

## 3ELE002 - Circuitos de Comunicação

## Experiência 2 - Filtros Ativos

Taufik ABRÃO<sup>†</sup>, Lab. Telecom - Depto Eng. Elétrica da Univ. Estadual de Londrina**RESUMO** Análise prática de filtros ativos**palavras-chave:** filtros ativos só polos.

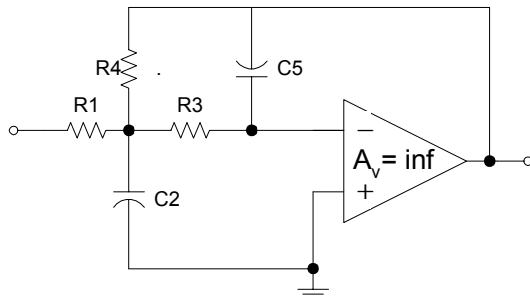
## 1. OBJETIVOS

Análise e avaliação experimental de circuitos ressoadores série e/ou paralelo, filtros passa-baixa (FPB), passa-alta (FPA) e/ou passa-faixa (FPF). Obter a resposta em frequência de tais filtros. Filtros de Butterworth.

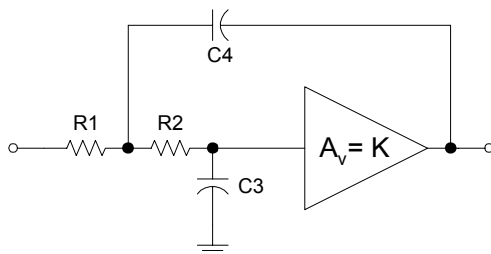
## 2. INTRODUÇÃO

Na implementação de filtros de ordem muito elevada é muito comum a utilização de filtros de 1a. e 2a. ordem em cascata. Isto se deve ao fato de que, à medida que aumenta a ordem do filtro, aumentam os problemas práticos com os circuitos. Desta forma, basta projetar células de 1a. e 2a. ordem.

Várias configurações são possíveis para circuitos de filtros ativos de 2a. ordem, entre as quais, as ilustradas na figura 1.



a) Filtro 2a. ordem - Top-I



b) Filtro 2a. ordem - Top-II

**Fig. 1** Duas topologias para filtro ativo passa-baixas de 2a. ordem

A exata escolha da topologia depende, entre outras coisas de:

- tipo de amplificador disponível;
- ganho desejado na banda passante;
- sensibilidade das características do filtro às variações dos componentes

Observe que o ganho do amplificador na topologia II da figura 1. é finito.

Para a topologia I (ganho infinito), pode-se mostrar, a partir de análise nodal que a função de transferência é equivalente a:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y_1 Y_3}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4} \quad (1)$$

com  $Y_1 = 1/R_1$ ;  $Y_3 = 1/R_3$ ;  $Y_4 = 1/R_4$ ;  $Y_2 = sC_2$  e  $Y_5 = sC_5$ , resultando em:

$$G(s) = \frac{-1}{s^2 R_1 R_3 C_2 C_5 + s(R_1 + R_3 + R_1 R_3 / R_4) C_5 + R_1 / R_4} \quad (2)$$

Desta forma, a implementação de um Butterworth de 4a. ordem a partir de duas células de 2a. ordem requer a identificação dos coeficientes de  $s$  da expressão anterior com os coeficientes tabelados para  $n = 4$  e, adicionalmente, a desnormalização de freq, resultando:

- 1a. célula:

$$R_1 R_3 C_2 C_5 = \frac{1}{\omega_c^2}$$

$$(R_1 + R_3 + R_1 R_3 / R_4) C_5 = 0,765 \times \frac{1}{\omega_c}$$

$$R_1 / R_4 = 1$$

- 2a. célula:

$$R_1 R_3 C_2 C_5 = \frac{1}{\omega_c^2}$$

$$(R_1 + R_3 + R_1 R_3 / R_4) C_5 = 1,848 \times \frac{1}{\omega_c}$$

$$R_1 / R_4 = 1$$

Como se tem 5 incógnitas e apenas 3 equações, pode-se adotar valores de 2 variáveis. Escolhendo-se  $R_1 = R_3$  implica imediatamente em  $R_1 = R_3 = R_4$  e simplifica os cálculos.

- Escolhendo  $R_1 = R_3 = 10K\Omega$  e adotando a freq de corte  $\omega_c = 2\pi \times 3 \times 10^3$  rad/s, resulta:

- 1a. célula:  $R_1 = R_3 = R_4 = 10K\Omega$ ;  $C_2 = 20,7nF$ ;  $C_5 = 1,35nF$ ;
- 2a. célula:  $R_1 = R_3 = R_4 = 10K\Omega$ ;  $C_2 = 8,56nF$ ;  $C_5 = 3,26nF$

A implementação encontra-se na figura 4.

## 2.1 Filtro Ativo de 2a. ordem

1. Montar o FPB de 2a ordem da figura 2.

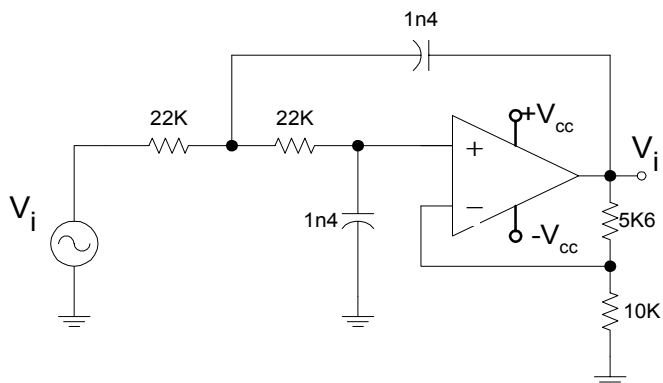


Fig. 2 Filtro ativo de 2a. ordem

- a. Identificar a topologia utilizada.
- b. Calcular o ganho de tensão na faixa de passagem. Lembre-se que para um operacional não inversor,  $A_v = \frac{R_F}{R_1} + 1$ , onde  $R_F$  é o resistor de realimentação e  $R_1 = 10K\Omega$ .
- c. Calcular a frequência de corte do filtro ativo,  $f_c$  (veja notas de aula)
- d. Utilizando um gerador senoidal, obter o diagrama de bode (módulo apenas) para uma faixa de frequência de pelo menos uma década acima e uma abaixo da freq de corte do filtro da figura 2. *Dicas:* ajustar o sinal senoidal fornecido pelo gerador de função de tal forma a manter  $V_i$  constante para qualquer valor de frequência; avaliar  $V_o$  com o osciloscópio para cada valor de frequência do sinal de entrada. Obter o ganho (ou atenuação) em dB:  $A_v = 20 \log(\frac{V_o}{V_i})$ .
- e. Faça um gráfico linear  $\times \log$  para  $A_v$  (dB)  $\times$  frequência.
- f. Determinar **experimentalmente** o valor da frequência de corte do FPB ativo e a ordem do filtro.

2. Identificar a topologia utilizada.
3. Obter o diagrama de bode para a primeira célula (2a. ordem, PT4) apenas e para o Butter de 4a. ordem, PT3.

- a. Determinar experimentalmente a freq de corte de ambos os filtros: o de 2a. ordem e o de Butterworth de 4a. ordem.

4. injetar uma forma de onda quadrada de freq fundamental igual a aproximadamente 90% da freq de corte do filtro Butter de 4a. ordem. Analisar a forma de onda na saída.

## 3. ANÁLISE

1. Como é possível reconhecer, dado um circuito como o da figura 2, se o filtro é passa-baixa, passa-altas, passa-faixa ou rejeita-faixas?
2. A partir do gráfico da função de transferência, como é possível saber se um filtro é ativo ou passivo, se é do tipo Chebychev ou não e qual sua ordem ?
3. Calcule um filtro passa-baixas de Butterworth de 6a. ordem com ganho de 10dB e freq de corte de 8KHz.
4. Faça a análise da resposta em função da freq para o filtro do item anterior utilizando simulador elétrico SPICE ou similar. Comprove através da função de transferência (módulo e fase) as características do filtro.
5. O filtro de 2a. ordem da figura 4 (topologia com o CI  $U_1$ ) apresenta uma resposta Butterworth de 2a. ordem? Por que? Justifique também sua resposta obtendo a função de transferência do filtro através de simulador elétrico.

## 4. APÊNDICE

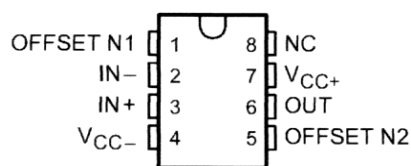


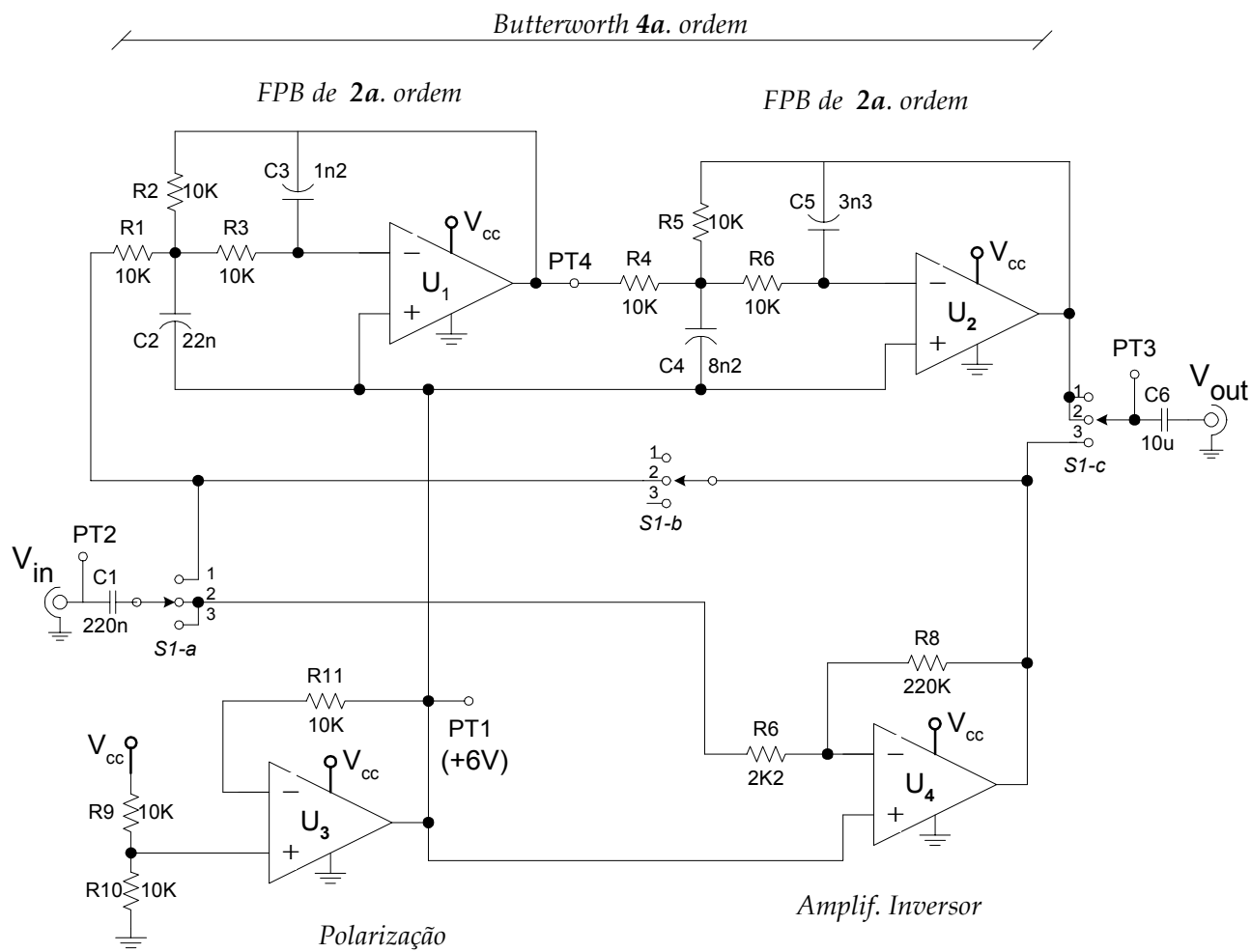
Fig. 3 Pinagem do 741

## 2.2 Filtro Butterworth Ativo de ordem superior

Analisar o filtro mostrado na figura 4 e previamente montado em placa de circuito impresso. Trata-se de dois filtros ativos de Butter de 2a. ordem em cascata. As funções proporcionadas pela chave S1 (3 polos x 3 posições) são:

1. a. apenas filtro Butter 4a. ordem;  
b. apenas amplificador inversor (Ganho 100);  
c. amplificador e filtro Butter 4a. ordem em cascata.

Note que os amplificadores operacionais usados são o 741; para permitir o uso de uma única fonte de alimentação (+12V), foi utilizado um divisor de tensão, composto pelo CI  $U_3$ , produzido +6V em sua saída.



**Fig. 4** Butterworth de 4a ordem a partir de duas células passa-baixas de 2a. ordem em cascata.