

3.9 ESTABILIDADE EM FREQUÊNCIA

A estabilidade do amplificador realimentado depende da resposta em frequência do ganho $A(s)$ e do fator de realimentação $\beta(s)$

A função de transferência de malha fechada é:

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta(s)}$$

Hipóteses:

- pólos e zeros da função em altas frequências
- $\beta(s)$ constante em baixas frequências
- $A(s)\beta(s)$ constante e positivo em baixas frequências

ANÁLISE EM ALTAS FREQUÊNCIAS

Em regime permanente senoidal:
$$A_f(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + A(j\omega)\beta(j\omega)}$$

Ganho de malha:
$$L(j\omega) = A(j\omega)\beta(j\omega) = |A(j\omega)\beta(j\omega)| e^{j\phi(\omega)}$$

A estabilidade do amplificador realimentado é determinada pelo modo como o ganho de malha varia com a frequência

ω_{180} : **Freqüência na qual a fase é 180°**

$L(j\omega_{180})$ **é um número real negativo \Rightarrow Realimentação positiva**

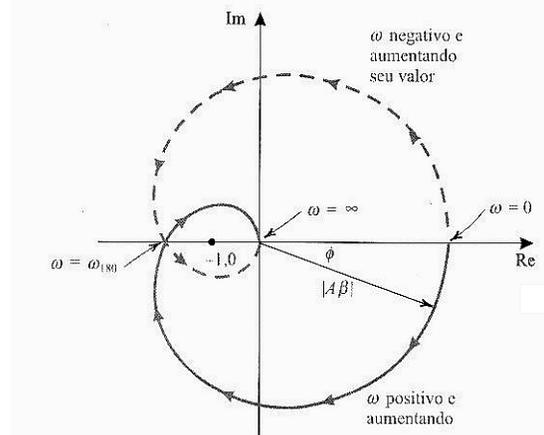
$|L(j\omega_{180})| < 1 \Rightarrow |A_f(j\omega)| > |A(j\omega)|$ **Ainda estável**

$|L(j\omega_{180})| = 1 \Rightarrow |A_f(j\omega)| = \infty$ **Oscilação mantida em ω_{180}**

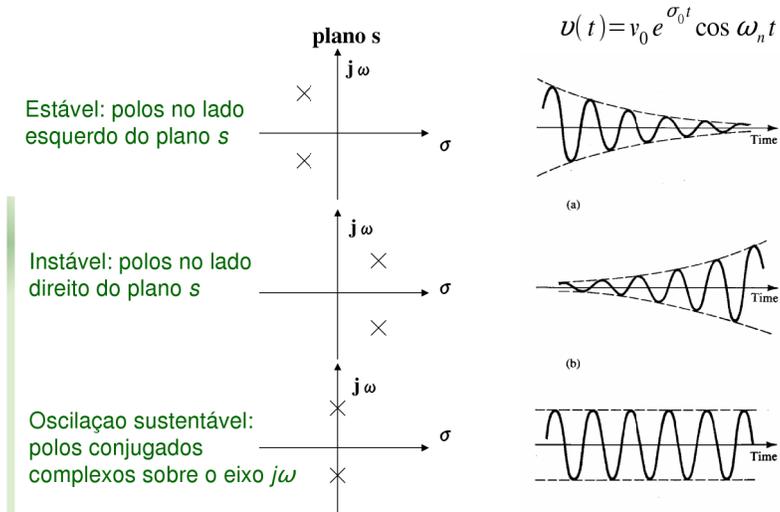
$|L(j\omega_{180})| > 1$ **Oscilação com amplitude crescente**

DIAGRAMA DE NYQUIST

Gráfico polar de $L(j\omega)$ com a freqüência como parâmetro



3.10 O EFEITO DA REALIMENTAÇÃO SOBRE OS PÓLOS



Os pólos de um amplificador realimentado são as raízes de sua equação característica:

$$1 + A(s) \beta = 0$$

Amplificadores com polo simples e β independente de s :

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_p}$$

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s) \beta} = \frac{A_0}{(1 + s/\omega_p + A_0 \beta)} = \frac{A_0 / (1 + A_0 \beta)}{1 + s / [\omega_p (1 + A_0 \beta)]}$$

$$\omega_{pf} = \omega_p (1 + A_0 \beta)$$

Graficamente:

Lugar das raízes
plano s:

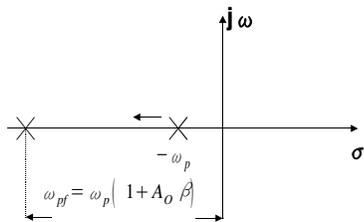
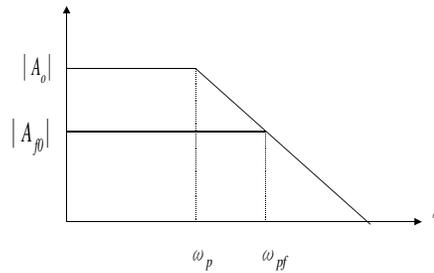


Diagrama de Bode:



Sistema Incondicionalmente Estável: polo em malha fechada sempre no lado esquerdo do plano s

Amplificadores com 2 polos e β independente de s:

$$A(s) = \frac{A_0}{(1 + s/\omega_{p1})(1 + s/\omega_{p2})}$$

Equação característica

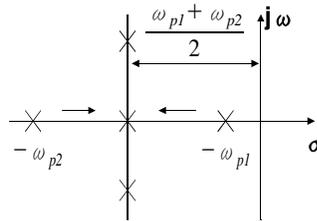
$$1 + A(s)\beta = 0$$

$$s^2 + s(\omega_{p1} + \omega_{p2}) + (1 + A_0\beta)\omega_{p1}\omega_{p2} = 0$$

Os pólos de malha fechada são dados por

$$s = -\frac{1}{2}(\omega_{p1} + \omega_{p2}) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\omega_{p1} + \omega_{p2})^2 - 4(1 + A_0\beta)\omega_{p1}\omega_{p2}}$$

Lugar das raízes



Forma da equação característica

$$s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2 = 0$$

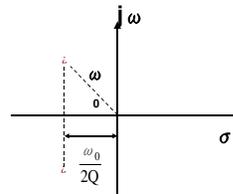
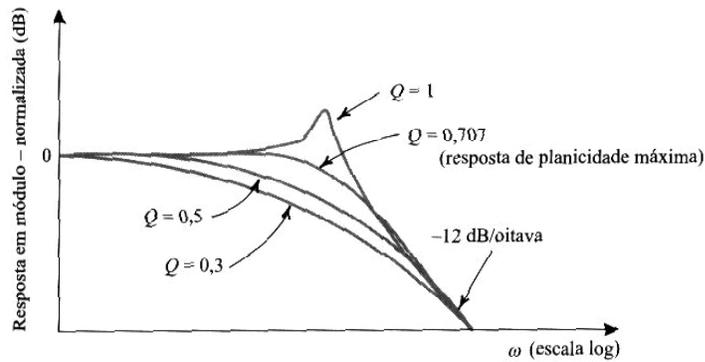


Diagrama de Bode:



$$Q = \frac{\sqrt{(1 + A_0 \beta) \omega_{p1} \omega_{p2}}}{\omega_{p1} + \omega_{p2}}$$

- Q < 0,5 → pólos reais**
- Q = 0,5 → pólos reais e iguais**
- Q > 0,5 → pólos complexos conjugados**

Exemplo 8.5 (Sedra):

- Para a malha de realimentação positiva do circuito pede-se:
- a transmissão da malha $L(s)$ e sua equação característica
- o diagrama do lugar das raízes para K variável
- valor de K que resulta em resposta de planicidade máxima
- valor de K que faz o circuito oscilar

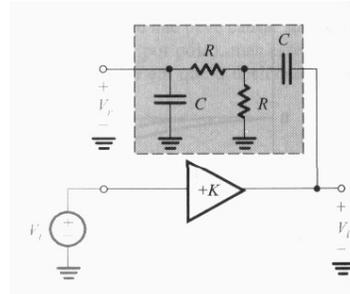
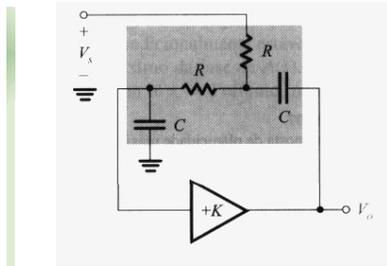
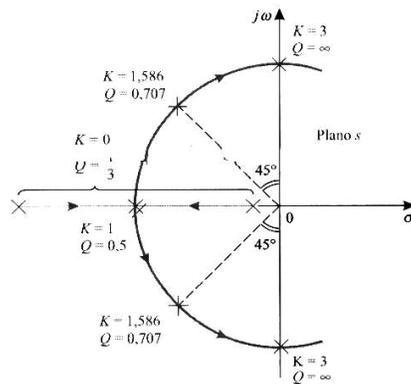
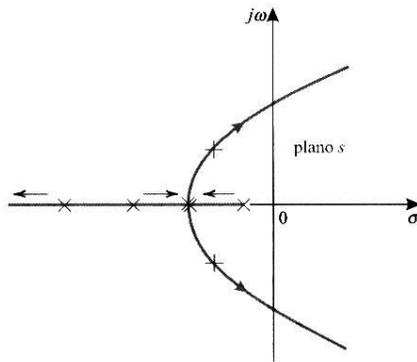


Diagrama do lugar das raízes:



AMPLIFICADORES COM TRÊS OU MAIS PÓLOS

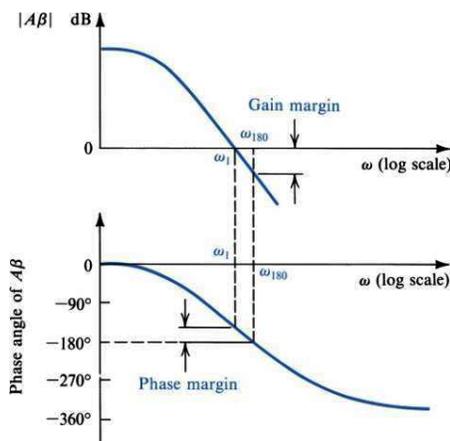


Aumentando-se o ganho de malha $A_0 \beta$:

- pólo de mais alta frequência se afasta
- pólos de menor frequência se aproximam, tornam-se complexos conjugados e passam para a metade direita do plano s, tornando o sistema instável
- Para manter estabilidade o ganho de malha $A_0 \beta$ deve ser inferior ao valor que faz as raízes puramente imaginárias
- Na condição limite o ângulo de defasagem é 180°

3.11 ESTABILIDADE USANDO AS CURVAS DE BODE

Margens de ganho e de fase

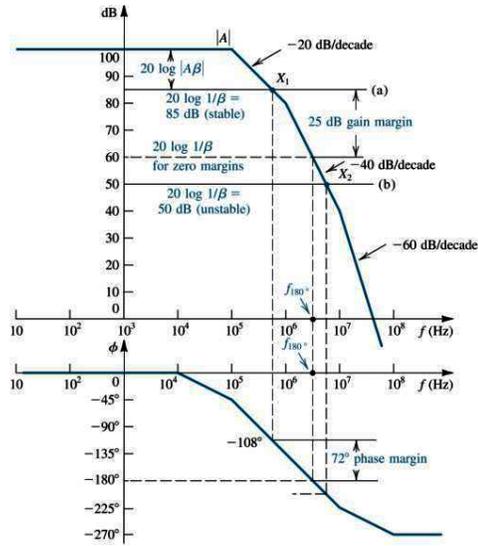


$$\text{margem de ganho} = |A\beta|_{180^\circ}$$

$$\text{margem de fase} = 180^\circ - \theta$$

$$\theta \rightarrow |A\beta| = 0$$

3.11 Análise de amplificador com 3 pólos



3.12 COMPENSAÇÃO EM FREQUÊNCIA

