

Capítulo 4 – Amplificador Operacional – Filtros

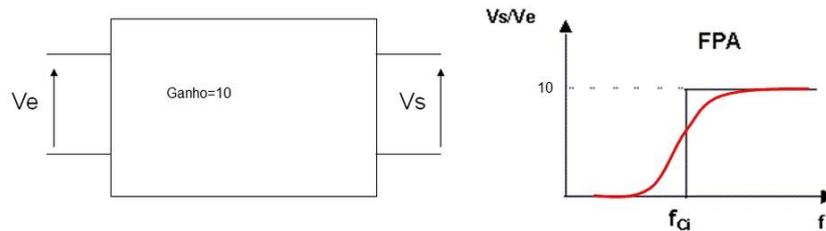
Neste capítulo são apresentados os Filtros e uma análise das limitações de um AmpOp real.

4.1. Filtros

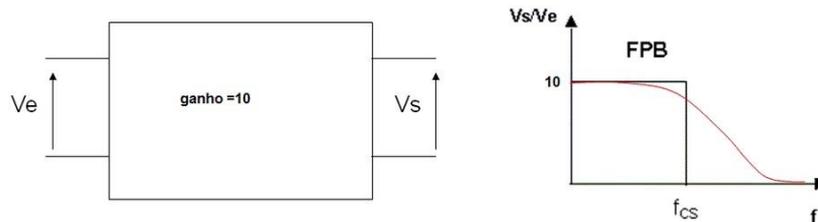
Genericamente, filtros são circuito que deixam passar só sinais de determinadas frequências, atenuando outras. São possíveis os seguintes tipos de filtros:

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

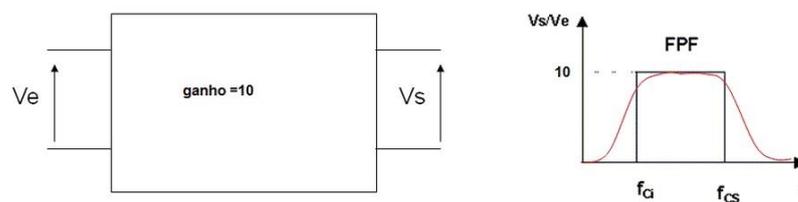
Considerando a curva de resposta em frequência:



(a)



(b)



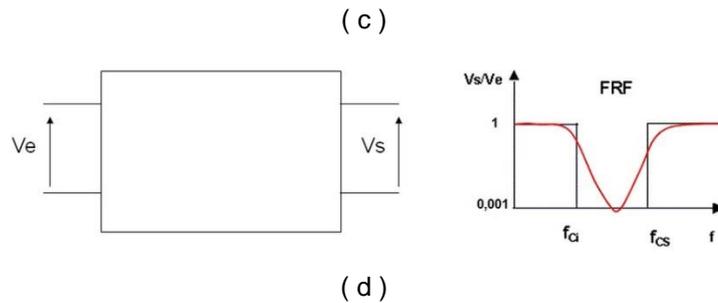


Figura 4.1 – Tipos de filtros e as curvas de resposta em frequência (a) Filtro Passa Altas (b) Filtro Passa Baixas (c) Filtro Passa Faixa (d) Filtro Rejeita Faixa

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

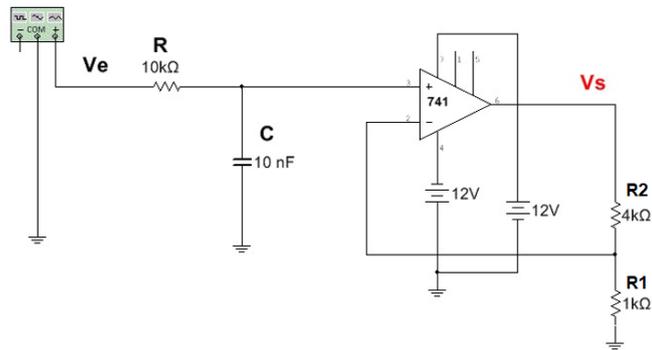
$$A_{vf} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

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

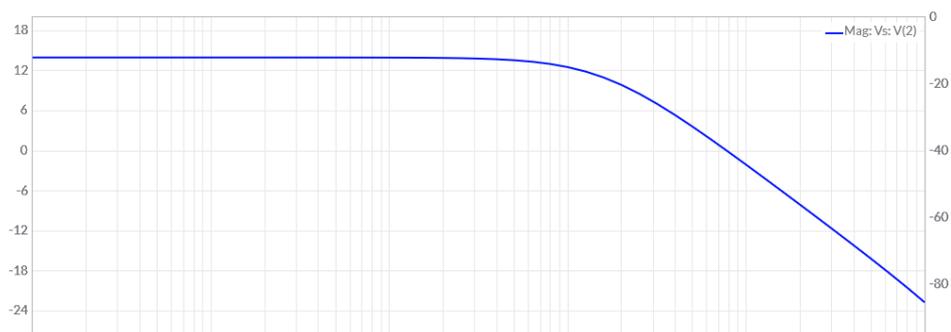
$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

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

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

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/

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:

$R2=0,586.R1$, se $R1 =1\text{ k}$ então $R2=0,586\text{K} = 586\text{ Ohms}$ (valor comercial mais próximo 560 Ohms)

A frequência de corte (f_c) vale:

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

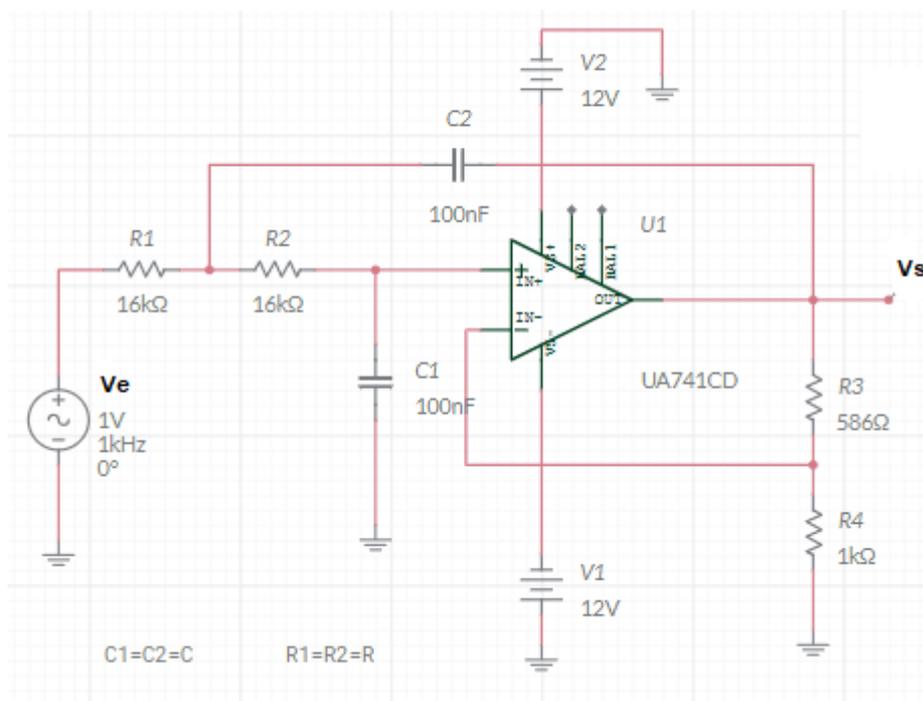


Figura 4.3 – Filtro Passa Baixas de segunda ordem (2 polos)

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).