

## RESPOSTA EM FREQUÊNCIA-DIAGRAMA DE NYQUIST

O diagrama de Nyquist (ou diagrama polar) é um gráfico do módulo de  $G(j\omega)$  pelo ângulo de fase de  $G(j\omega)$  em coordenadas polares com  $\omega$  variando de 0 até o infinito. Existem 4 pontos de interesse para plotar o diagrama de Nyquist:

- quando  $\omega = 0 \rightarrow \phi = 0^\circ$
- quando  $\omega = \infty \rightarrow \phi = 180^\circ$
- quando  $\phi = \pm 90^\circ$

### I) Pólo na origem

Ocorre quando  $G(s) = \frac{1}{s}$ , passando para o domínio da frequência:

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega} = -\frac{j}{\omega} \quad (\text{para imaginária negativa})$$

O módulo e a fase dessa função são dados por:

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\omega}$$

$$\text{tg } \phi = \frac{(-1/\omega)}{0} = -\infty \Rightarrow \phi = -90^\circ$$

Se  $\omega$  variar de 0 até  $\infty$ , o ganho irá variar de  $\infty$  até 0 (fig.12.1)

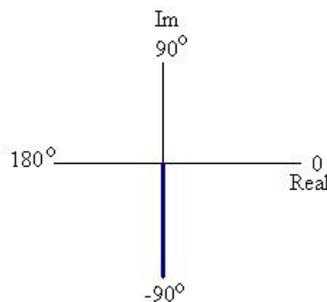


fig.12. 1 - Diagrama de Nyquist para um pólo

### II) Zero na origem

Ocorre quando  $G(s) = s$ , passando para o domínio da frequência:

$$G(j\omega) = j\omega$$

O módulo e a fase dessa função são dados por:

$$|G(j\omega)| = \omega$$

$$\text{tg } \phi = \frac{(\omega)}{0} = +\infty \Rightarrow \phi = 90^\circ$$

Se  $\omega$  variar de 0 até  $\infty$ , o ganho irá variar de 0 até  $\infty$  (fig.12.2)

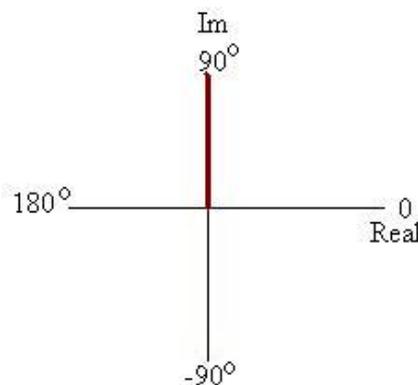


fig.12. 2 -Diagrama de Nyquist para um zero

III) Pólo real

Ocorre quando  $G(s) = \frac{1}{Ts + 1}$ , passando para o domínio da frequência:

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega T + 1} = \frac{1 - j\omega T}{1 + \omega^2 T^2}$$

O módulo e a fase dessa função são dados por:

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$$

$$\operatorname{tg} \phi = -\frac{(\omega T)}{1} = -\omega T \quad \Rightarrow \phi = -\operatorname{arctg}(\omega T)$$

Substituindo alguns valores de frequência nas equações acima, temos:

$\omega$ (rad/s)	$ G(j\omega) $	$\phi$	
0	1	0	Ponto de cruzamento com o eixo real
1/T	1/√2	-45°	
∞	0	-90°	Ponto de cruzamento com o eixo imaginário

Variando  $\omega$  de 0 até  $\infty$ , o diagrama de Nyquist será um semicírculo conforme mostra a figura 12.3:

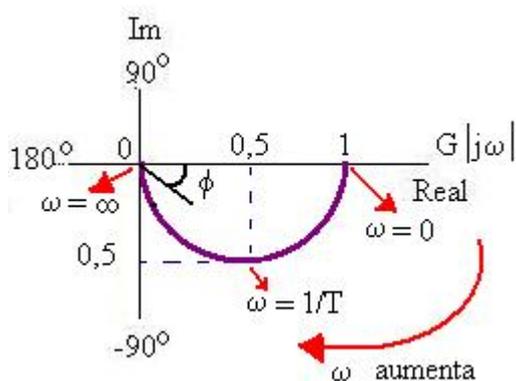


fig.12. 3 - Diagrama de Nyquist para um pólo real

IV) Zero real

Ocorre quando  $G(s) = 1 + Ts$ , passando para o domínio da frequência:

$$G(j\omega) = 1 + j\omega T$$

O módulo e a fase dessa função são dados por:

$$|G(j\omega)| = \sqrt{1 + \omega^2 T^2}$$

$$\text{tg } \phi = \omega T \quad \Rightarrow \quad \phi = \text{arctg}(\omega T)$$

Substituindo alguns valores de frequência nas equações acima, temos:

$\omega$ (rad/s)	$ G(j\omega) $	$\phi$	
0	1	0	Ponto de cruzamento com o eixo real
1/T	$\sqrt{2}$	45°	
$\infty$	$\infty$	90°	

Variando  $\omega$  de 0 até  $\infty$ , o diagrama de Nyquist será uma reta conforme mostra a figura 12.4

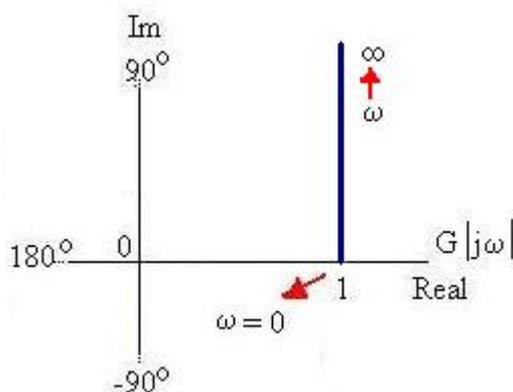


fig.12. 4 - Diagrama de Nyquist para zero real

V) Par de pólos complexos

Ocorre quando  $G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$ , passando para o

domínio da frequência:

$$G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + j2\zeta\omega_n\omega + \omega_n^2}$$

$$G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + j2\zeta\omega_n\omega + \omega_n^2} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] + j2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}}$$

$$G(j\omega) = \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] + j2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}} - j \frac{2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] + j2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}}$$

O módulo e a fase dessa função são dados por:

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}}$$

$$\text{tg}\phi = -\frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

Substituindo alguns valores de frequência nas equações acima, temos:

$\omega$ (rad/s)	$ G(j\omega) $	$\phi$	
0	1	0	Ponto de cruzamento com o eixo real
$\omega_n$	$1/2\zeta$	$-90^\circ$	Ponto de cruzamento com o eixo imaginário
$\infty$	0	$-180^\circ$	Ponto de cruzamento com o eixo real

Pela tabela nota-se que o gráfico irá depender do valor do coeficiente de amortecimento  $\zeta$ . Além disso, o ponto onde o gráfico cruza o eixo imaginário é a frequência natural não amortecida  $\omega_n$ . A figura 12.5-A mostra o diagrama de Nyquist para diferentes valores de  $\zeta$ :

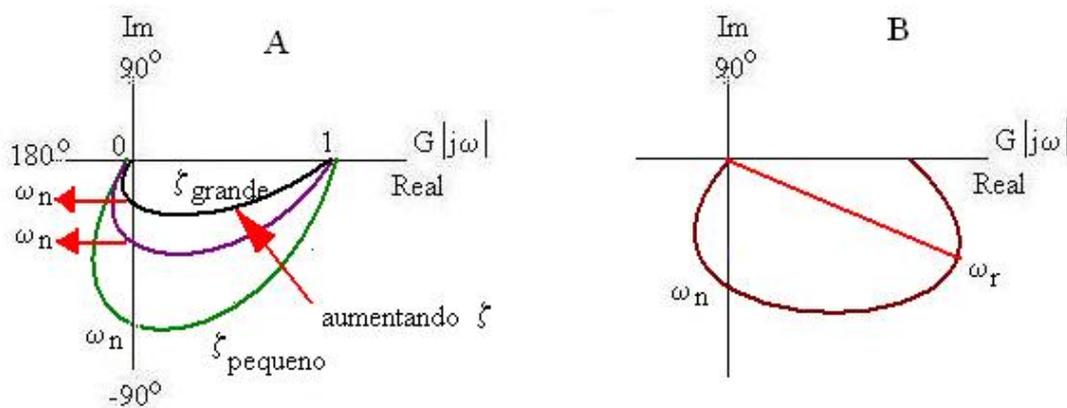


fig.12.5 - Diagrama de Nyquist para um pólo complexo

A figura 12.5 B mostra que o ponto mais distante da origem no diagrama de Nyquist corresponde à frequência de ressonância ( $\omega_r$ ). O valor de pico de ressonância é obtido pela relação entre o módulo do vetor na frequência de ressonância ( $\omega_n$ ) pelo módulo do vetor em  $\omega=0$ .

VI) Par de zeros complexos

Ocorre em  $G(s) = \frac{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{\omega_n^2}$ , passando para o domínio da frequência:

$$G(j\omega) = \frac{-\omega^2 + j2\zeta\omega_n\omega + \omega_n^2}{\omega_n^2} = 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j2\zeta\omega/\omega_n$$

O módulo e a fase dessa função são dados por:

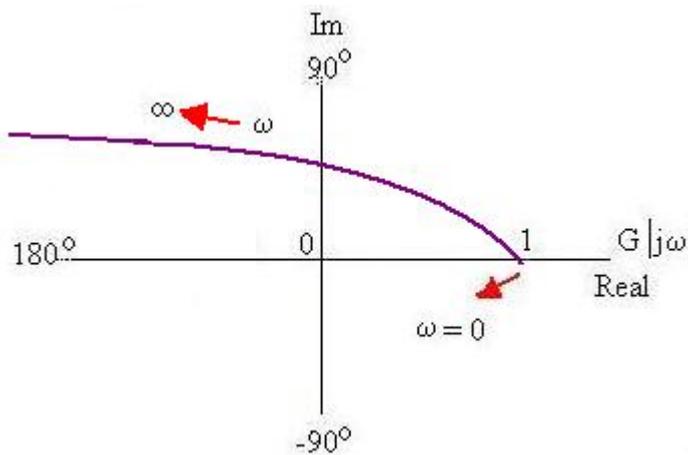
$$|G(j\omega)| = \sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta\omega/\omega_n]^2}$$

$$\text{tg } \phi = \frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2}$$

Substituindo alguns valores de frequência nas equações acima, temos:

$\omega$ (rad/s)	$ G(j\omega) $	$\phi$	
0	1	0	Ponto de cruzamento com o eixo real
$\omega_n$	$2\zeta$	$+90^\circ$	Ponto de cruzamento com o eixo imaginário
$\infty$	$\infty$	$180^\circ$	Ponto de cruzamento com o eixo real

A figura 12.6 mostra o diagrama de Nyquist para um zero complexo:



**fig.12. 6 Diagrama de Nyquist para um zero complexo**

\*\*\*\*\*

- Para obter o diagrama de Nyquist de uma função deve-se,
- colocar a função da forma  $x + jy$ ,
  - calcular a equação do módulo e fase da função
  - variar a frequência de 0 até  $\infty$  (lembrar dos ângulos  $\pm 90^\circ$  e  $\pm 180^\circ$ )

.....

Exemplo 1: Traçar o diagrama de Nyquist para a seguinte função:

$$G(s) = \frac{1}{(2s+1)(s^2+s+1)}$$

Solução: Passando para o domínio da frequência ( $j\omega$ ) e deixando na forma de  $x + jy$

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= \frac{1}{(2j\omega+1)(-\omega^2+j\omega+1)} = \frac{1}{-2j\omega^3-2\omega^2+2j\omega-\omega^2+j\omega+1} \\ &= \frac{1}{(1-3\omega^2) + j(3\omega-2\omega^3)} \\ &= \frac{(1-3\omega^2)}{(1-3\omega^2)^2 + (3\omega-2\omega^3)^2} - j \frac{(3\omega-2\omega^3)}{(1-3\omega^2)^2 + (3\omega-2\omega^3)^2} \end{aligned}$$

Calculando o módulo e a fase:

$$\begin{aligned} |G(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{(1-3\omega^2)^2 + (3\omega-2\omega^3)^2}} \\ \phi &= -\arctg \frac{3\omega-2\omega^3}{1-3\omega^2} \end{aligned}$$

Variando  $\omega$ :

Para  $\omega=0 \rightarrow |G(j\omega)| = 1$  e  $\phi = 0$   
 Para  $\omega=\infty \rightarrow |G(j\omega)| = 0$  e  $\phi = 90^\circ$ :

$$\phi = -\arctg \frac{3\omega-2\omega^3}{1-3\omega^2} = -\arctg \left[ \frac{3/\omega^3-2}{1/\omega^3-3/\omega} \right] = -\arctg \frac{-2}{0} = -\arctg(-\infty)$$

Os pontos de cruzamento com o eixo real são dados por  $\phi=0$  ou  $\phi=\pm 180^\circ$   
 Para  $\phi=-180^\circ \rightarrow \text{tg } \phi = -0$ , portanto

$$3\omega-2\omega^3=0 \Rightarrow \omega=0 \quad \text{ou} \quad \omega = \sqrt{\frac{3}{2}} = 1,2 \text{ rad/s}$$

para este valor o ganho será:  $G(j1.2) = -0,3$

Os pontos de cruzamento com o eixo imaginário são dados por  $\phi=\pm 90^\circ$

Para  $\phi=-90^\circ \rightarrow \text{tg } \phi = -\infty$ , portanto:

$$1-3\omega^2=0 \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,6 \text{ rad/s}$$

para este valor o ganho será:  $G(j1.2) = -0,7$

A figura 12.7 mostra o gráfico de Nyquist para esta função. Para auxiliar o esboço do gráfico outros valores podem ser calculados:

Para  $\omega=1 \rightarrow |G(j\omega)| = 0,4$  e  $\phi = -153^\circ$

Para  $\omega=0,2 \rightarrow |G(j\omega)| = 0,95$  e  $\phi = -34^\circ$

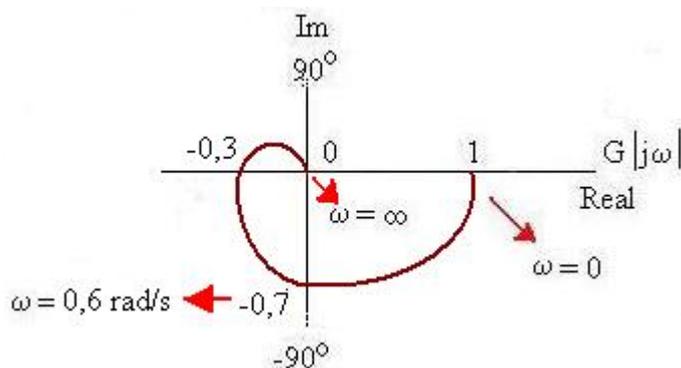


fig.12. 7 - Diagrama de Nyquist do exemplo 1

Exercício 1: Plote o diagrama de Nyquist para a função:

$$G(s) = \frac{1}{s(2s + 1)}$$

**CARTA DE NICHOLS (DIAGRAMA DE MÓDULO EM dB PELO ÂNGULO DE FASE)**

A carta de Nichols é uma outra forma de representar graficamente a resposta em frequência. O eixo X representam os ângulos enquanto que o eixo Y são plotados o módulo em dB da função.

A vantagem dessa representação é que a estabilidade relativa de um sistema de malha fechada pode ser determinada rapidamente e a compensação pode ser feita facilmente. A figura 12.8 mostra a carta de Nichols para algumas funções:

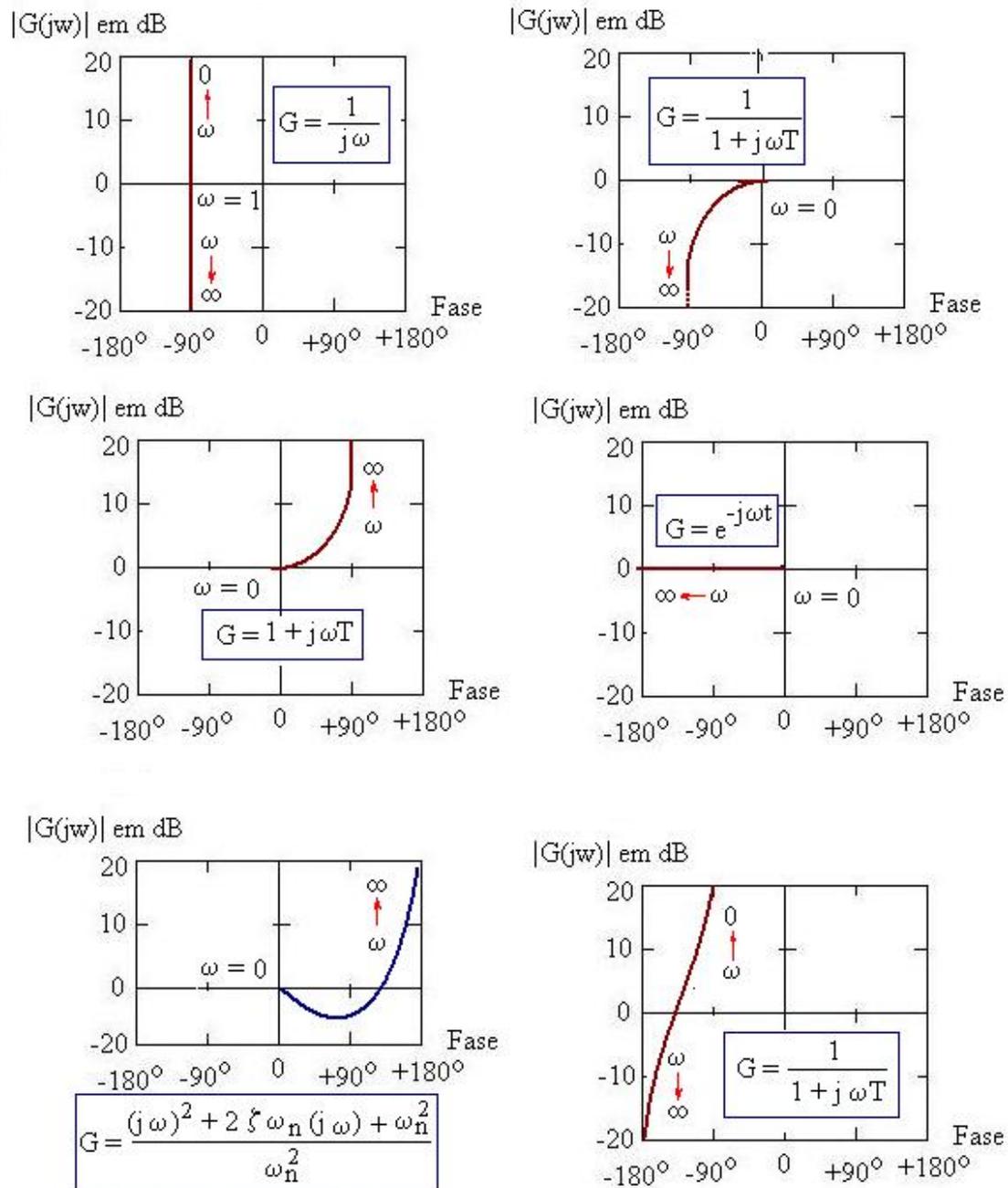


fig.12. 8 - Exemplos da carta de Nichols para algumas funções

### CRITÉRIO DE ESTABILIDADE DE NYQUIST

A resposta em frequência de um sistema pode ser facilmente obtida experimentalmente. H. Nyquist desenvolveu, em 1932, um critério para analisar a estabilidade de um sistema tendo como base a teoria das funções de variáveis complexas de Cauchy.

Considerando o sistema de malha fechada da figura 12.9, sua função de transferência é:

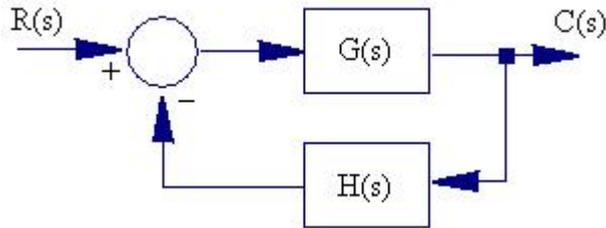


fig.12. 9 - Sistema de malha fechada

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Para um sistema ser estável sua equação característica:  $1 + G(s)H(s)$  deve possuir todas suas raízes no semiplano esquerdo do plano  $s$ . O critério de Nyquist relaciona a resposta em frequência da malha aberta ( $G(s)H(s)$ ) ao número de zeros e pólos da equação característica localizados no semiplano direito do plano  $s$ .

O critério de Nyquist realiza o mapeamento de uma função  $F(s)$  do plano  $s$  para o plano  $F(s)$ . Considerando a seguinte equação característica;

$$F(s) = 1 + \frac{1}{s+1} \quad \text{o ponto } s=1+2j \text{ seria mapeado no plano } F(s) \text{ como:}$$

$$F(1+2j) = 1,2 - j0,25$$

A figura 12.10 mostra alguns mapeamentos:

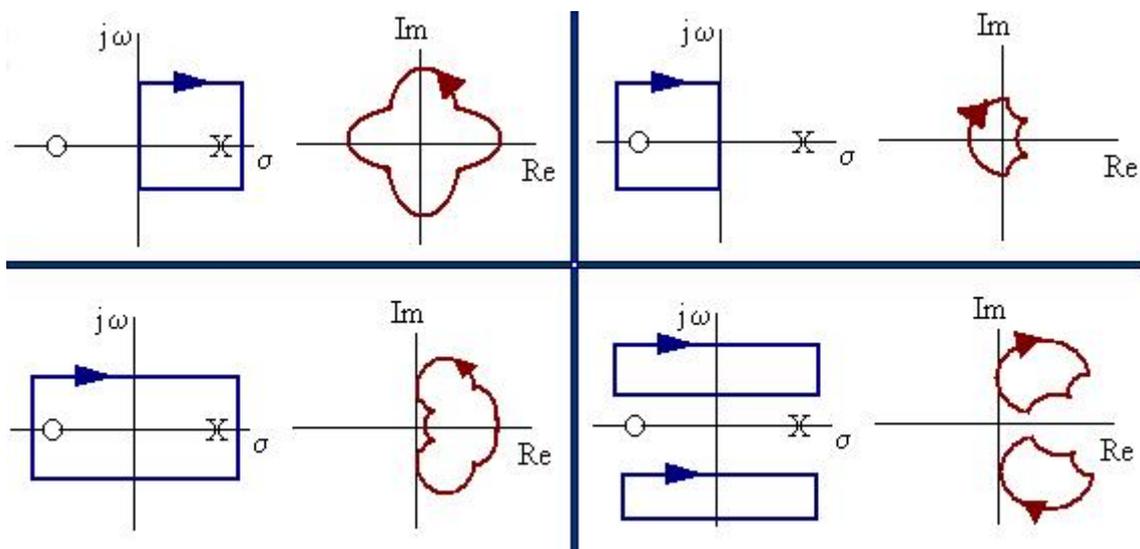


fig.12. 10 - Mapeamentos de alguns contornos fechados no plano  $s$

Pela figura anterior (fig.12.10) nota-se que quando o contorno envolve um pólo no plano  $s$ , o contorno no plano  $F(s)$  envolve a origem no sentido anti-horário. Se o contorno envolve um zero no plano  $s$ , o contorno no plano  $F(s)$  envolve a origem no sentido horário. Se o contorno no plano  $s$  conter o mesmo número de pólos e de zeros ou não conter nem pólo e nem zero, o contorno do plano  $F(s)$  não envolvera a origem. Se o contorno do plano  $s$  envolver  $N$  pólos (ou  $N$  zeros) o contorno do plano  $F(s)$  envolverá  $N$  vezes a origem no sentido anti-horário (ou horário).

### Teorema de Cauchy

Seja  $F(s)$  uma relação de polinômios em “ $S$ ”. Seja um contorno “ $C$ ” em “ $S$ ” mapeado num contorno “ $B$ ” no plano  $F(s)$ . Se  $F(s)$  é analítica dentro do contorno “ $C$ ”, exceto para um número finito de pólos e se  $F(s)$  não possui pólos e zeros sobre “ $C$ ”, então:

$$N = Z - P$$

onde:  $Z \rightarrow$  número de zeros de  $1+G(s)H(s)$  no semiplano direito do plano  $s$ .

$P \rightarrow$  número de pólos de  $G(s)H(s)$  no semiplano direito do plano  $s$ .

$N \rightarrow$  número de envolvimento do ponto  $-1+j0$  no sentido horário.

Se  $N > 0 \rightarrow$  sentido horário

Se  $N < 0 \rightarrow$  sentido anti-horário

Como a equação característica é  $1 + G(s)H(s)$ , o contorno dessa função é o mesmo da função  $G(s)H(s)$  deslocada de  $-1$  no eixo real. Portanto ao invés de verificar o número de voltas que um contorno “ $B$ ” realiza na origem de  $1 + G(s)H(s)$ , pod-se verificar o número que voltas que o contorno realiza no ponto  $-1,0$  de  $G(s)H(s)$ .

Nyquist mapeou todo o semiplano direito do plano  $s$ , com isso todas as raízes com parte real positivas do plano  $S$  são envolvidas pelo contorno “ $C$ ”. Para um sistema ser estável o número de zeros ( $Z$ ) deve ser igual a 0.

Exemplo 2: Dado o diagrama de Nyquist abaixo, determinar se o sistema é estável ou não:

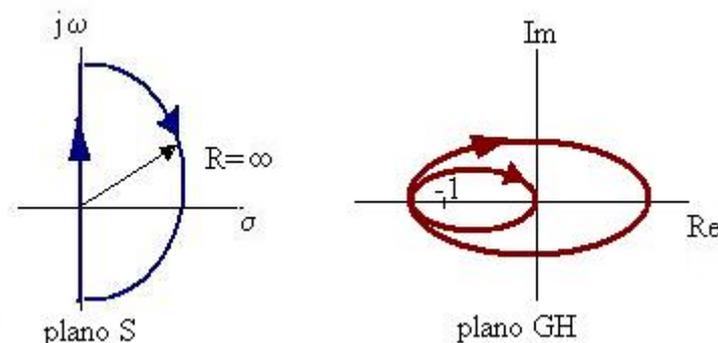


fig.12. 11 - Exemplo 2

Neste exemplo o mapeamento envolve o ponto  $-1$ , 2 vezes no sentido horário, portanto  $N=2 \rightarrow Z = N + P = 2 + P \neq 0 \therefore$  o sistema é instável.

Exemplo 3: Um sistema tem a seguinte função de transferência:

$$G(s)H(s) = \frac{50}{(s+1)^2(s+10)}$$

Utilize o diagrama de Nyquist para determinar se o sistema é estável ou não.

sistema é estável ou não.

- Passando para o domínio da frequência:

$$G(j\omega)H(j\omega) = \frac{50}{(j\omega+1)^2(j\omega+10)}$$

deixando na forma  $x = jy$

$$G(j\omega)H(j\omega) = \frac{50(10-12\omega)}{(10-12\omega)^2 + (21\omega - \omega^3)^2} - j \frac{50(21\omega - \omega^3)}{(10-12\omega)^2 + (21\omega - \omega^3)^2}$$

obtendo o módulo e a fase:

$$|G(j\omega)H(j\omega)| = \sqrt{\frac{[50(10-12\omega)]^2 + [50(21\omega - \omega^3)]^2}{[(10-12\omega)^2 + (21\omega - \omega^3)^2]}} \quad \text{se } \omega = 0 \rightarrow |GH| = 5$$

ou

$$|G(j\omega)H(j\omega)| = \sqrt{\frac{[50(10/\omega^3 - 12/\omega^2)]^2 + [50(21/\omega^2 - 1)]^2}{\omega^2[(10/\omega^3 - 12/\omega^2)^2 + (21/\omega^2 - 1)^2]}} \quad \text{se } \omega = \infty \rightarrow |GH| = 0$$

$$\phi = -\arctg \frac{(21\omega - \omega^3)}{(10 - 12\omega^2)}$$

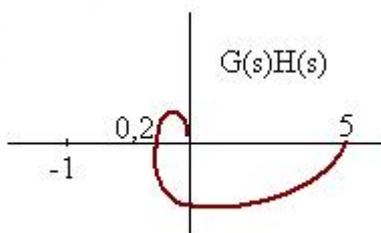
ponto de cruzamento com o eixo real ocorre quando  $\phi = 0$  ou  $\phi = \pm 180^\circ$ . Para  $\phi = \pm 180^\circ$ :

$$(21\omega - \omega^3) = 0$$

$$\omega(21 - \omega^2) = 0 \quad \text{ou} \quad \omega = 0 \quad \text{ou}$$

$$\omega^2 = 21 \Rightarrow \omega = 4,58$$

substituindo  $\omega$  na fórmula do módulo  $\rightarrow |GH| = 0,2066$ . Como o diagrama não envolve o ponto -1, e não tem pólos em malha aberta do lado direito  $\rightarrow Z = N + P = 0 \rightarrow$  sistema estável.

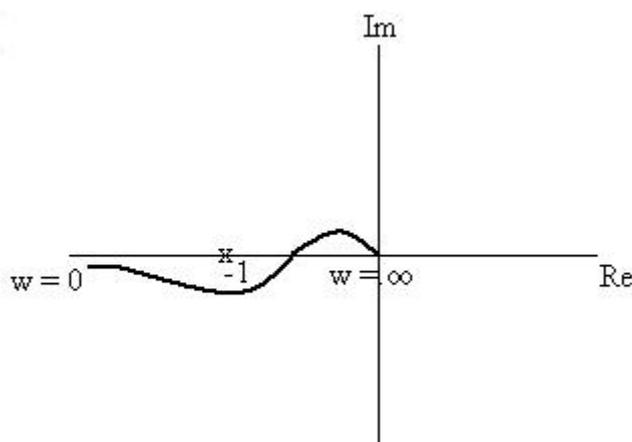


A figura ao lado mostra o diagrama de Nyquist desse sistema ( o diagrama está fora de escala).

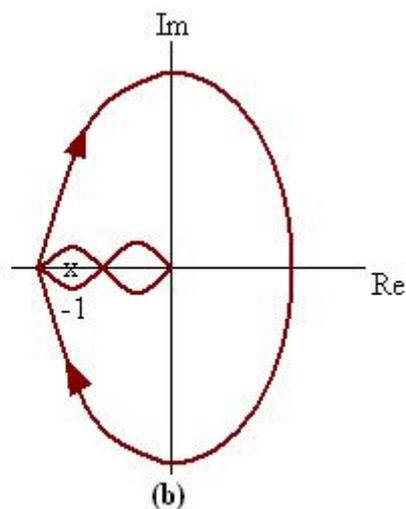
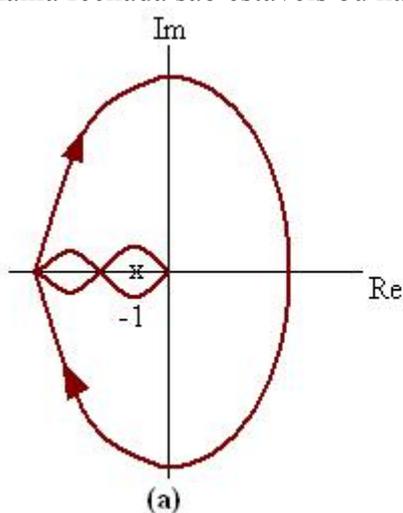
fig.12. 12 -Diagrama de Nyquist do exemplo 3

Exercício 2: A figura seguinte mostra o diagrama de Nyquist em malha aberta de um sistema. Complete o diagrama (supondo que Nyquist englobe todo semiplano direito do plano  $s$ ) e responda:

- se a função de transferência de malha aberta não possui pólos no semiplano direito do plano  $s$ , o sistema de malha fechada é estável?
- se a função de transferência de malha aberta possui um pólo e nenhum zero no semiplano direito do plano  $s$ , o sistema de malha fechada é estável?
- se a função de transferência de malha aberta possui um zero e nenhum pólo no semiplano direito do plano  $s$ , o sistema de malha fechada é estável?



Exercício 3: Considere os diagramas de Nyquist abaixo, sabendo que para ambos o sistema não possui pólos do lado direito do plano  $s$ , responda se os sistemas em malha fechada são estáveis ou não.



**Estabilidade Relativa pelo mapeamento.**

Um sistema em malha fechada será mais estável quanto mais afastados os pólos dominantes estiverem do eixo imaginário  $j\omega$ . Estabilidade relativa é quanto os pólos dominantes estão próximo ao eixo imaginário  $j\omega$ . Considere os seguintes mapeamentos no plano s:

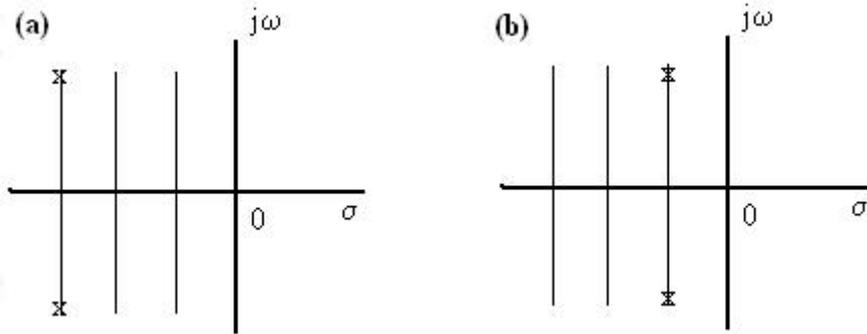


fig.12. 13 - Dois sistemas de malha fechada com dois pólos

Na figura 12.13, o sistema (a) é mais estável do que o sistema (b) porque seus pólos dominantes estão mais distantes do eixo imaginário  $j\omega$ . Mapeando esses sistemas temos:

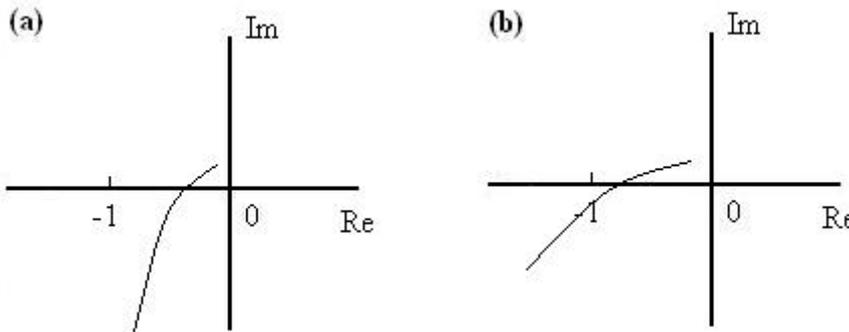


fig.12. 14 - Diagrama de Nyquist dos sistemas da figura 12.13

Pelas duas figuras anteriores, conclui-se que quanto mais próximo do eixo imaginário estiver os pólos dominantes mais próximo do ponto  $-1+j0$  estará o lugar geométrico de  $G(j\omega)$ .

A figura ao lado (fig.12.15) mostra o critério de estabilidade de Nyquist para um sistema em malha aberta.

Pela figura para um ângulo de fase de  $180^\circ$ , o módulo de  $G(j\omega)H(j\omega)$  não deve exceder de 1.

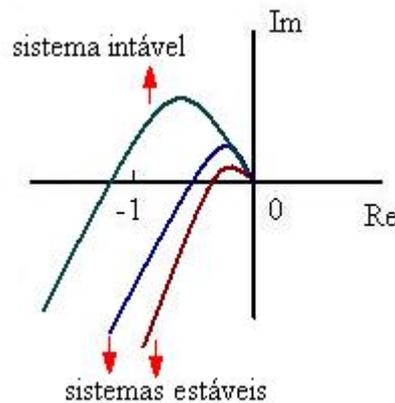


fig.12. 15 - Sistema estável e instável por Nyquist

Exemplo 4: Dada a função de transferência de malha aberta abaixo, qual a condição para que o sistema seja estável?

$$G(s)H(s) = \frac{k}{s(s+1)(s+1)}$$

Resolvendo de duas maneiras:

- Passando para domínio da frequência:

$$G(j\omega)H(j\omega) = \frac{k}{j\omega(j\omega+1)(j\omega+1)} = \frac{k}{-2\omega^2 + j(\omega - \omega^3)}$$

$$G(j\omega)H(j\omega) = \frac{-2k\omega^2}{(-2\omega^2)^2 + (\omega - \omega^3)^2} - j \frac{k(\omega - \omega^3)}{(-2\omega^2)^2 + (\omega - \omega^3)^2}$$

- O módulo e a fase são dados por:

$$|G(j\omega)H(j\omega)| = \frac{k}{\sqrt{4\omega^4 + (\omega - \omega^3)^2}}$$

$$\phi = -\arctg \frac{(\omega - \omega^3)}{-2\omega^2}$$

**PRIMEIRA SOLUÇÃO:** Como o módulo não pode ser maior do que 1 para 180°, na condição limite o ângulo  $\phi$  deve ser 0:

$$\omega - \omega^3 = 0 \Rightarrow \omega(1 - \omega^2) = 0 \quad \text{ou}$$

$$\omega = 0 \quad \text{ou} \quad \omega = 1$$

substituindo  $\omega=1$  na equação do módulo e fazendo o módulo ser menor do que 1:

$$|G(j\omega)H(j\omega)| = \frac{k}{\sqrt{4\omega^4 + (\omega - \omega^3)^2}} < 1$$

$$\frac{k}{\sqrt{4+0}} < 1 \Rightarrow k < 2$$

**SEGUNDA SOLUÇÃO:** Utilizando o gráfico normalizado ( $k=1$ ) de Nyquist do sistema, temos

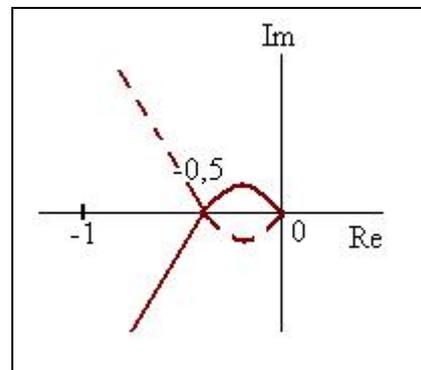
p/  $\omega=0 \rightarrow |GH| \rightarrow \infty$

p/  $\omega=\infty \rightarrow |GH| \rightarrow 0$

p/  $\omega=1 \rightarrow |GH| \rightarrow 0,5$

Como  $P=0$  (não há pólos no lado direito do plano s):

$$Z=N+P \rightarrow Z=N \text{ ou } N=0 \text{ para ser estável}$$



Como  $G(j\omega)$  não pode envolver o ponto -1 e sendo o ponto crítico = -0,5 (pelo diagrama), então o ponto -0,5 vezes o ganho  $k$  deve ser maior do que a condição limite (ponto -1):

$$-0,5k > -1 \rightarrow 0,5k < 1 \rightarrow k < 2$$

Exercício 4: Determine o valor de  $k$  para que os sistemas abaixo sejam estáveis:

a)  $G(s)H(s) = \frac{k}{s^2(s+1)}$

b)  $G(s)H(s) = \frac{k}{(s+1)(s+2)(s+3)}$

Resp.:  $k < 10$

Exercício 5: Determine o valor de  $k$  para que os sistemas abaixo sejam estáveis:

a)  $G(s)H(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)}$

Resp:  $k > 0$

b)  $G(s)H(s) = \frac{k}{s(s + 1)(2s + 1)}$

Resp:  $k < 1.5$

**SEÇÃO MATLAB**

O comando para traçar o diagrama de Nyquist no MatLab é:

nyquist(num, den)  
nyquist (num,den,w)      → w é o espaçamento entre décadas

Pode-se, também, utilizar argumentos:

[re,im,w] = nyquist (num, den)  
[re,im,w] = nyquist (num, den,w)

onde: re é uma matriz que contém a parte real da resposta  
im é a matriz que contém a parte imaginária da resposta  
w vetor de frequências

Exemplo: Esboçar o o diagrama de Nyquist para:

$$G(s) = \frac{16}{s^2 + 4s + 16}$$

Fazendo num = 16      → num = [0 0 16]  
e den = (s<sup>2</sup> + 4s + 16)      → den = [1 4 16]

```
num = [0 0 16 ];      % numerador de G(s)  
den =[1 4 16];  
nyquist(num,den)      % gráfico de Nyquist  
title('Diagram de Bode')
```

```
% usando o mesmo sistema anterior especificando frequencias  
w = 0.1:0.1:100      % frequências de 0.1 até 100 de 0.1 em 0.1  
nyquist (num,den,w)      % gráfico de Nyquist.  
title('Diagram de Nyquist')
```

Como exercício: faça todos os gráficos desta apostila utilizando o matlab.