

Capítulo 10

Técnicas de Resposta de Frequência

Fig.10.1

O Analisador Dinâmico de Sinal HP 35670A obtém dados de resposta de frequência de um sistema físico. Os dados exibidos podem ser usados para analisar, projetar ou determinar um modelo matemático para o sistema.



Cortesia da Hewlett-Packard.

Fig.10.2

Resposta de freqüência

senoidal:

a. sistema;

b. função de transferência;

c. formas de onda de entrada e de saída.

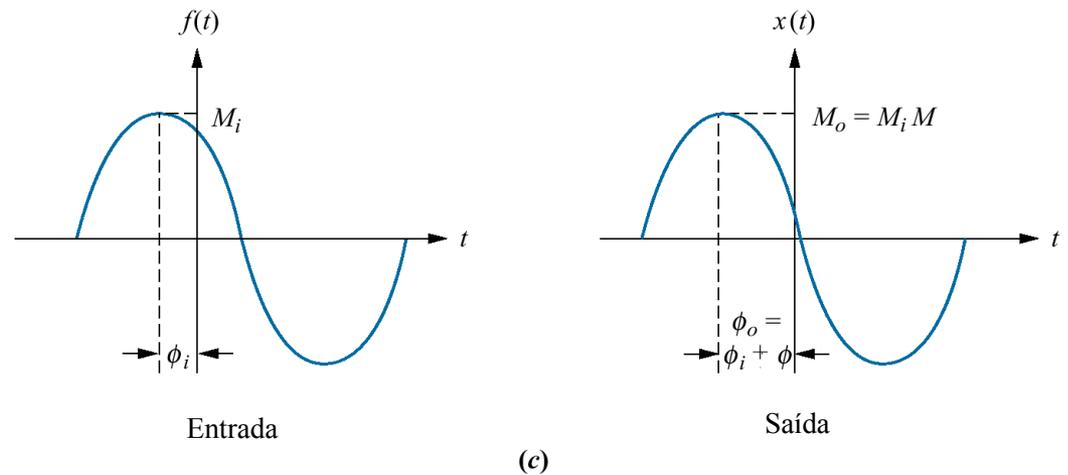
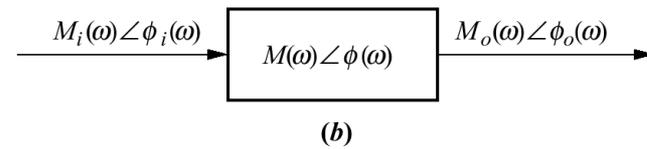
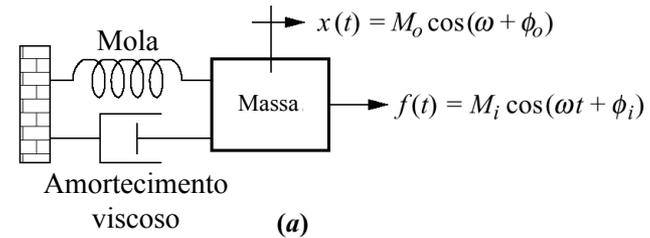


Fig.10.3

Sistema com
entrada senoidal

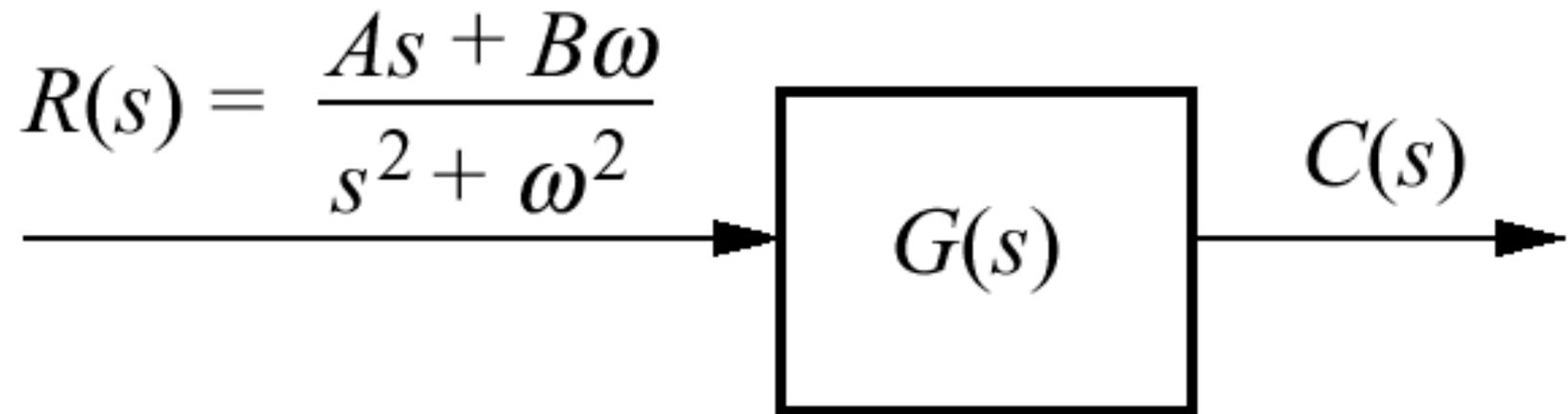


Fig.10.4
 Gráficos de
 resposta de
 frequência
 de $G(s) =$
 $1/(s + 2)$:
 magnitude
 e fase separados

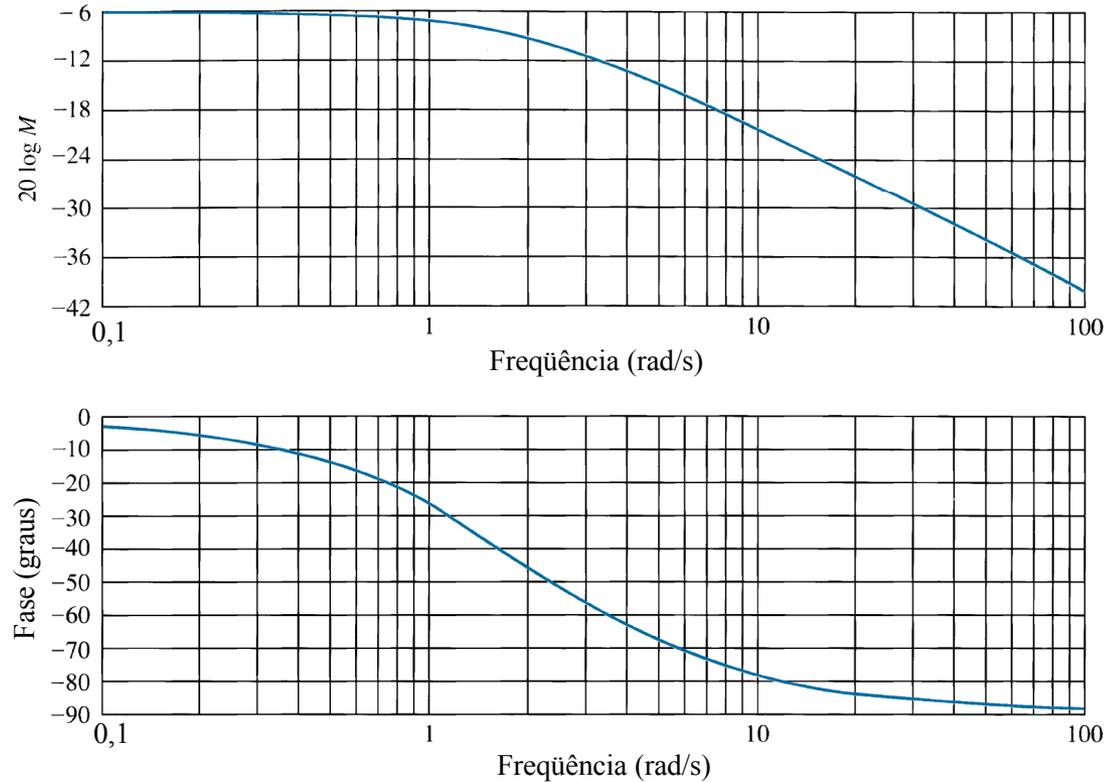


Fig.10.5

Gráficos de resposta de frequência para:
 $G(s) = 1/(s + 2)$: gráfico polar.

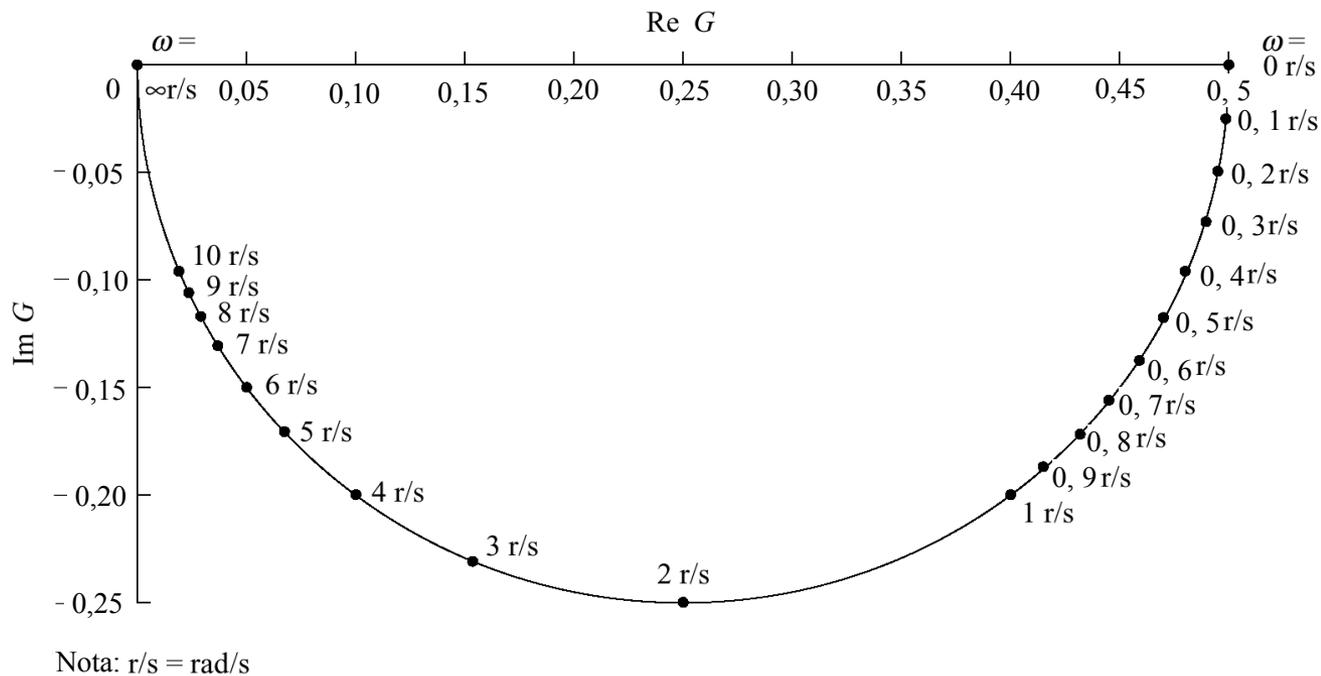


Fig.10.6

Gráficos de Bode para $(s + a)$:

a. gráfico de magnitude;

b. gráfico de fase

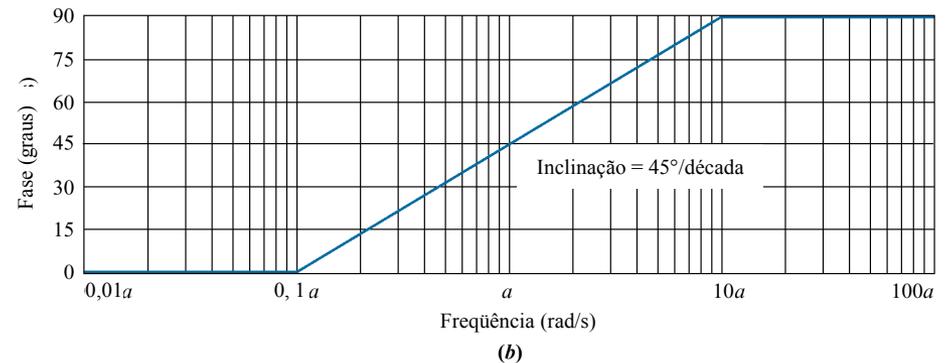
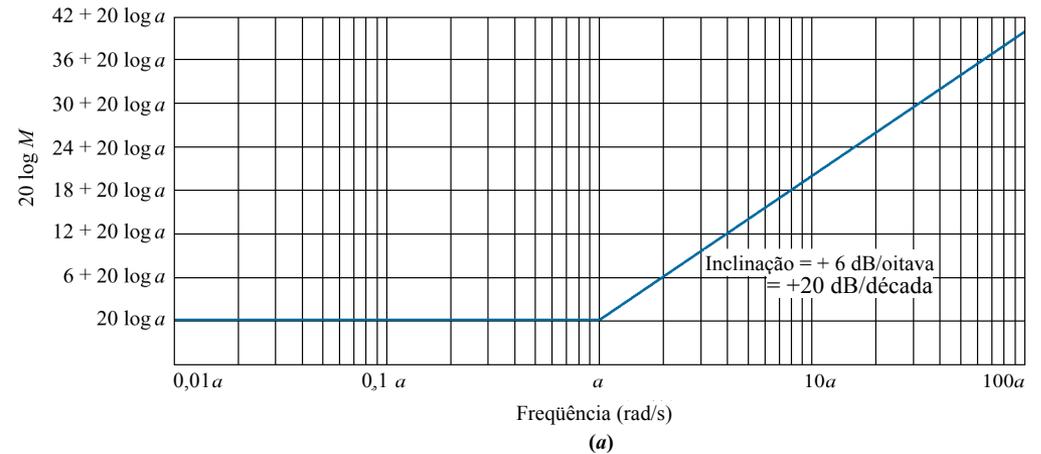


Tabela 10.1
 Dados da
 resposta de
 freqüência
 assintótica e real
 normalizada e em
 escala para
 $(s + a)$

<u>Frequência</u> <u>a</u>	$20 \log \frac{M}{a}$ (dB)		Fase (graus)	
	Assintótica	Real	Assintótica	Real
rad/s				
0,01	0	0,00	0,00	0,57
0,02	0	0,00	0,00	1,15
0,04	0	0,01	0,00	2,29
0,06	0	0,02	0,00	3,43
0,08	0	0,03	0,00	4,57
0,1	0	0,04	0,00	5,71
0,2	0	0,17	13,55	11,31
0,4	0	0,64	27,09	21,80
0,6	0	1,34	35,02	30,96
0,8	0	2,15	40,64	38,66
1	0	3,01	45,00	45,00
2	6	6,99	58,55	63,43
4	12	12,30	72,09	75,96
6	15,56	15,68	80,02	80,54
8	18	18,13	85,64	82,87
10	20	20,04	90,00	84,29
20	26,02	26,03	90,00	87,14
40	32,04	32,04	90,00	88,57
60	35,56	35,56	90,00	89,05
80	38,06	38,06	90,00	89,28
100	40	40,00	90,00	89,43

Fig.10.7

Resposta assintótica e real
normalizada de magnitude em
escala para $(s + a)$

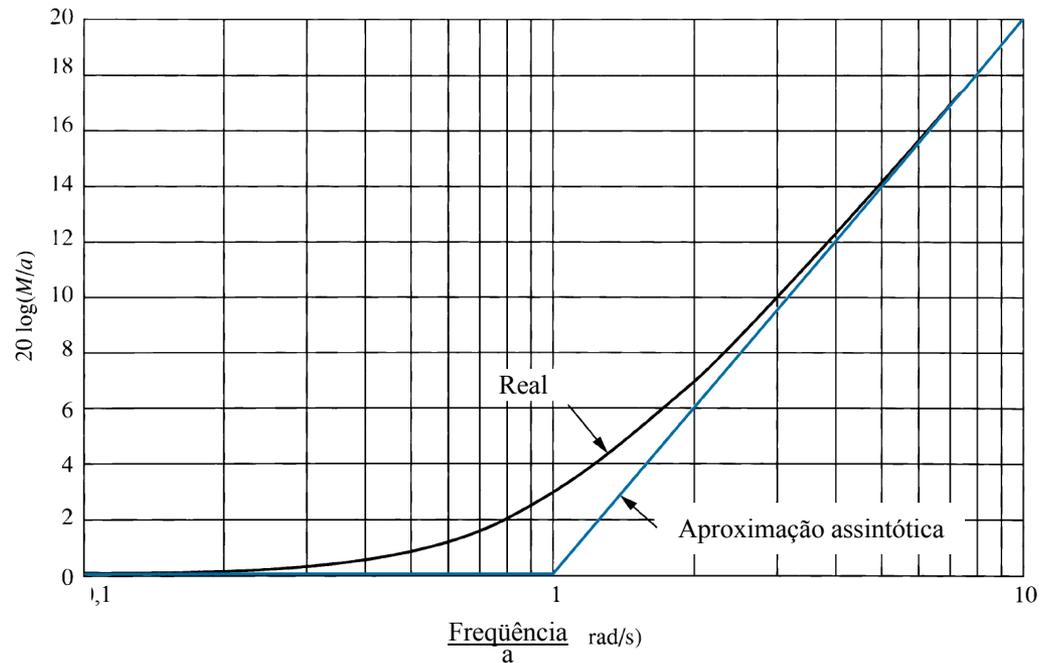


Fig.10.8

Resposta assintótica e real normalizada de fase em escala para $(s + a)$.

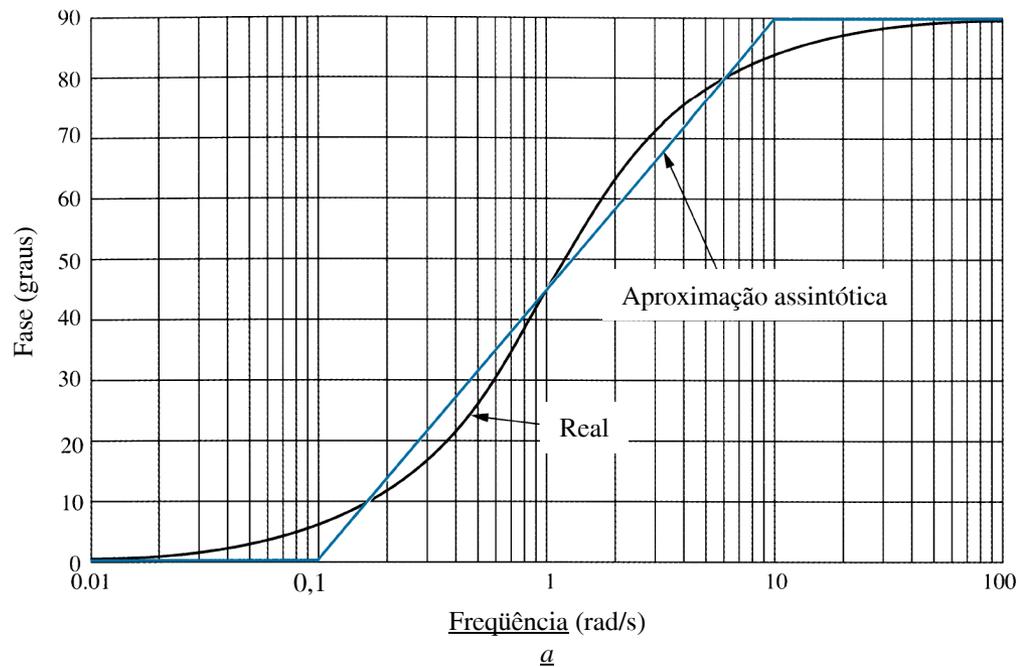


Fig.10.9

Gráficos de Bode normalizados e em escala para

a. $G(s) = s$;

b. $G(s) = 1/s$;

c. $G(s) = (s + a)$;

d. $G(s) = 1/(s + a)$

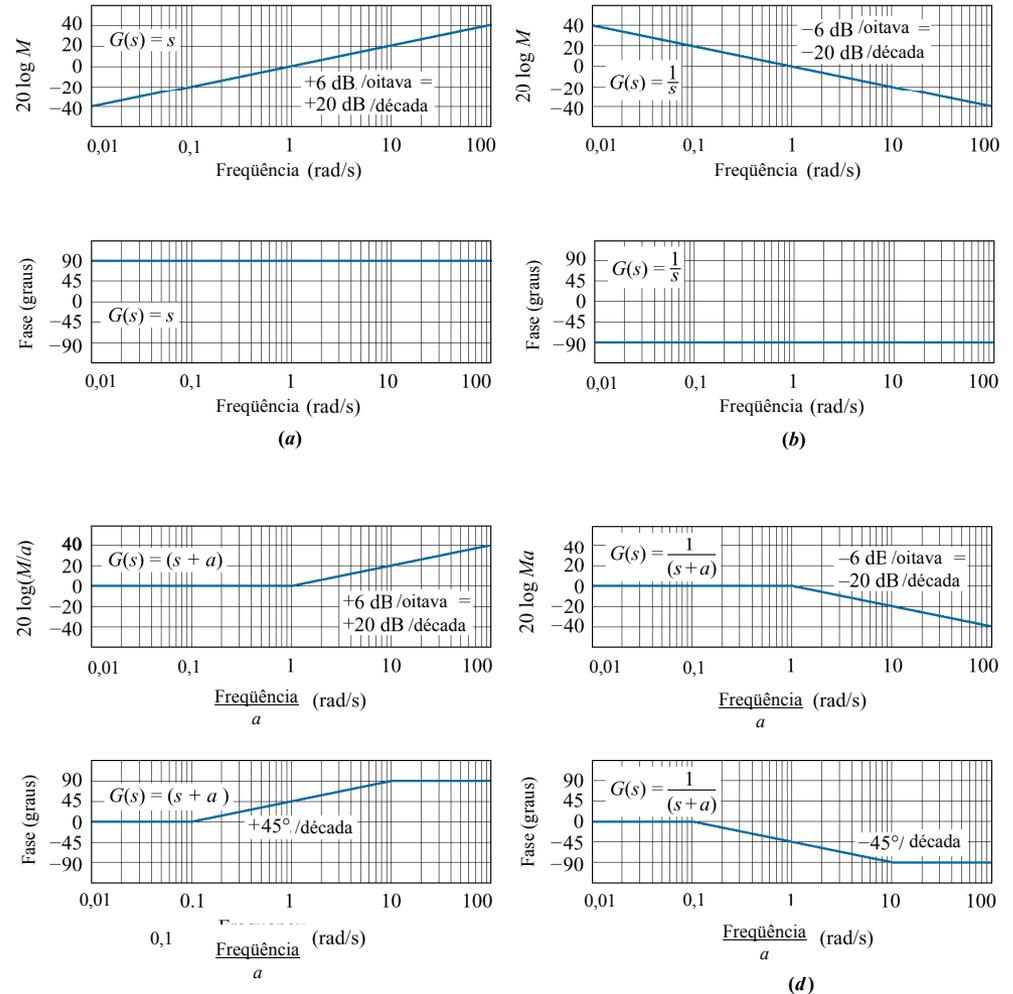


Fig.10.10

Sistema de controle
com retroação unitária
a malha fechada

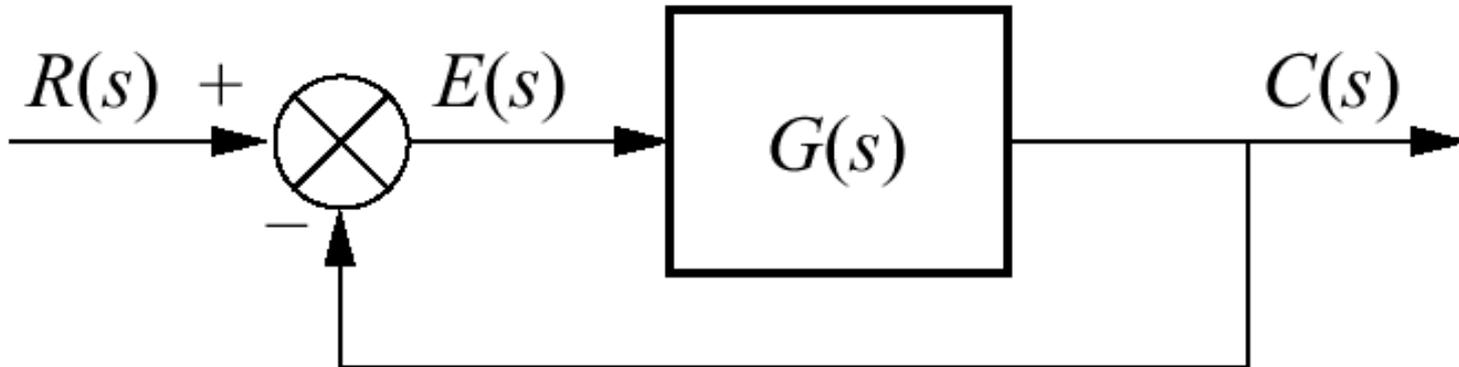


Fig.10.11

Gráfico

logarítmico de magnitude de Bode para o Exemplo 10.2:

- a. componentes;
- b. composição

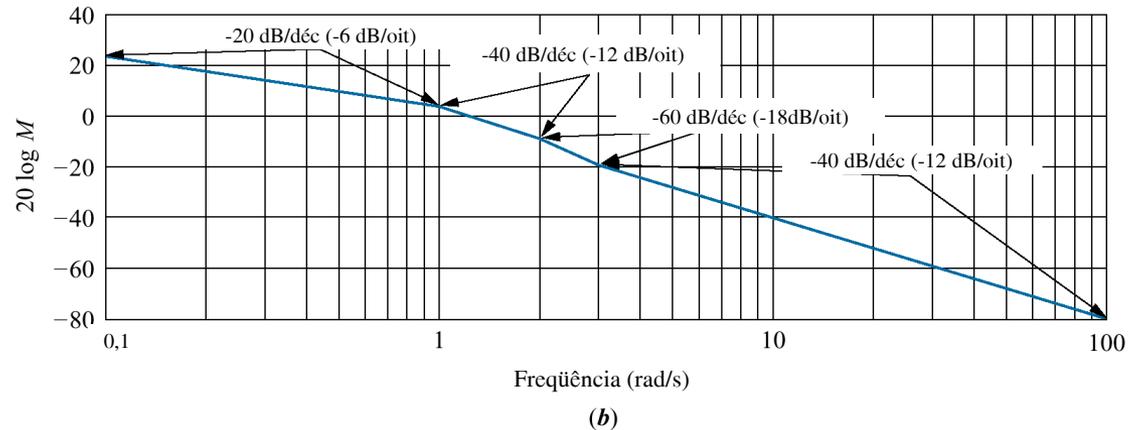
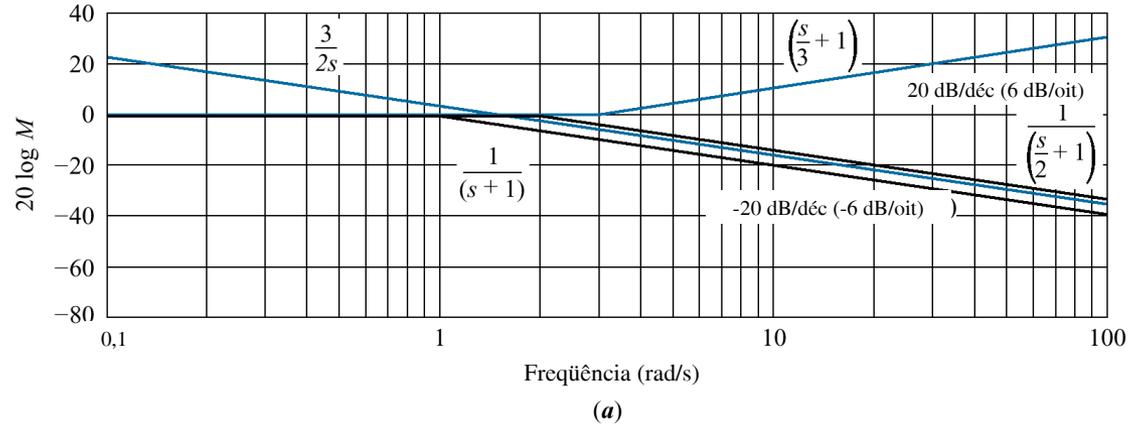


Tabela 10.2

Gráfico de magnitude de Bode: contribuição na inclinação de cada pólo e de cada zero do Exemplo 10.2

	Início: Pólo em 0	Início: Pólo em -1	Início: Pólo em -2	Início: Zero em -3
Frequência (rad/s)	0,1	1	2	3
Pólo em 0	-20	-20	-20	-20
Pólo em -1	0	-20	-20	-20
Pólo em -2	0	0	-20	-20
Zero em -3	0	0	0	20
Inclinação total (dB/década)	-20	-40	-60	-40

Tabela 10.3

Gráfico de fase de Bode: contribuição na inclinação de cada pólo e de cada zero do Exemplo 10.2

	Início: Pólo em -1	Início: Pólo em -2	Início: Zero em -3	Término: Pólo em -1	Término: Pólo em -2	Término: Zero em -3
Frequência (rad/s)	0,1	0,2	0,3	10	20	30
Pólo em -1	-45	-45	-45	0		
Pólo em -2		-45	-45	-45	0	
Zero em -3			45	45	45	0
Inclinação total (graus/década)	-45	-90	-45	0	45	0

Fig.10.12

Gráfico de fase de Bode para o Exemplo 10.2:

- a. componente;
- b. composição

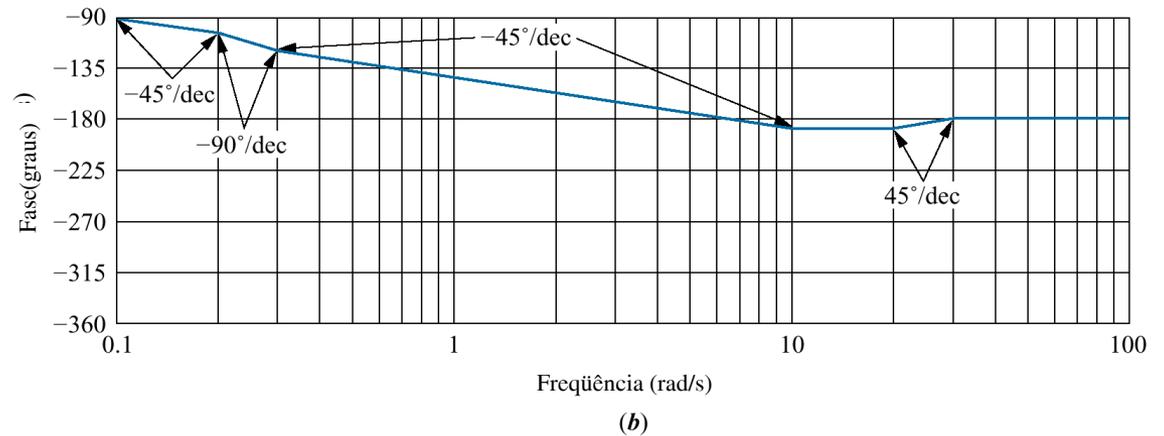
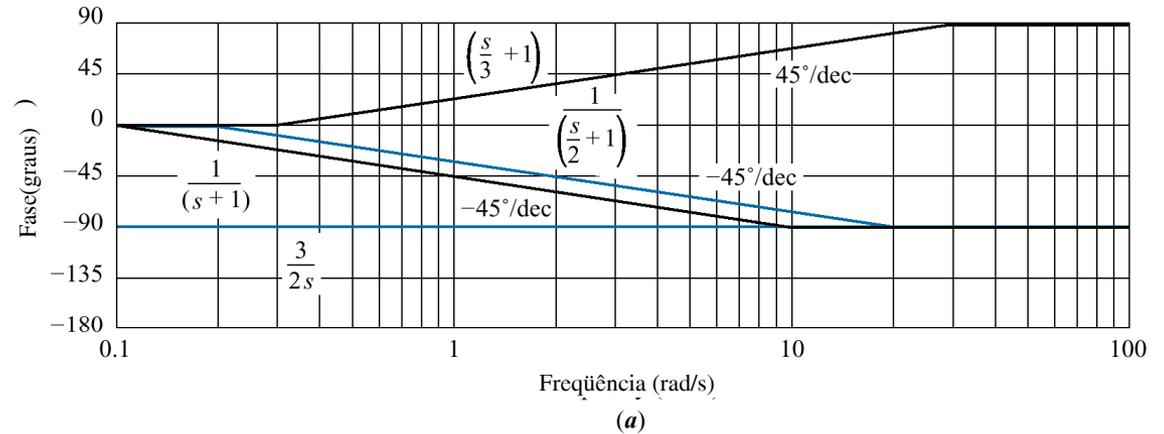


Fig.10.13

Assíntotas de Bode normalizadas e em escala para $G(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$:

- a. magnitude;
- b. fase

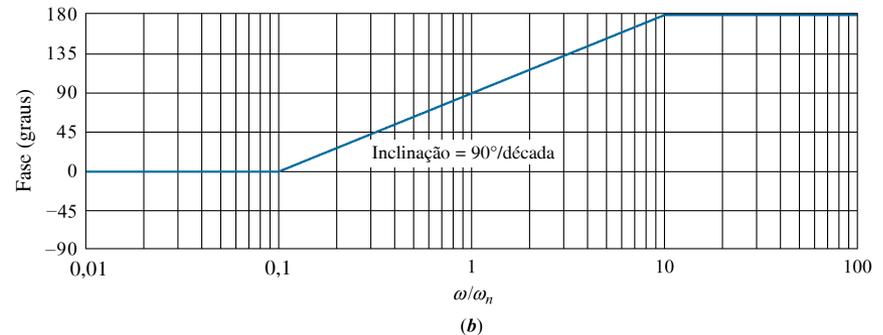
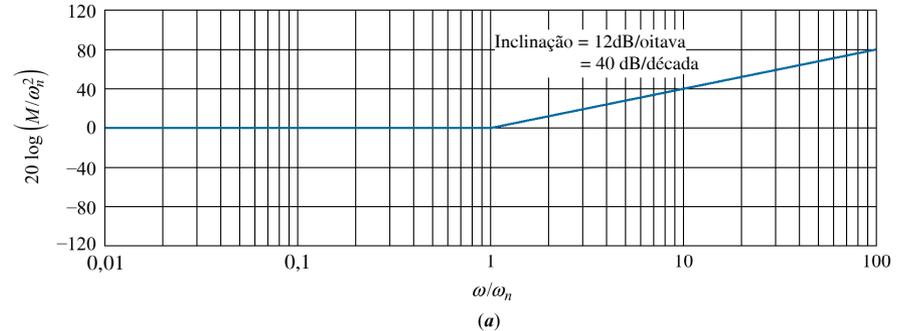


Fig.10.14

Resposta logarítmica de magnitude normalizada e em escala para $(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$

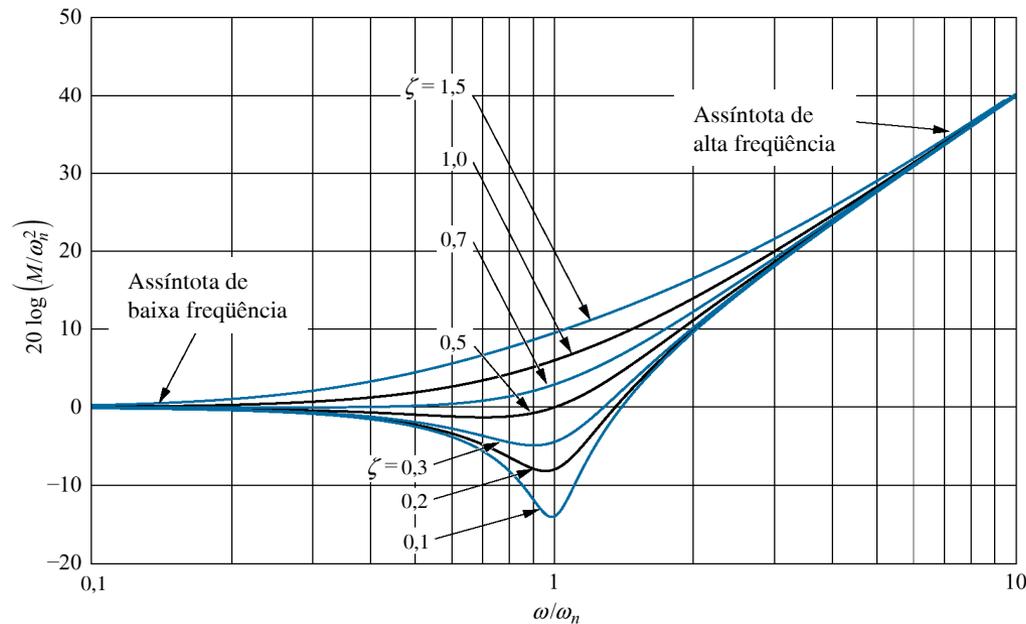


Fig.10.15

Resposta de fase em escala para $(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$

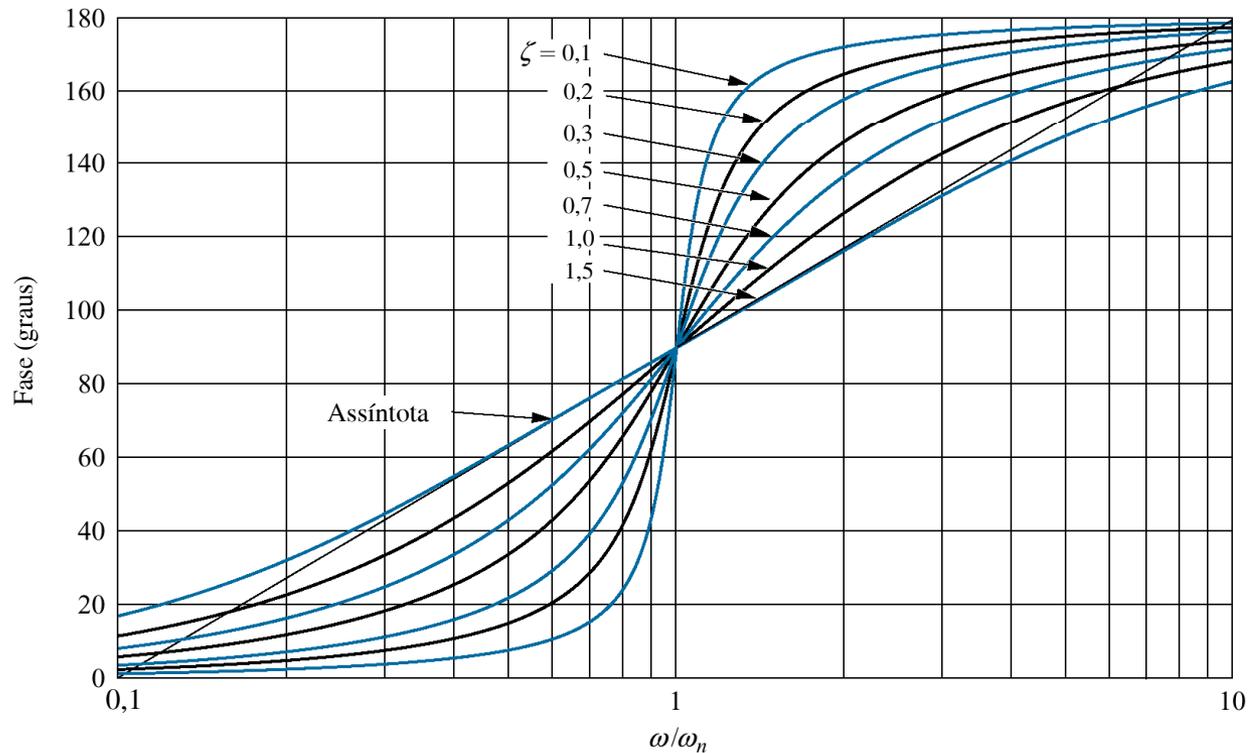


Fig.10.16

Resposta logarítmica de magnitude normalizada e em escala para $1/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$

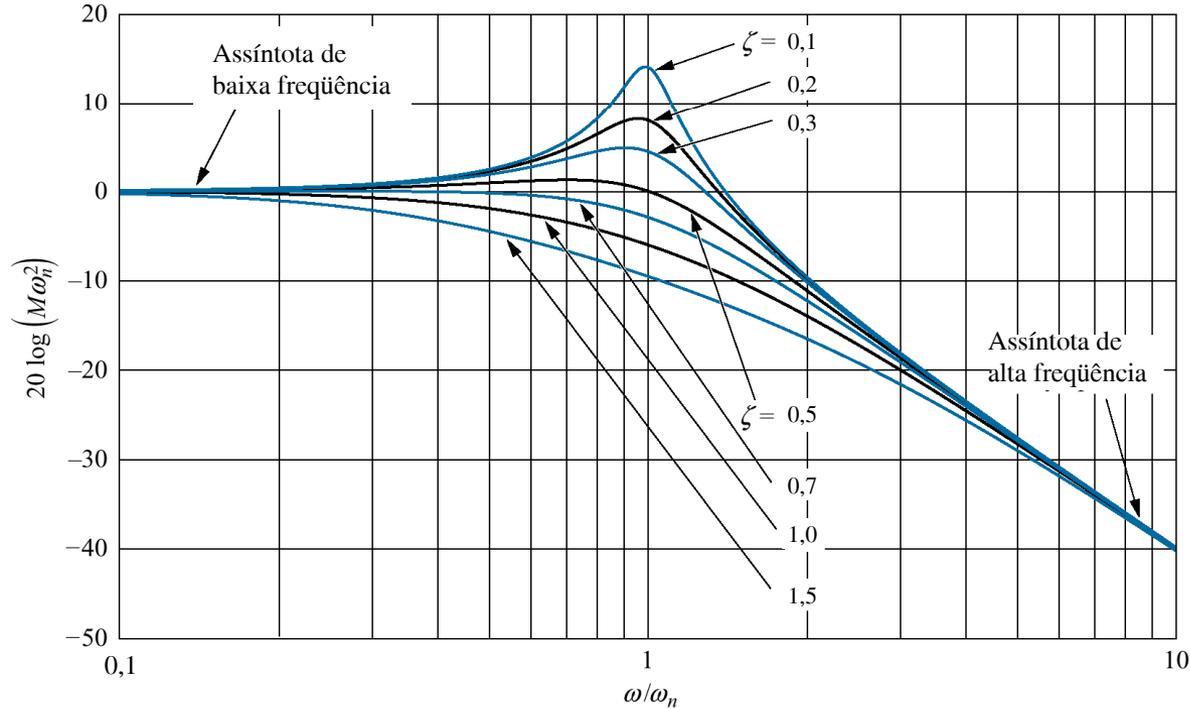


Fig.10.17

Resposta de fase em escala para $1/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$

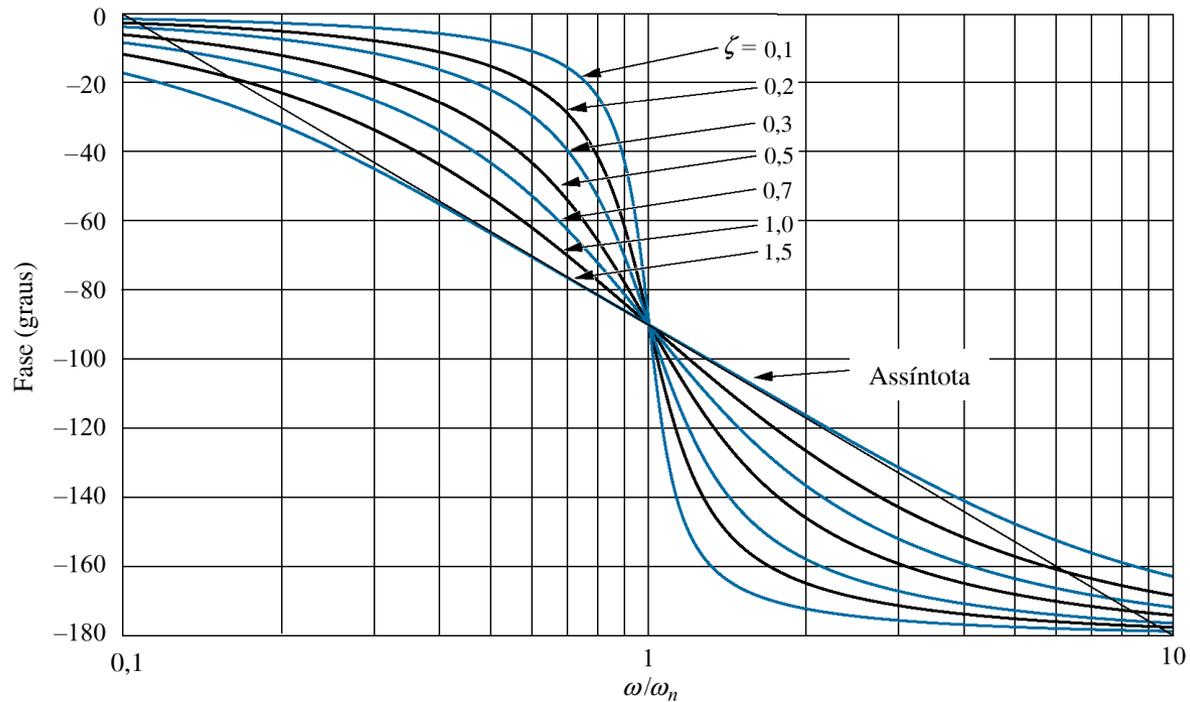


Fig.10.18

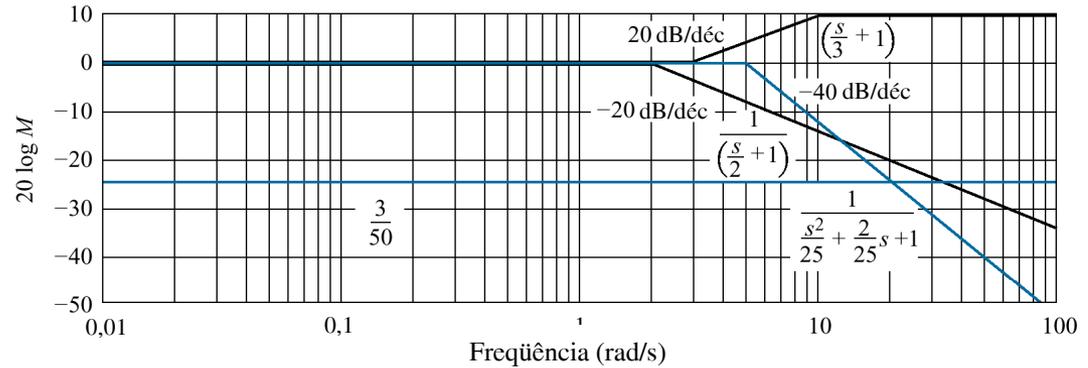
Gráfico de magnitude de Bode para

$$G(s) =$$

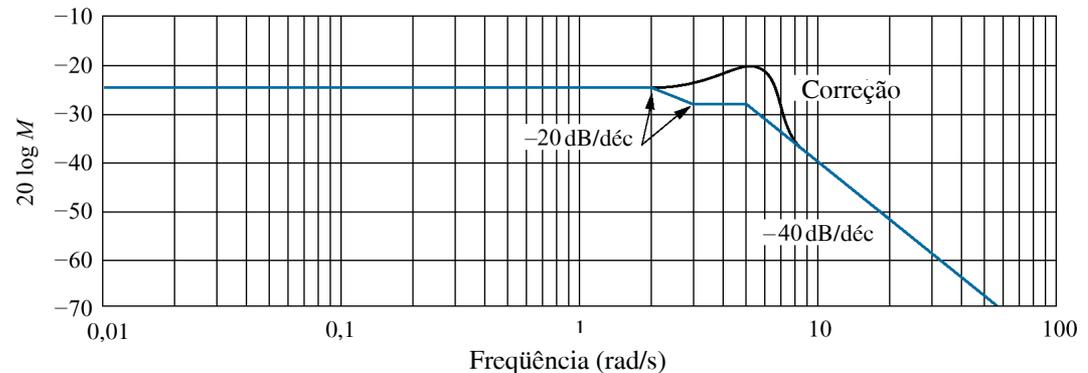
$$\frac{(s + 3)}{[(s + 2)(s^2 + 2s + 25)]}$$

a. componentes;

b. composição



(a)



(b)

Tabela 10.6

Gráfico de assíntotas de magnitude do Exemplo 10.3

		Início: Pólo em 2	Início: Zero em -3	Início: $\omega_n = 5$
Frequência (rad/s)	0,01	2	3	5
Pólo em -2	0	-20	-20	-20
Zero em -3	0	0	20	20
$\omega_n = 5$	0	0	0	-40
Inclinação total (dB/década)	0	-20	0	-40

Tabela 10.7

Gráfico de assíntotas de fase para o Exemplo 10.3

	Início: Pólo em -2	Início: Zero em -2	Início: $\omega_n = 5$	Término: pólo em -2	Término: zero em -3	Término: $\omega_n = 5$
Frequência (rad/s)	0,2	0,3	0,5	20	30	50
Pólo em -2	-45	-45	-45	0		
Zero em -3		45	45	45	0	
$\omega_n = 5$			-90	-90	-90	0
Inclinação total (graus/déc)	-45	0	-90	-45	-90	0

Fig.10.19

Gráfico de fase de Bode para

$$G(s) =$$

$$(s + 3)/[(s + 2)$$

$$(s^2 + 2s + 25)]:$$

a. componentes;

b. composição

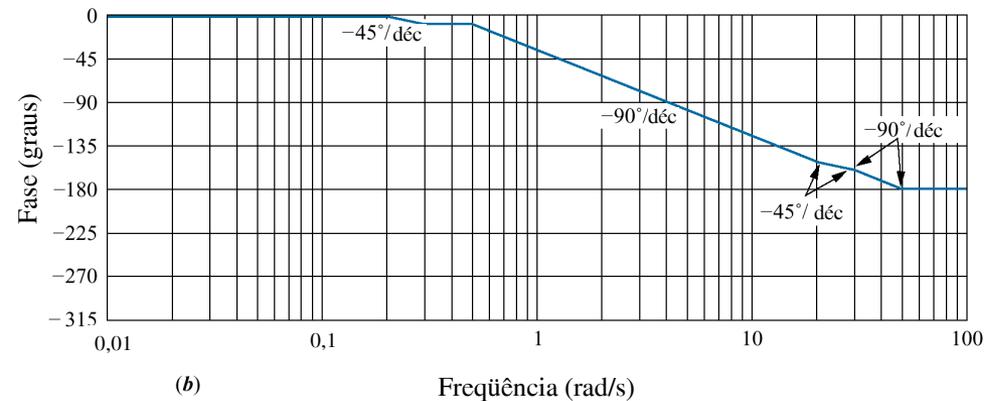
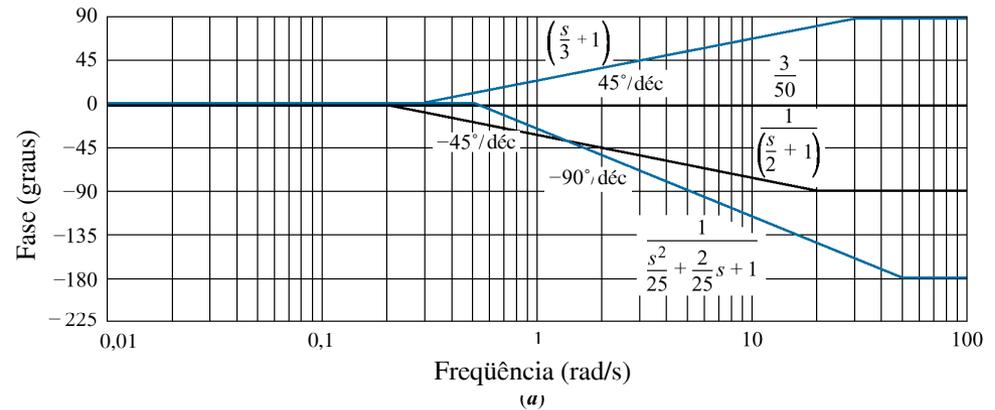


Fig.10.20

Sistema de controle a malha fechada

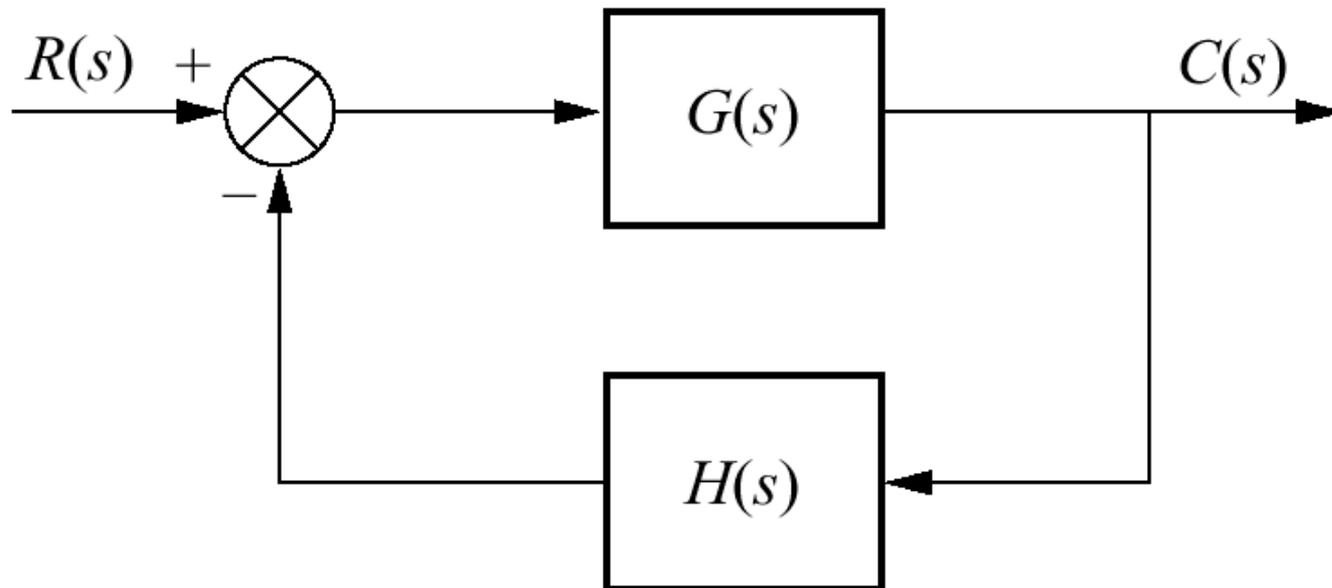


Fig.10.21

Mapeando o contorno A através da função $F(s)$ no contorno B

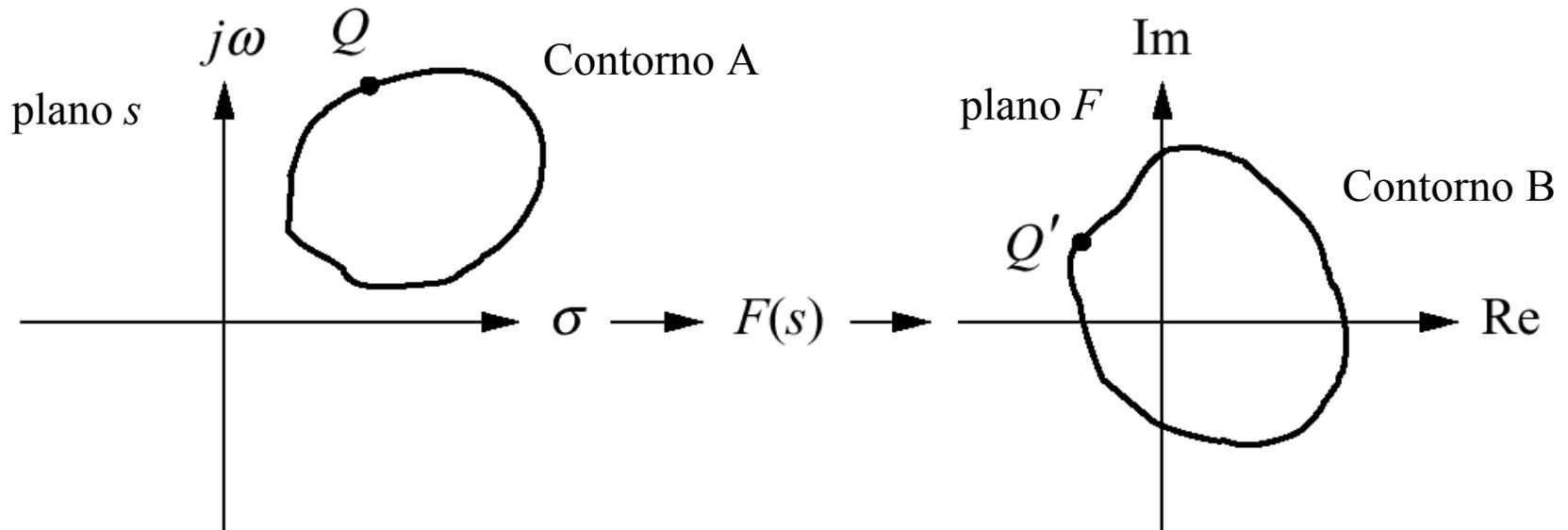


Fig.10.22
Exemplos de mapeamento de contornos

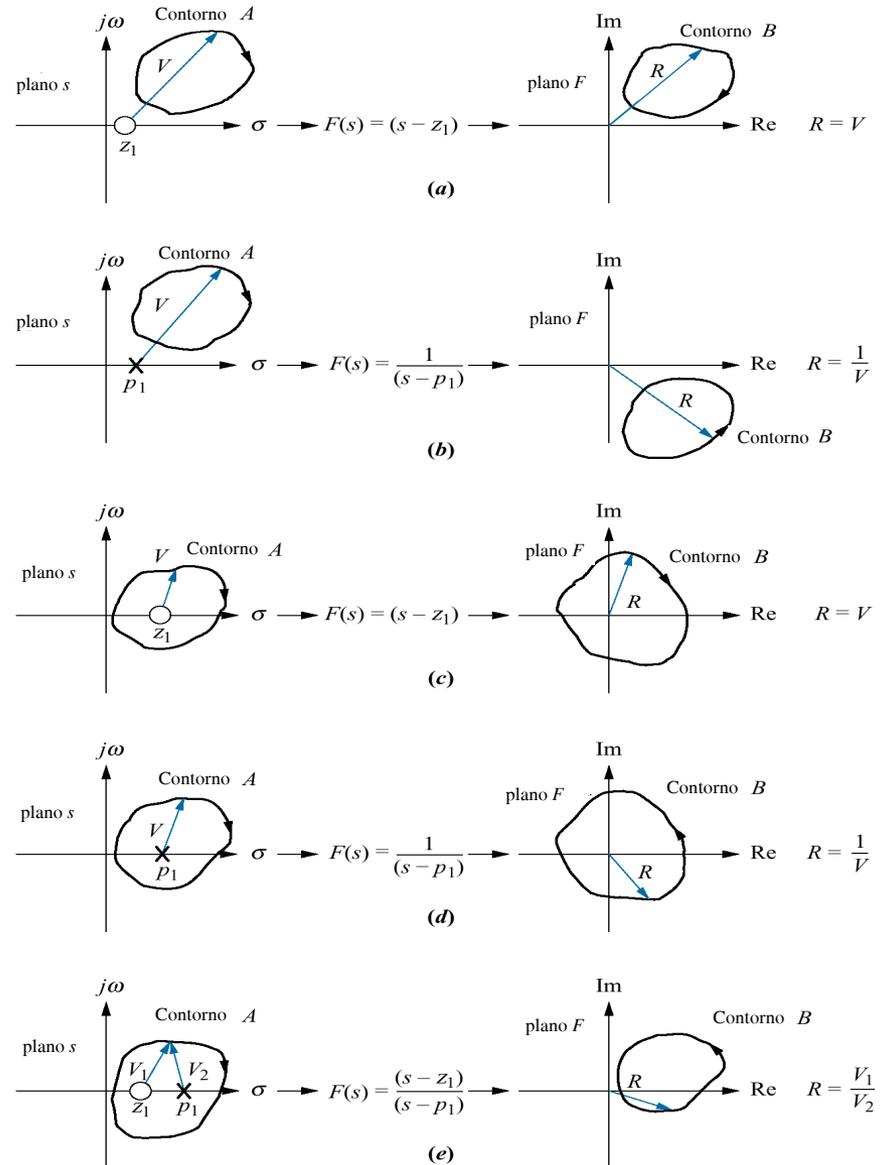


Fig.10.23

Representação de mapeamento por vetor

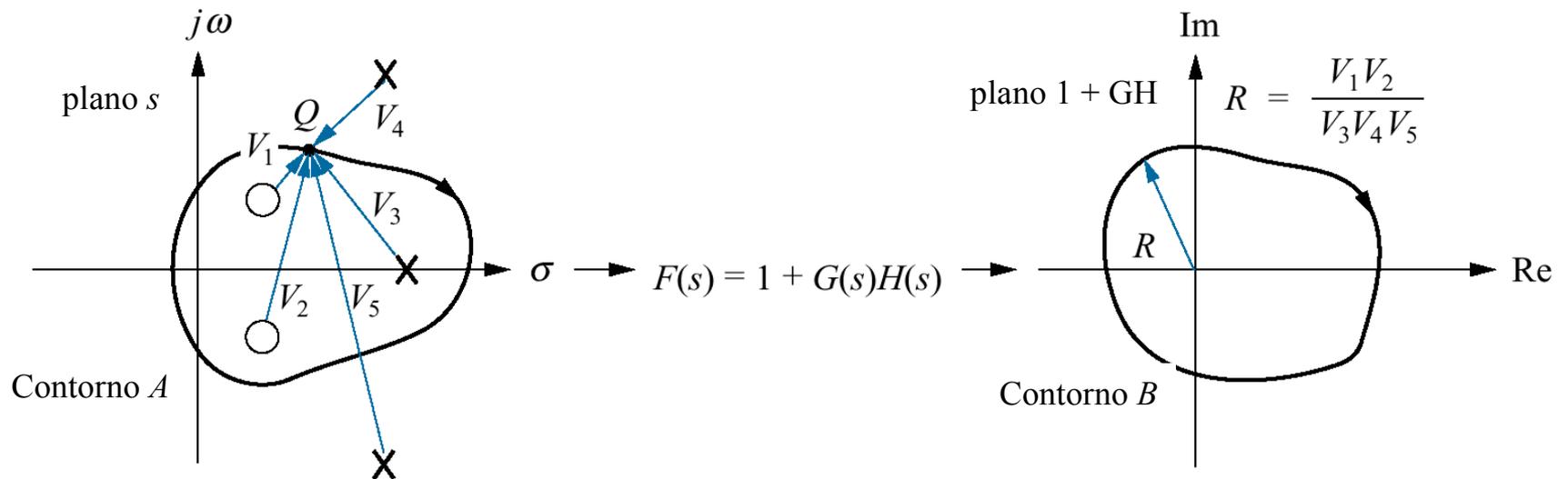


Fig.10.24

Contorno envolvendo o semiplano da direita para determinar estabilidade

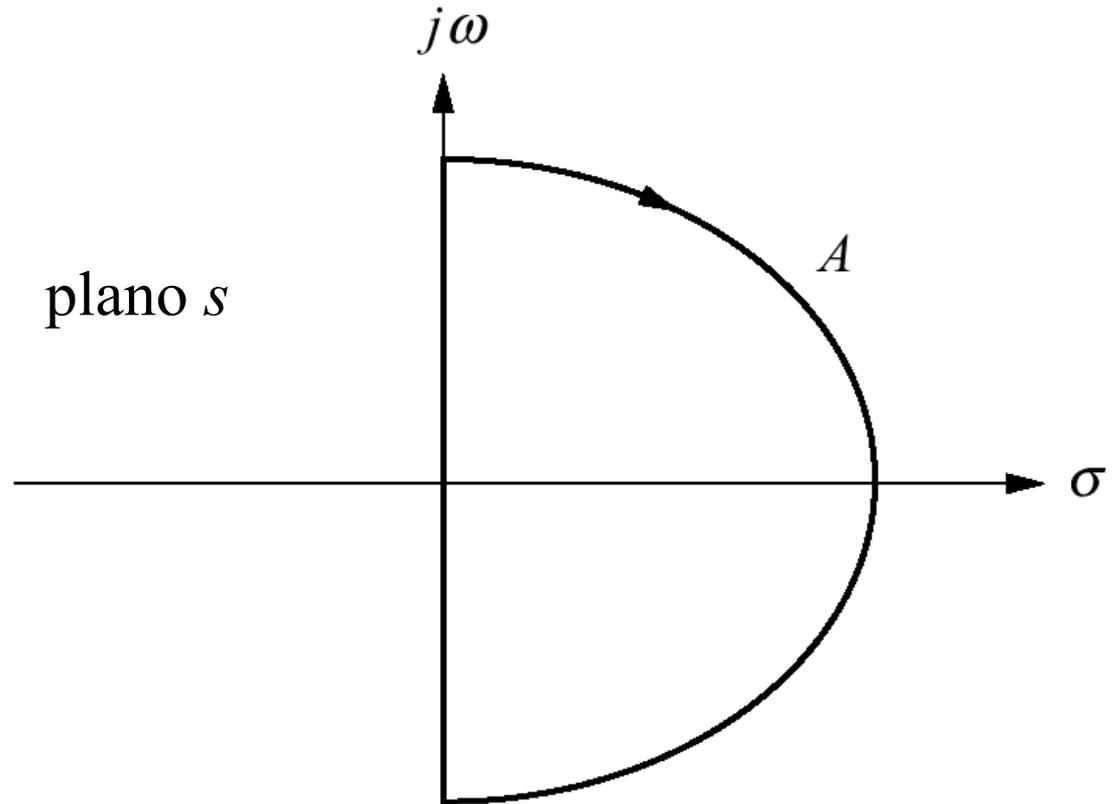


Fig.10.25

Exemplos de mapeamento:

a. o contorno não envolve os pólos a malha fechada;

b. o contorno envolve os pólos a malha fechada

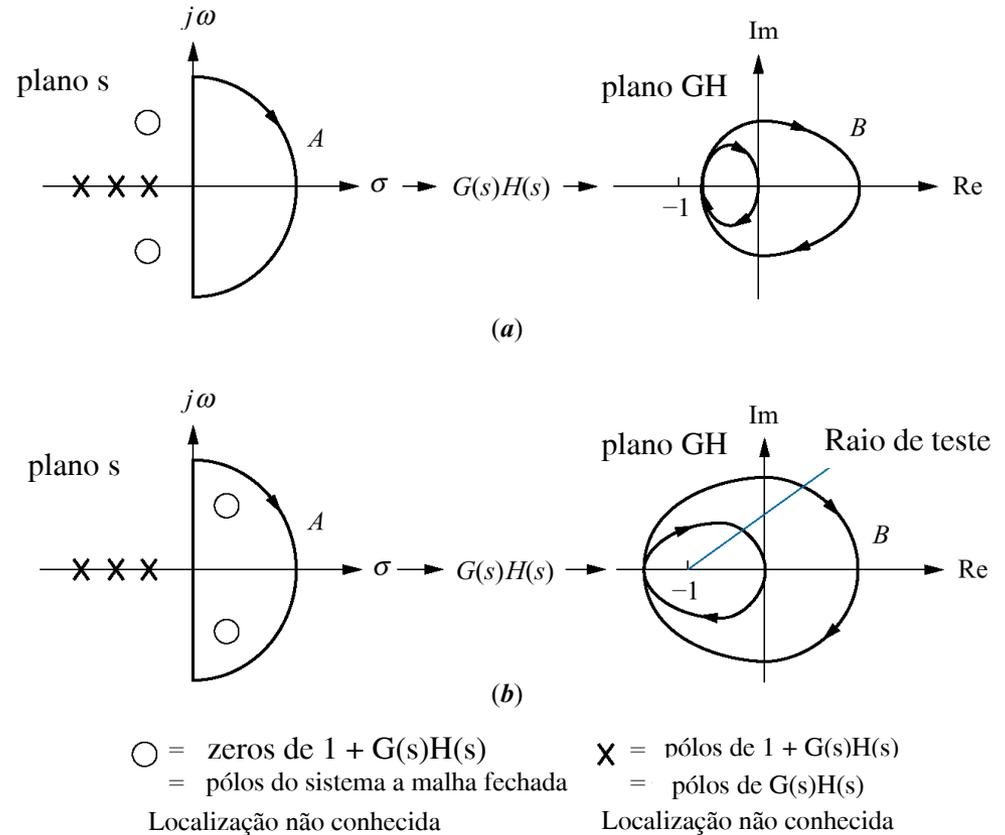


Fig.10.26

a. Turbina e gerador;
b. diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade para o Exemplo 10.4

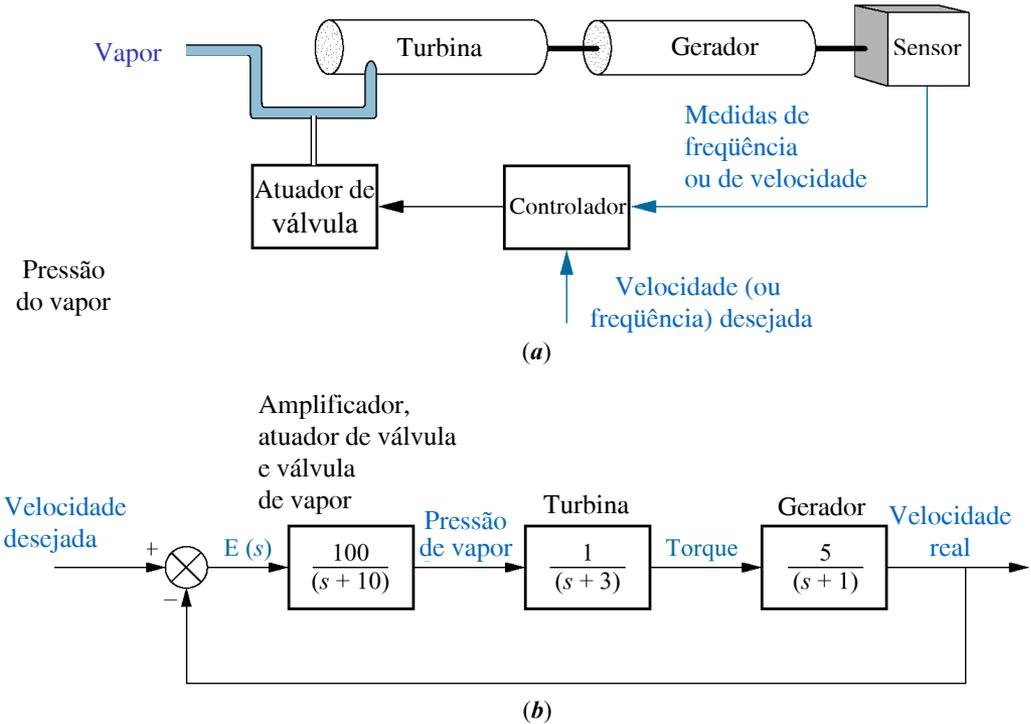


Fig.10.27

Cálculo com vetor para elaboração do diagrama de Nyquist para o Exemplo 10.4:

- a.** vetores no contorno em baixas freqüências;
- b.** vetores no contorno em torno do infinito;
- c.** diagrama de Nyquist

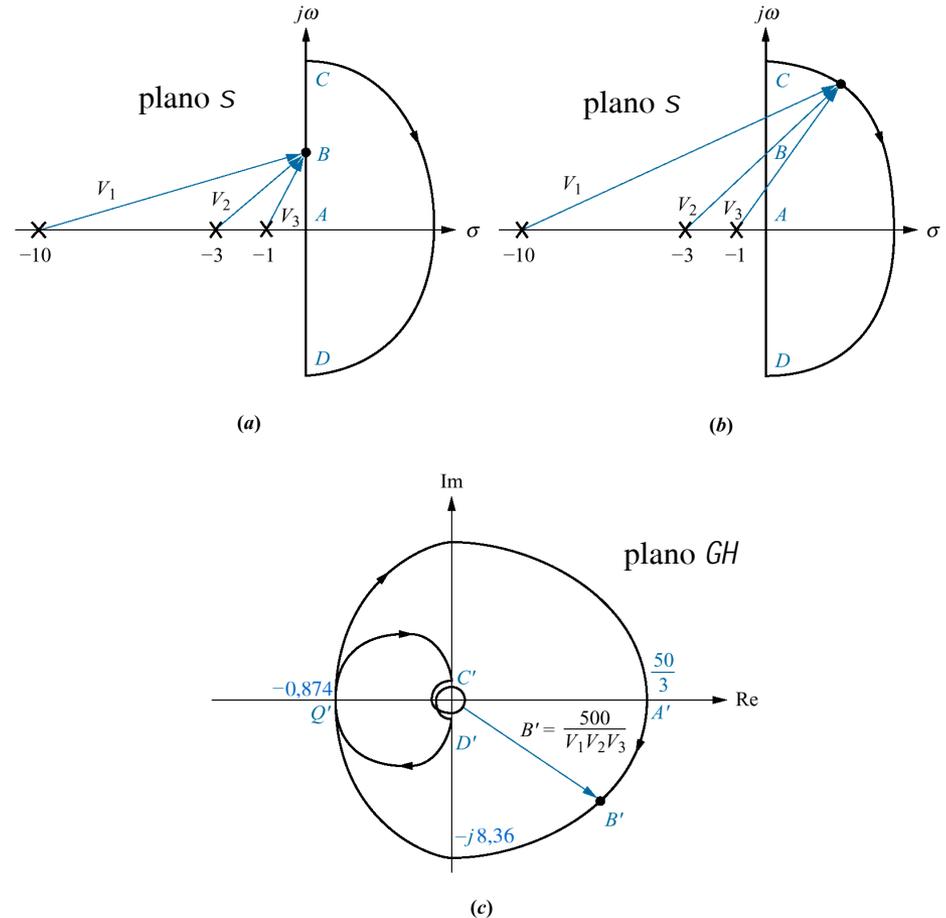


Fig.10.28

Contornando pólos a malha aberta:

- a. pólos no contorno;
- b. desvio pela direita;
- c. desvio pela esquerda

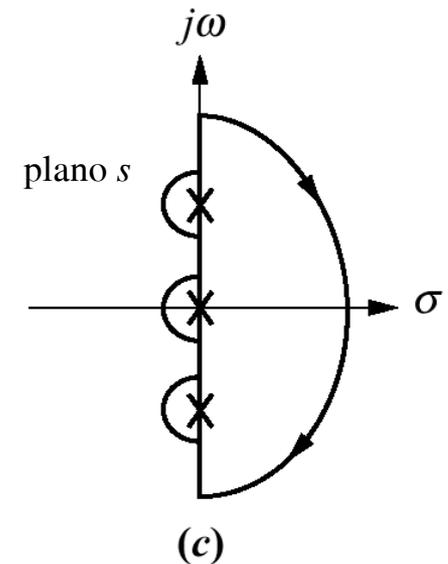
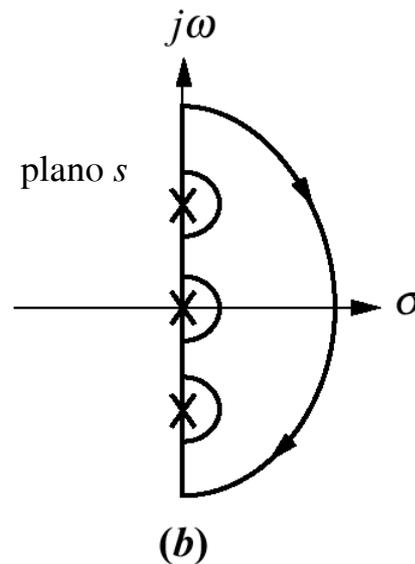
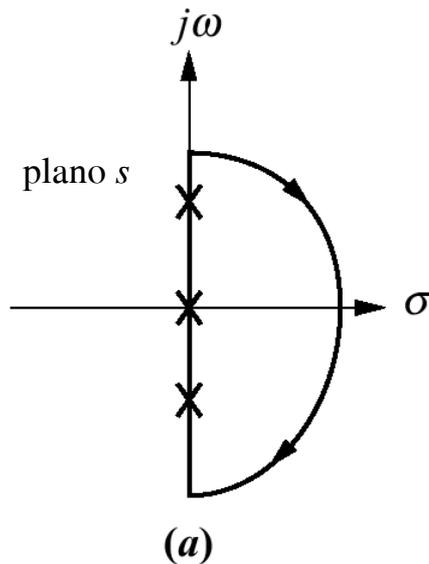


Fig.10.29

a. Contorno para o Exemplo 10.5;

b. diagrama de Nyquist para o Exemplo 10.5

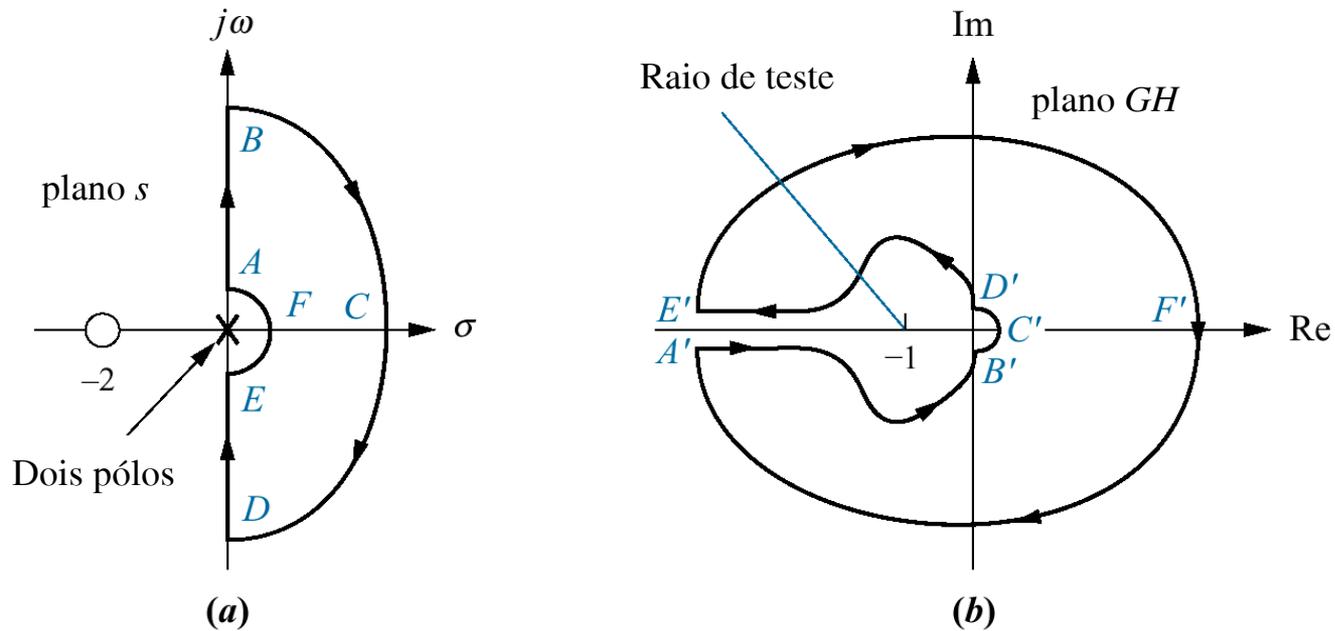


Fig.10.30

Demonstrando a estabilidade de Nyquist:

a. sistema;

b. contorno;

c. diagrama de Nyquist

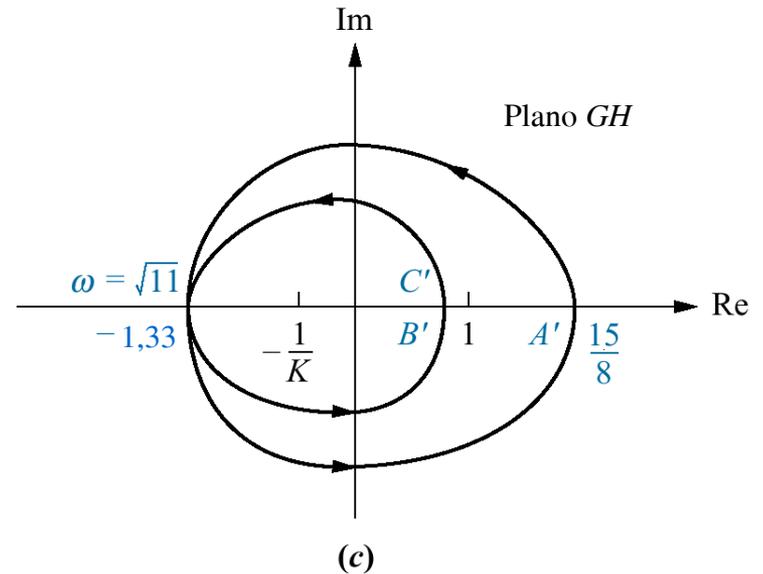
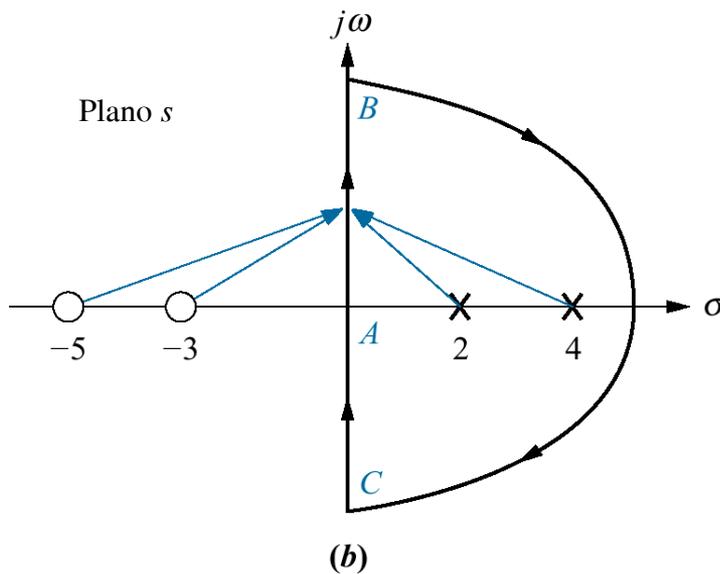
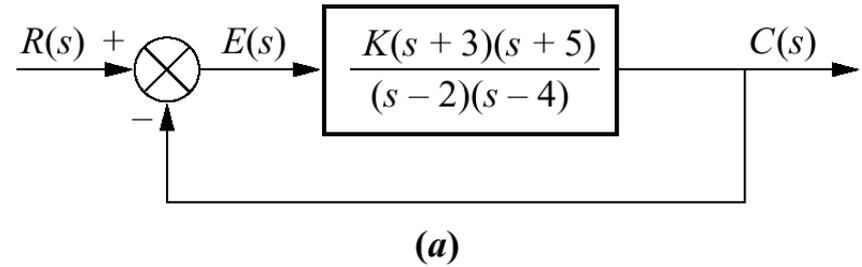


Fig.10.31

- a. Contorno para o Exemplo 10.6;
- b. diagrama de Nyquist

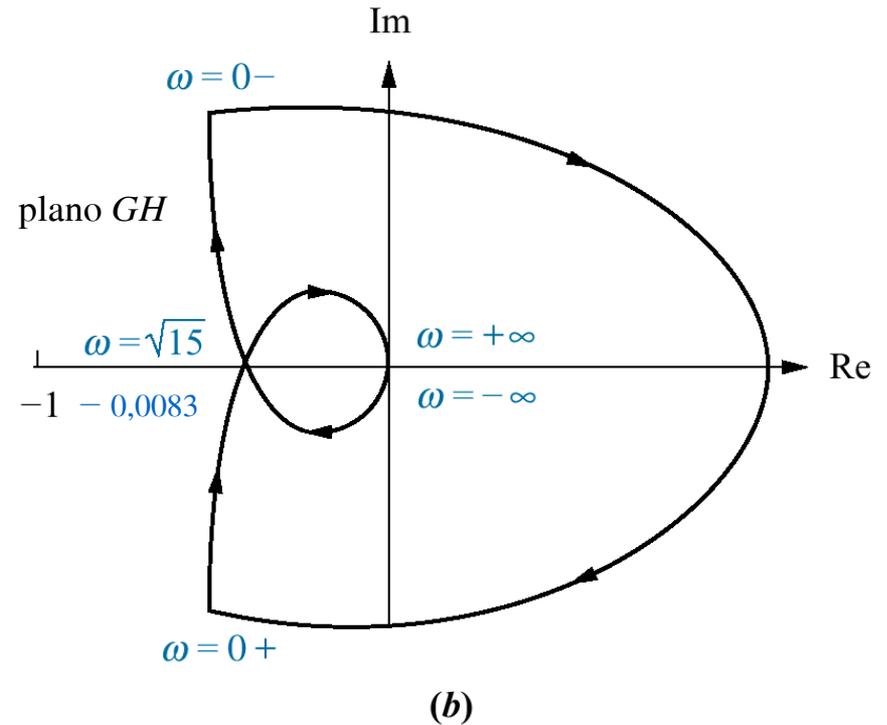
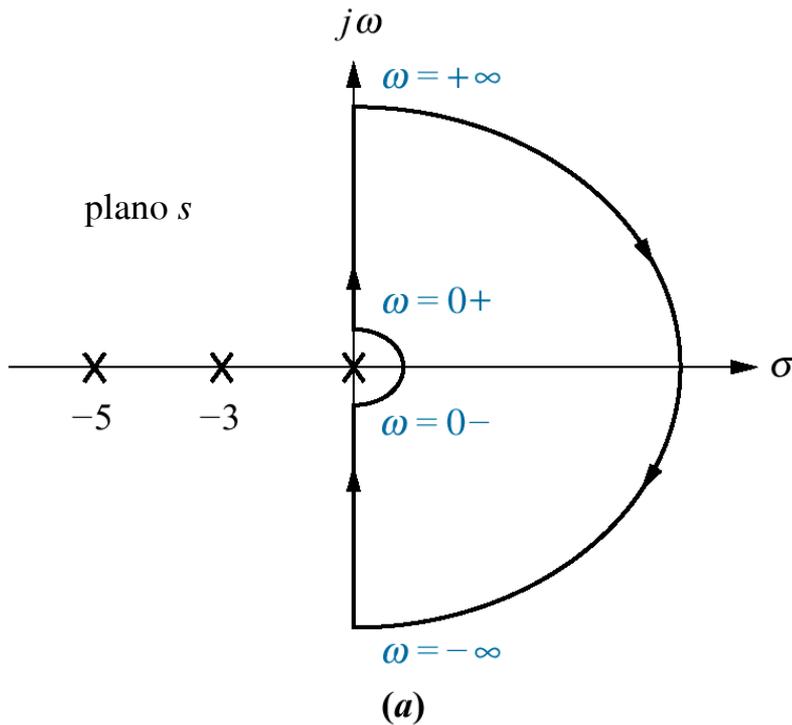


Fig.10.32

- a. Contorno e lugar das raízes do sistema que é estável para valor pequeno de ganho e instável para valor grande de ganho;
 b. diagrama de Nyquist

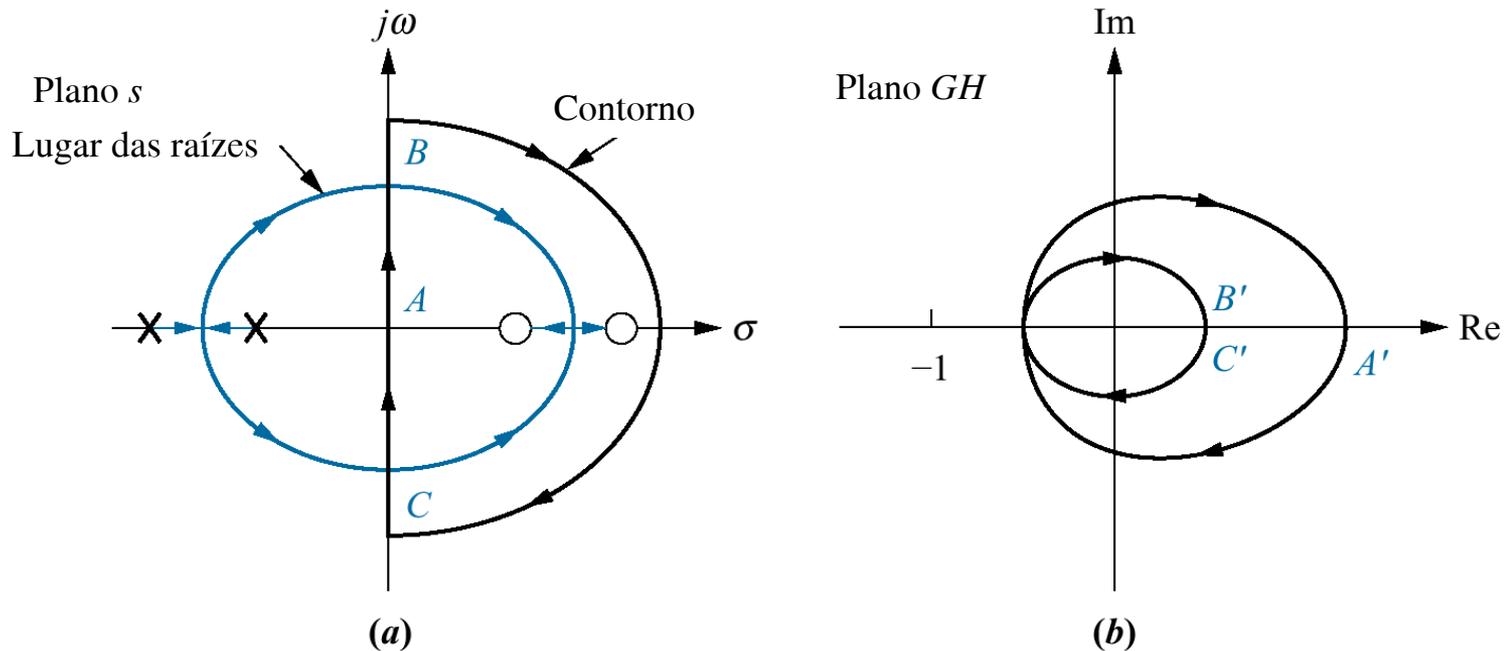


Fig.10.33

- a. Contorno e lugar das raízes do sistema que é instável para valores pequenos de ganho e estável para valores grandes de ganho;
 b. diagrama de Nyquist

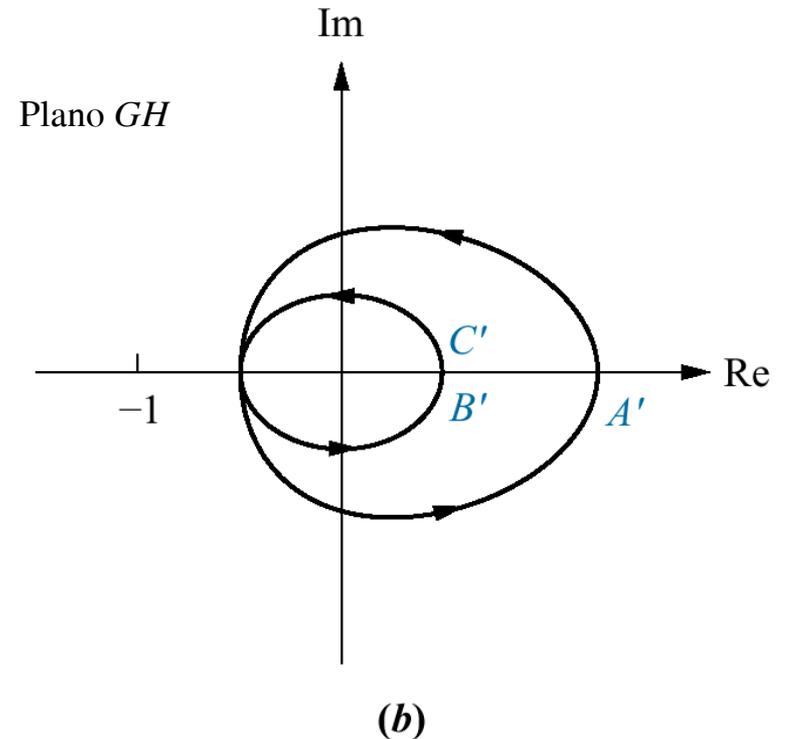
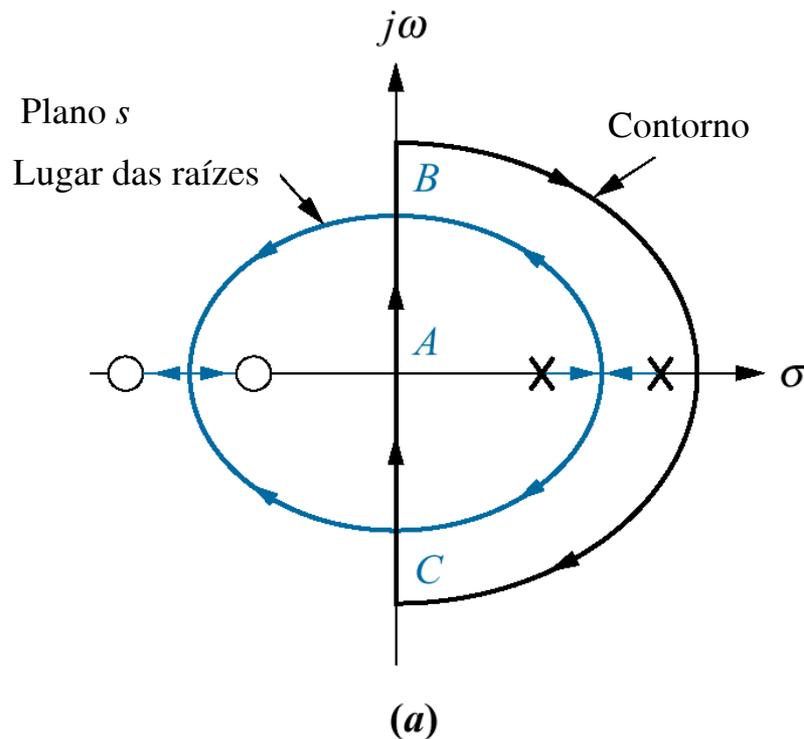


Fig.10.34

a. Porção do contorno a ser mapeada para o Exemplo 10.7;

b. diagrama de Nyquist do mapeamento do eixo imaginário positivo

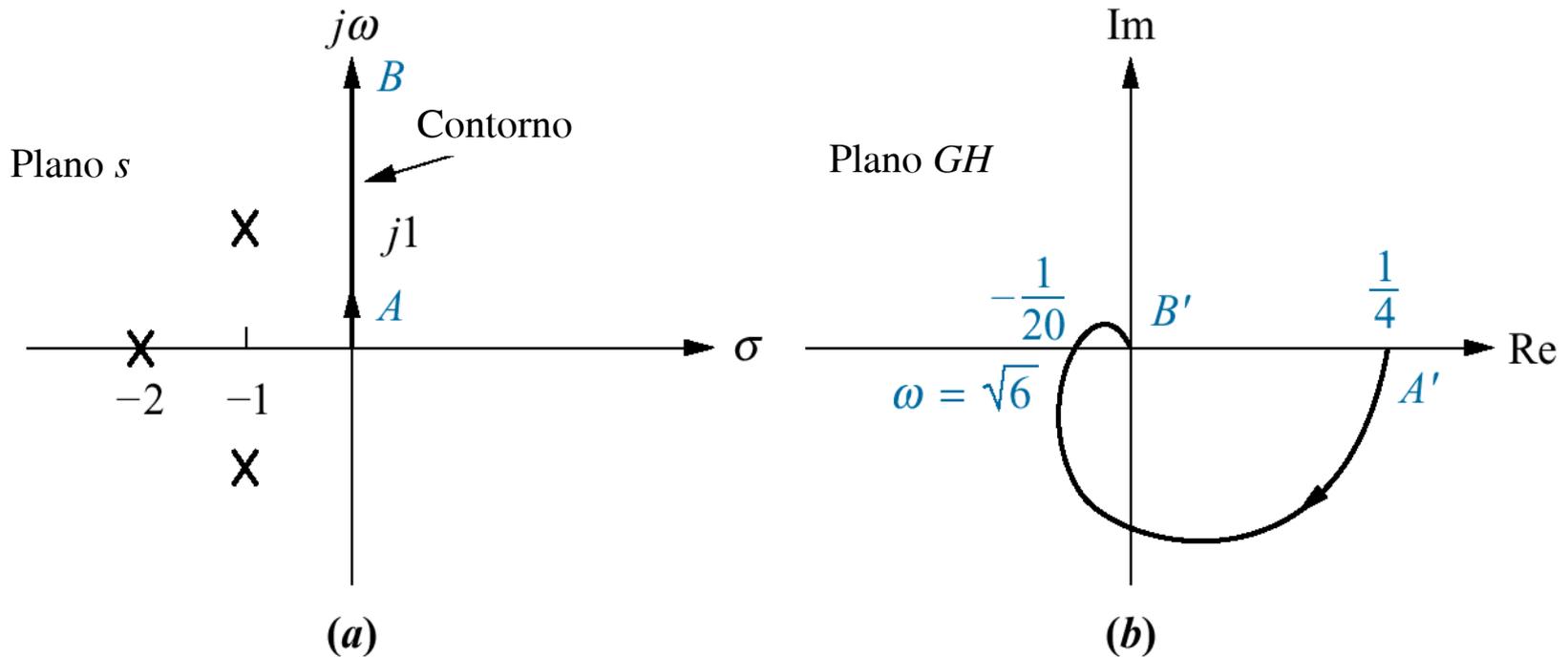


Fig.10.35

Diagrama de Nyquist mostrando as margens de ganho e de fase

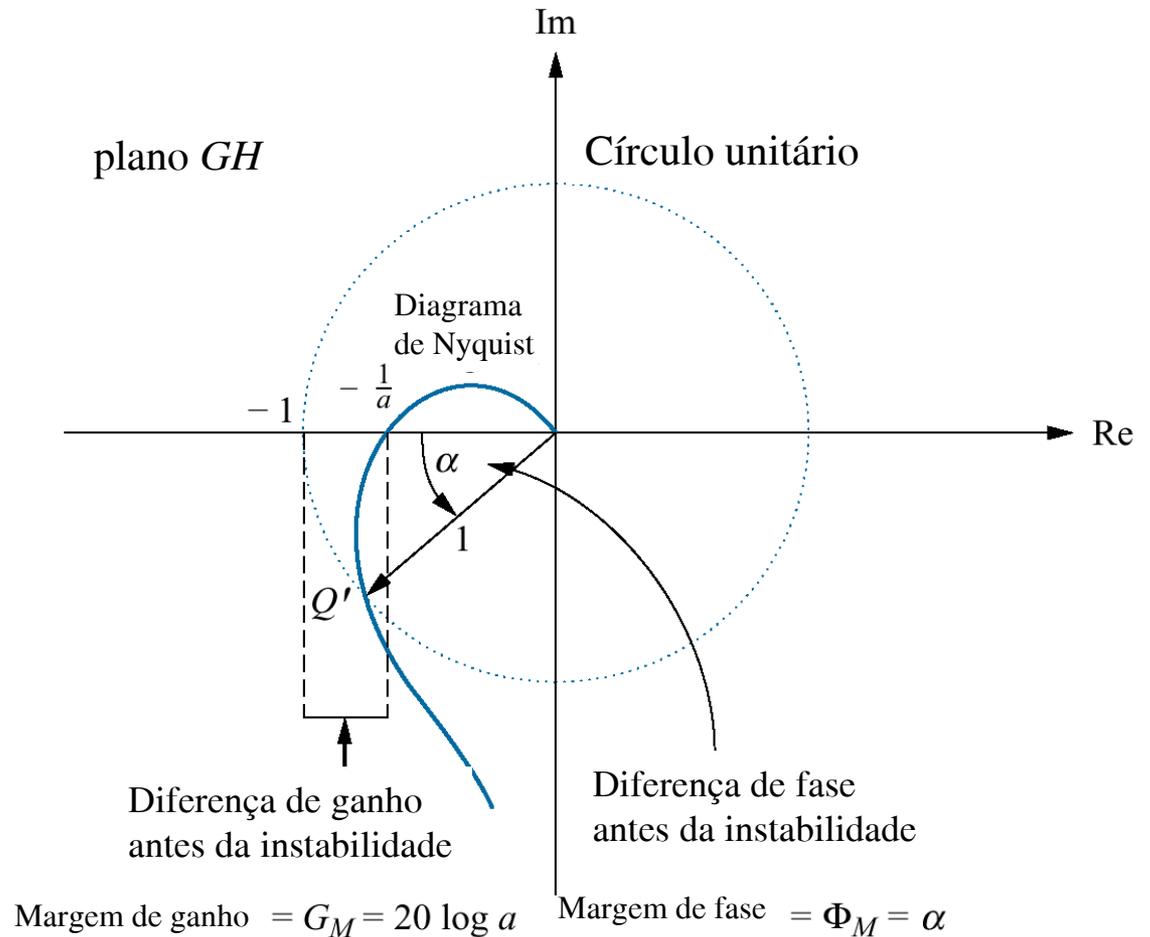


Fig.10.36
 Diagramas
 logarítmicos
 de magnitude
 e de fase de
 Bode para o
 sistema do
 Exemplo 10.9

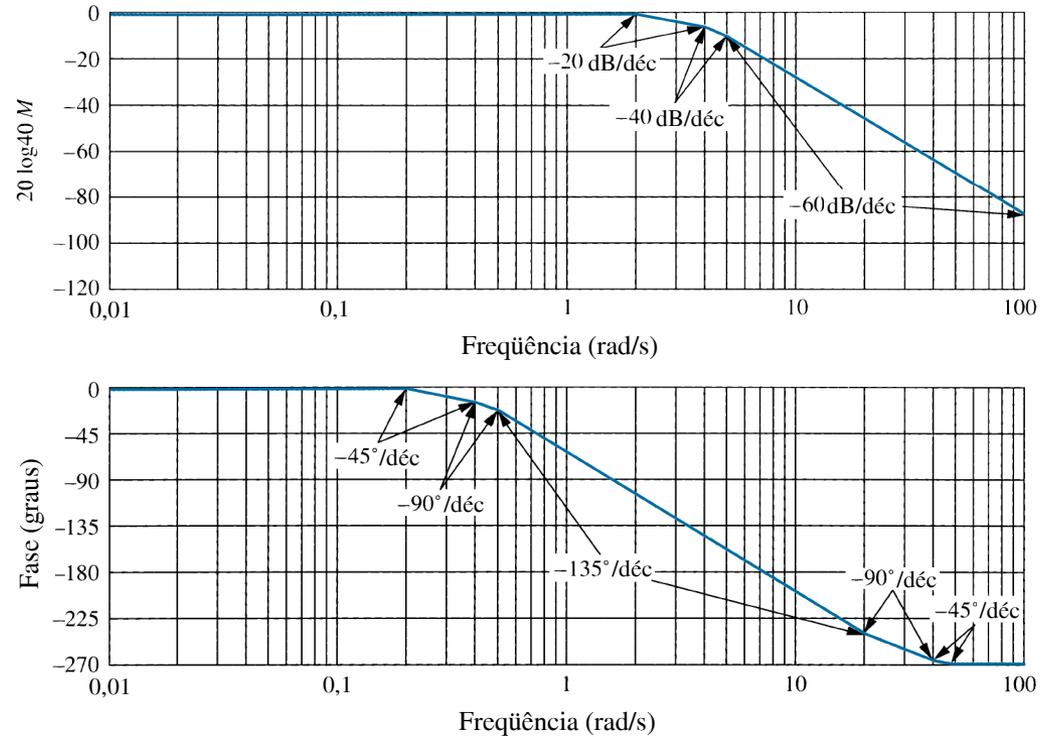


Fig.10.37
 Margens de ganho e de fase nos diagramas de Bode

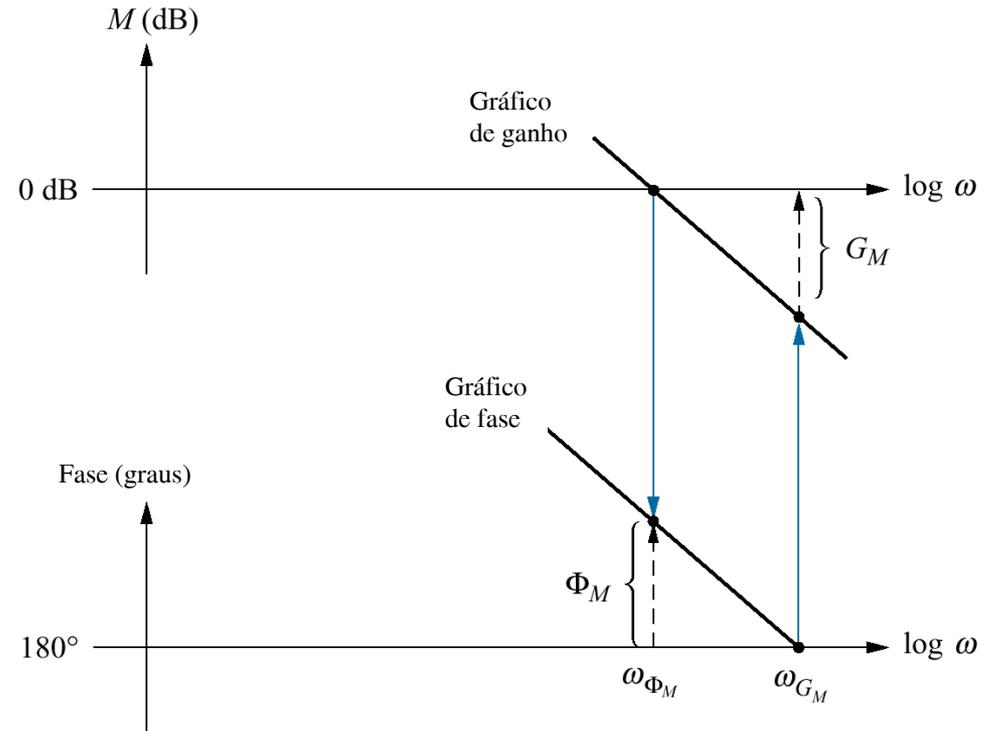


Fig.10.38

Sistema de segunda
ordem a malha
fechada

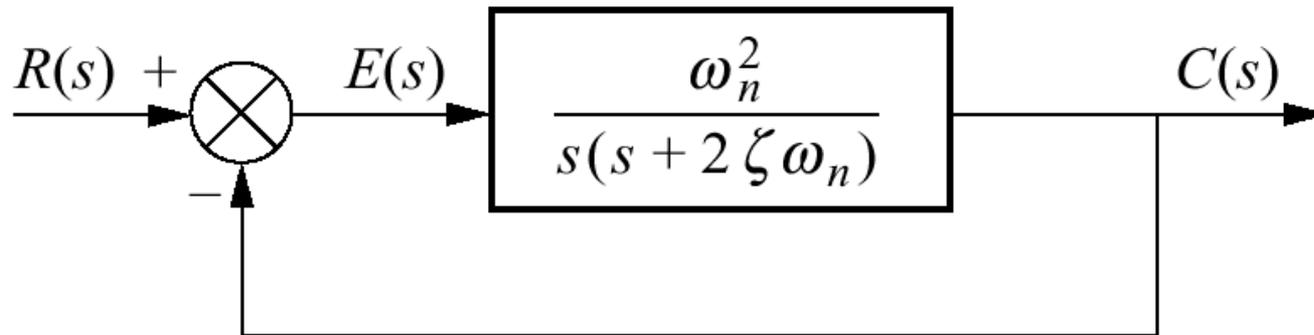


Fig.10.39
 Gráfico
 logarítmico de
 magnitude
 representativo
 da Eq.(10.51)

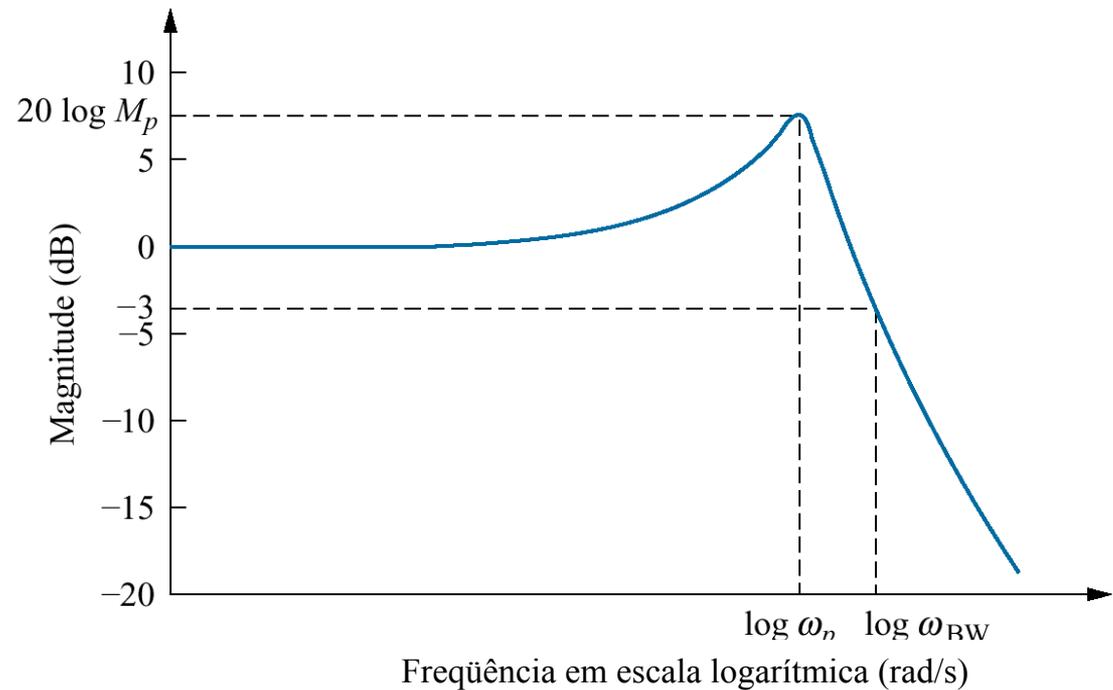


Fig.10.40

Pico de resposta de freqüência a malha fechada em função da ultrapassagem percentual para um sistema de dois pólos

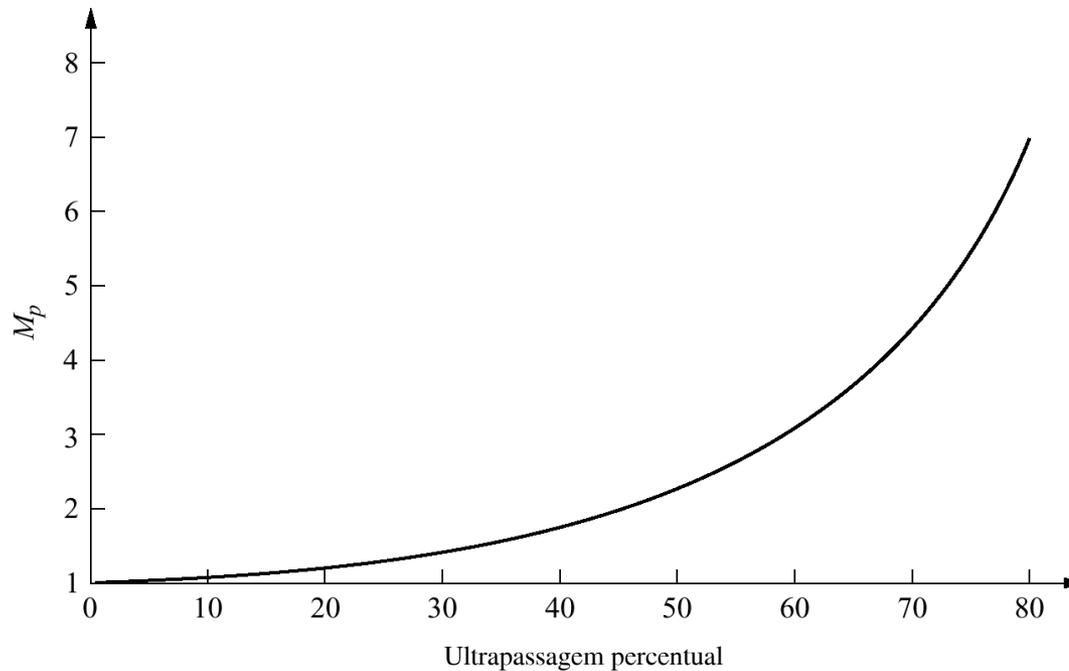
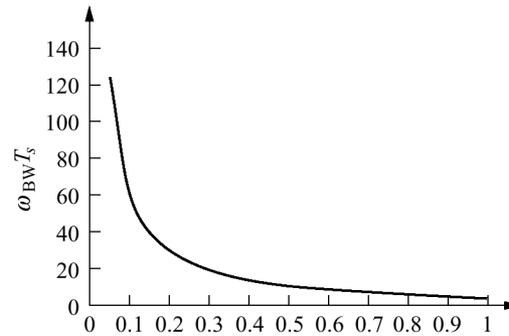


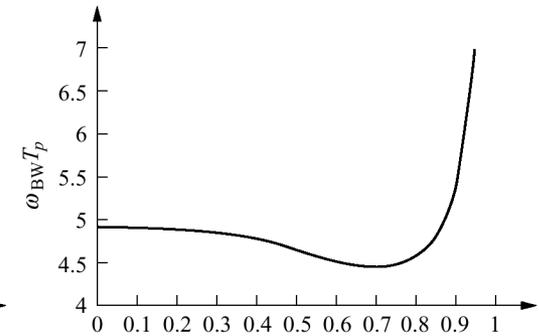
Fig.10.41

Banda passante normalizada em função da relação de amortecimento para:

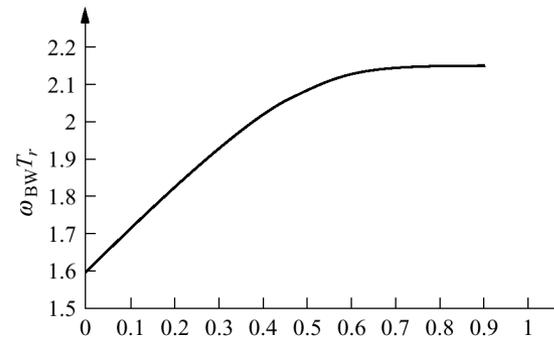
- a. tempo de assentamento;
- b. instante de pico;
- c. tempo de subida



Relação de amortecimento
(a)



Relação de amortecimento
(b)



(c)

Fig.10.42
Círculos M constantes

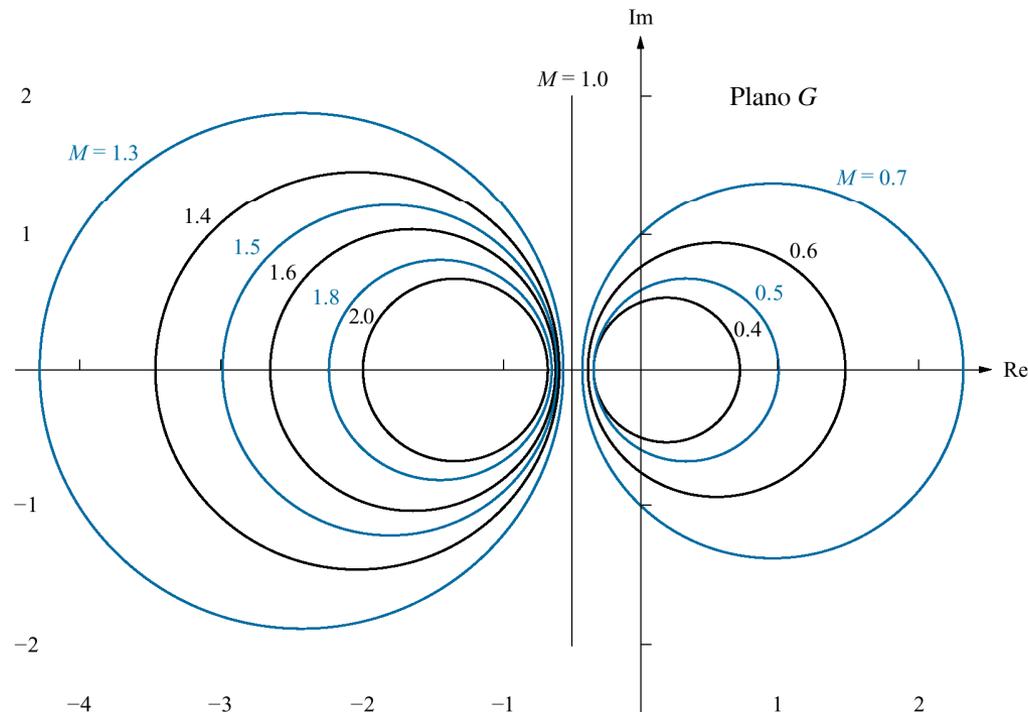


Fig.10.43
Círculos N constantes

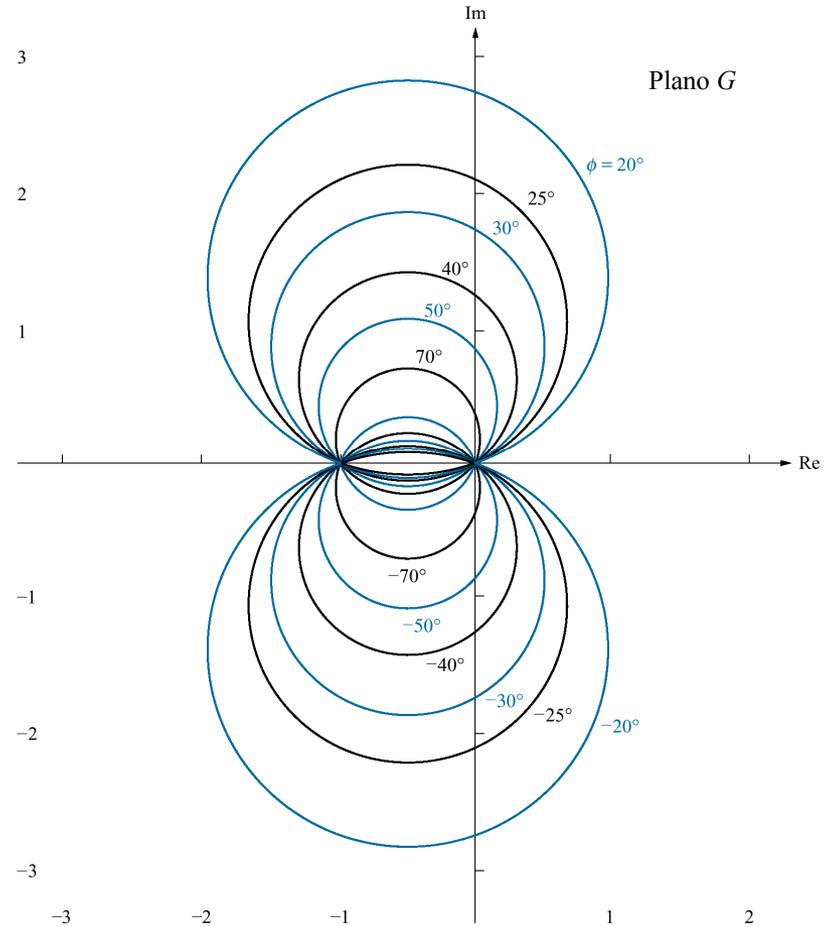


Fig.10.44
 Diagrama de Nyquist para o Exemplo 10.11 e círculos M e N constantes

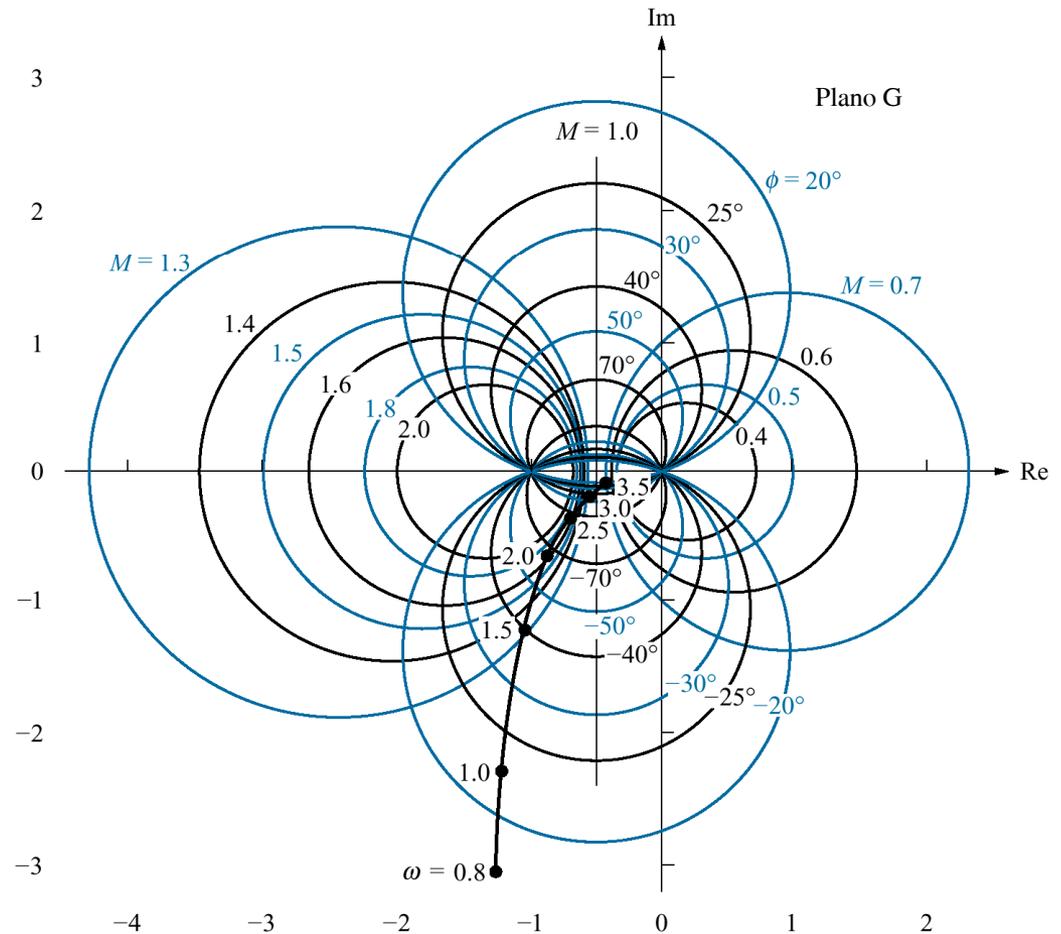


Fig.10.45
 Resposta de
 freqüência a
 malha fechada
 para o Exemplo
 10.11

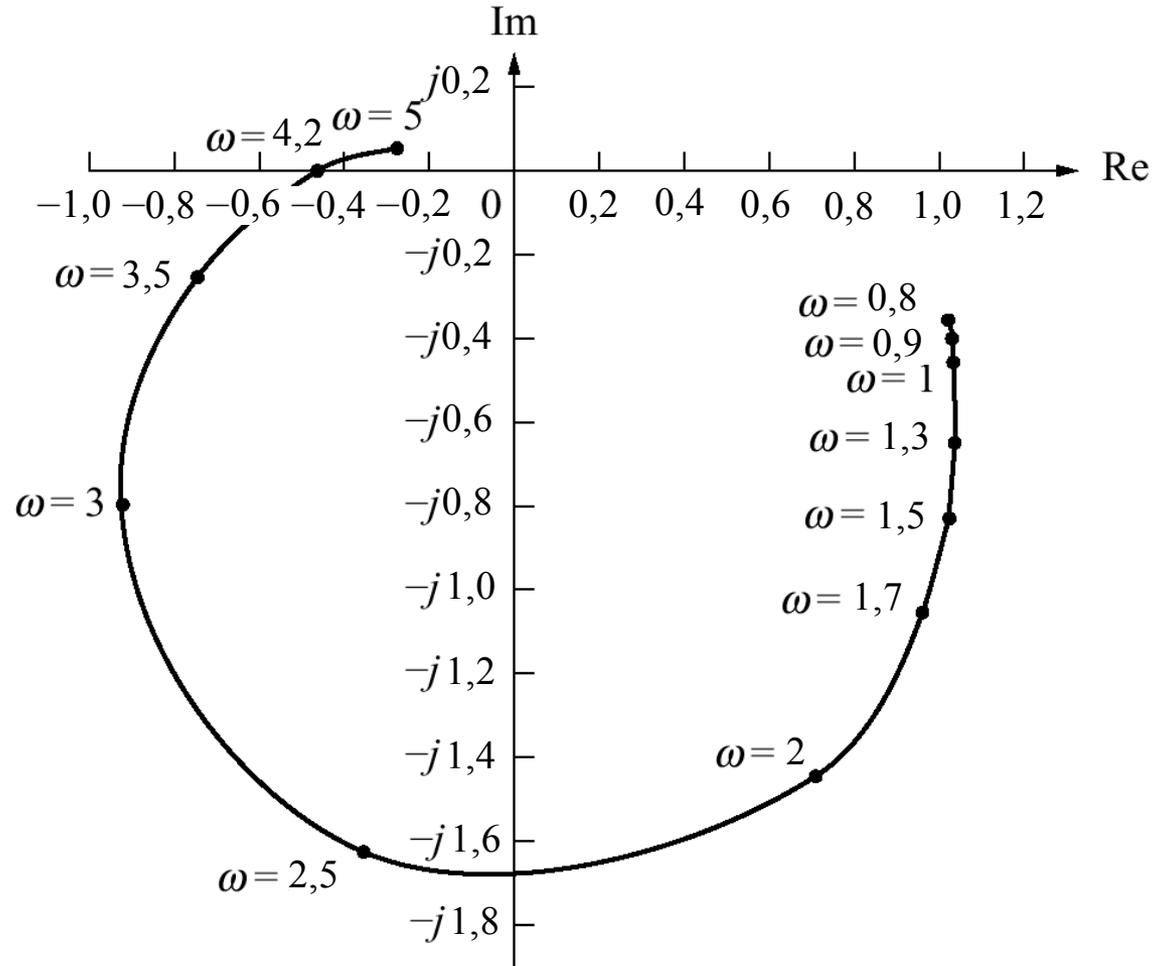


Fig.10.46

Gráfico de Nichols

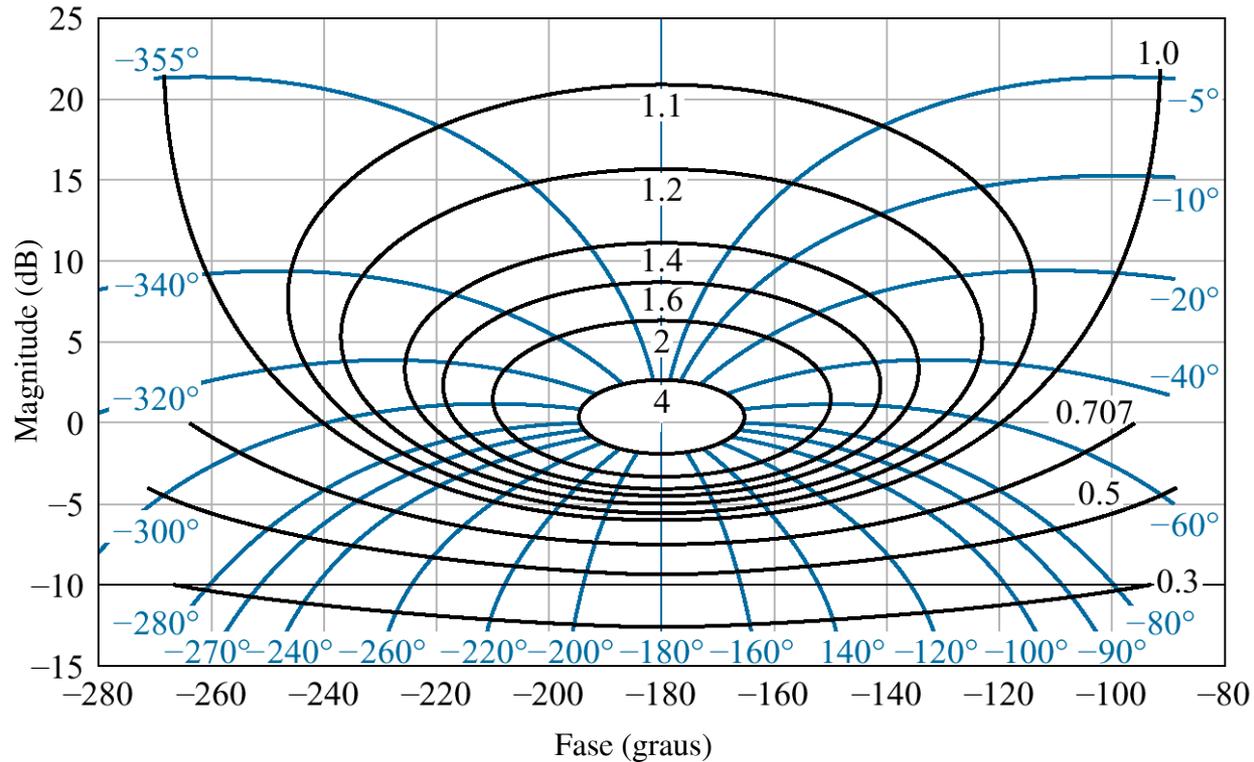


Fig.10.47

Gráfico de Nichols com resposta de freqüência para $G(s) = K/[s(s + 1)(s + 2)]$ superposta.

São mostrados valores para $K = 1$ e $K = 3,16$

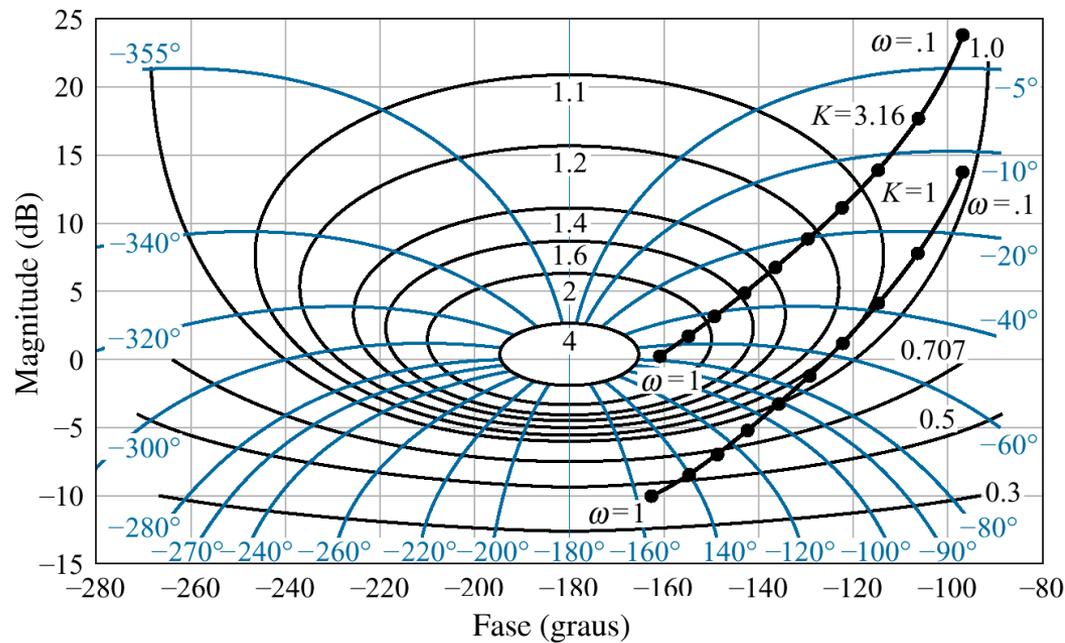


Fig.10.48

Margem de fase em função da relação de amortecimento

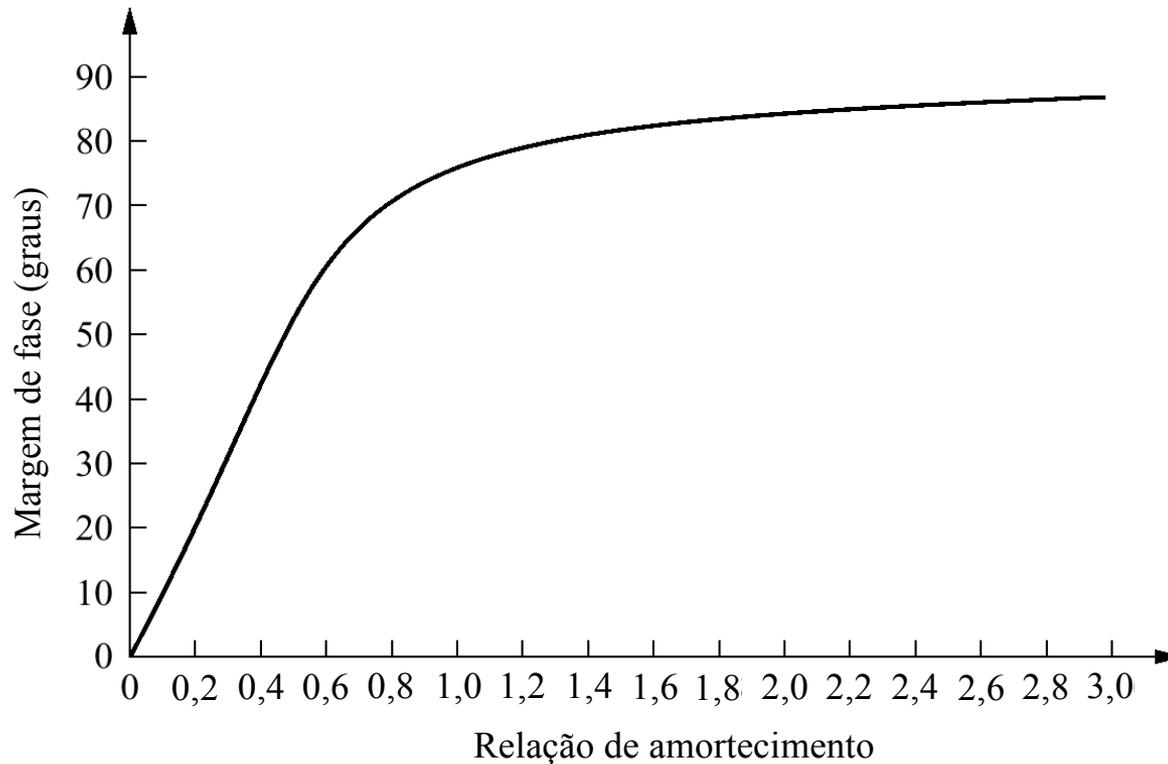


Fig.10.49

Ganho a malha aberta em função do ângulo de fase a malha aberta para ganho a malha fechada de -3 dB.

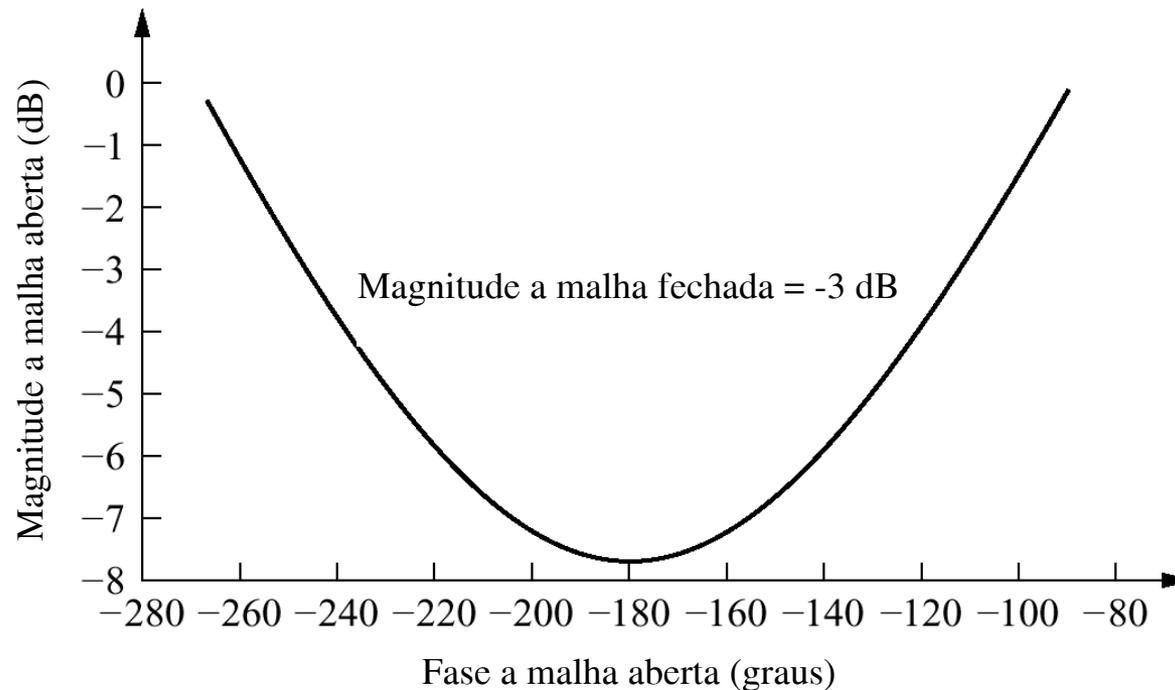


Fig.10.50

- a. Diagrama de blocos;
b. diagrama de Bode para o sistema do Exemplo 10.13

