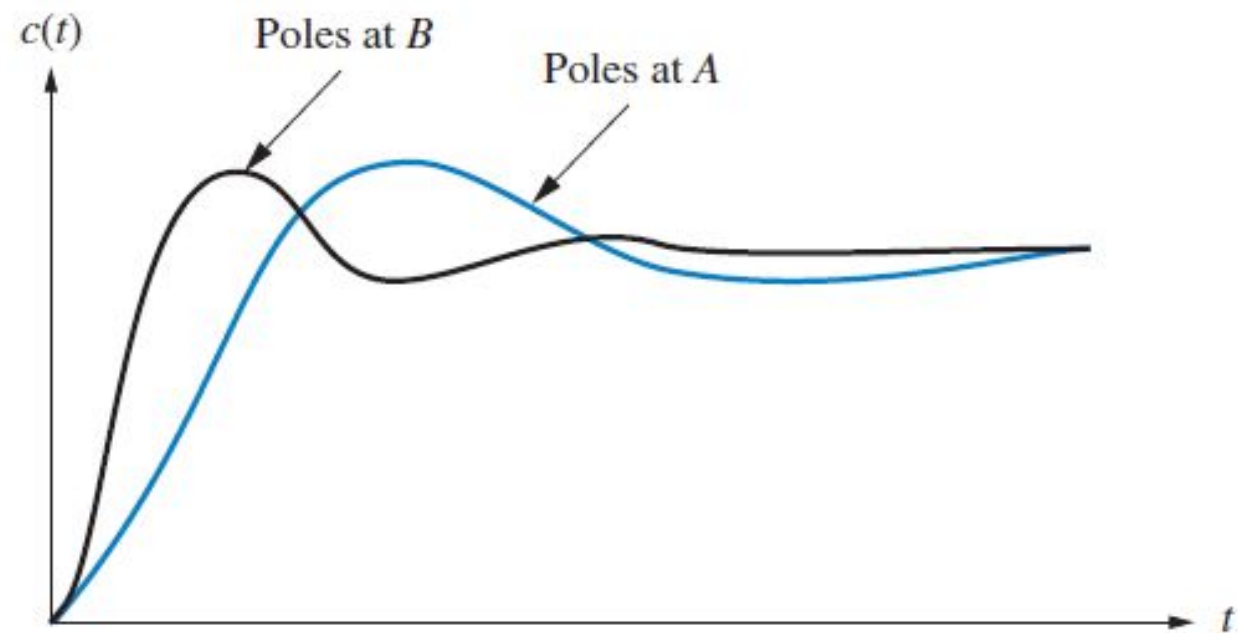
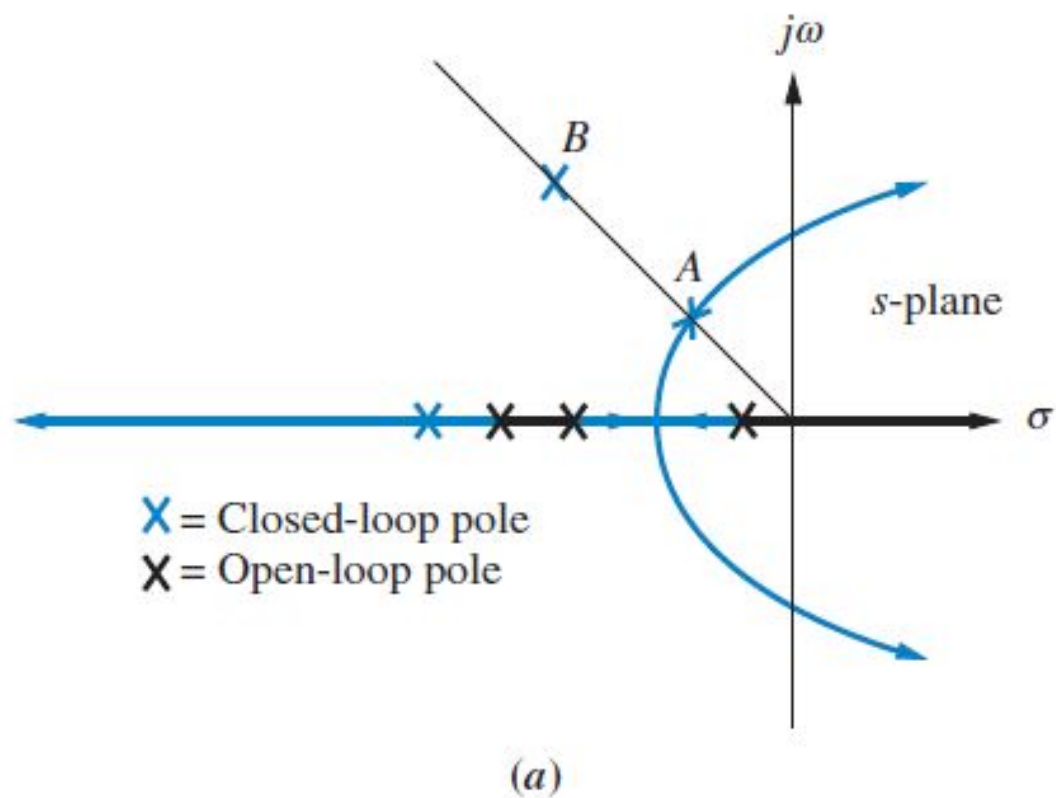
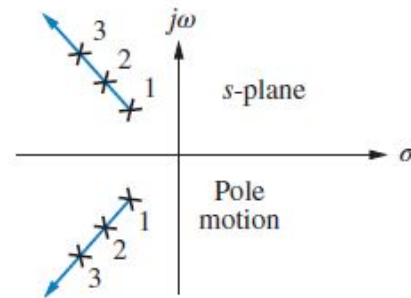
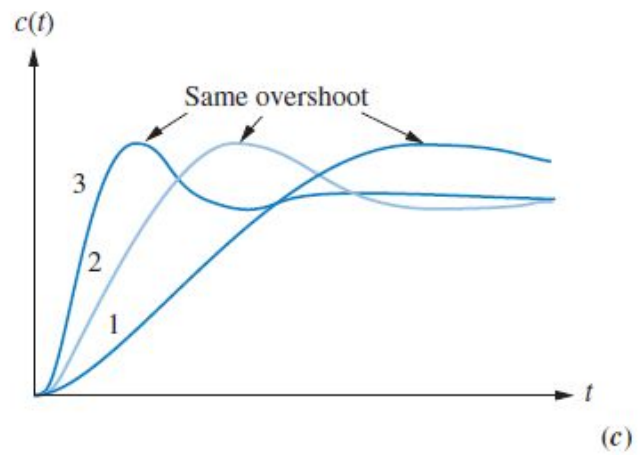
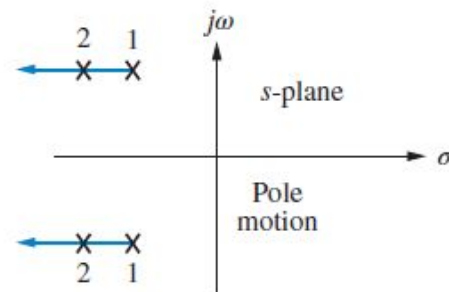
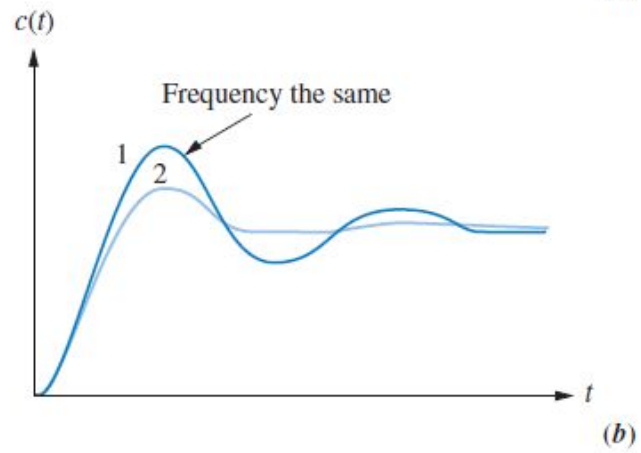
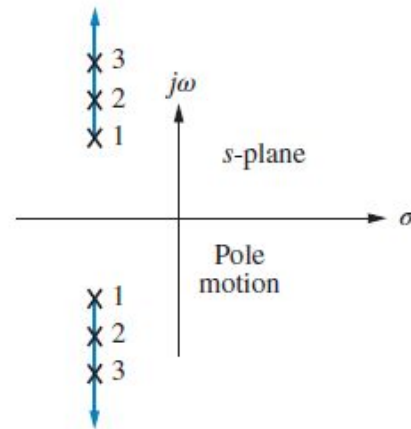
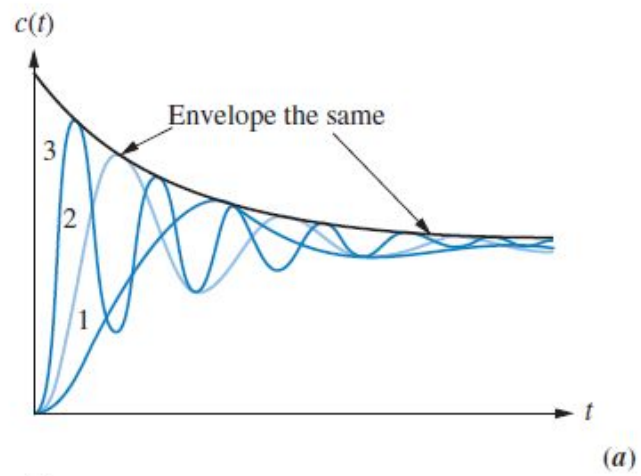


# Projeto Via Lugar Geométrico das Raízes

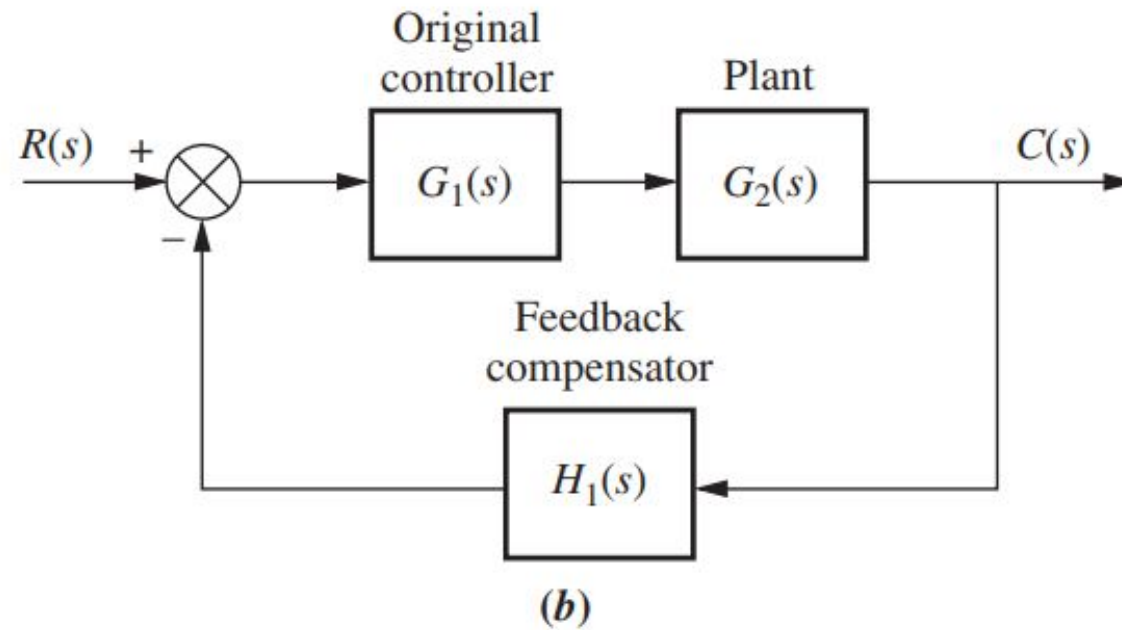
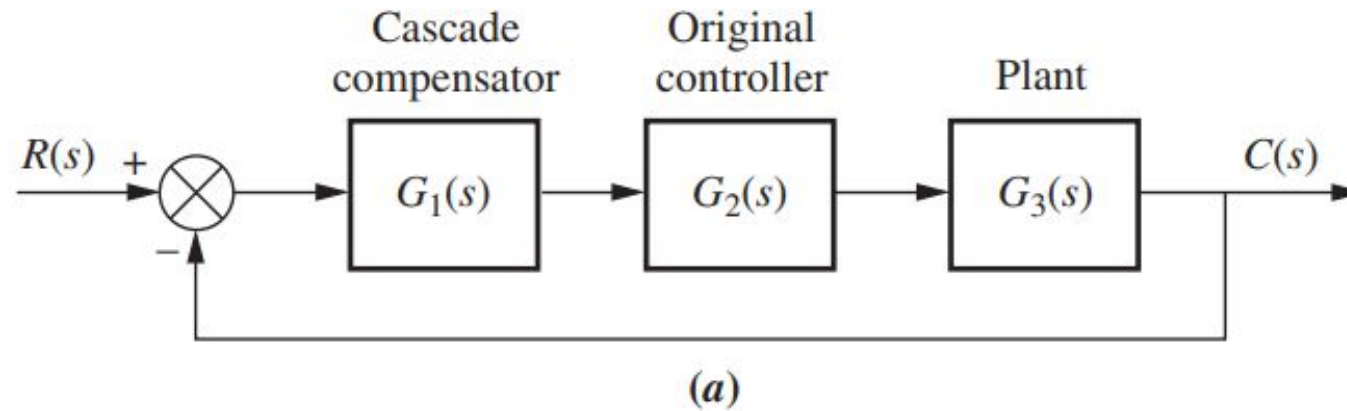
Fundamentos de Controle

# Melhorando a Resposta Transitória





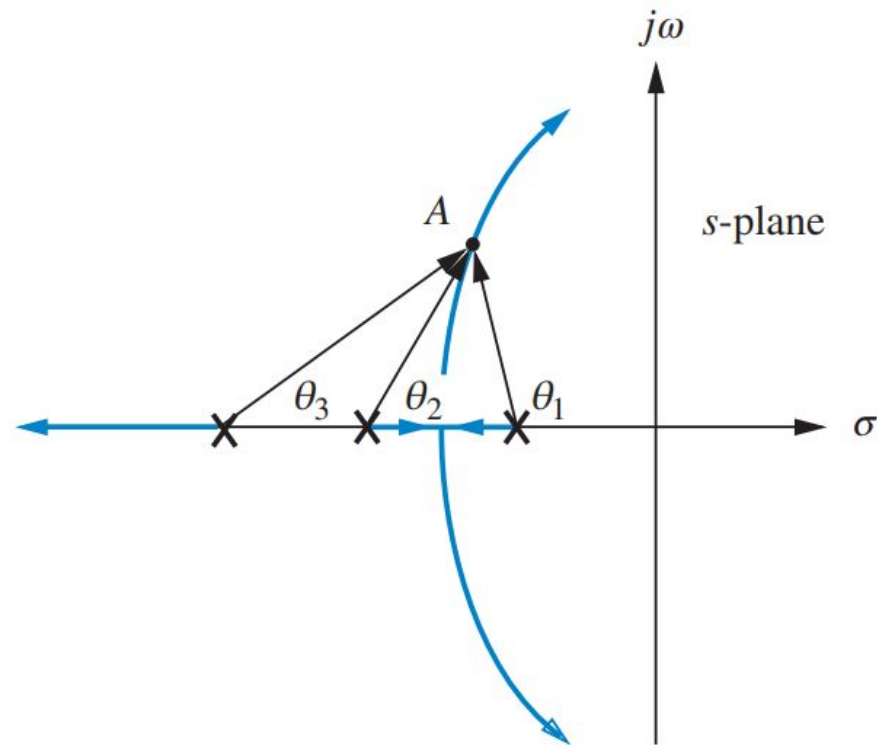
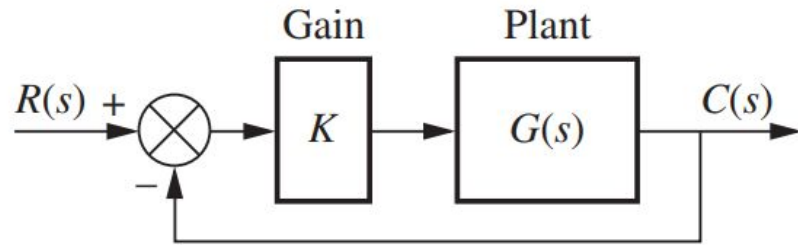
# Configurações



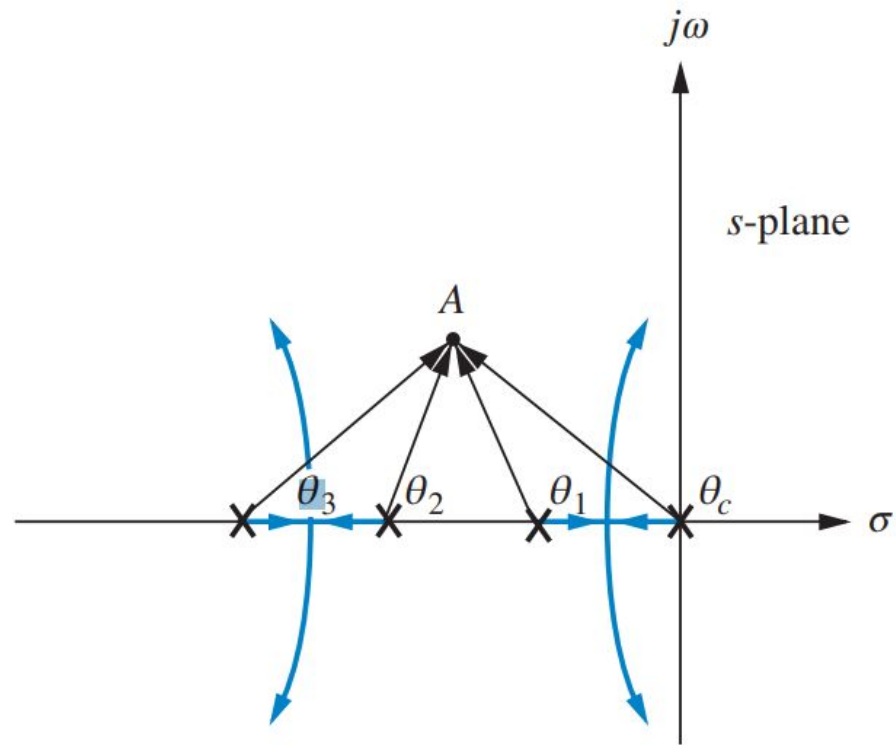
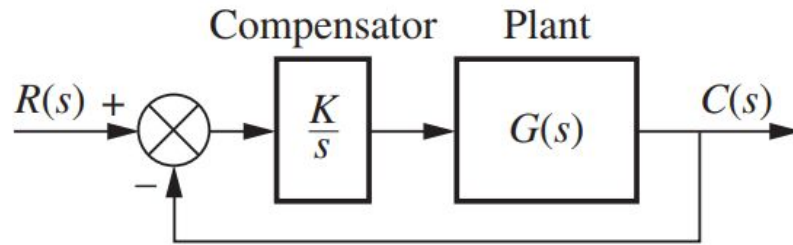
# Melhorando o Erro em Regime Permanente Via Compensação em Cascata

Fundamentos de Controle

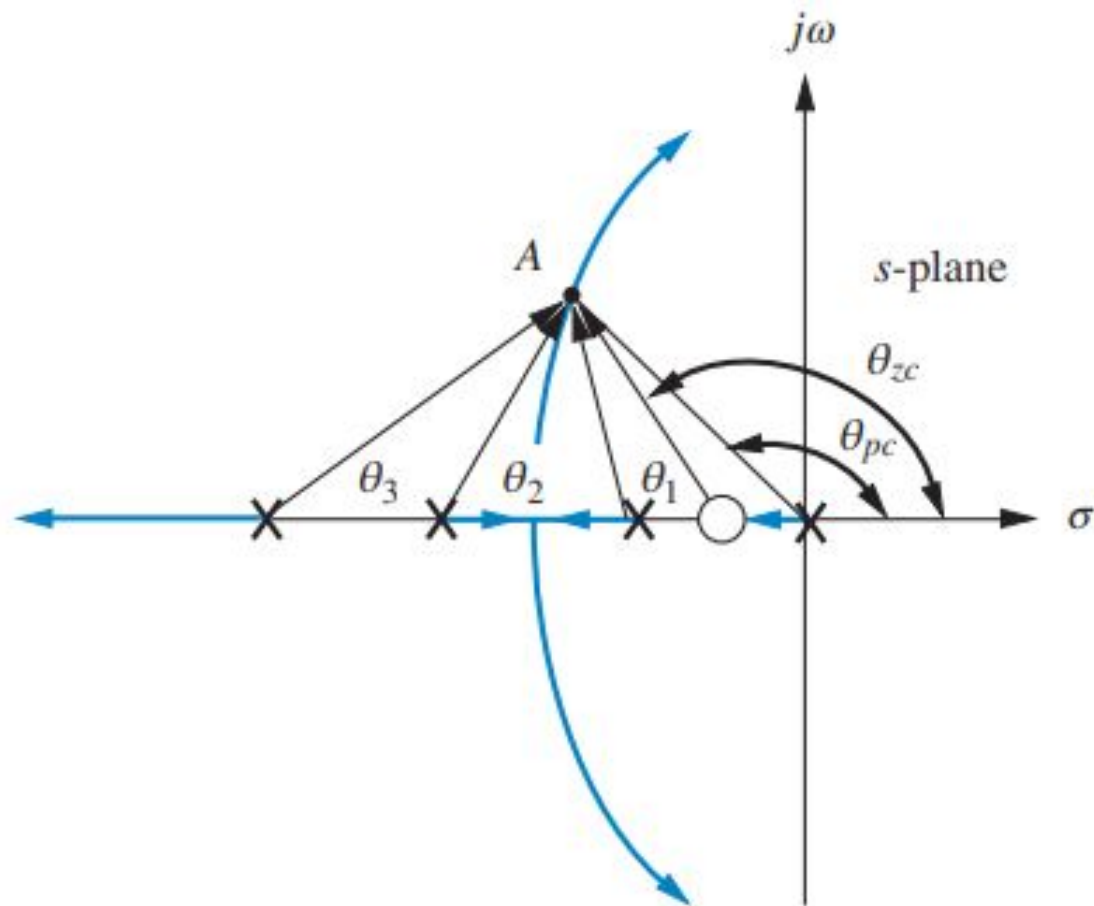
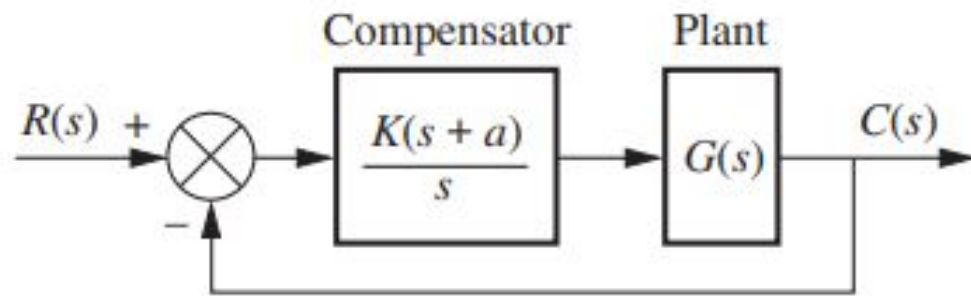
# Compensação Integral Ideal (PI)



$$-\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 = (2k + 1)180^\circ$$



$$-\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_c = (2k + 1)180^\circ$$



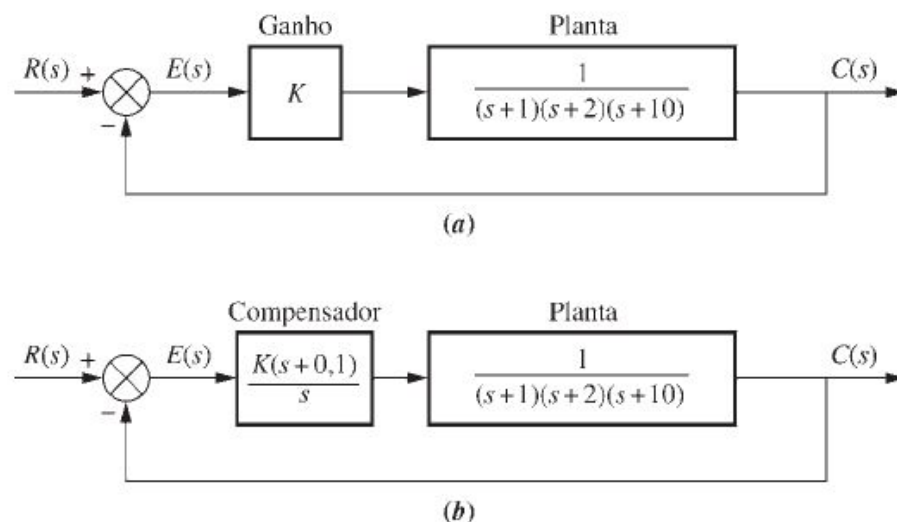
$$-\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_{pc} + \theta_{zc} \cong (2k+1)180^\circ$$



## Exemplo 9.1

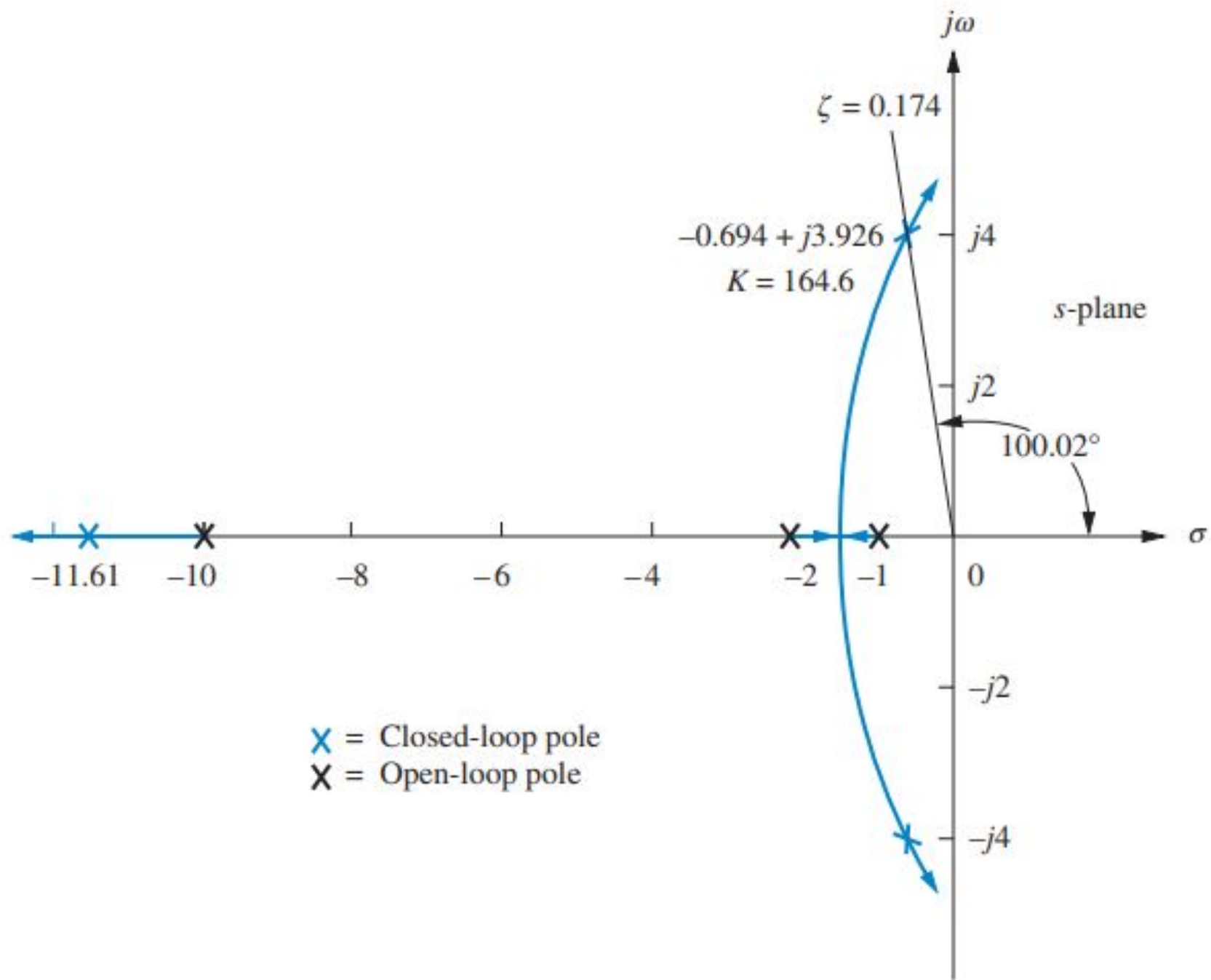
### O Efeito de um Compensador Integral Ideal

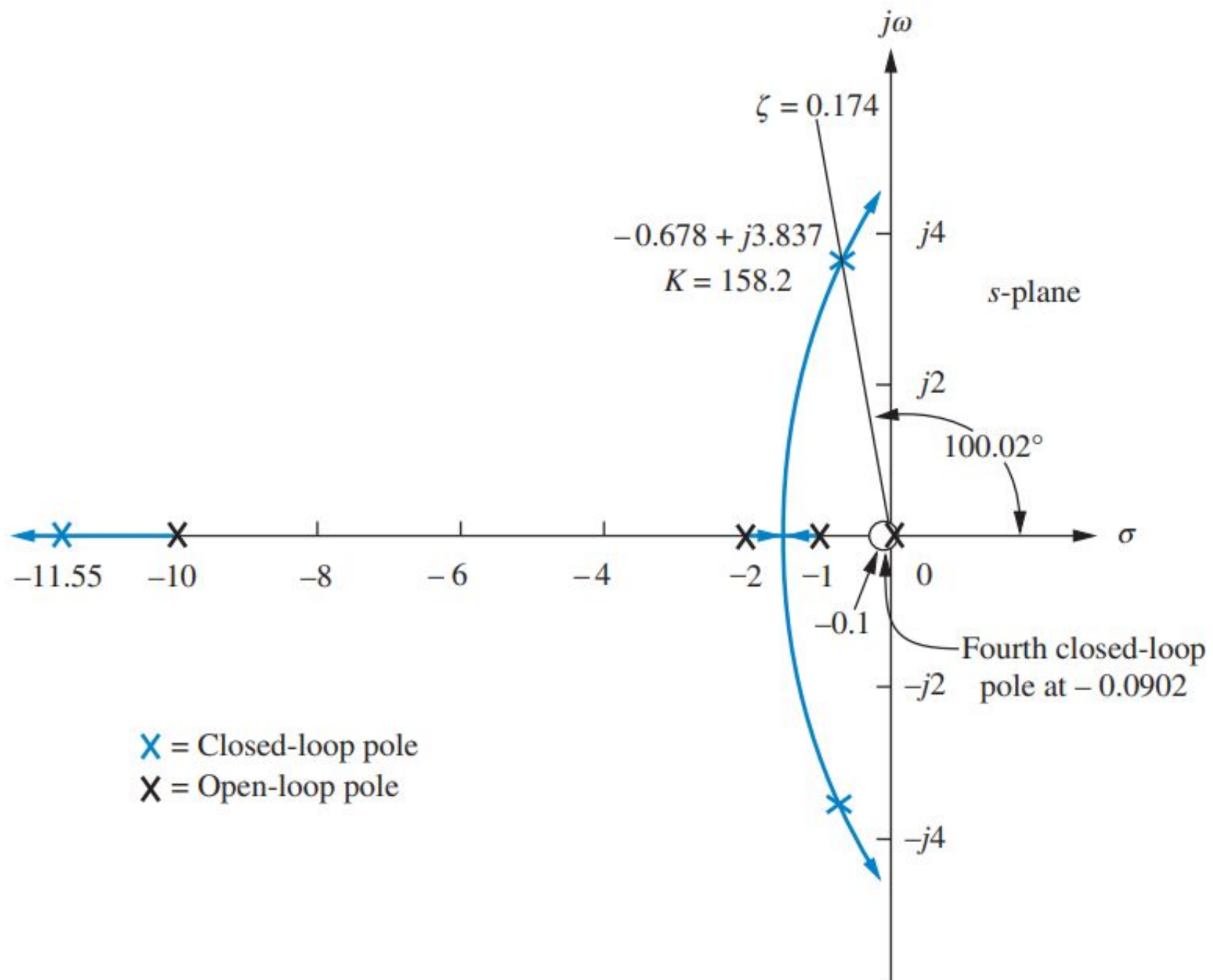
**PROBLEMA:** Dado o sistema da Figura 9.4(a), operando com um fator de amortecimento de 0,174, mostre que a adição do compensador integral ideal mostrado na Figura 9.4(b) reduz o erro em regime permanente a zero para uma entrada em degrau sem afetar significativamente a resposta transitória. A estrutura de compensação é escolhida com um polo na origem para aumentar o tipo do sistema e um zero em -0,1 próximo ao polo do compensador, de modo que a contribuição angular do compensador avaliada nos polos de segunda ordem dominantes originais seja aproximadamente zero. Assim, os polos de segunda ordem dominantes em malha fechada originais estão aproximadamente sobre o novo lugar geométrico das raízes.

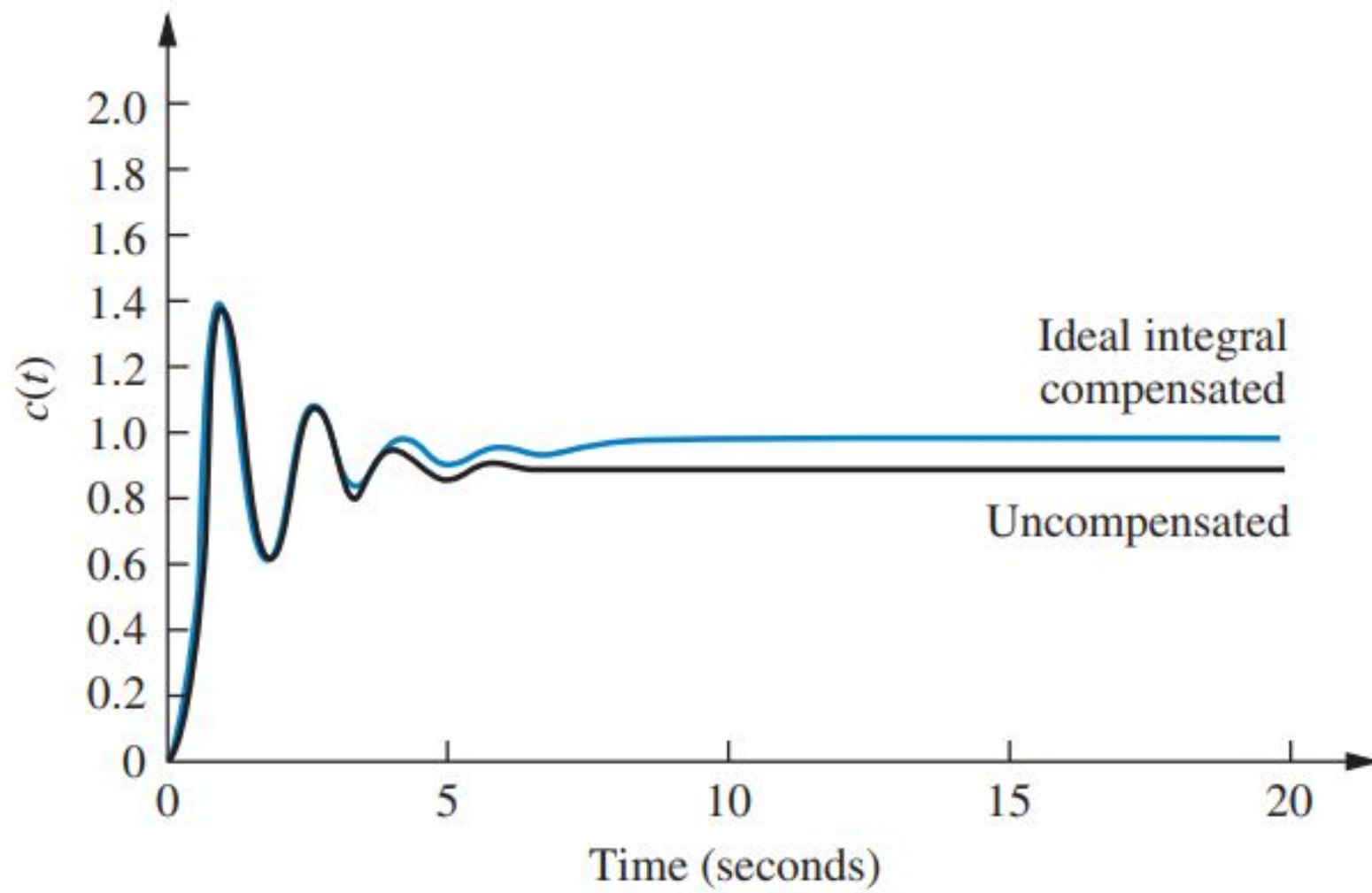


**FIGURA 9.4** Sistema em malha fechada para o Exemplo 9.1: **a.** antes da compensação; **b.** após a compensação integral ideal.

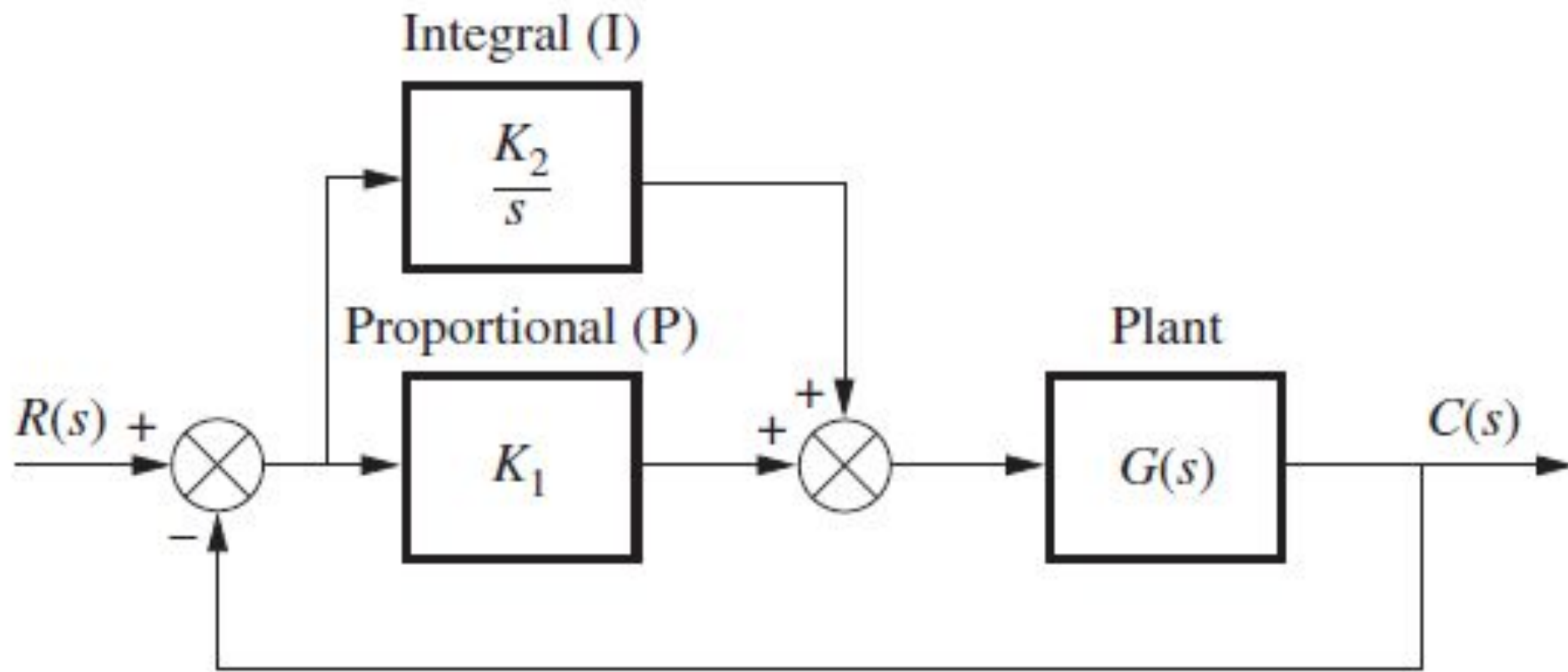




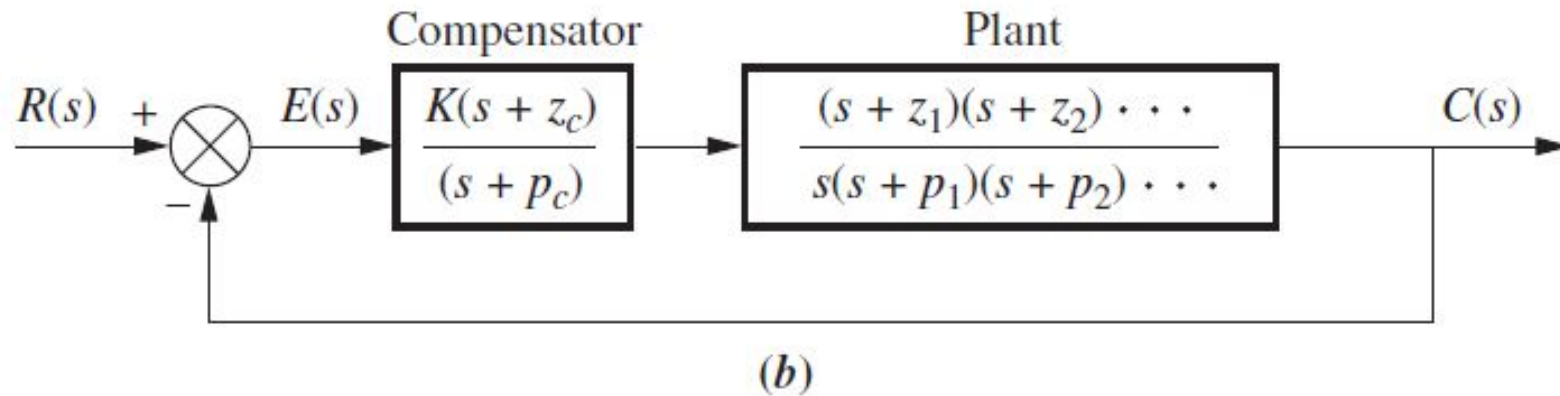
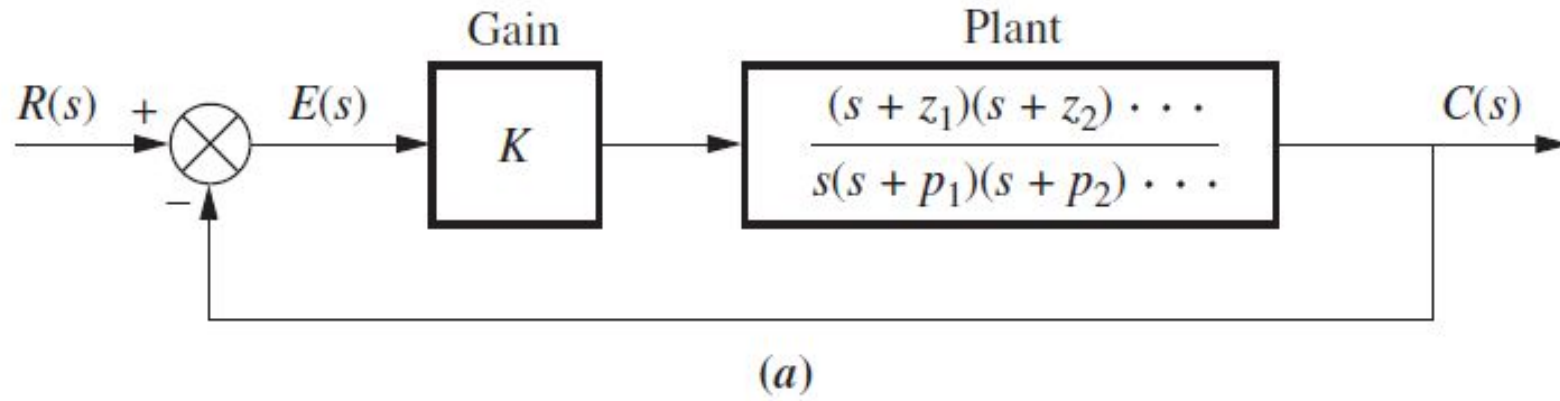




# Controlador PI



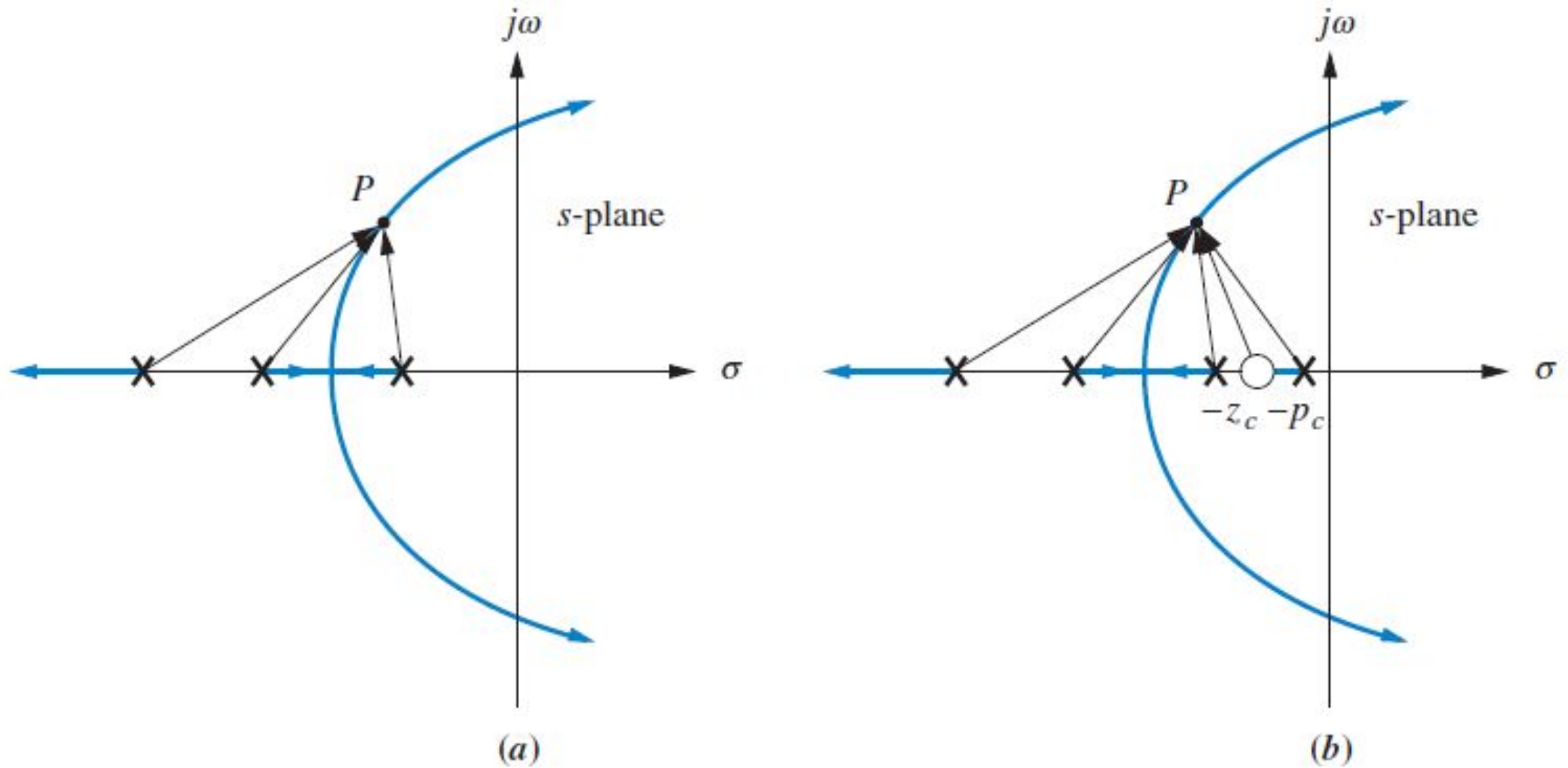
# Compensação de Atraso de Fase



$$K_{v0} = \frac{K z_1 z_2 \cdots}{p_1 p_2 \cdots}$$

$$K_{vN} = \frac{(K z_1 z_2 \cdots)(z_c)}{(p_1 p_2 \cdots)(p_c)}$$

$$K_{vN} = K_{v0} \frac{z_c}{p_c} > K_{v0}$$

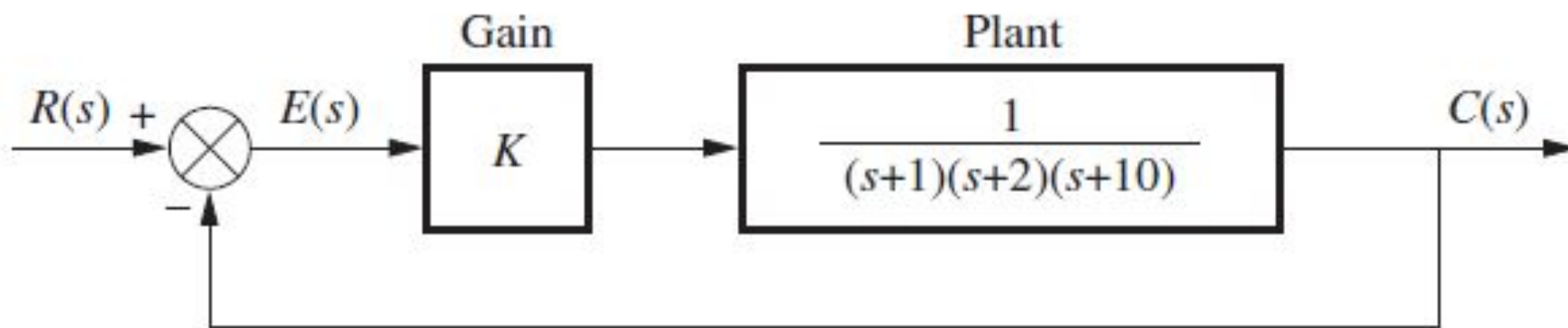


**FIGURE 9.10** Root locus: a. before lag compensation; b. after lag compensation

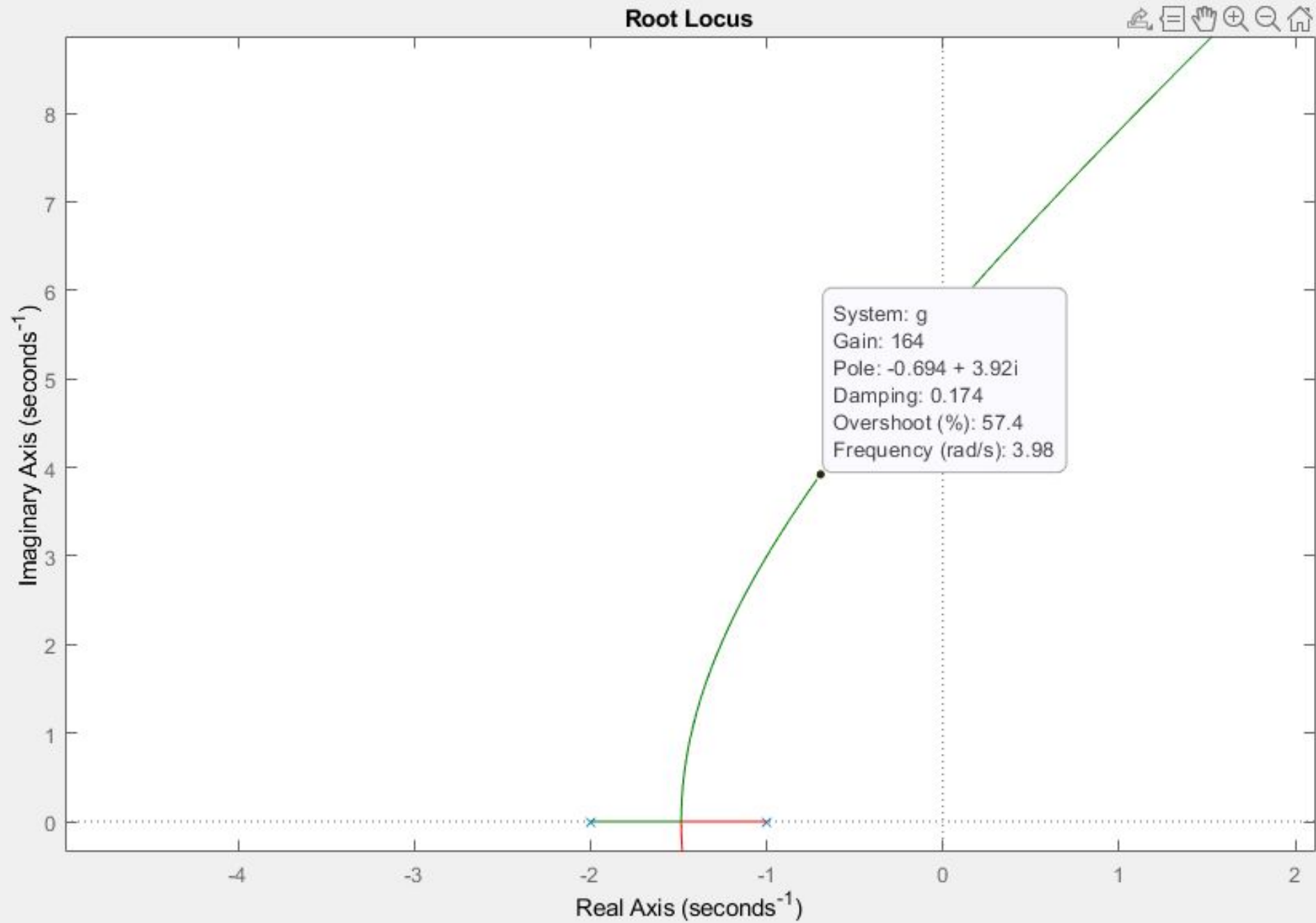
## Exemplo 9.2

### Projeto de Compensador de Atraso de Fase

**PROBLEMA:** Compense o sistema da Figura 9.4(a), cujo lugar geométrico das raízes é mostrado na Figura 9.5, para melhorar o erro em regime permanente por um fator de 10, caso o sistema esteja operando com um fator de amortecimento de 0,174.







$$e(\infty) = \frac{0.108}{10} = 0.0108$$

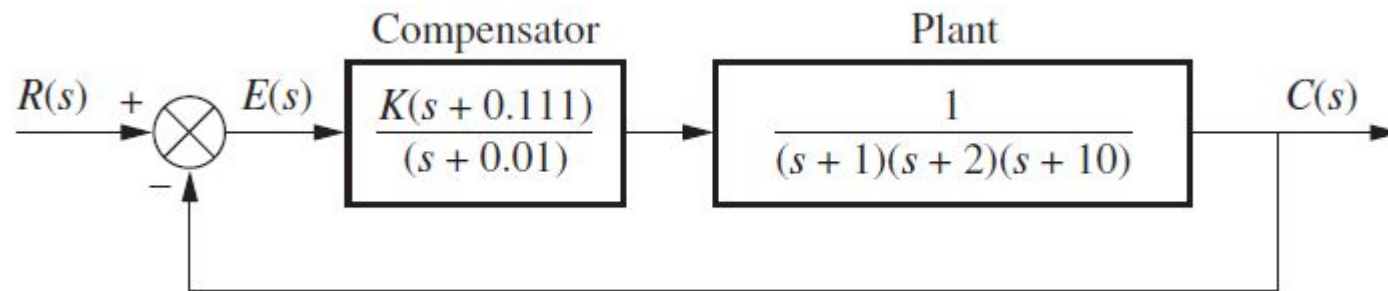
$$\frac{z_c}{p_c} = \frac{K_{p_N}}{K_{p_O}} = \frac{91.59}{8.23} = 11.13$$

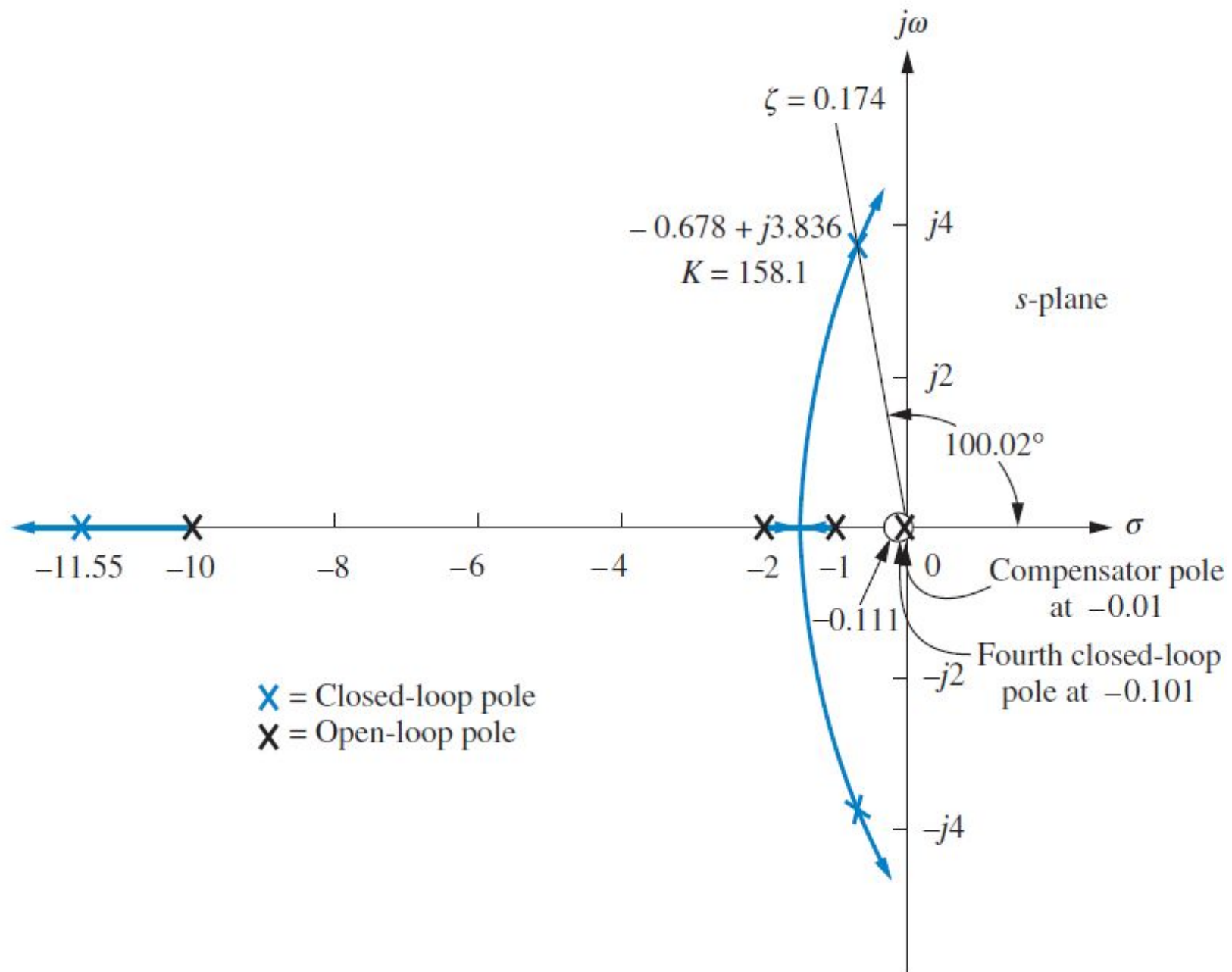
$$e(\infty) = \frac{1}{1 + K_p} = 0.0108$$

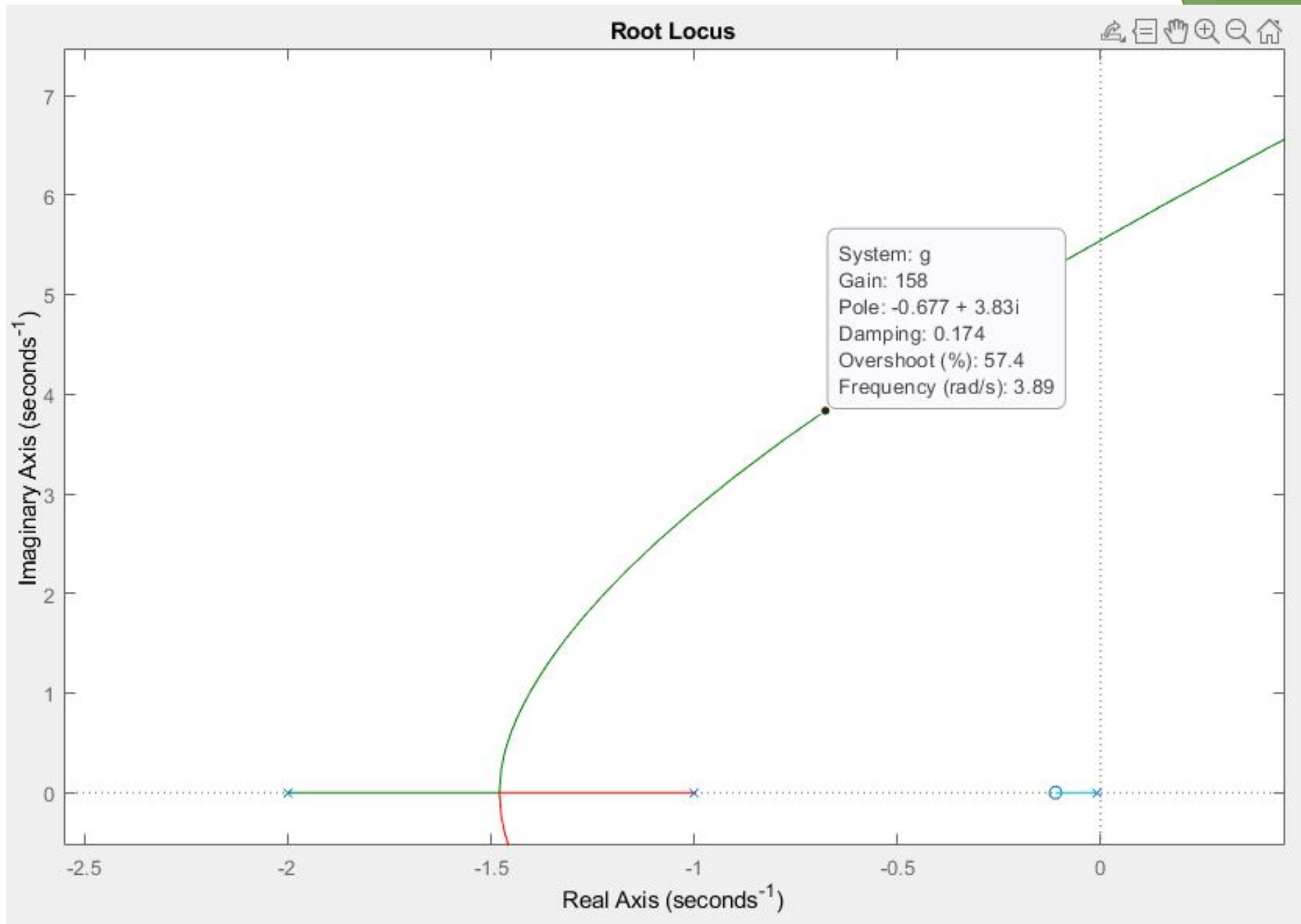
$$p_c = 0.01$$

$$K_p = \frac{1 - e(\infty)}{e(\infty)} = \frac{1 - 0.0108}{0.0108} = 91.59$$

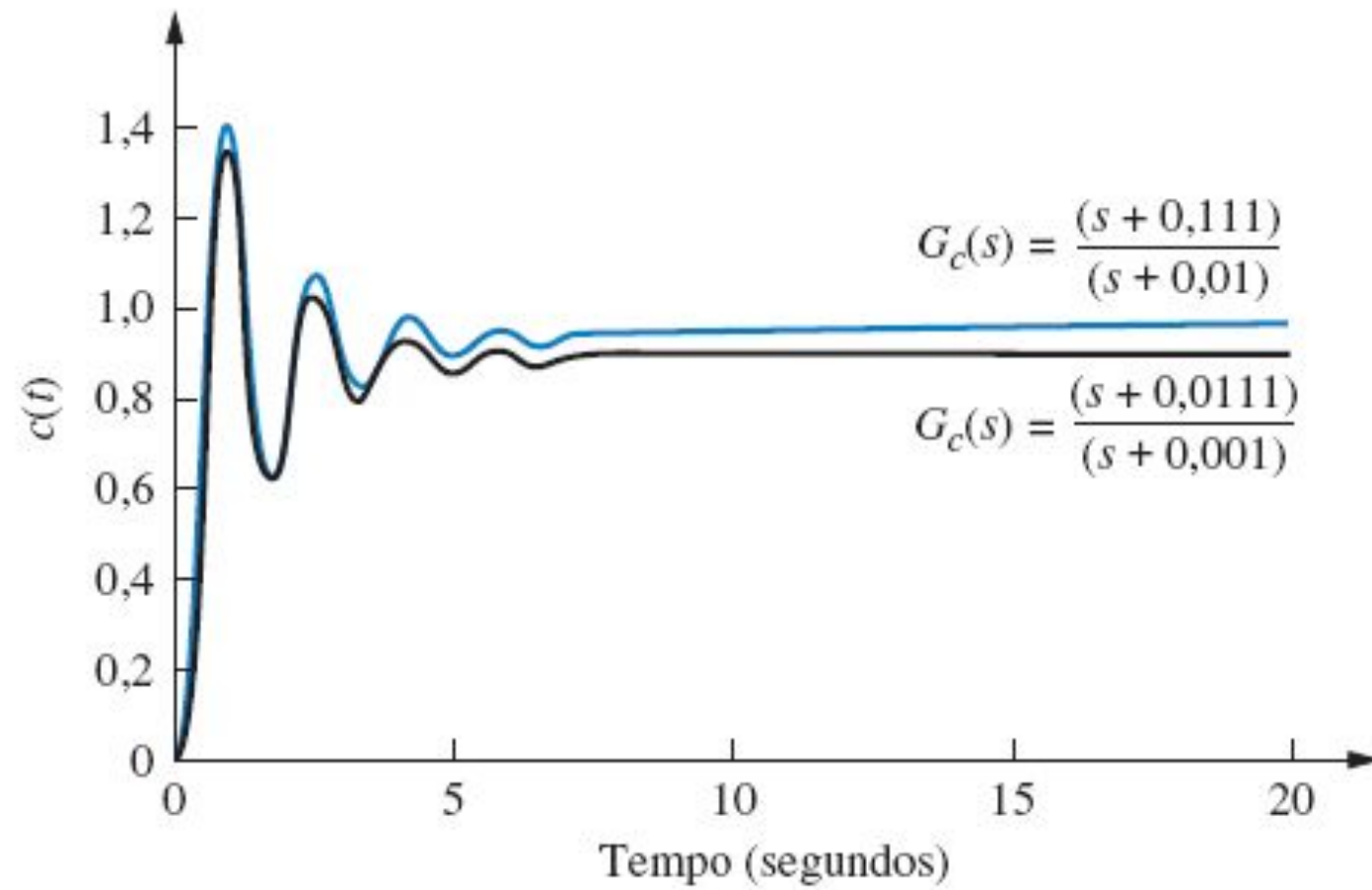
$$z_c = 11.13p_c \approx 0.111$$







Parameter	Uncompensated	Lag-compensated
	$K$	$K(s + 0.111)$
Plant and compensator	$\frac{K}{(s + 1)(s + 2)(s + 10)}$	$\frac{K(s + 0.111)}{(s + 1)(s + 2)(s + 10)(s + 0.01)}$
$K$	164.6	158.1
$K_p$	8.23	87.75
$e(\infty)$	0.108	0.011
Dominant second-order poles	$-0.694 \pm j3.926$	$-0.678 \pm j3.836$
Third pole	$-11.61$	$-11.55$
Fourth pole	None	$-0.101$
Zero	None	$-0.111$



## Exercício 9.1

**PROBLEMA:** Um sistema com realimentação unitária com a função de transferência à frente

$$G(s) = \frac{K}{s(s + 7)}$$

está operando com uma resposta ao degrau em malha fechada que tem 15 % de ultrapassagem. Faça o seguinte:

- Calcule o erro em regime permanente para uma entrada em rampa unitária.
- Projete um compensador de atraso de fase para melhorar o erro em regime permanente por um fator de 20.
- Calcule o erro em regime permanente para uma entrada em rampa unitária para seu sistema compensado.
- Calcule a melhoria obtida no erro em regime permanente.

### RESPOSTAS:

**a.**  $e_{\text{rampa}}(\infty) = 0,1527$

**b.**  $G_{\text{atraso}}(s) = \frac{s + 0,2}{s + 0,01}$

**c.**  $e_{\text{rampa}}(\infty) = 0,0078$

**d.** Melhoria de 19,58 vezes



# Root Locus

