Slides Aulas de Eletrônica

Material didático auxiliar

Observação importante

Os slides aqui apresentados não refletem todo o conteúdo abordado em sala de aula. Muitos exercícios, demonstrações e detalhamento da teoria, expostos na aula presencial, não estão contemplados nestes slides. Portanto, considere-o apenas como material de referência parcial a ser complementado com o auxílio de livros, apostilas, guias de laboratório e literatura correspondente. Material auxiliar adicional encontra-se disponibilizado no site da disciplina através de textos e links.


ELETRÔNICA
Filtros Elétricos
Ativos e Passivos
AOC

Análise de Circuitos

- **Domínio do tempo**

  Equações diferenciais e integrais

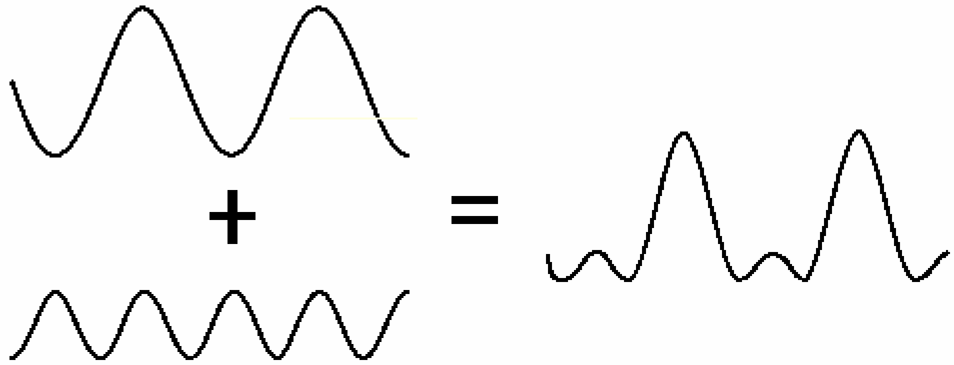
- **Domínio da frequência**

  Transformada de Laplace

  Transformada de Fourier

Análise Harmônica

- Fourier mostrou
  - Que é possível reduzir uma onda complexa em uma soma de ondas senoidais.
  - As únicas ondas senoidais necessárias são ondas com freqüências que são múltiplos inteiros da freqüência fundamental.



Fourier mostrou que:

"***Qualquer função periódica pode ser decomposta como uma soma de senos e cossenos*.**"

Série de Fourier

Sendo $g(t)$ um sinal periódico (período T_0) podemos escrever:

$$g(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$

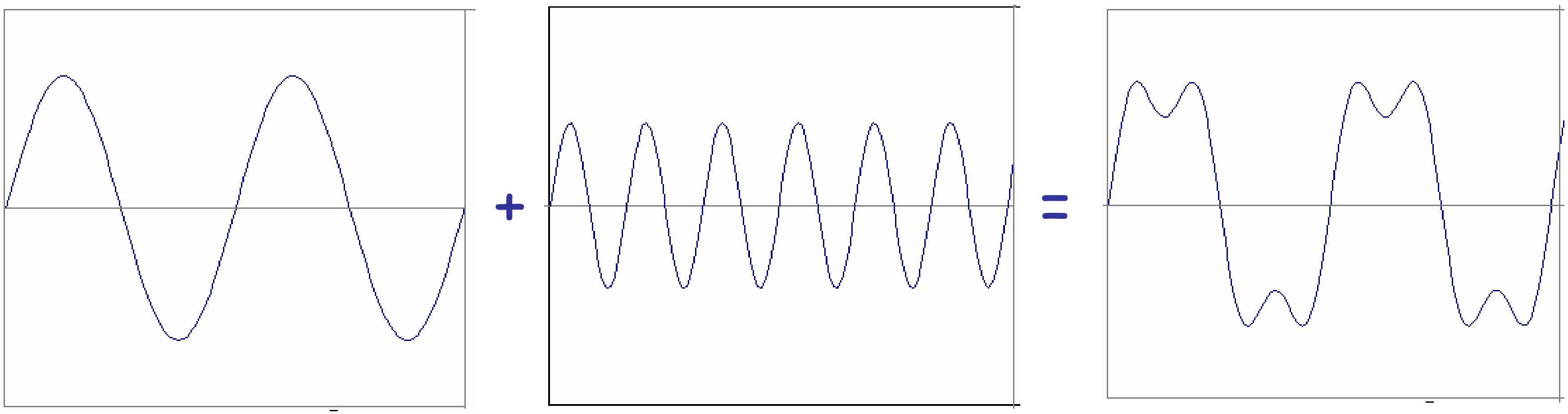
$$a_0 = \frac{1}{T_0}\int_{t_1}^{t_1+T_0} g(t)dt$$

$$a_n = \frac{2}{T_0}\int_{t_1}^{t_1+T_0} g(t)\cos n\omega_0 t dt$$

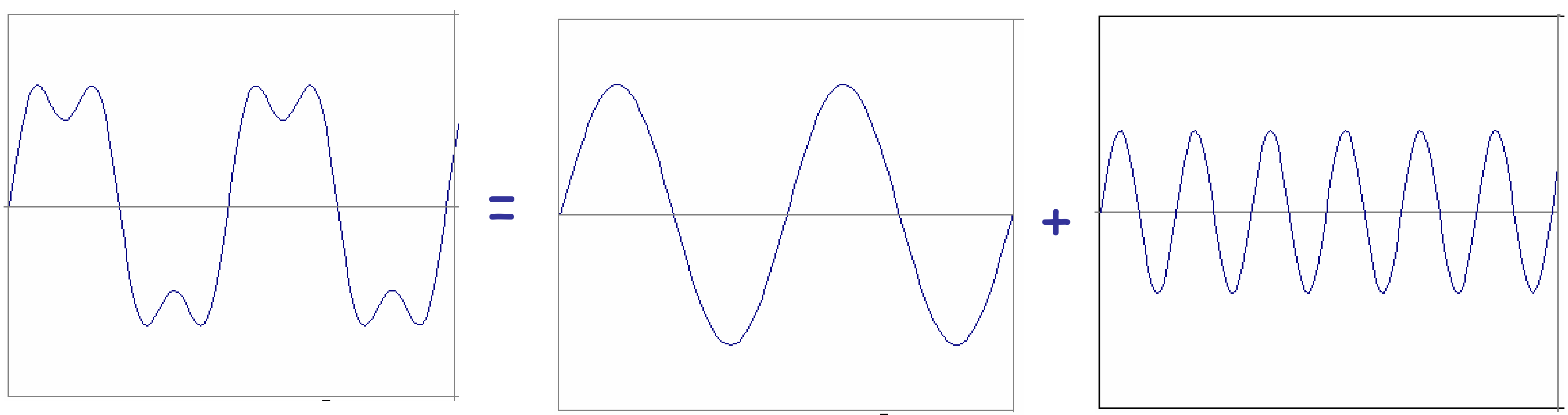
$$b_n = \frac{2}{T_0}\int_{t_1}^{t_1+T_0} g(t)\sin n\omega_0 t dt$$

$$n = 1, 2, 3, ...$$

Síntese → Composição

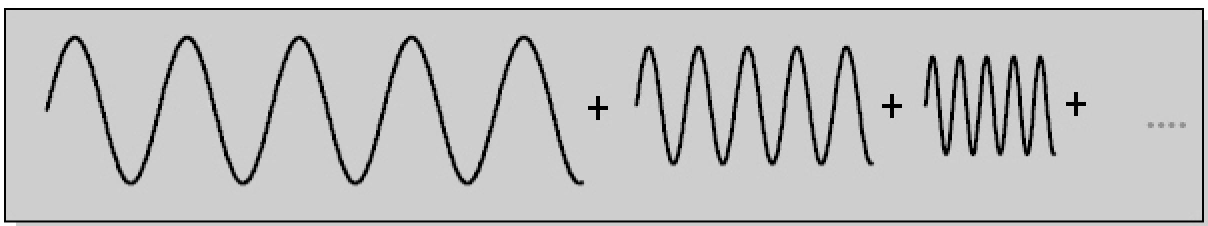


Análise → Decomposição



Análise de Sinais

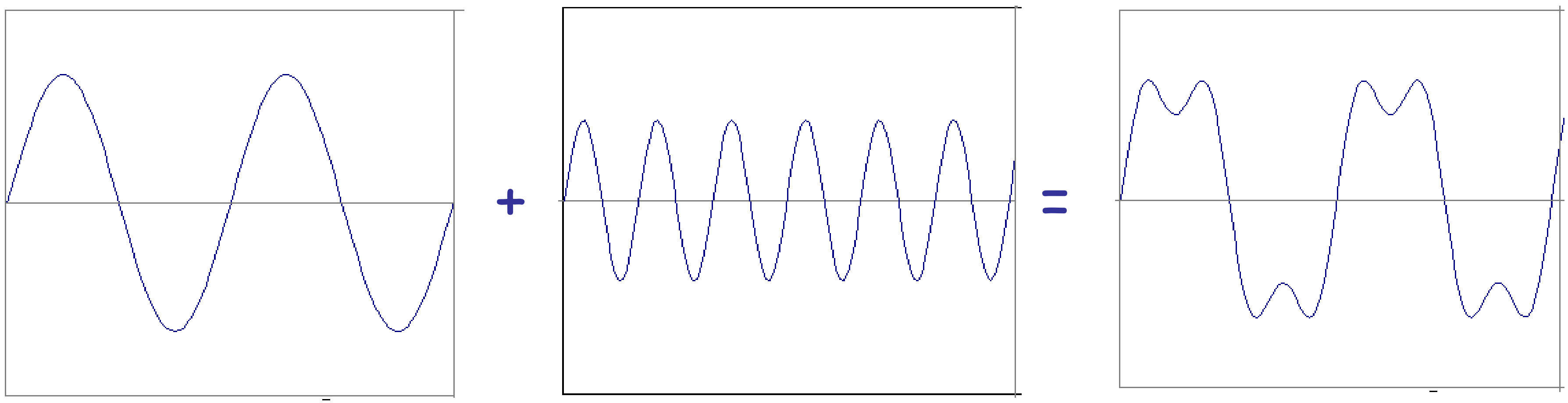
- **Série de Fourier**
  - *Qualquer sinal periódico pode ser entendido como uma soma (possivelmente infinita) de ondas senoidais de diferentes freqüências e amplitudes.*



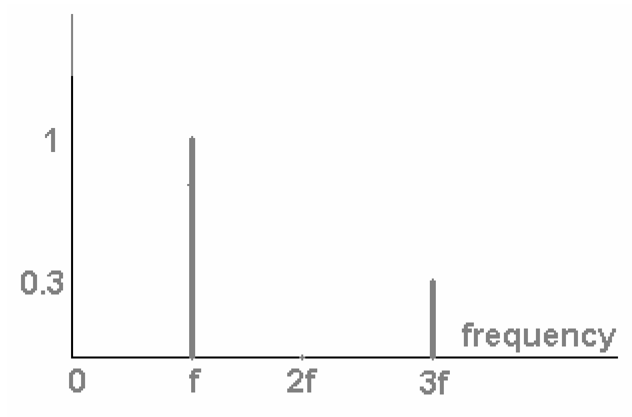
$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty}\left(a_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi x}{T}\right)\right)$$

Exemplo

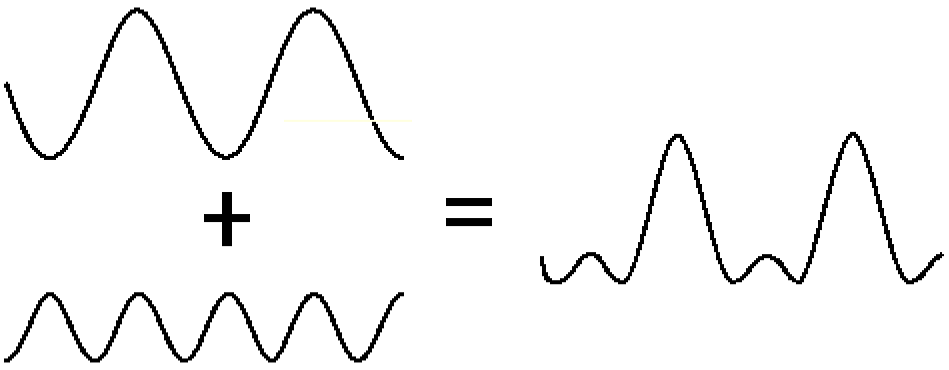
"Formas de ondas periódicas podem ser construídas a partir da soma de senóides."



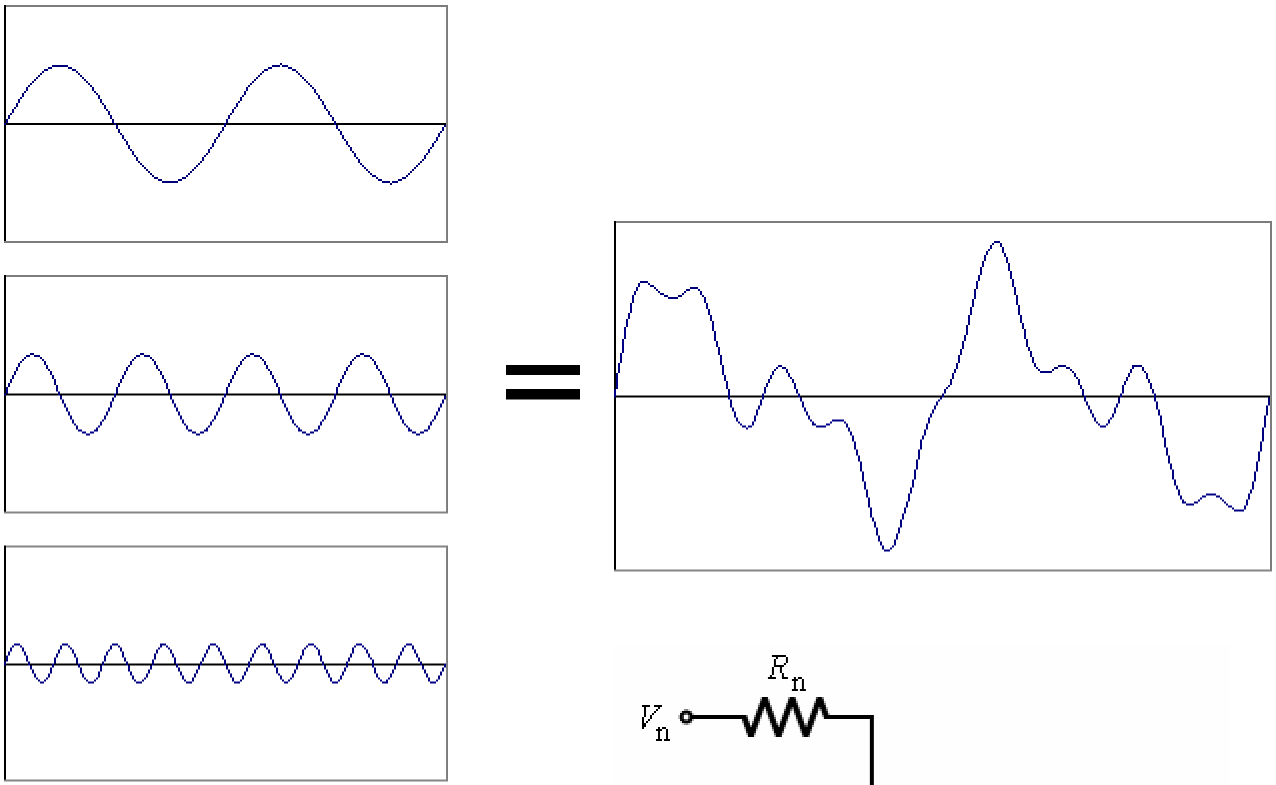
$$g(t) = \sin(2\pi f\, t) + (1/3)\sin(2\pi\, 3f\, t)$$

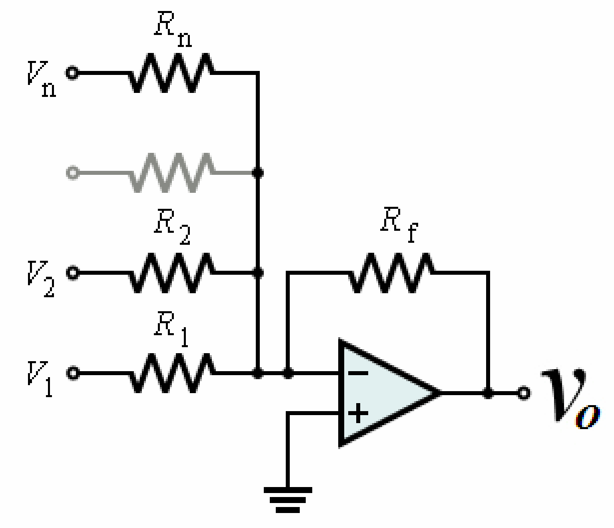


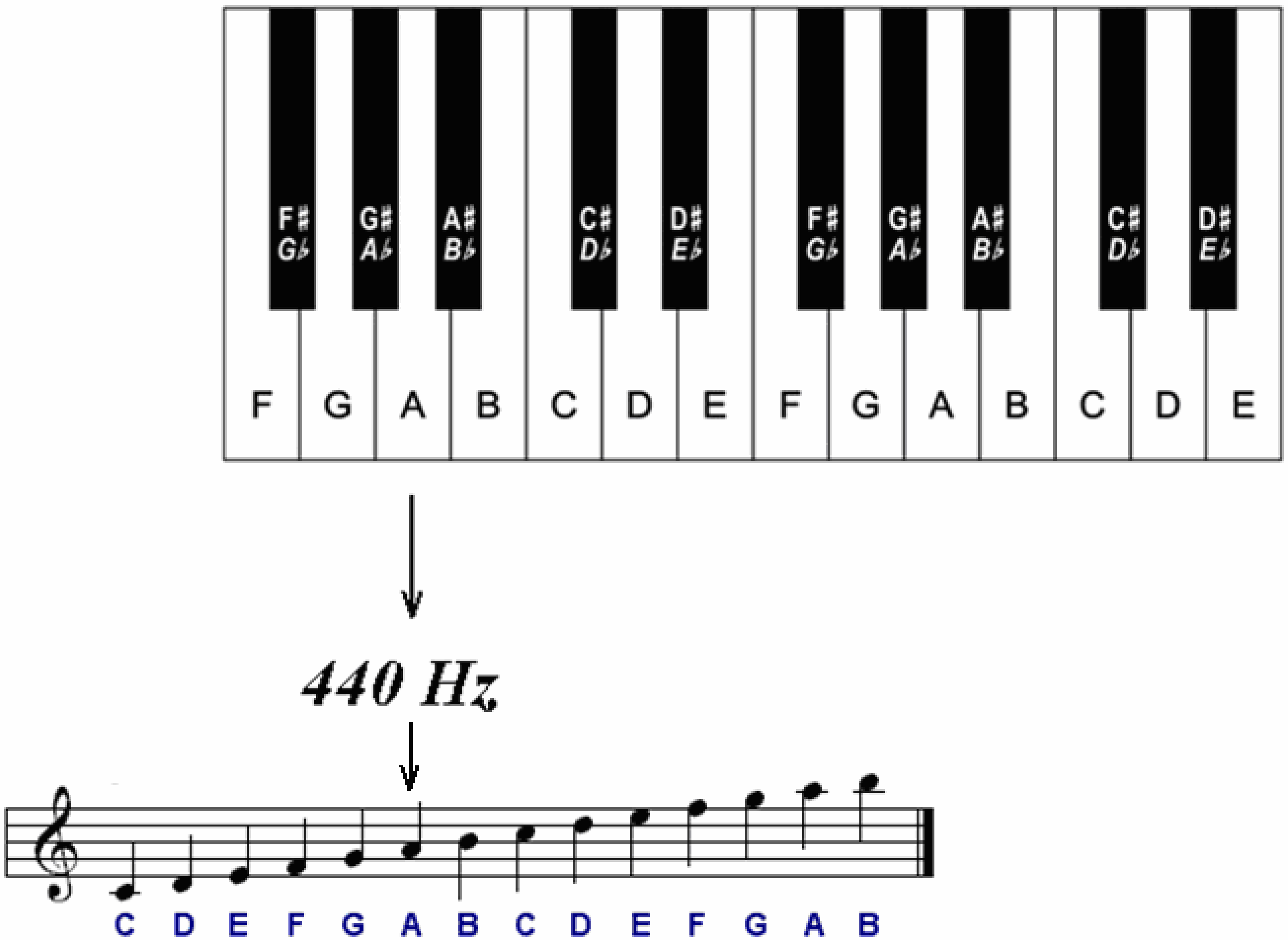
Combinando sinais de frequências distintas

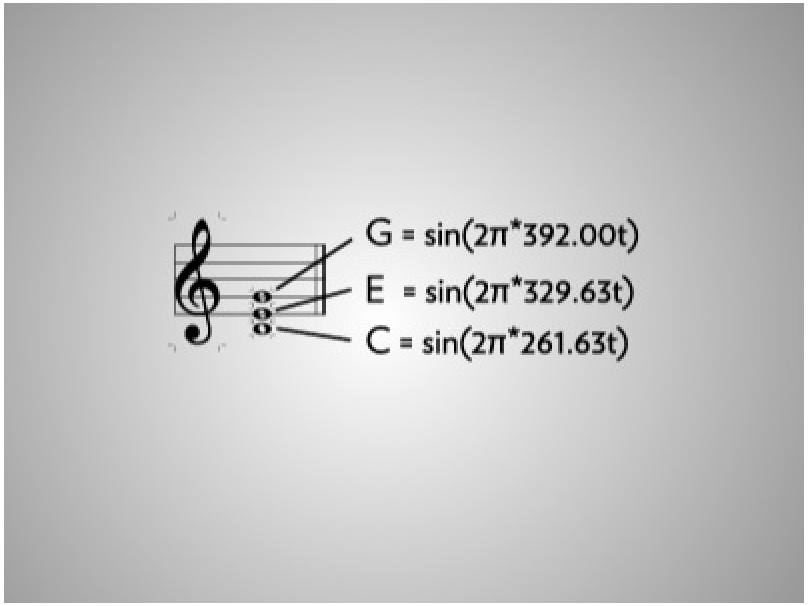


Geração de sinais complexos a partir de senóides

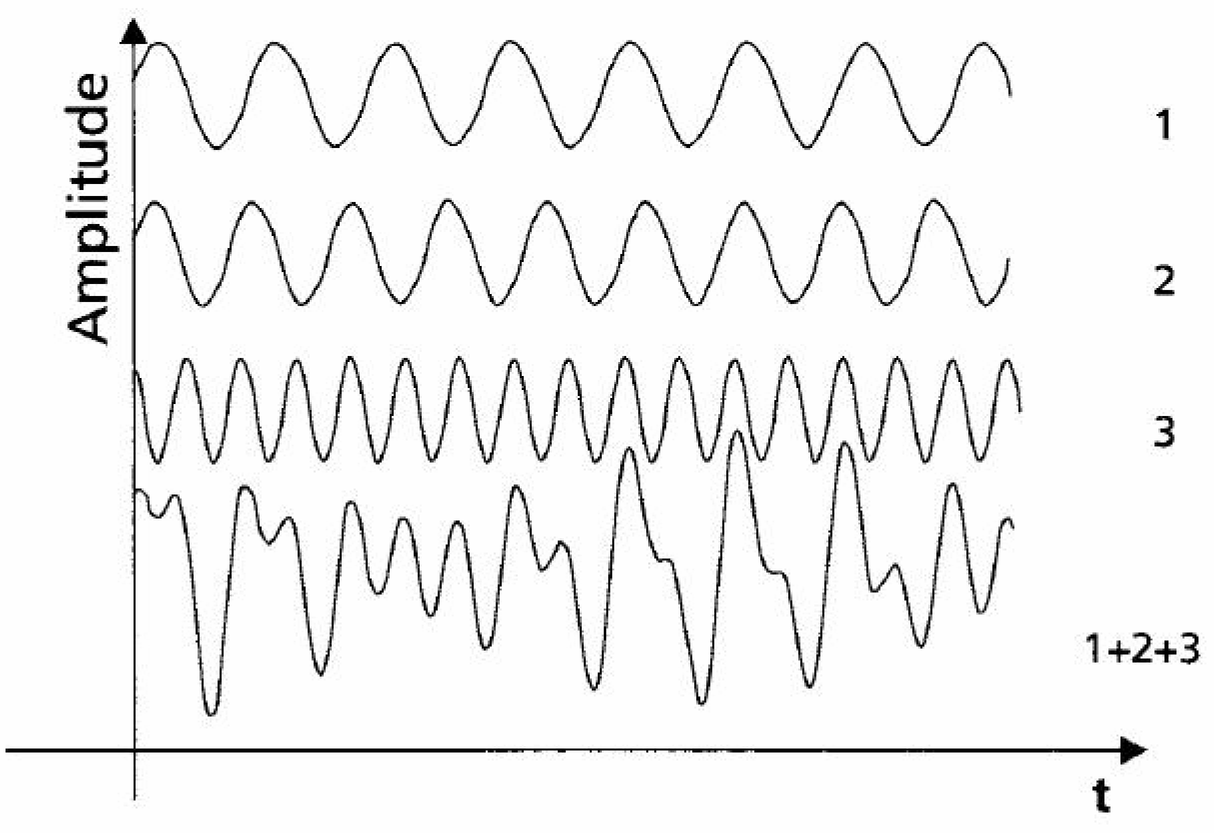





F# G♭
G# A♭
A# B♭
C# D♭
D# E♭
F# G♭
G# A♭
A# B♭
C# D♭
D# E♭
F G A B C D E F G A B C D E
440 Hz
C D E F G A B C D E F G A B


G = sin(2π*392.00t)
E = sin(2π*329.63t)
C = sin(2π*261.63t)

Composição de Sinais

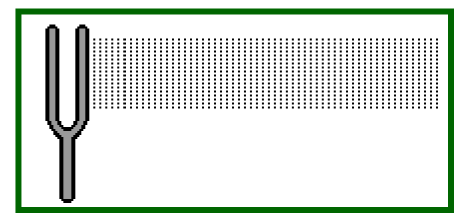


Aplicação de osciladores senoidais

Geração de Notas Musicais

Note	Frequency (Hz)
A	$220 = 220 \ldots 2^{0/12}$
A#	$233 = 220 \ldots 2^{1/12}$
B	$247 = 220 \ldots 2^{2/12}$
C	$262 = 220 \ldots 2^{3/12}$
C#	$277 = 220 \ldots 2^{4/12}$
D	$294 = 220 \ldots 2^{5/12}$
D#	$311 = 220 \ldots 2^{6/12}$
E	$330 = 220 \ldots 2^{7/12}$
F	$349 = 220 \ldots 2^{8/12}$
F#	$370 = 220 \ldots 2^{9/12}$
G	$392 = 220 \ldots 2^{10/12}$
G#	$415 = 220 \ldots 2^{11/12}$
A	$440 = 220 \ldots 2^{12/12}$

Diapasão Musical



A = 440 Hz

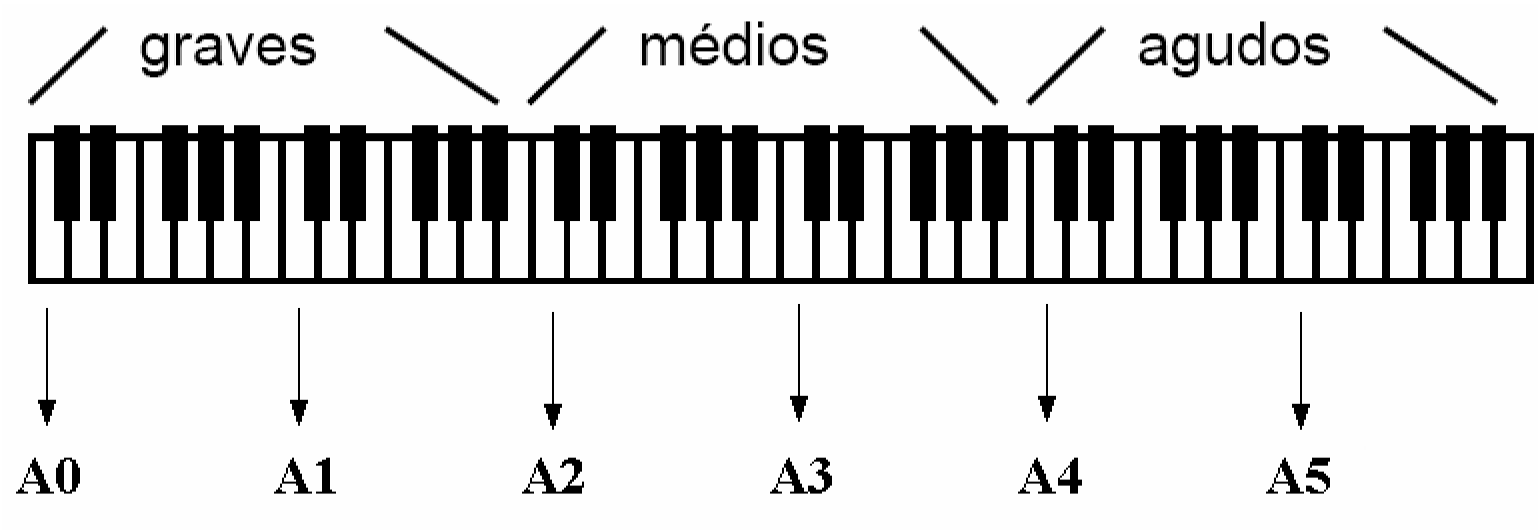
A → Nota musical LÁ

A frequência da nota musical seguinte é determinada pela relação $f = f_o \sqrt[12]{2}$

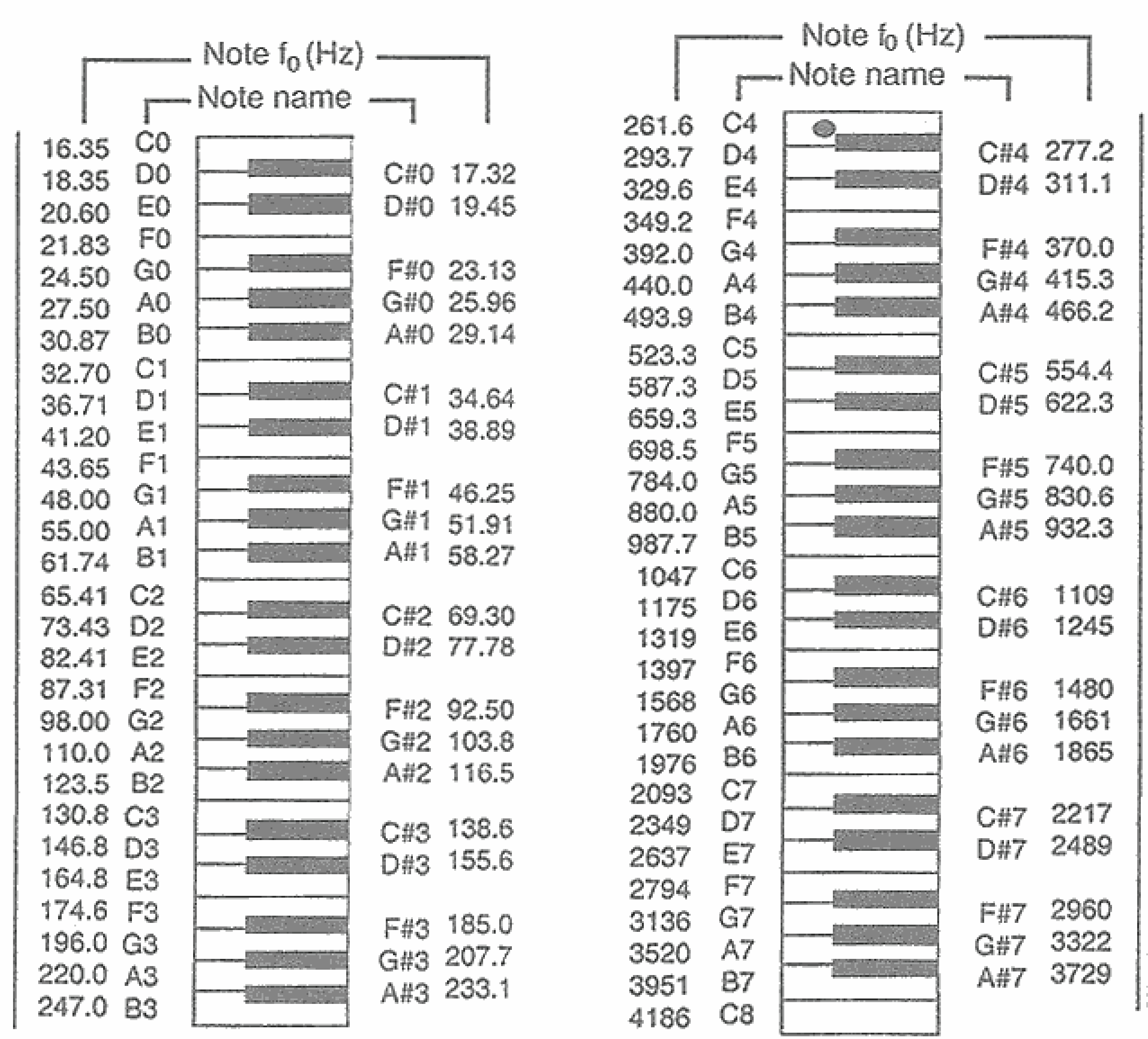
São comumente aceitos como limites da percepção humana em freqüência a região do espectro entre 20 e 20.000 Hz.

Um piano produz sons com freqüência entre 27,5 Hz (A0) e 4.186 Hz (C8)

A voz humana entre 80 Hz. (baixos) e 1 kHz (sopranos).



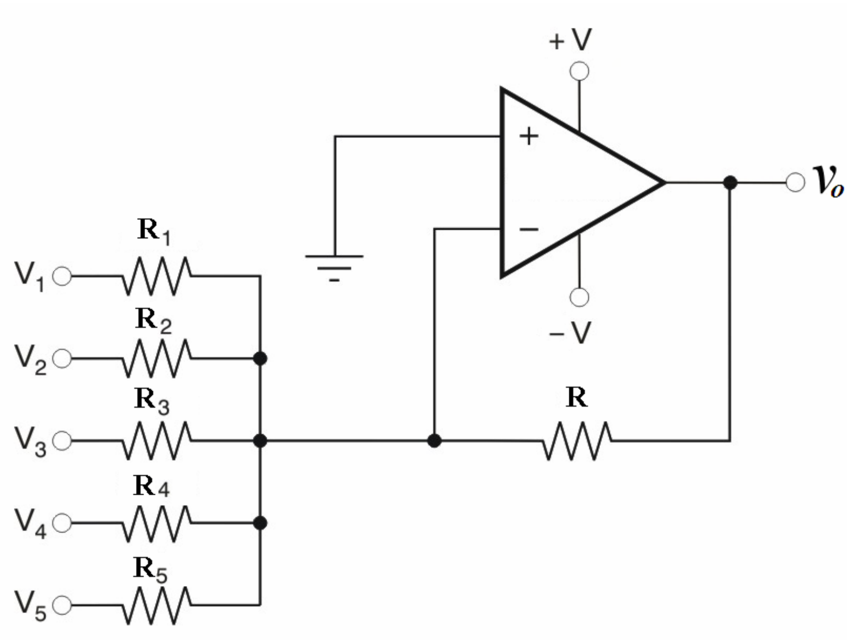
Notas musicais e frequências produzidas por um piano



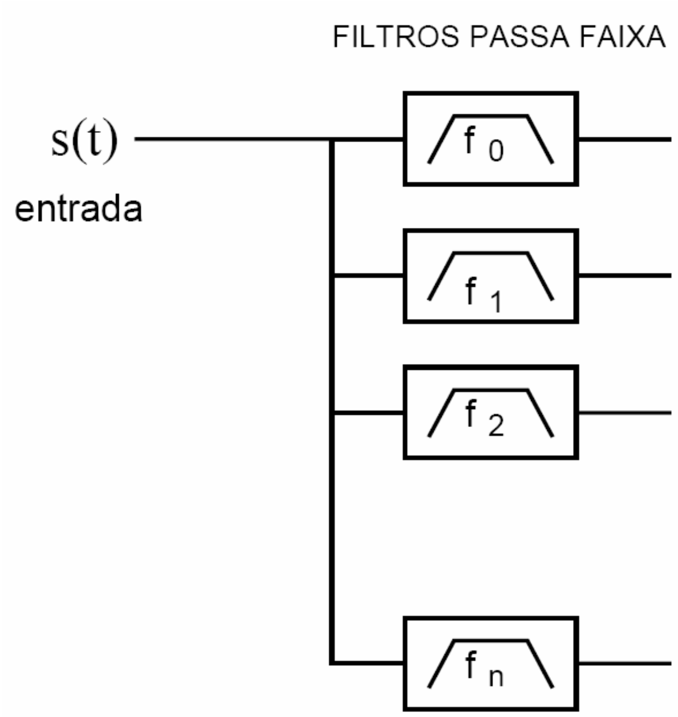
As frequências das notas musicais são determinadas pela relação $f = f_o \sqrt[12]{2}$

Síntese Espectral
x
Análise Espectral

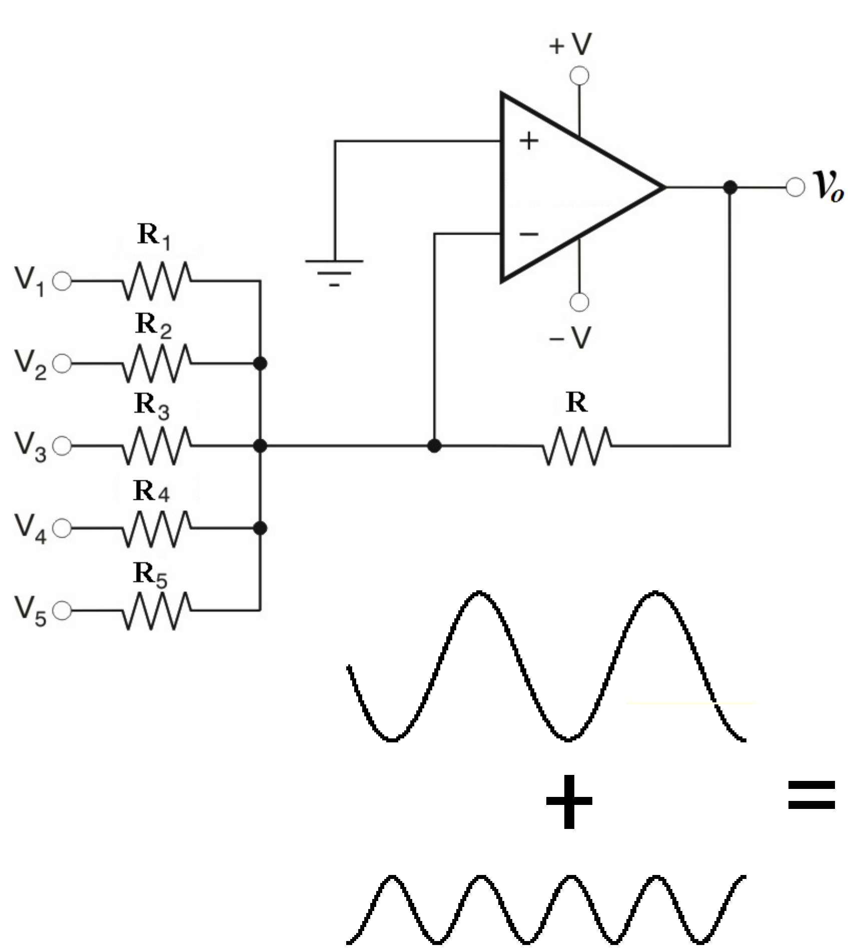
Síntese Espectral



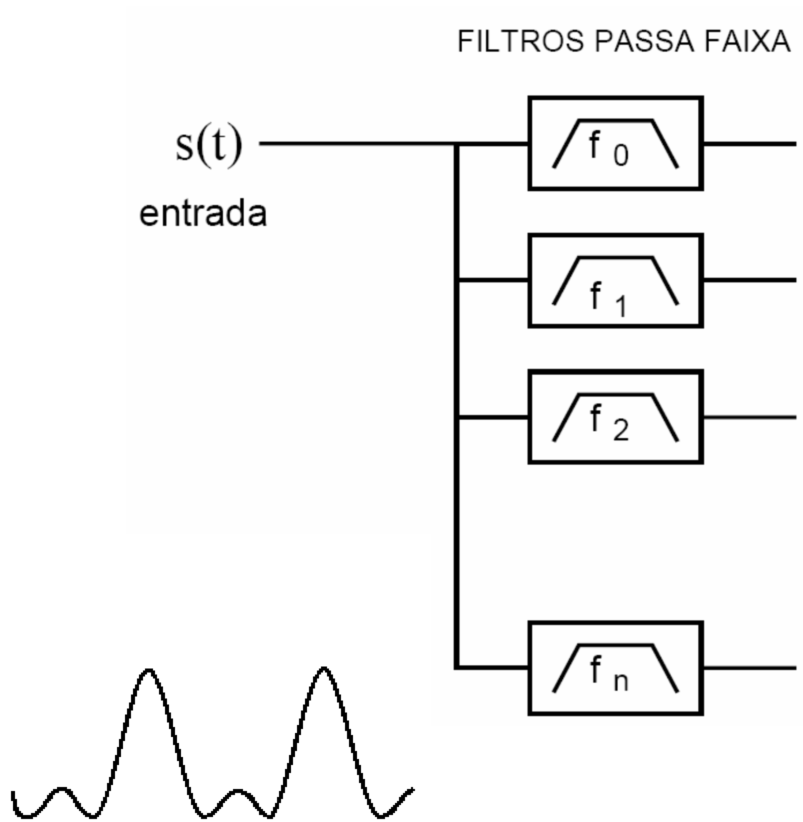
Análise Espectral



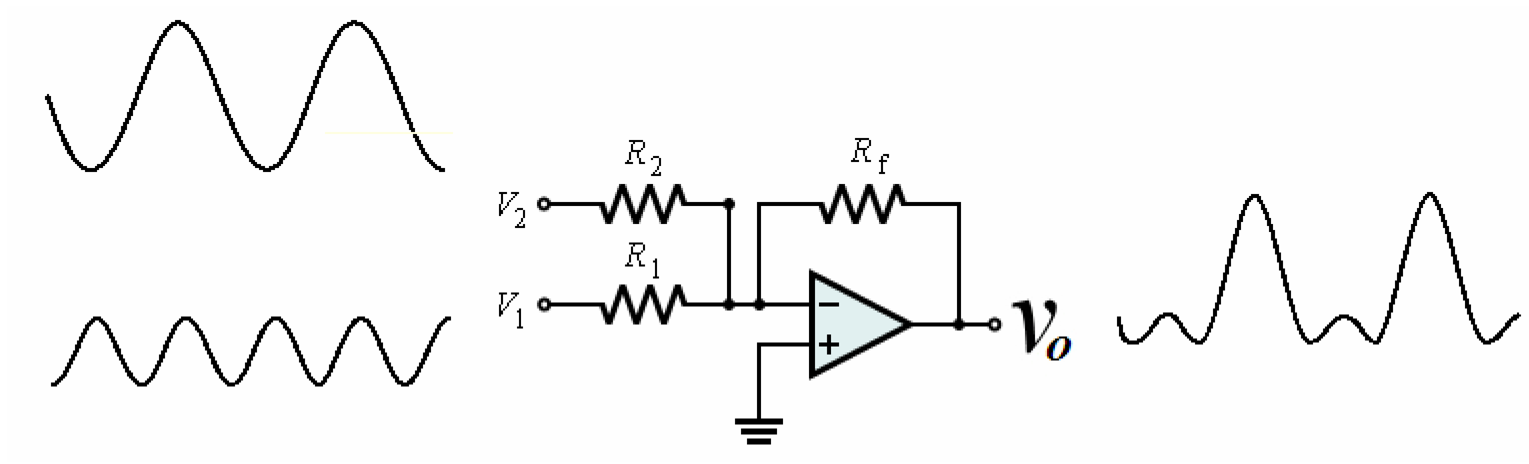
Síntese Espectral



Análise Espectral



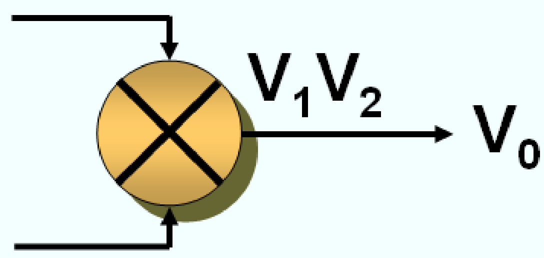
CIRCUITO SOMADOR



MULTIPLICAÇÃO DE SINAIS SENOIDAIS

$$V_1 = A_1 \sin(\omega_1 t)$$

$$V_2 = A_2 \sin(\omega_2 t)$$



$$\cos(X+Y) = \cos X \cos Y - \sin X \sin Y$$

$$\cos X \cos Y = 1/2[\cos(X+Y) + \cos(X-Y)]$$

$$-\sin X \sin Y = [\cos(X+Y) - \cos(X-Y)]$$

Multiplicador Analógico

$$v_1 = \cos(\omega_1 t)$$

$$v_2 = \cos(\omega_2 t)$$

$$v_o = v_1 v_2$$

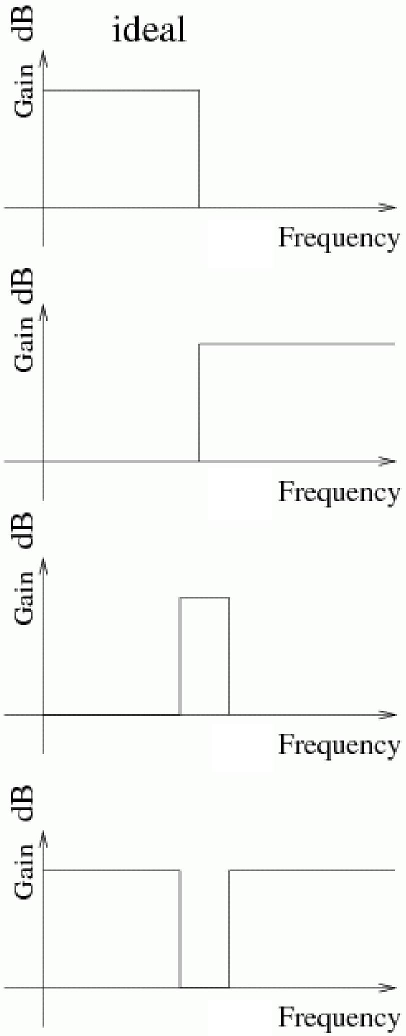
$$v_o = v_1 v_2 = \cos(\omega_1 t)\cos(\omega_2 t)$$

$$v_o = \frac{1}{2}\left[\cos((\omega_1 - \omega_2)t) + \cos((\omega_1 + \omega_2)t)\right]$$

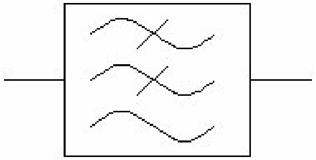
Filtros Elétricos

- ***Os filtros elétricos constituem uma das aplicações mais comuns da eletrônica, sendo amplamente utilizados na aquisição e processamento de sinais de áudio, vídeo e de dados, em sistemas de alimentação, telecomunicações, controle e instrumentação.***
- ***Possui um vasto e diversificado repertório de aplicações em praticamente todos os setores da eletrônica.***

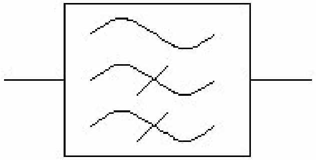
Classificação e Simbologia



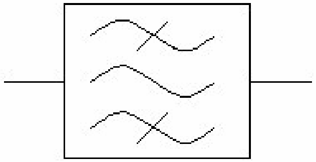
Passa-baixa



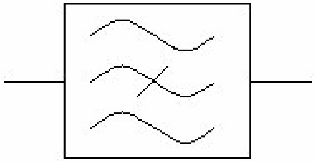
Passa-alta



Passa-faixa



Rejeita-faixa



Filtros Elétricos

Malha seletiva de frequência.

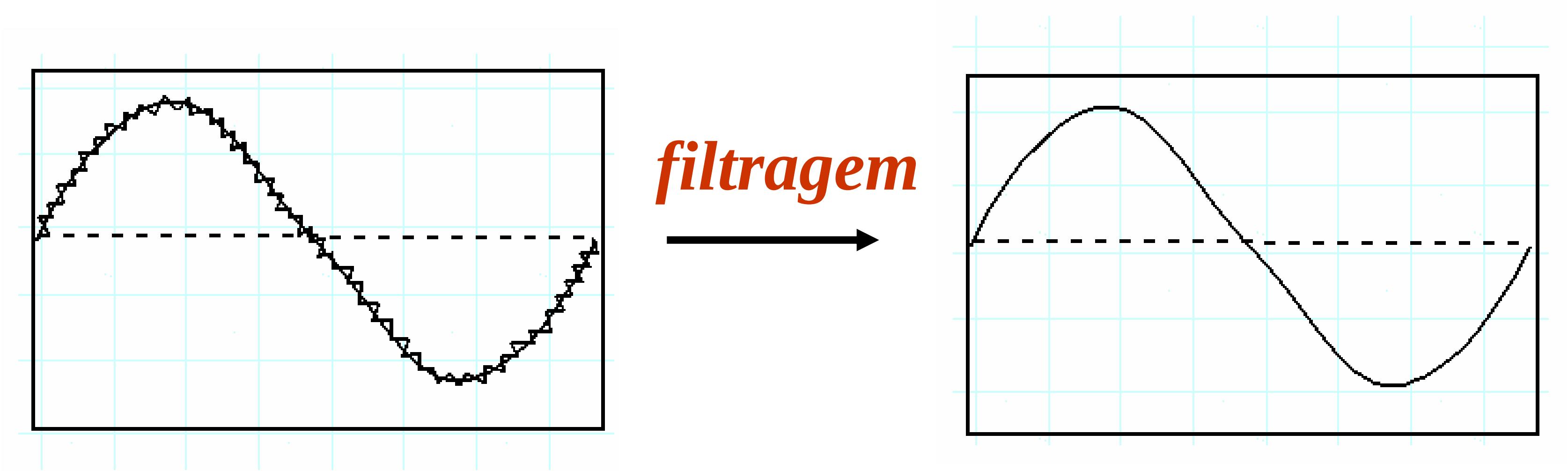
Um filtro atenua a quantidade de energia presente em certas frequências ou faixas de frequências

Deixam passar ou amplificam as freqüências desejadas e atenuam as indesejáveis.

A quantidade de atenuação para cada frequência varia de filtro para filtro.

Funcionalidade de um filtro elétrico

- **Um filtro elétrico é um circuito capaz de separar algumas frequências de outras quando misturadas.**



Parâmetros

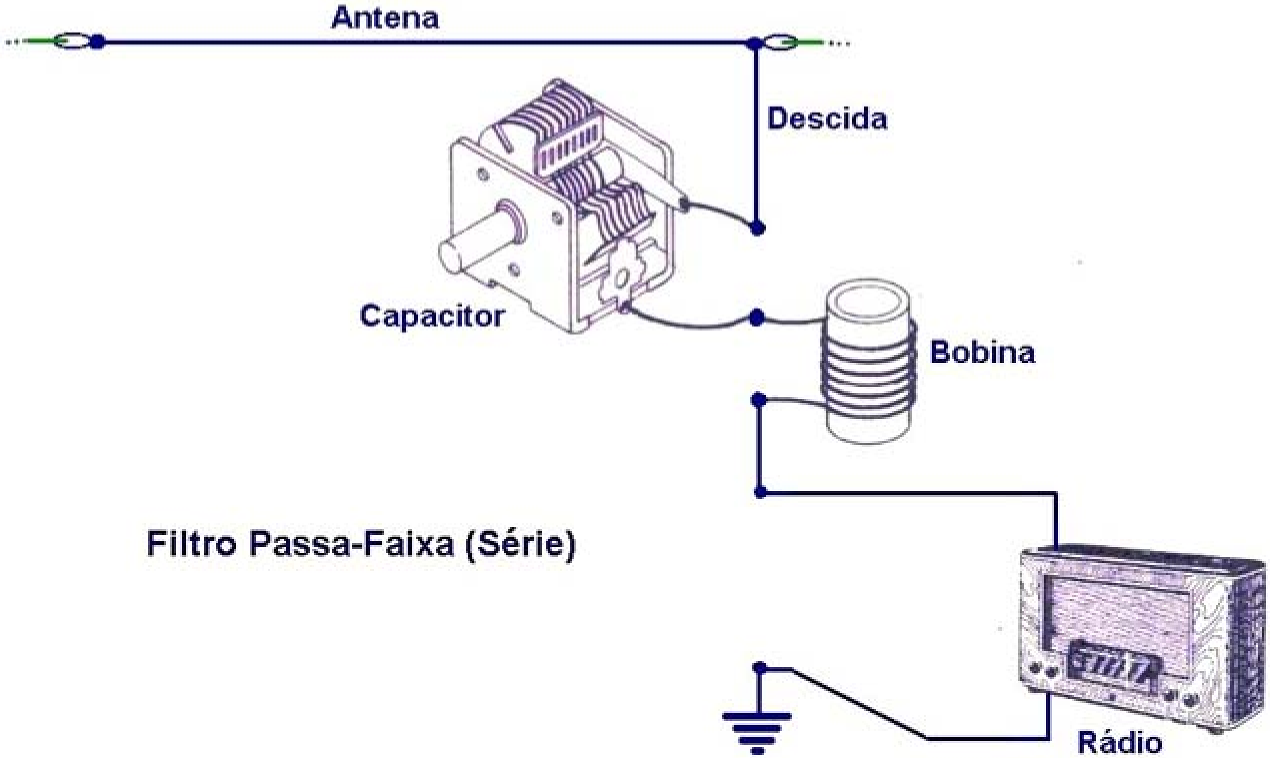
- Para extrair o conteúdo de informação fundamental de um sinal é necessário um dispositivo que selecione as frequências de interesse que compõe o sinal.
- Este dispositivo é denominando de filtro, cuja resposta em frequência é caracterizada por uma faixa de passagem, por uma faixa de rejeição, as quais estão separadas por uma faixa de transição ou faixa de guarda.

- **Filtro Analógico** → ***sinais analógicos***

- **Filtro Digital** → ***sinais digitais***

FILTRO PASSA - FAIXA (série)

CONFIGURAÇÃO : EM SÉRIE COM O RÁDIO



Filtro Passa-Faixa (Série)

Filtros Elétricos

- **Passivos** (**R, L, C**)
- **Ativos** (**R, L, C + Dispositivo Ativo**)

Dispositivo Ativo → Produz Ganho

Transistor, Amplificador Operacional

Função de Transferência

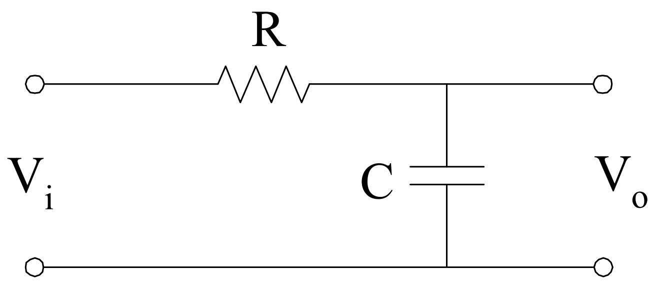
Diagramas de Bode

Hendrik Wade Bode

Engenheiro americano (1905-1982)

Pioneiro da moderna teoria de controle

Filtro Passa-Baixa
Primeira Ordem



$$V_o = \frac{X_C}{X_C + R} V_i$$

$$V_o = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} V_i = \frac{1}{1 + j\omega CR} V_i$$

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

$$\omega_o = \frac{1}{RC}$$

$$H(s) = \frac{\omega_0}{s + \omega_0}$$

$$s = j\omega$$

$$\phi(\omega) = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$$

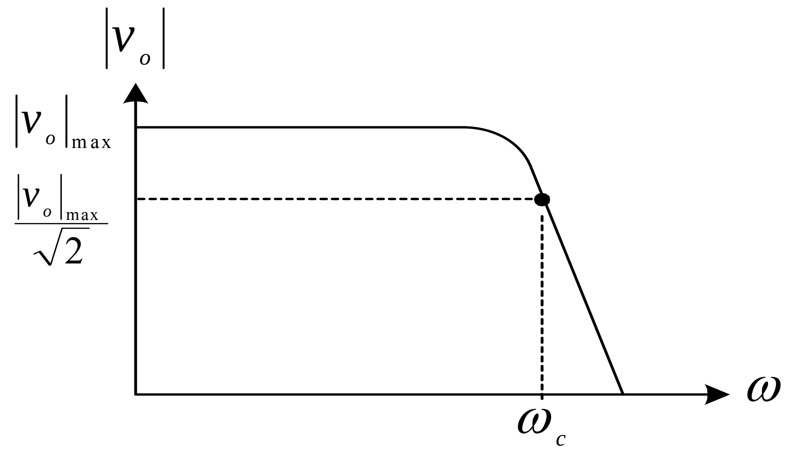
$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega CR}$$

$\omega \rightarrow 0 \Rightarrow |V_o| = |V_i| \leftarrow$ max. value

$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow |V_o| = 0 \leftarrow$ min. value

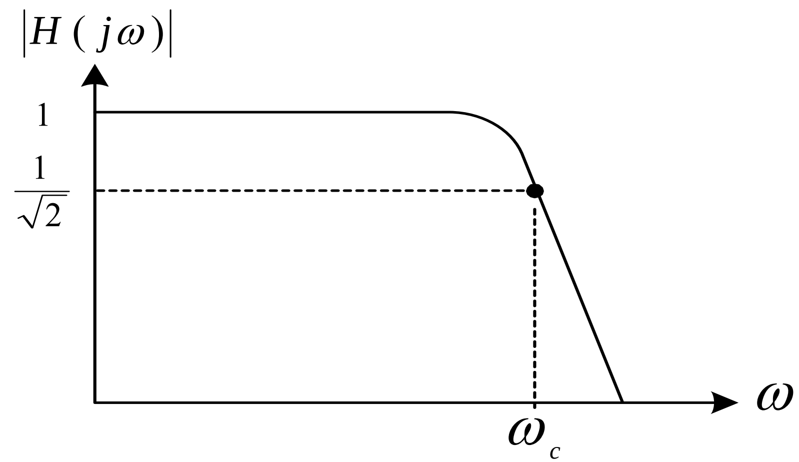
$$V_o = \frac{1}{1 + j\omega CR} V_i$$

$$\omega = \frac{1}{RC}$$



$$V_o = \frac{1}{1 + j} V_i$$

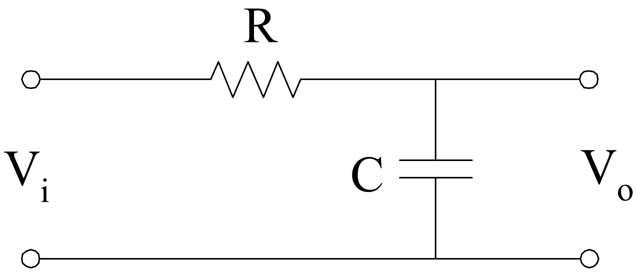
$$|V_o| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1^2}} |V_i| = \frac{1}{\sqrt{2}} |V_i|$$



$$\boldsymbol{\omega_c = \omega_o = \frac{1}{RC}}$$

Diagrama de Bode

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)}$$



filtro passa-baixa de primeira ordem

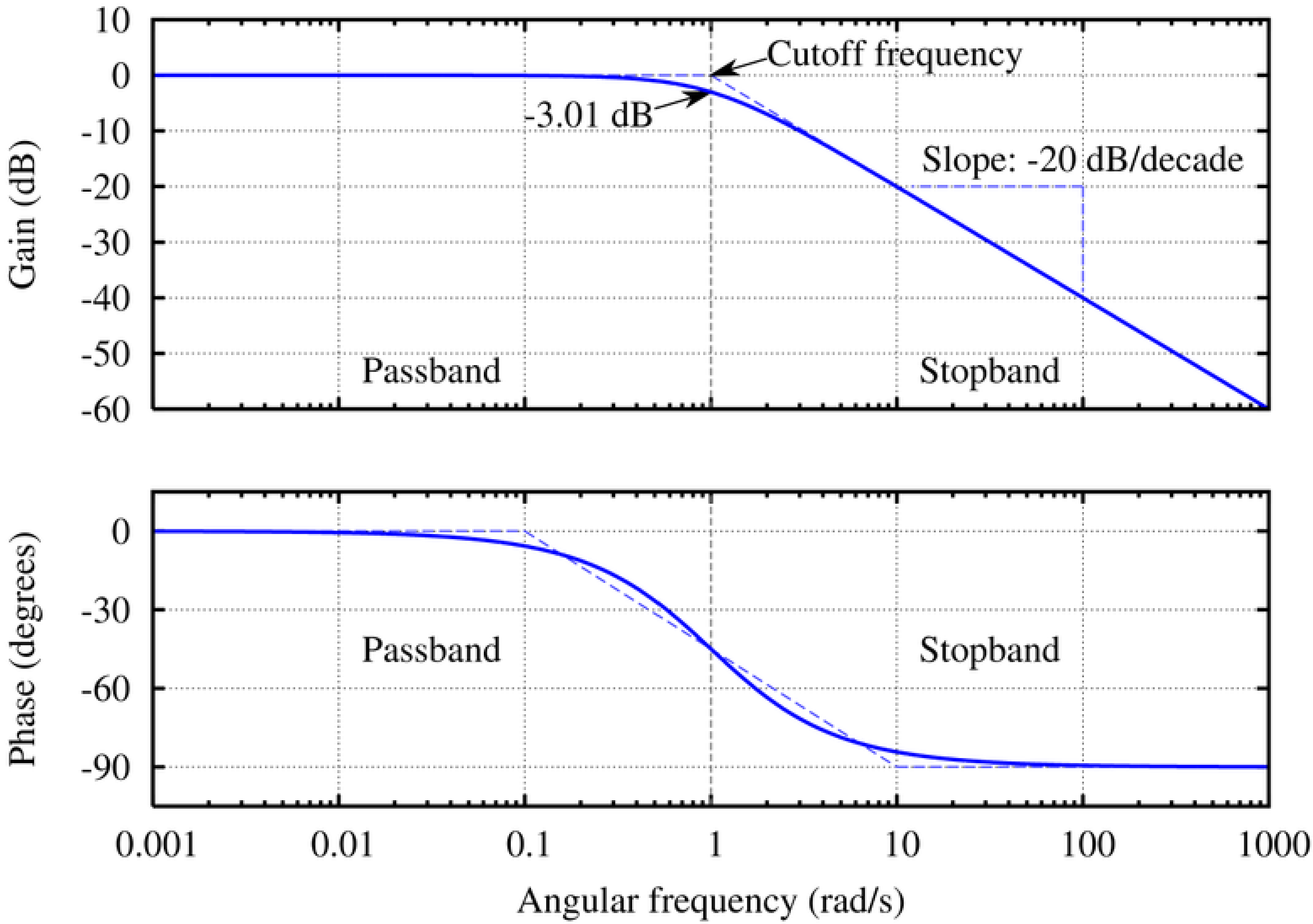
$$\Rightarrow \qquad \left|H(j\omega)\right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2}}$$

$$\left|H(j\omega)\right|_{dB} = 20\log_{10}\left|H(j\omega)\right| = 20\log_{10}\left(1 \Big/ \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2}\right)$$

For $\omega >> \omega_o$

$$\left|H(j\omega)\right|_{dB} \approx -20\log_{10}\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)$$

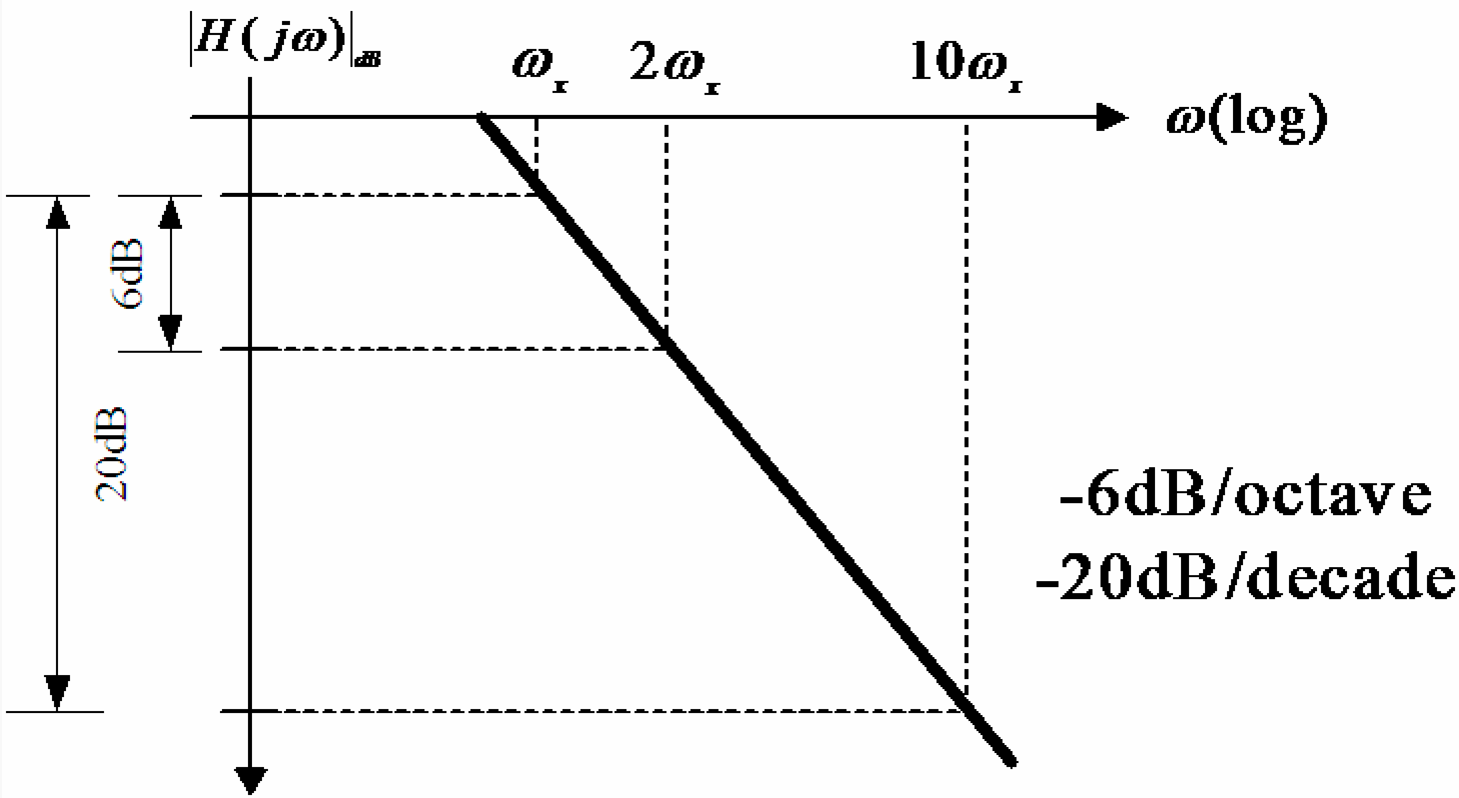
$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)}$$



$$|H(j\omega)| \approx -20\log_{10}\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)$$

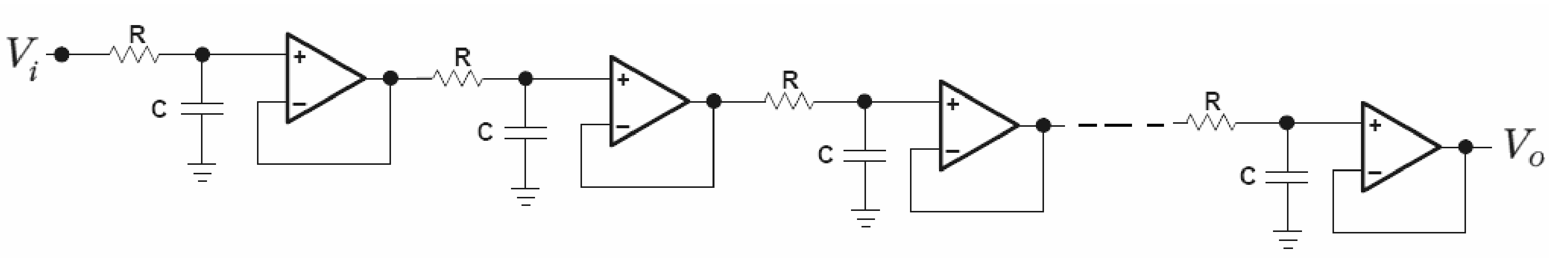
Uma oitava: $\frac{\omega}{\omega_o} = \frac{2}{1}$ $\quad |H(j\omega)| \approx -6dB$

Uma decada: $\frac{\omega}{\omega_o} = \frac{10}{1}$ $\quad |H(j\omega)| \approx -20dB$



Resposta em frequência

N filtros passa baixa em série



$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

Frequência de corte individual

$$\omega_C = \omega_0 \sqrt{2^{\frac{1}{N}} - 1}$$

Frequência de corte total

Frequência de corte equivalente a N filtros passa baixa colocados em série com frequência de corte individual f_o

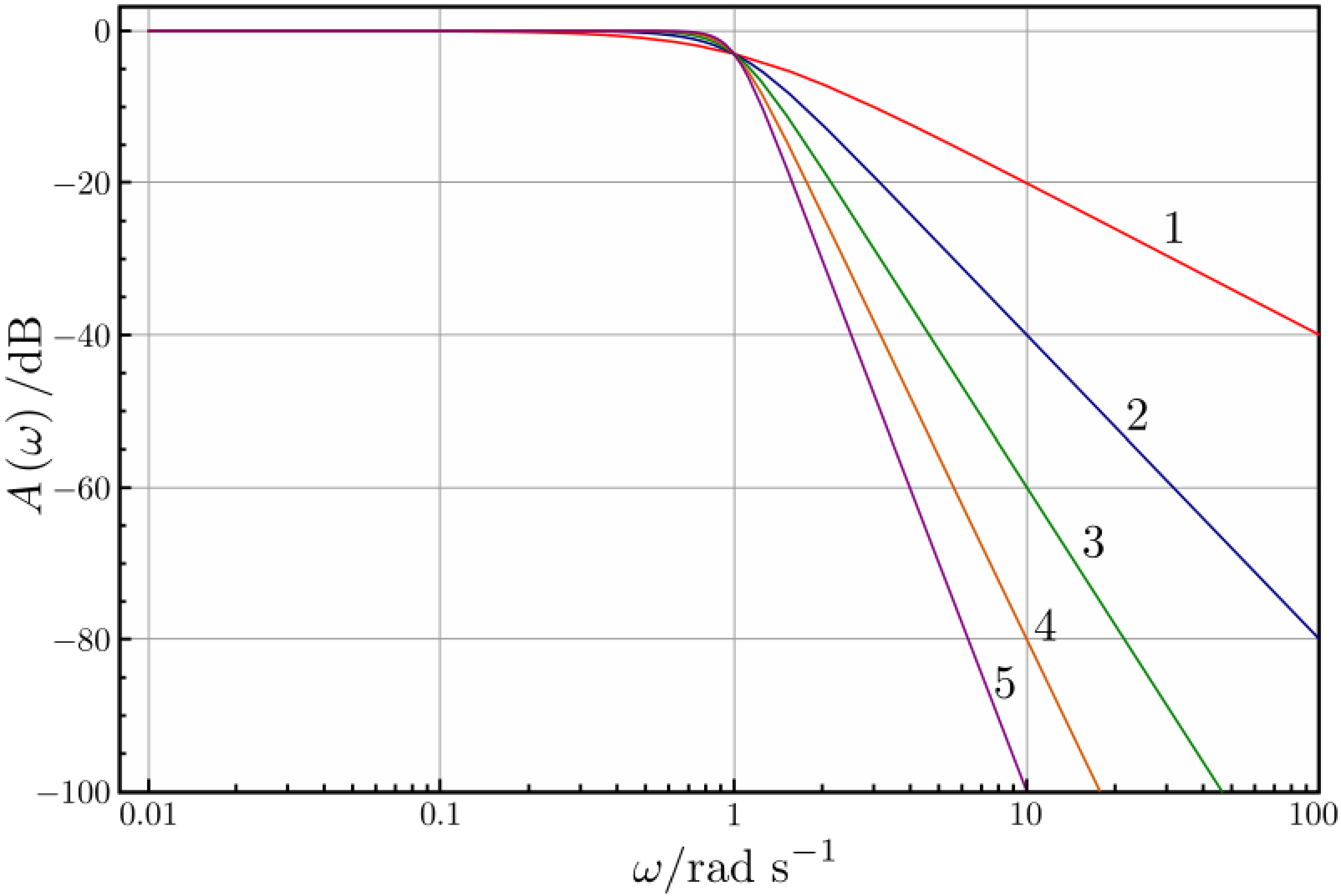
$$\omega_c = \omega_0 \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}$$

$$f_C = f_0 \sqrt{2^{\frac{1}{N}} - 1}$$

Frequência de corte equivalente a N filtros passa alta colocados em série com frequência de corte individual f_o

$$f_C = \frac{f_0}{\sqrt{2^{\frac{1}{N}} - 1}}$$

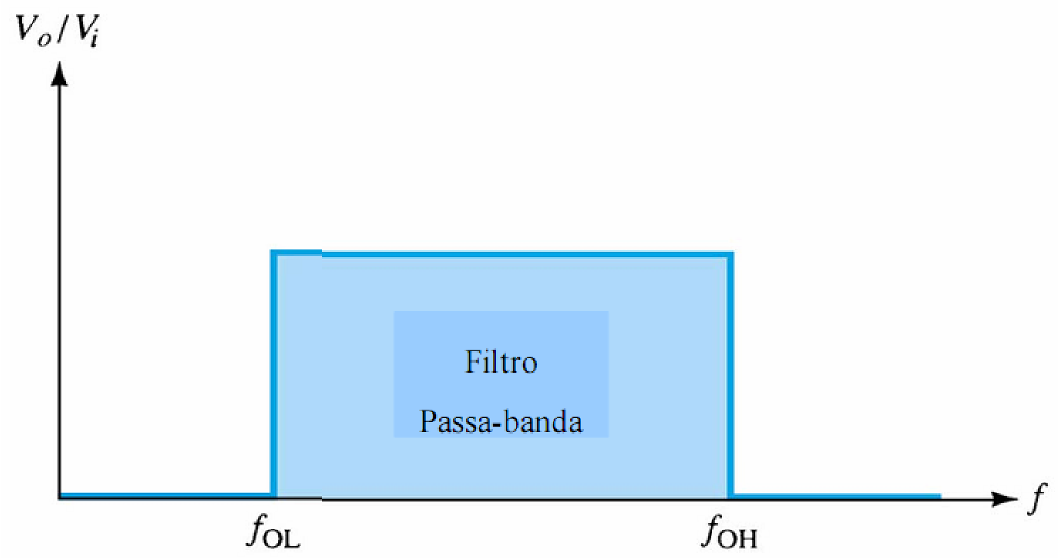
Ordem do Filtro



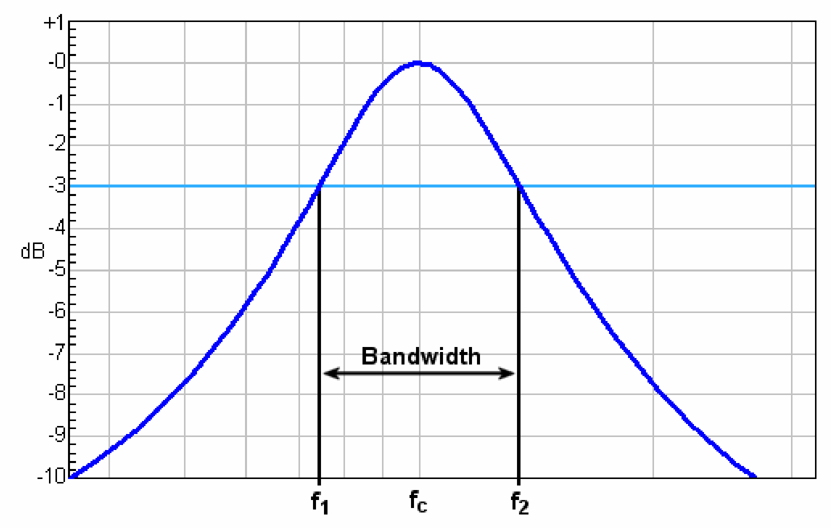

ELETRÔNICA
Filtros Eletrônicos
Resposta em Frequência
AOC

Filtro Passa-Faixa
Ideal x Real

IDEAL

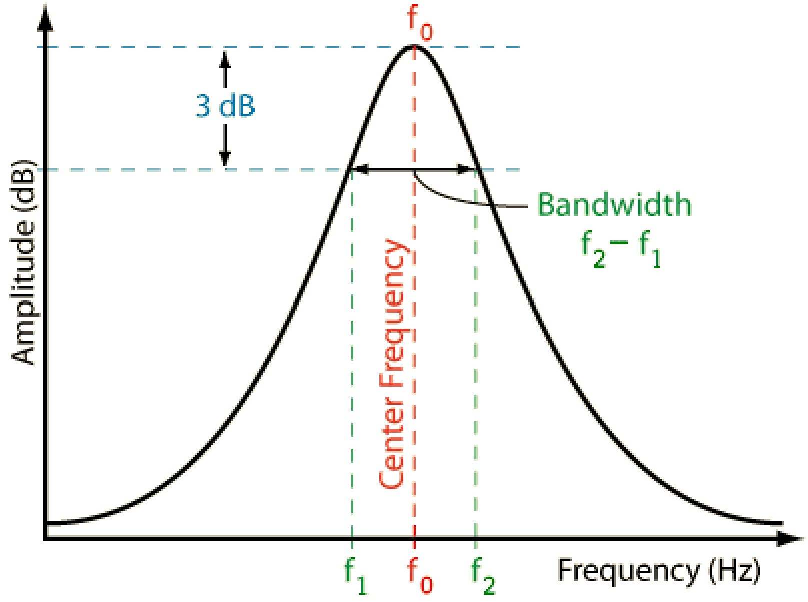


REAL

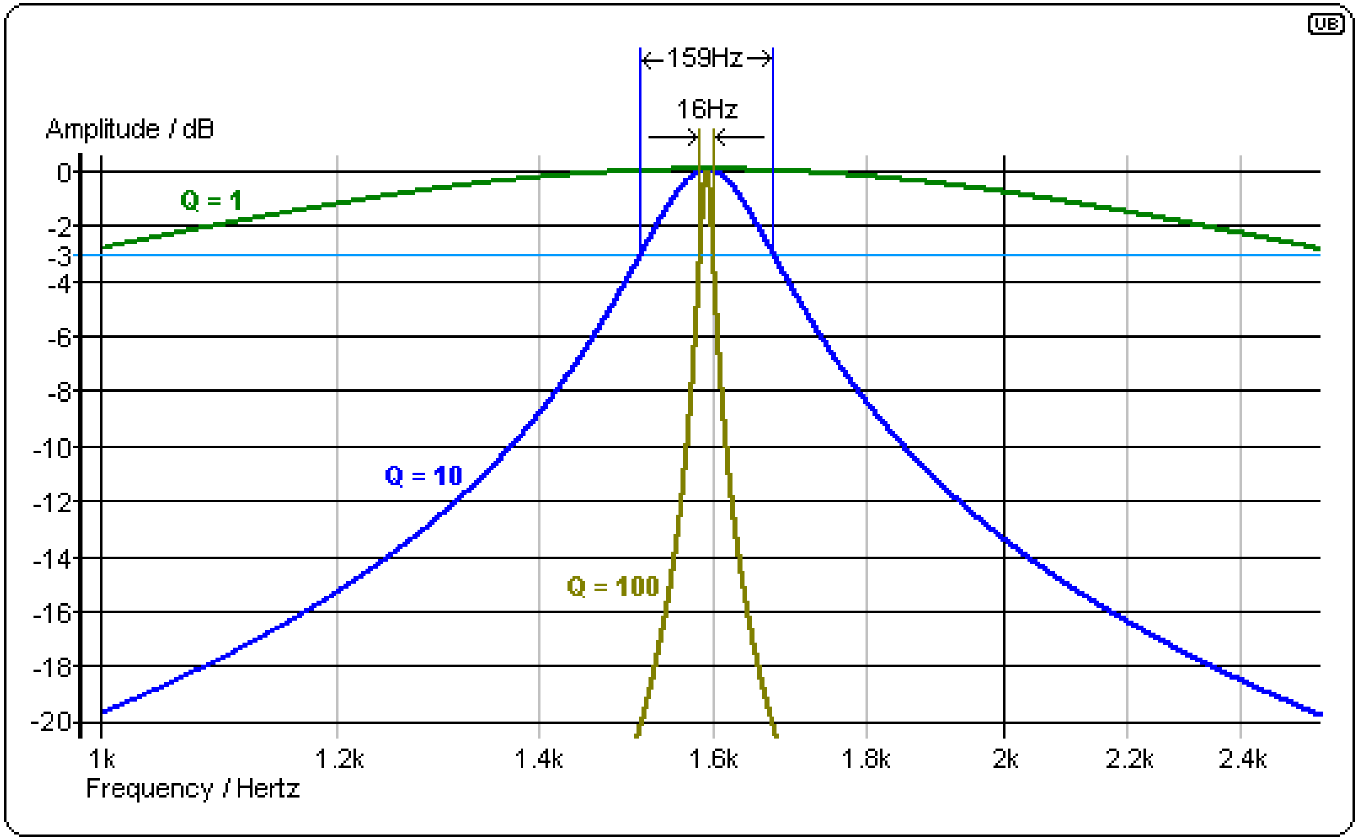


Seletividade

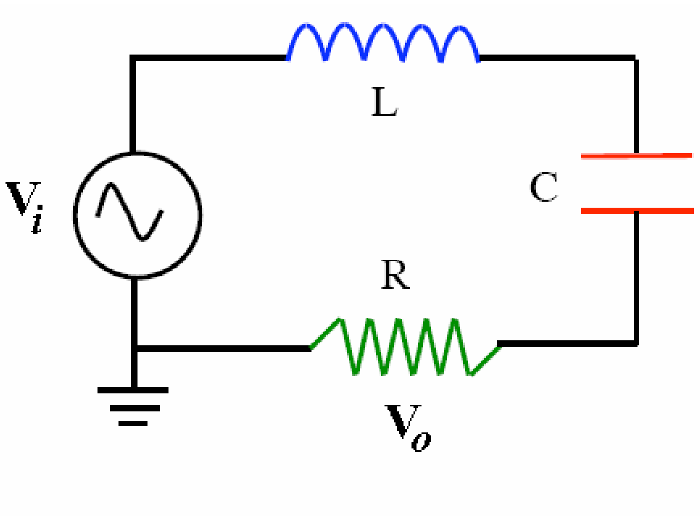
- ***Seletividade* é a propriedade que o circuito possui em distinguir, num dado espectro de frequências, uma determinada frequência em relação às demais.**

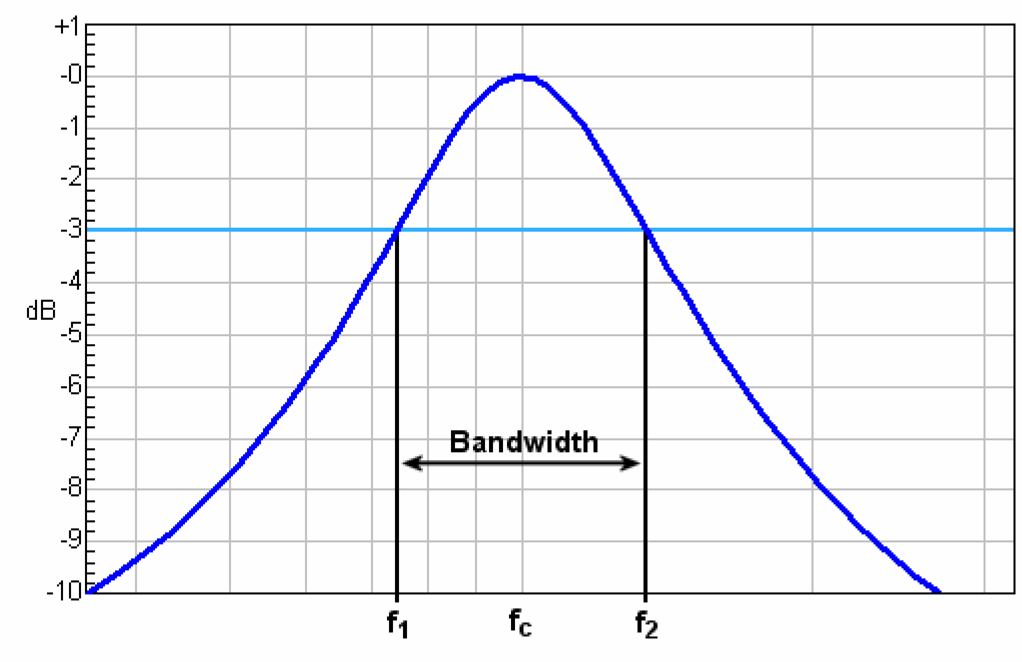


Fator de Qualidade → Q

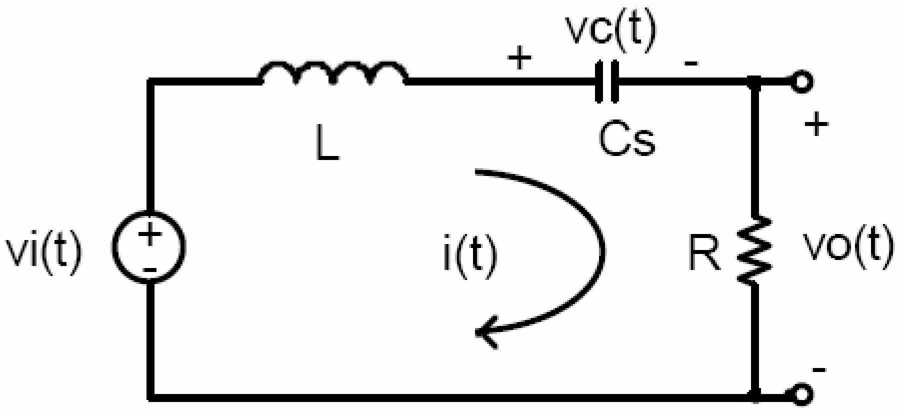


- *Um **filtro passa-faixa** é um dispositivo que permite a passagem das frequências de uma certa faixa e rejeita (atenua) as frequências fora dessa faixa.*
- *Um exemplo de um **filtro passa-faixa** analógico é o circuito RLC*.





Filtro LC série



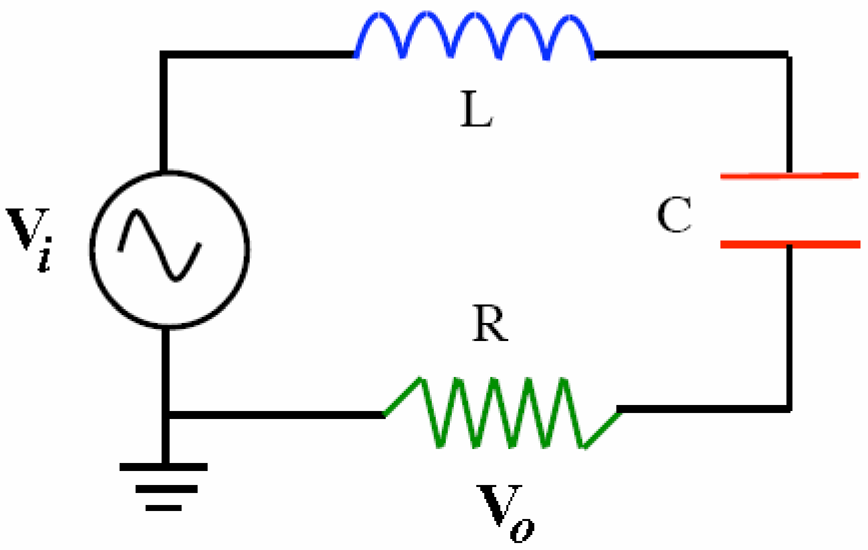
$$G(s)=\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\frac{s}{\frac{L}{R}.s^2+s+\frac{1}{R.C_s}}$$

$$H(s)=\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\frac{s\frac{R}{L}}{s^2+s\frac{R}{L}+\frac{1}{LC}}$$

$$\frac{\mathbf{V}_{OUT}}{\mathbf{V}_{IN}}=\frac{\mathbf{Z}_R}{\mathbf{Z}_L+\mathbf{Z}_R+\mathbf{Z}_C}$$

$$\frac{\mathbf{V}_{OUT}}{\mathbf{V}_{IN}}=\frac{R}{j\omega L+R+1/j\omega C}$$

$$\frac{\mathbf{V}_{OUT}}{\mathbf{V}_{IN}}=\frac{R}{R+j(\omega L-1/\omega C)}$$



$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s\frac{R}{L}}{s^2 + s\frac{R}{L} + \frac{1}{LC}}$$

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} \longrightarrow \frac{\omega_0}{Q} = \frac{R}{L}$$

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s\frac{\omega_0}{Q}}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \longrightarrow \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

Parâmetros do filtro passa faixa

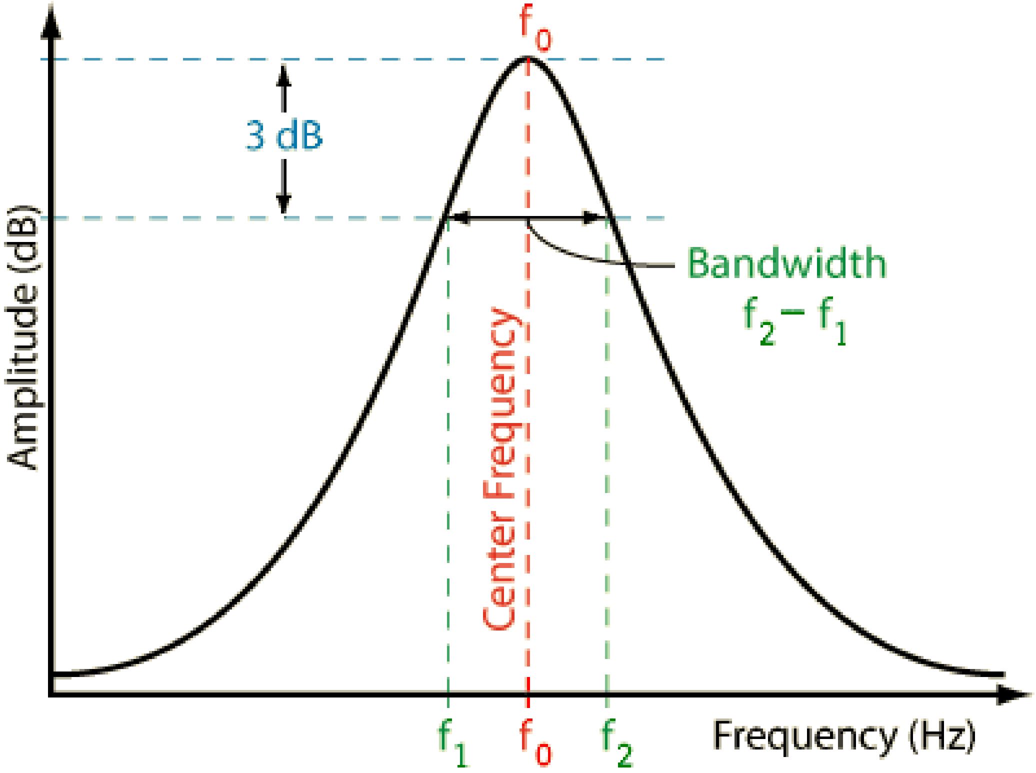
$$\Delta f = f_2 - f_1$$

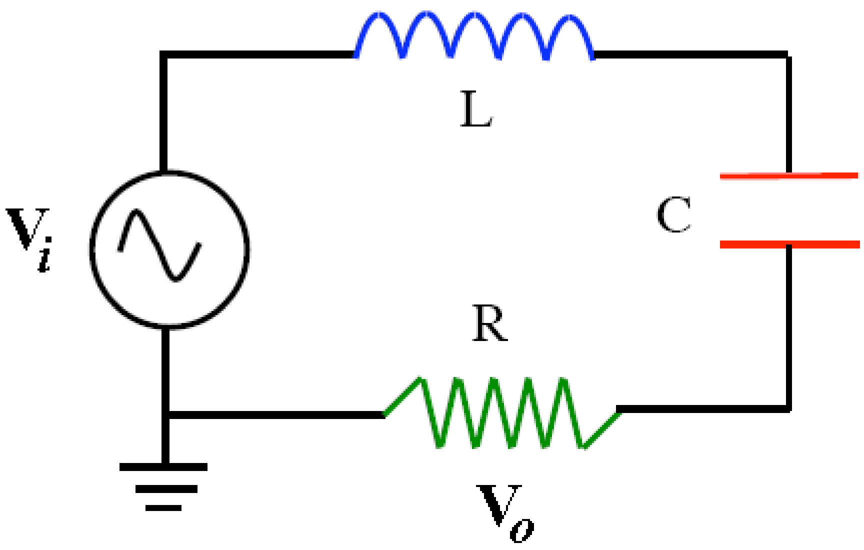
$$f_0 = \sqrt{f_1 . f_2} \quad \text{(média geométrica)}$$

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

$$f_2 = \frac{f_0}{2Q}\left(1 + \sqrt{1 + 4Q^2}\right)$$

$$f_1 = \frac{f_0}{2Q}\left(\sqrt{1 + 4Q^2} - 1\right)$$





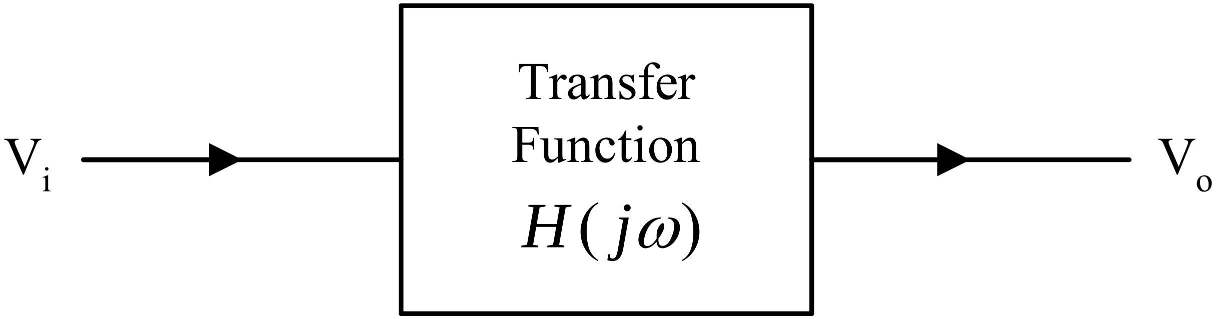
$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s\frac{R}{L}}{s^2 + s\frac{R}{L} + \frac{1}{LC}}$$

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s\frac{\omega_0}{Q}}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} \longrightarrow \frac{\omega_0}{Q} = \frac{R}{L}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \longrightarrow \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

Função de Transferência H(jω)



$$H(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)}$$

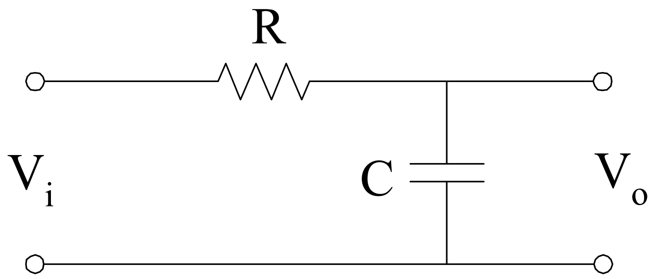
$$H = \mathrm{Re}(H) + j\,\mathrm{Im}(H)$$

$$|H| = \sqrt{\mathrm{Re}(H)^2 + \mathrm{Im}(H)^2}$$

$$\angle H = \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{Im}(H)}{\mathrm{Re}(H)}\right) \qquad \mathrm{Re}(H) \succ 0$$

$$\angle H = 180^o + \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{Im}(H)}{\mathrm{Re}(H)}\right) \qquad \mathrm{Re}(H) \prec 0$$

Filtro Passa Baixa
Primeira ordem



$$V_o = \frac{X_C}{X_C + R} V_i$$

$$V_o = \frac{\dfrac{1}{j\omega C}}{\dfrac{1}{j\omega C} + R} V_i = \frac{1}{1 + j\omega CR} V_i$$

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\dfrac{\omega}{\omega_0}} \qquad \text{where} \qquad \omega_o = \frac{1}{RC}$$

$$H(s) = \frac{\omega_0}{s + \omega_0}$$

$$s = j\omega$$

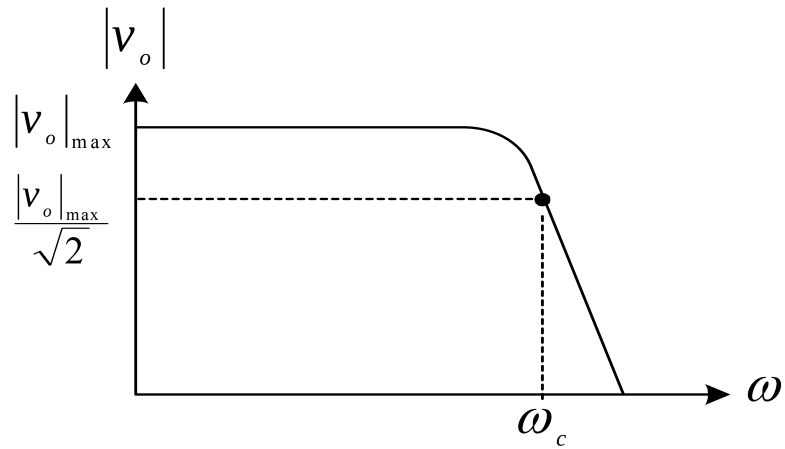
$$\phi(\omega) = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$$

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega CR}$$

$\omega \to 0 \Rightarrow |V_o| = |V_i| \leftarrow$ max. value

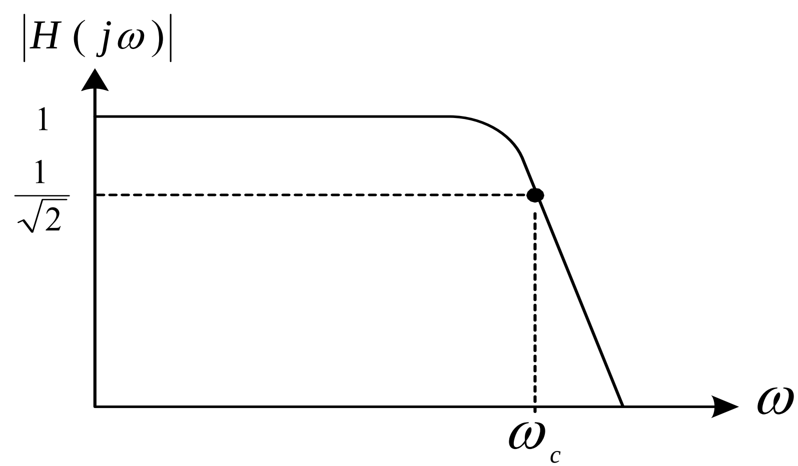
$\omega \to \infty \Rightarrow |V_o| = 0 \leftarrow$ min. value

$$V_o = \frac{1}{1 + j\omega CR} V_i$$



$$\omega = \frac{1}{RC}$$

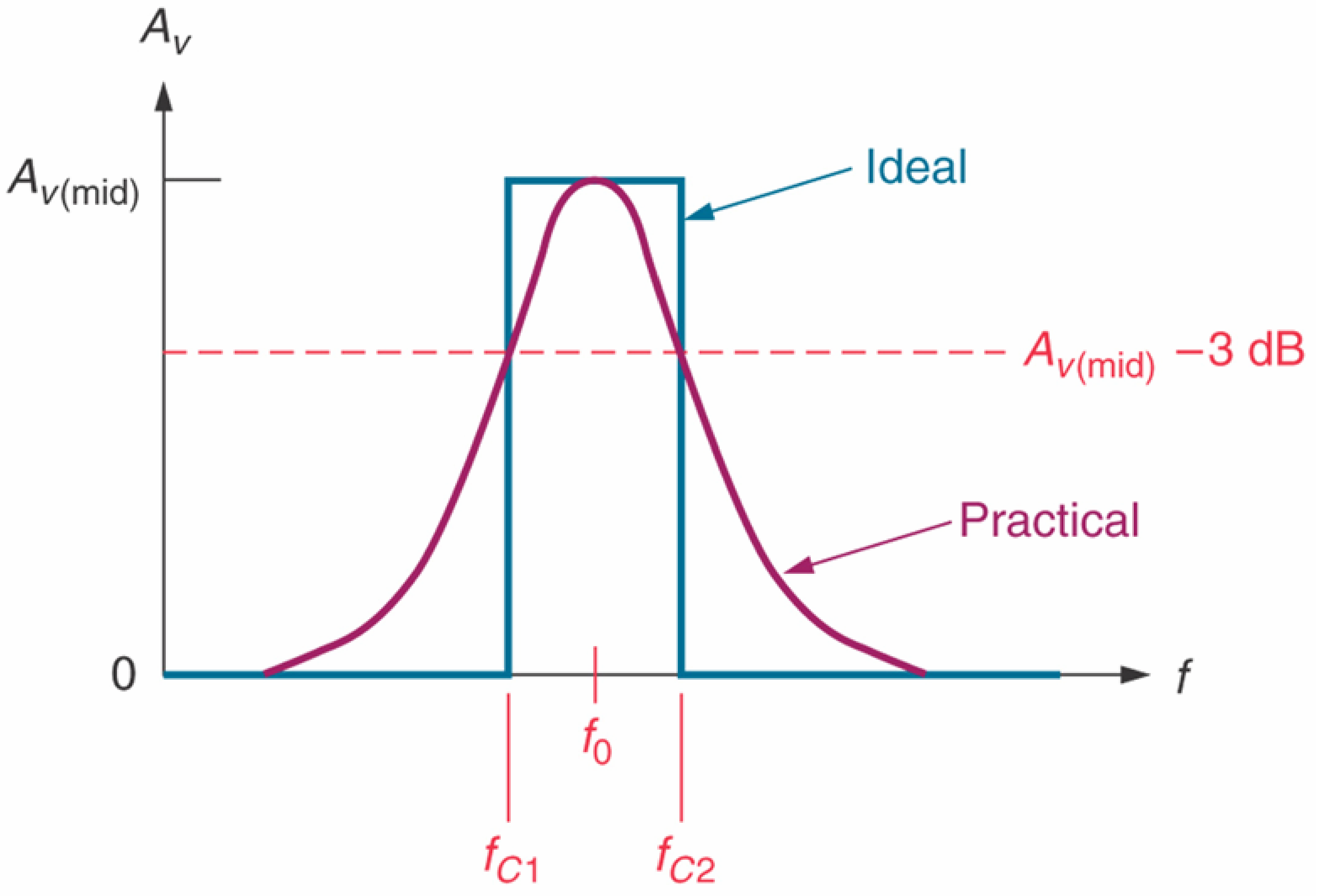
$$V_o = \frac{1}{1 + j} V_i$$

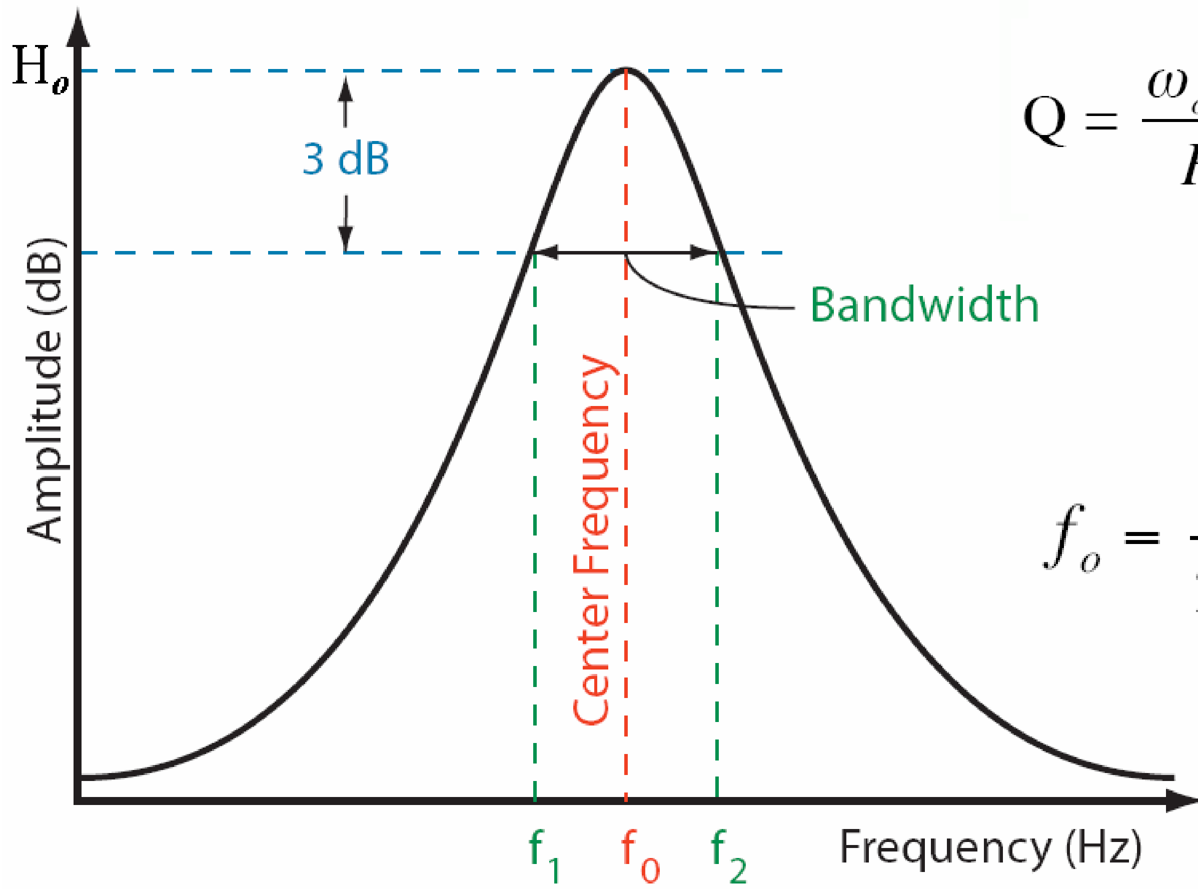


$$|V_o| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1^2}} |V_i| = \frac{1}{\sqrt{2}} |V_i|$$

$$\omega_c = \omega_o = \frac{1}{RC} \quad \text{(frequencia de corte)}$$

Resposta em frequência do filtro passa faixa

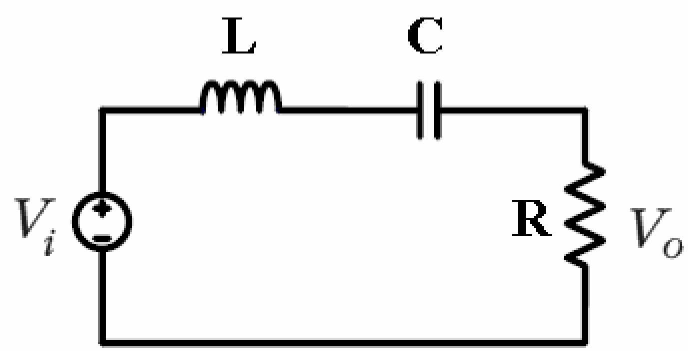




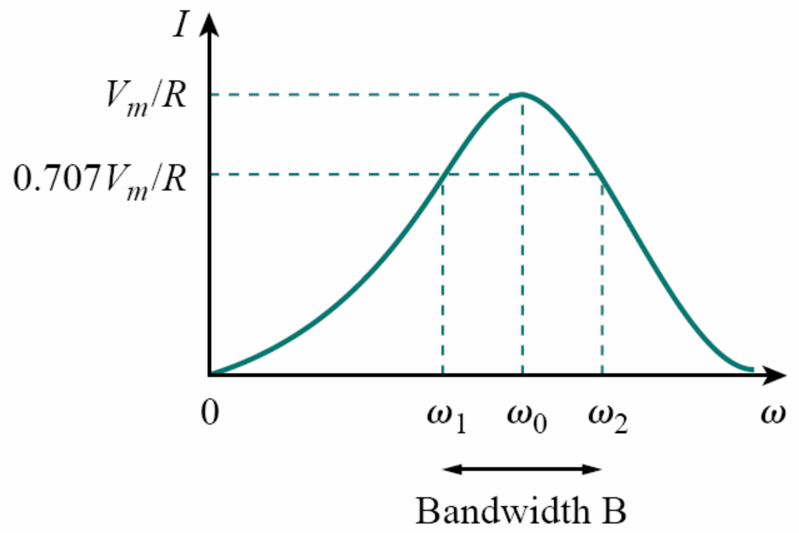
$$Q = \frac{\omega_o L}{R}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = H_o \frac{\left(\frac{R}{L}\right)s}{s^2 + \left(\frac{R}{L}\right)s + \frac{1}{LC}}$$



$$\frac{V_o}{V_i} = H_o \frac{\left(\frac{\omega_o}{Q}\right)s}{s^2 + \left(\frac{\omega_o}{Q}\right)s + \omega_o^2}$$



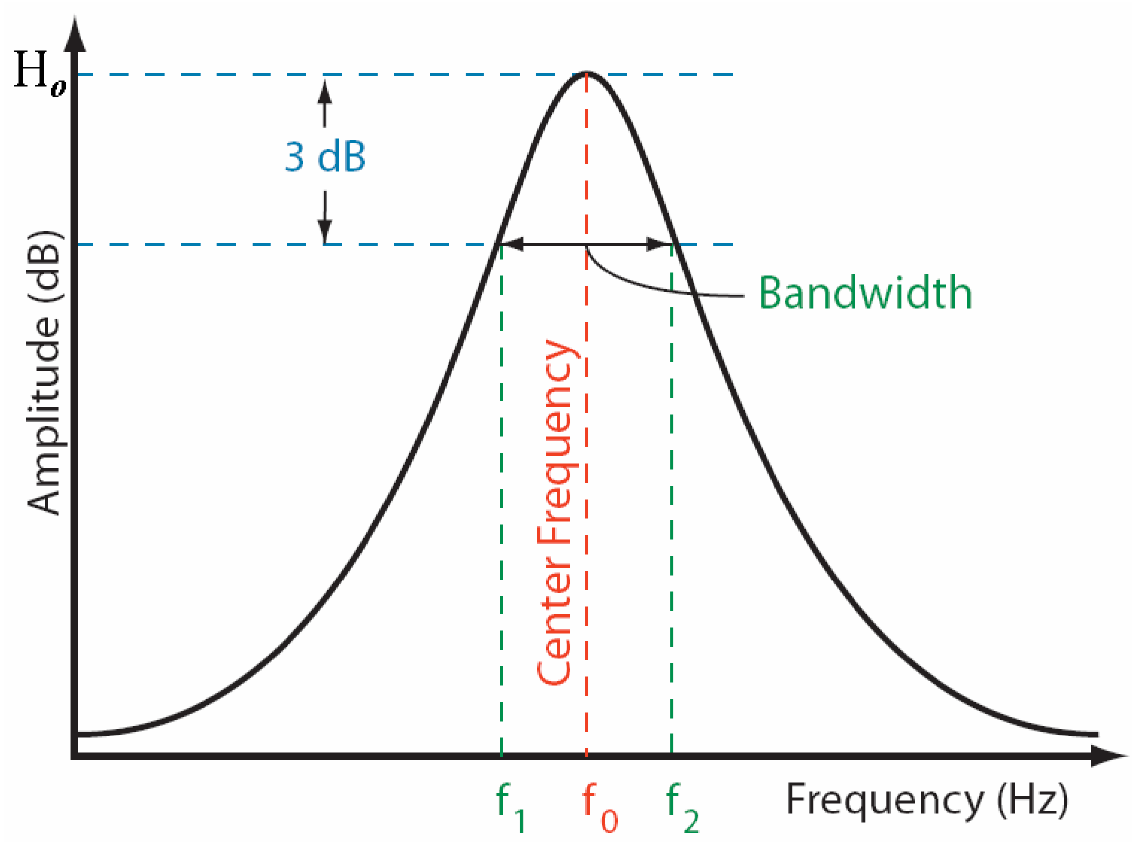
$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\omega_0}{B}$$

$$B = \omega_2 - \omega_1 = \frac{R}{L} = \frac{\omega_0}{Q}$$

$$\omega_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}$$

$$\omega_2 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$$



$$\frac{V_o}{V_i} = H_o \frac{\left(\frac{\omega_o}{Q}\right)s}{s^2 + \left(\frac{\omega_o}{Q}\right)s + \omega_o^2}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = H_o \frac{\frac{1}{Q}\left(\frac{s}{\omega_o}\right)}{\left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2 + \frac{1}{Q}\left(\frac{s}{\omega_o}\right) + 1}$$

$$\left|H(j\omega)\right| = \frac{\omega\frac{R}{L}}{\sqrt{\left(\frac{1}{LC}-\omega^2\right)^2+\left(\omega\frac{R}{L}\right)^2}}$$

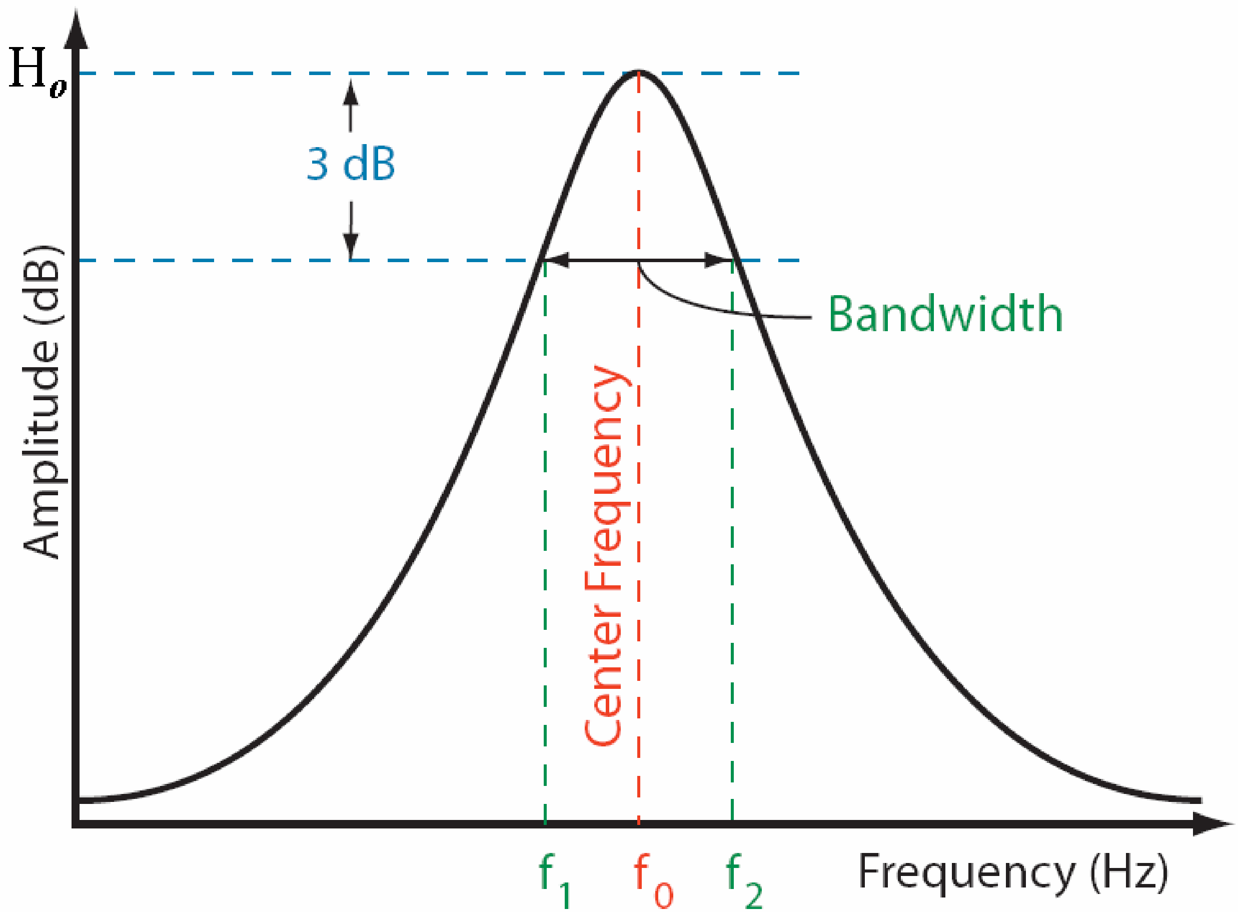
$$\theta(j\omega) = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{\omega\frac{R}{L}}{\frac{1}{LC}-\omega^2}\right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\omega_C\frac{L}{R}-\frac{1}{\omega_C RC}\right)^2+1}}$$

$$\pm 1 = \omega_C\frac{L}{R}-\frac{1}{\omega_C RC}$$

$$\omega_{C1} = -\frac{R}{2L}+\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2+\left(\frac{1}{LC}\right)}$$

$$\omega_{C2} = \frac{R}{2L}+\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2+\left(\frac{1}{LC}\right)}$$



$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

$$f_1 = f_0\left(\sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} - \frac{1}{2Q}\right)$$

$$f_2 = f_0\left(\sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} + \frac{1}{2Q}\right)$$

N – número de oitavas

$$Q = \frac{\sqrt{2^N}}{2^N - 1}$$

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$$

N – número de oitavas

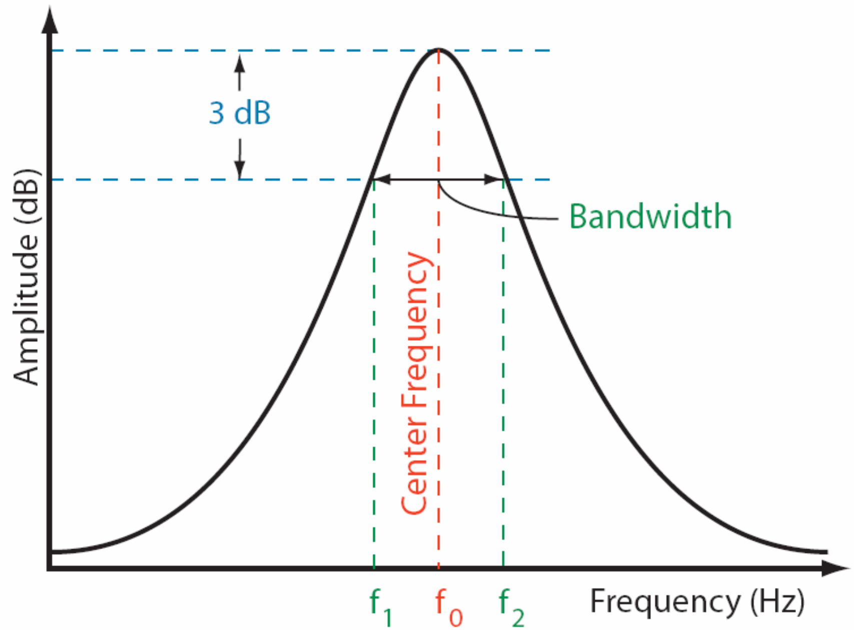
$$f_2 = y f_1,$$

$$y = 2^N,$$

$$f_2 = 2^N f_1$$

$$N = \frac{\log y}{\log 2}$$

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$



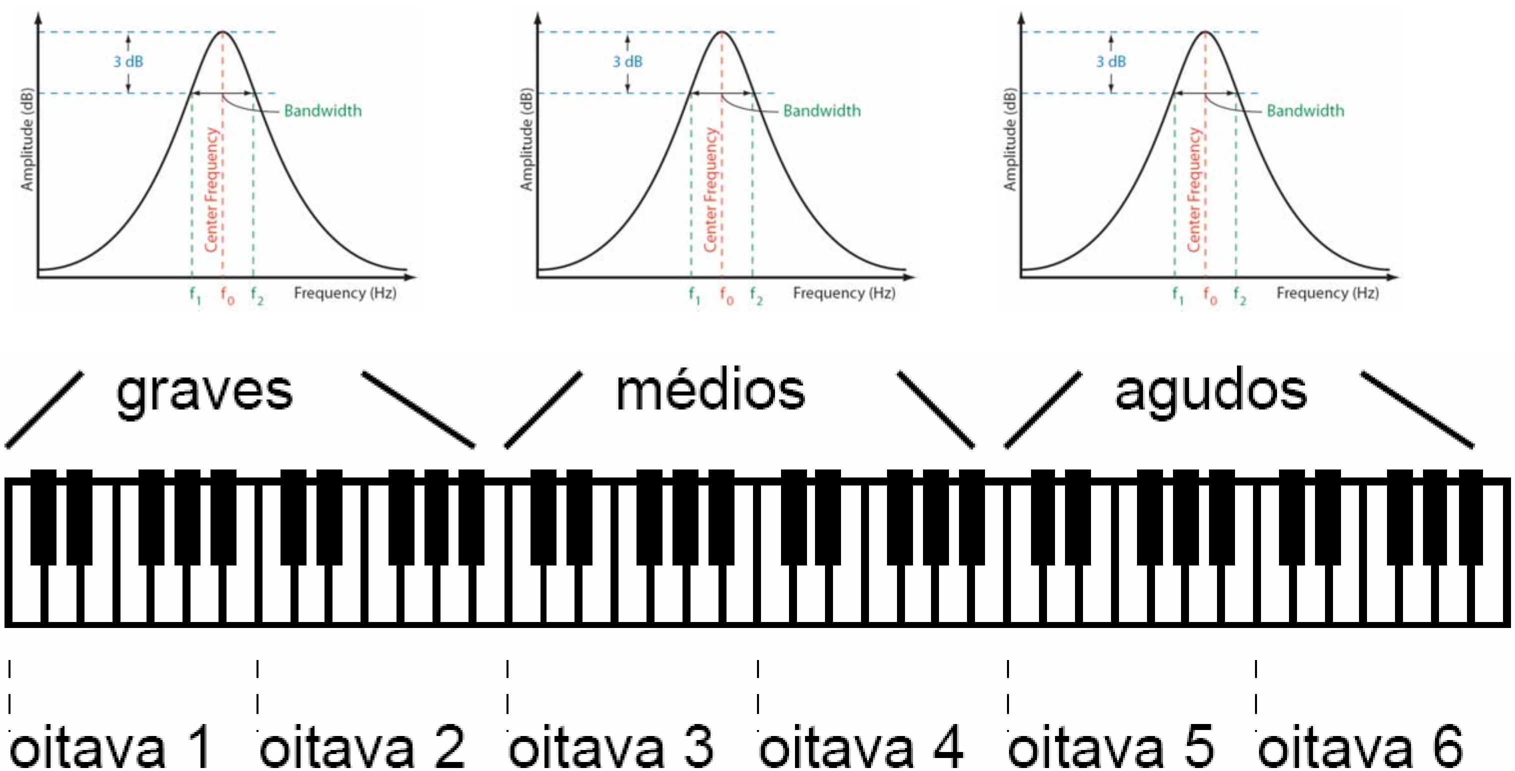
$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2}.$$

$$f_0 = \sqrt{f_1 (2^N f_1)}$$

$$f_0 = \sqrt{2^N} f_1.$$

$$Q = \frac{\sqrt{2^N} f_1}{2^N f_1 - f_1}$$

$$Q = \frac{\sqrt{2^N}}{2^N - 1}$$

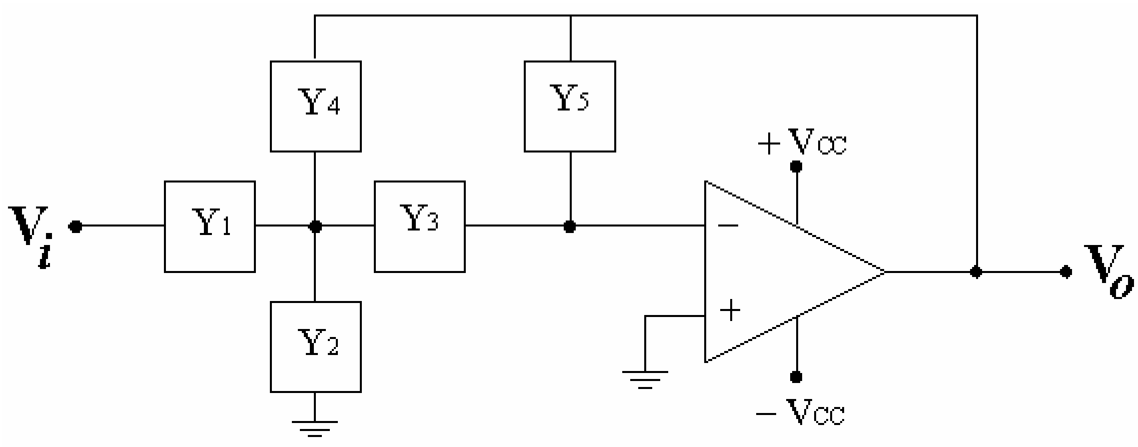

3 dB
Bandwidth
Amplitude (dB)
Center Frequency
f_1 f_0 f_2
Frequency (Hz)
3 dB
Bandwidth
Amplitude (dB)
Center Frequency
f_1 f_0 f_2
Frequency (Hz)
3 dB
Bandwidth
Amplitude (dB)
Center Frequency
f_1 f_0 f_2
Frequency (Hz)
graves
médios
agudos
oitava 1
oitava 2
oitava 3
oitava 4
oitava 5
oitava 6

BW (octaves)	Q
2.0	0.667
1.0	1.414
2/3	2.145
1/2	2.871
1/3	4.318
1/6	8.651
1/10	14.424
1/30	43.280

Filtro Ativo

Configuração Realimentação Múltipla

Multiple-Feedback Filter



$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{Y_1 Y_3}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4}$$

Filtro Passa Baixa

$$\frac{V_O(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{LP}\omega_n^{\,2}}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^{\,2}}$$

Filtro Passa Alta

$$\frac{V_{HP}(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{HP}s^2}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^{\,2}}$$

Filtro Passa Faixa

$$\frac{V_{BP}(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{BP}(\omega_n/Q)\,s}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^{\,2}}$$

Filtro Rejeita Faixa

$$\frac{V_{BR}(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{BR}(s^2 + \omega_n^{\,2})}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^{\,2}}$$

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{Y_1 Y_3}{Y_5(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4}$$

Filtro Passa Baixa

$$\frac{V_O(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{LP}\omega_n^2}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^2}$$

Filtro Passa Alta

$$\frac{V_{HP}(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{HP}s^2}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^2}$$

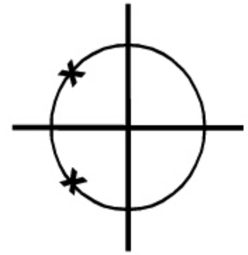
Filtro Passa Faixa

$$\frac{V_{BP}(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{BP}(\omega_n/Q)\,s}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^2}$$

Filtro Rejeita Faixa

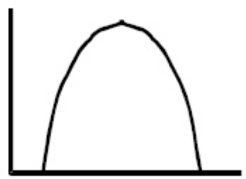
$$\frac{V_{BR}(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{BR}(s^2 + \omega_n^2)}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^2}$$

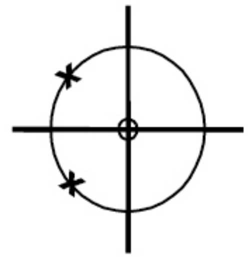
PASSA-BAIXA



$$\frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_o^2}$$

PASSA-FAIXA

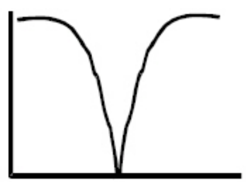


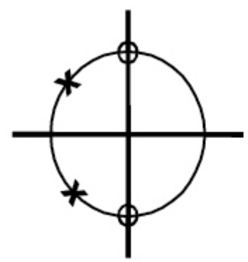


$$\frac{\frac{\omega_0}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_o^2}$$

REJEITA-FAIXA

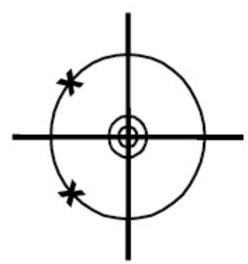
NOTCH





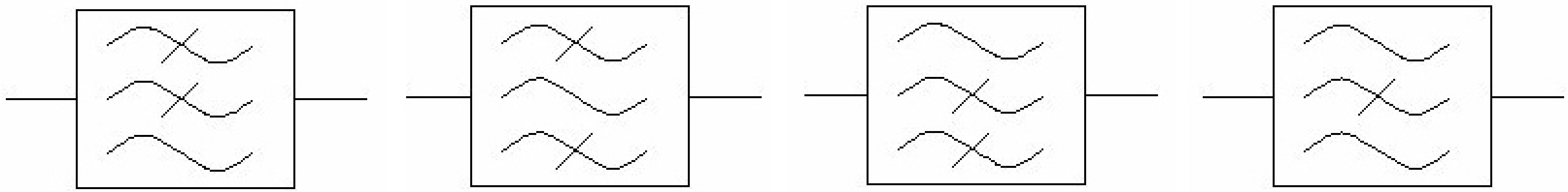
$$\frac{s^2 + \omega_z^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_o^2}$$

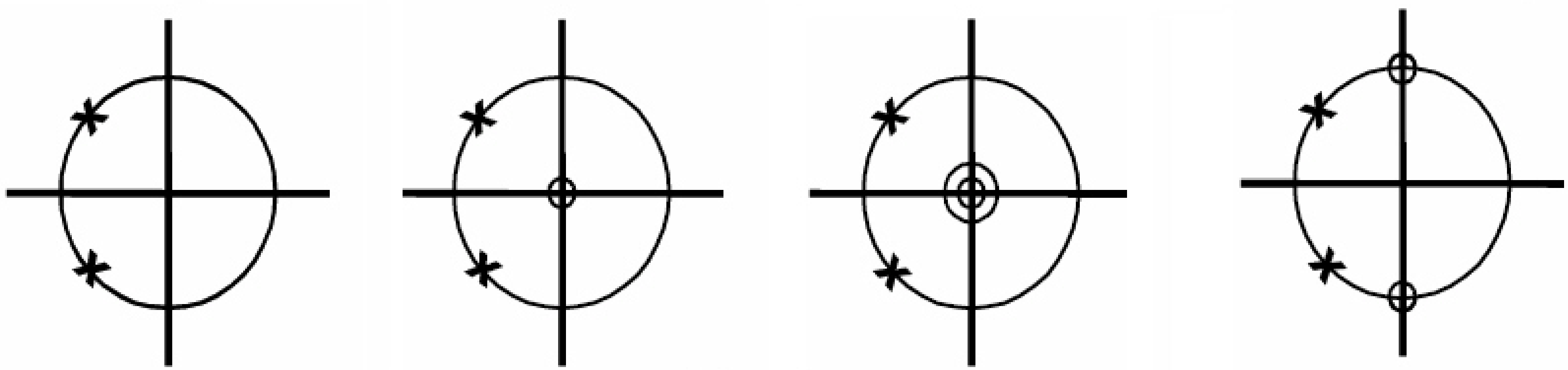
PASSA-ALTA



$$\frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_o^2}$$

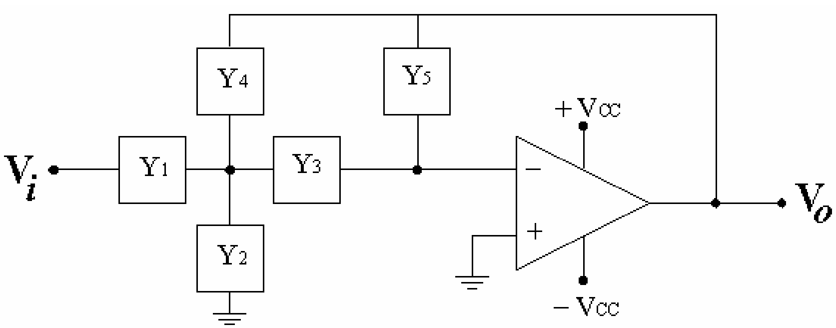
Filtros Elétricos - Configuração de pólos e zeros





$$\frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_o^2} \qquad \frac{\frac{\omega_0}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_o^2} \qquad \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_o^2} \qquad \frac{s^2 + \omega_z^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_o^2}$$

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{Y_1 Y_3}{Y_5(Y_1+Y_2+Y_3+Y_4)+Y_3 Y_4}$$



Filtro Passa Baixa

$$\frac{V_O(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{LP}\omega_n^2}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^2}$$

Filtro Passa Alta

$$\frac{V_{HP}(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{HP}s^2}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^2}$$

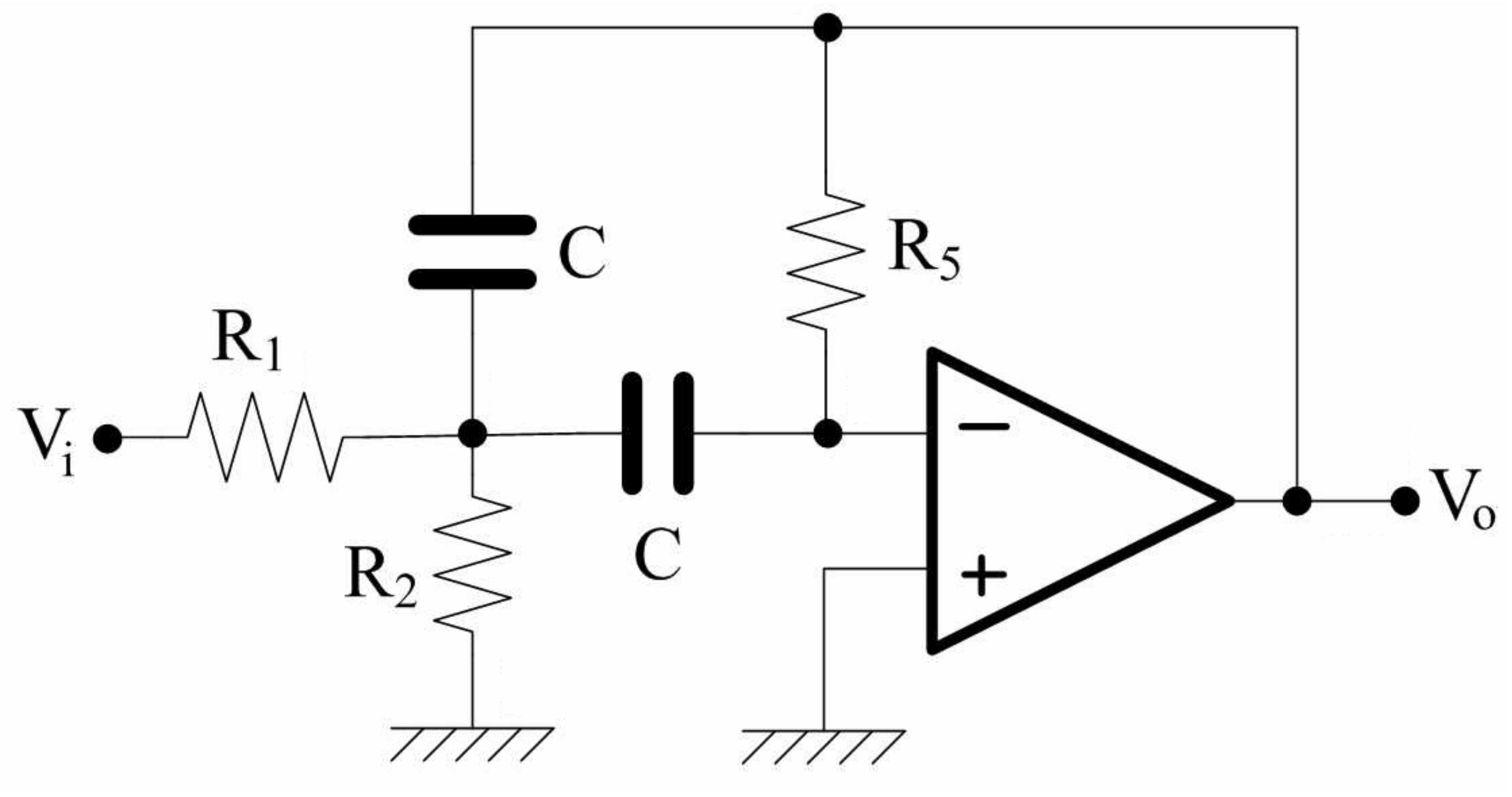
Filtro Passa Faixa

$$\frac{V_{BP}(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{BP}(\omega_n/Q)\,s}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^2}$$

Filtro Rejeita Faixa

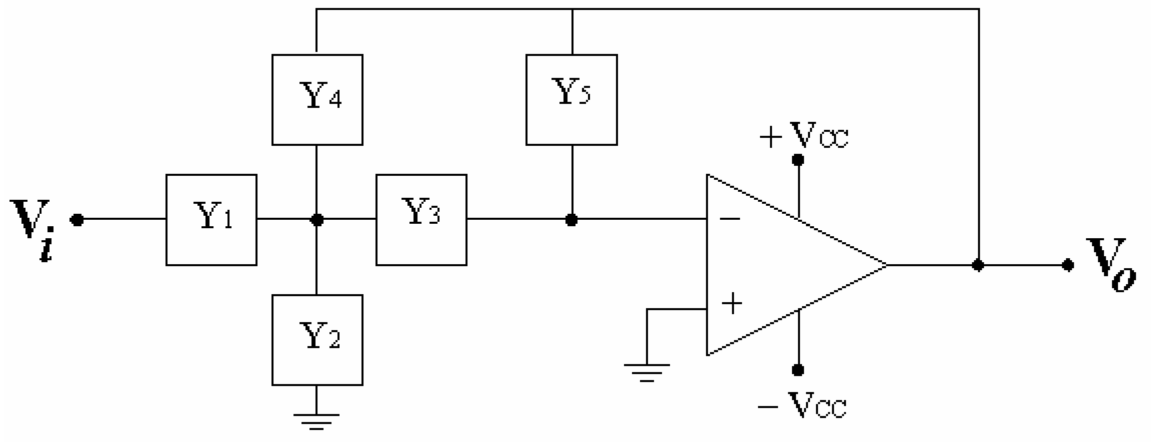
$$\frac{V_{BR}(s)}{V_I(s)} = \frac{A_{BR}(s^2 + \omega_n^2)}{s^2 + s\,\omega_n/Q + \omega_n^2}$$

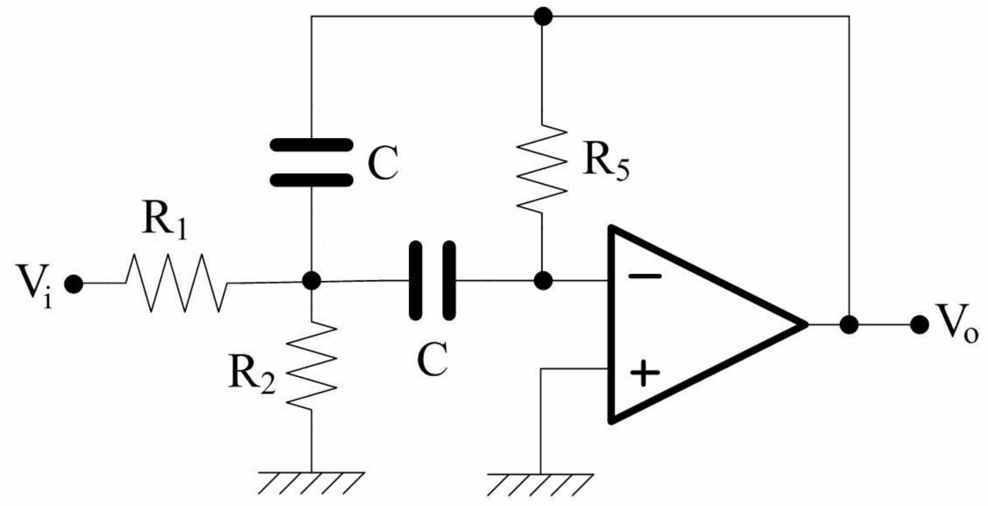
Filtro Passa Faixa



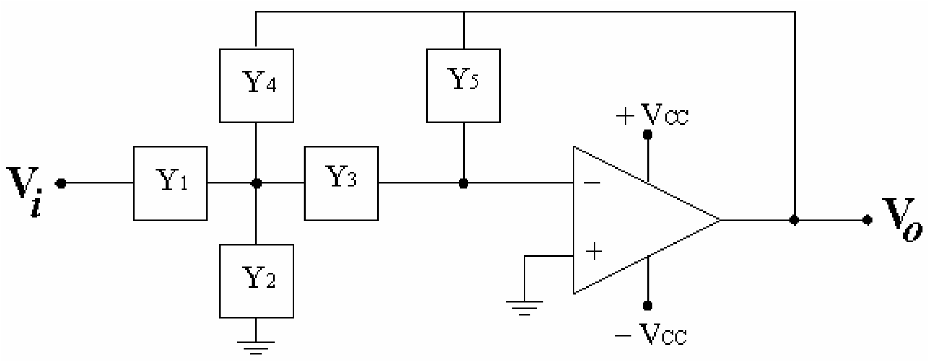
Filtro Passa Faixa

Multiple-Feedback Band-Pass Filter

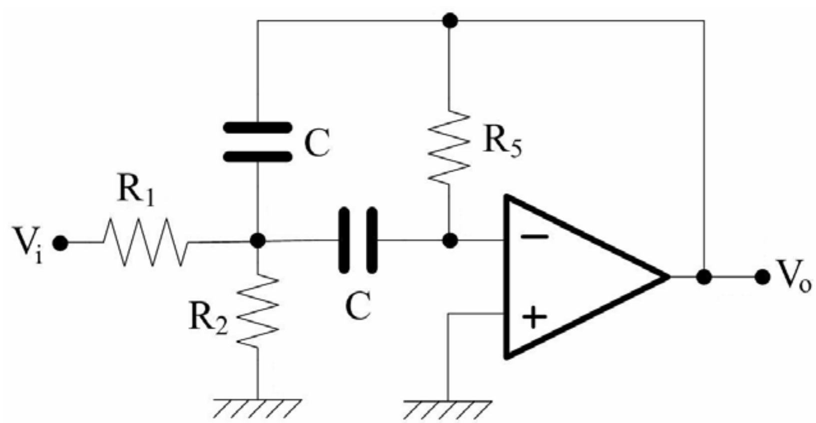




Filtro Passa Faixa

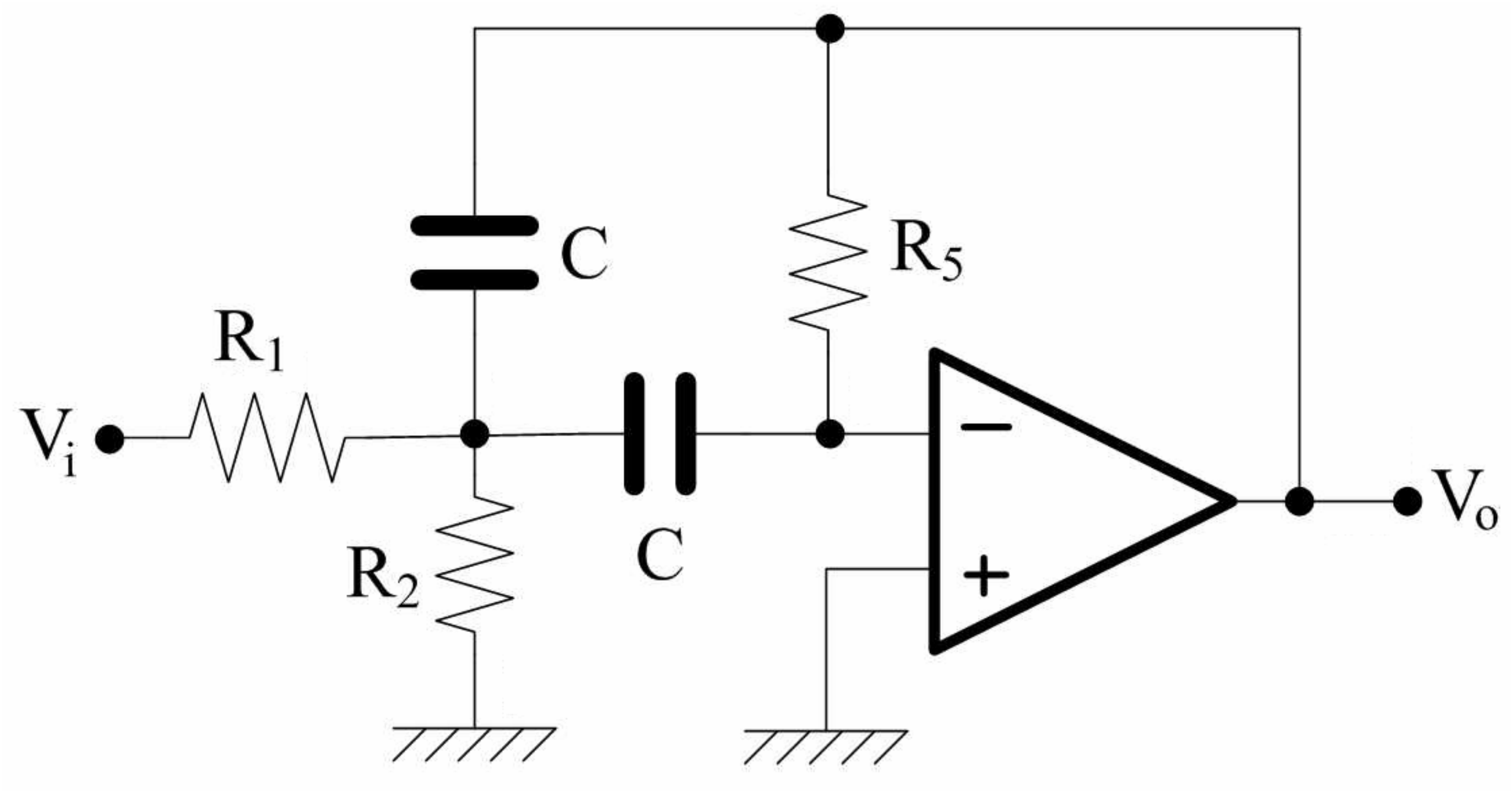


$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{Y_1 Y_3}{Y_5(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4}$$



$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{R_1 C} s}{s^2 + \frac{2}{R_5 C} s + \frac{(R_1+R_2)}{R_1 R_2 R_5 C^2}}$$

Filtro Passa Faixa



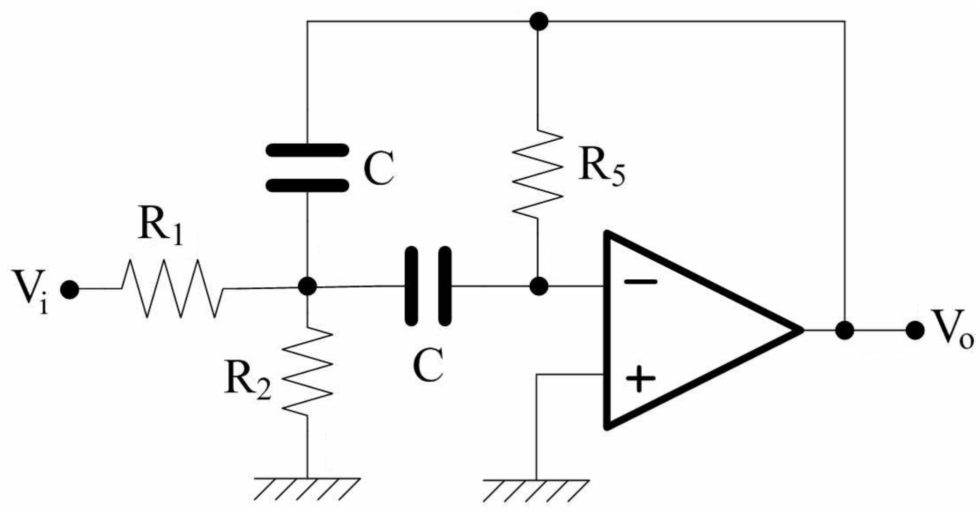
$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{\frac{1}{R_1 C}s}{s^2 + \frac{2}{R_5 C}s + \frac{(R_1+R_2)}{R_1 R_2 R_5 C^2}}$$

Filtro Passa Faixa

$$\frac{V_o}{V_i} = \text{H}_\text{o} \frac{\frac{\omega_0}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = - \frac{\frac{1}{R_1C}s}{s^2 + \frac{2}{R_5C}s + \frac{(R_1+R_2)}{R_1R_2R_5C^2}}$$

Filtro Passa Faixa



$$\omega_0^2 = \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 R_5 C^2}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{2}{R_5 C}$$

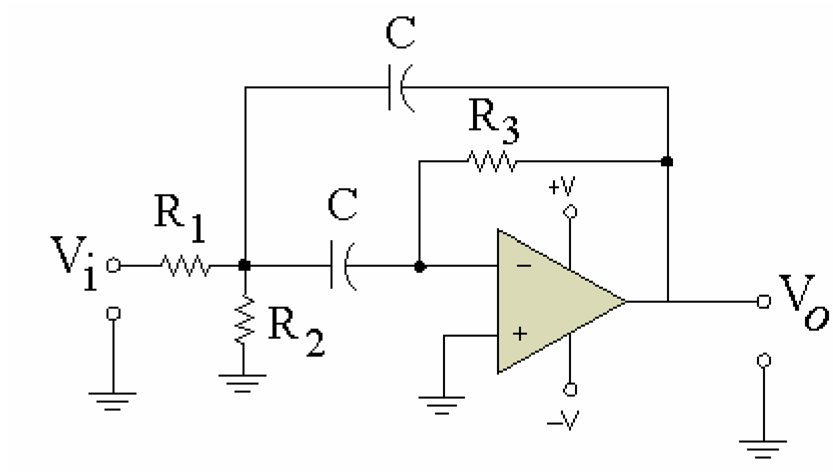
$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{\frac{1}{R_1 C} s}{s^2 + \frac{2}{R_5 C} s + \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 R_5 C^2}}$$

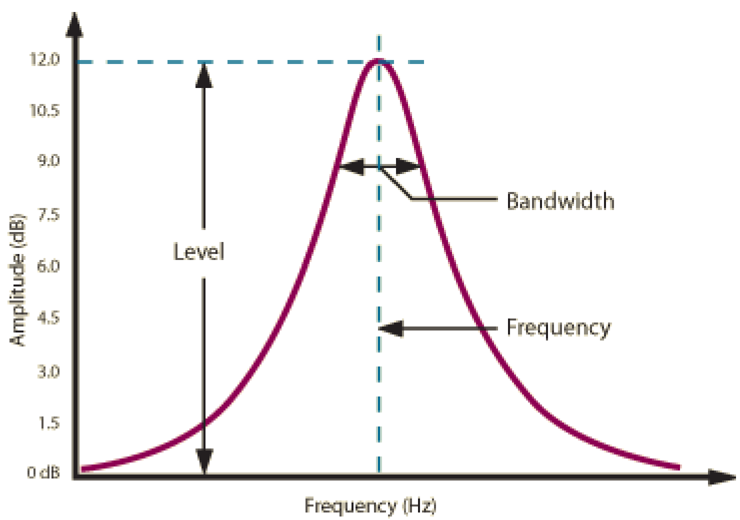
$$Q = \frac{\omega_0 R_5 C}{2}$$

$$H_o = -\frac{R_5}{2R_1}$$

$$Q = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_5(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}}$$

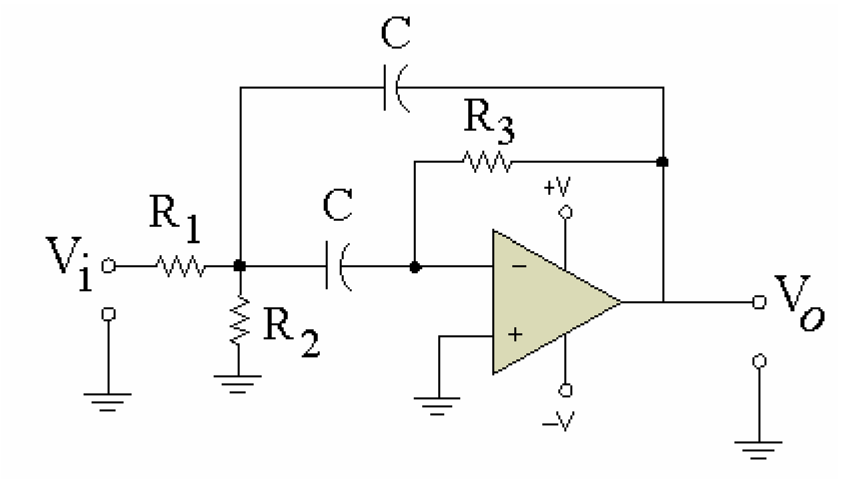
Filtro Passa Faixa

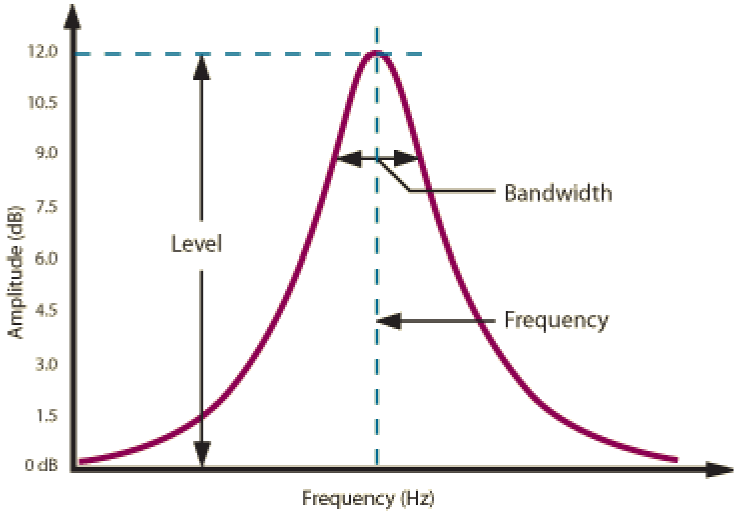




$$f_o = \frac{1}{2\pi C}\left[\frac{1}{R_3}\,\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}\right]^{1/2}$$

Filtro Passa Faixa





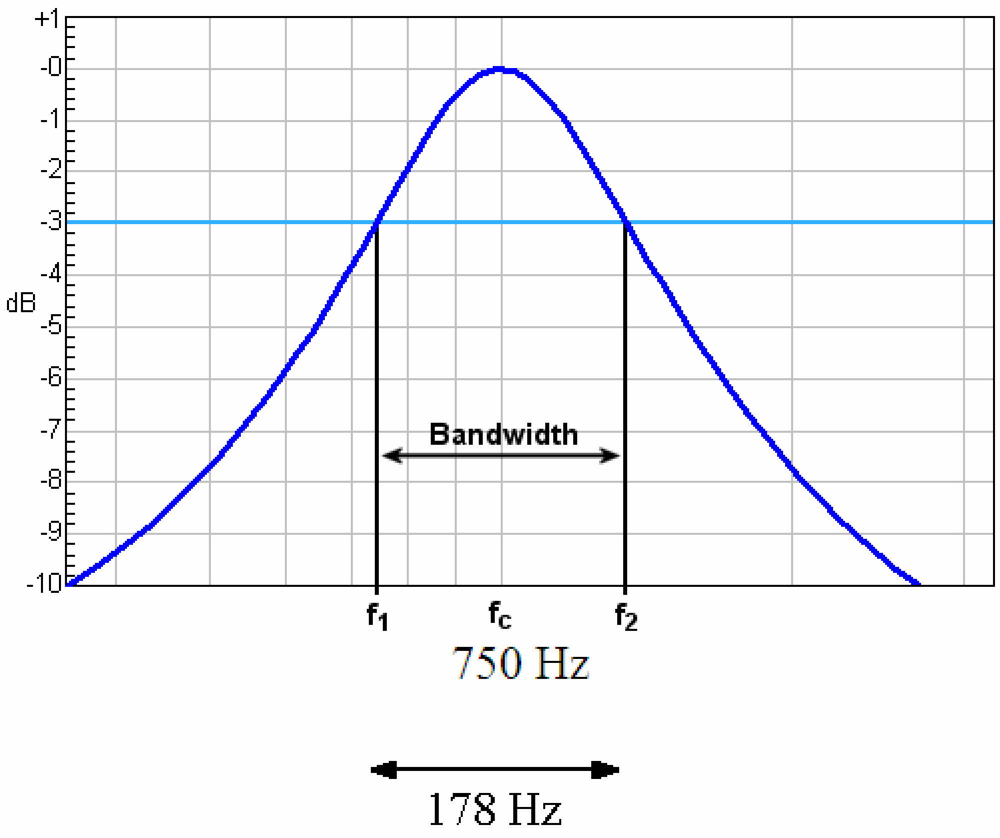
Fator de Qualidade → $Q = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_3}{R}} = \pi\, f_0 R_3 C$ $\quad R = R_1 \,//\, R_2$

Frequência central → $f_0 = \frac{1}{2\pi C\sqrt{RR_3}}$

Faixa de Passagem → $\Delta\omega = \frac{2}{R_3 C} = \frac{\omega_0}{Q}$

Projeto

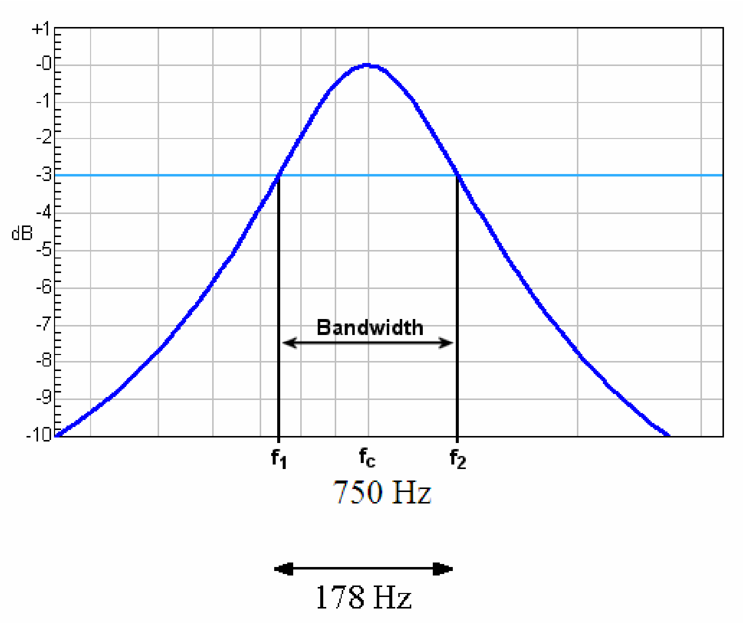
Projete um filtro passa faixa para 750 Hz, ganho de 1,32 na frequência central e faixa de passagem de 178 Hz.



Filtro Passa Faixa
Solução

Determinação do fator de qualidade Q

$$Q = \frac{f_o}{\Delta f} = \frac{750\ Hz}{178\ Hz} = 4{,}2$$

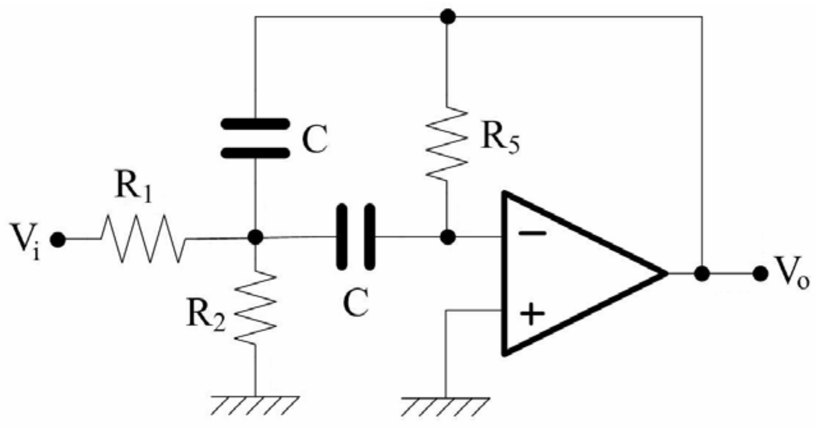


Filtro Passa Faixa
Especificações

Parâmetros para o projeto do filtro passa-faixa

- Frequência central de 750 Hz
- Ganho de 1,32 na frequência central
- Faixa de passagem Δf =178 Hz.
- Fator de qualidade Q = 4,2.

Circuito do Filtro Passa-Faixa
Esquemático



$$R_1 = \frac{Q}{2\pi f_o G_o C}$$

$$R_2 = \frac{Q}{2\pi f_o C(2Q^2 - G_o)}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{\frac{1}{R_1 C} s}{s^2 + \frac{2}{R_5 C} s + \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 R_5 C^2}}$$

$$R_5 = 2R_1 G_0$$

Escolhendo   C = 10 nF

$$R_1 = \frac{Q}{2\pi f_o G_o C} = \frac{(4.2)}{(2\pi)(750\ Hz)(1.32)(.01uF)}$$

R_1 = 67.6 kOhm (use 68 kOhm)

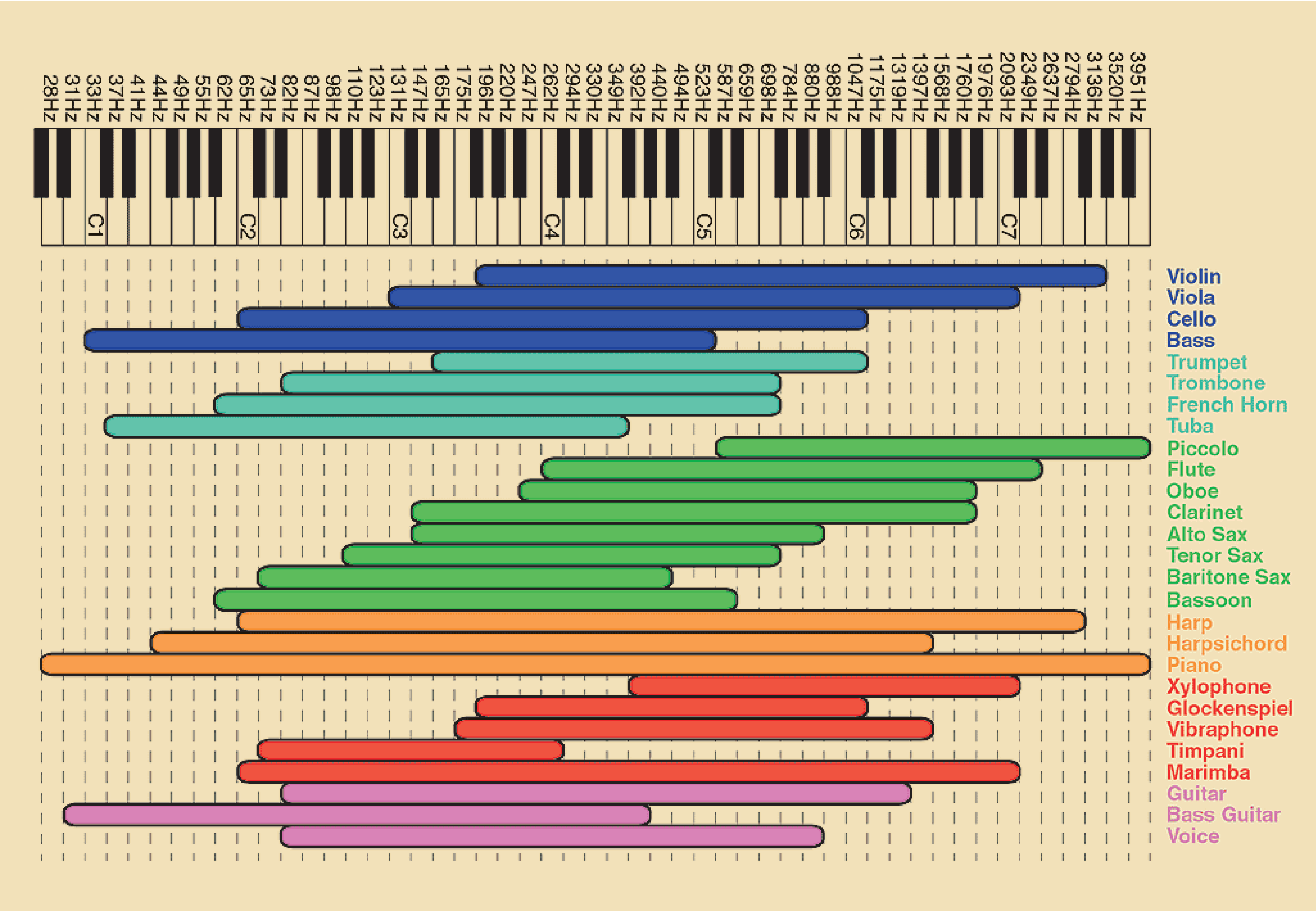
$R_5 = 2R_1G_0 = (2)(67.6\ kOhm)(1.32)$

R_5 = 178 kOhm (use 180 kOhm)

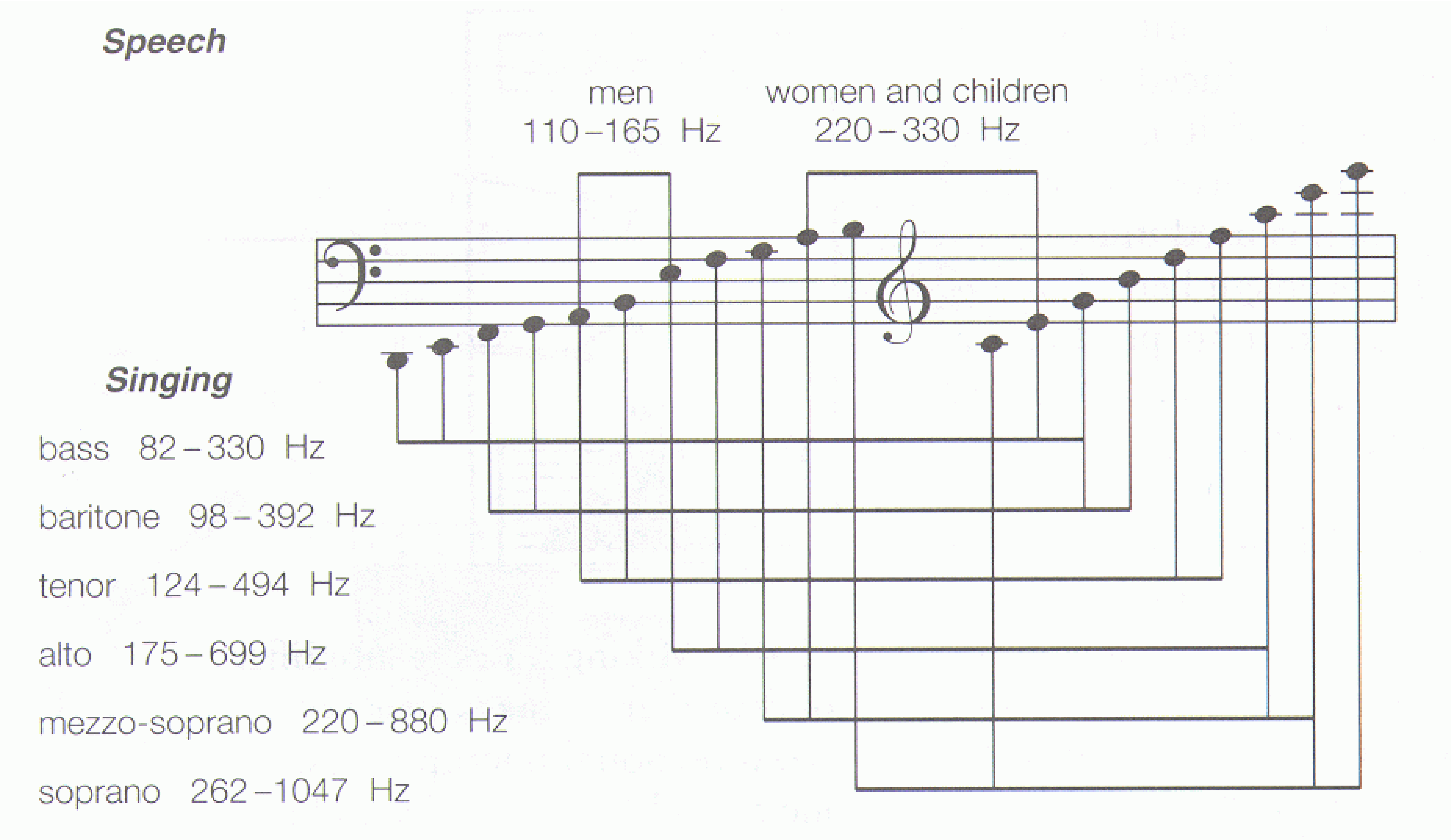
$$R_2 = \frac{Q}{2\pi f_o C(2Q^2 - G_o)}$$

$$R_2 = \frac{4.2}{[2\pi(750Hz)(.01uF)(2(4.2)^2 - 1.32)]}$$

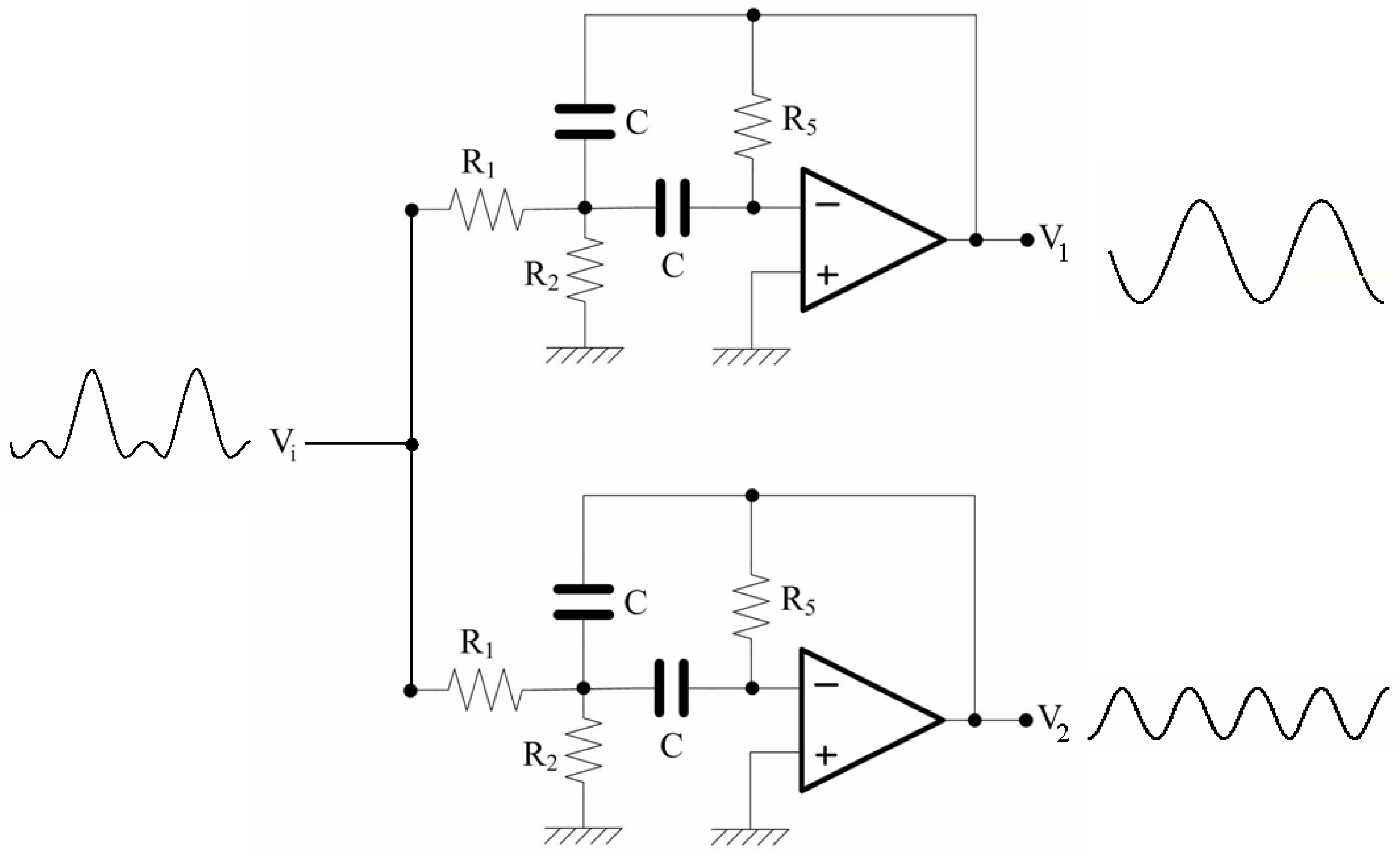
R_2 = 2.6 k.Ohm (use 2.7 kOhm)

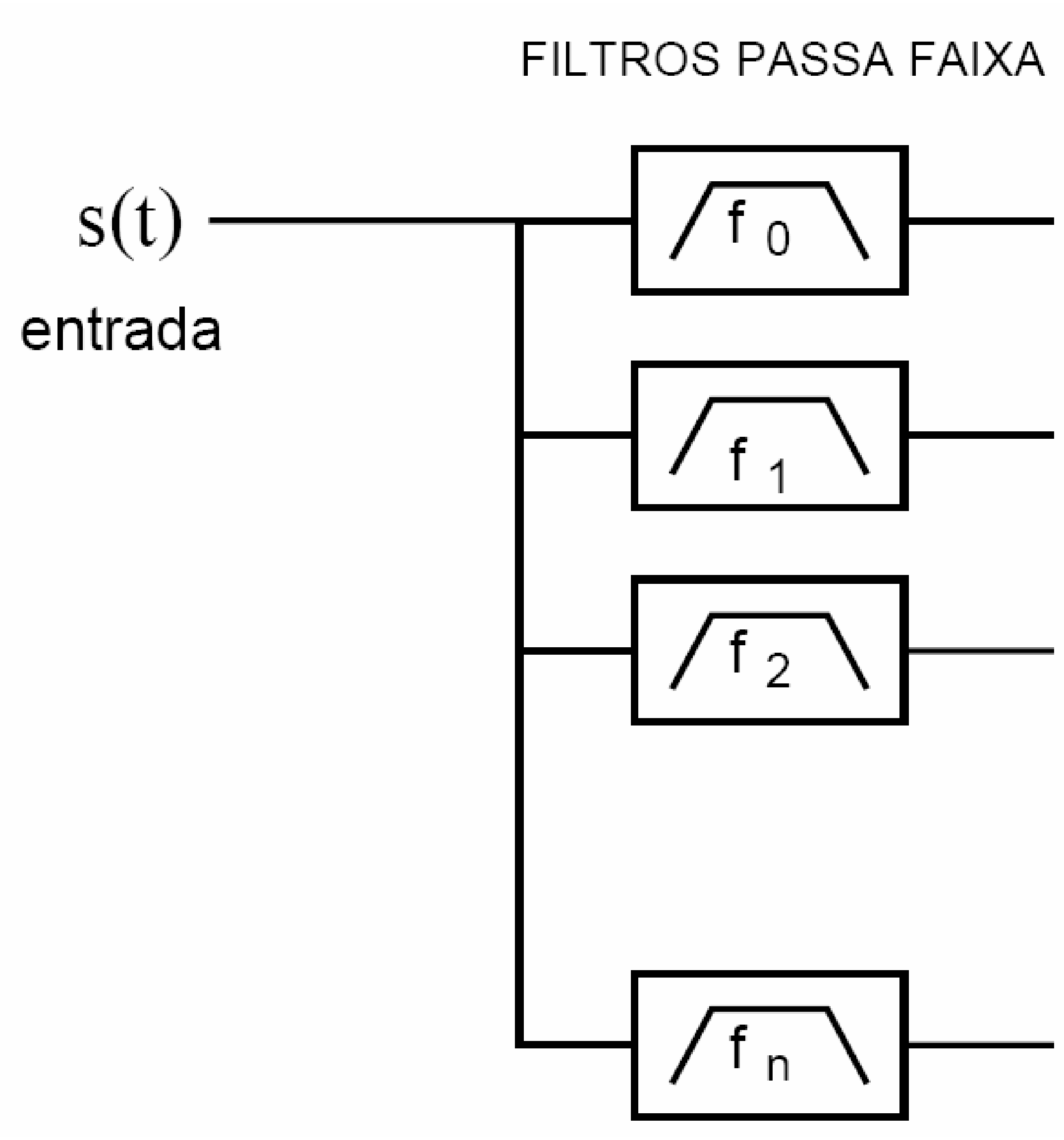

28Hz
31Hz
33Hz
37Hz
41Hz
44Hz
49Hz
55Hz
62Hz
65Hz
73Hz
82Hz
87Hz
98Hz
110Hz
123Hz
131Hz
147Hz
165Hz
175Hz
196Hz
220Hz
247Hz
262Hz
294Hz
330Hz
349Hz
392Hz
440Hz
494Hz
523Hz
587Hz
659Hz
698Hz
784Hz
880Hz
988Hz
1047Hz
1175Hz
1319Hz
1397Hz
1568Hz
1760Hz
1976Hz
2093Hz
2349Hz
2637Hz
2794Hz
3136Hz
3520Hz
3951Hz
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
Violin
Viola
Cello
Bass
Trumpet
Trombone
French Horn
Tuba
Piccolo
Flute
Oboe
Clarinet
Alto Sax
Tenor Sax
Baritone Sax
Bassoon
Harp
Harpsichord
Piano
Xylophone
Glockenspiel
Vibraphone
Timpani
Marimba
Guitar
Bass Guitar
Voice

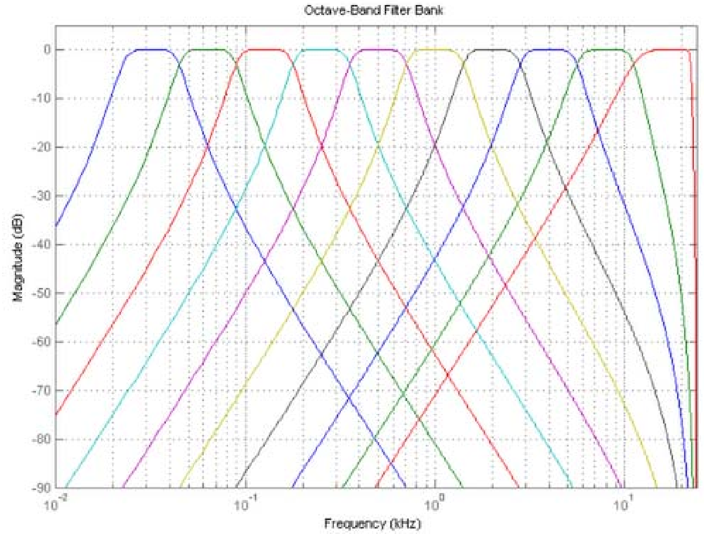
Faixa Espectral da voz humana

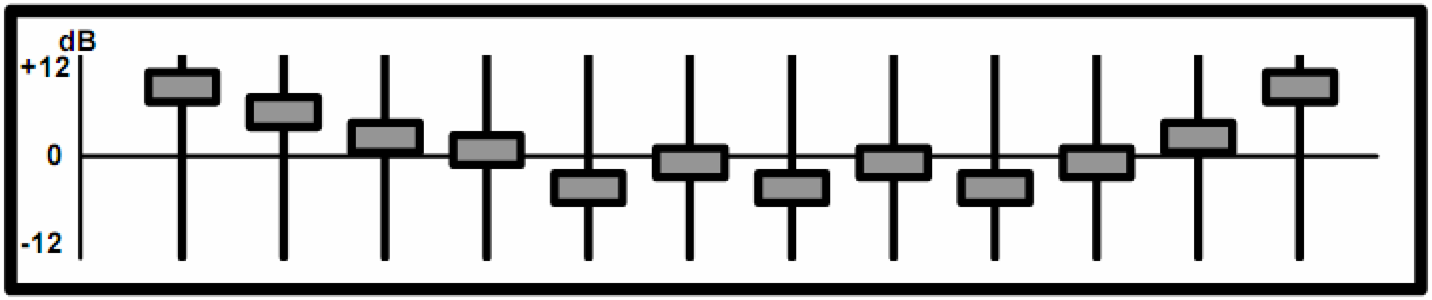


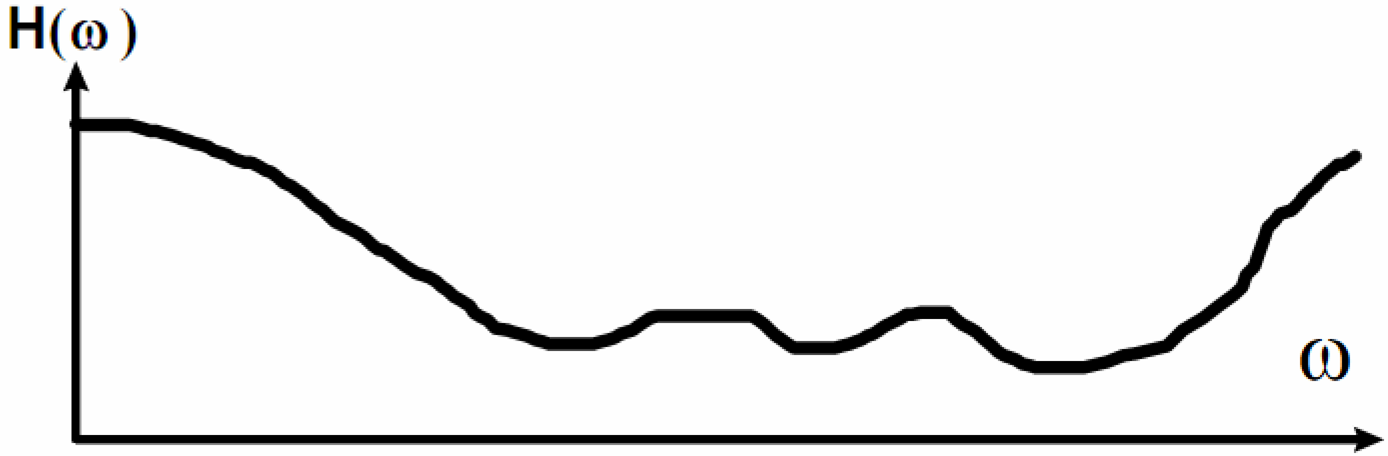
Análise Espectral




FILTROS PASSA FAIXA
s(t)
entrada
f 0
f 1
f 2
f n

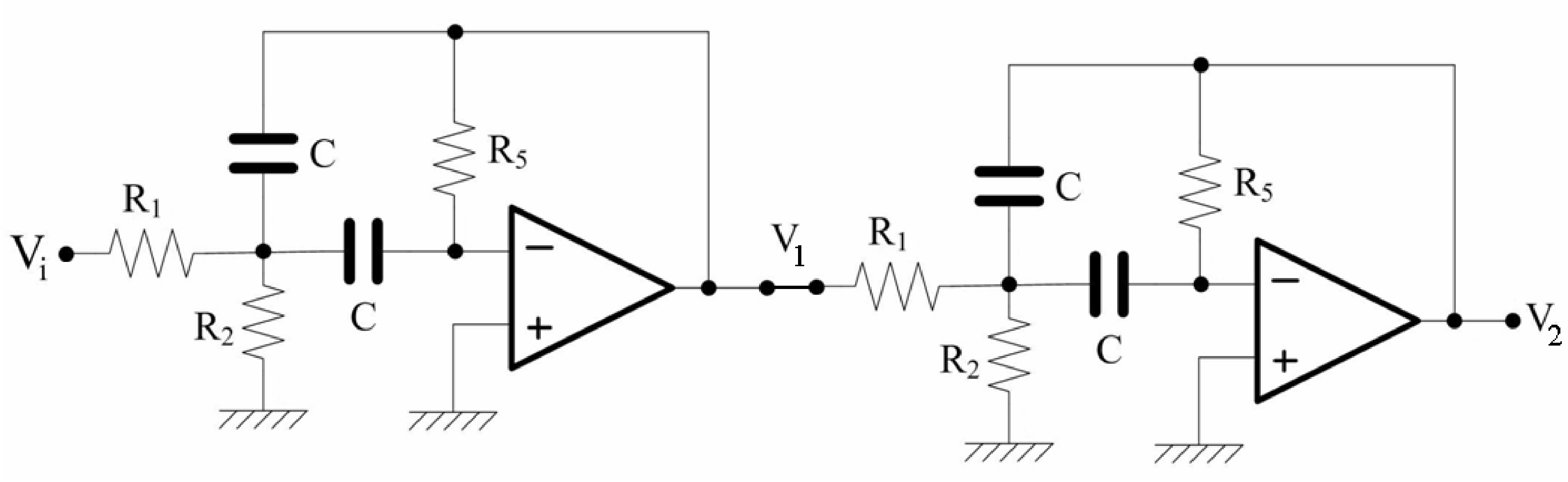

Octave-Band Filter Bank
Magnitude (dB)
Frequency (kHz)
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
-80
-90
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}

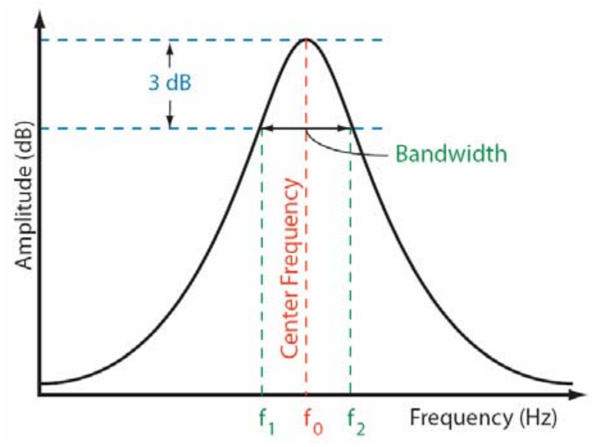

dB
+12
0
-12

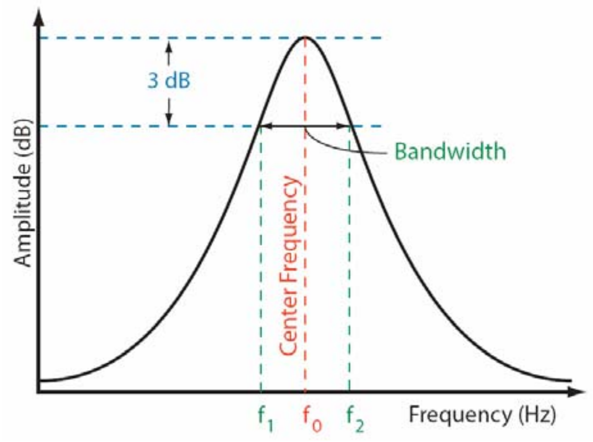

H(ω)
ω

Filtros passa faixas em série

Filtro Passa Faixa de Quarta Ordem







Filtros passa faixa em série
Fator de Qualidade Equivalente

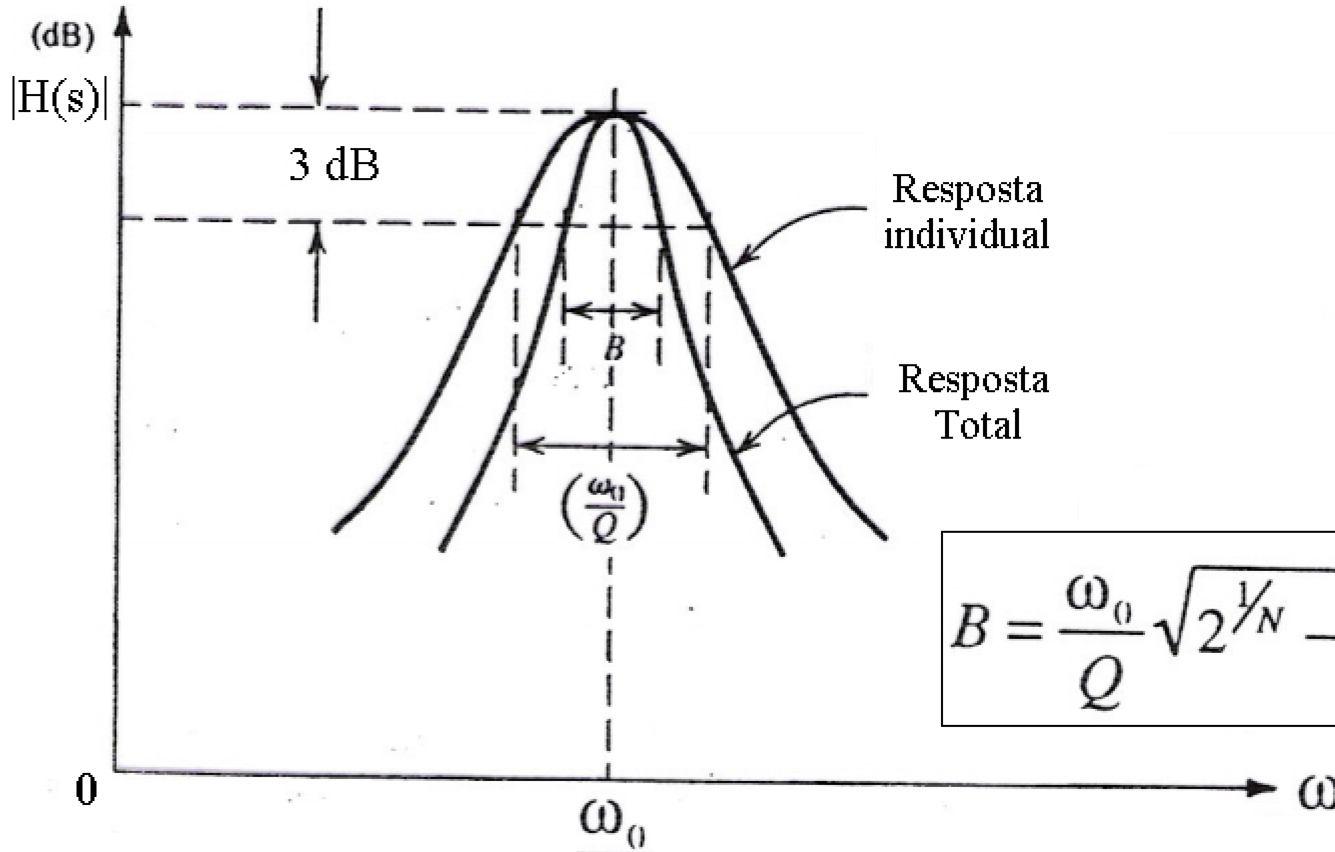
N → número de filtros em série de mesma frequência central e com fatores de qualidades iguais a Q_o

$$Q_T = \frac{Q_0}{\sqrt{\sqrt[N]{2} - 1}}$$

Fator de Qualidade Equivalente

$N = 1$	$Q = Q_o$
$N = 2$	$Q_2 = 1{,}55Q_o$
$N = 3$	$Q_3 = 1{,}96Q_o$
$N = 4$	$Q_4 = 2{,}3Q_o$
$N = 5$	$Q_5 = 2{,}6Q_o$

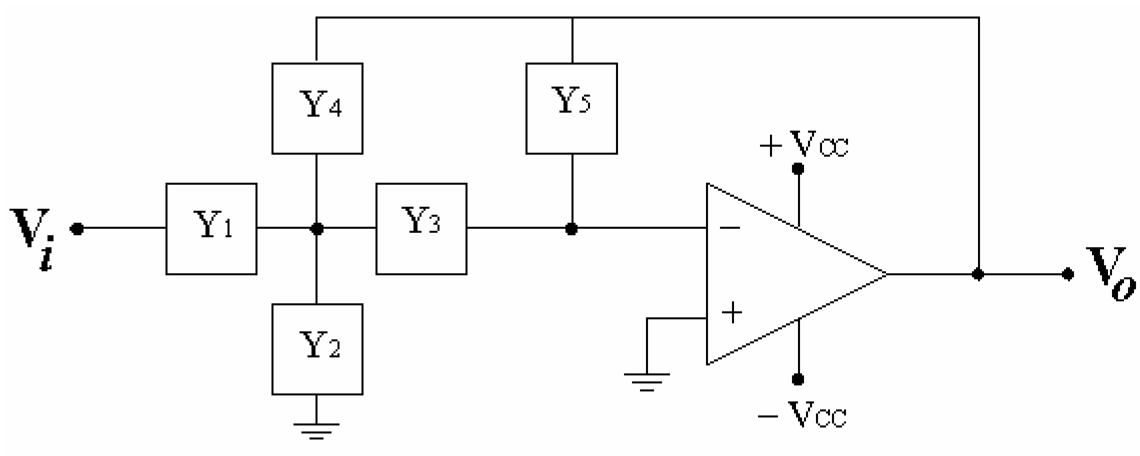
$$Q_T = \frac{Q_0}{\sqrt{\sqrt[N]{2} - 1}}$$

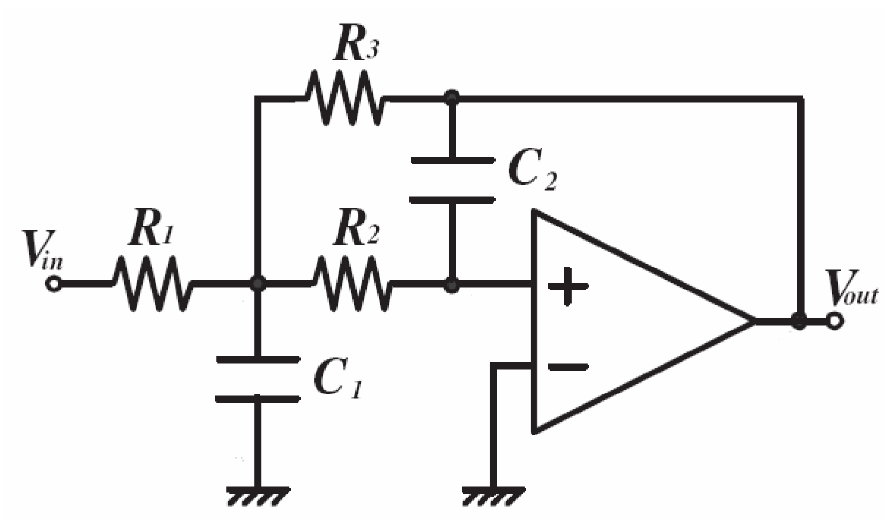


$$B = \frac{\omega_0}{Q}\sqrt{2^{1/N} - 1}$$

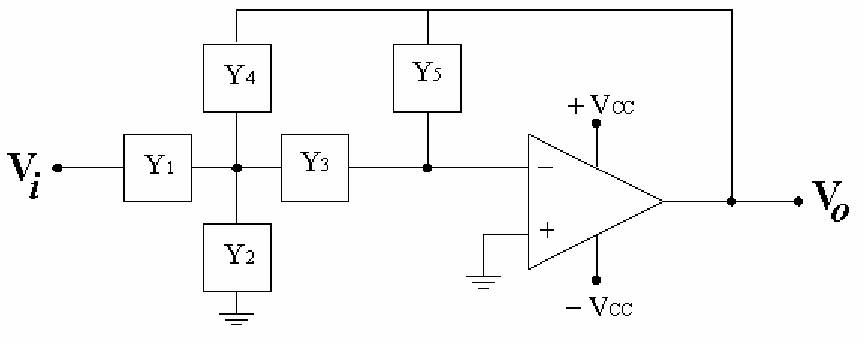
$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}\sqrt{2^{\frac{1}{N}} - 1} \qquad \Delta f = \frac{f_0}{Q}\sqrt{2^{\frac{1}{N}} - 1}$$

Filtro Passa Baixa

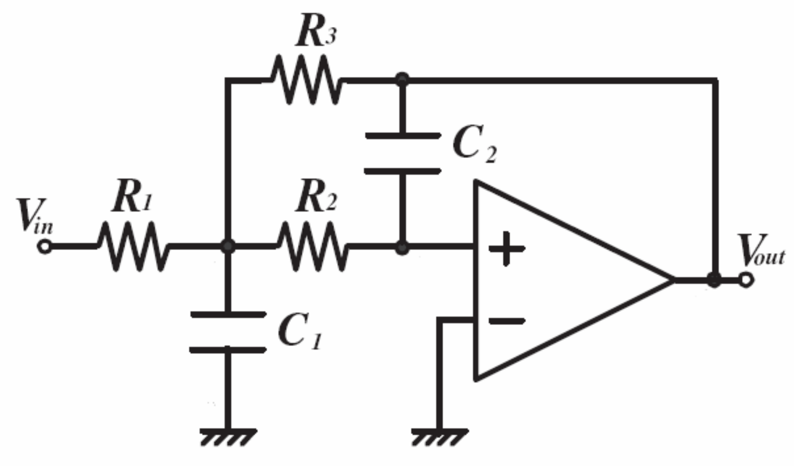




Filtro Passa Baixa

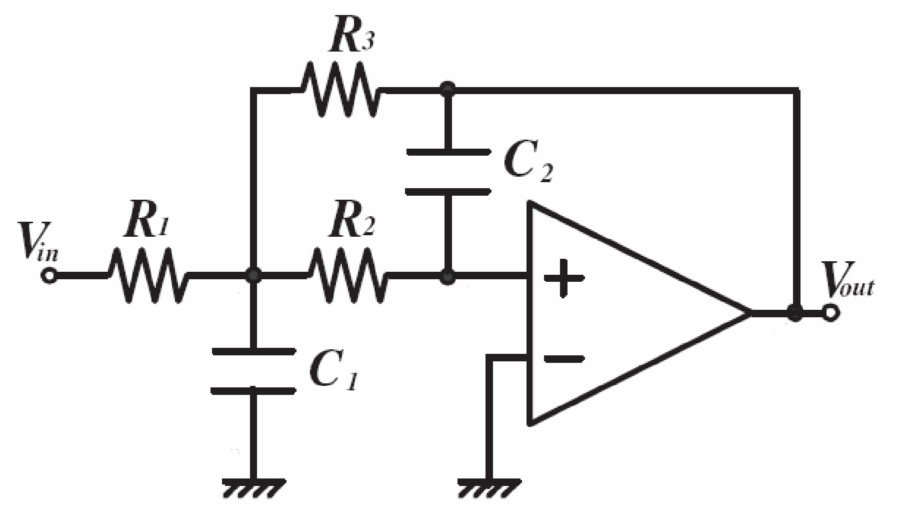


$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{Y_1 Y_3}{Y_5(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4}$$



$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + s\frac{1}{C_1}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

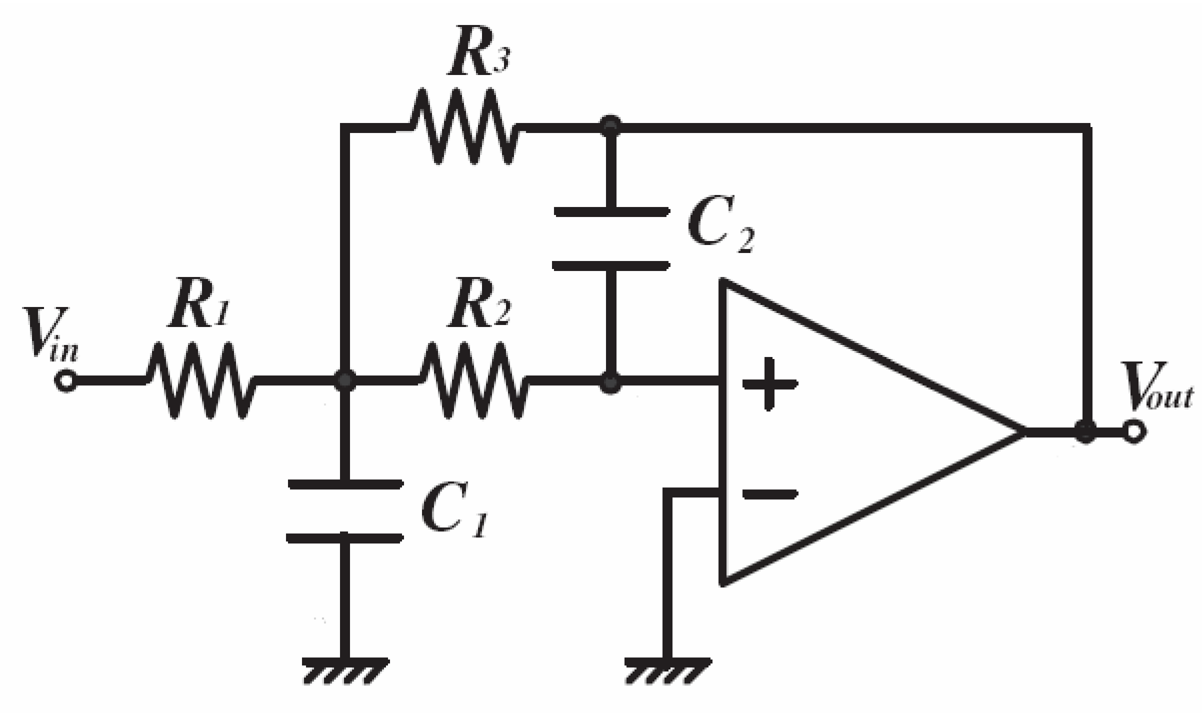
Filtro Passa Baixa



$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{\dfrac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{s^2 + s\dfrac{1}{C_1}\left(\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}\right) + \dfrac{1}{R_2R_3C_1C_2}}$$

$$H(s) = \frac{H_0}{s^2 + \dfrac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

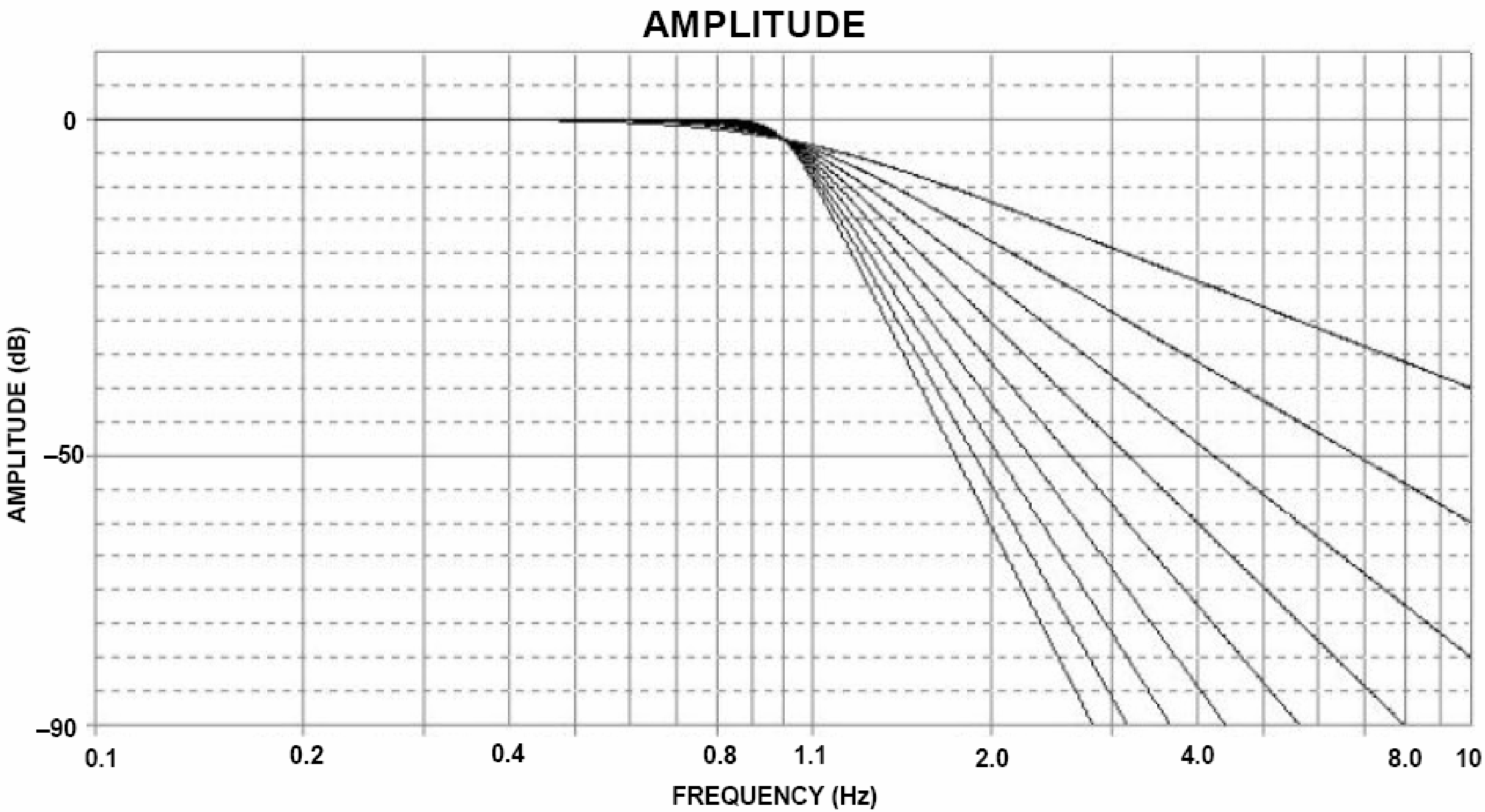
Filtro Passa Baixa



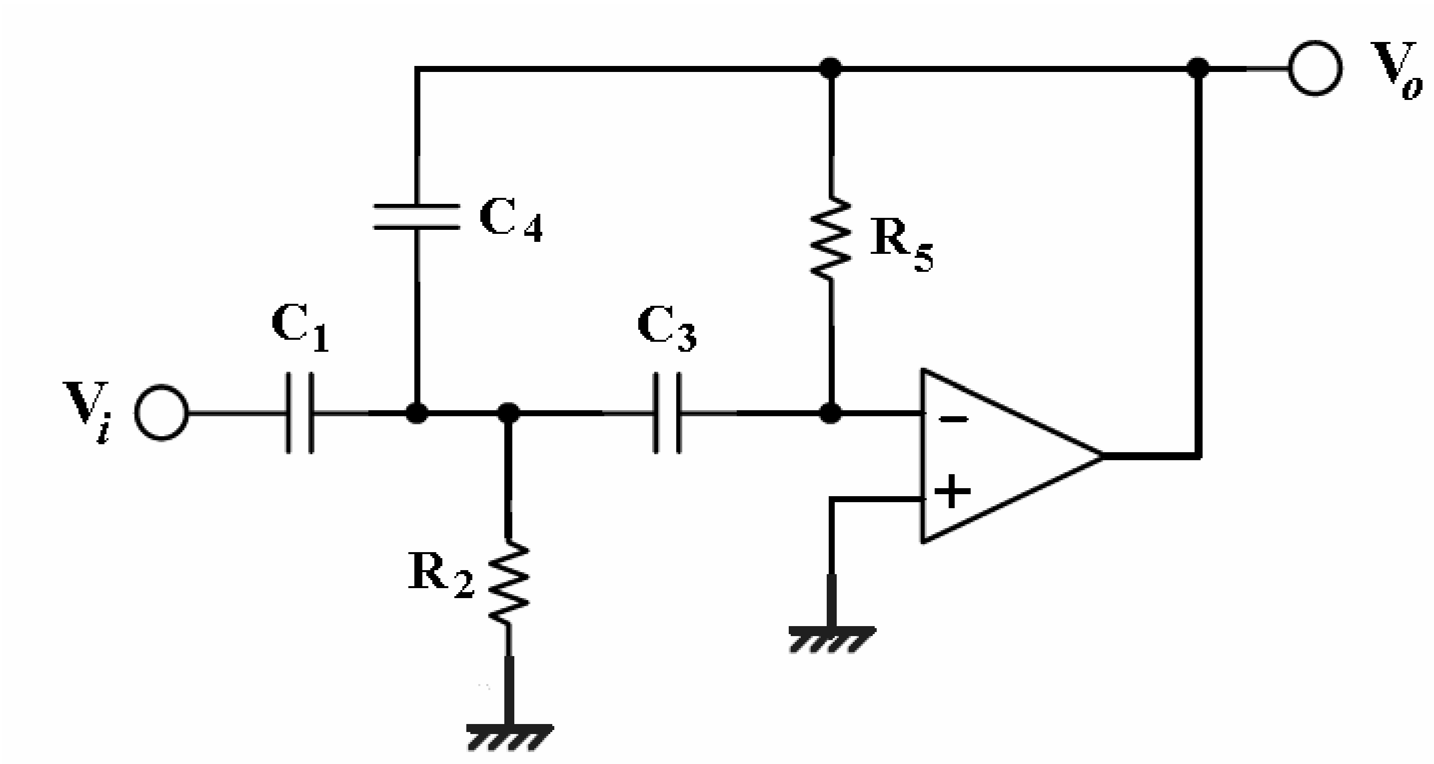
$$H(s) = \frac{H_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

Ordem do Filtro Passa Baixa



Filtro Passa Alta



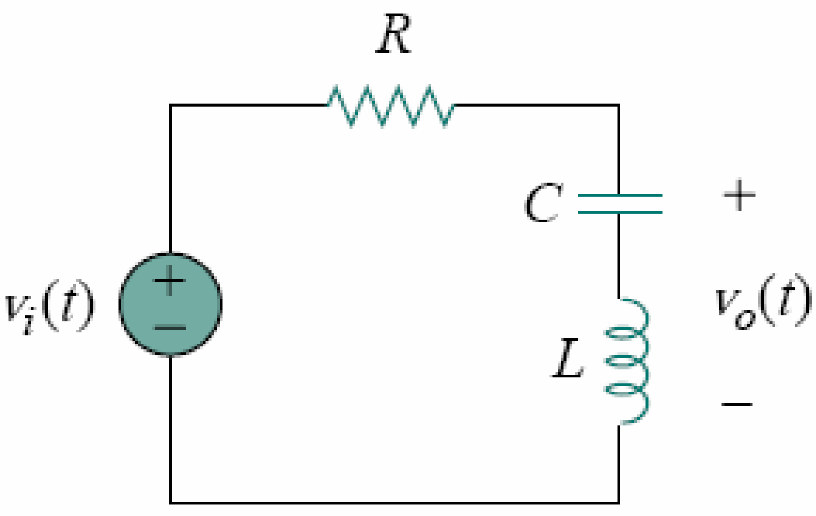
$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{\frac{C_1}{C_4}s^2}{s^2 + s\frac{1}{R_5}\left(\frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \frac{C_1}{C_3C_4}\right) + \frac{1}{R_2R_5C_3C_4}}$$

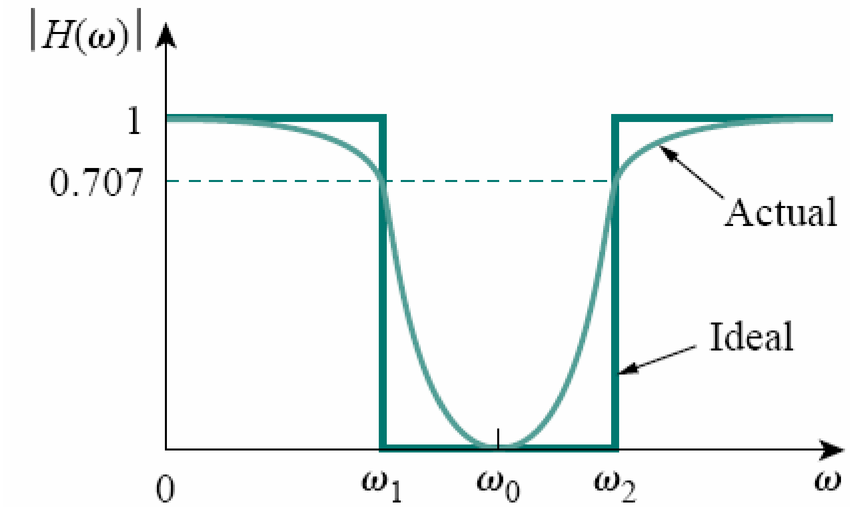
$$H(s) = \frac{H_0\, s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

Filtro Rejeita Faixa

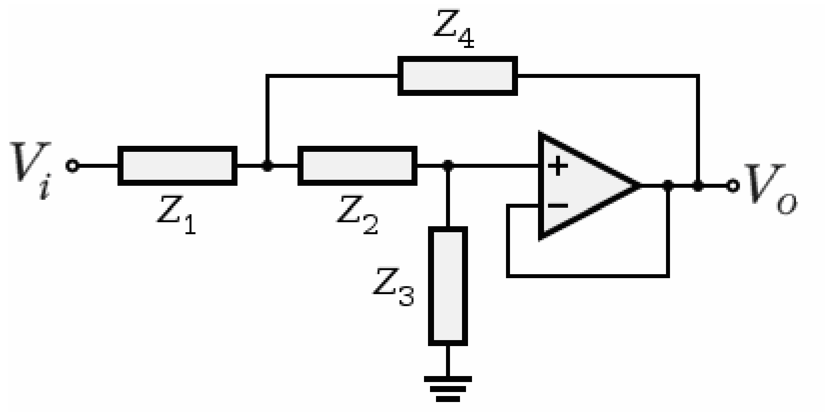
$$H(s) = \frac{H_0 (s^2 + \omega_z^2)}{s^2 + \dfrac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2}$$

$$H(\omega) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{j(\omega L - 1/\omega C)}{R + j(\omega L - 1/\omega C)}$$



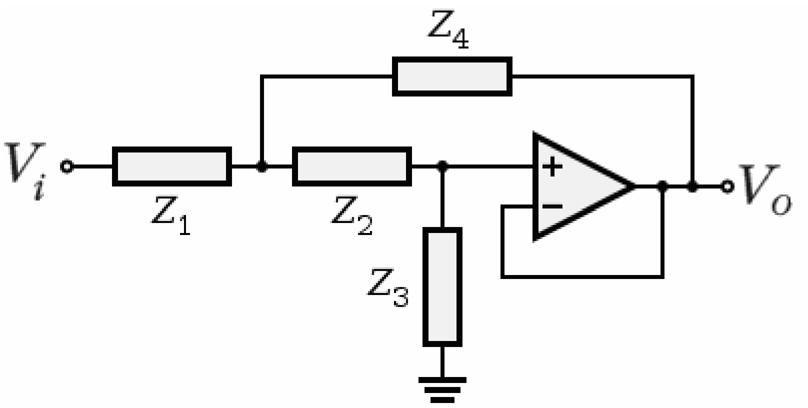


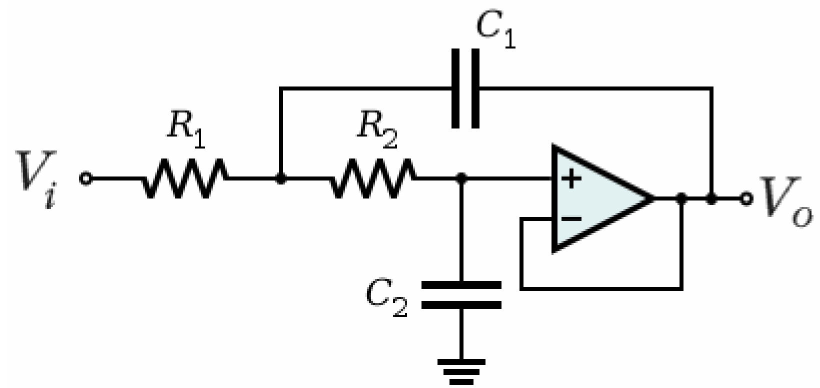
Topologia Sallen–Key



$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_4(Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4}$$

Filtro Passa Baixa Sallen-Key



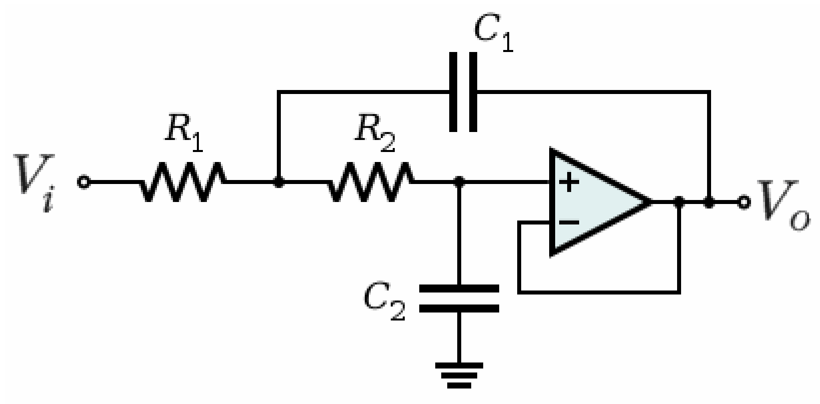


$$Z_1 = R_1, \quad Z_2 = R_2, \quad Z_3 = \frac{1}{sC_2}, \quad Z_4 = \frac{1}{sC_1}.$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_4(Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4}$$

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{\frac{1}{R1C1R2C2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R2C1} + \frac{1}{R1C1}\right) + \frac{1}{R1C1R2C2}}$$

Filtro Passa Baixa Sallen-Key



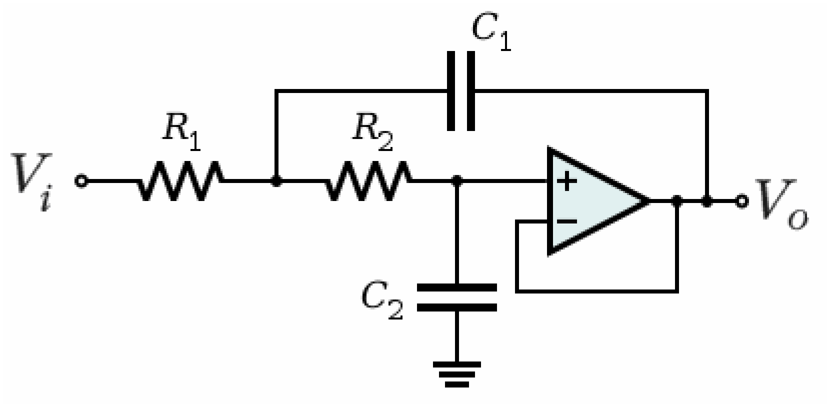
$$H(s) = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + s\frac{1}{C_1}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}\frac{\sqrt{R_1 R_2}}{R_1 + R_2}$$

Filtro Passa Baixa Sallen-Key

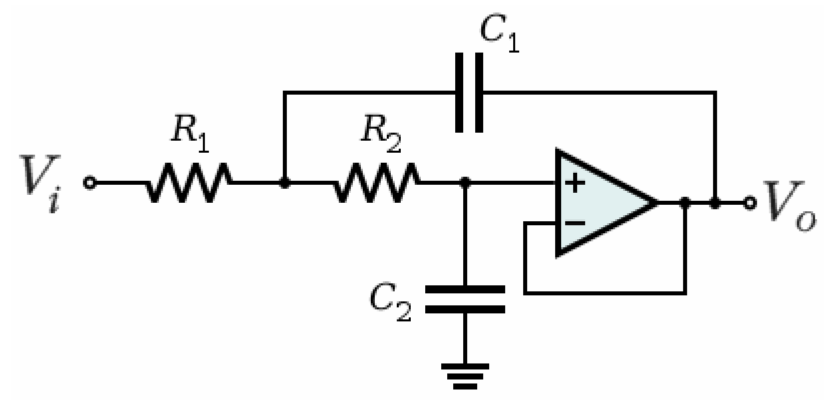


$$Z_1 = R_1, \quad Z_2 = R_2, \quad Z_3 = \frac{1}{sC_2}, \quad Z_4 = \frac{1}{sC_1}.$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_4(Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4}$$

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{\frac{1}{R1C1R2C2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R2C1} + \frac{1}{R1C1}\right) + \frac{1}{R1C1R2C2}}$$

Filtro Passa Baixa Sallen-Key



$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

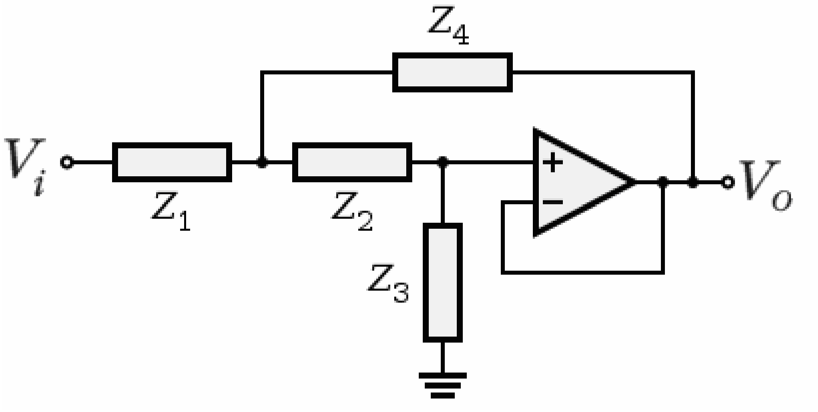
$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{\frac{1}{R1C1R2C2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R2C1} + \frac{1}{R1C1}\right) + \frac{1}{R1C1R2C2}}$$

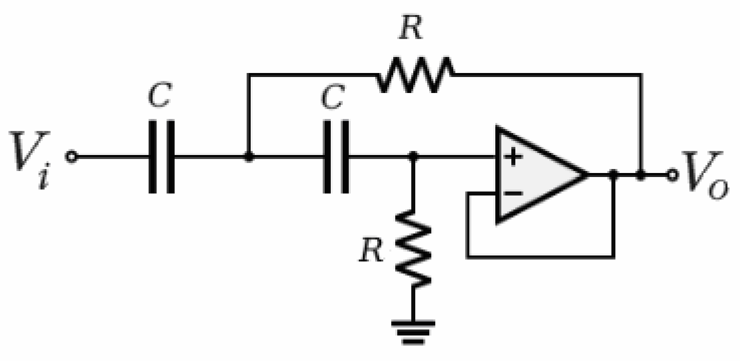
$$\frac{1}{Q} = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_1}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2\left(R_1 + R_2\right)}$$

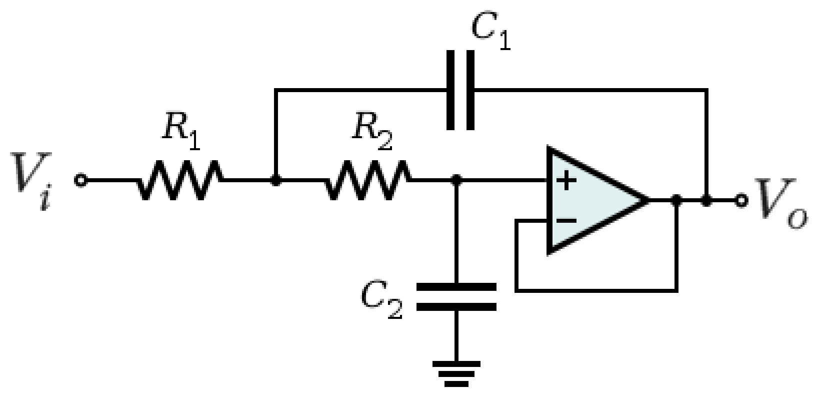
$$\frac{f_c}{Q} = \frac{R_1 + R_2}{2\pi C_1 R_1 R_2}.$$

Filtro Passa Alta Sallen-Key

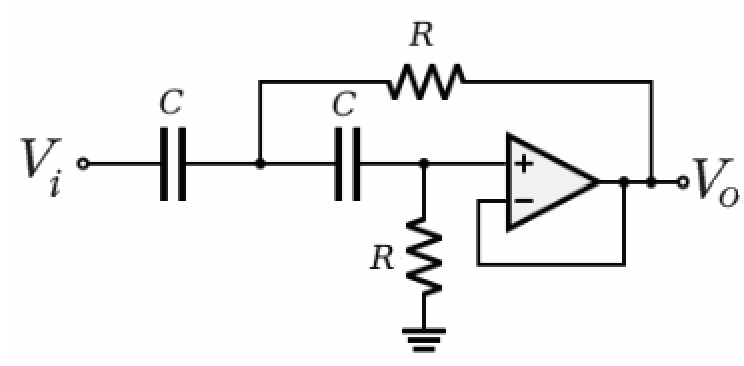




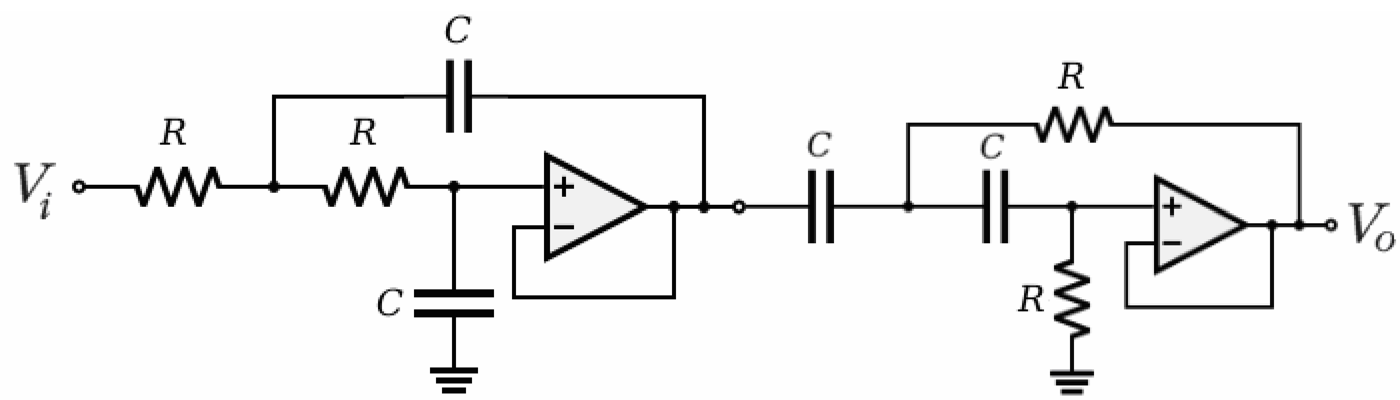
PASSA BAIXA



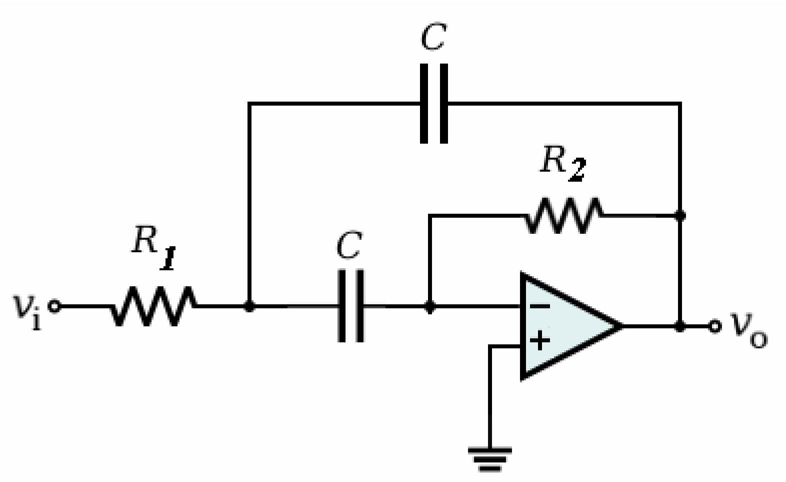
PASSA ALTA



PASSA FAIXA



Filtro Passa Faixa



$$H(s) = -\frac{s\dfrac{1}{R_1 C}}{s^2 + \dfrac{2}{R_2 C}s + \dfrac{1}{R_1 R_2 C^2}}$$

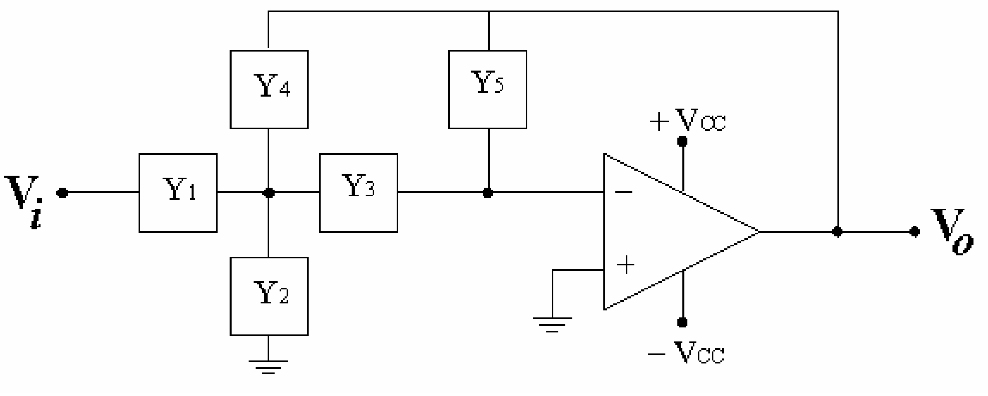
$$\frac{V_o}{V_i} = \mathrm{H_o}\,\frac{\dfrac{\omega_0}{Q}s}{s^2 + \dfrac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

$$H(s) = -\frac{R_2}{2R_1}\,\frac{s\dfrac{2}{R_2 C}}{s^2 + \dfrac{2}{R_2 C}s + \dfrac{1}{R_1 R_2 C^2}}$$

$$H_0 = -\frac{R_2}{2R_1} \qquad \omega_0 = \frac{1}{C\sqrt{R_1 R_2}} \qquad Q = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$

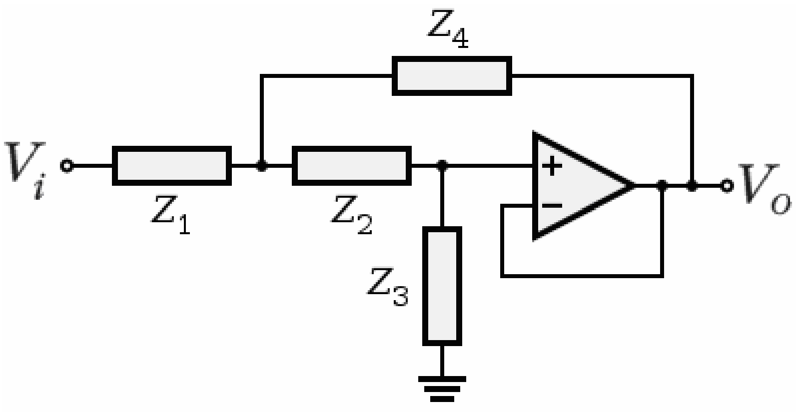
Filtros Ativos

Multipla Realimentação



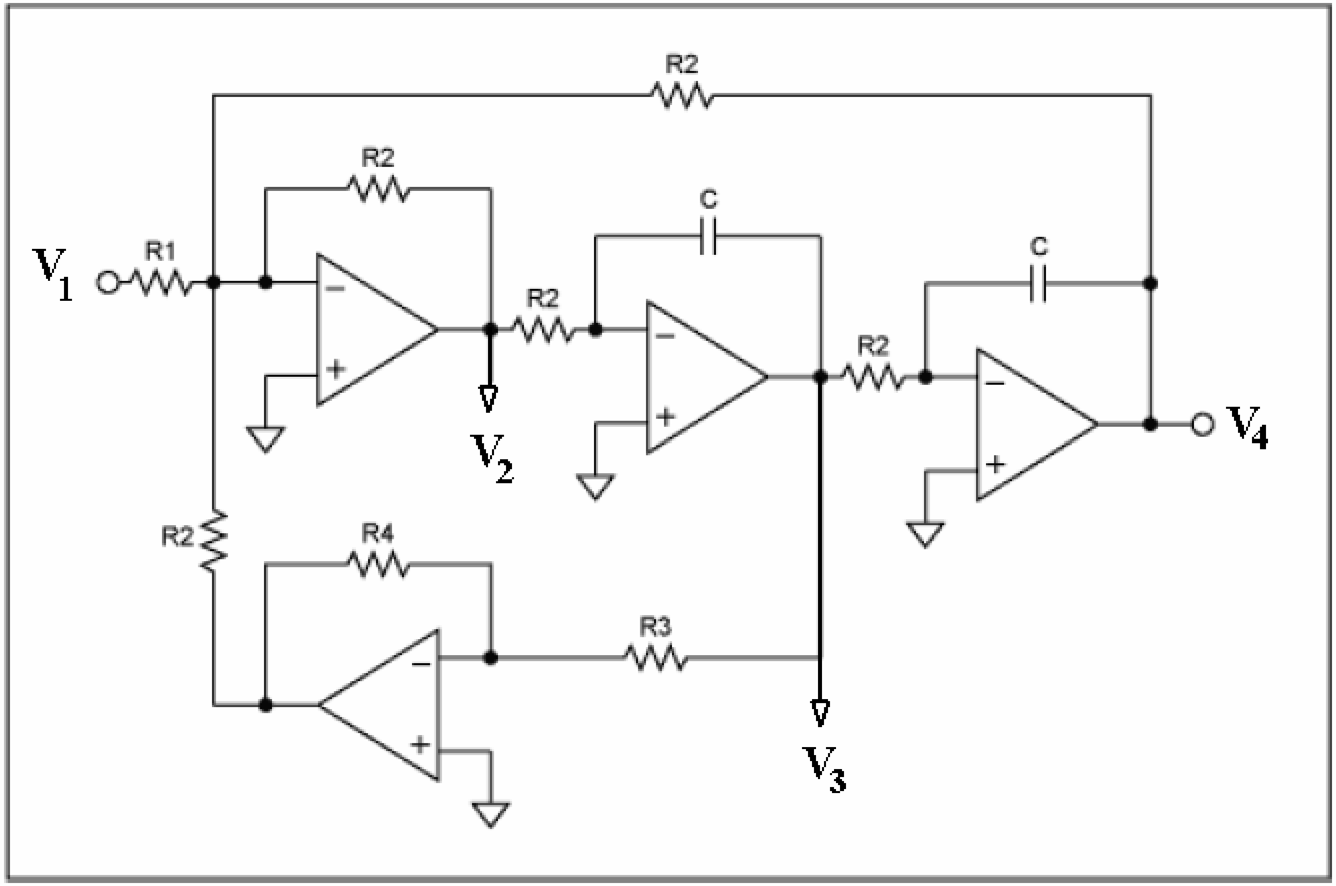
$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{Y_1 Y_3}{Y_5(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4}$$

Sallen-Key



$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_4(Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4}$$

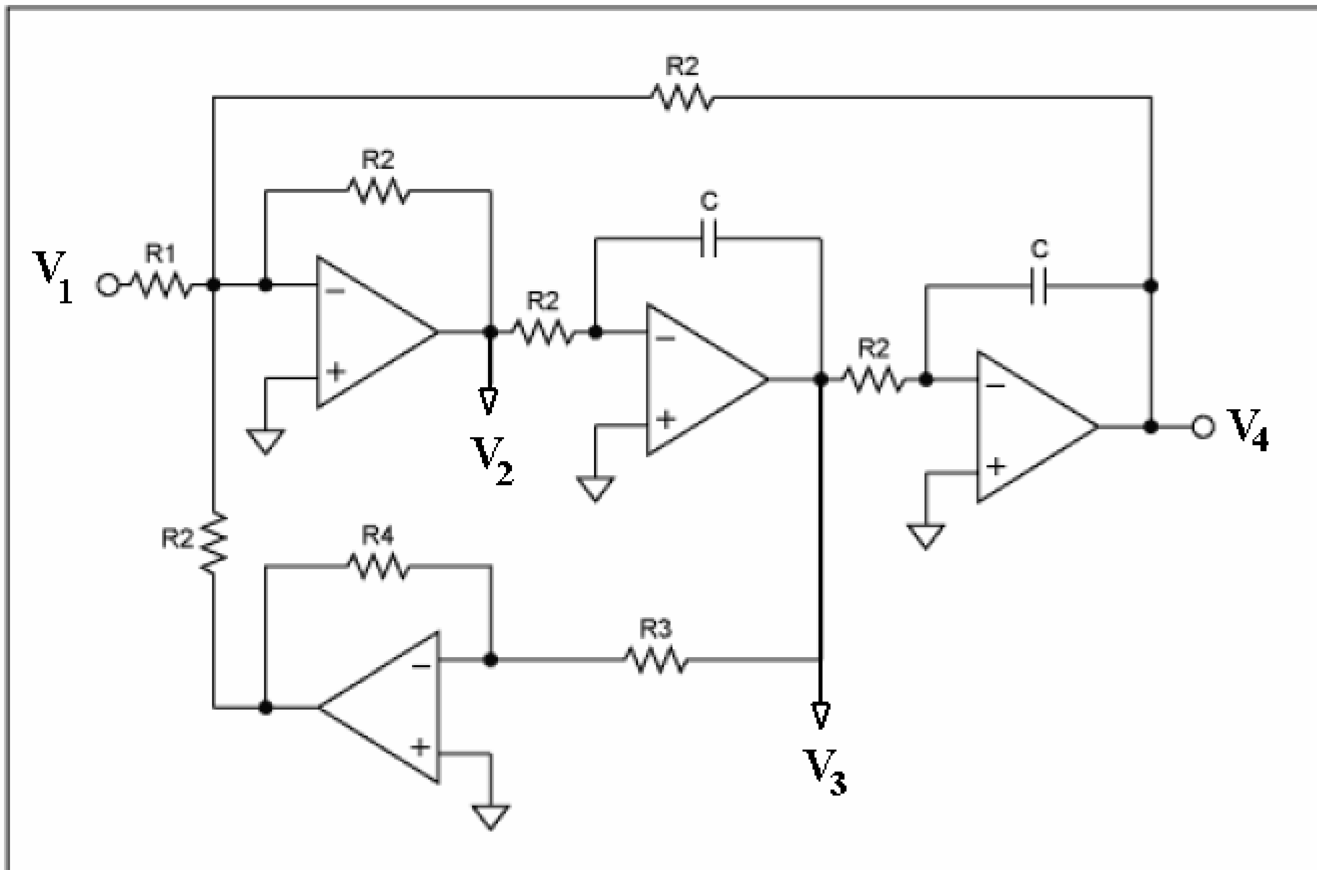
Filtro Ativo Universal



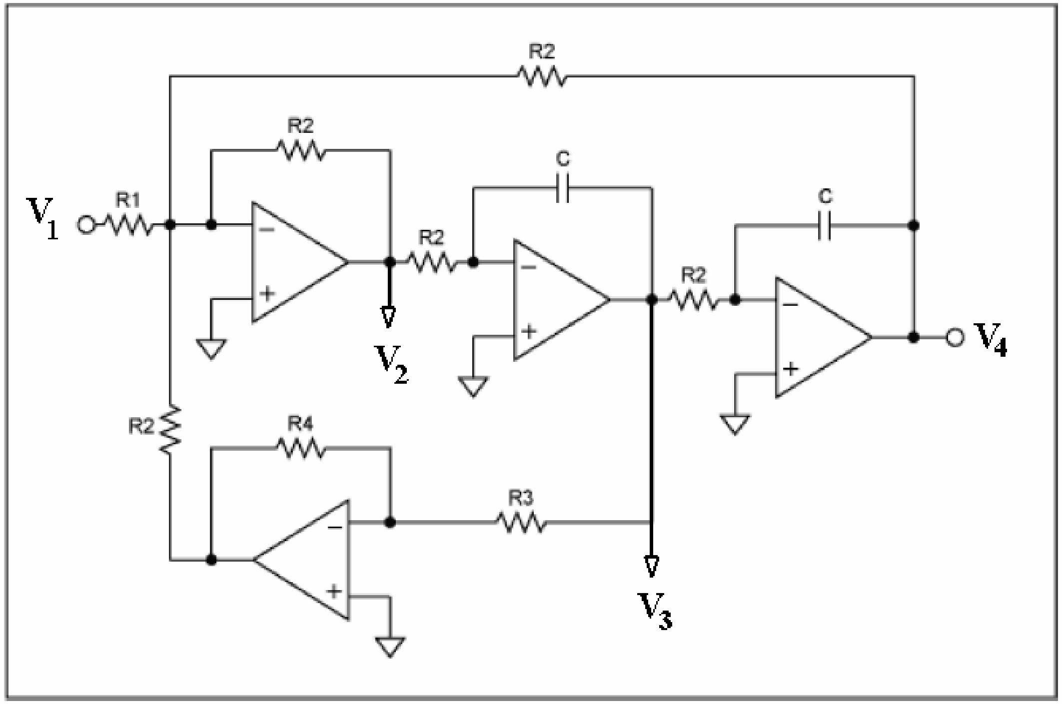
Filtro Ativo Universal

State Variable Filter

Kerwin-Huelsman-Newcomb (KHN)



Filtro Ativo Universal Segunda Ordem



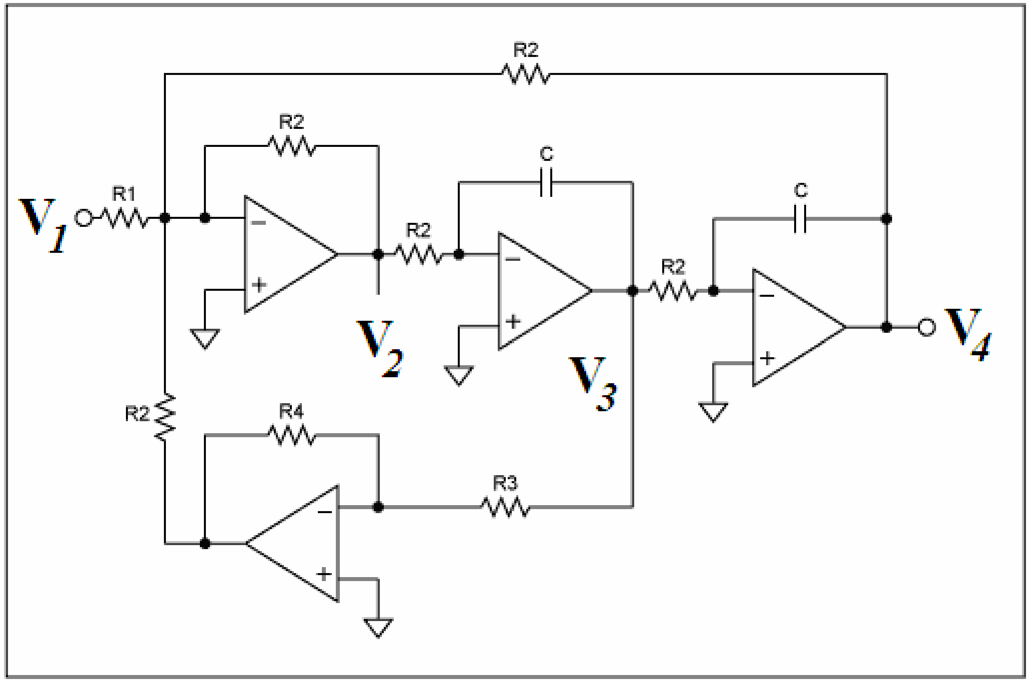
V_2 → *Filtro Passa Alta*

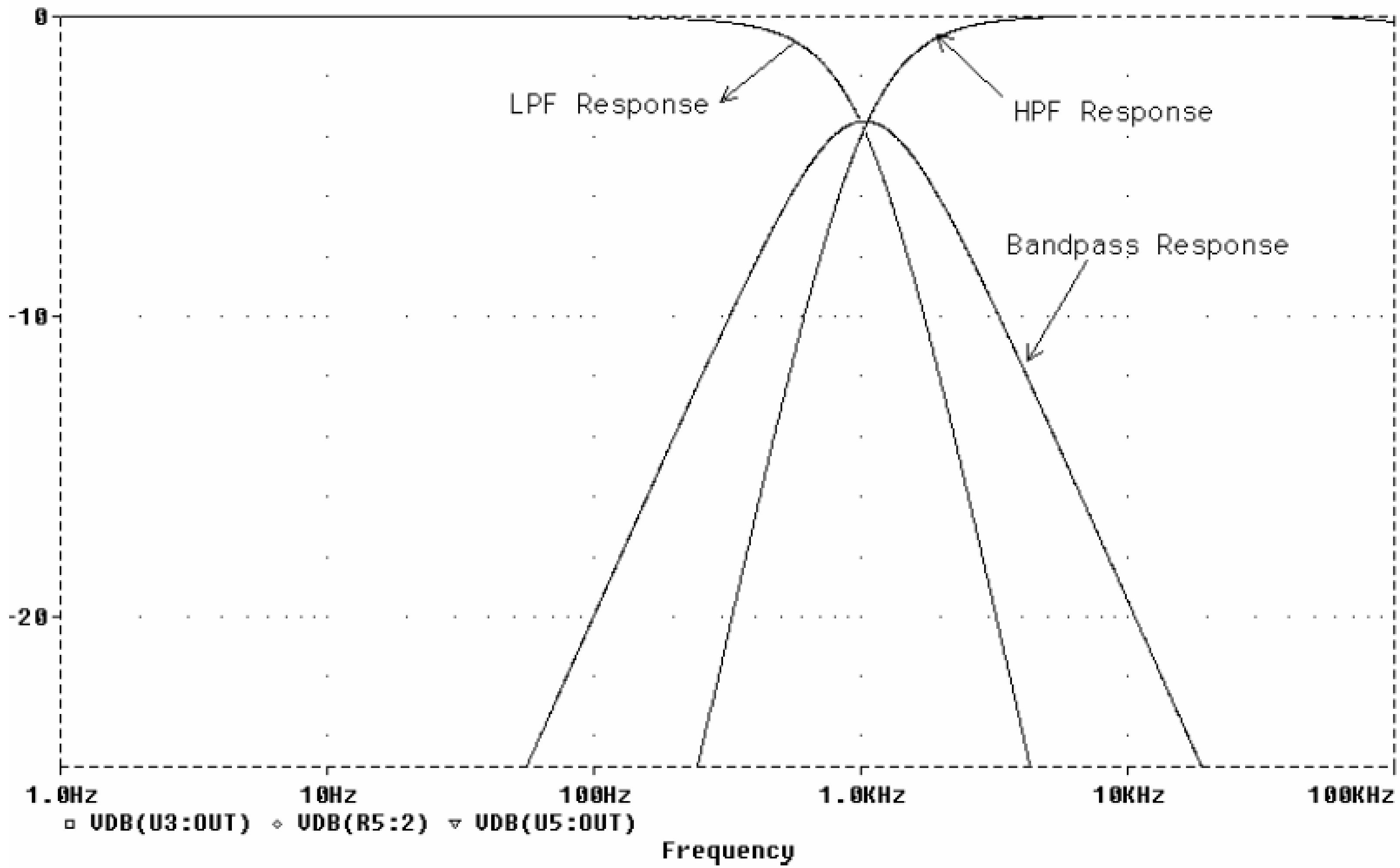
V_3 → *Filtro Passa Faixa*

V_4 → *Filtro Passa Baixa*

Filtro Ativo Universal

Produz simultaneamente saídas Passa-Baixa, Passa-Alta e Passa-Faixa a partir de uma simples entrada

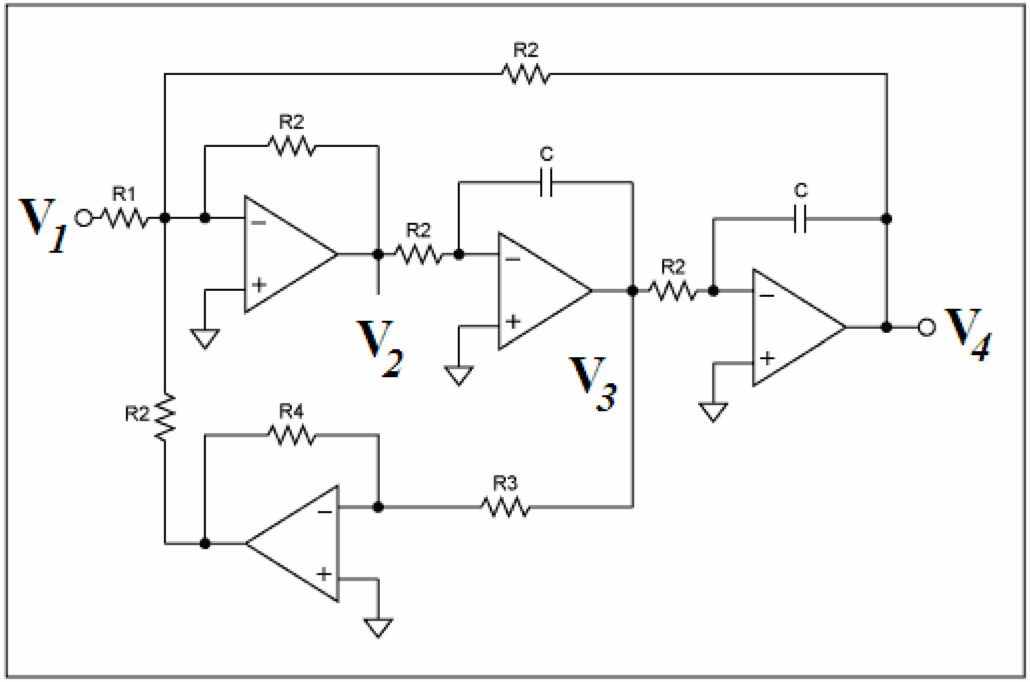




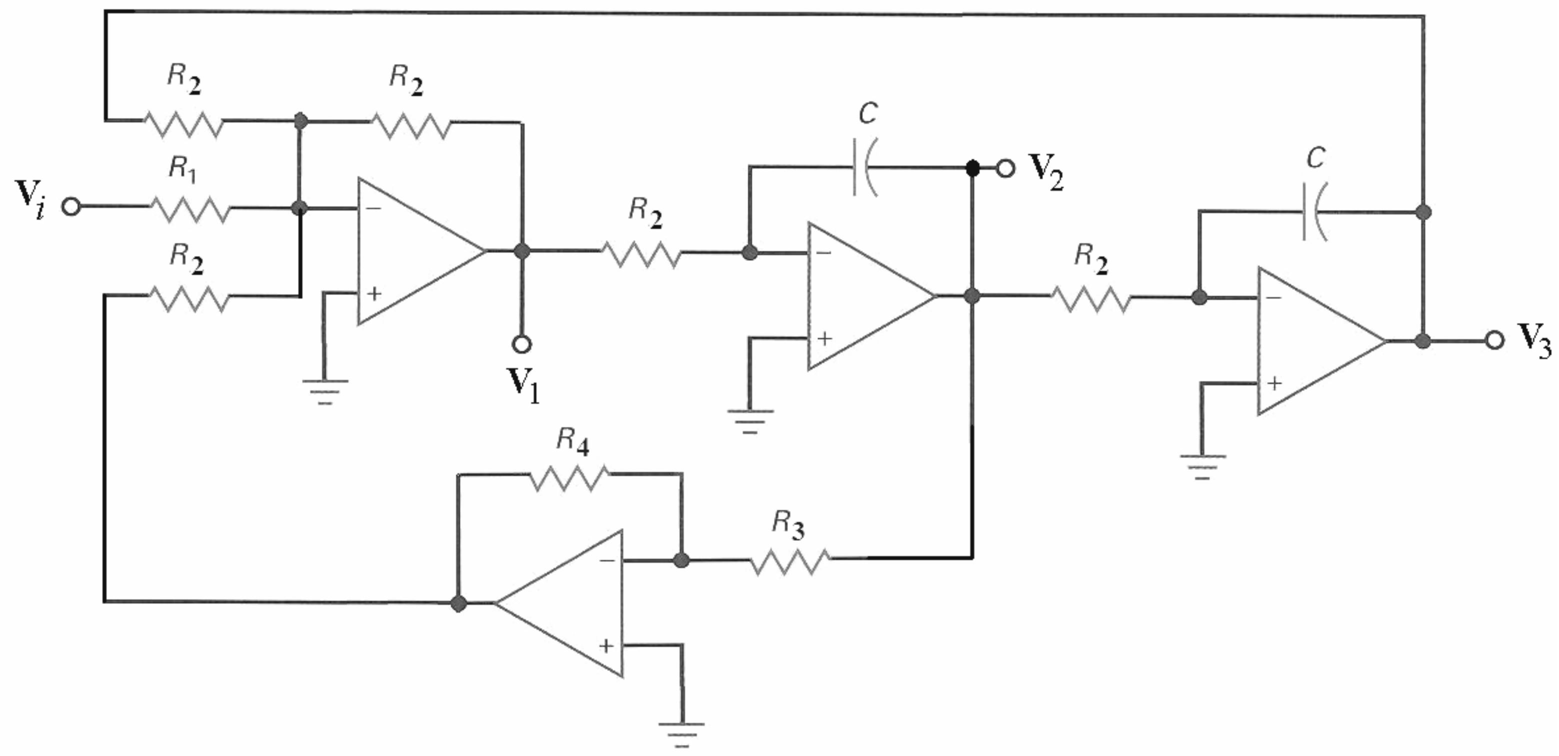
Frequency response of a state variable filter.

Filtro Ativo Universal

Além de produzir simultaneamente saídas Passa-Baixa, Passa-Alta e Passa-Faixa permite o Controle independente dos principais parâmetros do filtro: frequência de corte, fator de qualidade Q e Ganho.



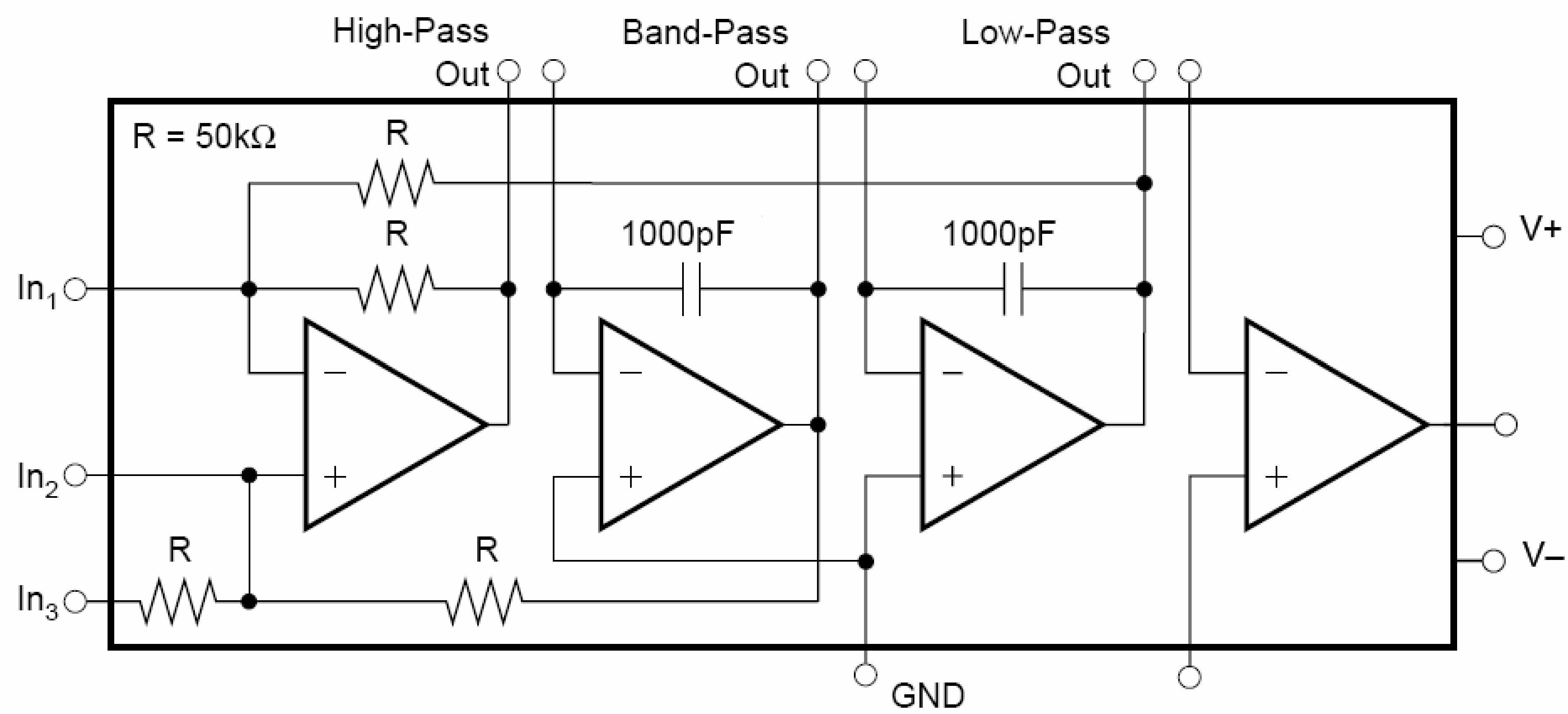
Filtro Ativo Universal



Passa ALTA	Passa FAIXA	Passa BAIXA
$\frac{V_1}{V_i} = -\frac{\frac{R_2}{R_1}s^2}{s^2 + \frac{R_4}{R_2R_3C}s + \left(\frac{1}{R_2C}\right)^2}$	$\frac{V_2}{V_i} = \frac{\frac{1}{R_1C}s}{s^2 + \frac{R_4}{R_2R_3C}s + \left(\frac{1}{R_2C}\right)^2}$	$\frac{V_3}{V_i} = -\frac{\frac{1}{R_1R_2C^2}}{s^2 + \frac{R_4}{R_2R_3C}s + \left(\frac{1}{R_2C}\right)^2}$

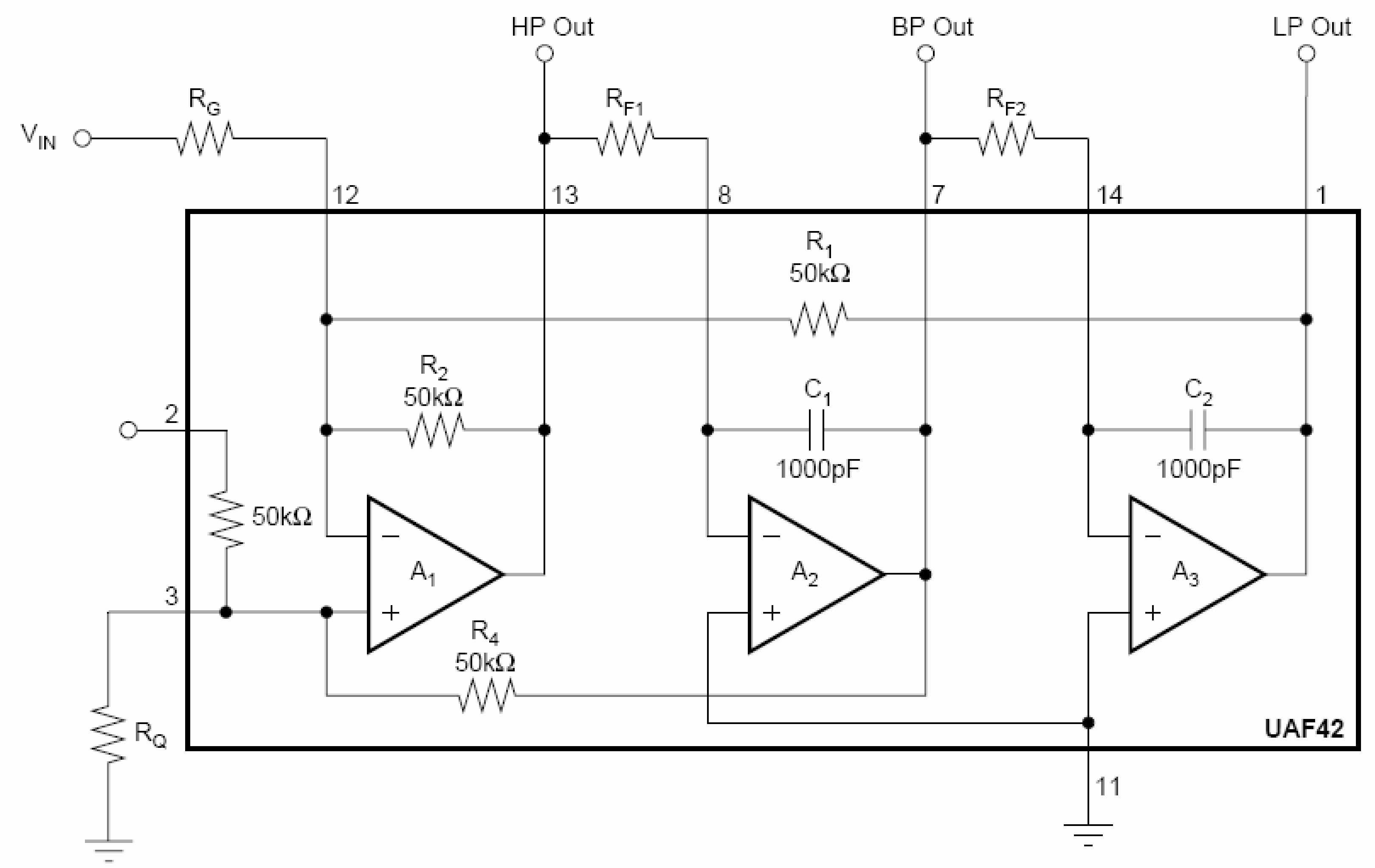
UNIVERSAL ACTIVE FILTER

UAF42



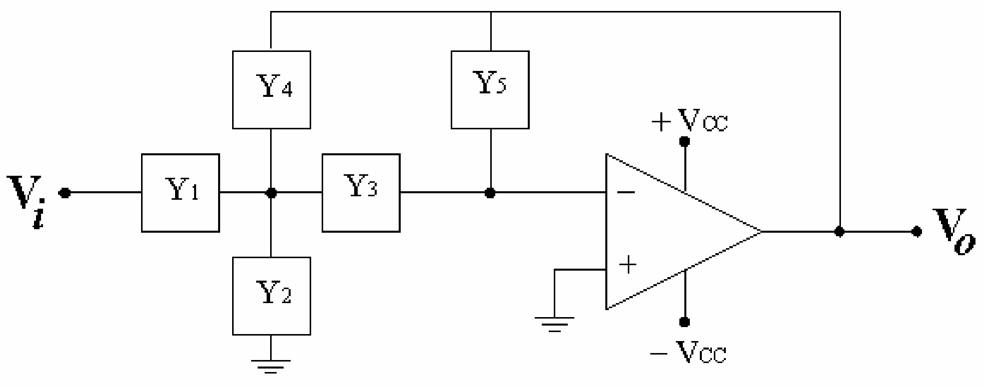
UNIVERSAL ACTIVE FILTER

UAF42



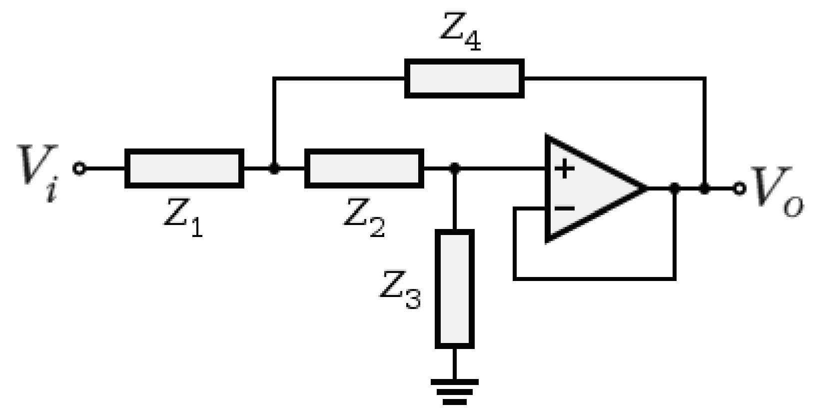
Topologias de Filtros Ativos

Multipla Realimentação



$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{Y_1 Y_3}{Y_5(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4}$$

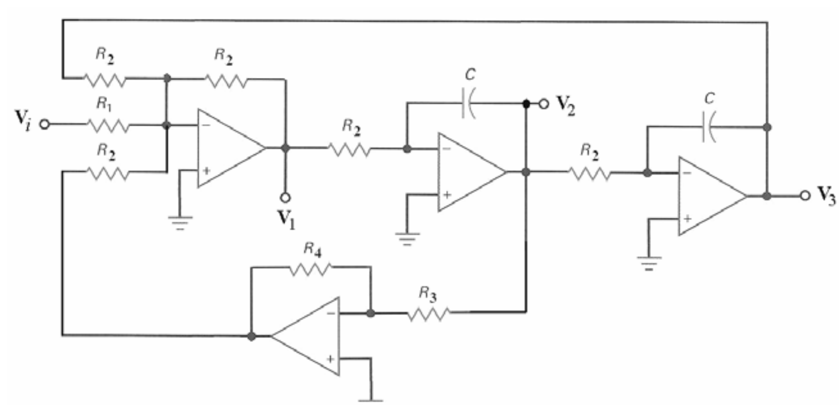
Sallen-Key



$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_4(Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4}$$

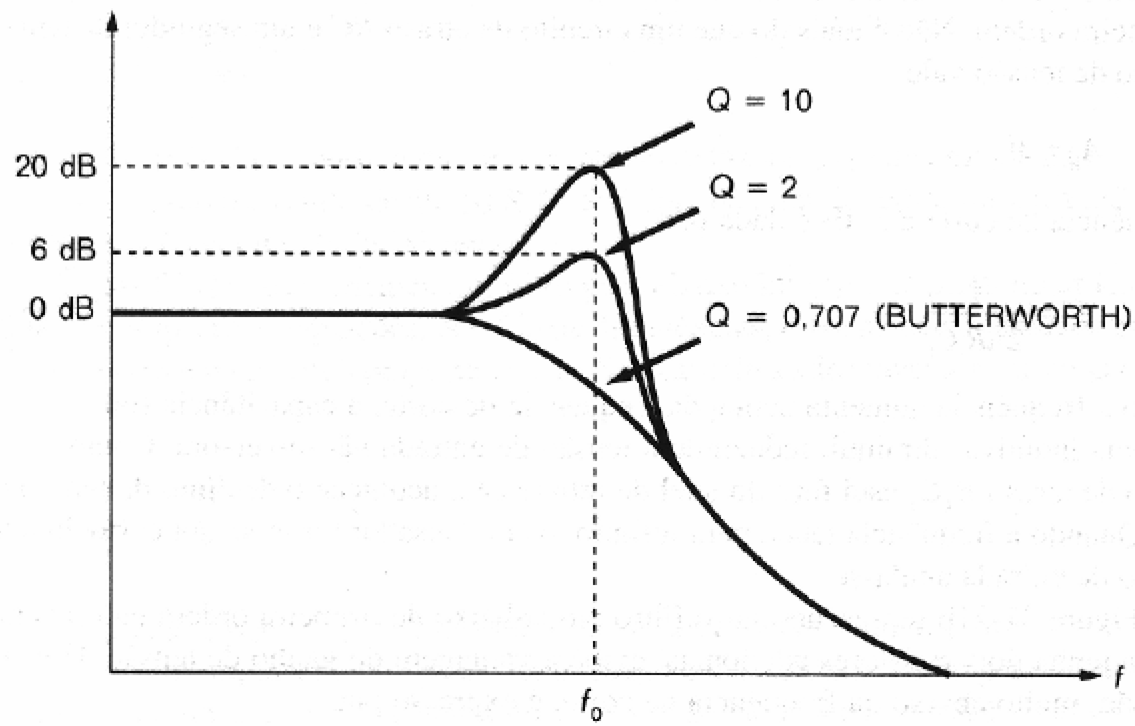
Filtro Universal

$$\frac{V_1}{V_i} = -\frac{\frac{R_2}{R_1} s^2}{s^2 + \frac{R_4}{R_2 R_3 C} s + \left(\frac{1}{R_2 C}\right)^2}$$

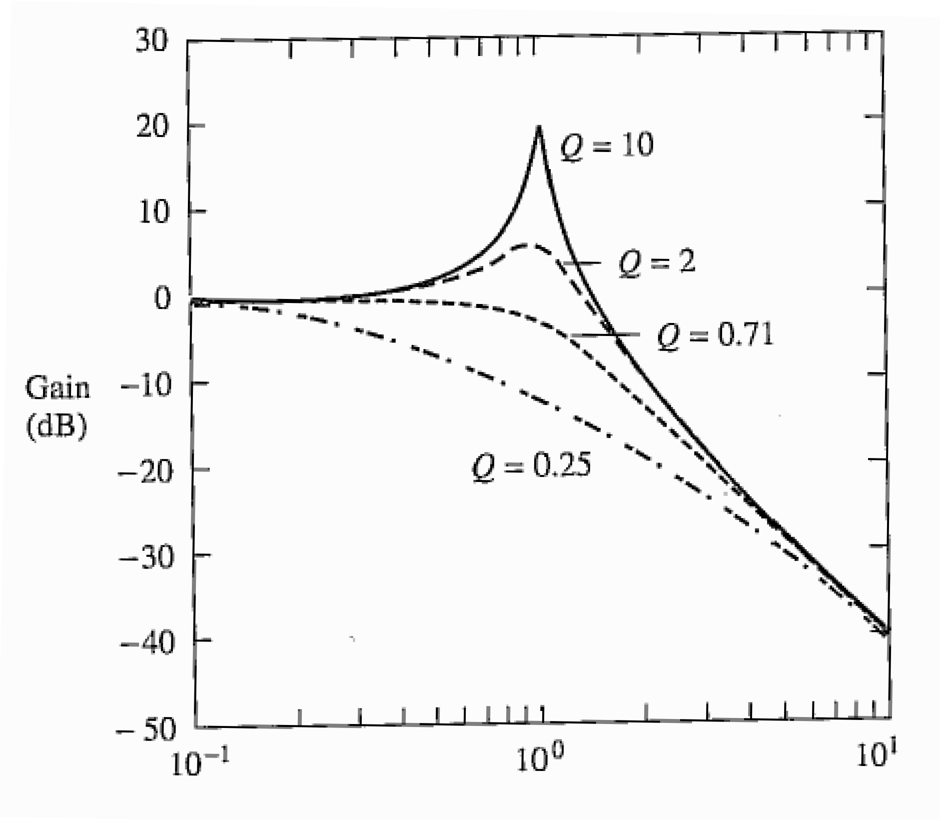


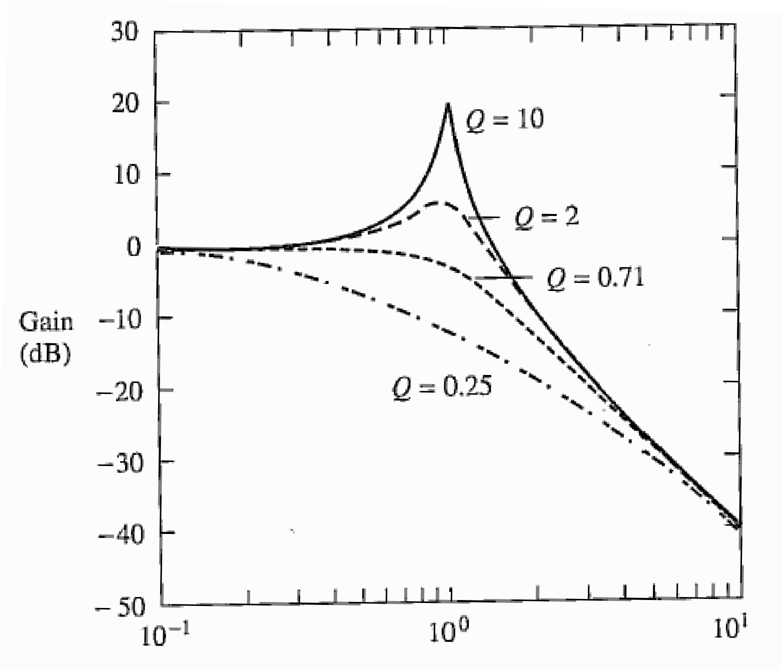
Efeito do fator de qualidade Q na resposta em frequência de um filtro passa baixa de segunda ordem.

A figura seguinte resume o efeito de Q num filtro de 2ª ordem:

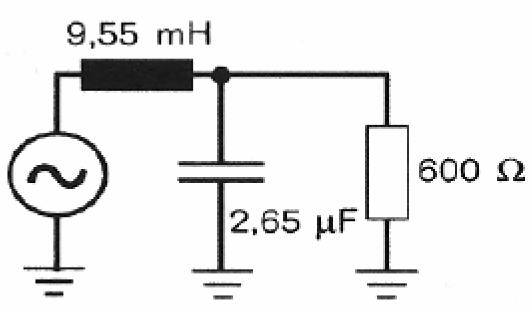


Efeito do fator de qualidade Q na resposta em frequência de um filtro passa baixa de segunda ordem.

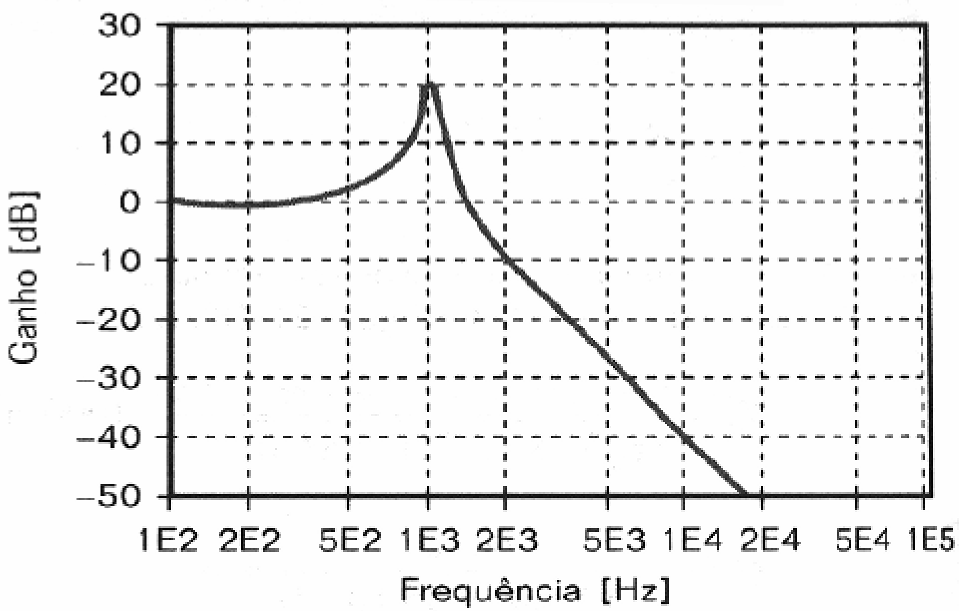




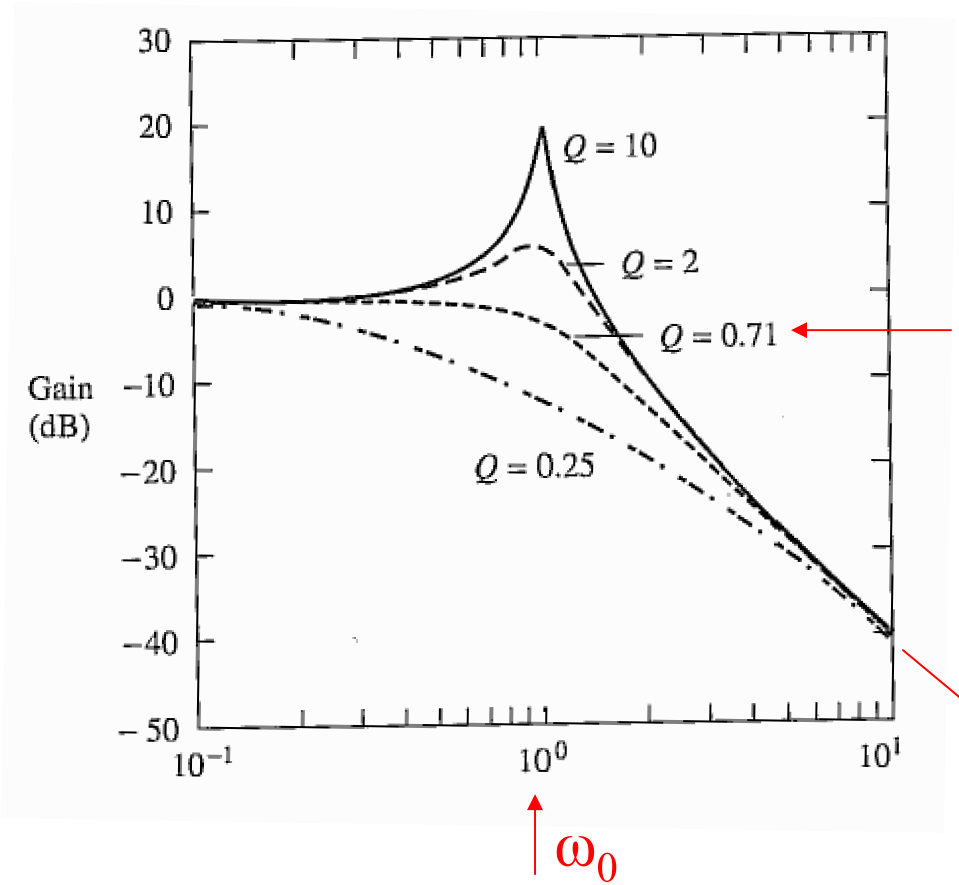
Efeito do fator de qualidade Q na resposta em frequência de um filtro passa baixa de segunda ordem.



$f_0 = 1\text{kHz}$, $Q = 10$



Filtro passa baixa de segunda ordem



Q = 1/√2 = 0.707
called "Butterworth" –
RMS deviation from ideal
is minimum

High frequency roll-off
of 40db/decade since
2nd order low-pass filter