

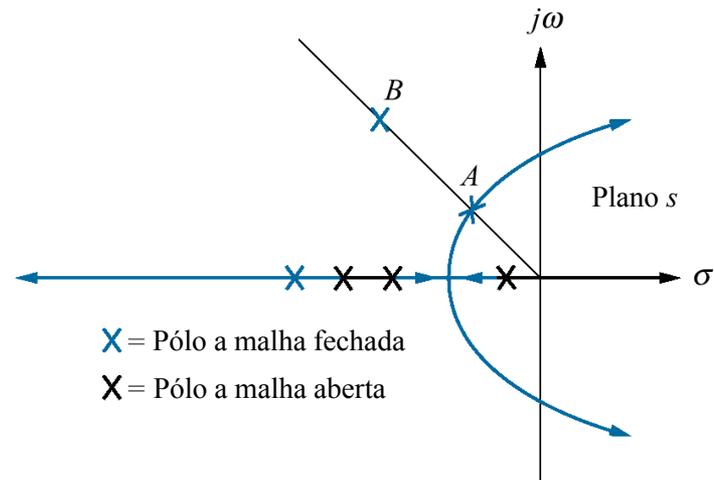
Capítulo 9

Projeto por Intermédio do
Lugar das Raízes

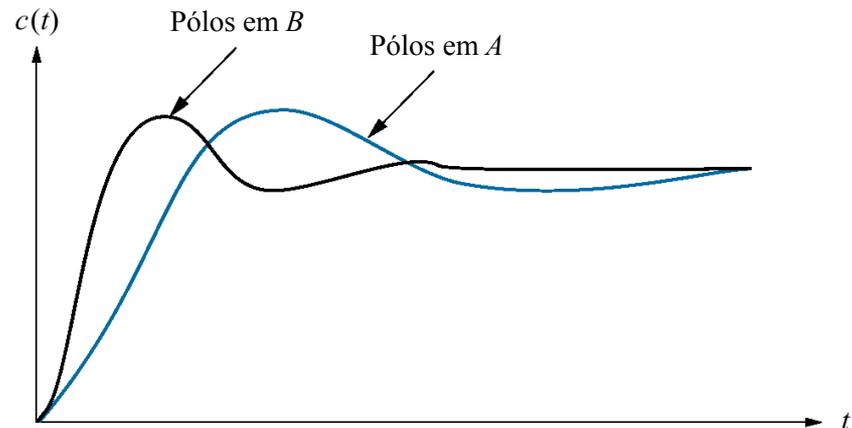
Fig. 9.1

a. Exemplo de lugar das raízes, mostrando um ponto de projeto possível através de ajuste de ganho (A) e um ponto de projeto desejado que não pode ser atendido através de um simples ajuste de ganho (B);

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



(a)



(b)

Fig. 9.2

Técnicas de compensação:

a. cascata;

b. retroação

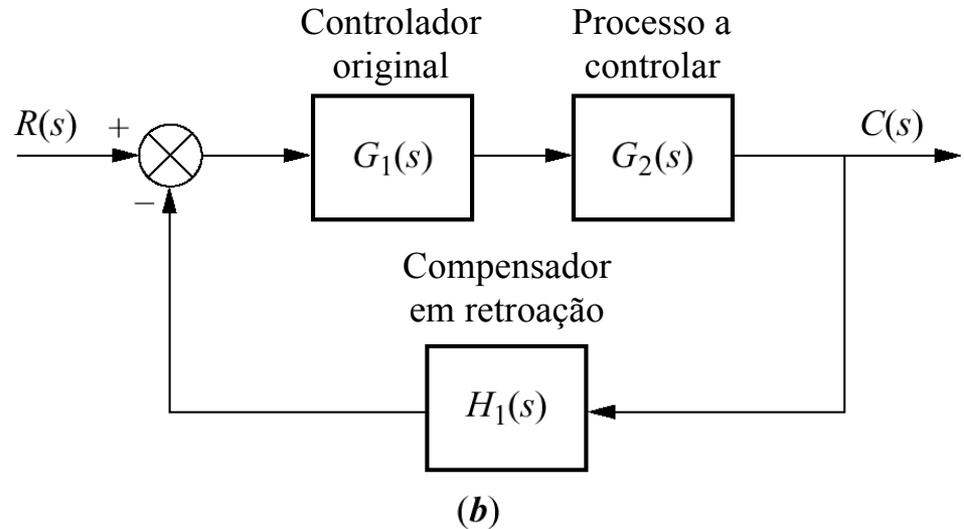
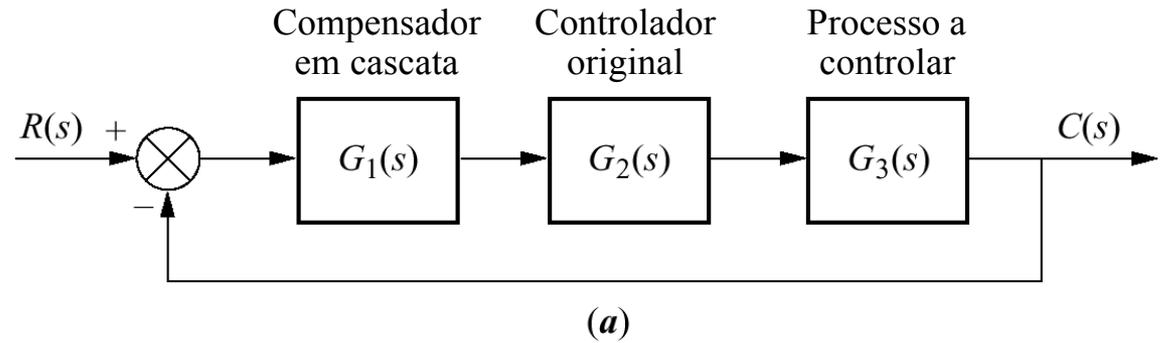


Fig. 9.3

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)

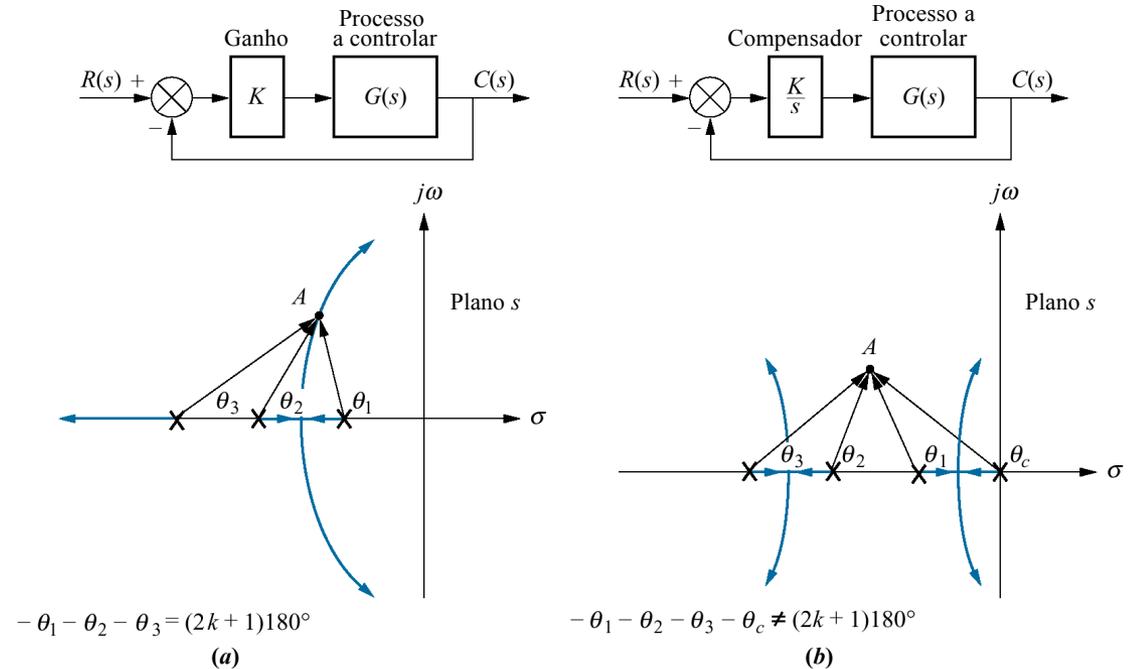


Fig. 9.3

(continuação)

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

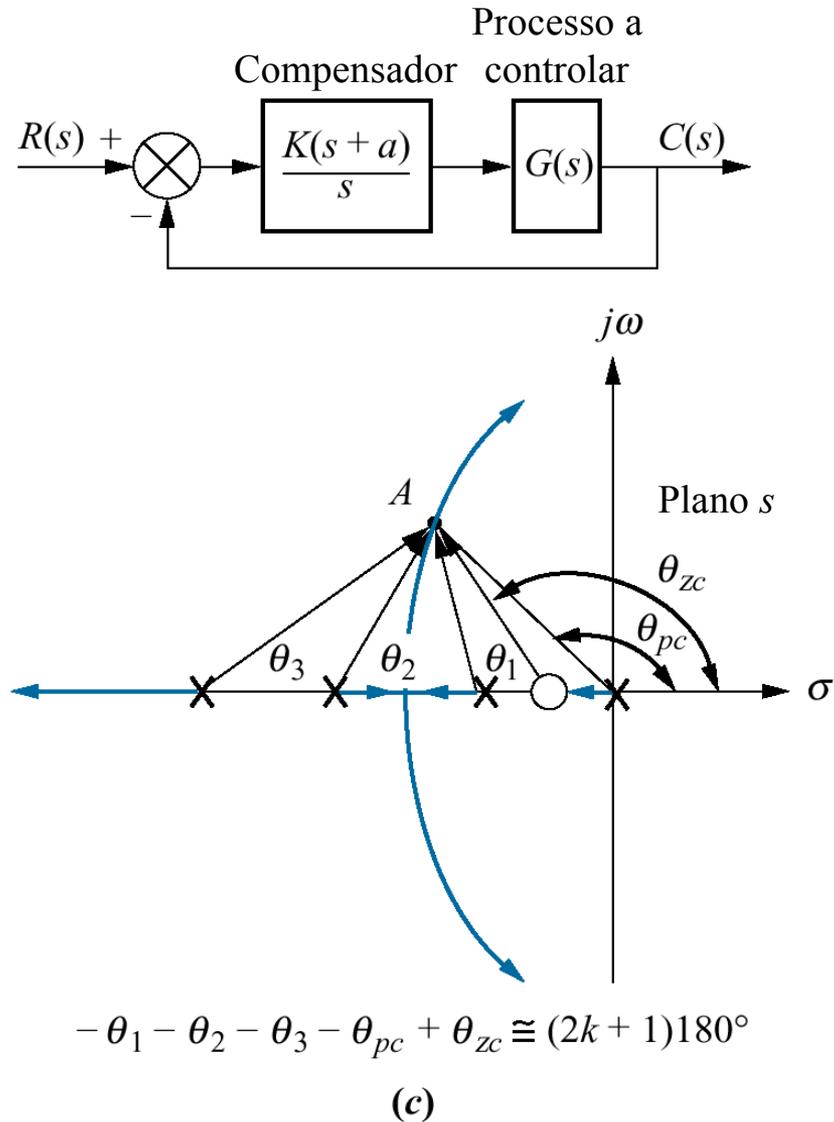


Fig. 9.4

Sistema a malha

fechada do

Exemplo 9.1:

a. antes da
compensação.

b. após a
compensação integral
ideal

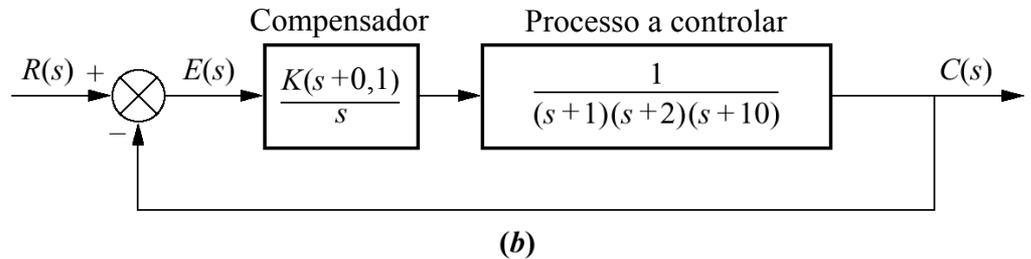
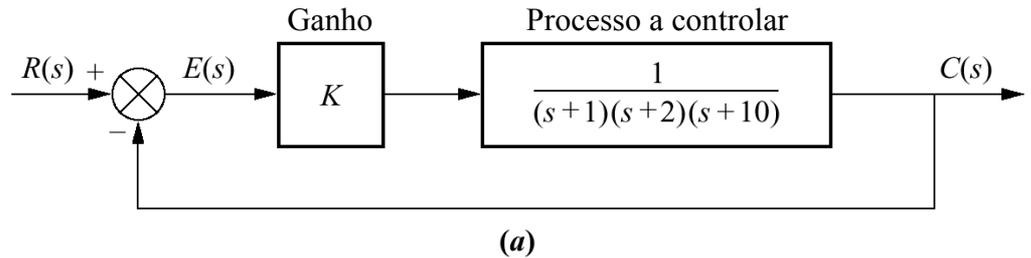


Fig. 9.5
 Lugar das raízes
 para o sistema
 não-compensado
 da Fig. 9.4(a)

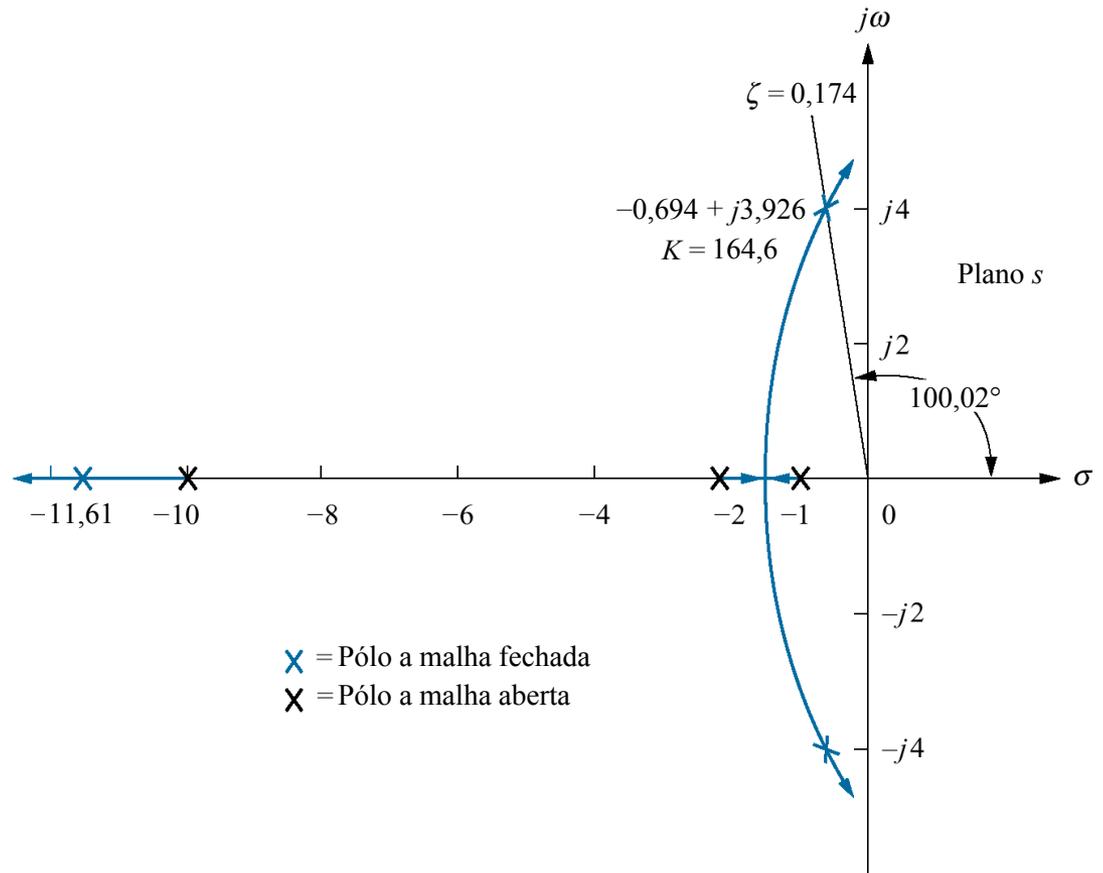


Fig. 9.6
Lugar das raízes para o sistema compensado da Fig. 9.4(b)

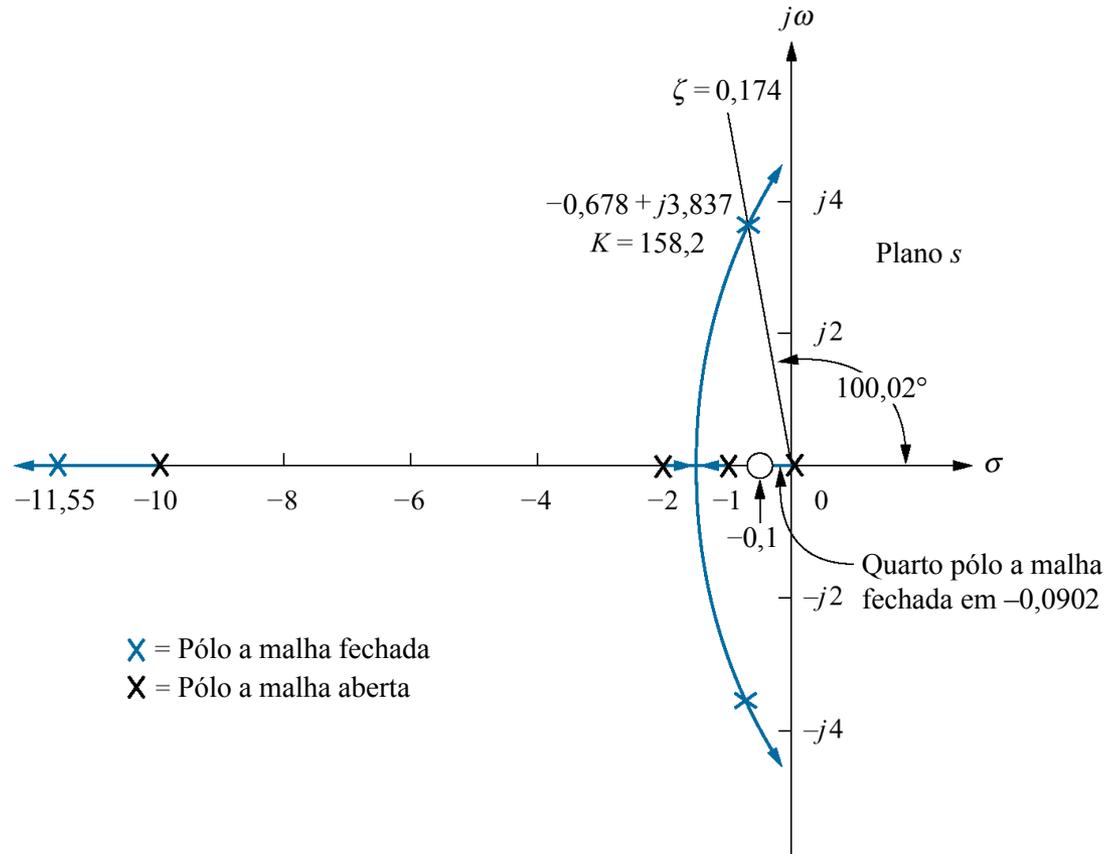


Fig. 9.7

Resposta do sistema compensado com um integrador ideal e do sistema não-compensado do Exemplo 9.1

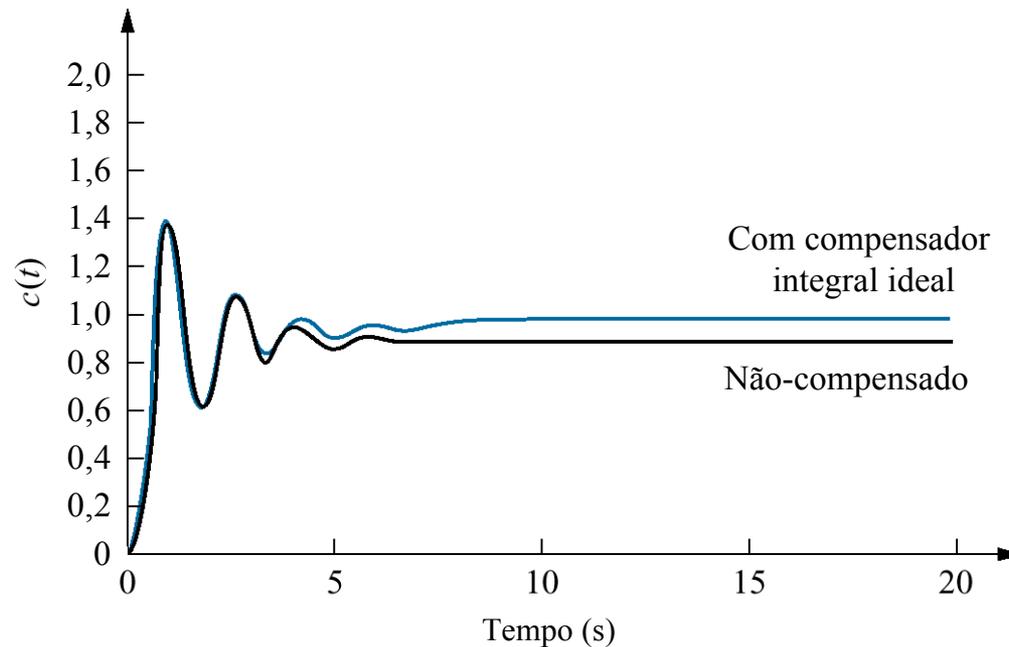


Fig. 9.8
Controlador PI

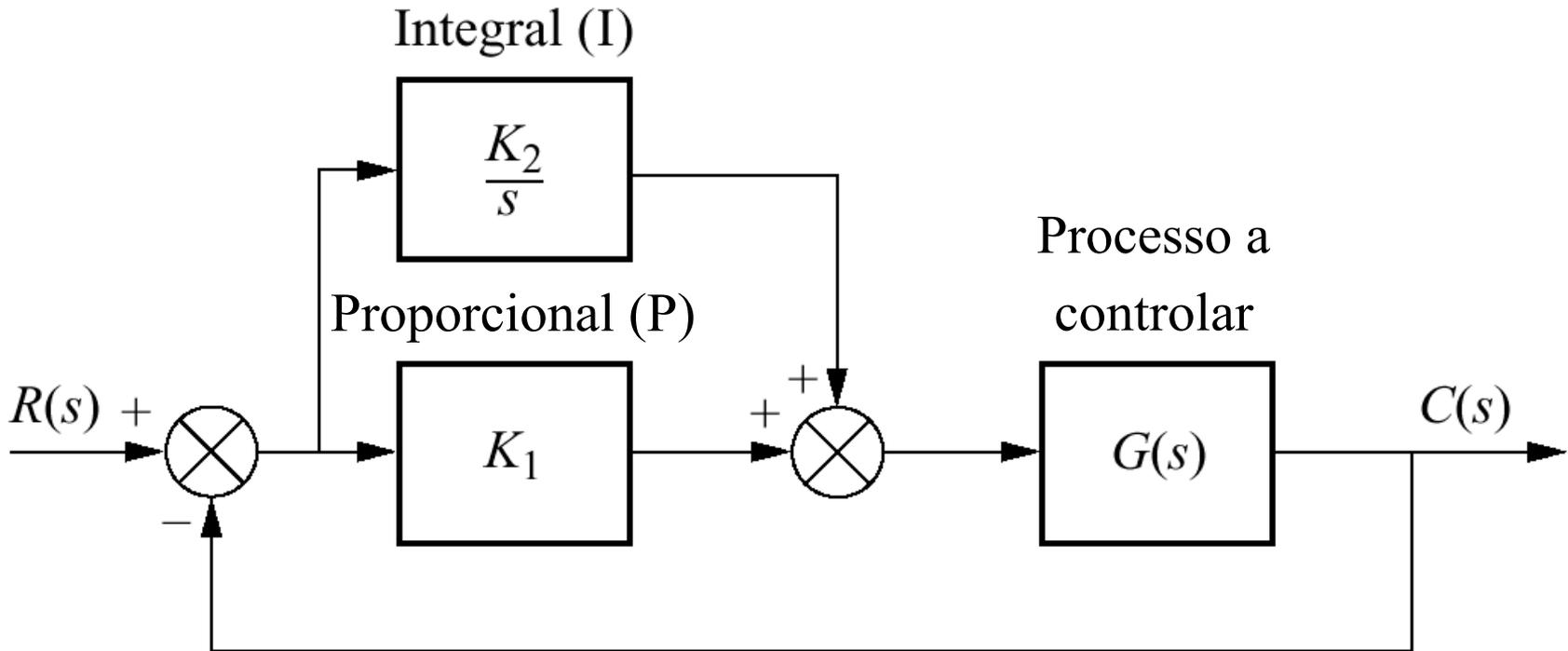
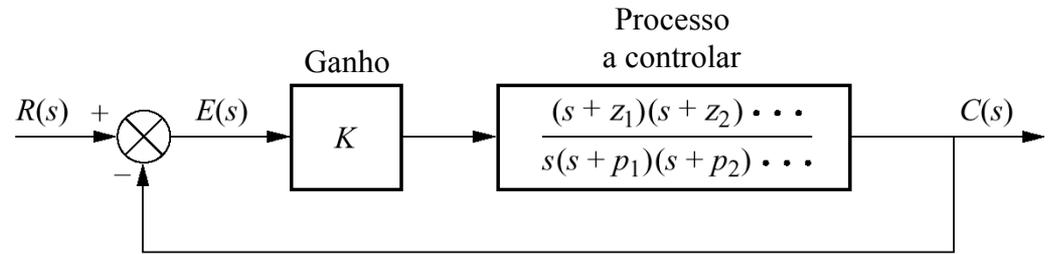


Fig. 9.9

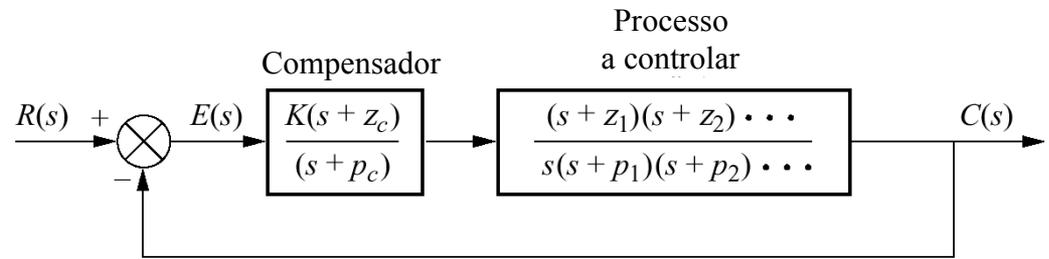
a. Sistema do tipo 1 não-compensado;

b. sistema do tipo 1 compensado;

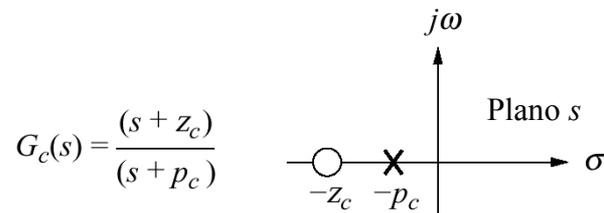
c. diagrama de pólos e zeros do compensador



(a)



(b)



(c)

Fig. 9.10

Lugar das raízes:

a. antes da compensação por atraso de fase;

b. depois da compensação por atraso de fase

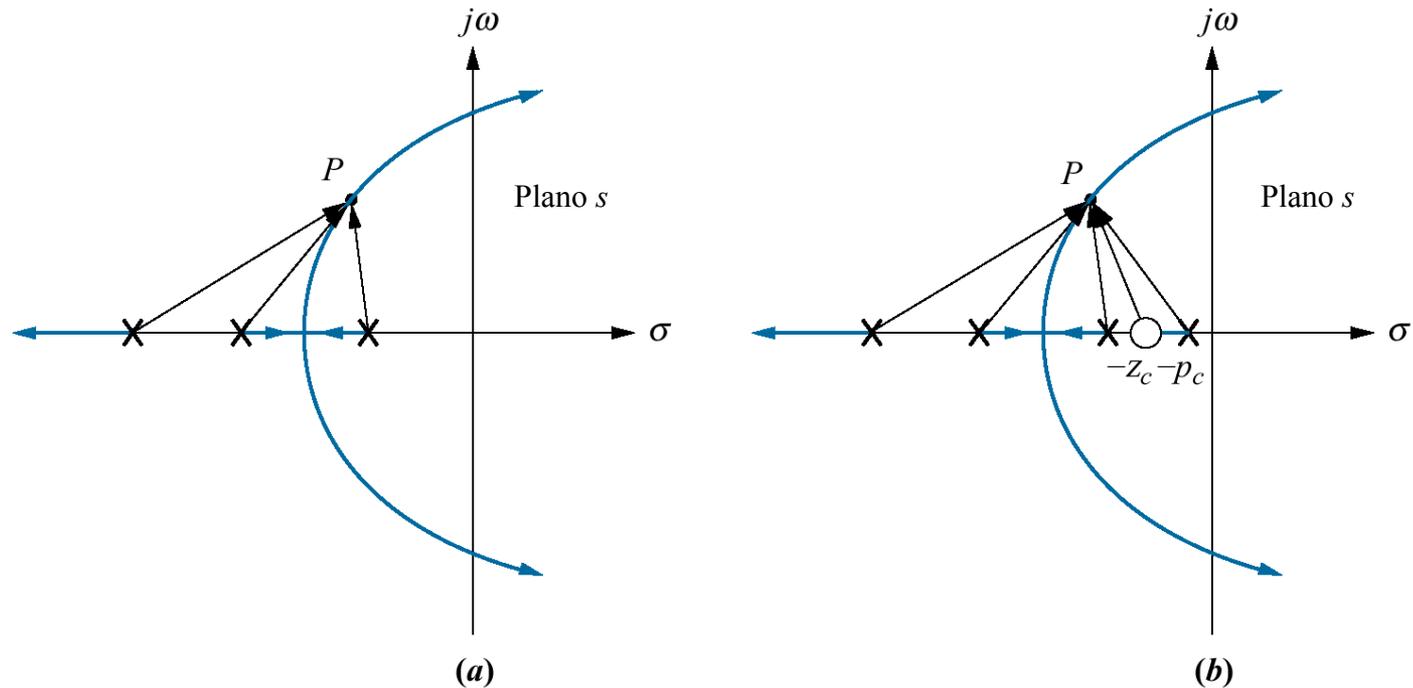


Fig. 9.11
 Sistema compensado do
 Exemplo 9.2

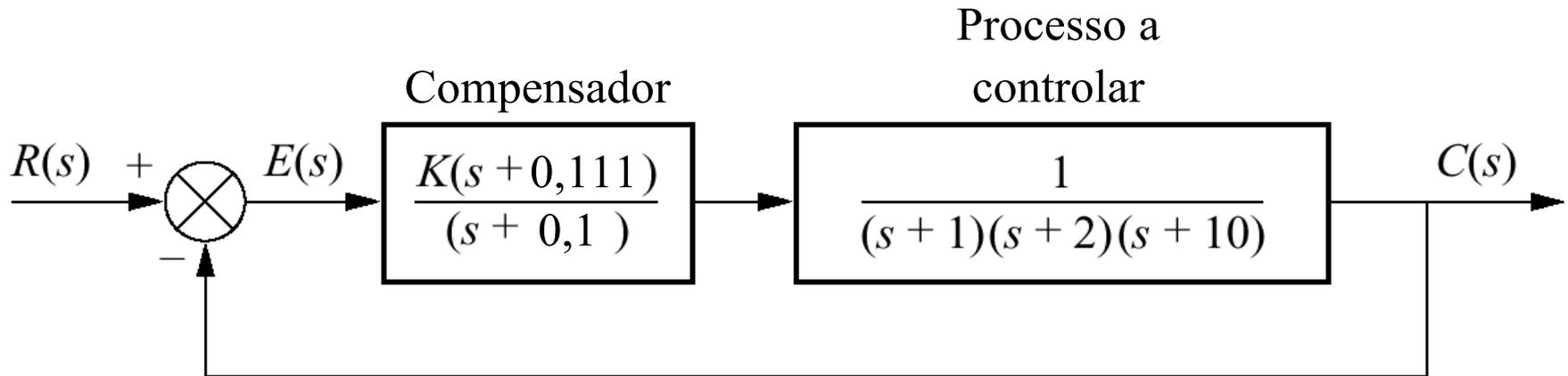


Fig. 9.12
Lugar das raízes do sistema compensado da Fig. 9.11

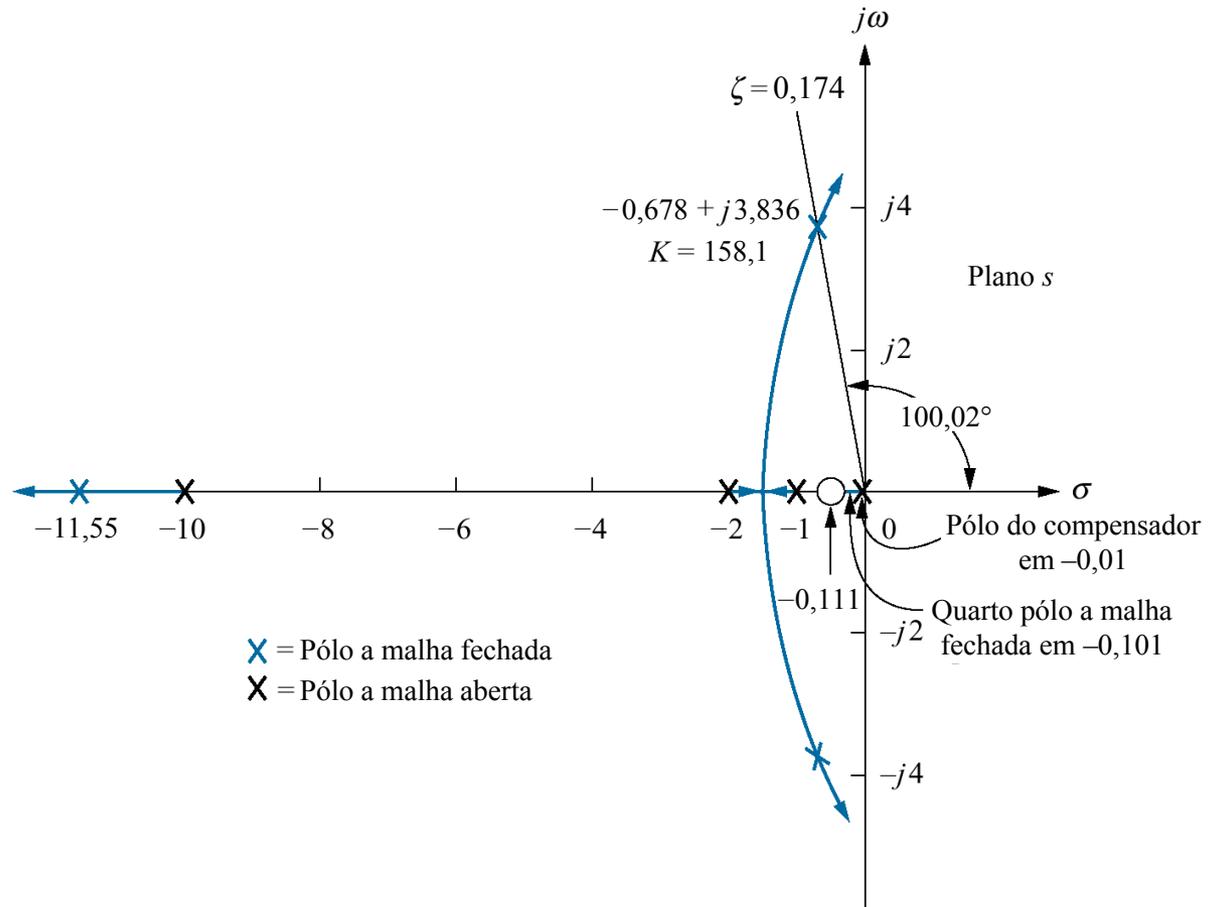


Tabela 9.1

Características previstas dos sistemas não-compensado e compensado por atraso de fase do Exemplo 9.2

Parâmetro	Não-compensado	Compensado por atraso de fase
Processo e compensador	$\frac{K}{(s+1)(s+2)(s+10)}$	$\frac{K(s+0,111)}{(s+1)(s+2)(s+10)(s+0,01)}$
K	164,6	158,1
K_p	8,23	87,75
$e(\infty)$	0,108	0,011
Pólos dominantes de segunda ordem	$-0,694 \pm j3,926$	$-0,678 \pm j3,836$
Terceiro pólo	-11,61	-11,55
Quarto pólo	Nenhum	-0,101
Zero	Nenhum	-0,111

Fig. 9.13

Respostas ao degrau do sistema não-compensado e do sistema compensado por atraso de fase para o Exemplo 9.2

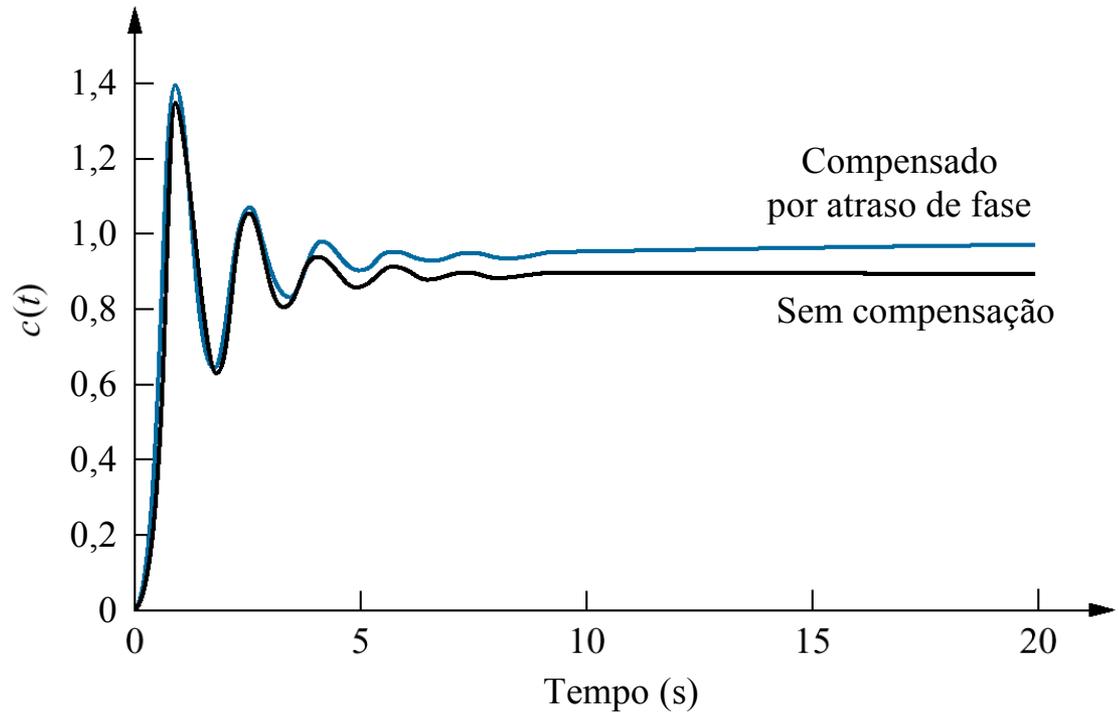


Fig. 9.14
 Respostas ao degrau do sistema do Exemplo 9.2 usando diferentes compensadores por atraso de fase

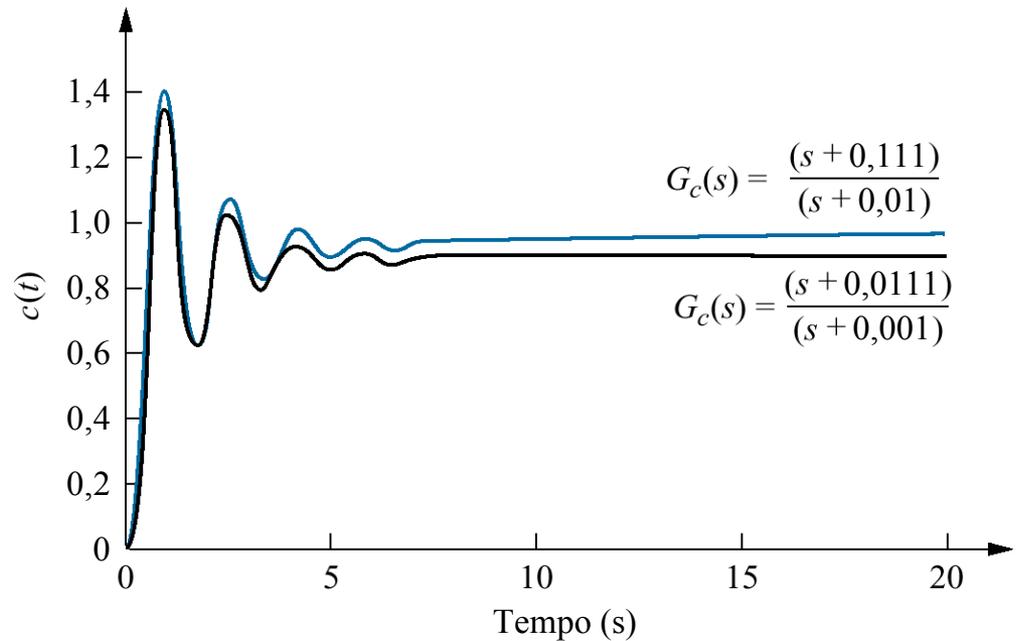


Fig. 9.15

Respostas ao degrau do sistema do Exemplo 9.2 usando diferentes compensadores por atraso de fase (a figura continua)

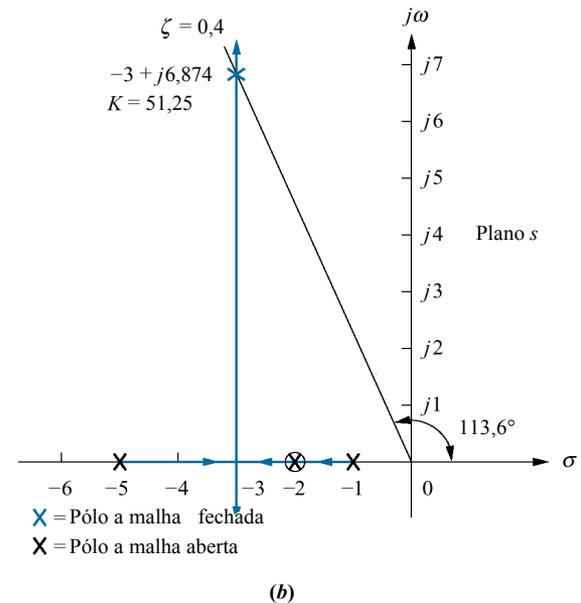
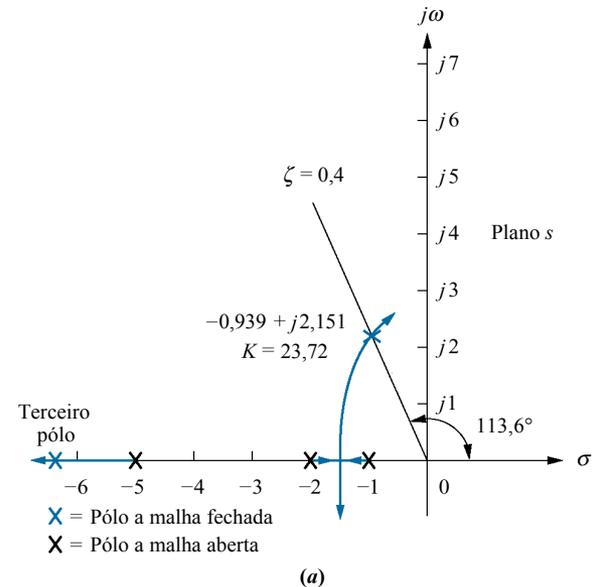


Fig. 9.15

(continuação)

c. com zero do compensador em -3 ;

d. com zero do compensador em -4

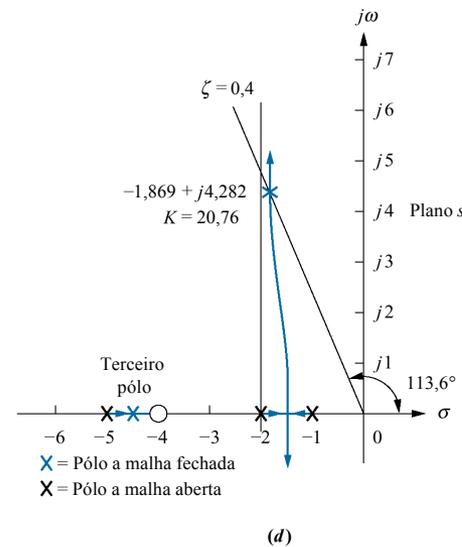
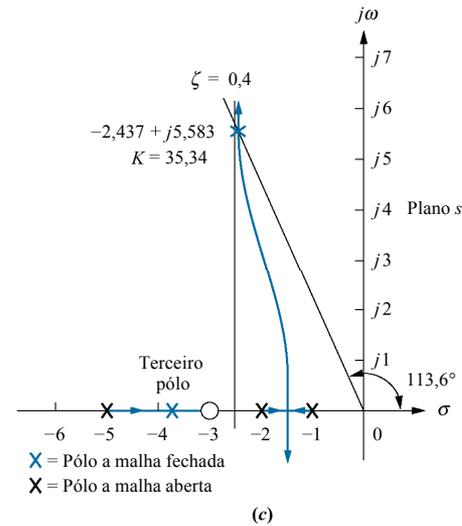


Fig. 9.16

Sistema não-compensado e soluções de compensação derivativa ideal com base na Tabela 9.2

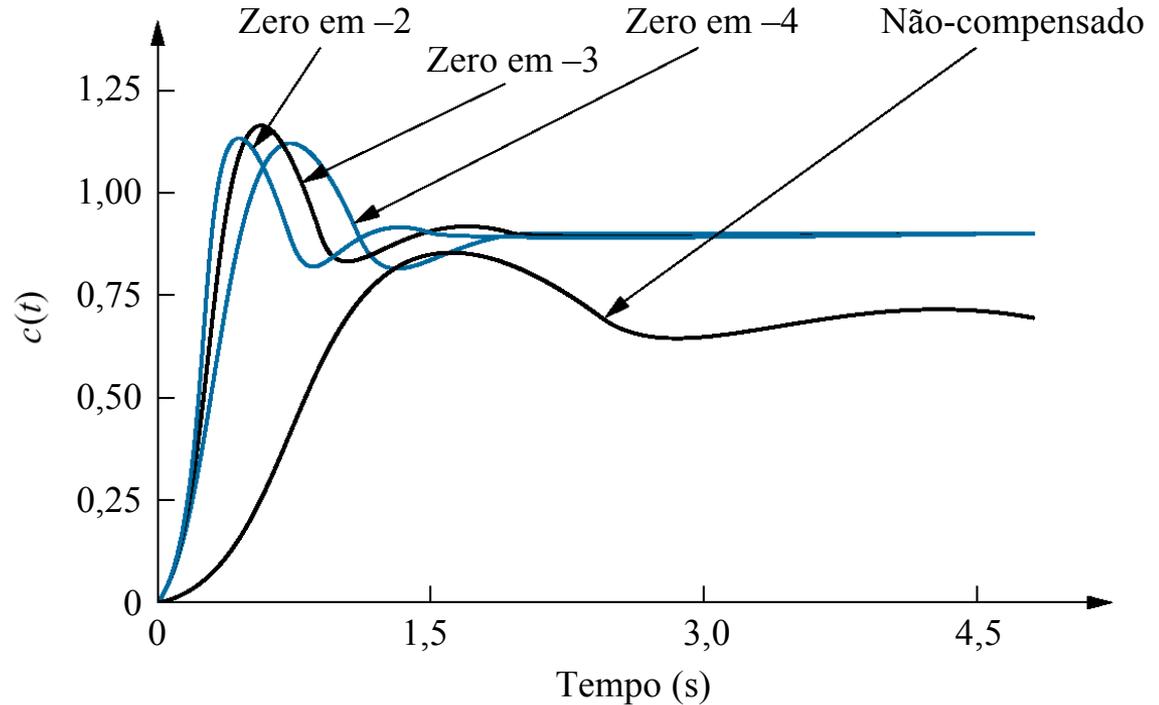


Tabela 9.2

Características previstas para os sistemas da Fig. 9.15

	Não-compensado	Compensação b	Compensação c	Compensação d
Processo e Compensador	$\frac{K}{(s+1)(s+2)(s+5)}$	$\frac{K(s+2)}{(s+1)(s+2)(s+5)}$	$\frac{K(s+3)}{(s+1)(s+2)(s+5)}$	$\frac{K(s+4)}{(s+1)(s+2)(s+5)}$
Pólos dom.	$-0,939 \pm j2,151$	$-3 \pm j6,874$	$-2,437 \pm j5,583$	$-1,869 \pm j4,282$
K	23,72	51,25	35,34	20,76
ζ	0,4	0,4	0,4	0,4
ω_n	2,347	7,5	6,091	4,673
%UP	25,38	25,38	25,38	25,38
T_s	4,26	1,33	1,64	2,14
T_p	1,46	0,46	0,56	0,733
K_p	2,372	10,25	10,6	8,304
$e(\infty)$	0,297	0,089	0,086	0,107
Terceiro pólo	-6,123	Nenhum	-3,127	-4,262
Zero	Nenhum	Nenhum	-3	-4
Comentários	Aprox. de 2ª ordem OK	Sistema de 2ª ordem puro	Aprox. de 2ª ordem OK	Aprox. de 2ª ordem OK

Fig. 9.17
Sistema de controle
com retroação
para o Exemplo 9.3

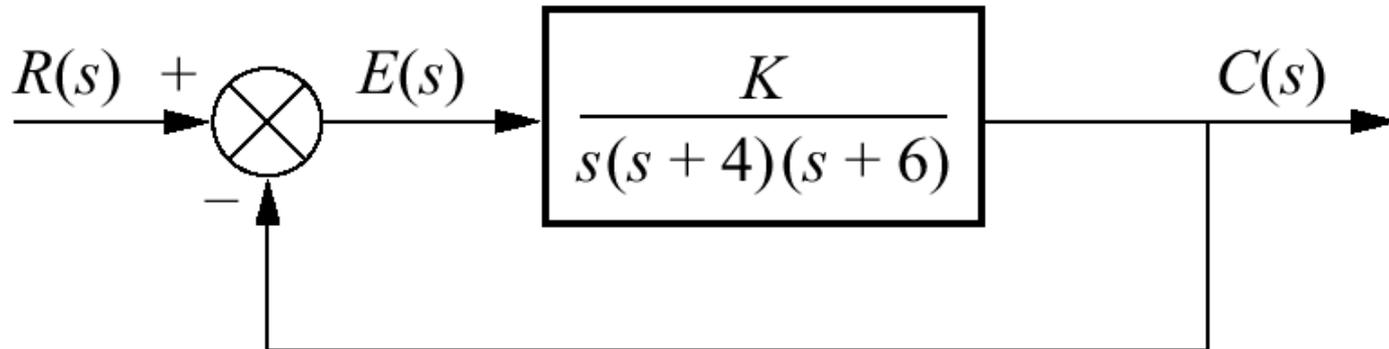


Fig. 9.18

Lugar das raízes do sistema não-compensado mostrado na Fig. 9.17

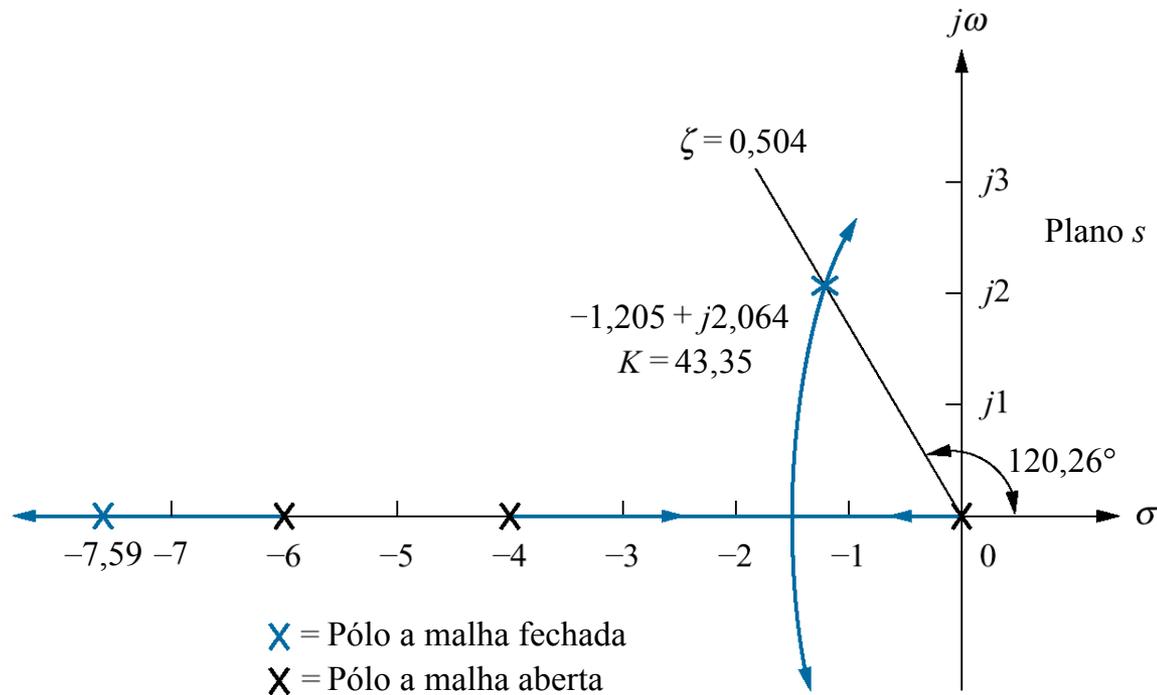


Tabela 9.3

Características dos sistemas não-compensado e compensado do Exemplo 9.3

	Não-compensado	Simulação	Compensado	Simulação
Processo e compensador	$\frac{K}{s(s+4)(s+6)}$		$\frac{K(s+3,006)}{s(s+4)(s+6)}$	
Pólos dominantes	$-1,205 \pm j2,064$		$-3,613 \pm j6,193$	
K	43,35		47,45	
ζ	0,504		0,504	
ω_n	2,39		7,17	
%UP	16	14,8	16	11,8
T_s	3,320	3,6	1,107	1,2
T_p	1,522	1,7	0,507	0,5
K_v	1,806		5,94	
$e(\infty)$	0,554		0,168	
Terceiro pólo	$-7,591$		$-2,775$	
Zero	Nenhum		$-3,006$	
Comentários	Aprox. de 2ª ordem OK		Não há cancelamento de pólo com zero	

Fig. 9.19
 Pólos dominantes do sistema compensado superpostos ao lugar das raízes do sistema não-compensado do Exemplo 9.3

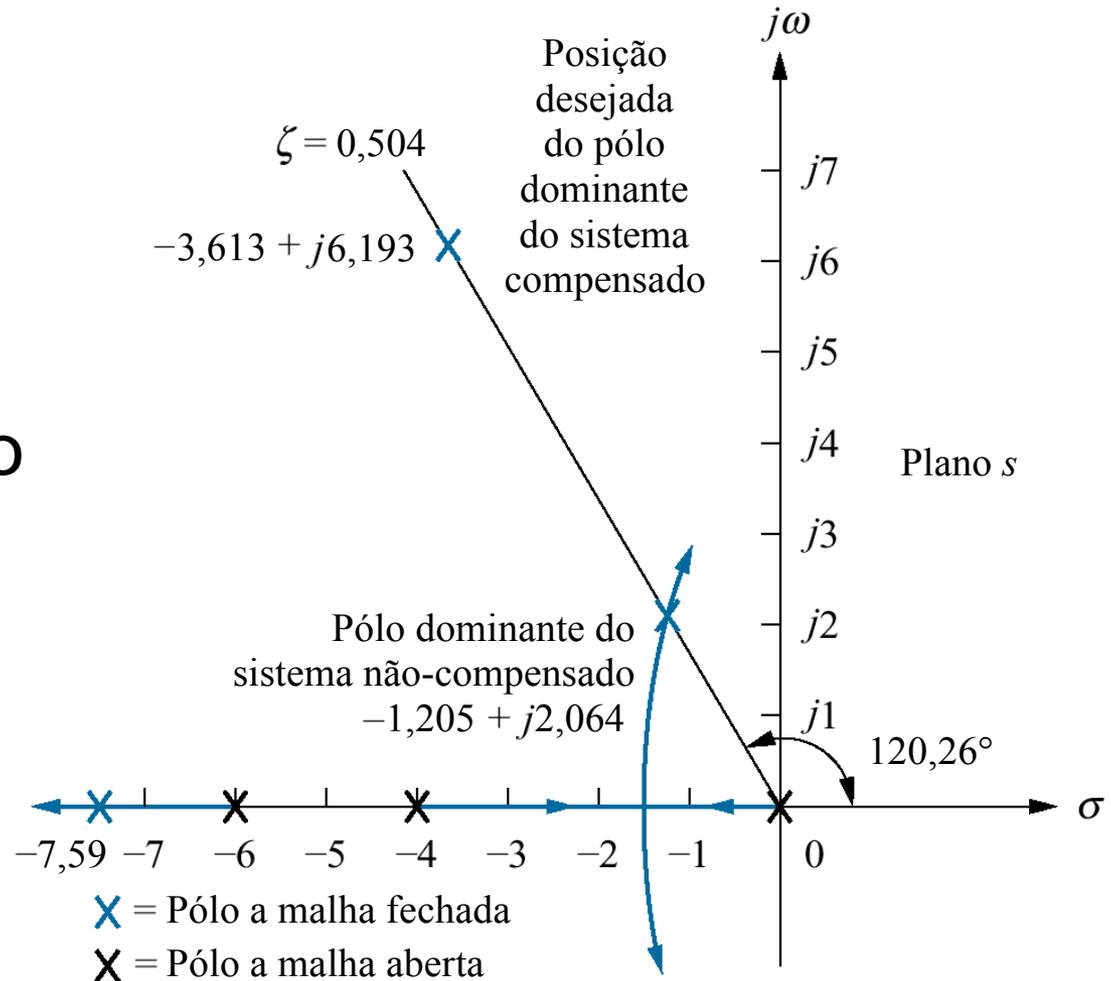


Fig. 9.20
 Calculando a
 localização do zero
 do compensador
 para o Exemplo 9.3

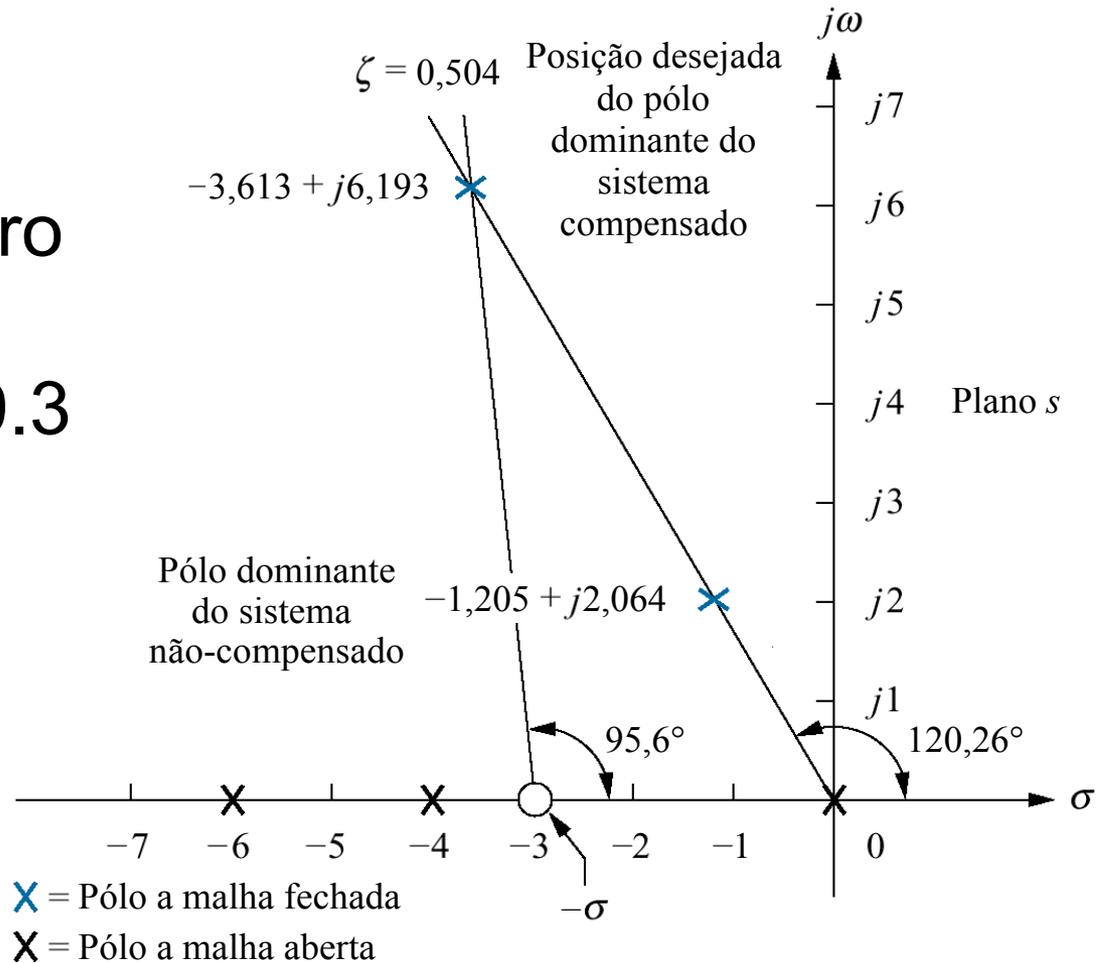


Fig. 9.21
Lugar das raízes do sistema não-compensado do Exemplo 9.3

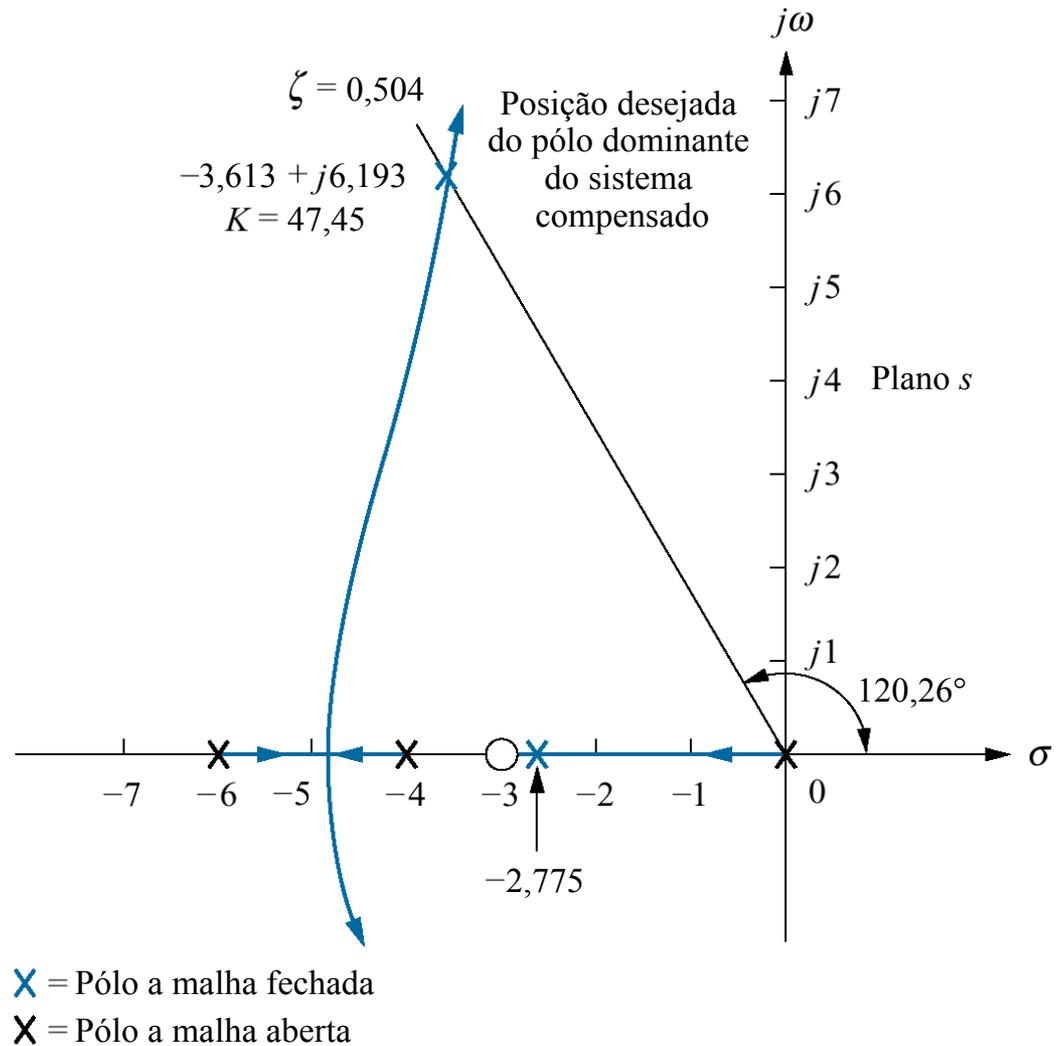


Fig. 9.22

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

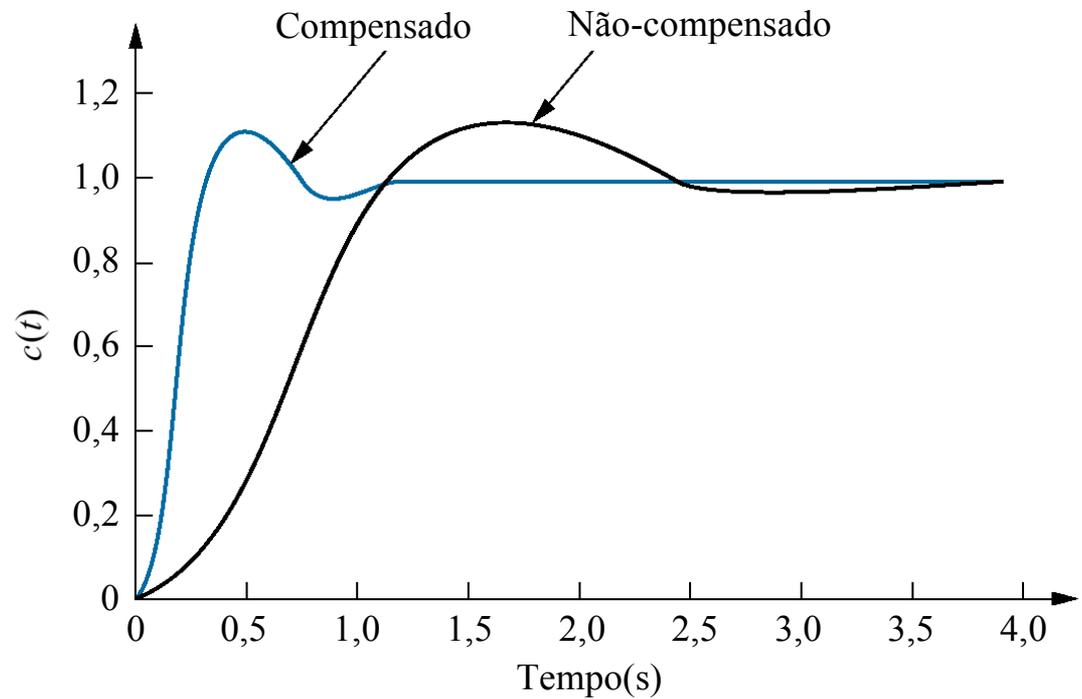


Fig. 9.23
Controlador PD

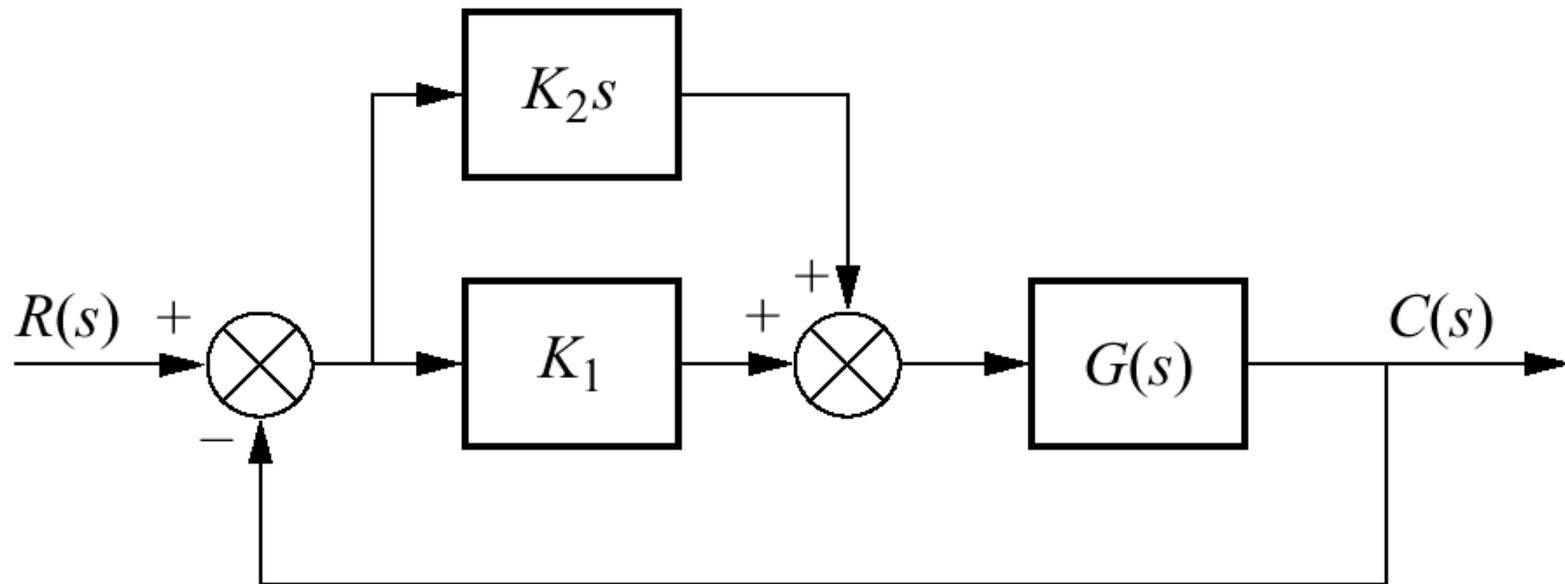


Fig. 9.24

Geometria da compensação por avanço de fase

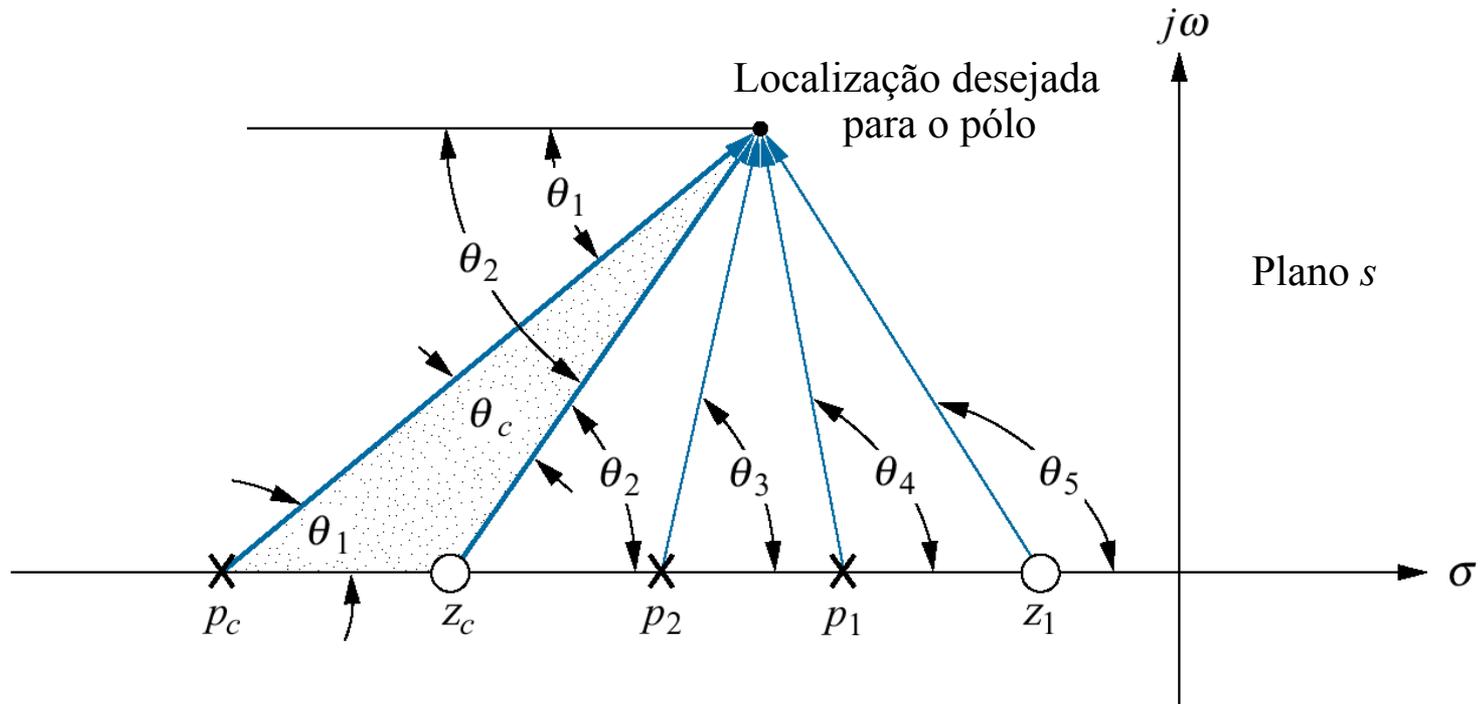


Fig. 9.25

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

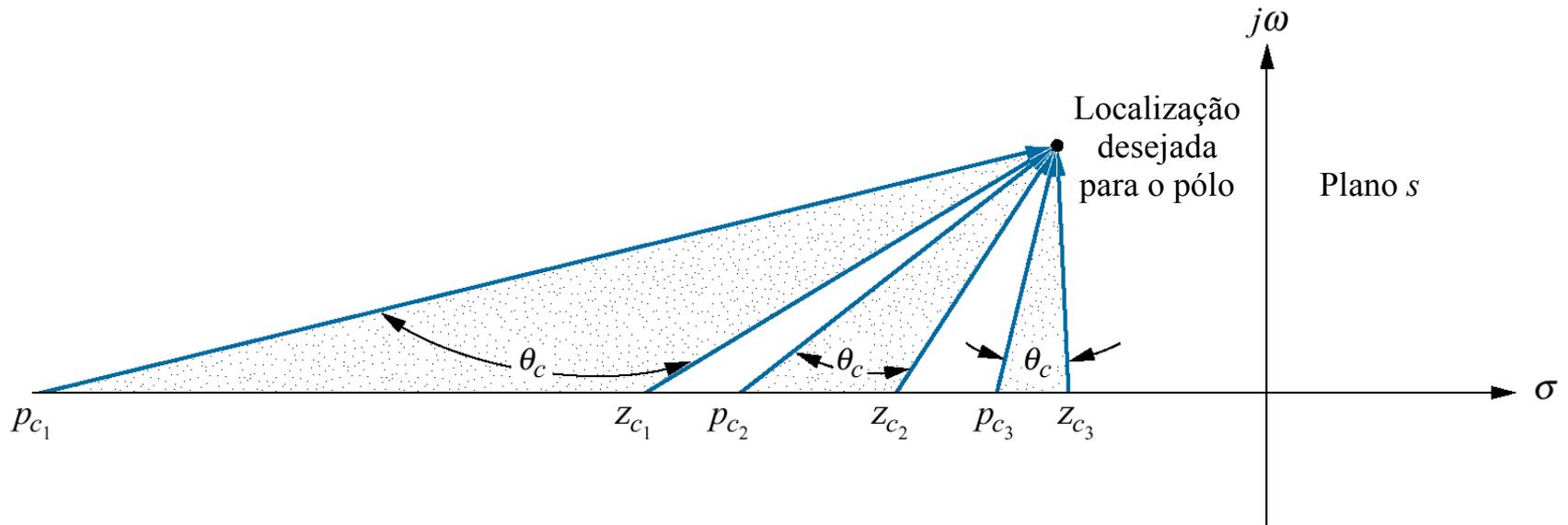


Fig. 9.26
 Projeto de compensador de avanço de fase, mostrando o cálculo de pólos dominantes compensados e não-compensados para o Exemplo 9.4

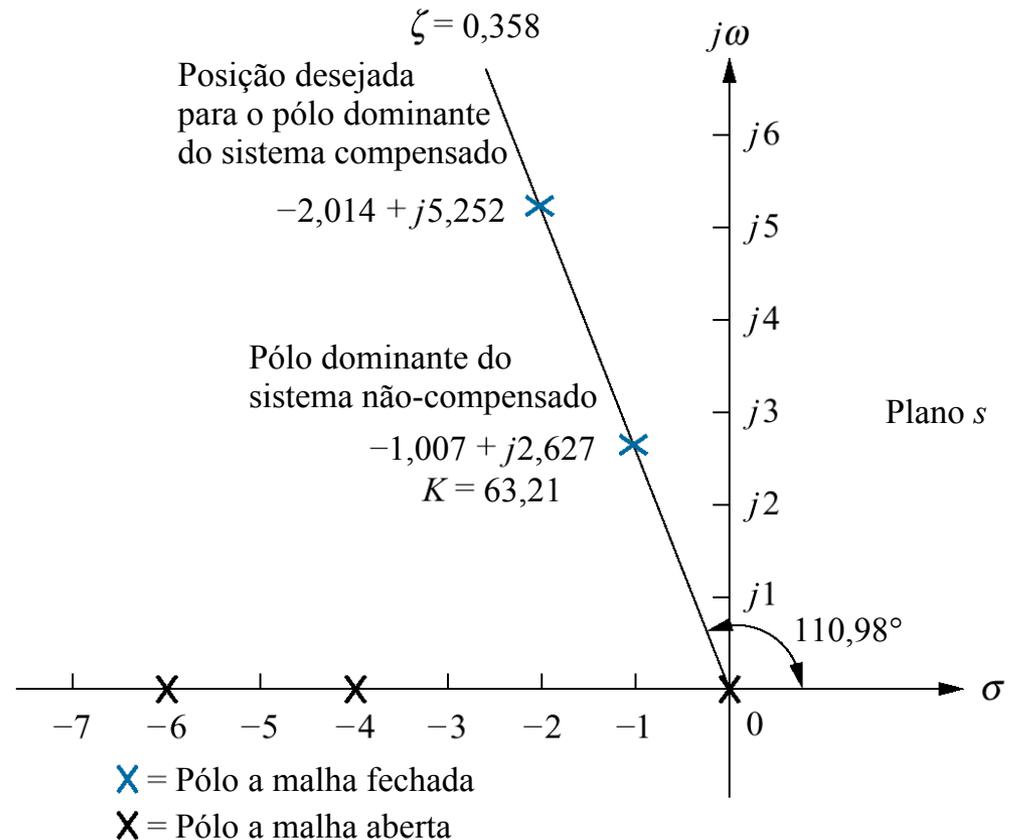


Tabela 9.4

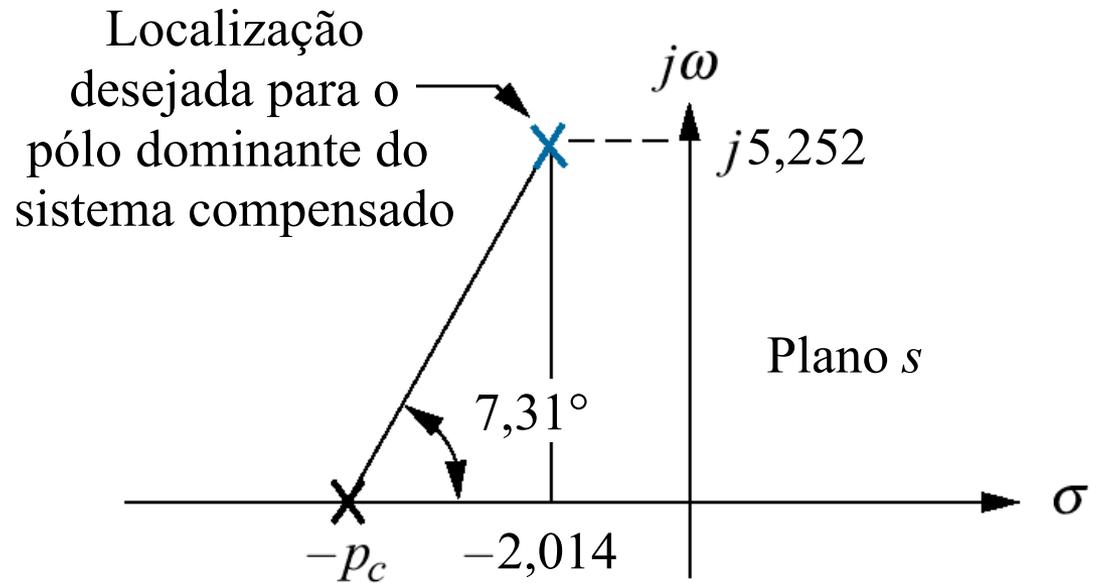
Comparação entre projetos de compensação por avanço de fase do Exemplo 9.4

	Não-compensado	Compensação a	Compensação b	Compensação c
Processo e compensador	$\frac{K}{s(s+4)(s+6)}$	$\frac{K(s+5)}{s(s+4)(s+6)(s+42,96)}$	$\frac{K(s+4)}{s(s+4)(s+6)(s+20,09)}$	$\frac{K(s+2)}{s(s+4)(s+6)(s+8,971)}$
Pólos dominantes	$-1,007 \pm j2,627$	$-2,014 \pm j5,252$	$-2,014 \pm j5,252$	$-2,014 \pm j5,252$
K	63,21	1423	698,1	345,6
ζ	0,358	0,358	0,358	0,358
ω_n	2,813	5,625	5,625	5,625
%UP	30(28)	30(30,7)	30(28,2)	30(14,5)
T_s	3,972(4)	1,986(2)	1,986(2)	1,986(1,7)
T_p	1,196(1,3)	0,598(0,6)	0,598(0,6)	0,598(0,7)
K_v	2,634	6,9	5,791	3,21
$e(\infty)$	0,380	0,145	0,173	0,312
Outros pólos	-7,986	-43,8, -5,134	-22,06	-13,3, -1,642
Zero	Nenhum	-5	Nenhum	-2
Comentários	Aprox. de 2ª ordem OK	Aprox. de 2ª ordem OK	Aprox. de 2ª ordem OK	Não há cancelamento de pólo com zero

Nota: Os resultados de simulação estão mostrados entre parênteses

Fig. 9.27

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



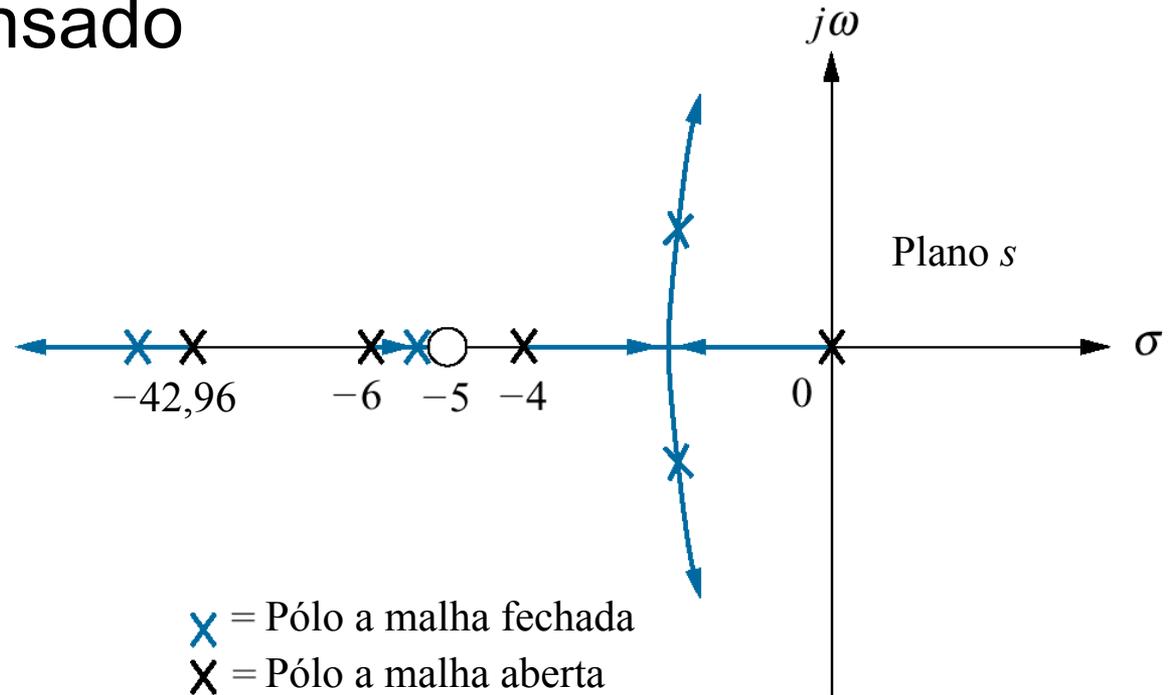
X = Pólo a malha fechada

X = Pólo a malha aberta

Nota: Esta figura não está desenhada em escala

Fig. 9.28

Lugar das raízes do sistema compensado



Nota: Esta figura não está desenhada em escala

Fig. 9.29

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

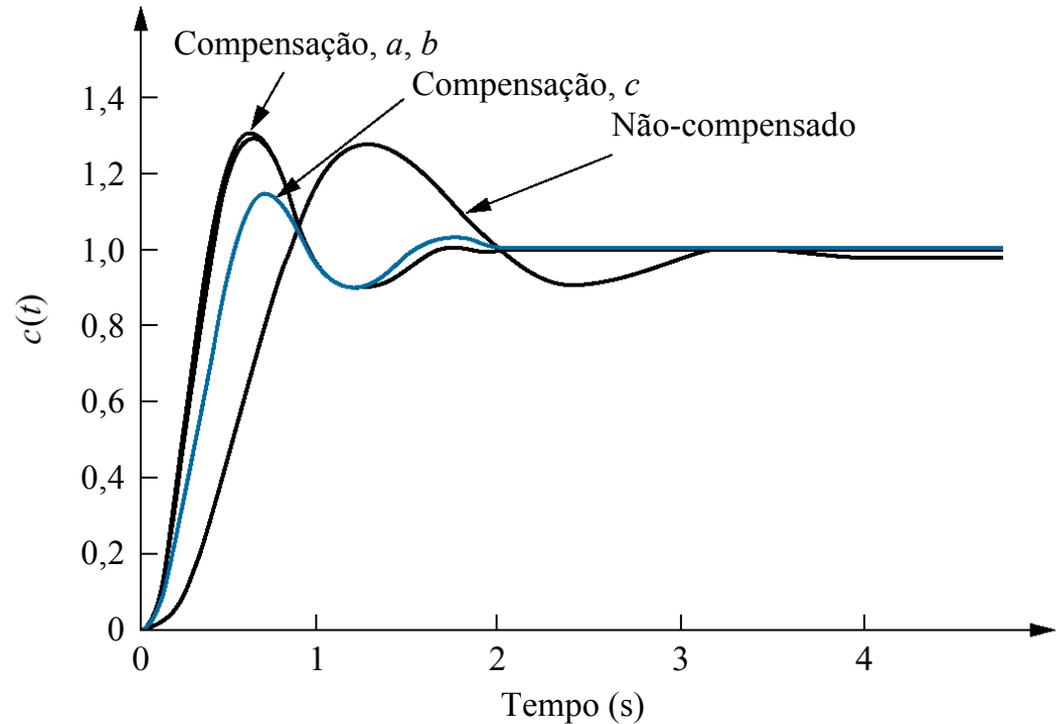


Fig. 9.30
Controlador PID

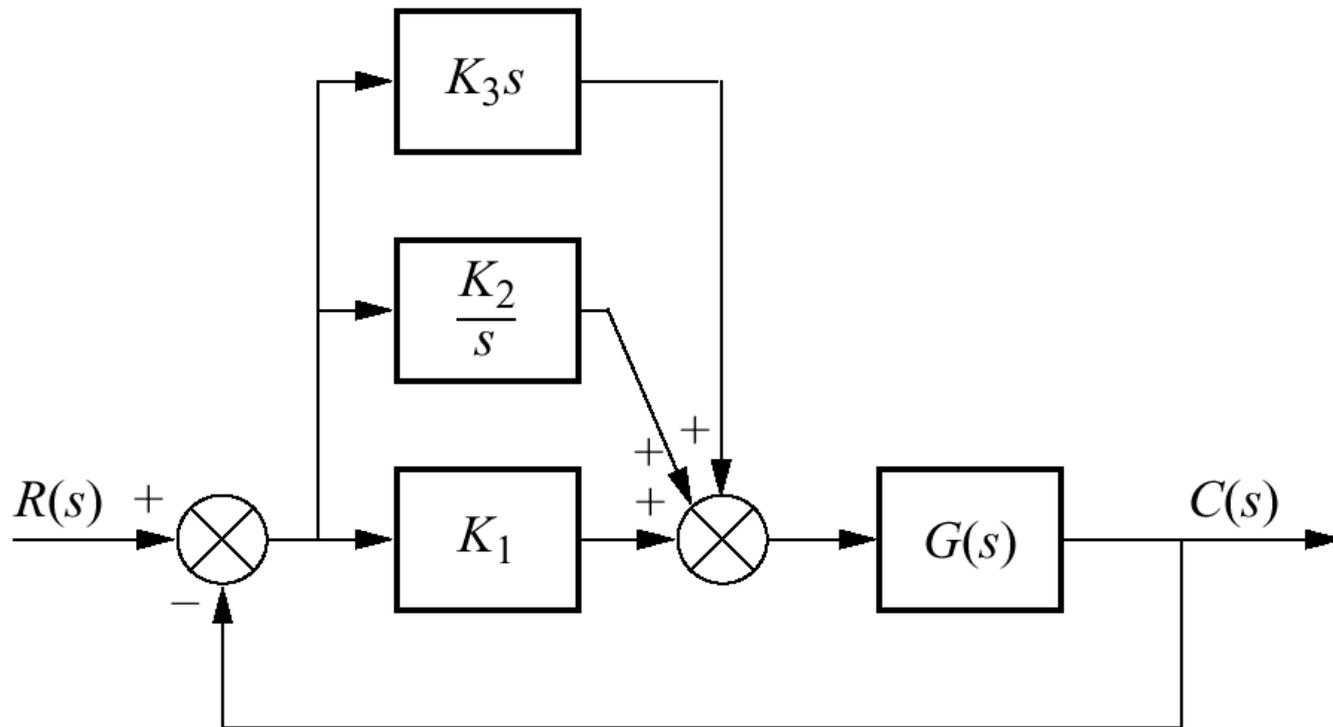


Fig. 9.31

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

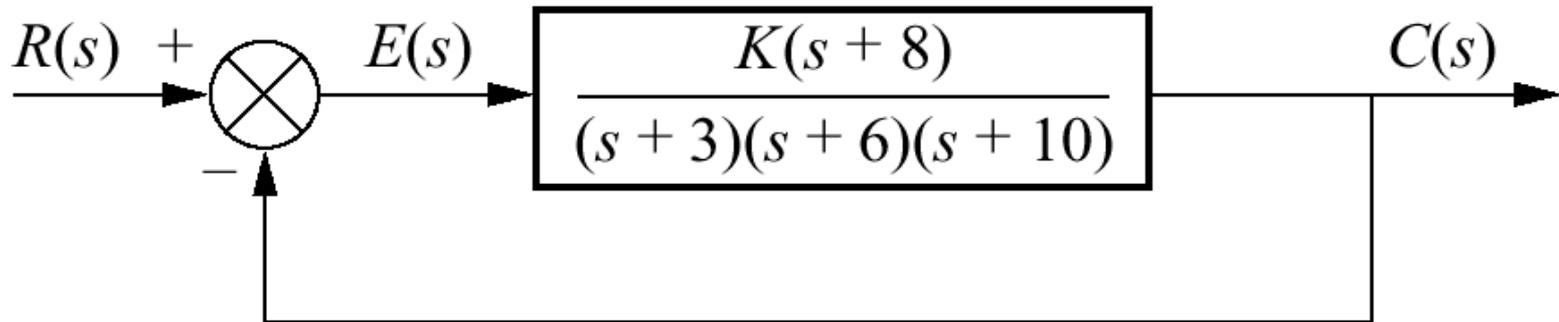


Fig. 9.32

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

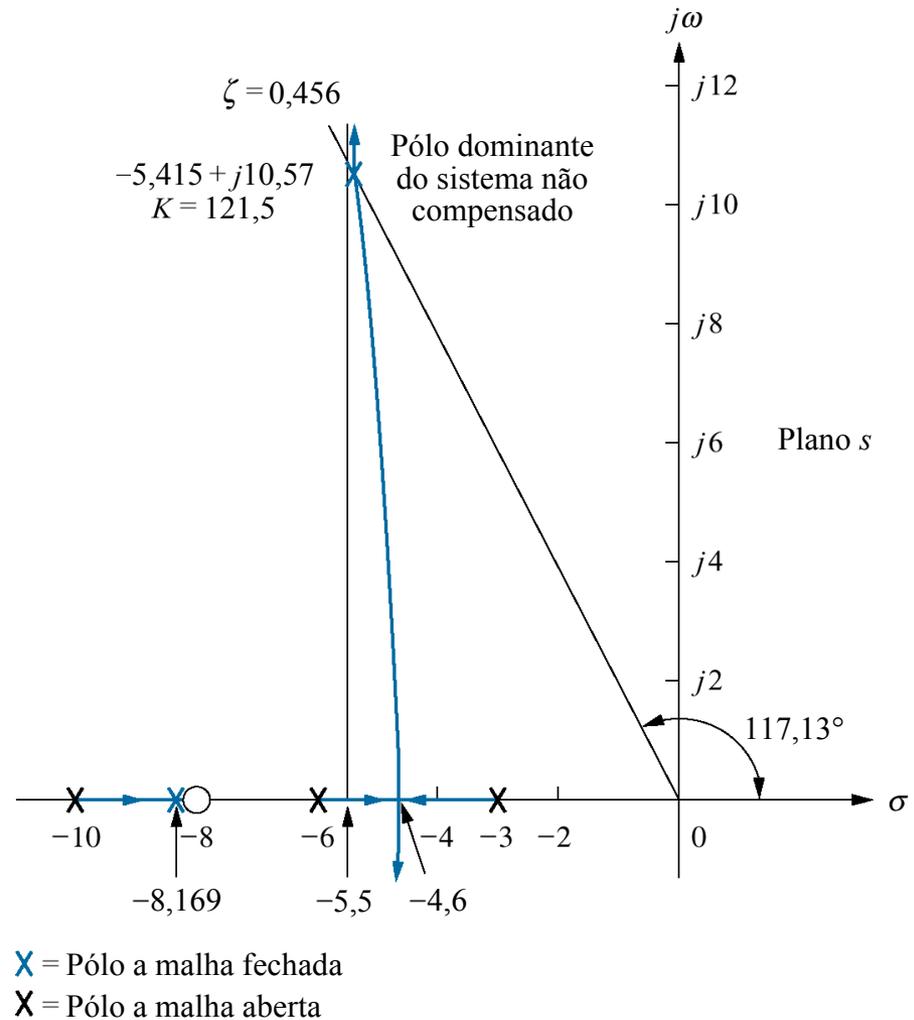


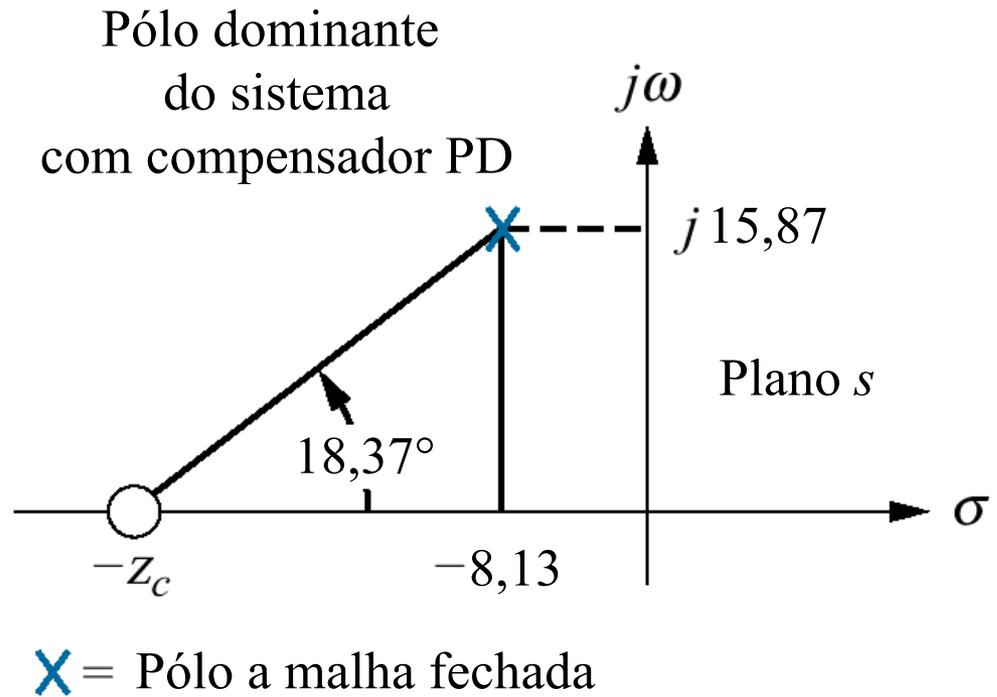
Tabela 9.5

Características previstas dos sistemas não-compensado e com compensadores PD e PID do Exemplo 9.5

Parâmetro	Não-compensado	Compensador PD	Compensador PID
Processo e compensador	$\frac{K(s+8)}{(s+3)(s+6)(s+10)}$	$\frac{K(s+8)(s+55,92)}{(s+3)(s+6)(s+10)}$	$\frac{K(s+8)(s+55,92)(s+0,5)}{(s+3)(s+6)(s+10)s}$
Pólos dominantes	$-5,415 \pm j10,57$	$-8,13 \pm j15,87$	$-7,516 \pm j14,67$
K	121,5	5,34	4,6
ζ	0,456	0,456	0,456
ω_n	11,88	17,83	16,49
%UP	20	20	20
T_s	0,739	0,492	0,532
T_p	0,297	0,198	0,214
K_p	5,4	13,27	∞
$e(\infty)$	0,156	0,070	0
Outros pólos	-8,169	-8,079	-8,099, -0,468
Zeros	-8	-8, -55,92	-8, -55,92, -0,5
Comentários	Aprox. de 2ª ordem OK	Aprox. de 2ª ordem OK	Zeros em -55,92 e em -0,5 não são cancelados

Fig. 9.33

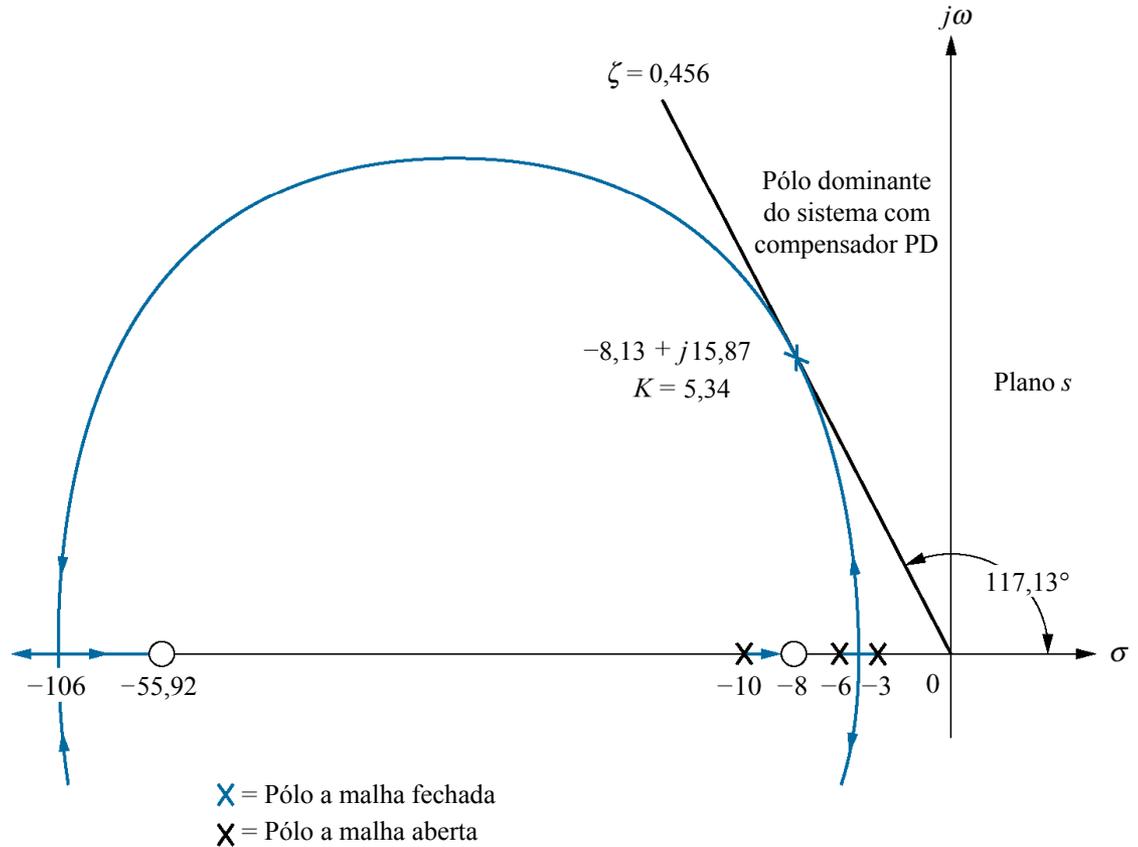
Calculando o zero do compensador PD para o Exemplo 9.5



Nota: Esta figura não está desenhada em escala

Fig. 9.34

Lugar das raízes para o sistema compensado PD do Exemplo 9.5



Nota: Esta figura não está desenhada em escala

Fig. 9.35

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

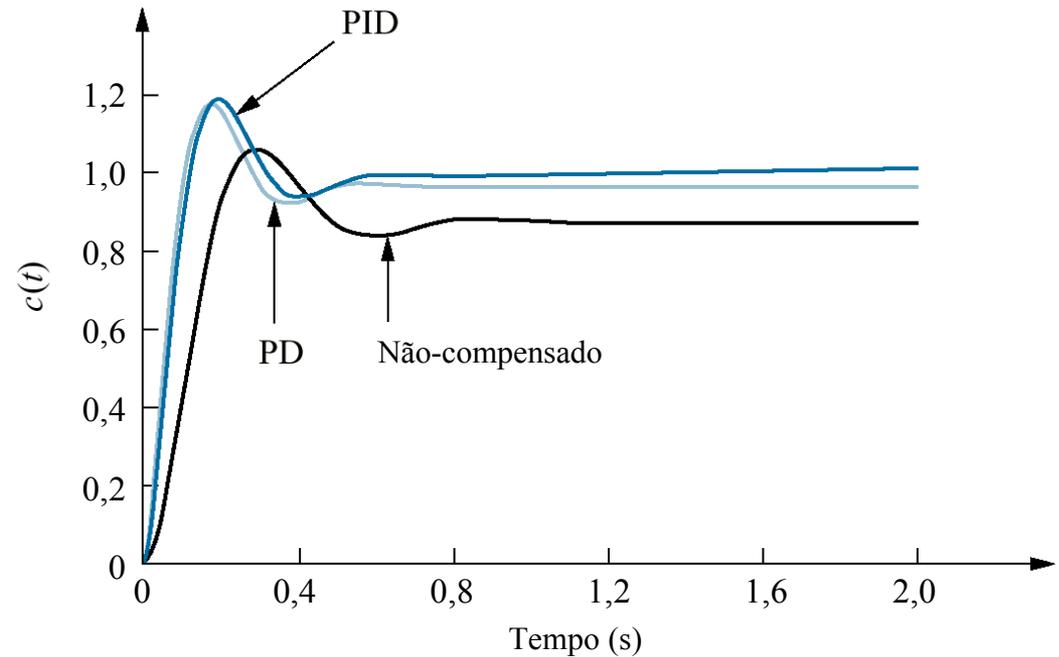
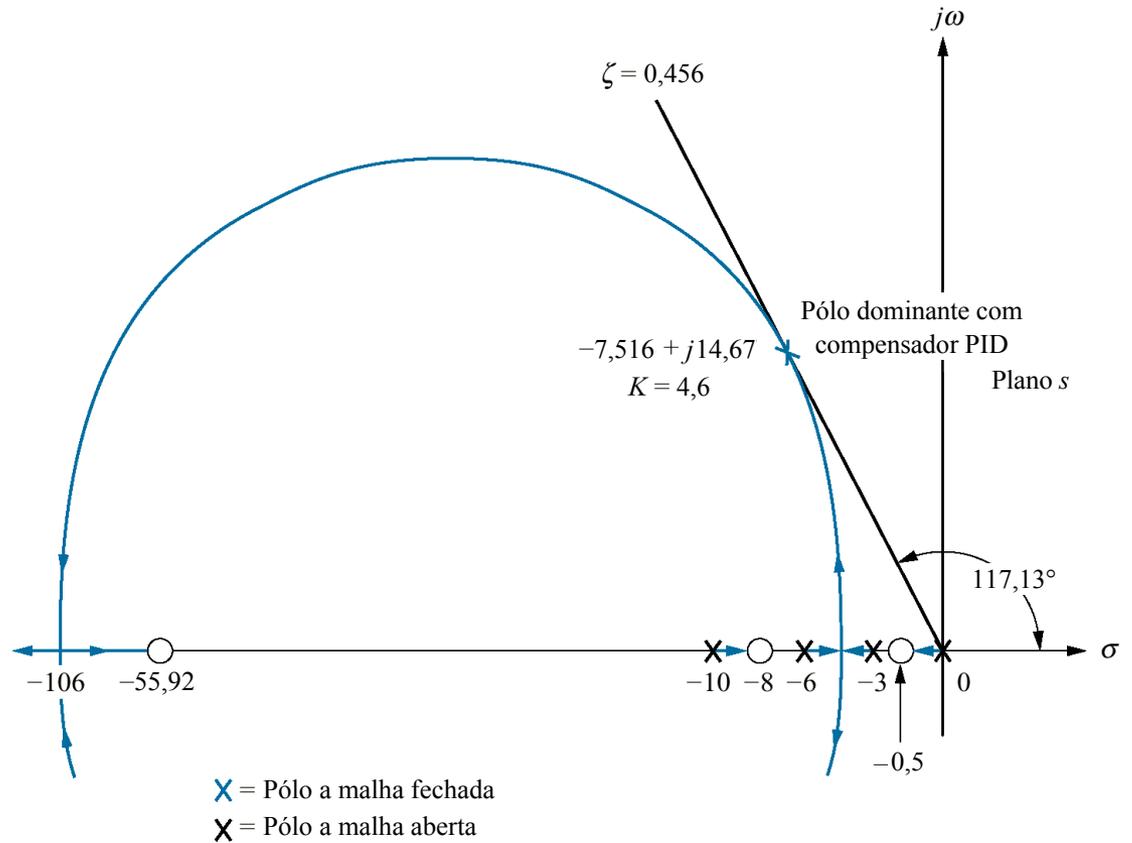


Fig. 9.36

Lugar das raízes para sistema compensado com PID do Exemplo 9.5



Nota: Esta figura não está em escala

Fig. 9.37
Sistema não-compensado
para o Exemplo 9.6

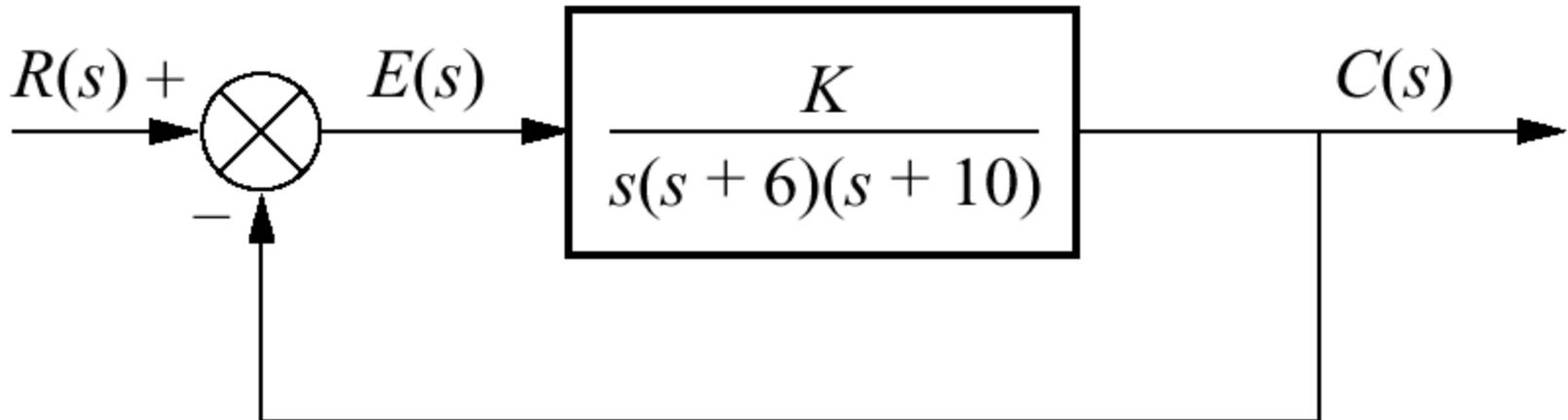


Fig. 9.38

Lugar das raízes para o sistema não-compensado do Exemplo 9.6

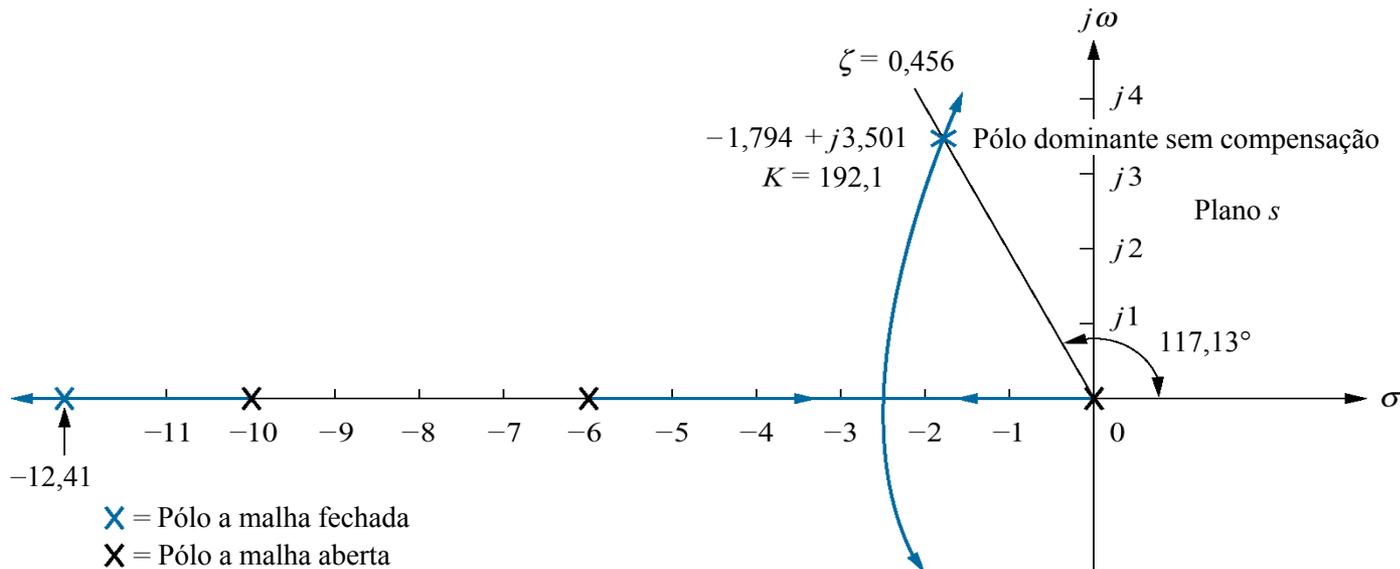


Tabela 9.6

Características previstas dos sistemas não-compensado e com compensadores por avanço de fase e atraso-avanço de fase do Exemplo 9.6

Parâmetro	Não-compensado	Compensado por avanço de fase	Compensado por atraso de fase
Processo e compensador	$\frac{K}{s(s+6)(s+10)}$	$\frac{K}{s(s+10)(s+29,1)}$	$\frac{K(s+0,04713)}{s(s+10)(s+29,1)(s+0,01)}$
Pólos dominantes	$-1,794 \pm j3,501$	$-3,588 \pm j7,003$	$-3,574 \pm j6,976$
K	192,1	1977	1971
ζ	0,456	0,456	0,456
ω_n	3,934	7,869	7,838
%UP	20	20	20
T_s	2,230	1,115	1,119
T_p	0,897	0,449	0,450
K_v	3,202	6,794	31,92
$e(\infty)$	0,312	0,147	0,0313
Terceiro pólo	-12,41	-31,92	-31,91, -0,0474
Zero	Nenhum	Nenhum	-0,04713
Comentários	Aprox. de 2ª ordem OK	Aprox. de 2ª ordem OK	Aprox. de 2ª ordem OK

Fig. 9.39

Calculando o pólo compensado para o Exemplo 9.6

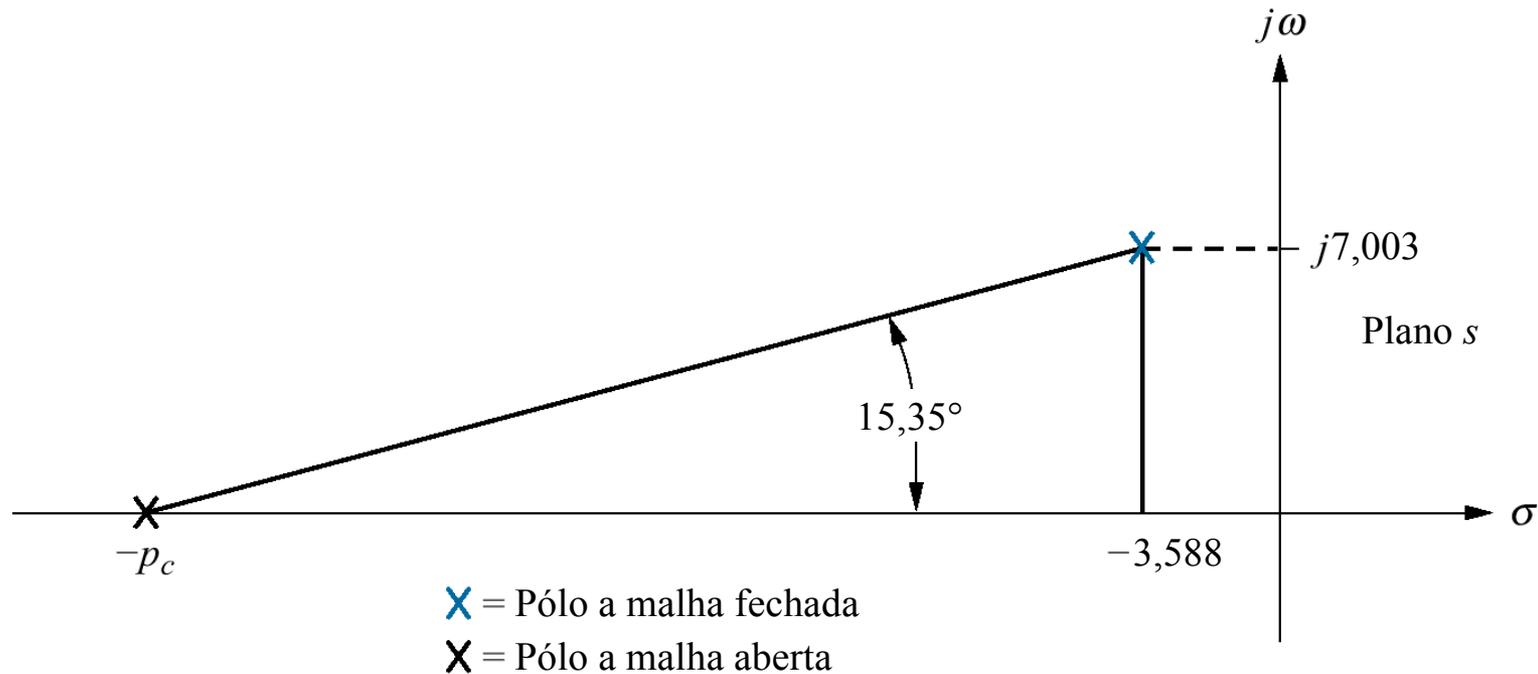


Fig. 9.40

Lugar das raízes para o sistema compensado por avanço de fase do Exemplo 9.6

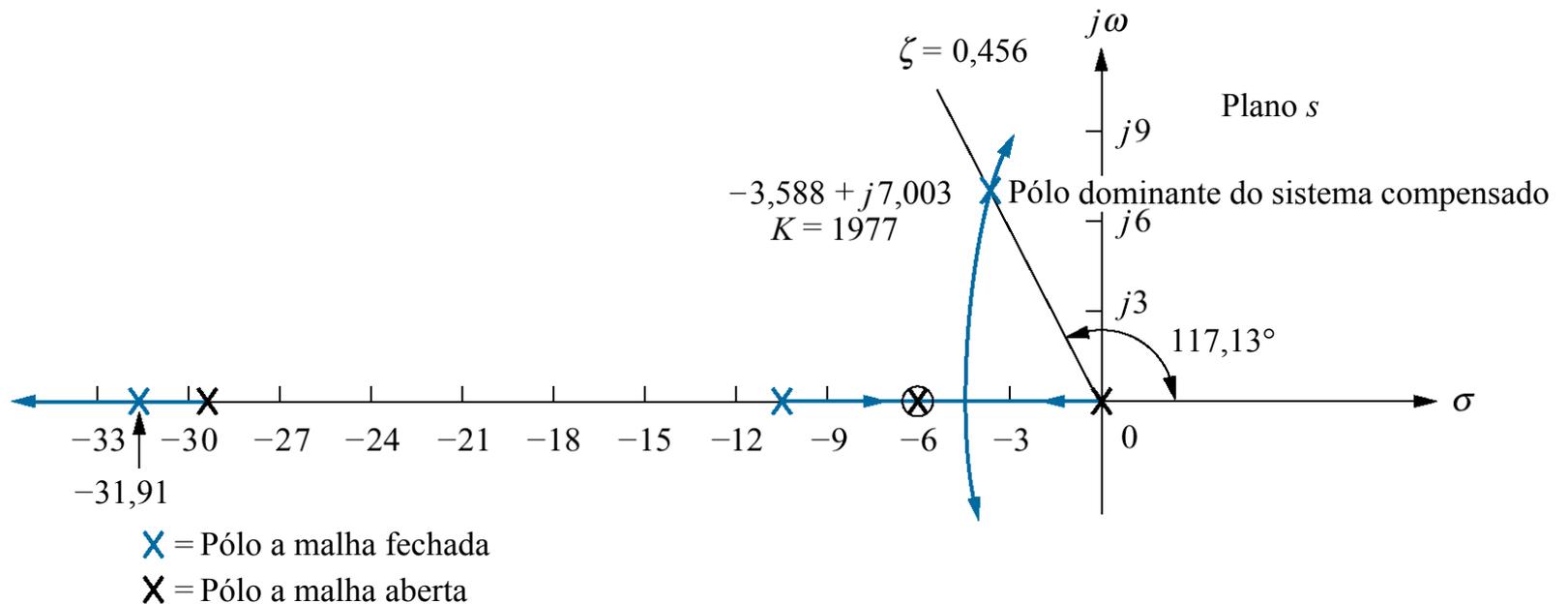


Fig. 9.41

Lugar das raízes para sistema compensado por atraso e avanço de fase do Exemplo 9.6

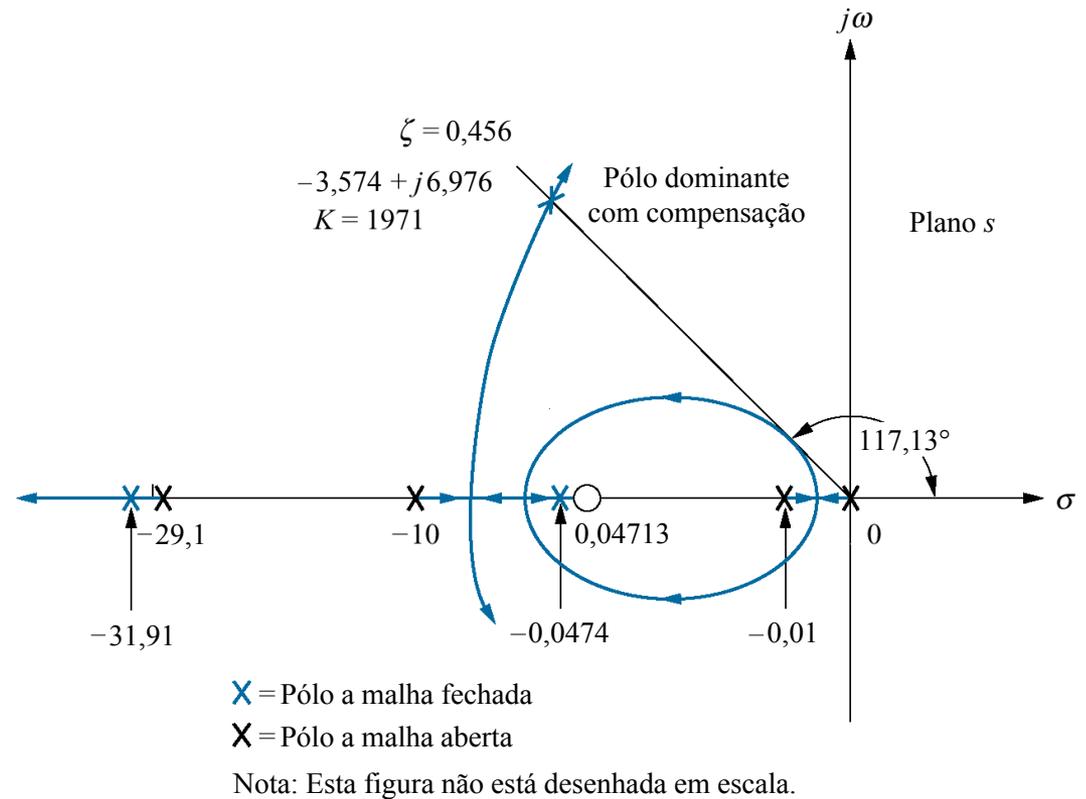


Fig. 9.42

Melhoria da resposta ao degrau para o sistema compensado por atraso e avanço de fase do Exemplo 9.6

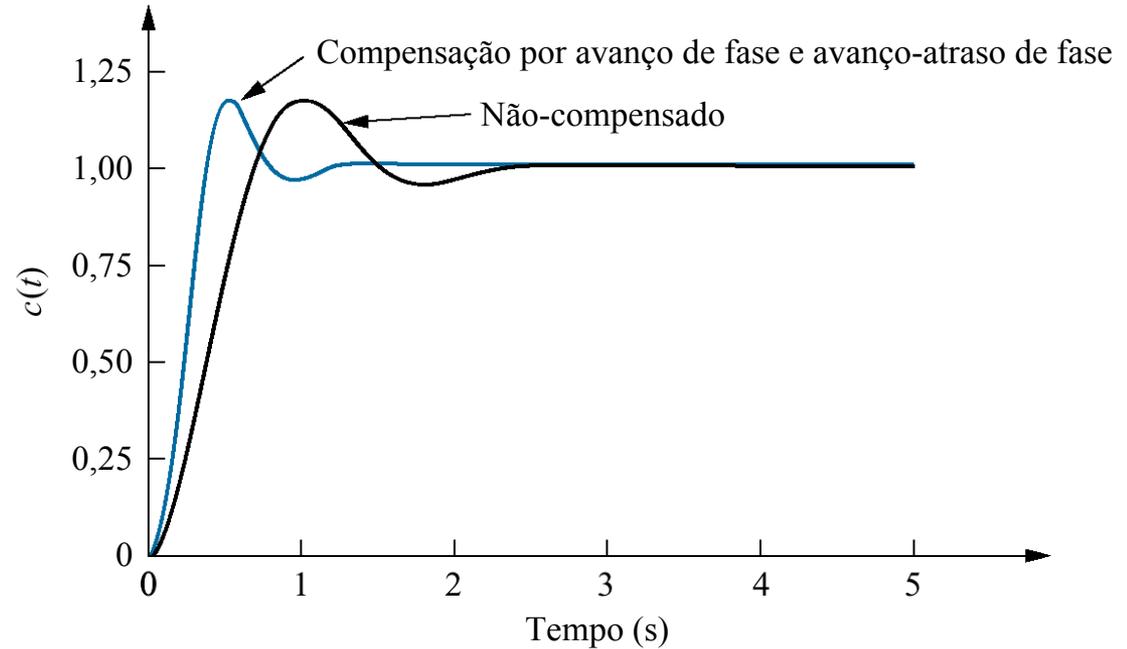


Fig. 9.43

Melhoria no erro de resposta à rampa para o sistema do Exemplo 9.6:

- a. compensado por avanço de fase;
- b. compensado por atraso e avanço de fase

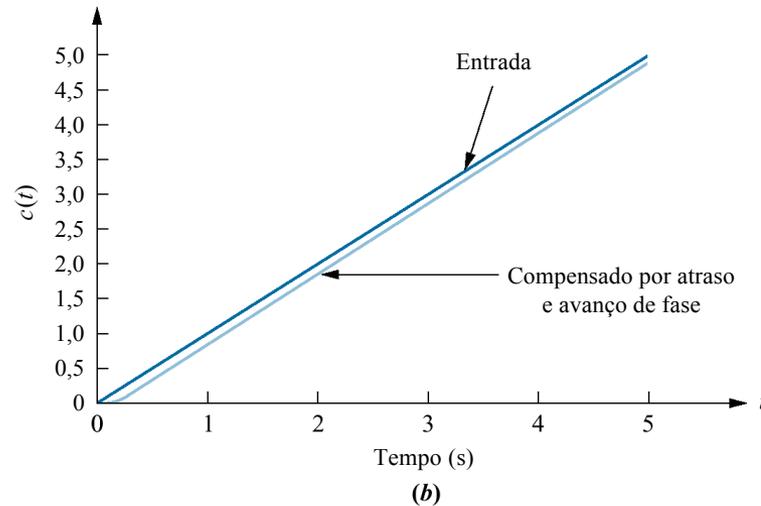
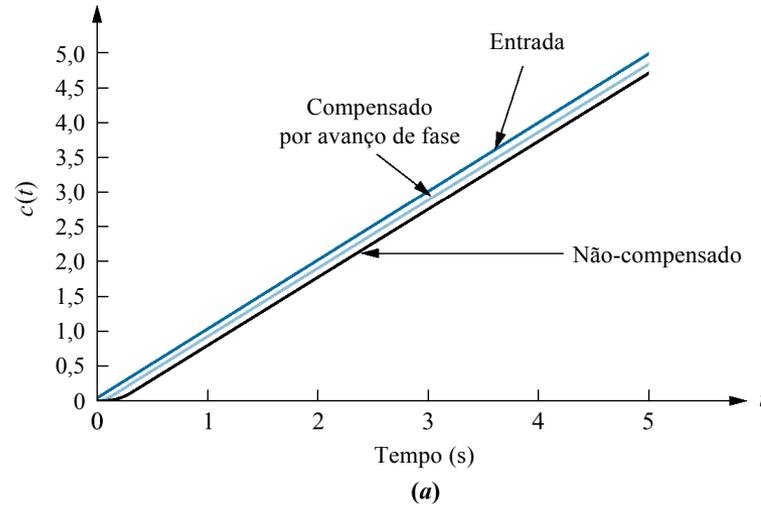


Fig. 9.44

a. Lugar das raízes antes da inserção de um filtro supressor de faixa;

b. resposta típica de um sistema a malha fechada ao degrau antes da inserção em cascata de um filtro supressor de faixa;
(*continua*)

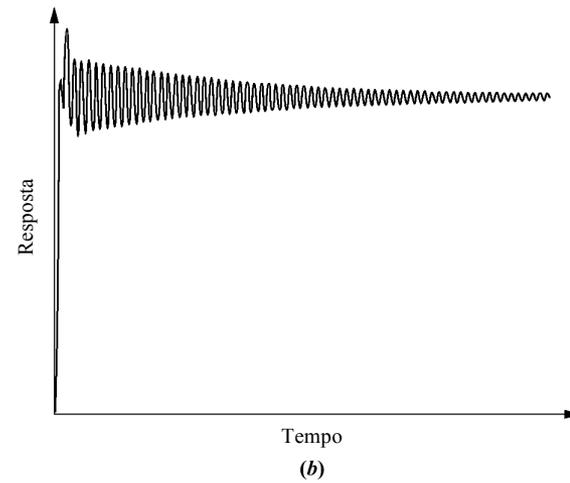
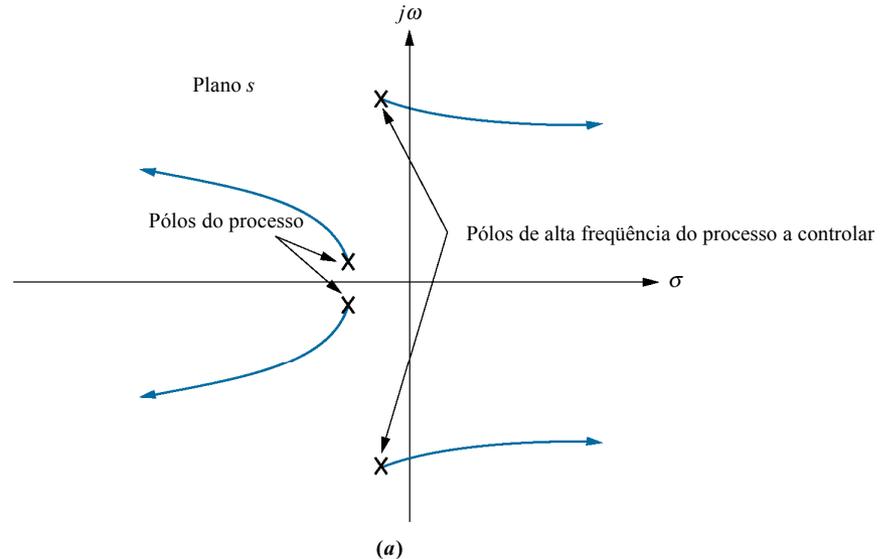


Fig.9.44

(continuação)

- c. diagrama de pólos e zeros de um filtro supressor de faixa;
- d. lugar das raízes depois da inserção em cascata de um filtro supressor de faixa;
- e. resposta ao degrau a malha fechada depois da inserção em cascata de um filtro supressor de faixa

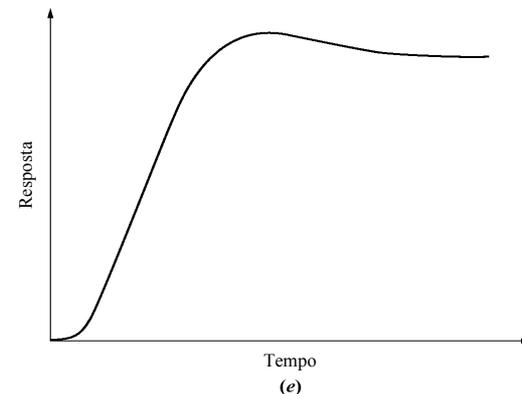
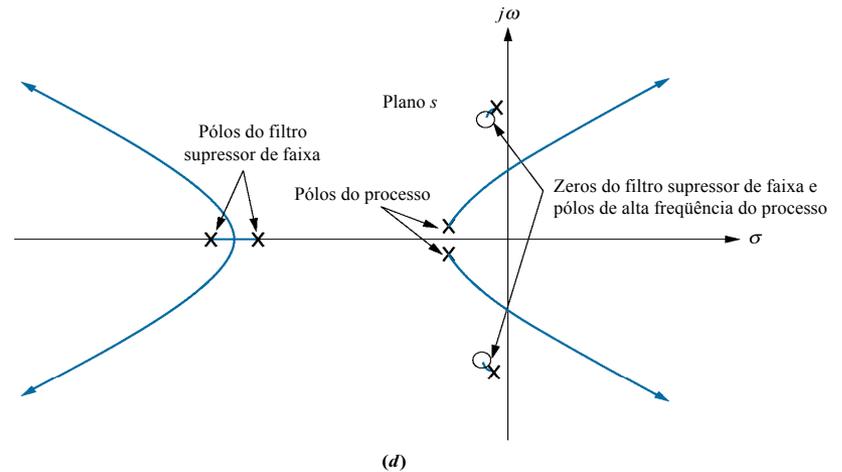
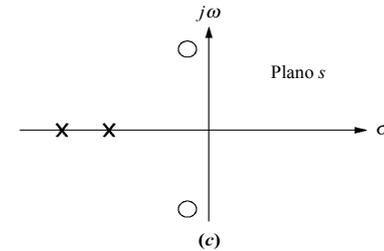


Fig. 9.45

Sistema de controle genérico com compensação em retroação

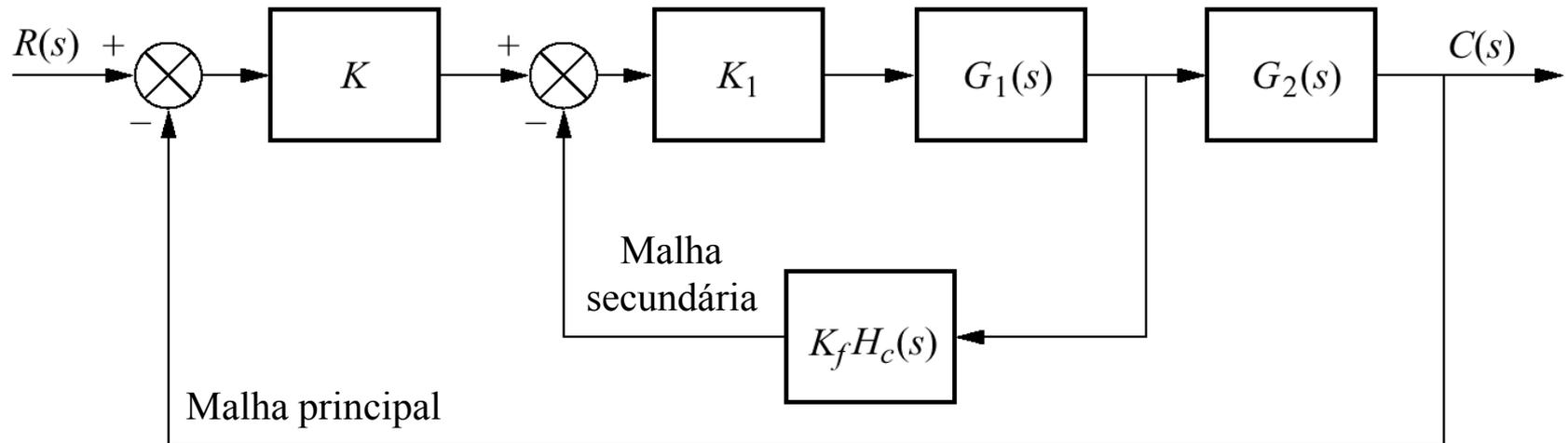
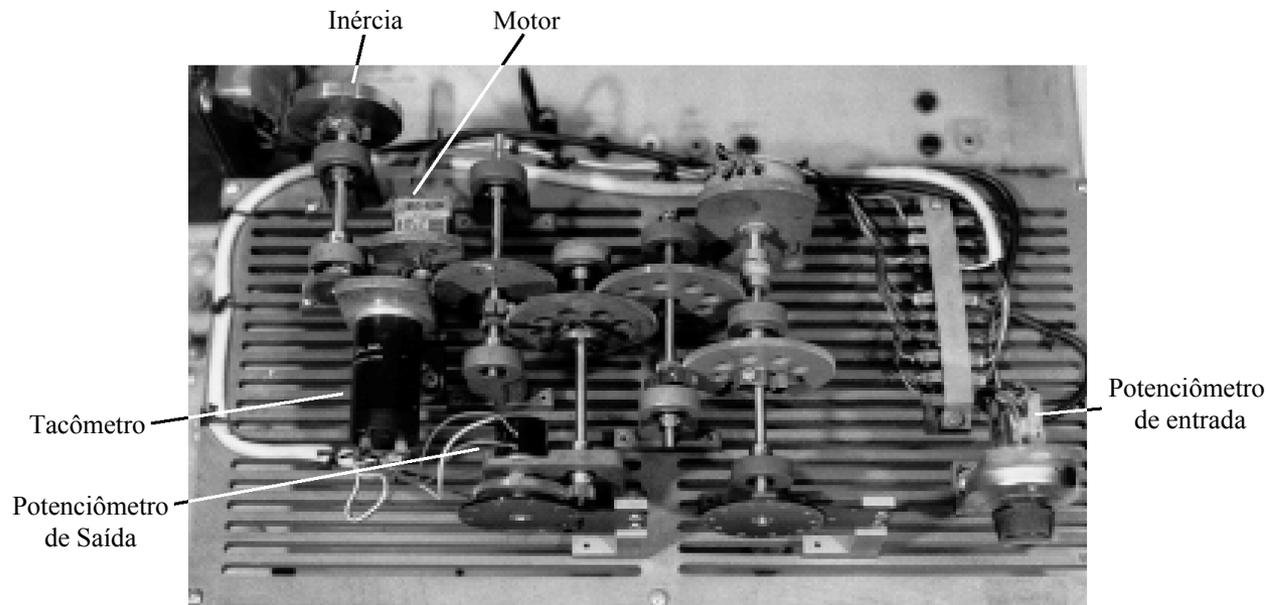


Fig. 9.46

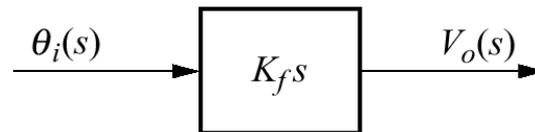
Um sistema de controle de posicionamento que utiliza um tacômetro como derivador no canal de retroação



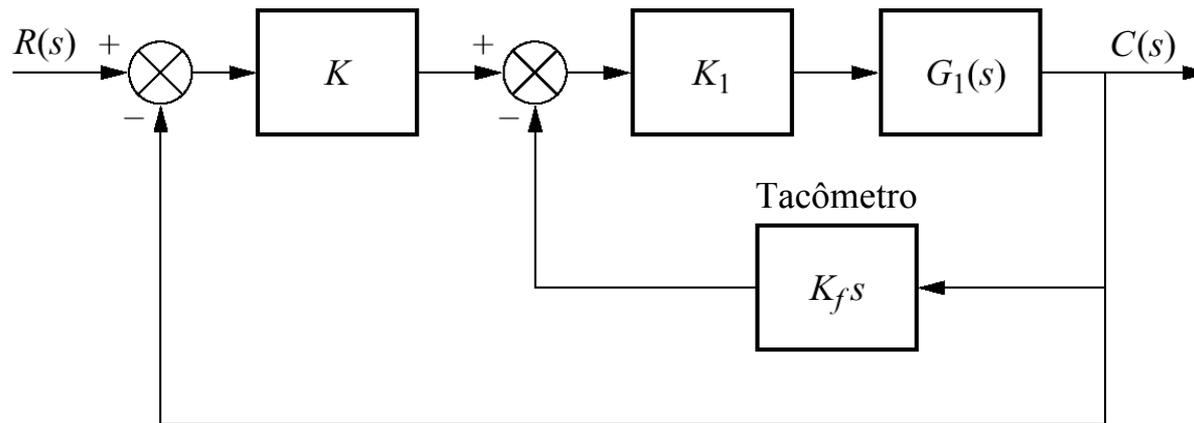
Fotografia de Mark E. Van Dusen.

Fig. 9.47

- a. Função de transferência de um tacômetro;
- b. compensação em retroação com tacômetro



(a)



(b)

Fig. 9.48

Diagrama de blocos
equivalentes da Fig. 9.45

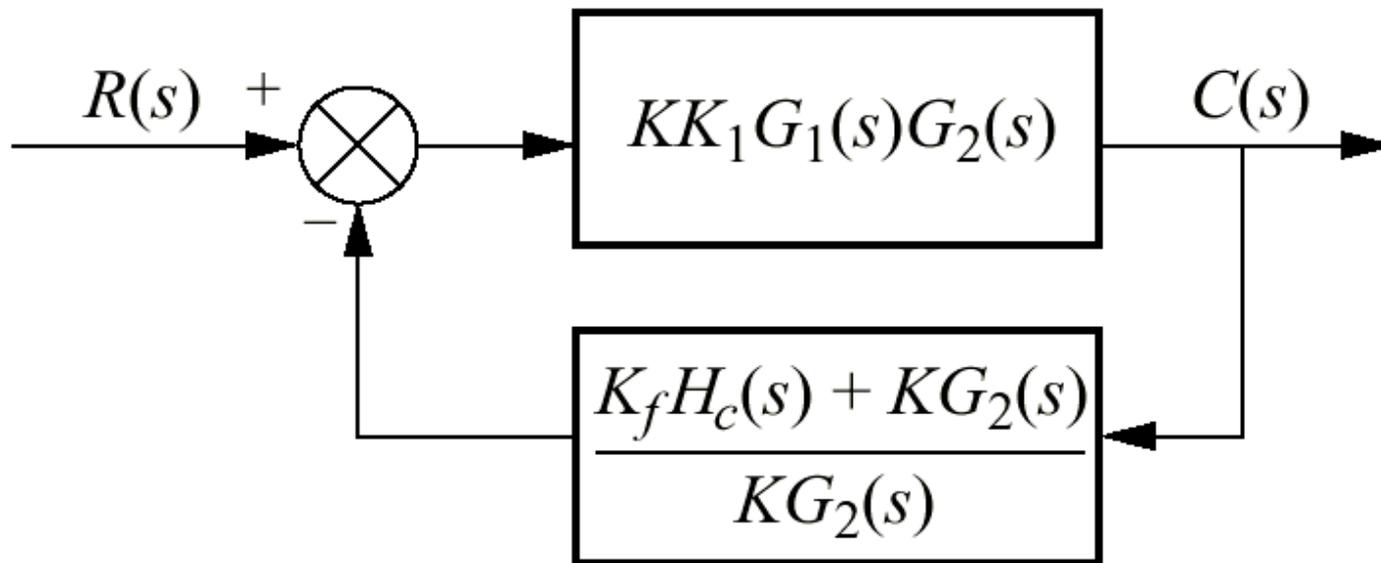


Fig. 9.49

- a. Sistema para o Exemplo 9.7;
- b. sistema com compensação por retroação de velocidade;
- c. sistema compensado equivalente;
- d. sistema compensado equivalente, mostrando retroação unitária

