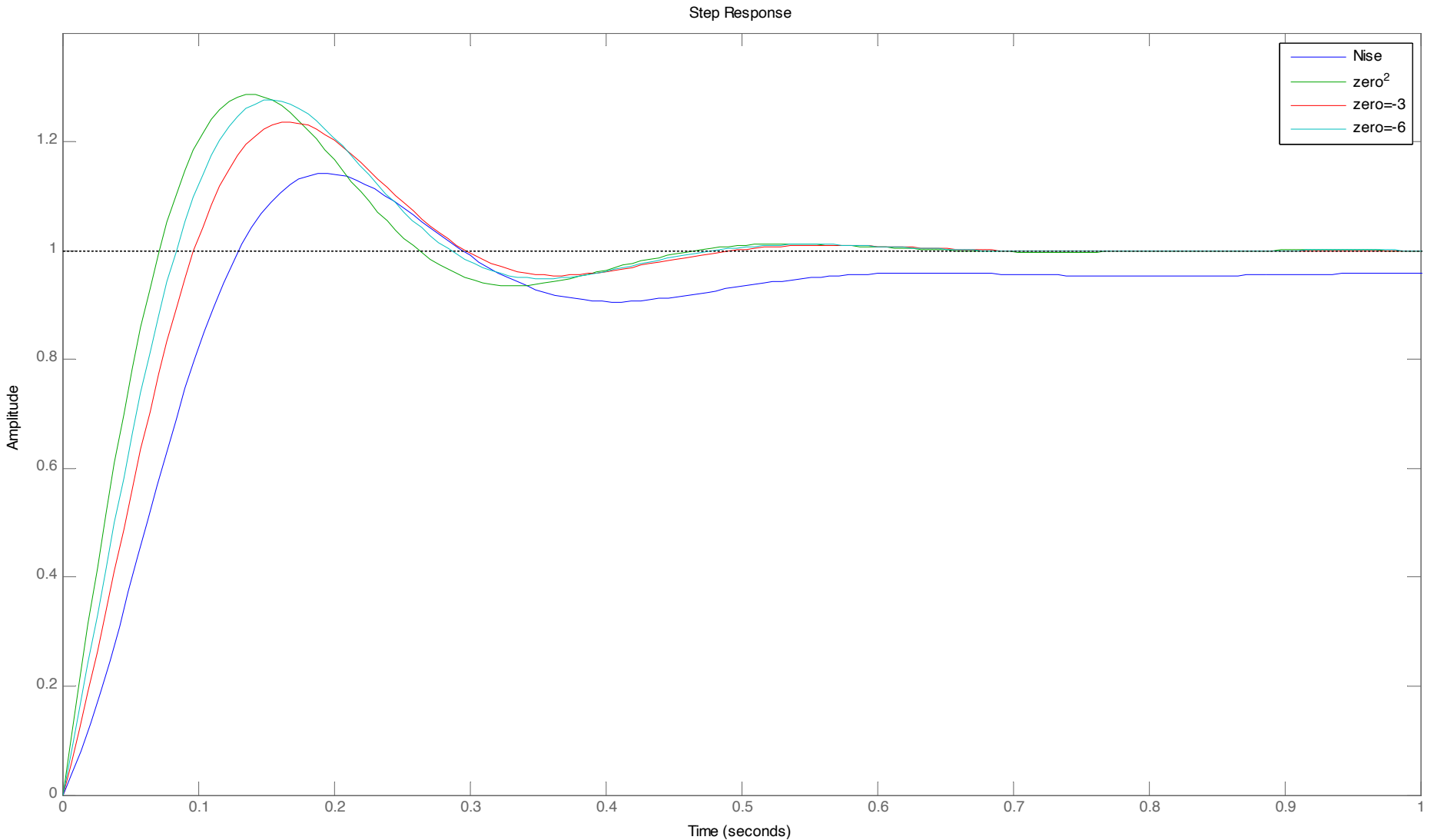


$$D_N(s) = \frac{4,6(s+55.92)(s+0,5)}{s}$$

$$D_{-6}(s) = \frac{11,6(s+6)(s+28,55)}{s}$$

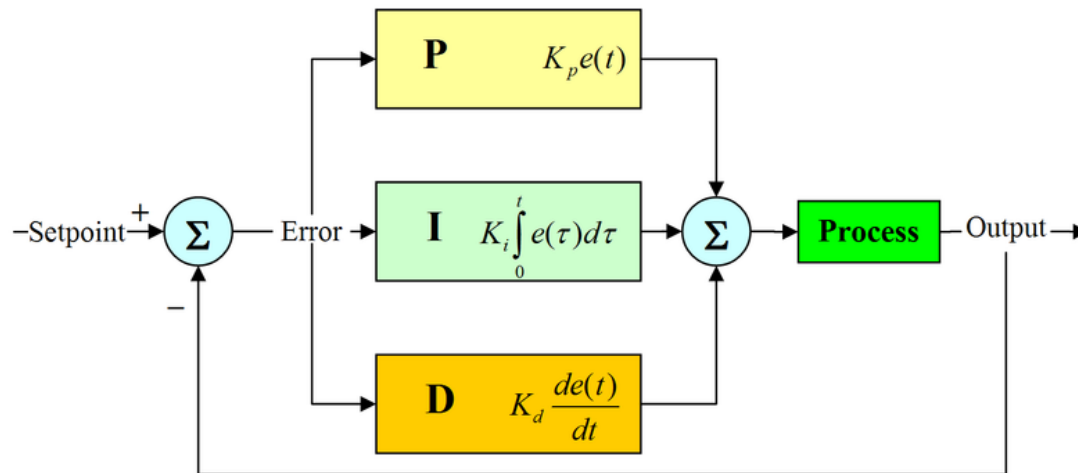


Alternativas de Projeto - PID



Sintonia PID – Técnicas Herísticas

- Manual (operador experiente)
- Ziegler-Nichols (1942)
- Vários outros métodos ...



Sintonia PID – Técnicas Herísticas

- Sintonia Manual



operador experiente

Effects of *increasing* a parameter independently

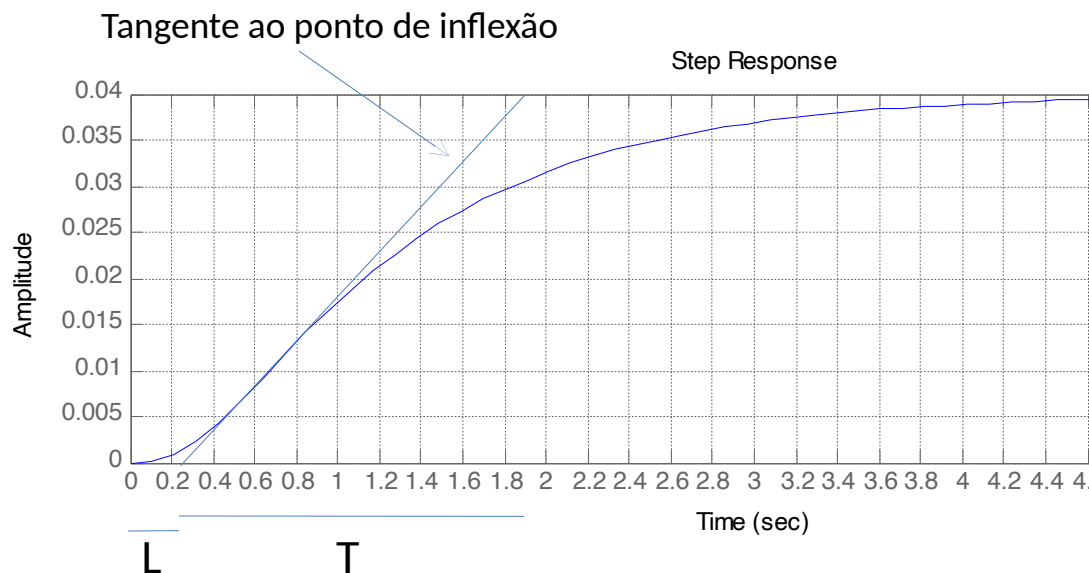
Parameter	Rise time	Overshoot	Settling time	Steady-state error	Stability ^[3]
K_p	Decrease	Increase	Small change	Decrease	Degrade
K_i	Decrease ^[4]	Increase	Increase	Decrease significantly	Degrade
K_d	Minor decrease	Minor decrease	Minor decrease	No effect in theory	Improve if K_d small

en.wikipedia.org

1º Método de Ziegler-Nichols

- O procedimento empírico proposto por Ziegler-Nichols visa, sem um modelamento sofisticado, sintonizar controladores PID para obter uma ultrapassagem percentual, em malha fechada, de aproximadamente 25%.

$$T(s) \approx \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$



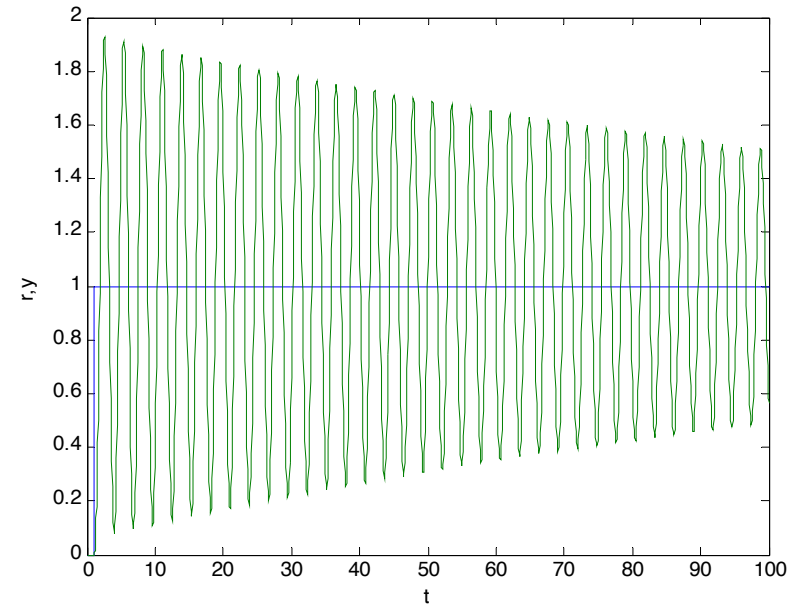
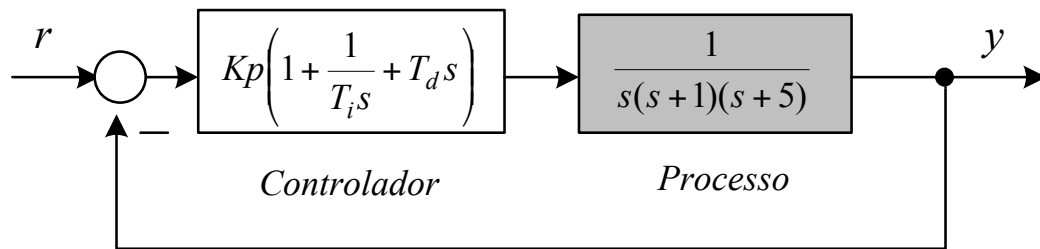
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Controlador PID na forma padrão ISA
- International Society of Automation, www.isa.org

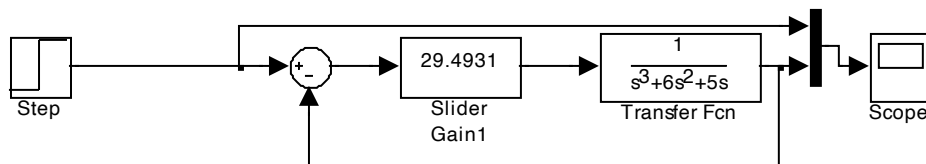
	K_p	T_i	T_d
P	T/L		
PI	$0,9 T/L$	$L/0,3$	
PID	$1,2 T/L$	$2L$	$0,5L$

2º Método de Ziegler-Nichols

- Resposta ao degrau em MA divergente

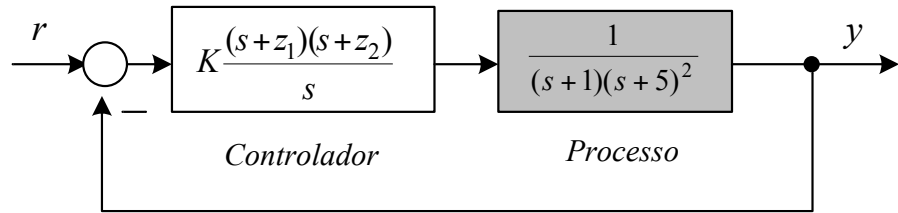


Experimento para encontrar K_{cr} e P_{cr}



	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$		
PI	$0,45K_{cr}$	$P_{cr} / 1,2$	
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

Ex. ZN 1º Método

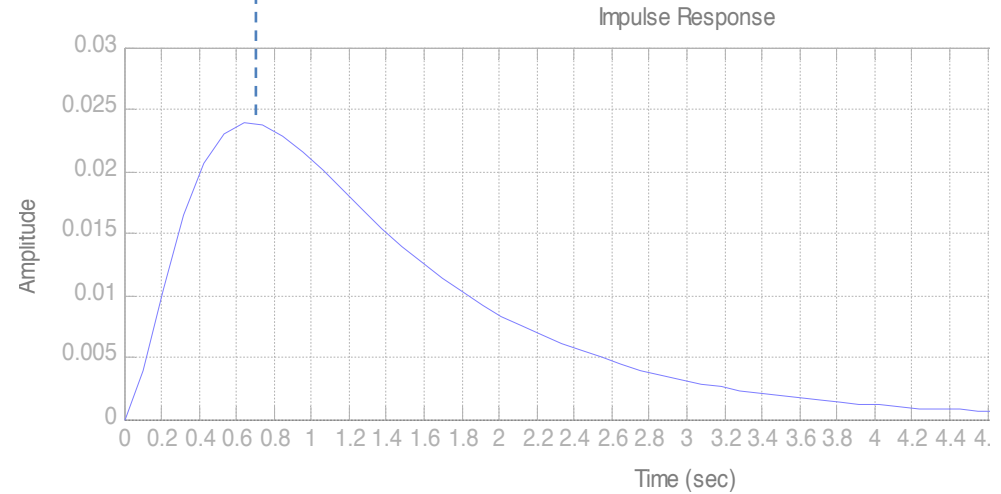


Da resposta ao impulso
o ponto de inflexão acontece em $t = 0,7 \text{ s}$.

Da resposta ao degrau:

$$L = 0,25 \text{ s}, T = 1,95 - 0,25 = 1,7 \text{ s} \rightarrow$$

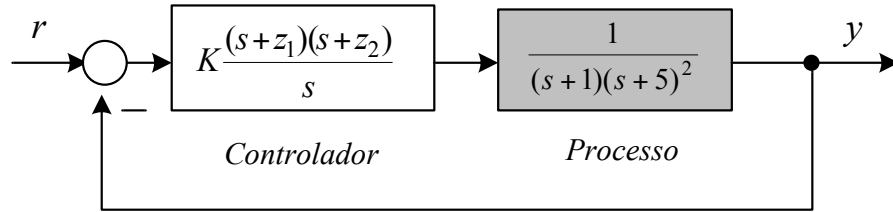
PID	1,2 T/(KL)	2L	0,5L
	$K_p = 204$	$T_i = 0,5$	$T_d = 0,125$



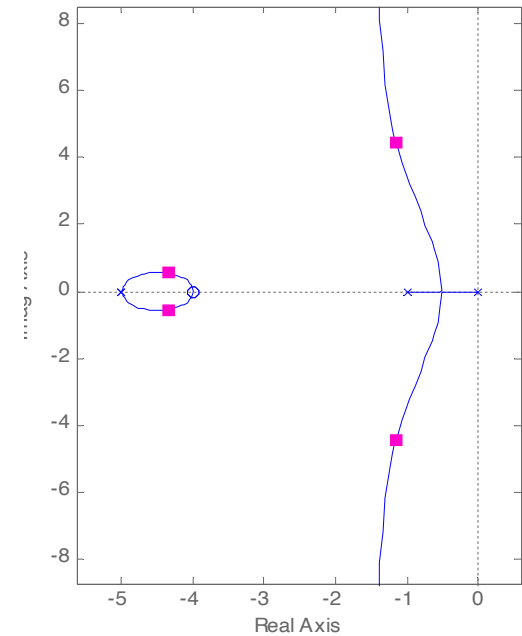
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 204 \left(1 + \frac{2}{s} + 0,125s \right) = 25,5 \frac{(s+4)(s+4)}{s}$$

Ex. ZN 1º Método

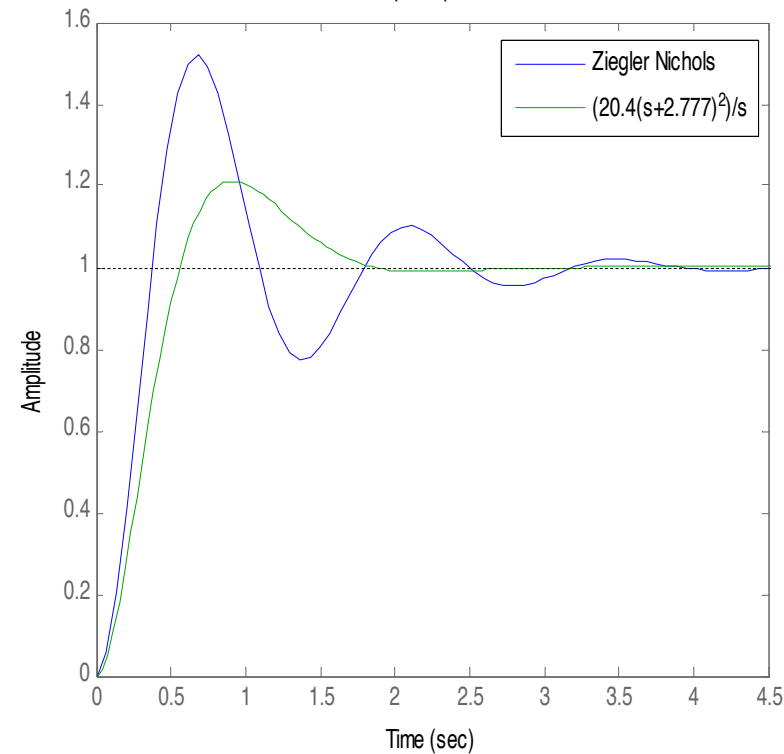
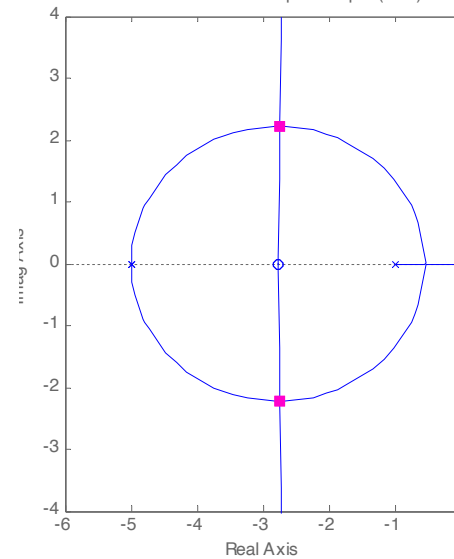
$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 204 \left(1 + \frac{2}{s} + 0,125s \right) = 25,5 \frac{(s+4)(s+4)}{s}$$



Root Locus Editor for Open Loop 1 (OL1)

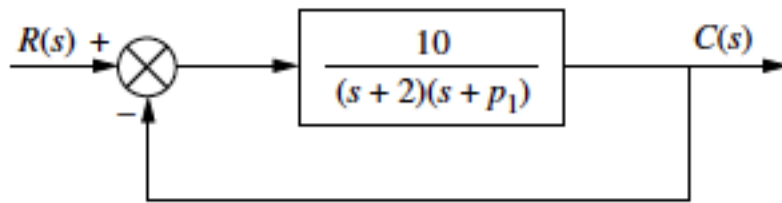


Root Locus Editor for Open Loop 1 (OL1)



LGR generalizado

(em função de um “outro” parâmetro p)



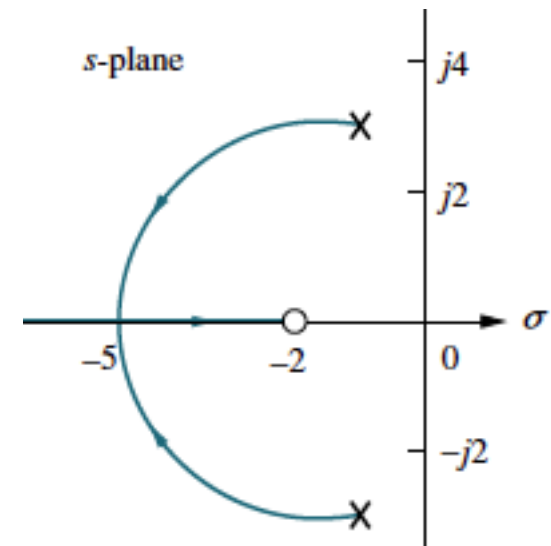
$$T(s) = \frac{10}{s^2 + 2s + 10} \cdot \frac{1}{1 + \frac{p_1(s+2)}{s^2 + 2s + 10}}$$

$$KG(s)H(s) = \frac{10}{(s+2)(s+p_1)}$$

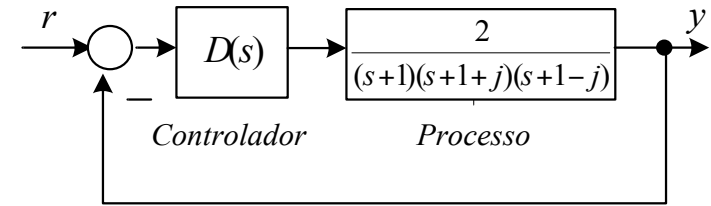
$$KG(s)H(s) = \frac{p_1(s+2)}{s^2 + 2s + 10}$$

$$T(s) = \frac{KG(s)}{1 + KG(s)H(s)} = \frac{10}{s^2 + (p_1 + 2)s + 2p_1 + 10}$$

$$T(s) = \frac{10}{s^2 + 2s + 10 + p_1(s+2)}$$



Exercício Extra 5



Projete um compensador PID, $D(s) = \frac{K(s + z_1)(s + z_2)}{s}$

para que o processo satisfaça em malha fechada, às seguintes especificações:

- Sobrepasso, $M_p \leq 30\%$
- Tempo de subida, $t_{r(10-90\%)} \leq 1,8 \text{ s}$
- Tempo de acomodação, $t_{s(2\%)} \leq 8 \text{ s}$
- Erro em regime permanente a uma rampa unitária, $e_{ss} \leq 1,5$

O projeto é feito inicialmente para atender às especificações transitórias.

Se possível, não utilizar uma rede em atraso para atender à especificação de regime permanente.

Dentre as seguintes alternativas, escolha a que tem menor e_{ss} :

- a) $PID_a(s)$, cancelamento do polo mais próximo à origem;
- b) $PID_b(s)$, zero duplo,; $z_1 = z_2$;
- c) $PID_c(s)$, - Cancelamento dos polos complexos conjugados.

Escolha valores comerciais de R e C para realizar o projeto.

Qual a fase fornecida, de fato, pelo projeto, em s_0 ?