

Amplificadores lineares e filtros

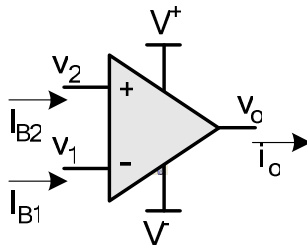
Prof. Geovany A. Borges
e-mail: gaborges@ene.unb.br

Tópicos

- Características de amplificadores operacionais
- Amplificadores C.C. e C.A.
- Amplificador de instrumentação
- Integradores
- Diferenciadores
- Filtros ativos

Características de AMPOPs

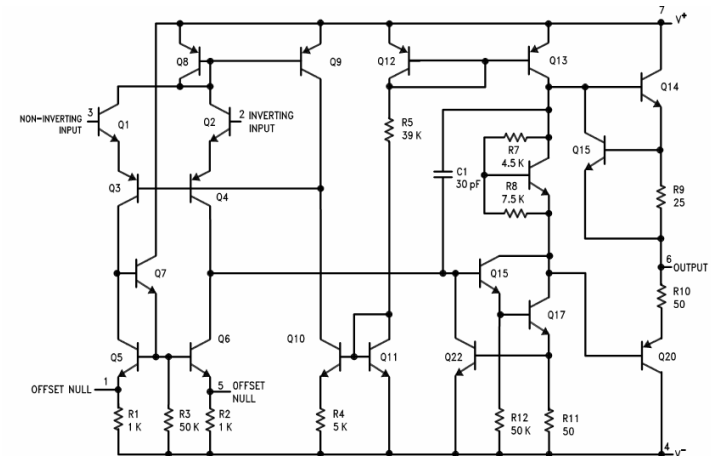
- AMPOP ideal vs. AMPOP real



- Qual a influência de cada parâmetro em um projeto?

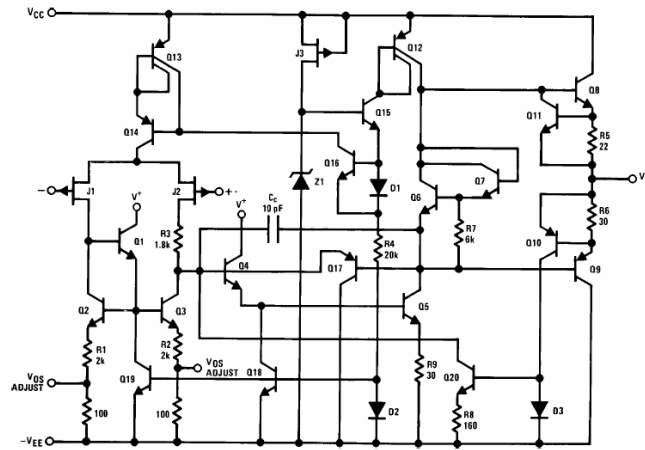
Características de AMPOPs

- Estrutura interna do LM741



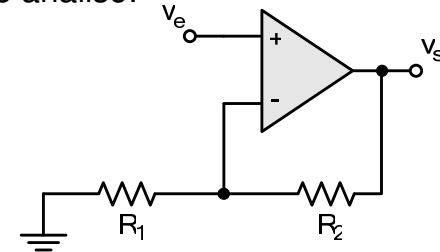
Características de AMPOPs

■ Estrutura interna do TL081



Características de AMPOPs

■ Metodologias de análise:

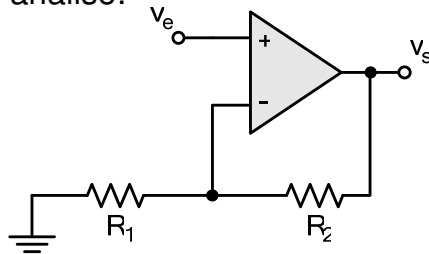


□ Método 1: supõe igualdade entre v_2 e v_1

$$v_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_e$$

Características de AMPOPs

■ Metodologias de análise:

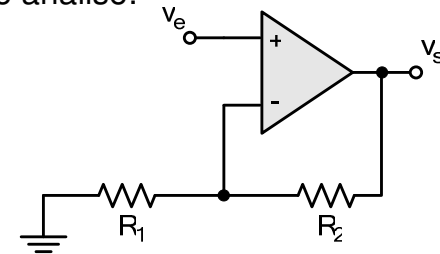


□ Método 2: supõe modelo de ordem zero do AMPOP

$$v_s = \frac{A_o}{1 + A_o\beta} v_e \xrightarrow{A_o\beta \gg 1} v_s \approx \frac{1}{\beta} v_e = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_e$$

Características de AMPOPs

■ Metodologias de análise:



□ Método 3: supõe modelo de primeira ordem do AMPOP

$$\frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{A_o\omega_b}{s + \omega_b(1 + A_o\beta)} \approx \frac{A_o\omega_b}{s + A_o\omega_b\beta} = \frac{\omega_t}{s + \omega_t\beta}$$

(F.P.B.)

Características de AMPOPs

■ Metodologias de análise:

□ Resumo:

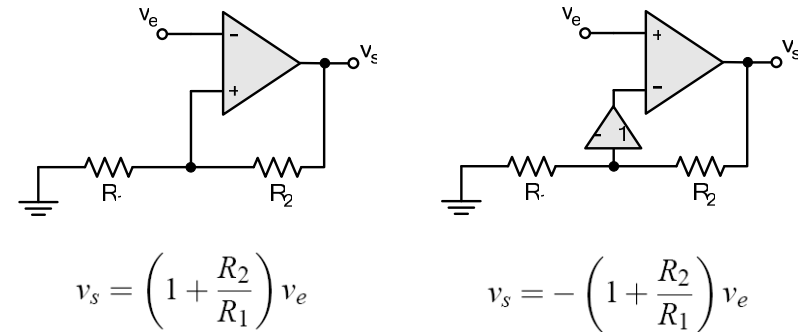
- Método 1: análise rápida, considerando potenciais iguais nas entradas do AMPOP;
- Método 2: análise menos rápida, mas que permite avaliar a influência do ganho de malha aberta do AMPOP;
- Método 3: obtenção da resposta dinâmica e análise de estabilidade.

- Então, por que complicar se podemos fazer simples usando apenas o método 1?

Características de AMPOPs

■ Metodologias de análise:

- Ok, então vamos fazer simples usando o método 1:

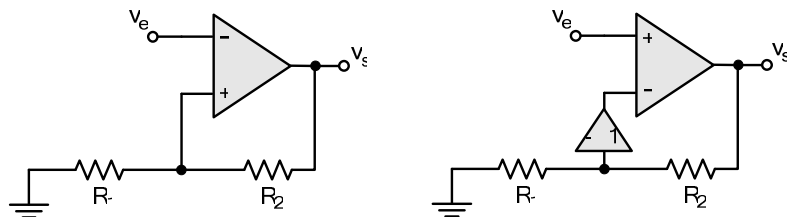


Estão certos estes resultados?

Características de AMPOPs

■ Metodologias de análise:

- E complicado (método 3)?



$$\frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{-A_o \omega_b}{s + \omega_b(1 - A_o \beta)} \quad \frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{A_o \omega_b}{s + \omega_b(1 - A_o \beta)}$$

Características de AMPOPs

■ Metodologias de análise:

- E agora, seriam os resultados equivalentes (em módulo) no regime permanente quando o ganho em malha aberta vai para infinito?
- Para responder a esta pergunta, vamos identificar o que há de errado em usar o seguinte raciocínio:

$$\frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{A_o \omega_b}{s + \omega_b(1 - A_o \beta)} \xrightarrow{A_o \beta \gg 1} \frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{A_o \omega_b}{s - \omega_b A_o \beta}$$

que em regime permanente resulta em

$$v_s \approx -\frac{1}{\beta} v_e = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_e$$

Características de AMPOPs

- Metodologias de análise:
 - A chave da questão está na estabilidade!
 - Ambos os circuitos são estáveis se

$$A_o\beta < 1$$

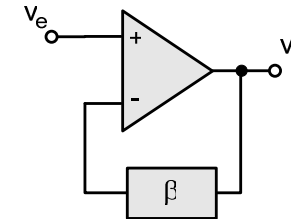
Funcionava bem na época das válvulas

Ou seja, nem sempre realimentação positiva implica em instabilidade.

- Assim, somente faz sentido usar os métodos 1 e 2 se o sistema for estável.
- Isto implica que sempre deve-se usar o método 3?

Características de AMPOPs

- Um método mais intuitivo, mas fundamentado:
 - Considera-se a seguinte configuração:



na qual o ganho de realimentação não possui dinâmica, ou o atraso de fase é pequeno.

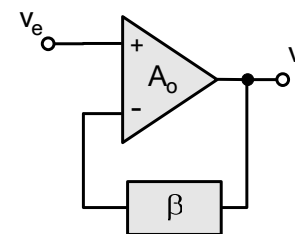
Características de AMPOPs

- Um método mais intuitivo, mas fundamentado:
 - Ao aplicar uma variação positiva na entrada não controlada por v_s , o que deverá aumentar o erro, haverá realimentação negativa se a resposta da saída do amplificador implicar em uma oposição ao aumento do erro.
 - Se for verificada realimentação negativa, sendo o AMPOP um sistema de primeira ordem de ganho elevado, o circuito será estável podendo-se então aplicar os métodos 1 ou 2.

Obs.: este método não permite lidar com sistemas estáveis apesar de haver realimentação positiva.

Características de AMPOPs

- Explicando o método 1:
 - É válido somente se houver realimentação negativa (ou sistema estável) com elevado ganho de malha em regime permanente:

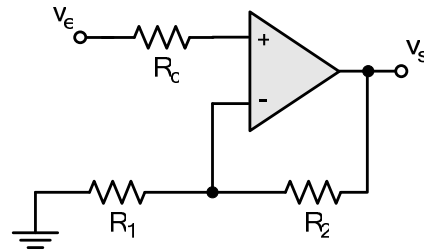


$$\begin{aligned} e &= v_2 - v_1 = v_e - \beta v_s \\ &= \left(1 - \frac{\beta A_o}{1 + A_o\beta}\right) v_e \\ &= \left(\frac{1}{1 + A_o\beta}\right) v_e \xrightarrow{A_o\beta \gg 1} e \approx 0 \end{aligned}$$

Amplificadores C.C. e C.A.

■ Amplificador não inversor

□ Circuito genérico:



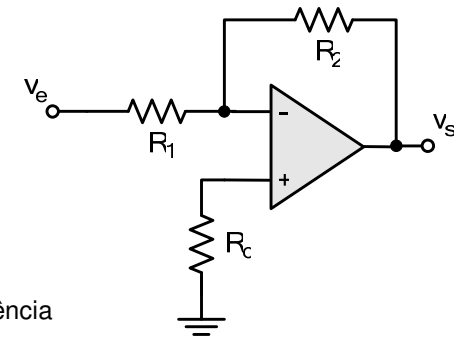
□ Propriedades:

- Resposta em frequência
- Impedância de entrada
- Efeito da corrente de polarização
- Características da saída (corrente, SR)

Amplificadores C.C. e C.A.

■ Amplificador inversor

□ Circuito genérico:



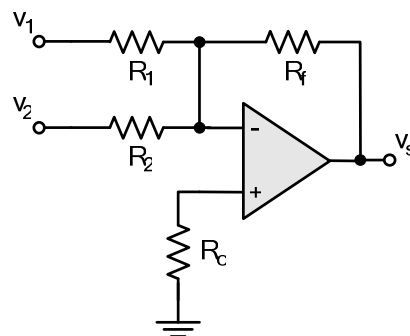
□ Propriedades:

- Resposta em frequência
- Impedância de entrada
- Efeito da corrente de polarização
- Características da saída (corrente, SR)

Amplificadores C.C. e C.A.

■ Amplificador somador inversor

□ Circuito genérico:



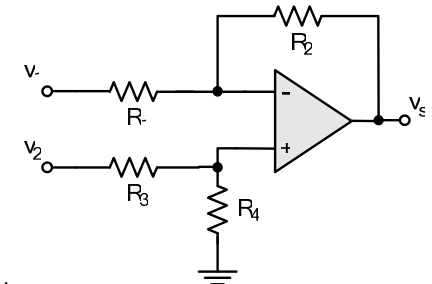
□ Propriedades:

- Resposta em frequência
- Impedância de entrada
- Efeito da corrente de polarização
- Características da saída (corrente, SR)

Amplificadores C.C. e C.A.

■ Amplificador subtrator

□ Circuito genérico:



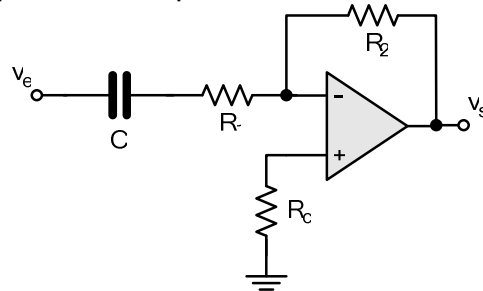
□ Propriedades:

- Resposta em frequência
- Impedância de entrada
- Efeito da corrente de polarização
- Características da saída (corrente, SR)

Amplificadores C.C. e C.A.

■ Amplificador C.A. a partir de amplificador inversor

□ Circuito genérico:



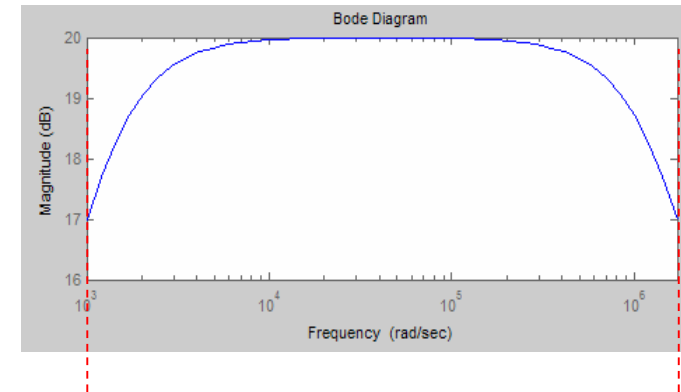
□ Análise por modelo de primeira ordem (após aproxim.):

$$\frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{-sCR_2}{s^2 \frac{1}{\omega_t}(R_1 + R_2)C + s \frac{1}{\omega_t}(1 + \omega_t R_1 C) + 1}$$

Amplificadores C.C. e C.A.

■ Amplificador C.A. a partir de amplificador inversor

□ Resposta em frequência (módulo):



Amplificadores C.C. e C.A.

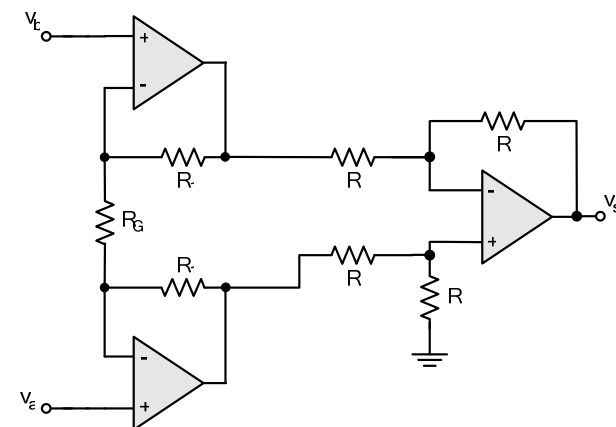
■ Amplificador C.A. a partir de amplificador inversor

□ Programa para resposta em frequência no MATLAB:

```
1 - clear all;
2 - close all;
3
4 %%% Parâmetros:
5 - wt = 2*pi*3e6;
6 - wb = 2*pi*5;
7 - Ao = wt/wb;
8 - R1 = 1000; R2 = 10000; C = 1e-6;
9
10 %%% Função de transferência:
11 - Num = [0 -C*R2 0];
12 - Den = [(R1+R2)*C/wt (1/wt)*(1+R1*C*wt) 1];
13
14 % Num = [0 -Ao*wb*C*R2 0];
15 % Den = [(R1+R2)*C (wb*(R1+R2)*C+1+Ao*wb*R1*C) wb*(1+Ao)];
16
17 %%% Diagramas de Bode e frequências de corte:
18 - wc1 = 1/(C*R1);
19 - wc2 = wt/(1+R2/R1);
20 - bode(tf(Num,Den),{wc1,wc2});
```

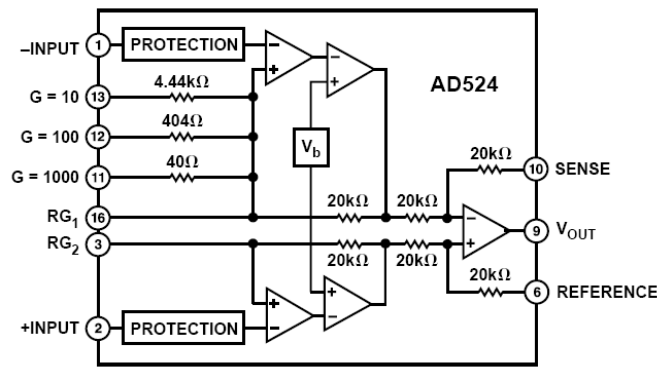
Amplificador de instrumentação

■ Topologia mais conhecida:



Amplificador de instrumentação

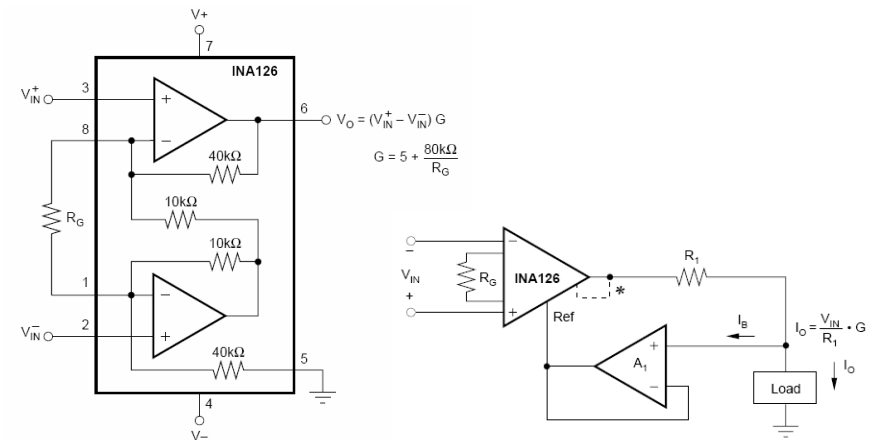
Exemplos: AD524 (Analog Devices)



Obs.: Verificar a realimentação negativa pelas entradas não-inversoras.

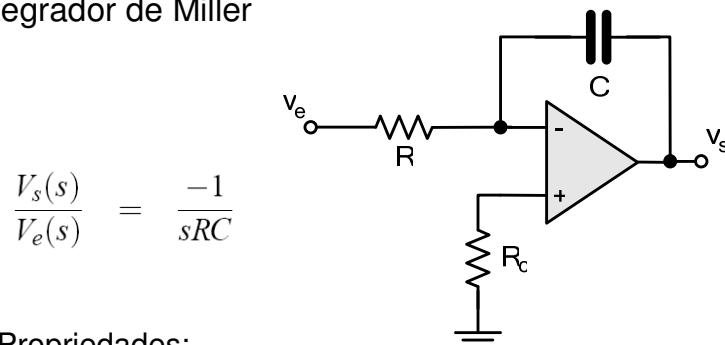
Amplificador de instrumentação

Exemplos: INA126 (Texas Instruments)



Integradores

Integrador de Miller



$$\frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{-1}{sRC}$$

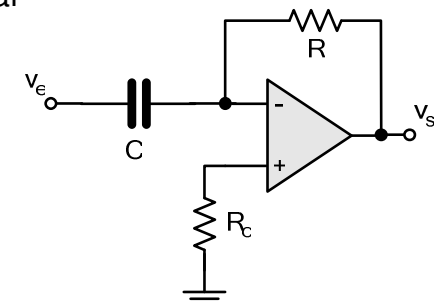
Propriedades:

- Efeito da corrente de polarização
- Compensação da corrente de polarização
- Efeito da tensão de offset

Derivadores

Circuito convencional

$$\frac{V_s(s)}{V_e(s)} = -RCs$$



Propriedades:

- Efeito da corrente de polarização
- Compensação da corrente de polarização
- Efeito da tensão de offset
- Problema com saturação do AMPOP

Derivadores

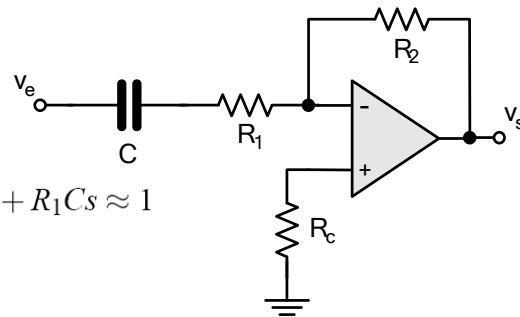
■ Circuito aproximado (banda limitada)

$$\frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{-R_2Cs}{1 + R_1Cs}$$

em baixas freqs.: $1 + R_1Cs \approx 1$

□ Propriedades:

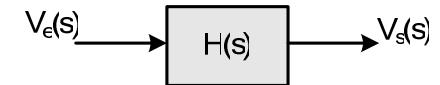
- Efeito da corrente de polarização
- Compensação da corrente de polarização
- Efeito da tensão de offset



Filtros ativos

■ Introdução

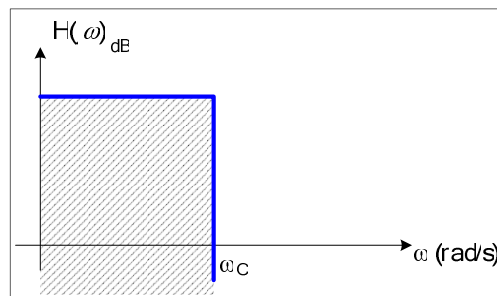
- Função: processamento/condicionamento no domínio da frequência
- Filtros passivos
- Filtros ativos
- Propriedades
 - Função de transferência
 - Faixa(s)/Ganho(s) de passagem
 - Faixa(s)/Ganho(s) de bloqueio
 - Impedância de entrada
 - Impedância de saída



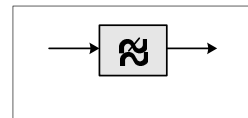
Filtros ativos

■ Filtros ideais

□ Filtro Passa Baixas (F.P.B.)



Resposta em frequência (módulo)

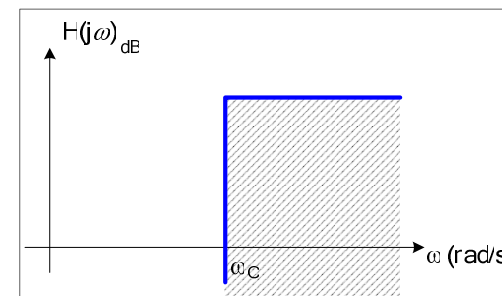


Símbolo

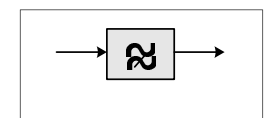
Filtros ativos

■ Filtros ideais

□ Filtro Passa Altas (F.P.A.)



Resposta em frequência (módulo)

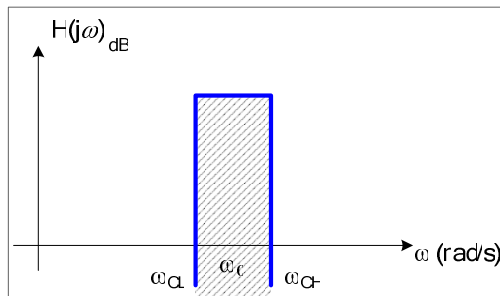


Símbolo

Filtros ativos

Filtros ideais

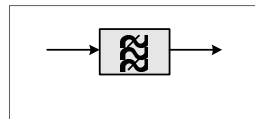
Filtro Passa Faixa (F.P.F.)



Resposta em frequência (módulo)

Fator de qualidade:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_C} = \frac{\omega_0}{\omega_{CH} - \omega_{CL}}$$

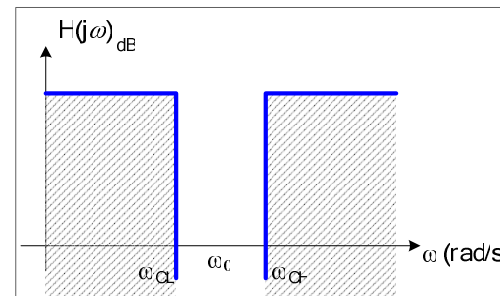


Símbolo

Filtros ativos

Filtros ideais

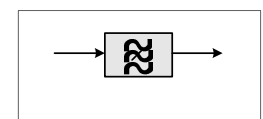
Filtro Rejeita Faixa (F.R.F.)



Resposta em frequência (módulo)

Fator de qualidade:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_C} = \frac{\omega_0}{\omega_{CH} - \omega_{CL}}$$

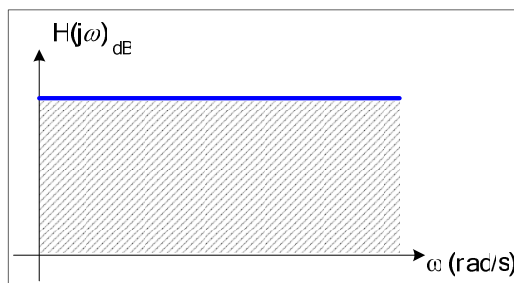


Símbolo

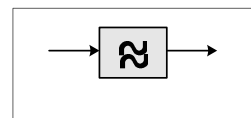
Filtros ativos

Filtros ideais

Filtro Passa Tudo (F.P.T.)



Resposta em frequência (módulo)



Símbolo

Filtros ativos

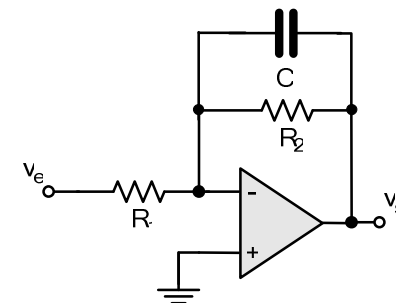
Filtros de primeira ordem

Filtro Passa Baixas

Função de transferência:

$$H(s) = K \frac{\omega_C}{s + \omega_C}$$

Exemplo:



Filtros ativos

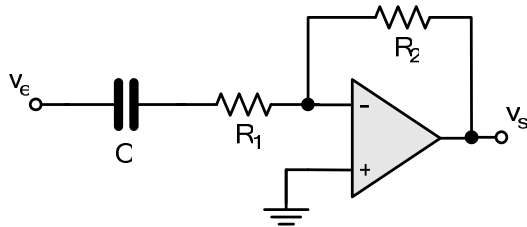
Filtros de primeira ordem

□ Filtro Passa Altas

- Função de transferência:

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

- Exemplo (ou filtro passa-faixa de banda larga, se considerarmos o AMPOP):



Filtros ativos

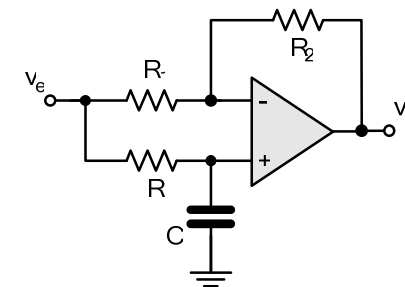
Filtros de primeira ordem

□ Filtro Passa Tudo

- Função de transferência:

$$H(s) = G \frac{s - \omega_C}{s + \omega_C}$$

- Exemplo:



Filtros ativos

Filtros de segunda ordem

□ Filtro Passa Baixas

- Função de transferência:

$$H(s) = K \frac{\omega_C^2}{s^2 + s \frac{\omega_C}{Q} + \omega_C^2}$$

- Módulo:

$$|H(j\omega)| = |K| \frac{\omega_C^2}{\sqrt{(\omega_C^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \frac{\omega_C^2}{Q^2}}}$$

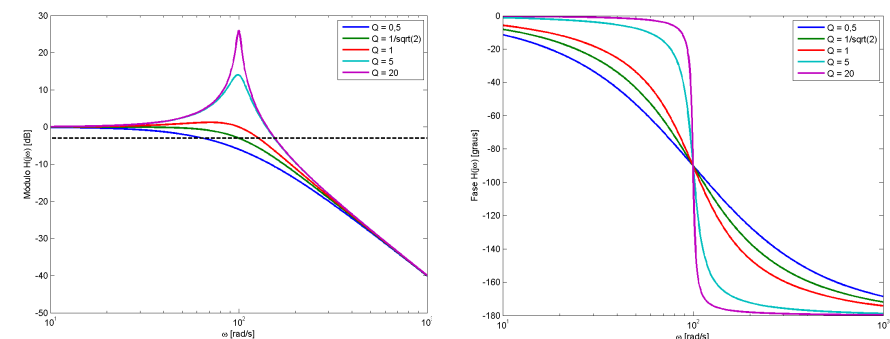
- Exercício: em que condição para Q a frequência de corte é igual a ω_C ?

Filtros ativos

Filtros de segunda ordem

□ Filtro Passa Baixas

- Resposta em frequência: $K = 1$, $\omega_C = 100$ rad/s



Filtros ativos

■ Filtros de segunda ordem

□ Filtro Passa Baixas de Butterworth

- Fórmula do módulo para qualquer ordem n:

$$|H(j\omega)| = \frac{|K|}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}}$$

Para qual escolha de Q obtém-se um FPB de Butterworth de segunda ordem?

