

# Capítulo 4 – Amplificador Operacional – Filtros

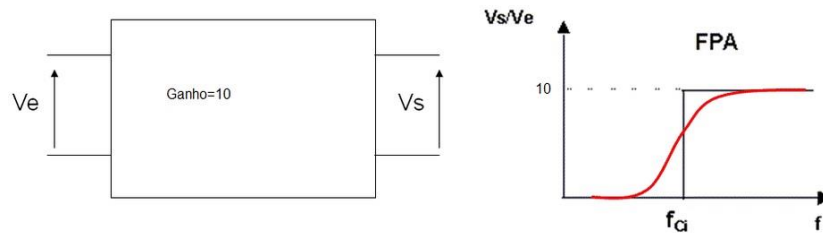
Neste capítulo são apresentados os Filtros e uma análise das limitações de um AmpOp real.

## 4.1. Filtros

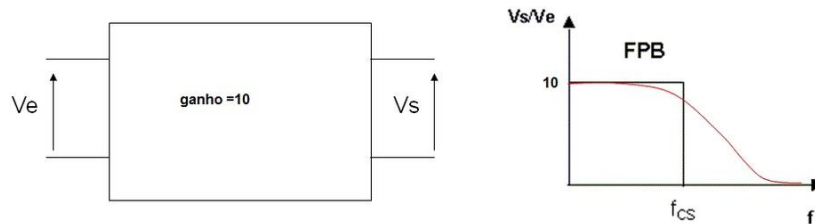
Genericamente, filtros são circuito que deixam passar só sinais de determinadas frequências, atenuando outras. São possíveis os seguintes tipos de filtros:

- a) Filtros Passa Altas (FPA);
- b) Filtros Passa Baixas (FPB);
- c) Filtro Passa Faixa (FPF);
- d) Filtro Rejeita Faixa (FRF).

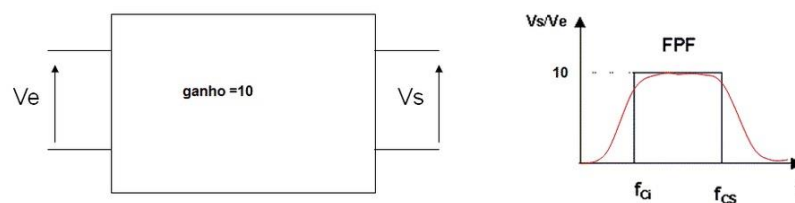
Considerando a curva de resposta em frequência:



( a )



( b )



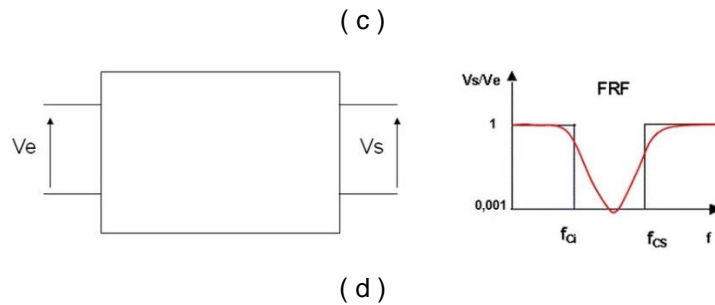


Figura 4.1 – Tipos de filtros e as curvas de resposta em frequência ( a ) Filtro Passa Altas ( b ) Filtro Passa Baixas ( c ) Filtro Passa Faixa ( d ) Filtro Rejeita Faixa

Observações em relação aos circuitos da Figura 4.1:

- Na Figura 4.1 o caso ideal é a curva desenhada em **preto** e a real em **vermelho**;
- $f_{ci}$  = frequência de corte inferior       $f_{cs}$  = frequência de corte superior;
- Quando o ganho no patamar (parte plana) é maior que 1, isso corresponde os filtros chamados de ATIVOS. Se o ganho é no máximo 1 no patamar o filtro é dito PASSIVO.

Na prática não é possível ter as curvas ideais devido as limitações nos elementos que constituem esses filtros. Existem várias maneiras de construir um filtro. Podem ser construídos só com resistores, indutores e capacitores, por isso mesmo são chamados de filtros passivos. A sua principal vantagem é não necessitarem de fonte de alimentação, porém, não produzem inclinação maior do que 20 dB/década e o ganho é no máximo igual 1.

Os filtros ativos por outro lado apesar de necessitarem de alimentação externa são bastante populares pois podem ter inclinação maior do que 20 dB/década (40 dB/década, 60, 80 ....). Existe uma variedade muito grande de tipos de filtros ativos (Butterworth, Chebyshev, Bessel e outros), cada um com uma característica. Para simplificar, será considerado somente o tipo Butterworth o qual apresenta uma máxima resposta plana.

Os filtros ativos se classificam de acordo com o número de redes RC que possuem (ou o número de polos). Quanto maior o número de redes RC maior a queda

(atenuação). Assim sendo existem filtros com atenuação de 20dB/Década (1 polo), 40 dB/Década (2 polos), 60 dB/Década (3 polos) etc.

#### 4.1.1 Filtro Passa Baixas de um Polo ou Primeira Ordem

A Figura 4.2 mostra um filtro ativo passa baixas de um polo ou primeira ordem (queda de 20dB/década), sendo assim denominado por ter um circuito RC.

A expressão do ganho em função da frequência é dada por:

$$\text{Ganho} = \frac{V_S}{V_e} = \frac{A_{vf}}{1 + j\frac{f}{f_c}}$$

Onde

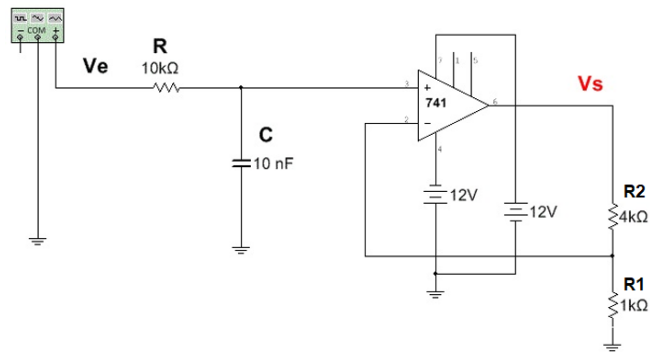
$$A_{vf} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

é o ganho no patamar (ganho DC), e a frequência de corte,  $f_c$  é dada por:

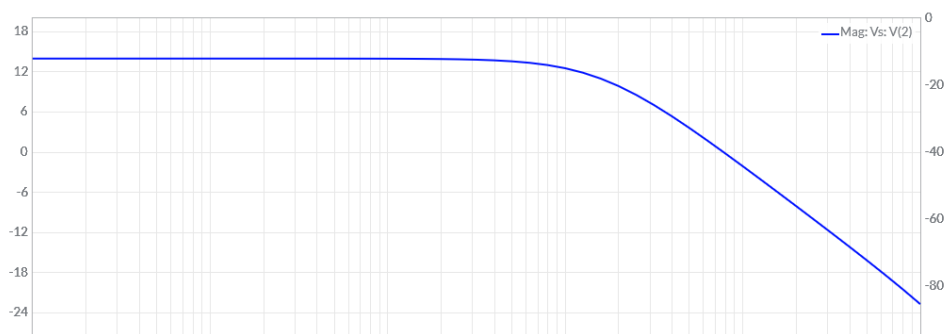
$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

O modulo do ganho é dado por:

$$\text{Ganho} = \frac{A_{vf}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$



( a )



( b )

Figura 4.2 – FPB de primeira ordem ( a ) Circuito ( b ) Curva de resposta em frequência

Link para Curva de Resposta em frequência – Medida da Frequência de Corte

[https://www.multisim.com/content/Pj2kvFHnwDgnRzGmSLQnd9/fpbprimeiraordemfigura4\\_2a/open](https://www.multisim.com/content/Pj2kvFHnwDgnRzGmSLQnd9/fpbprimeiraordemfigura4_2a/open)

Link para Medida do Ganho – Levantamento da Curva de Resposta em Frequência

[https://www.multisim.com/content/jzGuJhHMWY3vNrJ8JP8hPc/fpbprimeiraordemfigura4\\_2b/open](https://www.multisim.com/content/jzGuJhHMWY3vNrJ8JP8hPc/fpbprimeiraordemfigura4_2b/open)

### Exercício Resolvido

No circuito da Figura 4.2 considerando  $V_e=1$  V, determinar:

- Frequência de corte
- Valor de  $V_s$  na frequência de corte
- Valor da saída ( $V_s$ ) para  $f=2.f_c$  e para  $f=4.f_c$

Solução:

a)  $R=10$  k e  $C=10$  nF logo

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10k \cdot 10n} = 1,59 \text{ kHz}$$

b) Para  $f=1,59$  kHz o ganho vale

$A_{vf} = 1 + \frac{4k}{1k} = 5$  é o ganho no patamar ou o ganho em CC

$$Ganho = \frac{V_s}{V_e} = \frac{5}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,59}{1,59}\right)^2}} = 3,54$$

$$V_e=1V \quad V_s=3,54.V_e=3,54.1V=3,54 V$$

c) Para  $f=2.f_c=2.1,59$  k= 3,18 kHz

O valor do ganho nessa frequência vale:

$$Ganho = \frac{V_s}{V_e} = \frac{5}{\sqrt{1 + \left(\frac{3,18}{1,59}\right)^2}} = 2,23$$

$$\text{Com } V_e=1 V \quad V_s=2,23.V_e=2,23.1V=2,23 V$$

Para  $f=4.f_c=4.1,59$  k= 6,36 kHz

O valor do ganho nessa frequência vale:

$$Ganho = \frac{V_s}{V_e} = \frac{5}{\sqrt{1 + \left(\frac{6,36}{1,59}\right)^2}} = 1,21$$

$$\text{Com } V_e=1 V \quad V_s1,21.V_e=1,21.1V=1,21 V$$

Use esse arquivo para verificar a solução

[https://www.multisim.com/content/UfWi5eYTATwqW5vpA7XmoA/fpbprimeiraordemfigura4\\_2a/open/](https://www.multisim.com/content/UfWi5eYTATwqW5vpA7XmoA/fpbprimeiraordemfigura4_2a/open/)

#### 4.1.2 Filtro Passa Baixas de dois Polos ou Segunda Ordem

A Figura 4.3 mostra um filtro ativo passa baixas de dois pólo (queda de 40dB/década), sendo assim denominado por ter dois circuitos RC. A análise matemática avançada mostra que a resposta é a mais plana possível quando o ganho de malha fechada vale 1,586 ou 4 dB, desta forma a relação entre R1 e R2 é dada por:

$R_2 = 0,586 \cdot R_1$ , se  $R_1 = 1 \text{ k}$  então  $R_2 = 0,586 \text{ K} = 586 \text{ Ohms}$  (valor comercial mais próximo 560 Ohms)

A frequência de corte ( $f_c$ ) vale:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

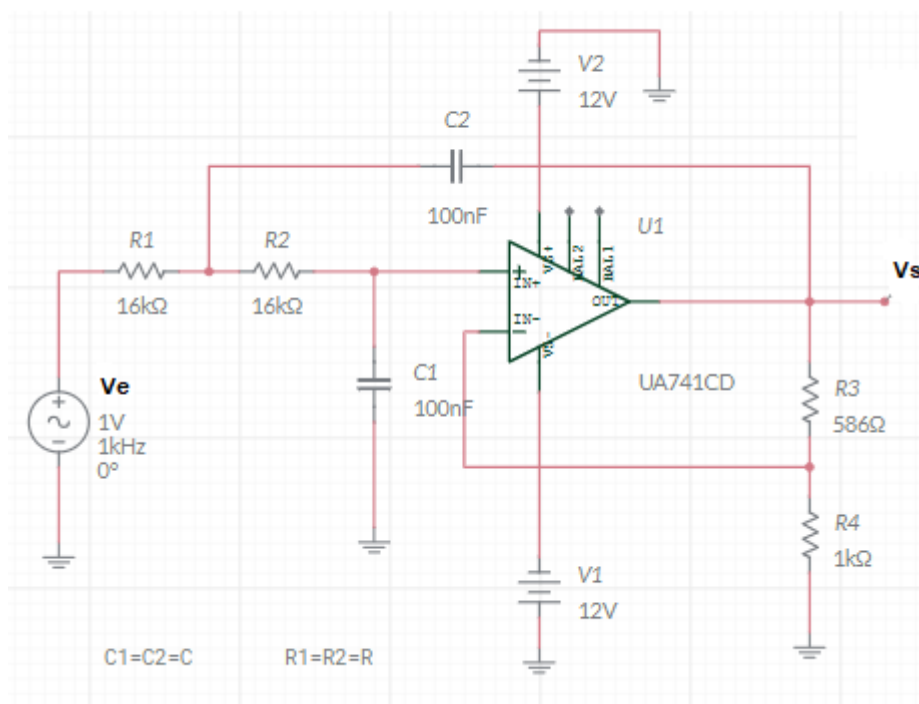


Figura 4.3 – Filtro Passa Baixas de segunda ordem (2 polos)

A Figura 4.4 mostra a curva de resposta em frequências do circuito da Figura 4.3 com o ganho no patamar (em baixas frequências) o qual é calculado por:

$$G = 20 \cdot \log(1 + R_2/R_1) = 20 \cdot \log 1,586 = 4 \text{ dB}$$

O segundo cursor mostra aproximadamente a frequência de corte (100 Hz) na qual o ganho vale aproximadamente 1dB (3 dB abaixo do ganho no patamar).