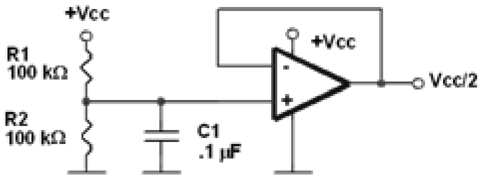
Estruturas SAB SK e MFB com Fonte Simples

A referência do circuito nos circuitos com fonte simples deve ser a metade do valor da tensão V_{CC} da fonte. Às vezes um *buffer* é necessário. A referência pode ser criada com o circuito abaixo onde R_1 e R_2 devem tem o mesmo valor e devem ser escolhidos considerando o consumo de energia e o ruído. O capacitor C_1 proporciona um PB para que o sistema seja menos sensível a variações rápidas de V_{CC}



.

Capacitor de Acoplamento

Este capacitor, encontrado em praticamente todos os circuitos com o nome de C_{in}, é usado para isolar o potencial de referência $V_{CC}/2$ do resto do sistema. Caso contrário, a referência poderia ser curto-circuitada pelo circuito ou pelo dispositivo que atua como fonte de sinal.

Como o dispositivo de acoplamento é um capacitor, um PA é formado com a impedância de entrada do filtro. Dessa forma, o valor deste capacitor deve ser alto o necessário para que o PA tenha o mínimo de influência sobre as frequências de operação.

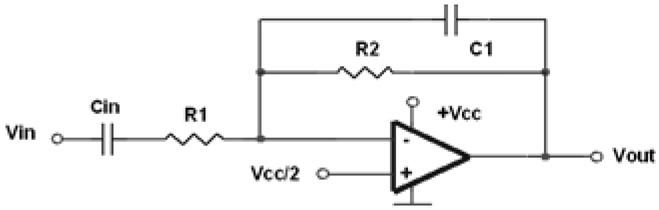
Os circuitos PA já possuem esta característica de isolamento, portanto um dos próprios capacitores do filtro será, também, o capacitor de acoplamento.

Outro fato importante, é que a tensão de referência $V_{CC}/2$ estará presente no sinal de saída do filtro. Cabe ao projetista determinar se este referencial é necessário ou não. Se não, deve-se utilizar um capacitor de acoplamento na saída do filtro.

1. Filtros de Primeira Ordem

1.1. PB (estrutura inversora e não inversora)

1.1.1. Inversora O circuito abaixo realiza um PB com inversão de fase.



$$V_O = V_I\left(K\frac{\sigma_s}{s+\sigma_s}\frac{s}{s+\sigma_i}\right)+\frac{V_{CC}}{2} \qquad (1.1)$$

$$K=-\frac{R_2}{R_1} \quad \sigma_s=\frac{1}{R_2C_1} \quad \sigma_i=\frac{1}{R_1C_{in}} \qquad (1.2)$$

Este circuito é um PA em cascata com um PB. A freqüência de corte do PB é definida por C_1 e R_2. O valor de C_{in} deve ser escolhido para que toda a faixa de freqüência de interesse sofra a mínima influência causada pelo PA formado por ele e por R_1

$$T_{PB}(s) = A/(s+a_0) \qquad (1.3)$$

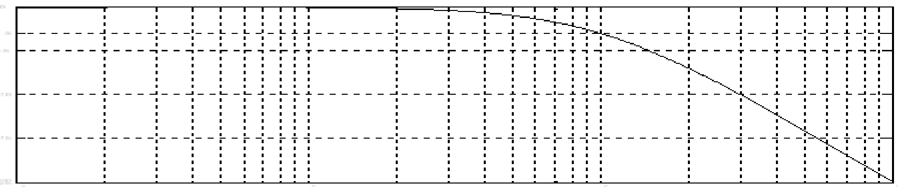
$$R_1 = 1\Omega \quad R_2 = |A|/a_0 \quad C_1 = 1/|A| \quad C_{in} \geq 100/2\pi f_i \qquad (1.4)$$

Onde f_i é a menor freqüência de interesse do sinal a ser filtrado.

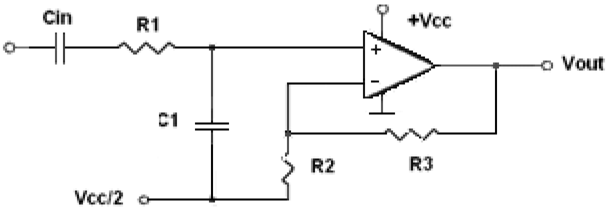
Exemplo 1.1.1.:

Especificações: Sinal de áudio, $f_i = 20Hz$, $f_p = 100Hz$, $K = 1$. $T_{PB}(s) = \dfrac{-628,31853}{s+628,31853}$

Conforme (1.4): $R_1 = R_2 = 1\Omega \quad C_1 = 1{,}591549\ \mathrm{mF} \quad C_{in} \geq 795{,}7747\ \mathrm{mF}$



1.1.2. Não inversora



$$V_\mathrm{O} = V_\mathrm{I}\left[K\frac{\sigma_s}{s+\sigma_s}\right] + \frac{V_\mathrm{CC}}{2} \qquad (1.5)$$

$$K = \left(1+\frac{R_3}{R_2}\right)\left(\frac{C_{in}}{C_{in}+C_1}\right) \quad \sigma_s = \frac{1}{R_1 C_1}\left(1+\frac{C_1}{C_{in}}\right) \qquad (1.6)$$

Escolhendo $C_{in} >> C_1$, os parâmetros do filtro sofrem pouca influência de C_{in}.

$$T_{PB}(s) = \frac{A}{s+a_0} \qquad (1.7)$$

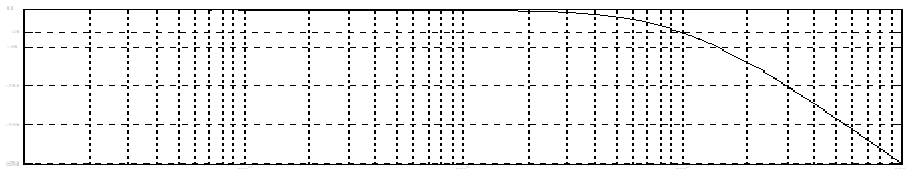
$$R_1 = R_2 = 1\Omega \quad C_1 = 1/a_0 \qquad R_3 = (A/a_0) - 1 \qquad C_{in} \geq 100 C_1 \quad K \geq 1 \qquad (1.8)$$

Exemplo 1.1.2.:

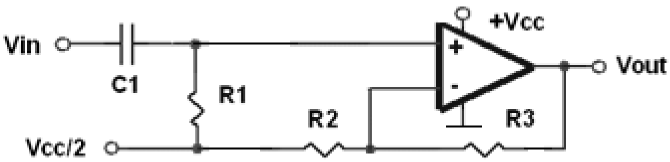
Especificações: $f_\mathrm{P} = 100Hz$, $K = 1$. $\qquad T_\mathrm{PB}(s) = \dfrac{628{,}31853}{s+628{,}31853}$

Conforme (1.8): $R_1 = R_2 = 1\Omega \qquad C_1 = 1{,}5815494\ \mathrm{mF} \qquad R_3 = 0\Omega \qquad C_{in} \geq 158{,}1549\ \mathrm{mF}$

Como $R_3 = 0$, o resistor R_2 não é necessário, portanto, $R_2 \to \infty$.



1.2. PA



$$V_\mathrm{O} = V_\mathrm{I}\left[K\frac{s}{s+\sigma_s}\right] + \frac{V_\mathrm{CC}}{2} \qquad (1.9)$$

$$K = \left(1+R_3/R_2\right) \quad \sigma_\mathrm{S} = 1/R_1 C_1 \qquad (1.10)$$

$$T_{PA}(s) = \frac{Ks}{s+a_0} \qquad (1.11)$$

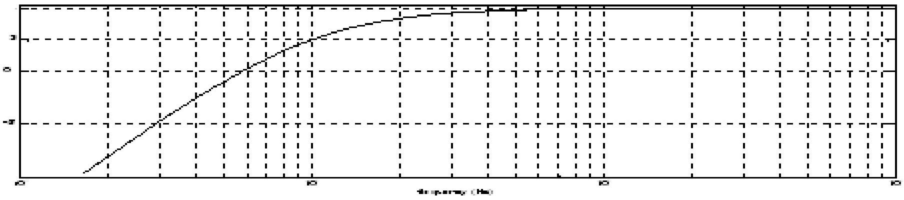
$$R_1 = R_2 = 1\Omega \quad R_3 = K - 1 \quad C_1 = \frac{1}{a_0} \qquad (1.12)$$

Exemplo 1.2.:

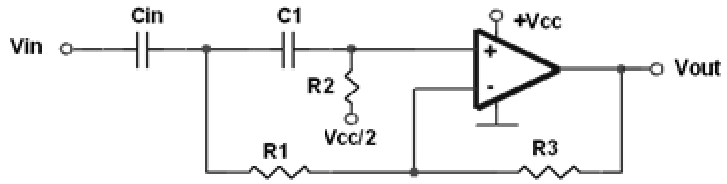
Especificações: $f_p = 100Hz$, $K = 2$. $$T_{PA}(s) = \frac{2s}{s + 628{,}31853}$$

Conforme (1.12): $R_1 = R_2 = 1\Omega$ $C_1 = 1{,}591549\ \text{mF}$ $R_3 = 1\Omega$

Caso $K = 1$, então $R_3 = 0\Omega$ e R_2 não é necessário.



1.3. Passa-tudo



$$V_{\text{O}} = V_{\text{I}} \left[\frac{s - (R_3 / R_1)(1/R_2C_1)}{\left(s + 1/R_2C_1\right)\left(s + 1/R_1C_{in}\right) + s\left(G_2 - G_1\right)/C_{in}} s \right] + \frac{V_{\text{CC}}}{2} \qquad (1.13)$$

Para $R_1 = R_2 = R_3 = R$: $$V_{\text{O}} = V_{\text{I}} \left[\frac{s - 1/RC_1}{s + 1/RC_1} \frac{s}{s + 1/RC_{in}} \right] + \frac{V_{\text{CC}}}{2} \qquad (1.14)$$

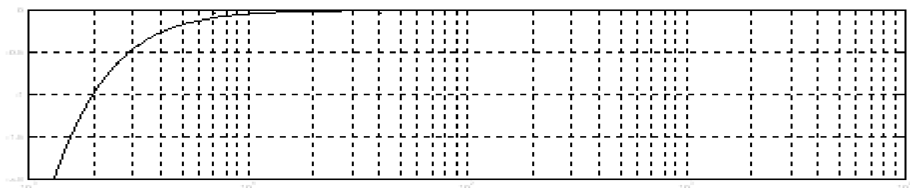
$$T_{\text{PT}}(s) = \frac{s - a_0}{s + a_0} \qquad (1.15)$$

$R = 1\Omega$ $C_1 = 1/a_0$ $C_{\text{IN}} \geq 100/2\pi f_{\text{i}}$ (f_i é a menor freq. de interesse do sinal) (1.16)

Exemplo 1.3.:

Especificações: $f_{\text{P}} = 1\ \text{kHz}$, $f_i = 100Hz$ $$T_{\text{PT}}(s) = \frac{s - 6283{,}1853}{s + 6283{,}1853}$$

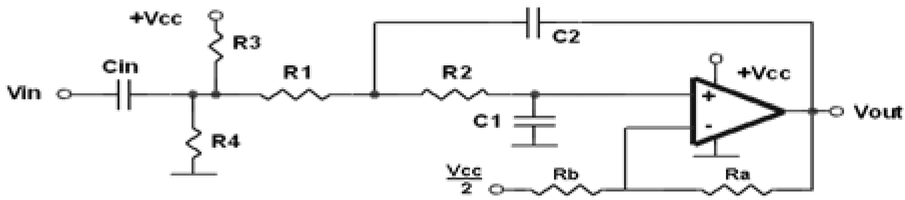
Conforme (1.16): $R = 1\Omega$ $C_1 = 159{,}1549\ \mu\text{F}$ $C_{in} \geq 159{,}1549\ \text{mF}$



2. Filtros de Segunda Ordem

2.1. SK

2.1.1. PB



Os resistores R_3 e R_4 devem ser iguais e de alto valor. Usualmente, $1\,\text{M}\Omega$ ou $10\,\text{M}\Omega$ para que se tenha um baixo consumo de energia. Com $R_3 = R_4 = R$, encontra-se a FT:

$$V_{\text{O}} = V_{\text{I}} \frac{K(1/C_1C_2R_1R_2)}{s^2 + s\frac{\left(1-K\right)R_1C_2 + C_1\left(R_1 + R_2\right)}{C_1C_2R_1R_2} + \frac{1}{C_1C_2R_1R_2}} \left(\frac{s}{s + (2/C_{in}R)} \right) + \frac{V_{\text{CC}}}{2} \quad \text{onde } K = 1 + \frac{R_a}{R_b} \qquad (2.1)$$

$$T_{\text{PB}}(s)=\frac{A}{s^2+a_1s+a_0} \qquad (2.2)$$

$$R_1=R_2=R_b=R=1\Omega \quad C_1=C_2=\frac{1}{\sqrt{a_0}} \quad R_a=2-\frac{a_1}{\sqrt{a_0}} \quad C_{in}\geq\frac{100}{\pi f_i} \qquad (2.3)$$

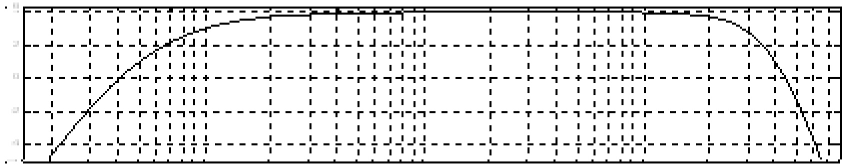
Onde f_i é a menor freq. de interesse do sinal a ser filtrado. O ganho da estrutura é $K=3-(1/Q)$.

Nesta estrutura, o escalamento em impedância deve ser realizado com cuidado, pois os resistores R_3 e R_4 influenciam apenas o valor do capacitor C_{in}. Ou seja, dois escalamentos podem ser realizados em separado. Um para os componentes do filtro propriamente dito, e outro para o estágio de acoplamento formado por R_3, R_4 e C_{in}.

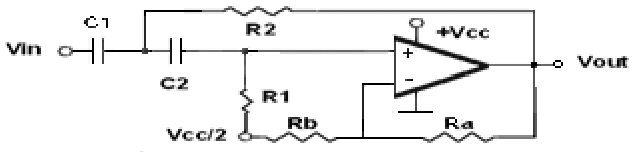
Exemplo 2.1.1.:

Especificações: $f_{\text{P}}=4\,\text{kHz}$, $Q=\frac{\sqrt{2}}{2}$ e $f_i=500Hz$. $\qquad T_{\text{PB}}(s)=\frac{1{,}0016694\times10^9}{s^2+35{,}543063\times10^3s+631{,}65468\times10^6}$

Conforme (2.3): $R_1=R_2=R_b=R=1\Omega \quad C_1=C_2=39{,}7887\,\mu\text{F} \quad R_a=0{,}58578\,\Omega \quad C_{in}\geq63{,}66197\,\text{mF}$



2.1.2. PA



$$V_{\text{O}}=V_{\text{I}}\frac{Ks^2}{s^2+s\frac{(1-K)R_1C_2+R_2(C_1+C_2)}{C_1C_2R_1R_2}+\frac{1}{C_1C_2R_1R_2}}+\frac{V_{\text{CC}}}{2} \quad \text{onde } K=1+\frac{R_a}{R_b} \qquad (2.4)$$

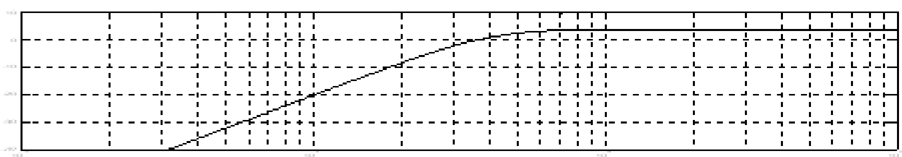
$$T_{\text{PA}}(s)=\frac{Ks^2}{s^2+a_1s+a_0} \qquad (2.5)$$

$$R_1=R_2=R_b=1\Omega \quad C_1=C_2=1/\sqrt{a_0} \quad R_a=2-(a_1/\sqrt{a_0}) \qquad \text{onde} \qquad K=3-(1/Q) \qquad (2.6).$$

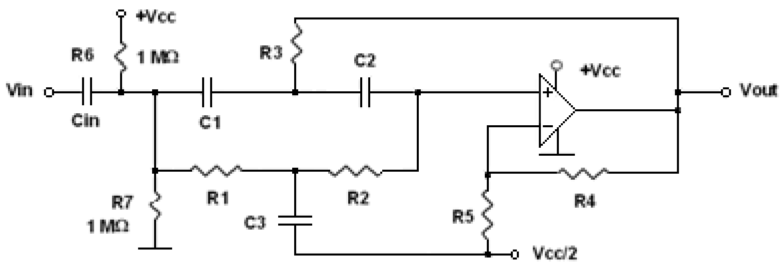
Exemplo 2.1.2.:

Especificações: $f_{\text{P}}=4\,\text{kHz}$, $Q=\frac{\sqrt{2}}{2}$. $\quad T_{\text{PA}}(s)=\frac{1{,}58578643s^2}{s^2+35{,}543063\times10^3s+631{,}65468\times10^6}$

Conforme (2.6): $R_1=R_2=R_b=1\Omega \quad C_1=C_2=39{,}78873\,\mu\text{F} \quad R_a=0{,}58578643\Omega$



2.1.3. Rejeita-faixa



P/ que esta estrutura se comporte como um RF, as seguintes relações devem ser respeitadas:

$R_1 = R_2 = R \quad R_3 = R/2 \qquad C_1 = C_2 = C \quad C_3 = 2C$

$$V_{out} = V_{in} \frac{K\left(s^2 + (1/R^2C^2)\right)}{s^2 + \dfrac{4-2K}{RC}s + \dfrac{1}{R^2C^2}} \left(\frac{s}{s + (2/C_{in}R_6)}\right) + \frac{V_{cc}}{2} \qquad \text{onde } K = 1 + \frac{R_4}{R_5} \qquad (2.7)$$

$$T_{\mathrm{RF}}(s) = \frac{K(s^2 + a_0)}{s^2 + Bs + a_0} \qquad (2.8)$$

$$R = R_5 = R_6 = R_7 = 1\Omega \quad C = 1/\sqrt{a_0} \quad R_4 = 1 - B/2\sqrt{a_0} \quad C_{\mathrm{in}} \geq 100/\pi\, f_{\mathrm{i}} \qquad (2.9)$$

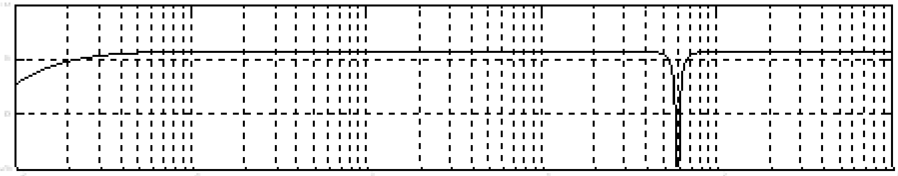
onde f_i é a menor freq. de interesse do sinal a ser filtrado e o ganho da estrutura é $K = 2 - (1/2Q)$.

As considerações sobre a escolha de R_6 e R_7 e sobre o escalamento destes resistores, são as mesmas apresentadas para os resistores R_3 e R_4 do PB da seção 2.1.1.

Exemplo 2.1.3.:

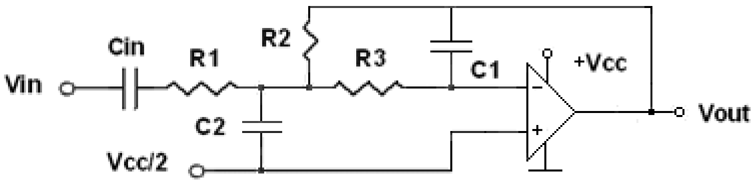
Especificações: $f_{\mathrm{S}} = 60\ \mathrm{Hz}$, $Q = 10$, $f_i = 1Hz$. $T_{\mathrm{RF}}(s) = \dfrac{1{,}95(s^2 + 142{,}12230 \times 10^3)}{s^2 + 37{,}699112s + 142{,}1223 \times 10^3}$

Conforme (2.9): $R = R_5 = R_6 = R_7 = 1\Omega \quad C = 2{,}65258\ \mathrm{mF} \quad R_4 = 0{,}95\Omega \quad C_{in} \geq 31{,}83099\ \mathrm{F}$



2.2. *MFB*

2.2.1. PB



$$V_{\mathrm{O}} = V_{\mathrm{I}} \frac{-\dfrac{R_2}{R_1}\dfrac{1}{C_1C_2R_2R_3}\dfrac{s}{s + 1/C_{in}R_1}}{s^2 + s\dfrac{1}{C_2}\left(\dfrac{1}{R_1}\dfrac{s}{s + (1/C_{in}R_1)} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}\right) + \dfrac{1}{C_1C_2R_2R_3}} + \frac{V_{\mathrm{CC}}}{2} \qquad (2.10)$$

O capacitor C_{in}, juntamente com R_1, influencia de duas maneiras: forma um PA e torna o valor de Q dependente da frequência, pois modifica o valor de R_1 visto pelos outros componentes do filtro. Entretanto, à medida que a freqüência aumenta as duas influências diminuem e serão insignificantes. Dessa forma, como já utilizado em outras estruturas, o valor de C_{in} será escolhido de acordo com a menor freqüência de interesse do sinal a ser filtrado.

$$T_{\mathrm{PB}}(s) = \frac{A}{s^2 + a_1 s + a_0} \qquad (2.11)$$

$$R_1 = R_3 = 1\Omega \quad R_2 = \frac{|A|}{a_0} \quad C_2 = \frac{2}{a_1} + \frac{a_0}{a_1|A|} \quad C_1 = \frac{1}{C_2|A|} \quad C_{in} \geq \frac{100}{2\pi f_i} \qquad (2.12)$$

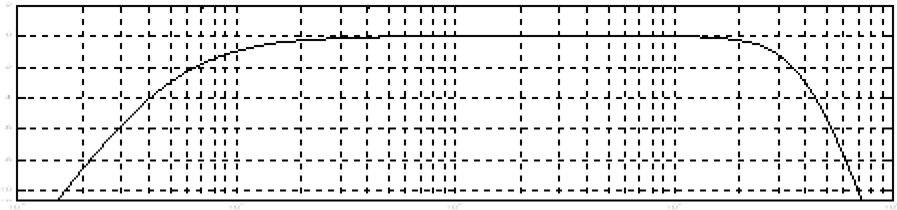
Onde f_i é a menor freqüência de interesse do sinal a ser filtrado.

Exemplo 2.2.1.:

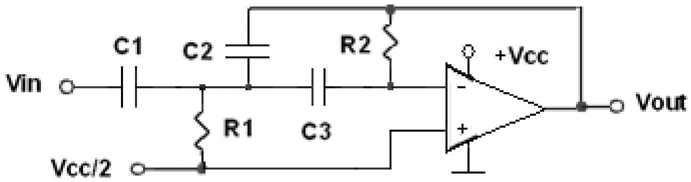
Espec.: $f_p = 4kHz$, $Q = \dfrac{\sqrt{2}}{2}$, $K = 1$ e $f_i = 500Hz$ $T_{PB}(s) = \dfrac{631{,}65468 \times 10^6}{s^2 + 35{,}543063 \times 10^3 s + 631{,}65468 \times 10^6}$

Conforme (2.12):

$R_1 = R_3 = 1\Omega \quad R_2 = 1\Omega \quad C_2 = 84{,}404654\mu F \quad C_1 = 18{,}756589\mu F \quad C_{in} \geq 31{,}830988 mF$



2.2.2. PA



Função da rede:

$$V_O = V_I \frac{-(C_1/C_2)s^2}{s^2 + s\dfrac{C_1+C_2+C_3}{C_2C_3R_2} + \dfrac{1}{C_2C_3R_1R_2}} + \frac{V_{CC}}{2} \tag{2.13}$$

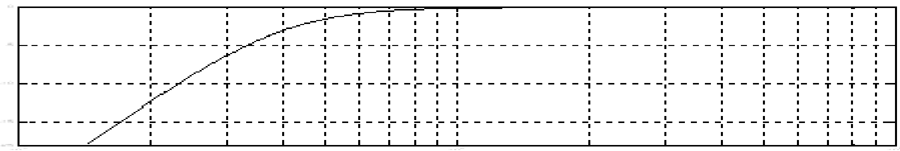
$$T_{PA}(s) = \frac{Ks^2}{s^2 + a_1 s + a_0} \tag{2.14}$$

$$R_1 = \frac{a_1/\sqrt{a_0}}{2+(1/|K|)} \qquad R_2 = \frac{\sqrt{a_0}}{a_1}\left(2|K|+1\right) \quad C_1 = C_3 = \frac{1}{\sqrt{a_0}} \quad C_4 = \frac{1}{|K|\sqrt{a_0}} \tag{2.15}$$

Exemplo 2.2.2.:

Especif: $f_p = 4kHz$, $Q = \dfrac{\sqrt{2}}{2}$ e $K = 1$ $T_{PA}(s) = \dfrac{s^2}{s^2 + 35,543063\times10^3 s + 631,65468\times10^6}$

Conforme (2.15): $R_1 = 0{,}47140452\Omega \qquad R_2 = 2{,}1213203\Omega \qquad C_1 = C_3 = C_2 = 39,7887\ \mu\text{F}$



Considerações Finais

Todas as simulações (SG2) comprovaram a validade das equações mostradas. Os filtros PF implementados por estruturas *SK e RC-*∞ não são recomendados por causa de problemas de espalhamento de componentes, algoritmos complexos e outros problemas. [1]. Na implementação de qualquer uma das estruturas que contenham capacitor de acoplamento, é de vital importância que o valor do capacitor de acoplamento C_{in} seja significativamente maior que os capacitores do filtro após os escalamentos das impedâncias.

Referência

[1] SLOA096 – *More Filter Design on a Budget* – Documento da Texas Instruments

Conclusões Suplementares:

Para filtros PF de baixo Q, Q<0,5, recomenda-se o uso de uma cascata de um passa alta com um passa baixa. Para Q>0,5, as duas estruturas interagem e há uma redução no ganho da freqüência central do passa faixa [1]. Para filtros PB de ordem 2, recomenda-se o uso de estruturas MFB, pois há uma liberdade maior para escolha de ganho. Nas estruturas SK o ganho é amarrado ao Q desejado. Para o cálculo dos capacitores C_{in} das estruturas PB e RF, foi realizado introduzindo o conceito de menor freqüência de interesse do sinal desejado. Seu valor é escolhido de modo que toda faixa desejada do sinal passe pela estrutura sofrendo as menores atenuações possíveis.