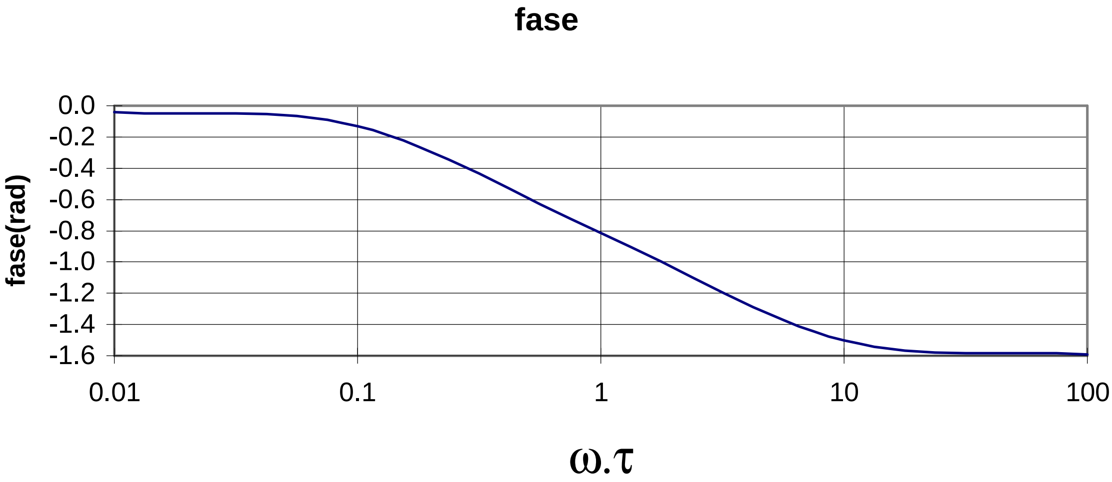
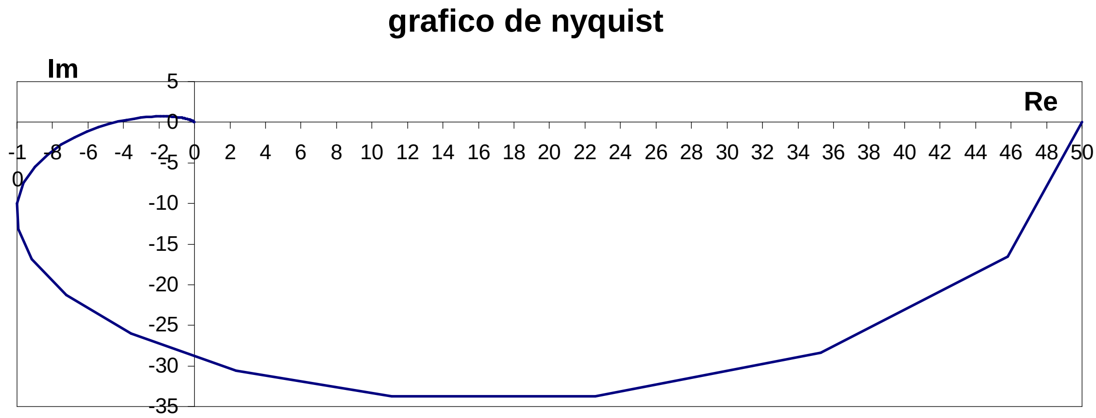


observações: quando a freqüência tende para zero, logAR tende para zero e a fase tende para zero. Esta é a assíntota de baixa freqüência; quando a freqüência tende para o infinito, logAR tende para - log$\omega.\tau_P$.e a fase tende a 90° Esta é a assíntota de alta freqüência (inclinação -1); a freqüência $1/\tau_P$ é conhecida como freqüência de canto (fase = 45°).

GRÁFICOS DE NYQUIST

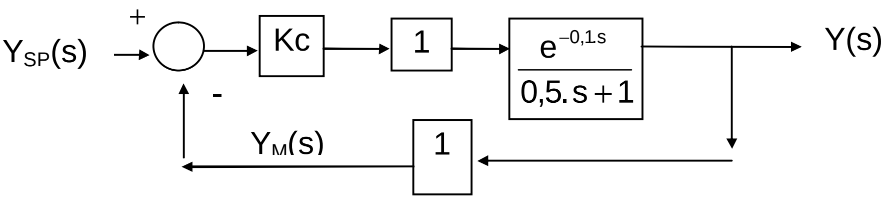
O gráfico de Nyquist é uma alternativa para representar a resposta em freqüência característica de um sistema dinâmico. Ele usa a própria função de transferência, variando a freqüência de zero ao infinito. Depois os valores de Im[G] são plotados na ordenada e os valores de Re[G] como abcissa. Vamos ver o procedimento através de um exemplo:

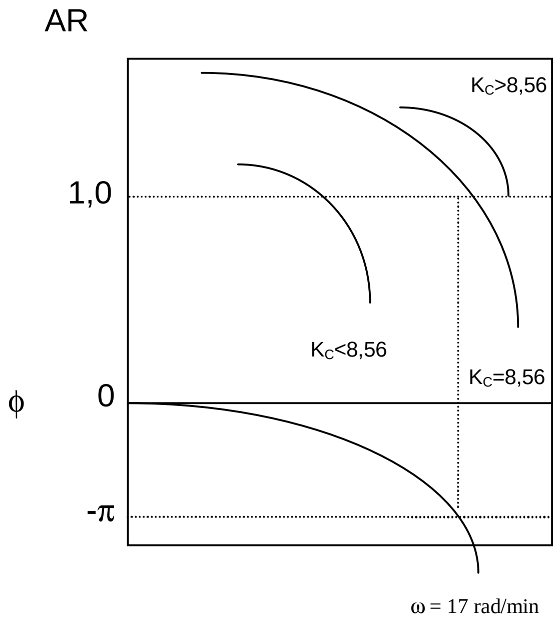
$$G(s) = \frac{50}{(s+1).(2.s+1).(4.s+1)}$$



13 - PROJETO E SINTONIA DE SISTEMAS DE CONTROLE EM "FEEDBACK" UTILIZANDO TÉCNICAS DE RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA.

CRITÉRIO DE BODE





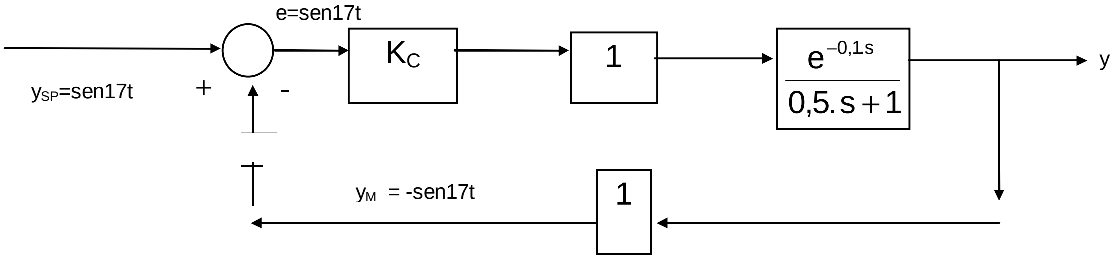
Consideraremos o sistema em "loop" fechado mostrado acima . A função de transferência de "loop" aberto é dada por

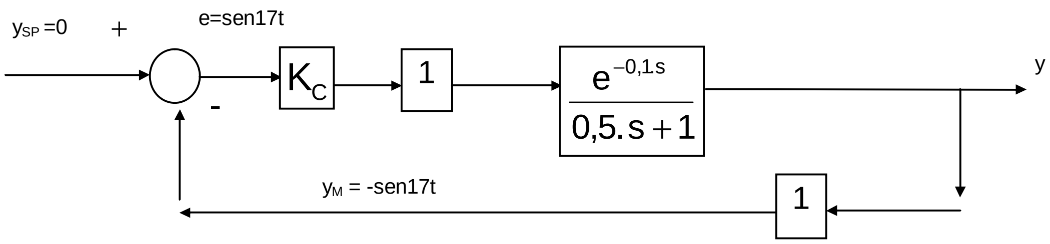
$$G_{OL}(s) = \frac{Y_M(s)}{Y_{SP}(s)} = \frac{K_C.e^{-0,1s}}{0,5.s+1}.$$

O diagrama de Bode para $G_{OL}(s)$ foi construído e é mostrado abaixo da respresentação da malha. Nota-se que quando a freaqüência atinge o valor de 17 rad/min, o ângulo de fase é -π (- 180°). A freqüência onde a fase é igual a 180° é chamada de freqüência de "crossover" e é denotada por ω_{CO}. Nesta freqüência, a razão de amplitude é encontrada no diagrama de Bode e vale

$$\frac{AR}{K_C} = \frac{1}{\sqrt{(0{,}5.17)^2 + 1}} = 0{,}12 \ .$$

Conseqüentemente, $K_C = 8{,}56$, para que tenhamos AR = 1. Agora, vamos considerar a malha em “feedback” com seu “loop” aberto com $K_C = 8{,}56$. Lá, o sinal do sensor foi desconectado do comparador do controlador. Vamos supor que o “set point” varie senoidalmente com freqüência de 17 rad/min e com amplitude igual a 1, y_{SP} = sen (17.t), então a íltima resposta do “loop” aberto $y_M(t)$ = sen(17.t - π) = -sen (17.t).





Ao mesmo instante de tempo o “set point” é zero e, simultaneamente, nós religamos o “loop” . Sob estas condiçoes o comparador inverte o sinal do sensor dando a ele o mesmo papel desempenhado pelo “set point” no “loop” aberto. Note que o erro e permanece o mesmo. Teoricamente, “a resposta do sistema continuará a oscilar com amplitude constante (AR = 1), senão houverem mudanças ou no “set point”, ou na carga (ou perturbação)”.

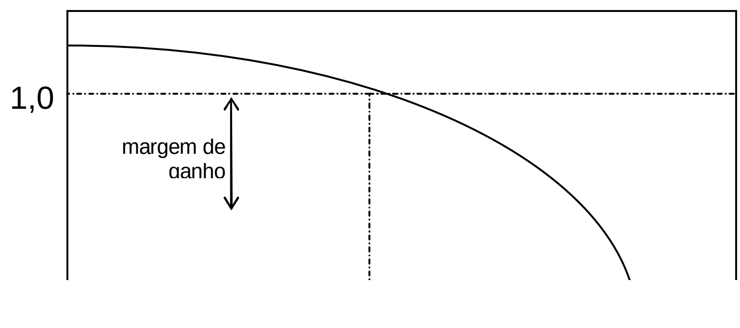
Vamos examinar os seguintes casos:

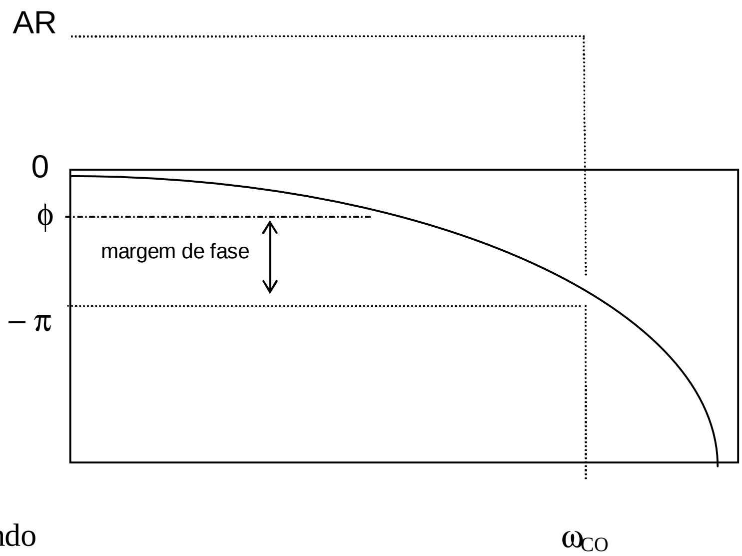
i) se $K_C > 8{,}56$, então AR > 1 quando a fase é - π. Entretanto, a oscilação mantida no “loop fechado” da malha de baixo começará a exibir um aumento contínuo da amplitude, conduzindo a um sistema instável;

ii) se $K_C < 8{,}56$, então AR < 1, quando a fase é - π. Conseqüentemente, a resposta oscilatória do “loop” fechado da malha de baixo exibirá uma amplitude continuamente decrescente, conduzindo a uma oscilação cada vez menor.

Podemos concluir o seguinte: “um sistema de controle em “feedback” é instável se a AR da correspondente função de transferência em “loop” aberto é maior do que 1 na freqência de crossover”. Este é o critério de estabilidade de Bode.

<u>MARGEM DE FASE E MARGEM DE GANHO</u>





Definindo

$$\text{margem de ganho} = \frac{1}{AR}$$

Nós podemos fazer as seguintes observações no significado prático da margem de ganho:

i) constitui uma medida de quanto o sistema está do limite da isntabilidade;

ii) quanto mais alto o valor da margem de ganho estiver acima de 1, mais robusto será o comportamento do “loop” fechado e, assim, mais seguro será a operação do processo controlado. Em outras palavras, quanto mais alta a margem de ganho, mais alta o fator segurança na sintonia do sistema;

iii) tipicamente, um sistema em “feedback” é projetado com uma margem de ganho maior do que 1,7. Isto significa que a AR pode aumentar 1,7 vezes antes do sistema ficar instável.

Além disto, há um outro fator de segurança : a margem de fase = π - ϕ, isto é, ela é uma quantidade adicional de fase necessária para desestabilizar o sistema. È claro, entretanto, que quanto maior a margem de fase, maior o fator de segurança utilizado para sintonia de controladores. Uma margem de fase típica utilizada é de 30°.

TÉCNICA DE SINTONIA ZIEGLER-NICHOLS

È uma técnica experimental bastante utilizada para sintonizar controladores. Ela tem as seguintes etapas:

i) trazer o sistema para o nível de operação desejado;

ii) usando controle proporcional, somente, e com “loop” fechado em “feedback”, introduzir uma mudança no “set point” e variar o ganho proporcional até que o sistema oscile continuamente. A freqüência de oscilação contínua é a freqüência de “crossover”. Chamando de M a razão de amplitude na freqüência de “crossover”;

iii) computar as seguintes quantidades:

$$\text{ultimo ganho} = K_U = \frac{1}{M}$$

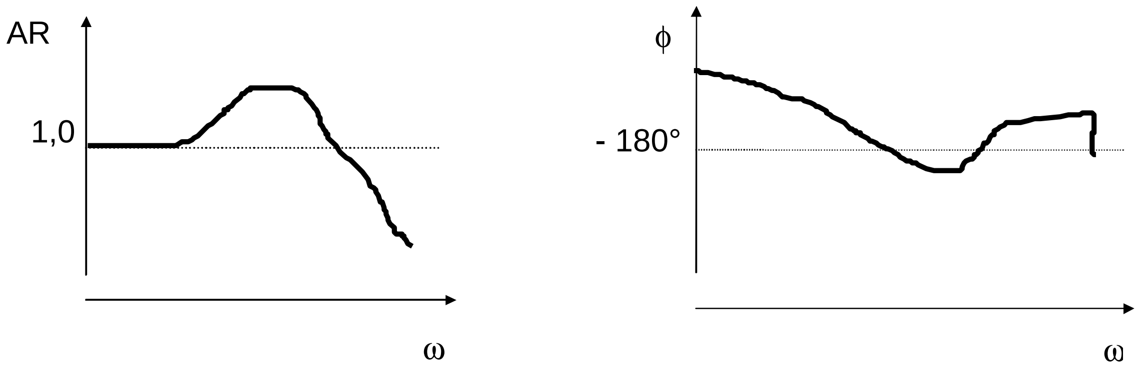
$$\text{ultimo periodo de ciclo mantido} = P_U = \frac{2.\pi}{\omega_{CO}} \text{min / ciclo}$$

iv) usando os valores de K_U e de P_U, Ziegler e Nichols recomendaram o seguinte cálculo para sintonia de controladores:

	K_C	τ_I	τ_D
proporcional	$K_U / 2$	-	-
PI	$K_U / 2,2$	$P_U / 1,2$	-
PID	$K_U / 1,7$	$P_U / 2$	$P_U / 8$

CRITÉRIO DE NYQUIST

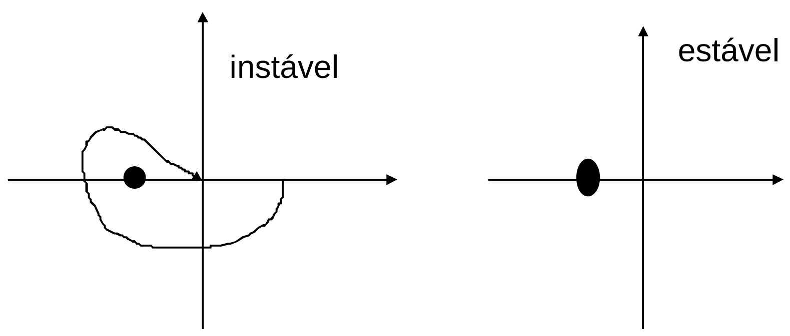
Há situações em que o critério de Bode não permite avaliar a estabilidade e nem verificarmos os valores para sintonia. Serão mostrados nos gráficos abaixo.

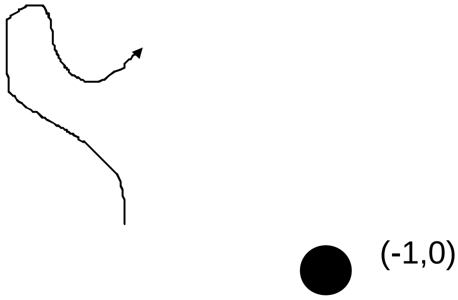


Assim, necessitamos de um critério mais geral, que é o critério de Nyquist.

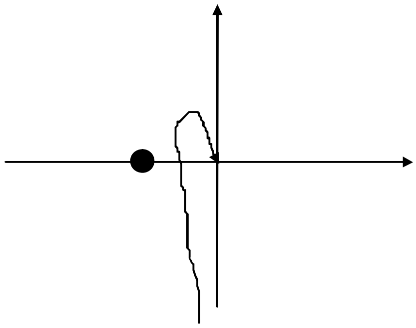
"Se em um gráfico de Nyquist, para um sistema em "feedback", cercar o ponto (-1,0) quando a freqüência varia , o sistema é instável".

Vamos ver alguns exemplos para ilustrar e entender como se dá este "cerco".

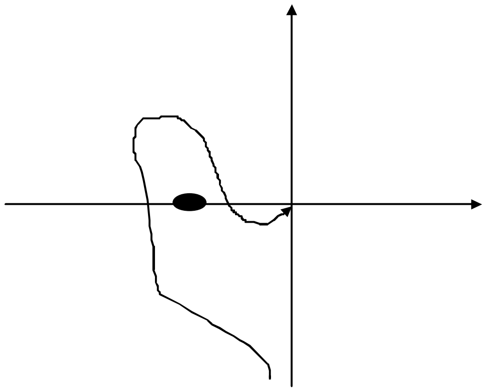


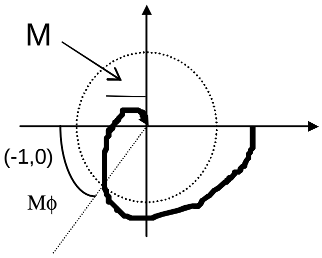


estável



instável





m.g = 1/M