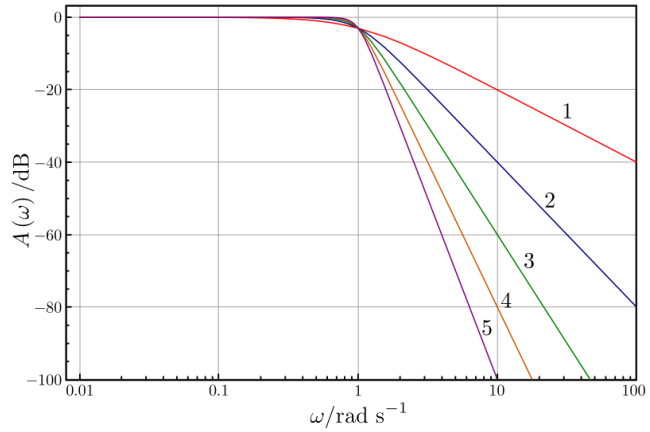
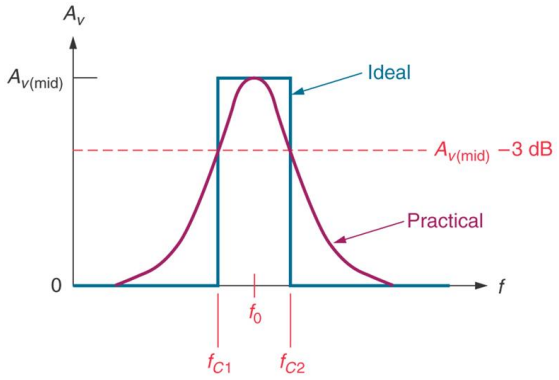
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

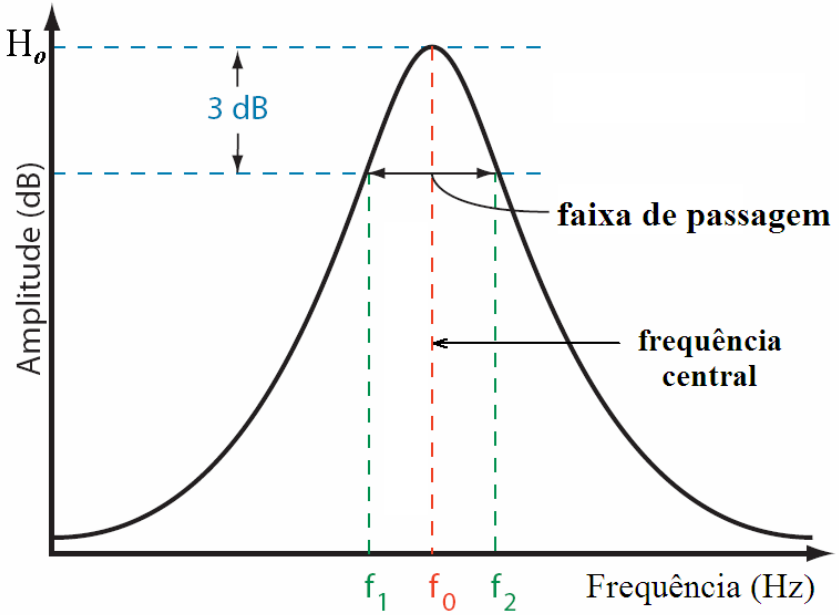
LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA

Experimento #4

Filtros analógicos ativos







EXPERIMENTO #4

Objetivos Gerais

Esta prática tem como objetivo a montagem e verificação da funcionalidade de filtros analógicos ativos. Durante o experimento o aluno deve fazer observações sobre as principais características dos filtros projetados [frequência de corte, atenuação na faixa de rejeição, ganho, faixa de passagem e fator de qualidade].

Neste experimento será analisado, a partir das funções de transferência, o comportamento de circuitos no domínio da frequência.

Objetivos Específicos

Após completar estas atividades de laboratório, o aluno deverá estar apto a:

1. Projetar um ***filtro ativo passa-baixa*** Sallen&Key de segunda ordem.
2. Projetar um ***filtro ativo passa-alta*** Sallen&Key de segunda ordem.
3. Projetar um ***filtro ativo passa-faixa*** de segunda ordem.
4. Verificar a resposta em frequência de filtros ativos.

Introdução

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

Um filtro eletrônico pode ser definido como uma malha seletiva de frequência. Representam uma classe de circuitos cujo ganho depende da frequência do sinal aplicado. Essa característica permite que os filtros sejam utilizados para selecionar uma determinada faixa de freqüências, ou para eliminar sinais indesejáveis, tais como ruídos.

Filtros são circuitos lineares que possuem uma função de transferência H(s) = Vo/Vi dependente da frequência. O propósito de um filtro é remover sinais indesejados do sinal que estamos medindo.

Um filtro atenua a quantidade de energia presente em certas freqüências (indesejáveis) ou faixas de freqüências enquanto deixa passar ou amplificar as freqüências selecionadas (desejadas). Em outras palavras, um filtro elétrico é um circuito capaz de separar algumas freqüências de outras quando misturadas.

A quantidade de atenuação para cada frequência depende do tipo de filtro e é determinada pela função de transferência do filtro correspondente.

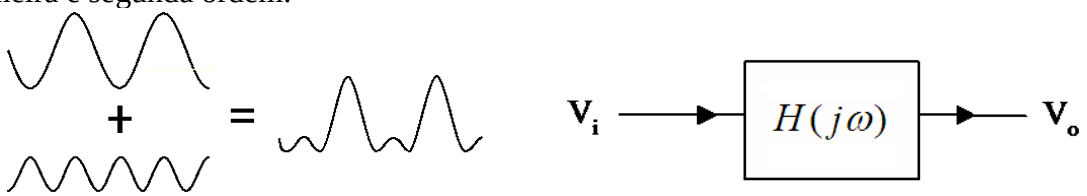
Uma das maneiras possíveis de se caracterizar um sistema é pela sua resposta em frequência, que é a resposta de regime permanente para excitação senoidal, quando a frequência varia de zero a infinito.

Para estudar a resposta em frequência, basta analisar o comportamento da função de transferência, que relaciona a tensão de entrada (excitação) com a tensão de saída (resposta).

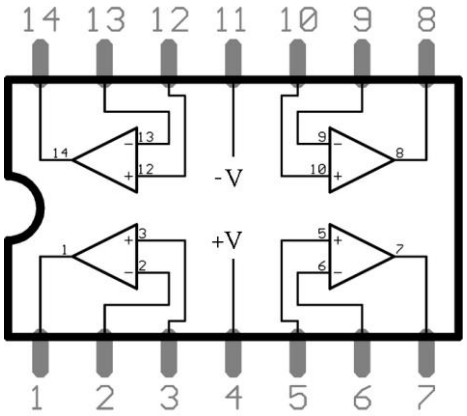
A resposta em freqüência de um filtro é determinada pela sua função de transferência H(s) e caracterizada pela faixa de passagem, frequência de corte, ganho e fator de qualidade Q.

Os filtros elétricos podem ser implementados com diversas topologias.

Filtros de ordem superior podem ser obtidos pela justaposição em série de filtros de primeira e segunda ordem.



PARTE EXPERIMENTAL



Amplificador Operacional - TL074/TL084/LM324

QUESTÕES

a) Determine a função de transferência H(s) especifica para cada filtro montado com os valores utilizados nos experimentos.
b) Determine teoricamente e experimentalmente a frequência de corte para cada filtro montado neste experimento.
c) Determine teoricamente e experimentalmente a faixa de passagem, a freqüência central, o fator de qualidade Q e as freqüências de corte inferior e superior para os filtros passa-faixas deste experimento.

MONTAGENS EXPERIMENTAIS

Montagem 1 FILTRO PASSA-BAIXA ATIVO DE SEGUNDA ORDEM – *Topologia SALLEN & KEY*

O objetivo desta montagem é verificar a funcionalidade de um filtro ativo passa baixa de segunda ordem observando a sua freqüência de corte, ganho unitário na faixa de passagem e atenuação na faixa de rejeição.

A estrutura Sallen Key é uma das mais usadas por ser simples e possuir função de transferência H(s) facilmente dedutível.

Monte o circuito da figura 1. Aplique um sinal senoidal na entrada e observe os sinais de entrada e saída simultaneamente com o osciloscópio. Inicie o experimento aplicando um sinal com amplitude de $10V_{PP}$ e com freqüência inferior a freqüência de corte teórica do filtro. Varie apenas a frequência do sinal de entrada, mantendo a amplitude constante, e observe em que frequência ocorre à atenuação de – 3dB correspondente a frequência de corte real do filtro. Compare os valores medidos com os valores teóricos esperados.

Considere $R_1 = R_2 = 10\ k\Omega$ e $C_1 = C_2 = 1nF$.

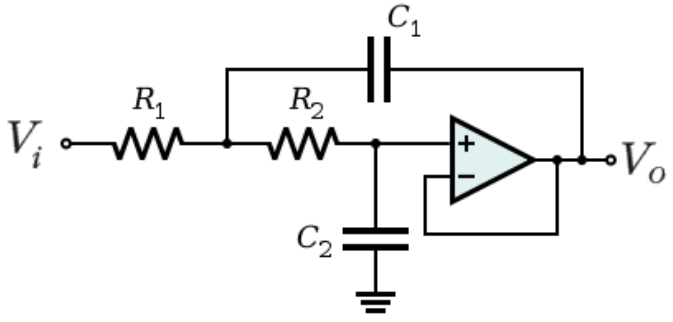
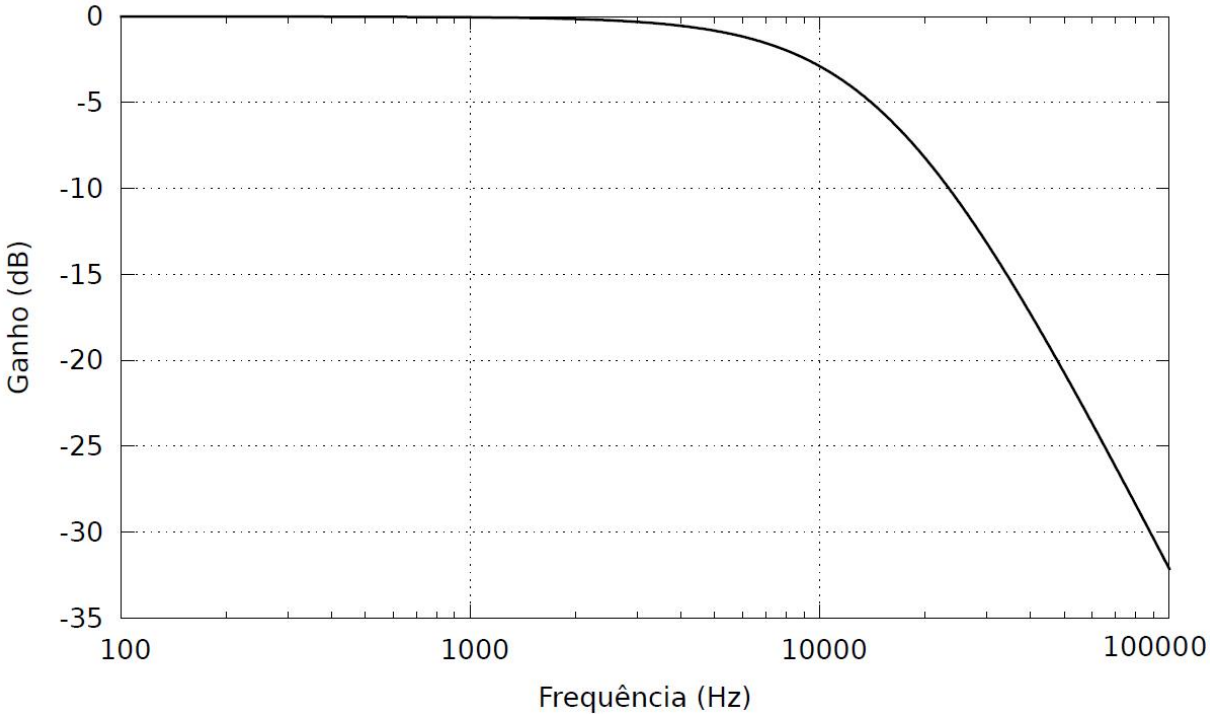


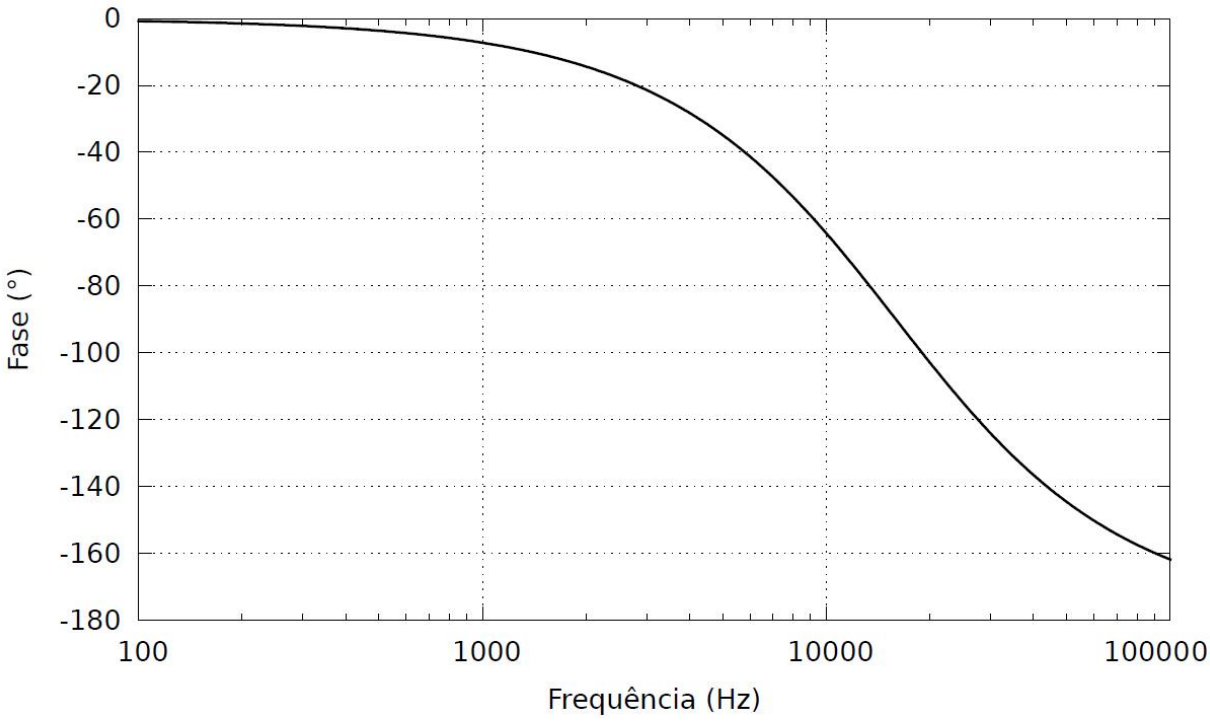
Figura 1 – Filtro Passa Baixa Sallen & Key

Função de transferência H(s) - Filtro Passa Baixa
Topologia Sallen & Key

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

DIAGRAMA DE BODE





Montagem 2 FILTRO PASSA-ALTA ATIVO DE SEGUNDA

ORDEM – *Topologia SALLEN & KEY*

O objetivo desta montagem é verificar a funcionalidade de um filtro ativo passa alta de segunda ordem observando a sua frequência de corte, ganho unitário na faixa de passagem e atenuação na faixa de rejeição.

Monte o circuito da figura 2. Repita o mesmo procedimento efetuado na montagem anterior e observe em que frequência ocorre à atenuação de – 3dB correspondente a freqüência de corte do filtro. Compare os valores medidos com os valores teóricos esperados. R_1= R_2=10 kΩ e C_1= C_2=1nF.

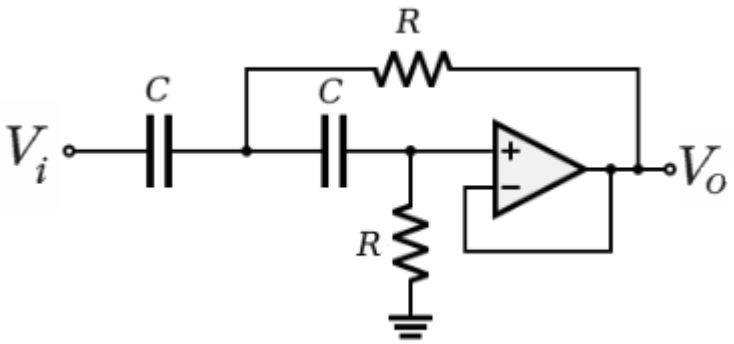
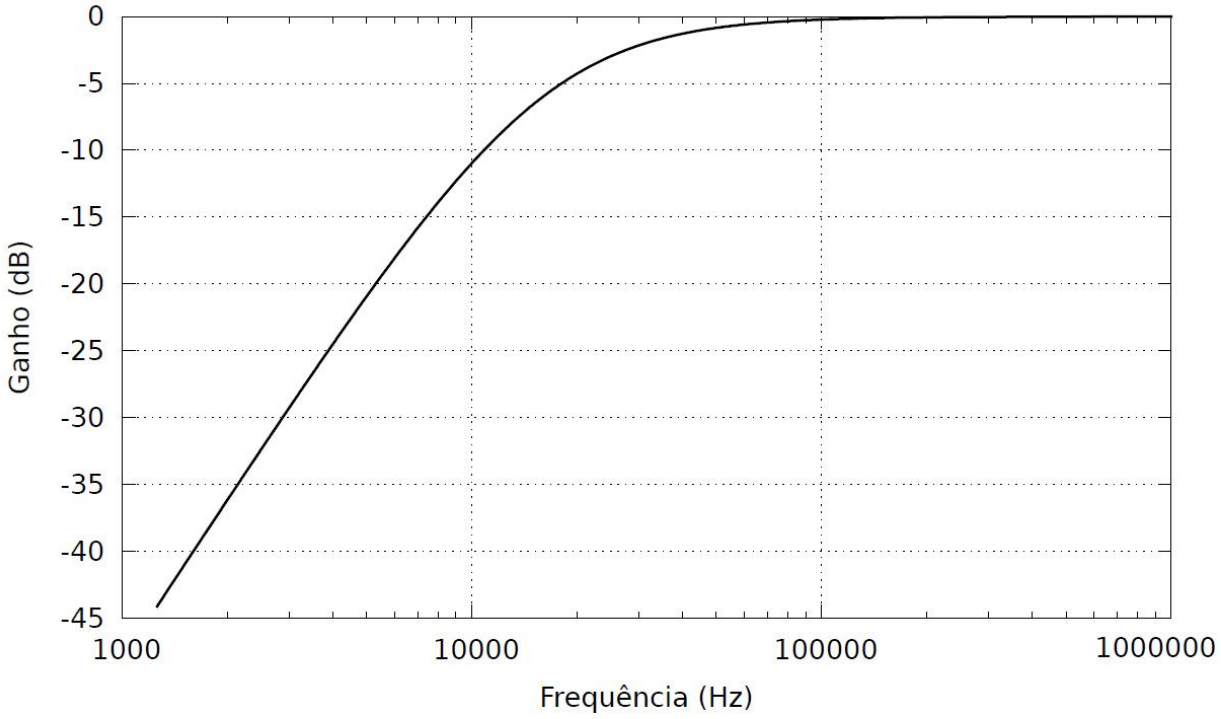


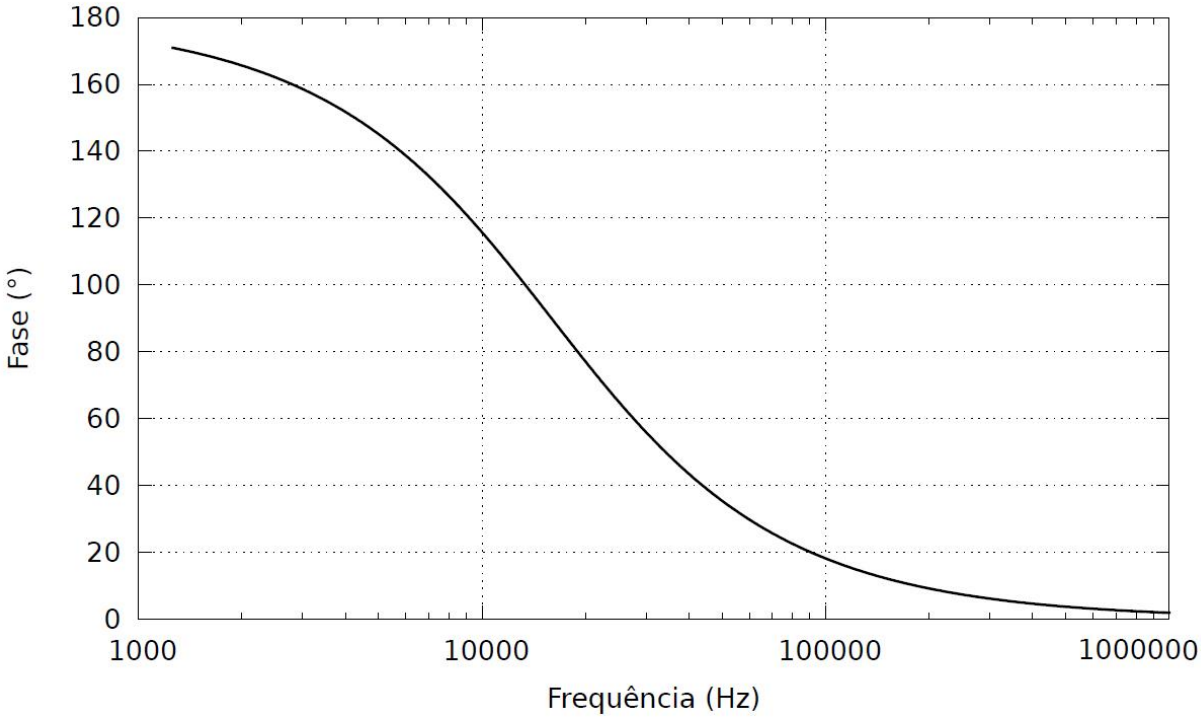
Figura 2 - Filtro Passa Alta Sallen & Key

Função de transferência H(s) - Filtro Passa Alta – Topologia Sallen & Key

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

DIAGRAMAS DE BODE





Estes filtros podem ser conectados em série para a obtenção de filtros de ordem superior. Por exemplo, dois destes filtros (passa-baixa, passa-alta) colocados em série constituem um filtro de quarta ordem.

Questão Teórica 1 FILTRO PASSA-FAIXA ATIVO

Observe que é possível a construção de um filtro passa-faixa pela conexão em cascata de um filtro passa-baixas com um filtro passa-altas conforme mostrado na figura 3. Encontre a função de transferência H(S) e determine a ordem do filtro.

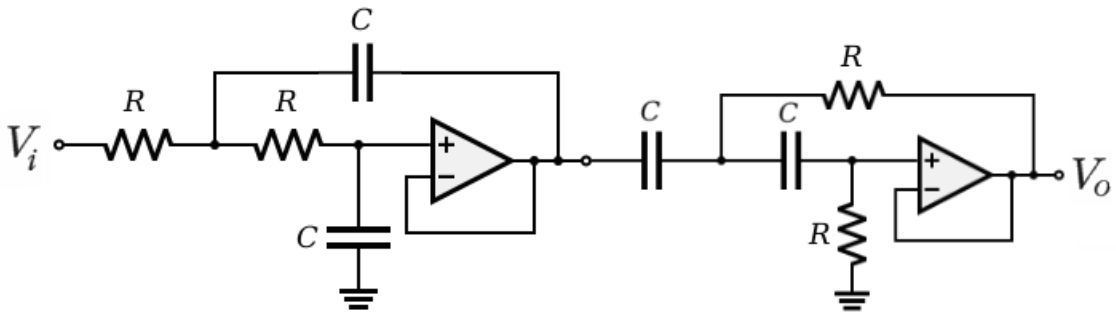


Figura 3 – Filtro Passa-Faixa

Questão Teórica 2 FILTRO PASSA-FAIXA PASSIVO

*Encontre a **função de transferência H(s)** para o circuito da figura 4 e mostre que o mesmo corresponde a um **filtro passa-faixa.** Determine **o fator de qualidade Q e a faixa de passagem**. Projete-o para uma frequência central de 1 kHz. Determine as frequências de corte inferior e superior.*

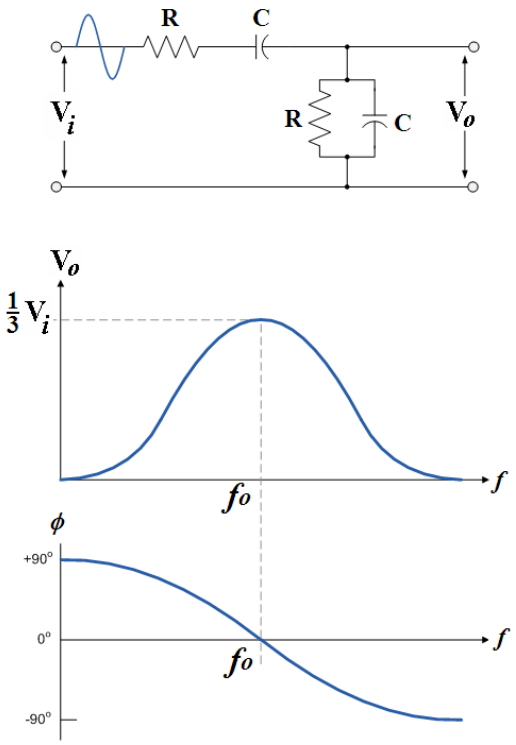


Figura 4 – Filtro Passa-Faixa passivo

Montagem 3 FILTRO PASSA-FAIXA ATIVO DE SEGUNDA ORDEM *Topologia Rauch (Múltipla Realimentação)*

O objetivo desta montagem é verificar a funcionalidade de um filtro ativo passa faixa de segunda ordem observando a sua frequência central, frequências de corte inferior e superior, ganho na faixa de passagem e fator de qualidade Q.

A figura 5 mostra uma topologia genérica usando amplificador operacional com múltipla realimentação aplicada na implementação de filtros ativos de segunda ordem. Nesta topologia, as admitâncias Y podem ser representadas por resistores e capacitores, que dependendo do seu posicionamento no circuito o torna um filtro passa-baixa, passa-alta ou passa-faixa.

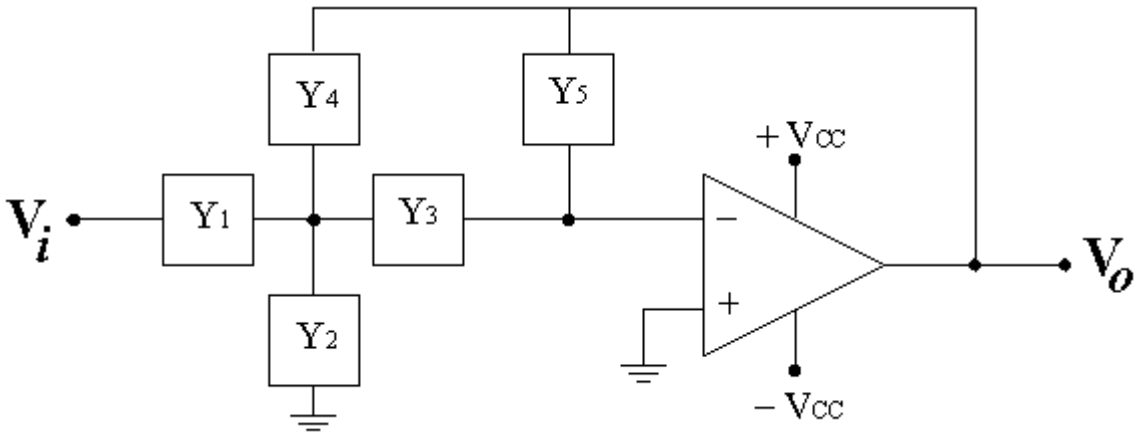


Figura 5 – TOPOLOGIA RAUCH PARA FILTROS ATIVOS DE SEGUNDA ORDEM

Função de transferência para a topologia múltipla realimentação mostrada na figura 5.

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

$$Y_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{4k7} \qquad Y_3 = sC_3$$

$$Y_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{270\Omega} \qquad Y_4 = sC_4$$

$$C_3 = C_4 = 10nF$$

$$Y_5 = \frac{1}{R_5} = \frac{1}{680k\Omega}$$

A figura 6 a configuração de circuito usando amplificador operacional com múltipla realimentação para implementação de um filtro ativo passa faixa de segunda ordem.

Monte o circuito da figura 6. Aplique um sinal senoidal na entrada e observe os sinais de entrada e saída simultaneamente com o osciloscópio. Inicie o experimento aplicando um sinal com frequência inferior a frequência central do filtro. Varie apenas a frequência do sinal de entrada, mantendo a amplitude do sinal de entrada constante, e observe em que frequência ocorre o ganho máximo correspondente a frequência central do filtro. Diminua a frequência e observe a frequência de corte inferior. Aumente a frequência e observe a frequência de corte superior. A partir dos valores obtidos experimentalmente determine o fator de qualidade Q e a faixa de passagem. Compare os valores medidos com os valores teóricos esperados.

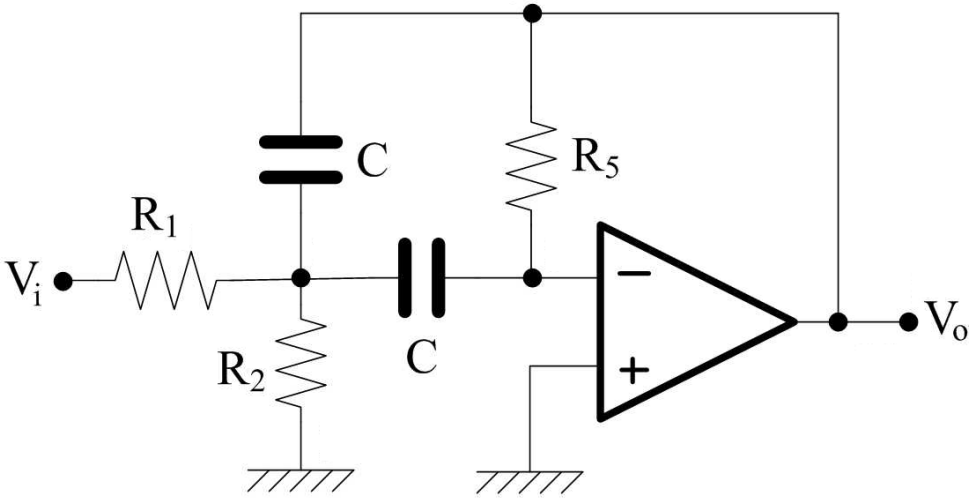


Figura 6 – *FILTRO ATIVO PASSA-FAIXA*

Substituindo-se as respectivas admitancias na expressão geral encontra-se a função de transferência H(s) para o filtro passa faixa de segunda ordem em função de seus componentes (resistores e capacitores).

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

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

Associando-se os coeficientes da equação geral com os respectivos coeficientes da função de transferência H(s) para o filtro passa faixa de segunda ordem mostrado na figura 6 obtém-se os parâmetros do respectivo filtro, conforme apresentados a seguir.

A figura 7 mostra a resposta em frequência para H(s).

$$H(s) = H_o \frac{s\frac{\omega_o}{Q}}{s^2 + s\frac{\omega_o}{Q} + \omega_0^2} \qquad H_0 = -\frac{R_5}{2R_1}$$

DIAGRAMAS DE BODE

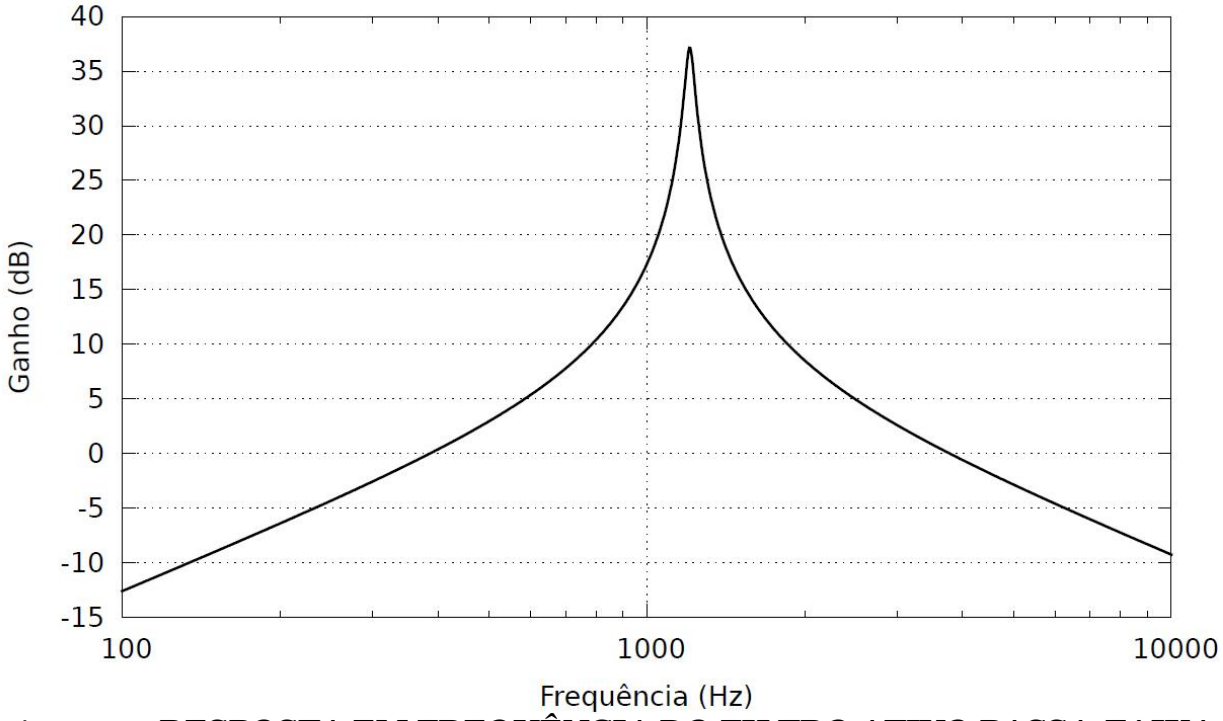
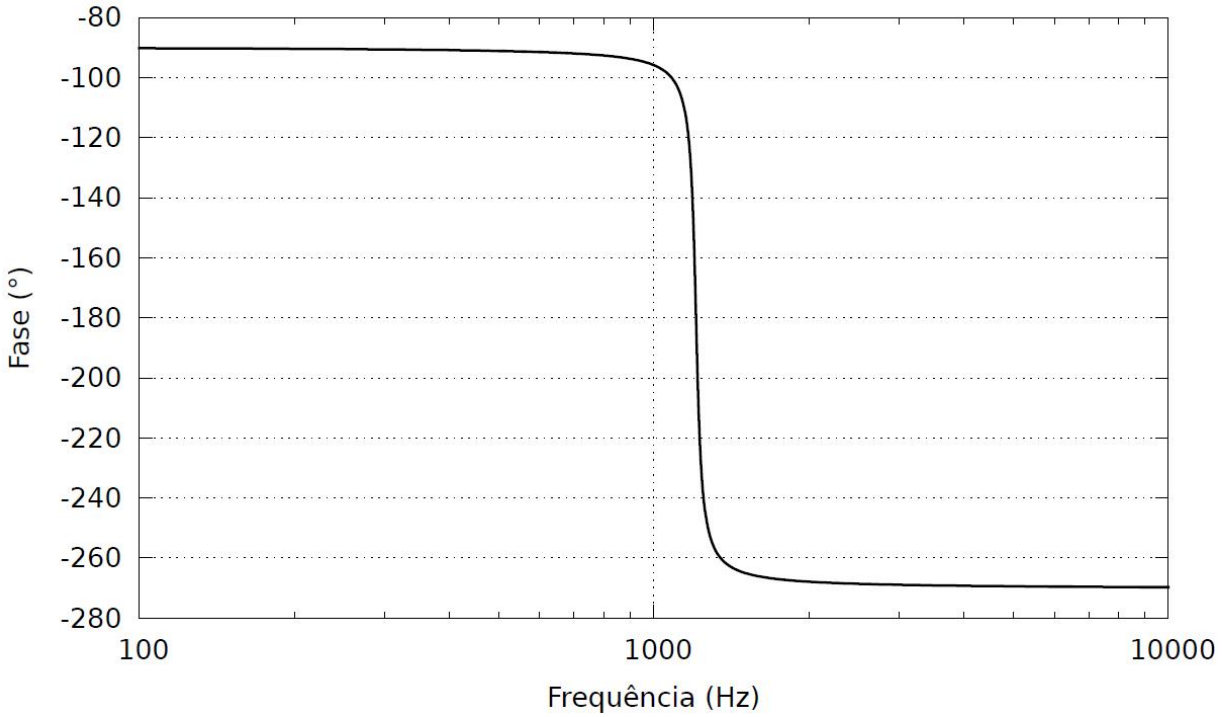


Figura 7 – *RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO ATIVO PASSA-FAIXA*



$$|H_0| = \frac{R_5}{2R_1} = 72{,}34$$

$$|H_0| = 37{,}2\,dB$$

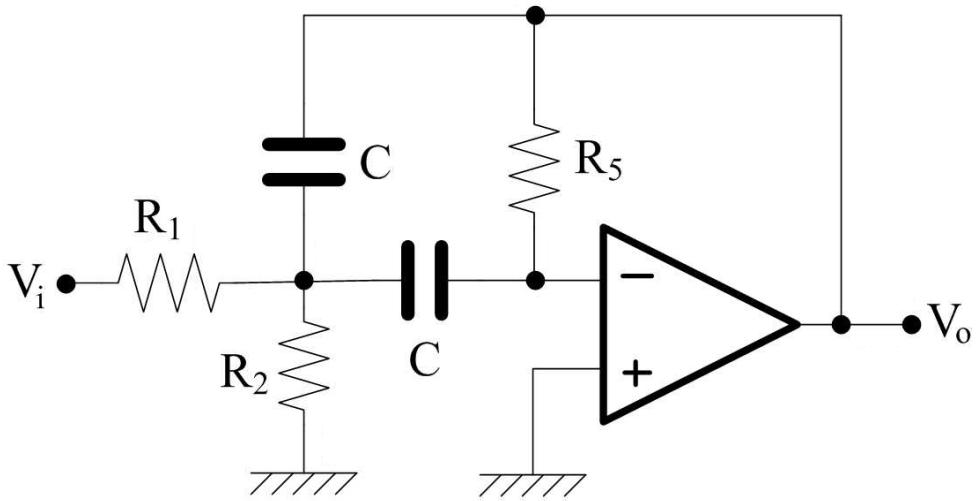
$$\omega_0 = 7590\ rd/s$$

$$f_0 = 1208\,Hz$$

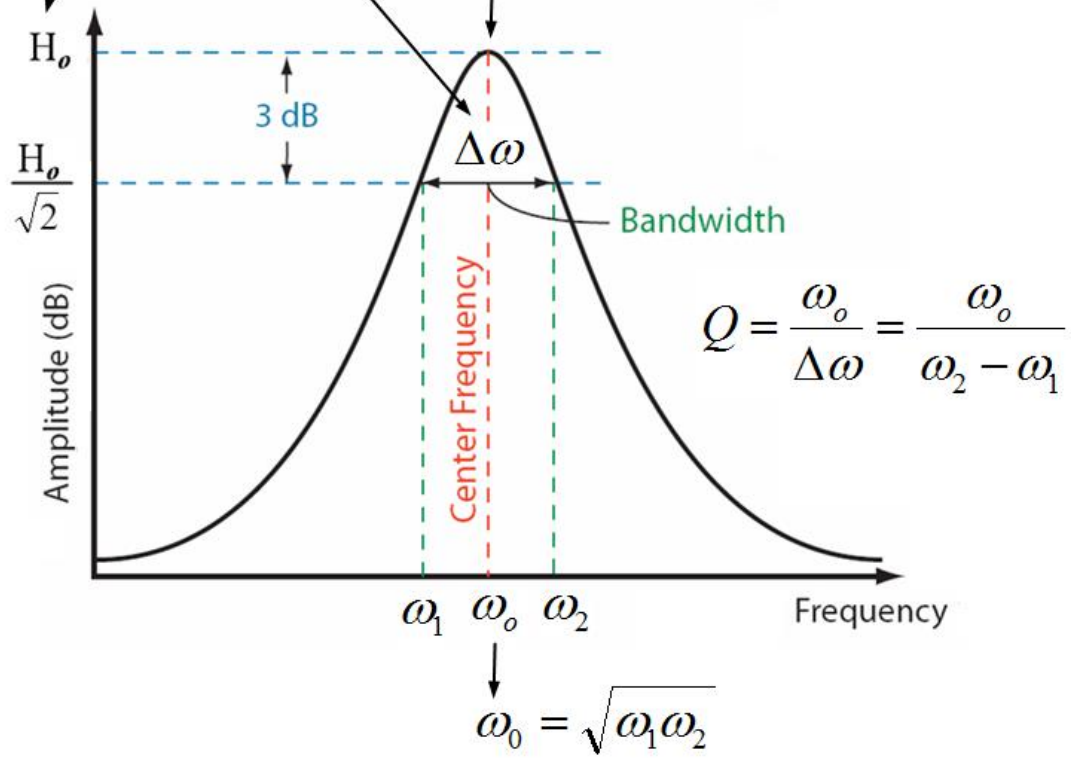
$$\Delta f = 46{,}8\,Hz$$

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = 25{,}8$$

FILTRO PASSA-FAIXA



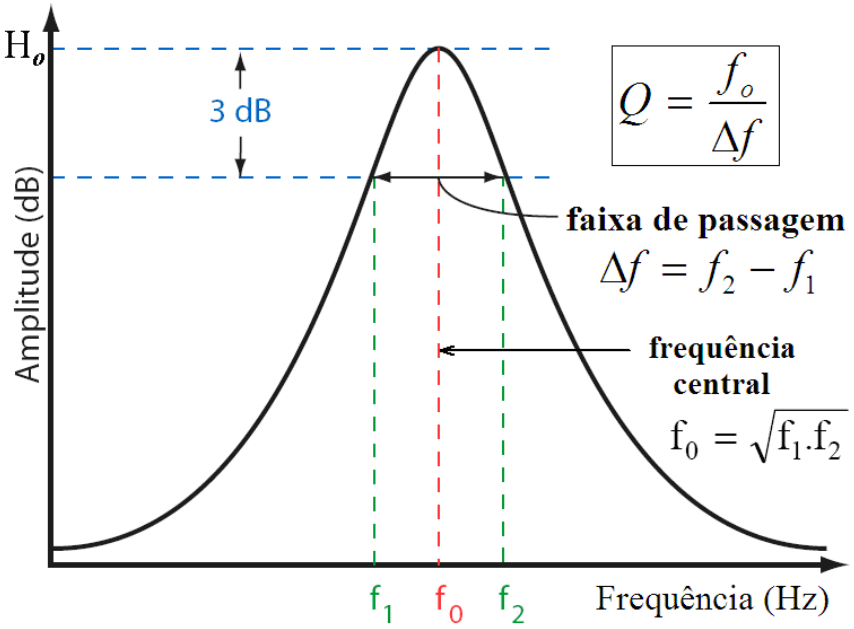
$$H(s) = \underbrace{-\frac{R_5}{2R_1}}_{H_o} \frac{\overbrace{\frac{2}{R_5C}}^{\Delta\omega = \frac{\omega_o}{Q}} s}{s^2 + \frac{2}{R_5C}s + \underbrace{\frac{(R_1+R_2)}{R_1R_2R_5C^2}}_{\omega_o^2}} = H_o \frac{\frac{\omega_o}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q}s + \omega_o^2}$$



$$Q = \frac{\omega_o}{\Delta\omega} = \frac{\omega_o}{\omega_2 - \omega_1}$$

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

Curva característica do filtro passa faixa de segunda ordem



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

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

Equações para projeto de um filtro ativo passa faixa

$f_0 = \frac{1}{2\pi C}\sqrt{\left[\frac{1}{R_5}\frac{(R_1+R_2)}{R_1R_2}\right]}$	$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{2}{R_5C}$
$Q = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_5(R_1+R_2)}{R_1R_2}}$	$Q = \frac{\omega_0 R_5 C}{2}$
$\omega_0^2 = \frac{(R_1+R_2)}{R_1R_2R_5C^2}$	$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{2}{R_5C}$

Referente ao circuito mostrado na figura 6

- Dois filtros passa-faixas idênticos quando colocados em série é equivalente a um filtro passa-faixa com faixa de passagem menor e fator de qualidade maior. Considerando Q_1 o fator de qualidade individual de cada filtro passa faixa o fator de qualidade Q total equivalente é igual a

$$Q = \frac{Q_1}{\sqrt{\sqrt[N]{2} - 1}}$$

Questões Teóricas: O que você entende por **seletividade** de um filtro passa-faixa? Determine o **fator de qualidade Q** e a **faixa de passagem** correspondente para uma **associação em série de 3 filtros idênticos** ao da figura 6.

Relacione algumas vantagens e desvantagens dos filtros passivos e ativos.

Questão Teórica 3 FILTRO PASSA-BAIXA ATIVO

Considere o filtro ativo passa baixa, mostrado na figura 8, obtido a partir da topologia Rauch mostrada na figura 5.

Encontre a função de transferência H(S) e determine os respectivos parâmetros do filtro (H_o, Q e ω_o).

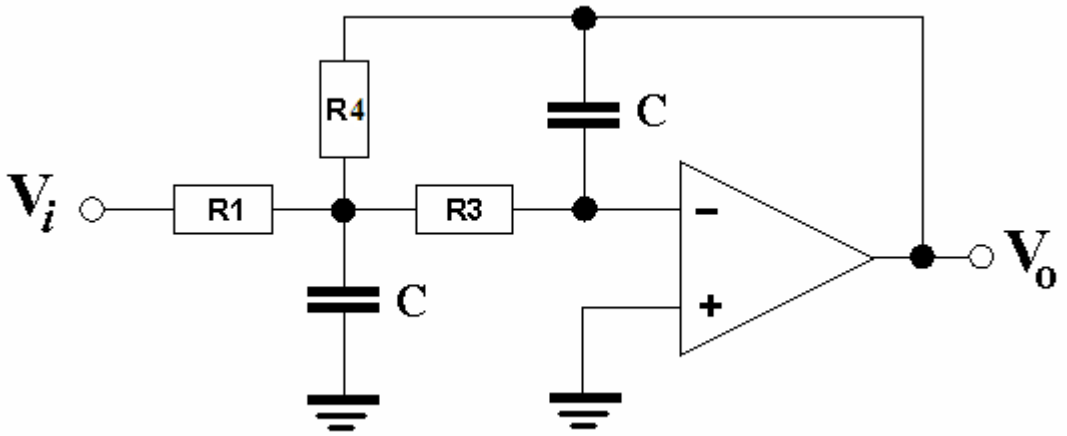


Figura 8 – *FILTRO ATIVO PASSA-BAIXA DE SENGUNDA ORDEM*

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

Equação geral de um filtro passa baixa de segunda ordem

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

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

$$\downarrow$$

$$\omega_o^2$$

Filtro Butterworth

$$\omega_o = \omega_c$$

Determine a resposta em frequência para o filtro passa baixa da Figura 8, considerando os componentes a seguir.

$$Y_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{10k\Omega} \qquad Y_2 = sC_4$$

$$Y_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1k\Omega} \qquad Y_5 = sC_5$$

$$Y_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{10k\Omega} \qquad C_4 = C_5 = C = 1nF$$

$$\boxed{\begin{aligned} R_1 &= R_4 = 10k \\ R_3 &= 1k \\ C &= 1nF \end{aligned}}$$

Escalonamento em Frequência – Desnormalização

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \qquad para \qquad \omega = 1rd/s$$

Podemos projetar filtros para qualquer outra frequência de corte substituindo-se s por s/ω_c.

Por exemplo, para ω_c = 100 *rad/s*

$$H(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2 + \sqrt{2}\left(\frac{s}{\omega_c}\right) + 1}$$

$$H(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{100}\right)^2 + \sqrt{2}\left(\frac{s}{100}\right) + 1}$$

$$H(s) = \frac{10^4}{s^2 + 100\sqrt{2}s + 10^4}$$

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE UM CRISTAL

Uma compreensão da funcionalidade de um oscilador a cristal de quartzo ou cerâmica pode fornecer aos engenheiros projetistas um melhor entendimento dos osciladores a cristais. Entender como um cristal de quartzo opera permite uma compreensão de como ele se comporta em um circuito oscilador.

Os cristais de quartzo têm características muito desejáveis para o uso em circuitos osciladores sintonizados. Suas frequências de oscilação natural são muito estáveis, a ressonância tem um fator de qualidade muito alto (Q), que vai de 10.000 a várias centenas de milhares alem de uma boa estabilidade com a temperatura.

O cristal de quartzo é um componente indispensável e importante na tecnologia eletrônica em geral. O uso de cristais osciladores é indicado quando for necessária alta estabilidade em frequência.

O quartzo é um material piezoelétrico e quando um campo elétrico é aplicado sobre ele, um deslocamento físico ocorre. Inversamente, quando uma tensão alternada é aplicada ao cristal, ele vibra na frequência da tensão aplicada.

A maior vibração ocorre na frequência natural de ressonância do cristal.

Um cristal possui duas frequências ressonantes caracterizadas por uma mudança de fase zero. Um cristal de quartzo fornece uma frequência de ressonância série ω_S *e uma frequência ressonância paralela* ω_p *.*

A frequência de ressonância série é determinada na frequência em que as reatâncias indutiva e capacitiva são iguais e se cancelam, isto é, XL1 = XC1. Neste caso o cristal comporta-se como um dispositivo resistivo. Portanto, quando o cristal está operando na sua frequência de ressonância série Fs a sua impedância será mínima e a corrente será máxima. Na ressonância série, o valor de X_{C0}*>>R1, como resultado, aparece resistivo no circuito, com um valor muito próximo R1.*

Monte o circuito da figura 9. Aplique um sinal senoidal na entrada e varie a frequência a partir de 1 kHz. Observe a resposta em frequência do cristal usando o osciloscópio e verificando os sinais de entrada e saída simultaneamente, enquanto varia a frequência. Determine experimentalmente as frequências de ressonância série ω_S *[reatância mínima do cristal] e paralela* ω_p *[reatância máxima do cristal]. Meça os valores da tensão de entrada e saída na frequência de ressonância série e determine, a partir dos valores medidos, o valor da resistência série do cristal* R_x *.*

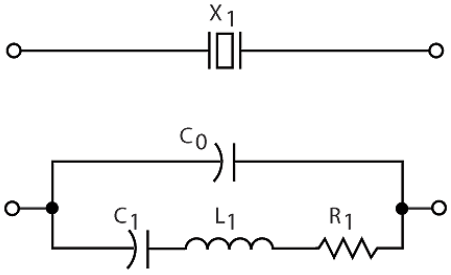
Observe que na ressonância série o cristal comporta-se como uma impedância puramente resistiva, considerando-se que a capacitância dos eletrodos representada por C_p *é pequena. Neste caso o sinal de saída encontra-se em fase com o sinal de entrada.*

Considere $R_1 = 100\Omega$ *e* $R_2 = 220\Omega$.

MODELO ELÉTRICO DO CRISTAL

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \times \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}}$$



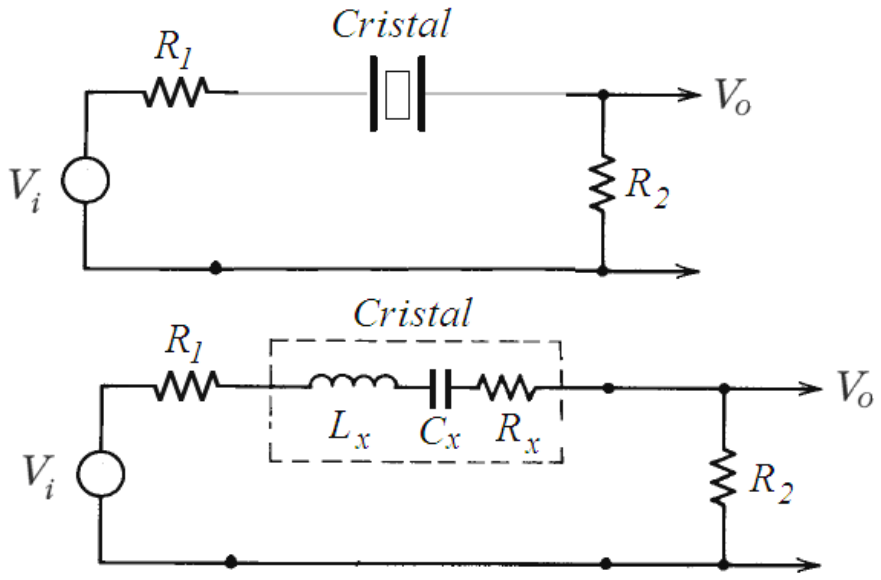
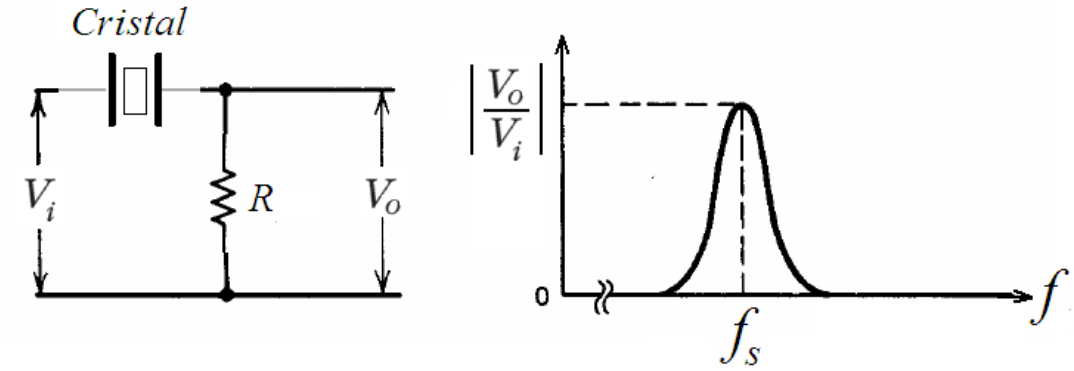
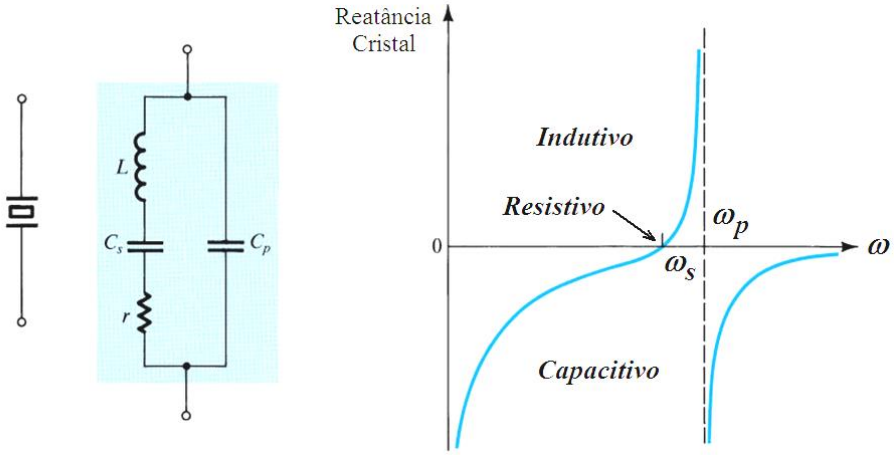


Figura 9 – Análise de um circuito a Cristal

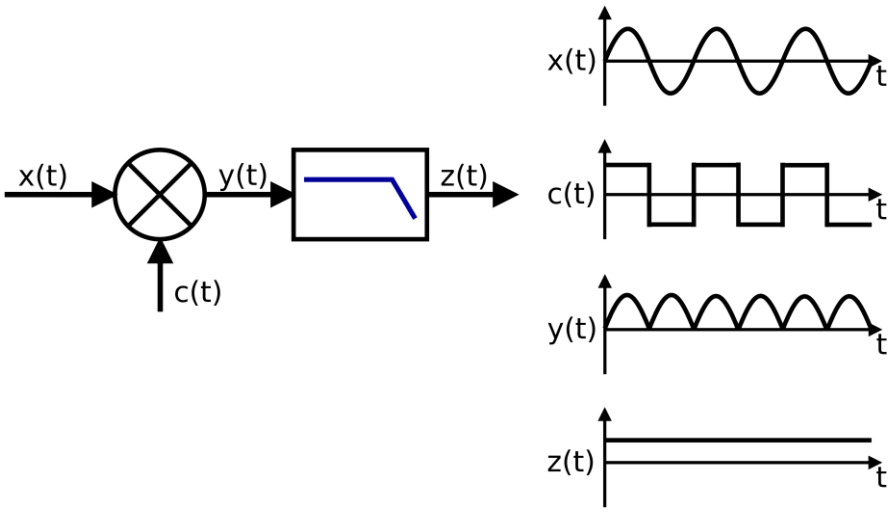


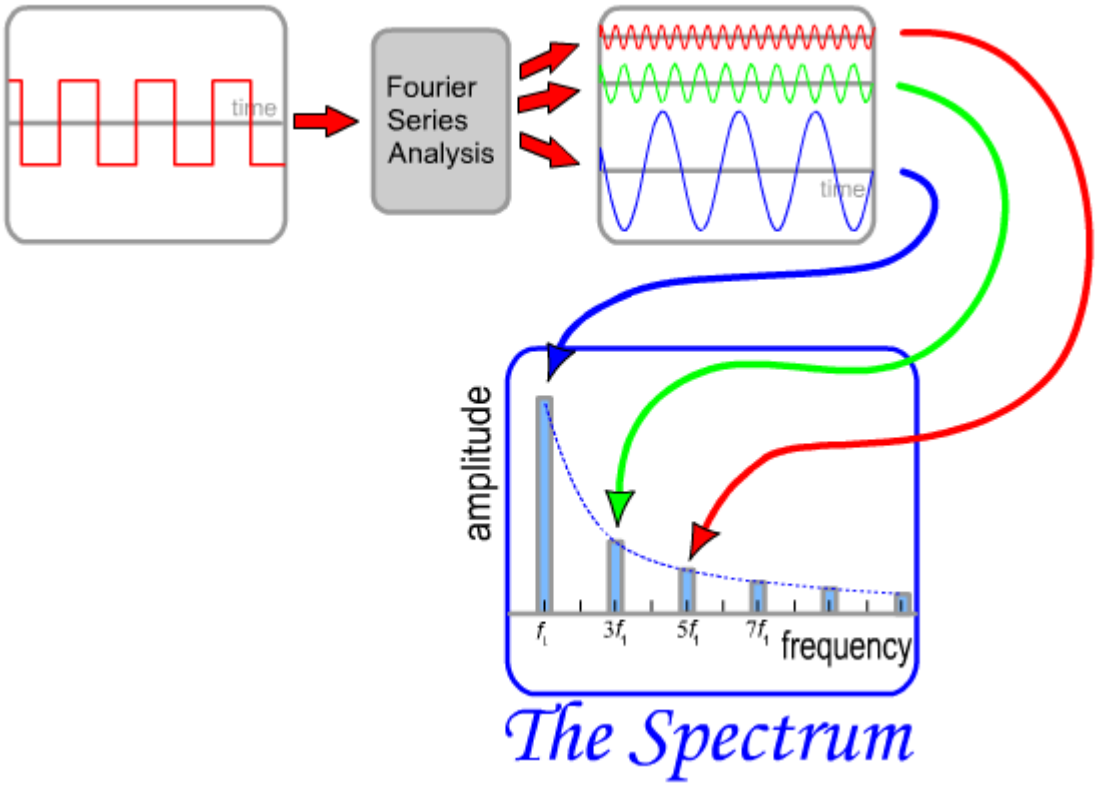
Modelo Elétrico e Curva Característica do Cristal



Demodulador AM

O demodulador a seguir é composto de um misturador (mixer) e um filtro passa baixa.


x(t)
y(t)
z(t)
c(t)
x(t)
t
c(t)
t
y(t)
t
z(t)
t

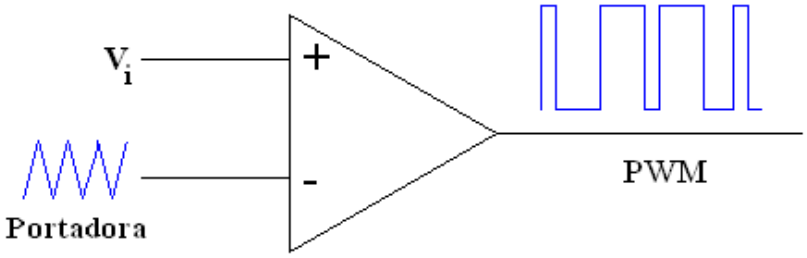

time
Fourier
Series
Analysis
time
amplitude
f_1
$3f_1$
$5f_1$
$7f_1$
frequency
The Spectrum

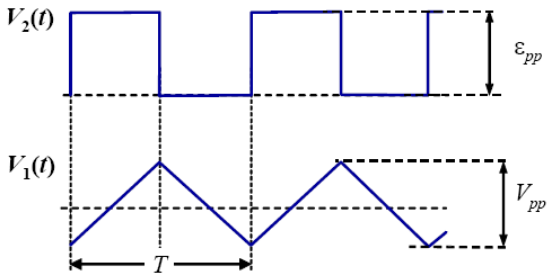
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

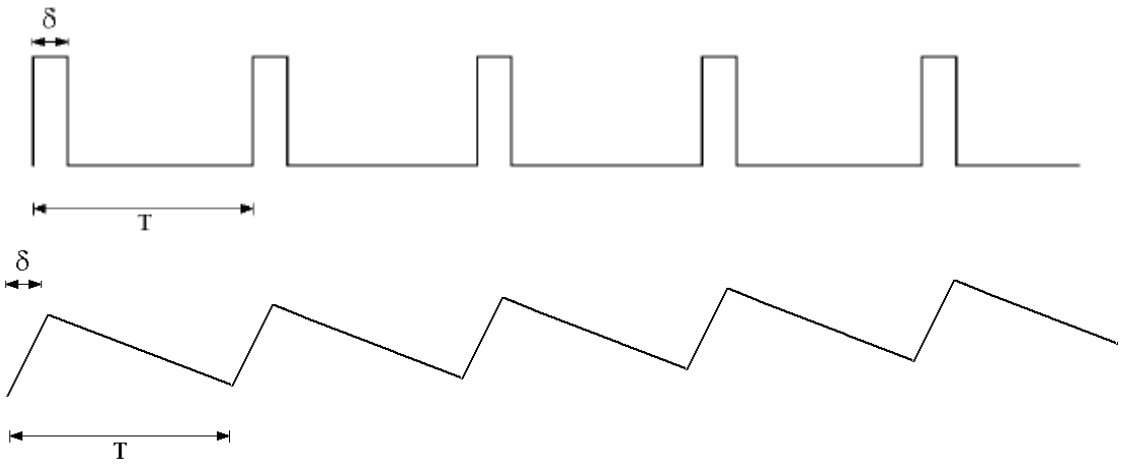
LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA

Experimento #5

GERADORES DE SINAIS
Gerador de onda quadrada e exponencial
Gerador de onda triangular
Gerador de rampa e pulso







EXPERIMENTO #5

Objetivos Gerais

Esta prática tem como objetivo a montagem e verificação da funcionalidade de um oscilador astável, gerador de pulso e um gerador de onda triangular e rampa. Montagem de um gerador de onda quadrada, pulso, triangular e rampa crescente e decrescente.

Objetivos Específicos

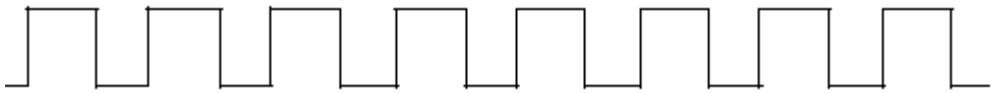
Após completar estas atividades de laboratório, o aluno deverá estar apto a:
1. Projetar um oscilador de onda quadrada e triangular.
2. Projetar um gerador de pulso e rampa.
3. Projetar um multivibrador astável.

Questões Teóricas

(1) Explique o ***princípio de funcionamento do gerador de onda quadrada*** apresentado na montagem 1. Determine as expressões para os cálculos da frequência e da amplitude do sinal gerado a partir do circuito.
Sugestão: Sugira aplicações para os circuitos montados neste experimento usando sensores de temperatura, umidade, força, pressão e luminosidade.

MONTAGENS EXPERIMENTAIS

Montagem 1 OSCILADOR DE ONDA QUADRADA E EXPONENCIAL



A figura 1 representa o circuito de um gerador de onda quadrada. Seu funcionamento é bastante simples, o tempo de comutação é feito através da realimentação negativa, onde o capacitor carrega-se exponencialmente até atingir a referência positiva $V_+ = \beta V_o$, neste ponto o capacitor começa a descarregar até atingir a referência negativa $V_- = -\beta V_o$. Veja ilustração a seguir.

O circuito da figura 1 não tem sinal de excitação na entrada, entretanto o circuito gera uma onda quadrada na saída. É um circuito comparador com realimentação positiva definindo duas tensões limiares (*threshold*) que dependem do valor de V_+, que é dada por:

$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o = \beta V_o$. Suponha que a saída V_o esteja inicialmente no nível V_{CC} (saturação positiva). O capacitor C se carrega exponencialmente em direção V_{CC}, mas nunca atinge este valor, pois ao atingir a tensão de limiar dada por βV_o, a diferença $(V_+ - V_-)$ fica negativa e neste momento a saída inverte a tensão para $-V_{CC}$. Desta maneira o capacitor inverte o sentido de sua carga. A tensão do capacitor diminui como mostra a figura 2. Quando a tensão no capacitor atinge o nível $-\beta V_{CC}$ a saída muda novamente para $+V_{CC}$. Desta maneira a saída é uma onda quadrada como mostrada na figura 2.

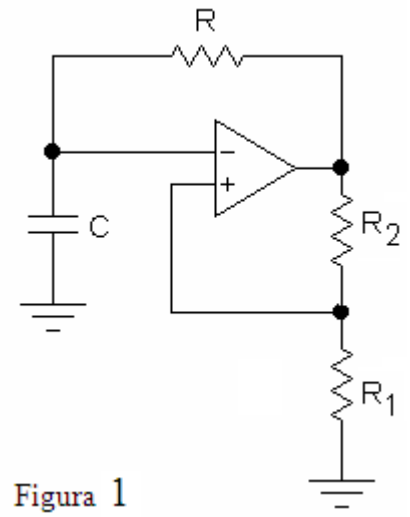
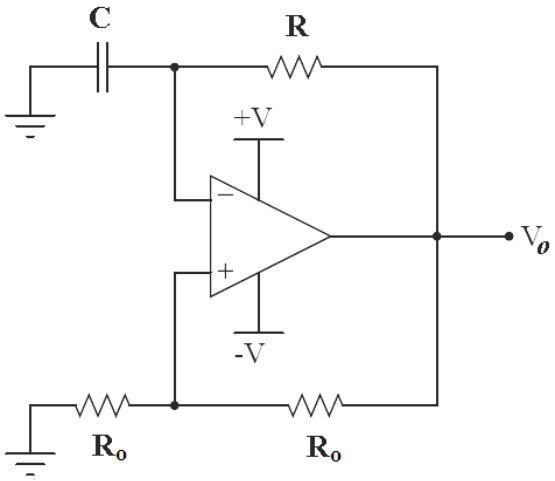
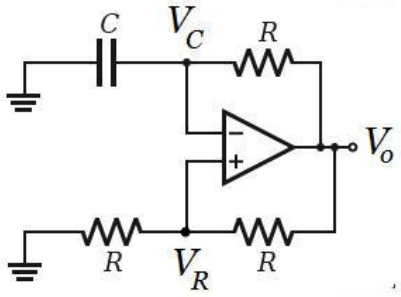


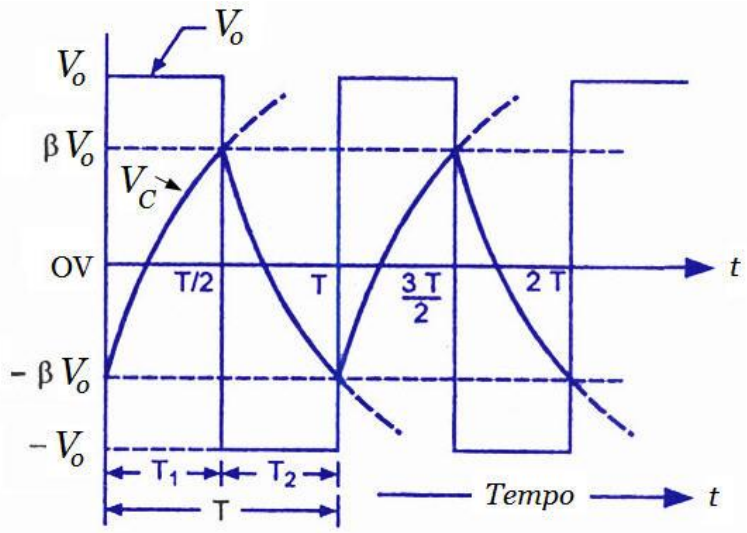
Figura 1



$$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o = \beta V_o$$



$$T = 2RC \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)$$



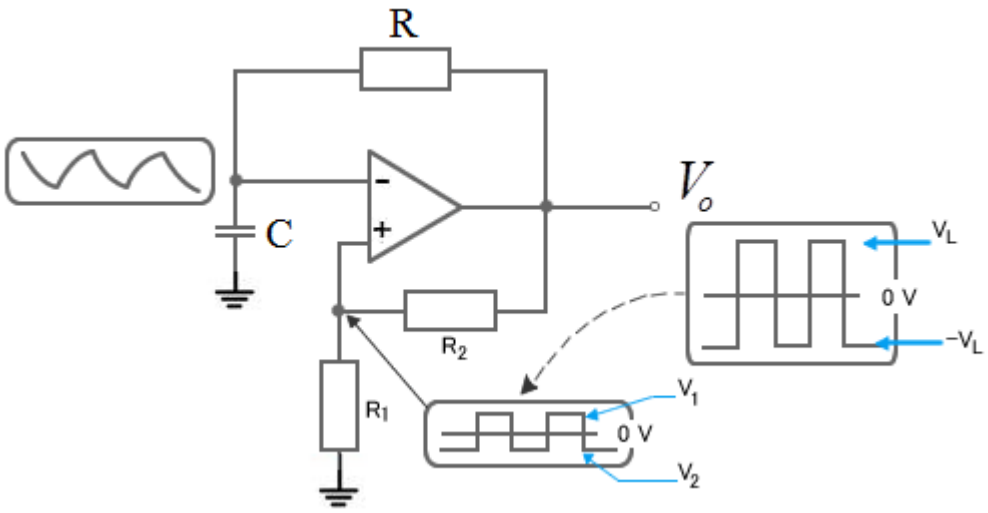


Figura 2

O período de oscilação T pode ser facilmente encontrado e é dado pela expressão: $T = 2RC \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)$.

Monte o circuito da figura 1. Considere R_1=R_2=R=10kΩ e C=10nF. Conecte os canais do osciloscópio na saída e na entrada inversora do Amp-Op. Observe as formas de onda obtidas. Meça a frequência e compare com o valor teórico esperado.

Acrescente ao resistor R um potenciômetro R_P= 47kΩ, conforme mostrado na figura 3. Varie o potenciômetro para obter ondas quadradas com diferentes frequências. Substitua o potenciômetro por um ***fotoresistor*** e observe a variação de frequência em função da incidência de luz sobre o mesmo (***oscilador de onda quadrada com frequência dependente da luz***). A frequência do oscilador aumenta ou diminui com o aumento da intensidade luminosa? Observe experimentalmente e justifique teoricamente.

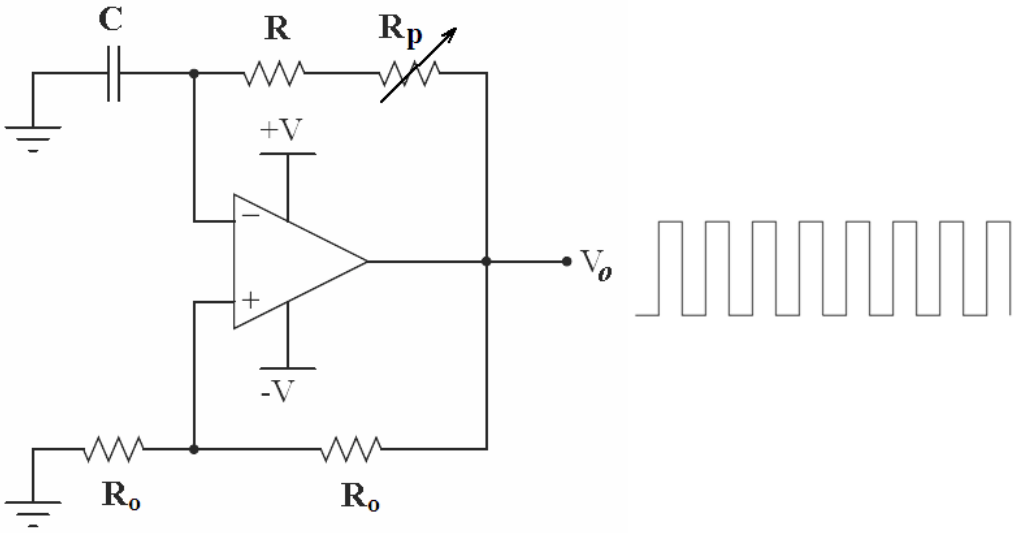


Figura 3

Montagem 2 GERADOR DE PULSOS

O oscilador de onda quadrada pode ser modificado para funcionar como um gerador de pulsos. Neste caso o resistor R que determina a constante de tempo de carregamento e descarregamento com o capacitor C é substituído por dois resistores (R_1 e R_2) e diodos fornecendo caminhos distintos para carregar e descarregar o capacitor C, formando assim duas constantes de tempo, ou seja, $\tau_1 = R_1 C$ *e* $\tau_2 = R_2 C$. Desta forma, na saída tem-se uma assimetria entre os tempos de saturação positiva e negativa do amplificador operacional, gerando pulsos conforme mostrado na figura 4.

Monte o circuito da figura 4. R_1 =R_o =10kΩ, R_2=100kΩ e C=10nF.

Conecte os canais do osciloscópio na saída e na entrada inversora do Amp-Op. Observe as formas de ondas obtidas. Inverta simultaneamente as polaridades dos 2 diodos e observe novamente as formas de ondas obtidas. Compare e justifique com os valores obtidos antes da inversão de polaridade dos diodos.

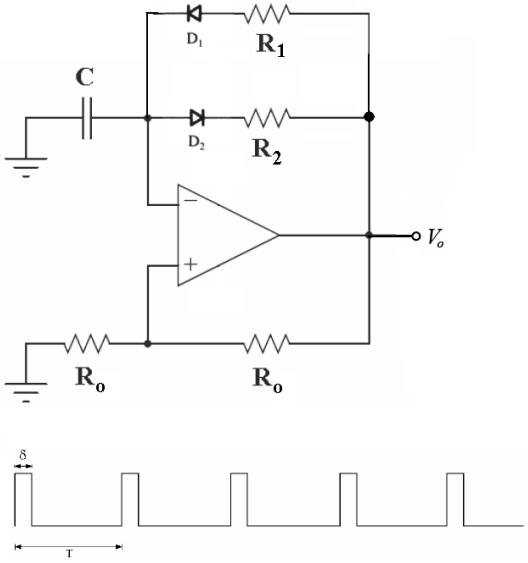


Figura 4

GERAÇÃO DE ONDA TRIANGULAR E RAMPA

A partir de uma onda quadrada ou pulso aplicado na entrada de um circuito integrador obtém-se uma onda triangular ou rampa, conforme ilustrado na Figura 5.

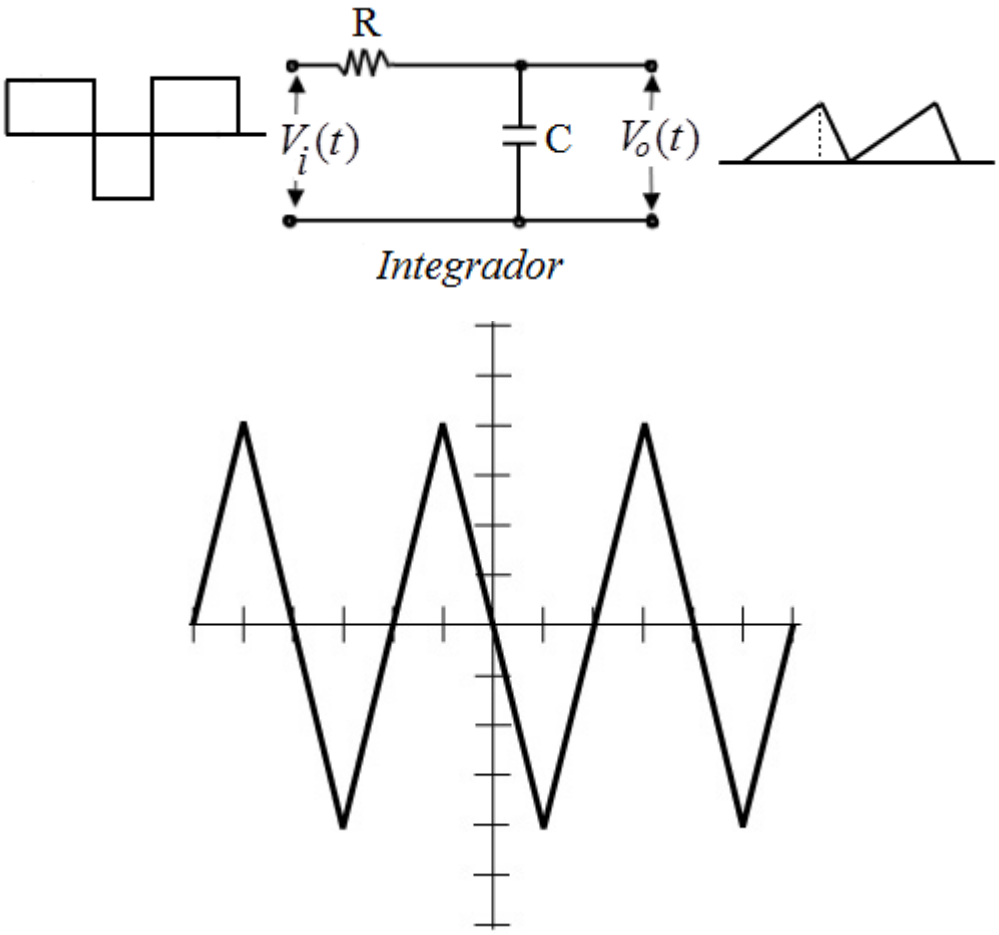


Figura 5

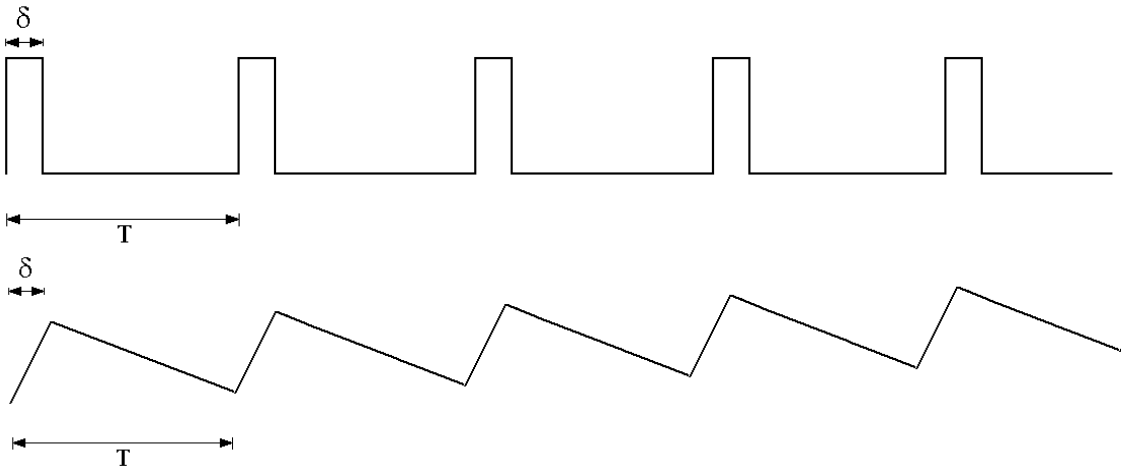


Figura 6

Montagem 3 GERADOR DE ONDA QUADRADA E TRIANGULAR

(I) Monte o circuito da figura 7 e observe as tensões nos pontos V_S e V_o.

(II) Substitua R por um potenciômetro e observe a variação da frequência dos sinais.

$$R_1 = 8k2 \quad R_2 = 10k\Omega \quad R = 10k\Omega \quad C = 10nF$$

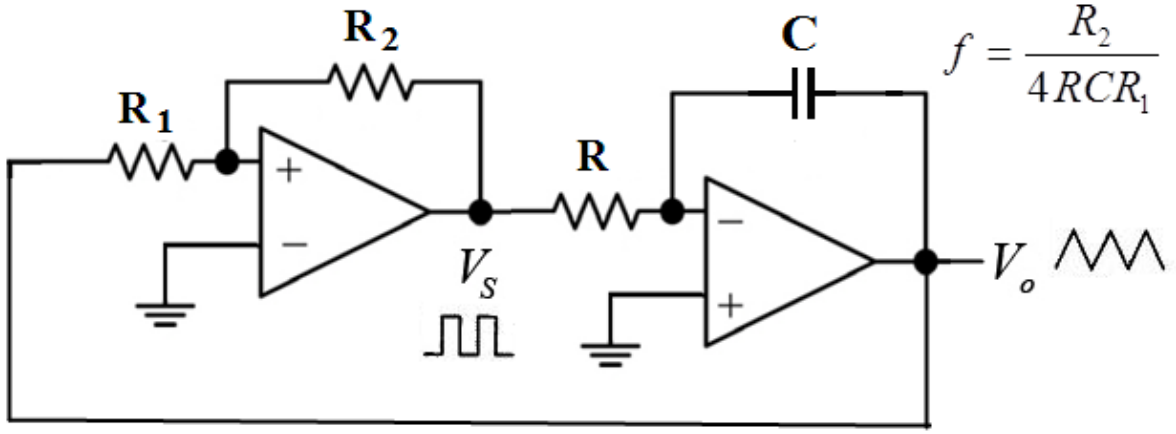
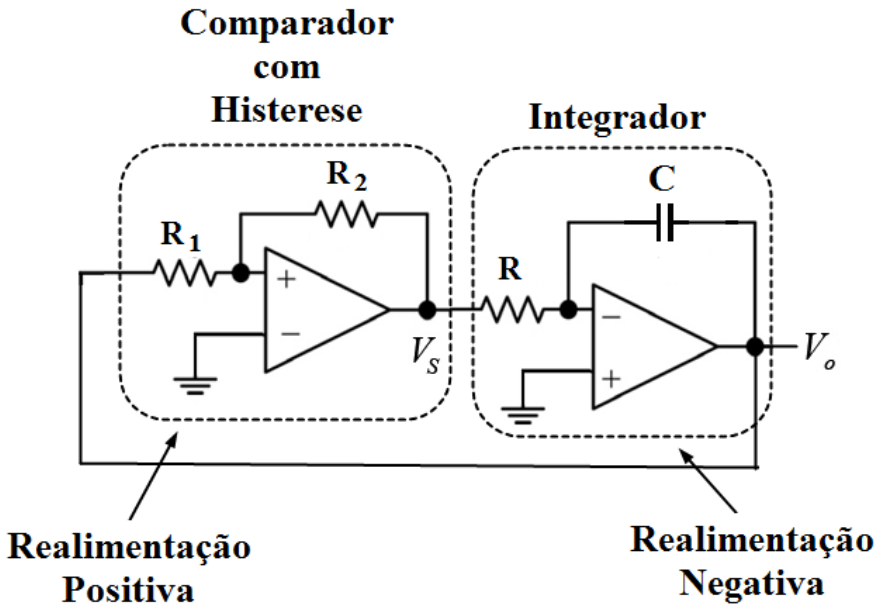


Figura 7



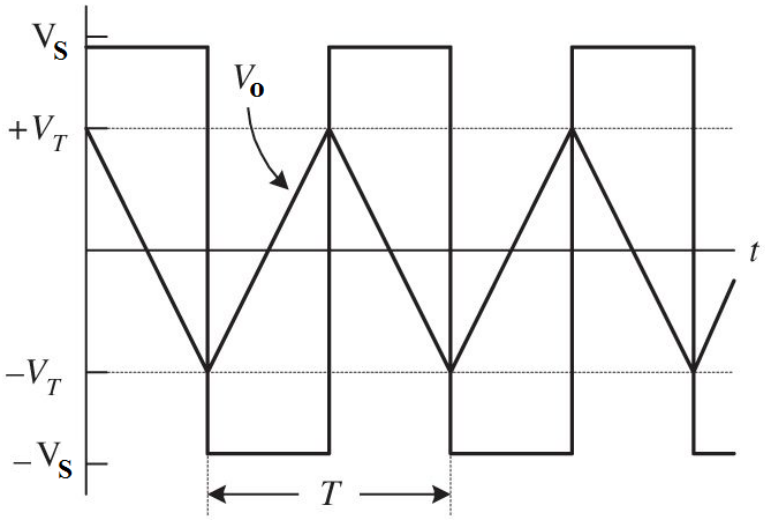


Figura 8

Montagem 4 GERADOR DE RAMPA E PULSOS

(I) Monte o circuito da figura 9 e observe as tensões nos pontos V_S e V_o, enquanto varia o potenciômetro.

(II) Substitua R por um potenciômetro e observe a variação da frequência dos sinais.

$$R_1 = 8k2 \quad R_2 = 10k\Omega \quad R = 10k\Omega \quad C = 10nF$$

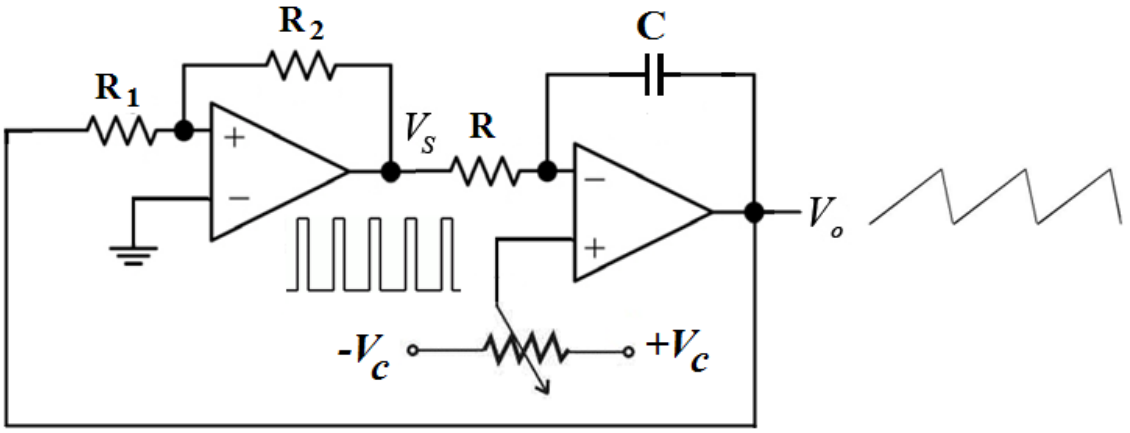
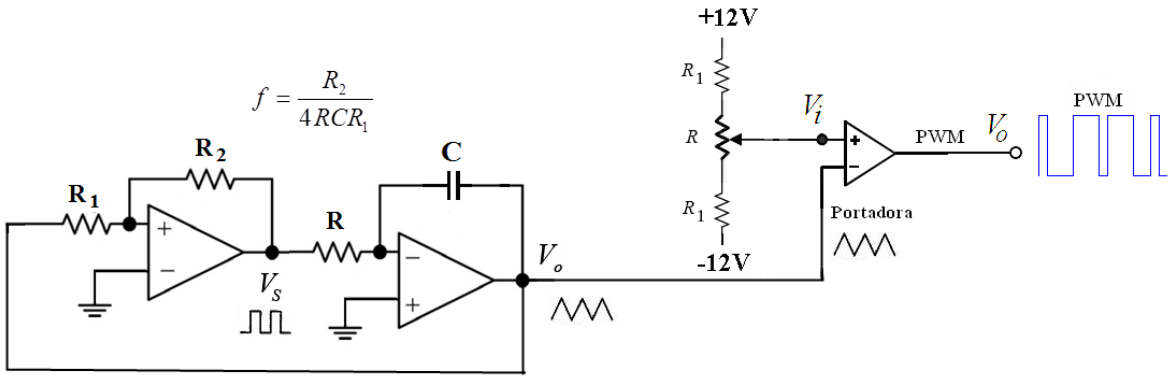
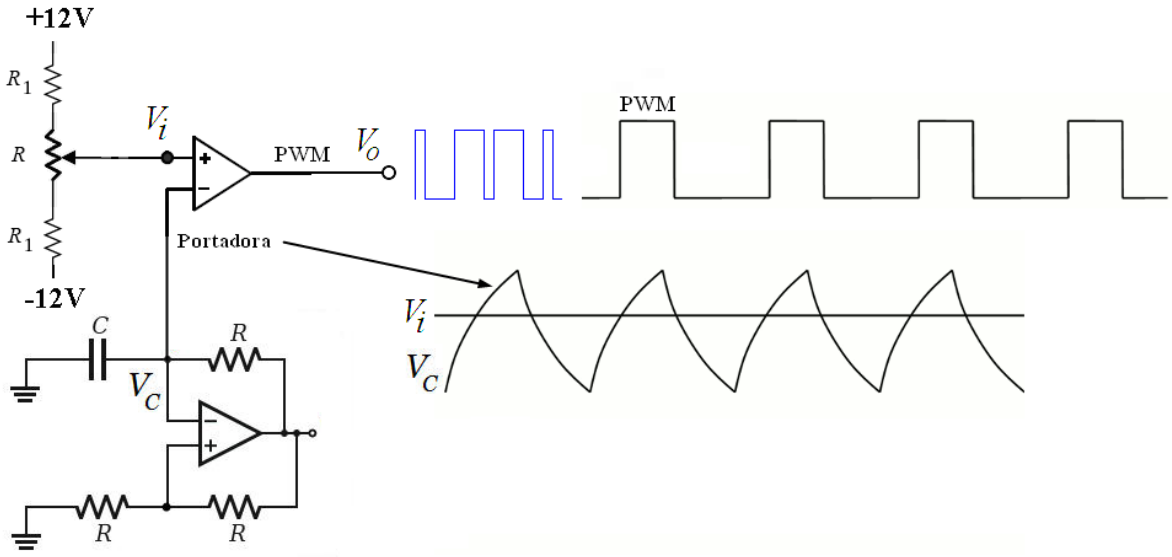


Figura 9

APLICAÇÃO

GERADOR DE PWM (Pulse Width Modulation)