

MANUAL DO ALUNO

DISCIPLINA ELETRICIDADE E ELETRÓNICA

Módulos 9 e 10

República Democrática de Timor-Leste
Ministério da Educação



FICHA TÉCNICA

TÍTULO

MANUAL DO ALUNO - DISCIPLINA DE ELETRICIDADE E ELETRÓNICA
Módulos 9 a 10

AUTOR

JORGE FLÁVIO

COLABORAÇÃO DAS EQUIPAS TÉCNICAS TIMORENSES DA DISCIPLINA
XXXXXXX

COLABORAÇÃO TÉCNICA NA REVISÃO
XXXXXXXXXX

DESIGN E PAGINAÇÃO
UNDESIGN - JOAO PAULO VILHENA
EVOLUA.PT

IMPRESSÃO E ACABAMENTO
XXXXXX

ISBN
XXX - XXX - X - XXXXX - X

TIRAGEM
XXXXXXX EXEMPLARES

COORDENAÇÃO GERAL DO PROJETO
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO DE TIMOR-LESTE
2014



Índice

Amplificadores Operacionais	7
Apresentação.....	8
Introdução	8
Objetivos de aprendizagem	9
Âmbito de conteúdos	9
Introdução aos Amplificadores Operacionais	10
Introdução	10
Constituição e princípio de funcionamento	10
Caraterísticas dos amplificadores operacionais.....	12
Ganho em tensão	14
Máxima tensão de saída.....	14
Corrente de curto-circuito	15
Largura de banda.....	15
Frequência de ganho unitário.....	17
Taxa de salto (“slew rate”)	17
Frequência máxima	19
Correntes de polarização.....	19
Tensão de desvio (“offset”).....	20
Impedância de entrada.....	21
Impedância de saída.....	22
Amplificadores operacionais comerciais	22
Realimentação	24
Comportamento do circuito em malha aberta (sem realimentação).....	26
Comportamento do circuito em malha fechada (com realimentação).....	28
Atividades propostas	29
Principais montagens	32
Introdução	32
Amplificador inversor	32
Aplicação da realimentação negativa	33
Conceito de terra virtual.....	33

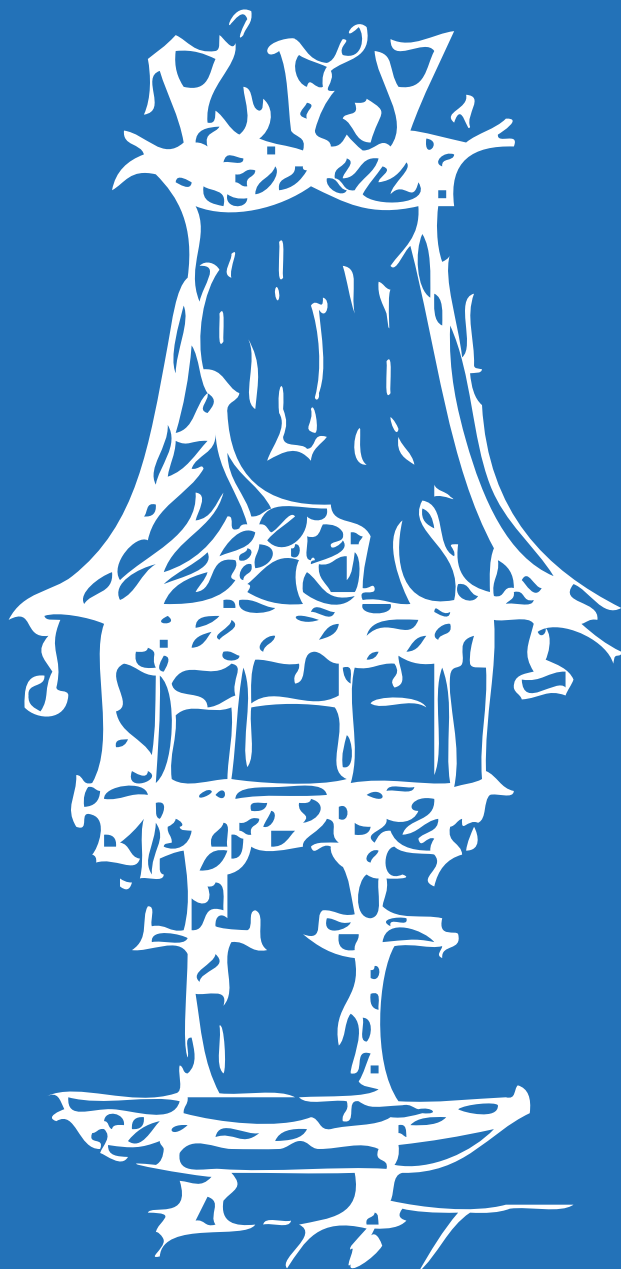


Ganho em tensão	34
Largura de banda	35
Impedância de entrada.....	36
Resumo das características do amplificador inversor	37
Amplificador não inversor	37
Conceito de curto-circuito virtual.....	38
Ganho em tensão	39
Largura de banda	40
Impedância de entrada.....	40
Resumo das características do amplificador não inversor	40
Seguidor de tensão.....	41
Amplificador somador inversor	42
Amplificador subtrator	43
Amplificador calculador de média aritmética.....	44
Conversor digital-analógico	45
Amplificador elevador de corrente.....	46
Fonte de corrente controlada por tensão.....	47
Inversor não inversor comutável	48
Inversor com ganho ajustável	48
Circuito desfasador	49
Atividades propostas	51
Exercícios propostos	63
Bibliografia	65
Aplicações com Amplificadores Operacionais	67
Apresentação.....	68
Introdução	68
Objetivos de aprendizagem	68
Âmbito de conteúdos	68
Circuitos não lineares	69
Introdução	69
Montagens com amplificadores operacionais	72
Introdução	72



Circuitos comparadores.....	72
Comparador não inversor com referência nula	72
Comparador inversor com referência nula	75
Comparador não inversor com referência não nula	77
Comparador com uma única alimentação.....	79
Comparador de janela	80
Comparador com histerese (comparador Schmitt-Trigger)	83
Gerador de PWM como comparador	88
Circuitos integradores.....	88
Circuitos diferenciadores	92
Conversores de forma de onda	96
Conversor de qualquer tipo de onda para onda quadrada.....	97
Conversor de onda quadrada para onda triangular.....	98
Conversor de qualquer tipo de onda para série ou trem de impulsos	98
Circuitos ativos com díodos	99
Retificador ativo simples ou de meia onda.....	100
Retificador ativo de onda completa.....	101
Filtros.....	101
Filtros passivos.....	106
Filtros ativos	110
Filtros ativos passa baixo	110
Filtros ativos passa alto.....	115
Filtros ativos passa banda.....	118
Exercícios propostos	144
Bibliografia	147







Amplificadores Operacionais

Módulo 9

Apresentação

Este módulo tem carácter teórico-prático, por isso deverá decorrer em parte em ambiente laboratorial de forma a permitir aos alunos verificarem e comprovarem os conceitos teóricos estudados relativos às características, funcionamento e aplicações dos Amplificadores Operacionais – A.O.

Esta disciplina tem como intenção tornar o aluno apto a compreender a linguagem e as técnicas utilizadas, possibilitando assim um melhor aproveitamento na sequência dos estudos desta e das outras disciplinas técnicas e também na comunicação adequada com os profissionais da área.

Introdução

A abordagem deste módulo de Amplificadores Operacionais leva-nos a uma melhor compreensão dos vários tipos de aparelhos, que incorporam circuitos que utilizam estas características, existentes no mercado assim como a melhor escolha deste tipo de equipamentos para que se ajuste às crescentes evoluções disponíveis pelas diversas marcas.

Este módulo requer um conhecimento básico de matemática e análise de circuitos eletrónicos básicos.



Objetivos de aprendizagem

- Identificar as características do AO ideal.
- Caracterizar o AO real quanto a:
 - Curva de resposta de frequência.
 - Largura de banda.
 - Tensão offset.
 - Slew-rate.
- Conhecer as montagens básicas com realimentação negativa.
- Calcular correntes, tensões e ganhos.
- Identificar outros AO`s lineares.

Âmbito de conteúdos

- O Amplificador Operacional:
 - Amplificador Operacional (AO) Ideal.
 - Amplificador operacional real.
- Características do A.O.:
 - Tensão offset.
 - Slew rate.
 - Curva de resposta de frequência.
 - Largura de banda.
- Montagens básicas com realimentação negativa:
 - Amplificador inversor – Seguidor de tensão.
 - Amplificador não inversor – Somador – Subtrator.
 - Outros AO lineares.



Introdução aos Amplificadores Operacionais

Introdução

A palavra operacional indica a relação do circuito com as operações matemáticas, particularmente as mais básicas, adição, subtração, multiplicação e divisão.

As primeiras versões dos amplificadores operacionais foram orientadas para a execução deste tipo de operações, mas o desenvolvimento tecnológico veio permitir uma mais ampla gama, com a consequente adaptação às diversas necessidades que o desenvolvimento de circuitos eletrónicos criou.

Assim sendo, o circuito amplificador operacional é hoje muito mais do que um simples executor de operações matemáticas básicas.

Constituição e princípio de funcionamento

Os primeiros circuitos operacionais eram constituídos por componentes eletrónicos discretos (compreendendo elementos independentes como resistências, condensadores, transístores, díodos, etc.), semelhantes a circuitos híbridos (constituídos por componentes discretos e integrados, numa placa conjunta).

A evolução tecnológica veio trazer unicamente a tecnologia integrada, ou seja, todos os componentes constituintes destes circuitos, são colocados num mesmo "chip", sob forma de uma pastilha integrada, ou circuito integrado.

Deste modo, é conseguida uma produção mais rápida, mais compacta e mais eficaz, necessitando de menos espaço e conseguindo melhores características e melhor desempenho do circuito.

Genericamente, um amplificador operacional é constituído por três blocos principais, como se pode ver pelo diagrama de blocos seguinte:

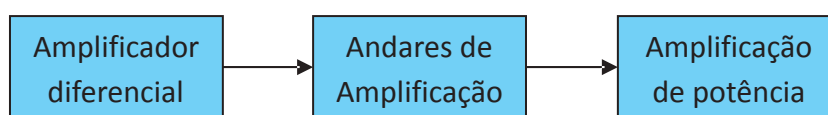


Fig. 1: Diagrama de blocos de um amplificador operacional



O primeiro bloco, ou amplificador diferencial (circuito já estudado anteriormente), contém duas entradas, uma chamada de inversora (-) e outra chamada de não-inversora (+), que no seu conjunto, vão permitir colocar na entrada do amplificador um sinal que é a diferença dos sinais presentes nestas duas entradas.

Na figura seguinte, apresenta-se o esquema equivalente de um amplificador diferencial, construído com componentes discretos.

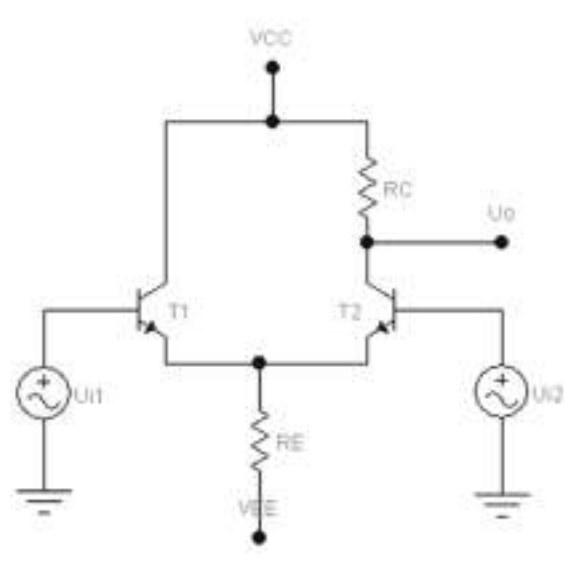


Fig. 2: Constituição de um amplificador diferencial

Na figura seguinte é possível observar o esquema simplificado de um amplificador operacional, onde se podem identificar as entradas de sinal (U_i), inversora (-) e não-inversora (+).

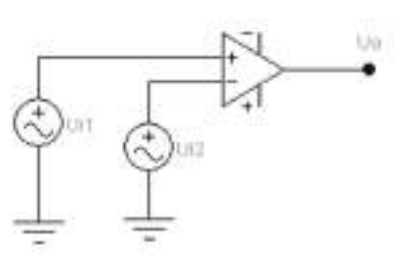


Fig. 3: Amplificador operacional básico



Quando se aplicam às duas entradas do amplificador diferencial os sinais U_{i1} e U_{i2} , através das bases dos dois transístores bipolares, a saída (U_o) obtida, vem dada pela expressão:

$$U_o = A_v \times (U_{i1} - U_{i2})$$

Em que A_v é o ganho diferencial em tensão do amplificador.

Embora o amplificador diferencial, apresente também um ganho em tensão para sinais de modo comum, este é normalmente muito menor do que o ganho em tensão diferencial, característica avaliada por um parâmetro chamado fator de rejeição de modo comum (CMRR).

Vamos aqui prestar atenção apenas ao ganho de modo diferencial e ao papel importante das duas entradas constituídas pelas bases dos dois transístores.

A entrada (+), ou entrada não-inversora, assim designada porque se lhe for aplicada uma tensão positiva, dará origem na saída a uma tensão também positiva, e se lhe for aplicada uma tensão negativa, dará origem na saída a uma tensão também negativa.

Dito de outro modo e considerando uma entrada sinusoidal, na saída aparecerá também uma onda sinusoidal, em fase com a tensão de entrada.

Ao invés, a entrada (-), ou entrada inversora, assim designada porque se lhe for aplicada uma tensão positiva, dará origem na saída a uma tensão negativa, e se lhe for aplicada uma tensão negativa, dará origem na saída a uma tensão positiva.

Seguindo o mesmo raciocínio que foi seguido para a entrada não-inversora, se lhe aplicarmos uma entrada sinusoidal, na saída aparecerá também uma onda sinusoidal, mas agora em oposição de fase com a tensão de entrada (desfasada de 180°).

Caraterísticas dos amplificadores operacionais

Vamos agora analisar as caraterísticas de um amplificador operacional ideal, ou seja, daquele com que gostaríamos de poder trabalhar.

Na realidade, o amplificador operacional real, por diversas razões, não consegue o desempenho teórico esperado.



A construção do amplificador operacional, tem por objetivo a obtenção de elevados ganhos em tensão, impedâncias de entrada elevadas e impedâncias de saída com valores reduzidos.

A impedância de entrada elevada permite uma significativa redução de consumos, com quedas de tensão desprezáveis, sem provocar alterações no sinal aplicado ao circuito.

A impedância de saída reduzida permite conseguir que o sinal de saída apresente valores constantes, sem sofrer os efeitos de carga, sensíveis na maior parte dos circuitos.

O amplificador operacional ideal apresenta ganho em malha aberta infinito, impedância de entrada infinita, e impedância de saída nula.

Os valores apresentados na prática (pelo amplificador real), são naturalmente diferentes destes, como pode ser confirmado pela tabela apresentada de seguida.

PRINCIPAIS CARATERÍSTICAS DOS AMPLIFICADORES OPERACIONAIS			
Grandeza	Símbolo	Amplificador operacional ideal	Amplificador operacional real (μ A741)
Ganho de tensão em malha aberta	A_{vol}	Infinito	100000
Frequência de ganho unitário	f_u	Infinita	1 MHz
Impedância de entrada	Z_i	Infinita	2 M Ω
Impedância de saída	Z_o	Nula	75 Ω
Corrente de polarização de entrada	$I_i(\text{bias})$	Nula	80 nA
Corrente de desvio (offset) de entrada	$I_i(\text{off})$	Nula	20 nA
Tensão de desvio (offset) de entrada	$V_i(\text{off})$	Nula	2 mV
Fator de rejeição de modo comum	CMRR	Infinito	90 dB

Fig. 4: Caraterísticas do amplificador operacional

Vamos agora analisar mais detalhadamente, as diversas caraterísticas dos amplificadores operacionais, para de seguida, proceder à análise de diversas montagens típicas, conseguidas com estes circuitos integrados.



Ganho em tensão

Os conceitos de ganho em malha aberta (A_{vol}) e de ganho em malha fechada serão mais facilmente compreendidos, quando for abordado e tema da realimentação de circuitos, um pouco mais à frente.

Nesta altura importa compreender o conceito de ganho em malha aberta, ou seja quando consideramos o circuito numa lógica de sinal de entrada / transformação / sinal de saída, sem considerar qualquer efeito da saída sobre a entrada.

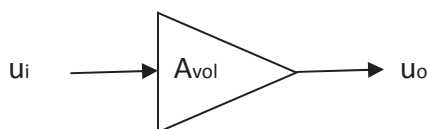


Fig. 5: Ganho de tensão em malha aberta

O ganho em malha aberta será dado pelo quociente entre o sinal de saída e o sinal de entrada do circuito considerado.

$$A_{vol} = \frac{u_o}{u_i}$$

Nos amplificadores operacionais, convém relembrar que a tensão de entrada u_i será dada pela diferença de tensão entre as duas entradas (inversora e não inversora) do circuito, ou seja, $u_i = u_{i1} - u_{i2}$.

Os valores do ganho de um circuito amplificador operacional, quando considerado em malha aberta, terão valores muito elevados, sem ser um valor infinito como considerado para o amplificador ideal, conforme descrito em tabela anterior.

Máxima tensão de saída

A máxima tensão de saída ($U_{opp\ máx}$) corresponde ao máximo valor pico-a-pico que a tensão de saída pode assumir, a qual é limitada pelos valores de U_{CC} e U_{EE} , utilizados para polarizar o circuito, dados pela expressão:

$$U_{opp\ máx} < U_{CC} + |U_{EE}|$$



No amplificador operacional real, a tensão de saída nunca chega a atingir este valor, devido à existência de pequenas quedas de tensão no andar final.

Quanto maior for a carga R_L a alimentar pelo circuito operacional, mais elevada será a corrente a fornecer aquela, razão pela qual aumentarão as quedas de tensão internas e mais baixa será a tensão disponível na saída do amplificador.

Corrente de curto-circuito

A corrente de curto-circuito (I_{os}) de um amplificador operacional é a máxima corrente que ele é capaz de fornecer na saída.

Este valor é disponibilizado na folha de características (“datasheet”) do amplificador operacional, sendo habitualmente um valor baixo, o que por sua vez originará tensões também de baixo valor na saída (dependendo do valor da resistência de carga).

Por exemplo, para um $\mu A741C$, em que $I_{os} = 25 \text{ mA}$, se a resistência de carga for $R_L = 75 \Omega$, o valor da tensão de saída será:

$$U_o = I_{os} \times R_L = 25 \times 10^{-3} \times 75 = 1,88V$$

Largura de banda

Para abordar a largura de banda, faz sentido, falar novamente nos conceitos de malha aberta e de malha fechada, para os quais este parâmetro terá valores significativamente diferentes.

Nesta altura, por simplicidade de abordagem, consideraremos apenas os conceitos relativos à largura de banda em malha aberta, deixando para mais tarde a abordagem à largura de banda em malha fechada (com realimentação).

Na figura seguinte representa-se em escala logarítmica, a característica do ganho em tensão (portanto, da amplitude), em função dos diferentes valores de frequência.

O valor mais elevado do ganho ocorre a 0 Hz, portanto, em funcionamento em corrente contínua.



À medida que a frequência aumenta, o valor do ganho em tensão vai diminuindo de modo progressivo, assumindo o valor aproximado de 1, para uma frequência de aproximadamente 1 MHz.

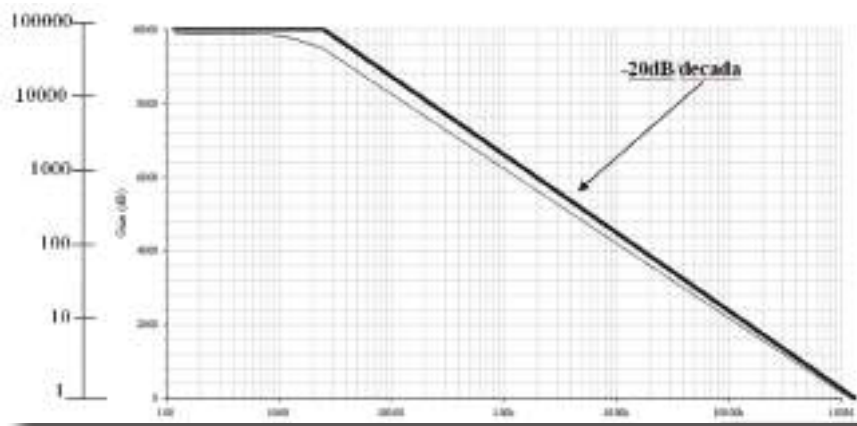


Fig. 6: Curva logarítmica de ganho de um amplificador operacional em malha aberta

Para valores mais elevados, o ganho continuará a decrescer, deixando de haver interesse na utilização do amplificador operacional para valores desta ordem.

Da observação da figura, conclui-se que o ganho se mantém constante até por volta da frequência de 10 Hz, valor a partir do qual começa a decrescer.

Este valor é designado por frequência de corte (f_c), frequência para a qual o ganho do amplificador operacional apresenta uma atenuação (ou perda de ganho) de 3dB.

Pode dizer-se, que a esta frequência, o amplificador apresenta uma perda de ganho de 30% relativamente ao seu ganho máximo.

Tendo em atenção que o ganho em malha aberta se mantém constante (a menos desta tolerância de 30% de perda de ganho) entre 0 Hz e 10Hz, podemos então dizer que a largura de banda em malha aberta, é dada pela diferença entre estes dois valores de frequência, ou seja, 10 Hz.

A partir da frequência de corte, dizemos que o ganho apresenta uma quebra de 20 dB por década.

Dado que a escala não é linear, mas logarítmica, os intervalos no eixo das frequências (eixo horizontal) não são iguais, sendo repartidos por intervalos de valores de 1 a 10, de 10 a 100, de 100 a 1000, etc., ou seja separados por um fator de multiplicação igual a 10. A cada um destes intervalos, chamamos década.



Se observarmos a diferença em termos de ganho (eixo vertical), marcado em dB (decibéis), podemos concluir que a característica representada, apresenta uma inclinação negativa de 20 dB, ou -20 dB / década.

Frequência de ganho unitário

A frequência para a qual o ganho apresenta o valor 1, é chamada frequência de ganho unitário (fu), sendo um parâmetro que consta das folhas de características de cada amplificador operacional.

No caso apresentado na última imagem, este parâmetro assume o valor de 1 MHz.

Taxa de salto (“slew rate”)

Os amplificadores operacionais contêm no seu interior um condensador chamado condensador de compensação (CC), destinado a evitar o aparecimento de oscilações que possam intervir com o sinal existente na saída do amplificador.

Mas como este componente não apresenta apenas vantagens associadas à sua presença, acarreta fundamentalmente a existência de um atraso no processamento do sinal entre a entrada do amplificador e a sua saída.

Este atraso resulta fundamentalmente dos tempos de carga e descarga do condensador, introduzindo limitações ao nível da máxima frequência que o operacional é capaz de processar, sem provocar distorções na onda apresentada na saída.

Este problema é tanto mais crítico, quanto se sabe que é a cada vez maior a necessidade de se trabalhar com velocidades de processamento de sinais mais elevadas, à medida que a eletrónica vai evoluindo.

A taxa de salto, ou “slew rate” na língua inglesa (SR), define-se então como o quociente entre a variação da tensão de saída (ΔU_o) e o intervalo de tempo (Δt), em que se verifica essa variação.

$$S_R = \frac{\Delta U_o}{\Delta t}$$



No caso do amplificador operacional 741C, o valor da taxa de salto é de $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$, o que quer dizer que a tensão de saída pode variar até $0,5 \text{ V}$ num intervalo de tempo de $1 \mu\text{s}$. Nesta situação, com sinais de entrada que apresentem variações até $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$, ou seja com sinais de baixa frequência (lentos) e/ou de pequenas variações de amplitude, o circuito será capaz de processar estes mesmos sinais para a sua saída sem apresentar distorção na onda exibida.

Quando os sinais forem de frequências elevadas (rápidos) e/ou de elevadas variações de amplitude, será apresentada distorção no sinal de saída.

Nas duas figuras seguintes, exemplificam-se situações de distorção, sendo as ondas superiores os sinais de entrada e as ondas inferiores os de saída.

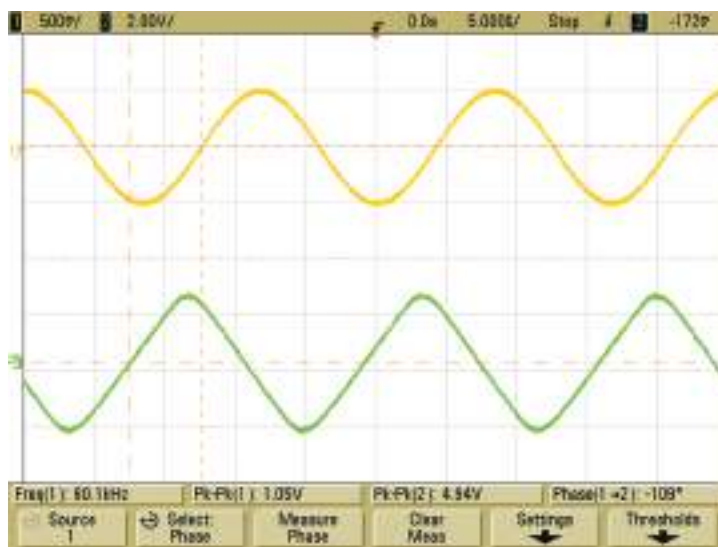


Fig. 7: Exemplo de distorção com onda de entrada sinusoidal

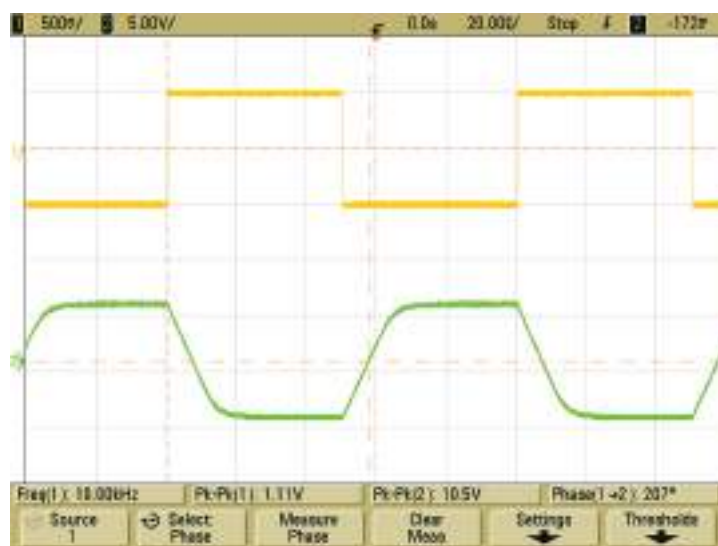


Fig. 8: Exemplo de distorção com onda de entrada quadrada



Frequência máxima

O conceito de distorção permite-nos introduzir um novo parâmetro dos amplificadores operacionais, a sua frequência máxima de funcionamento ($f_{m\acute{a}x}$).

A taxa de salto (SR) impõe, portanto, limites à frequência do sinal de entrada e ao seu valor de amplitude máximo, ou melhor dito, à taxa de variação do sinal de entrada (SS). Tal limitação aparece expressa na equação seguinte.

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{S_R}{2 \times \pi \times U_p}$$

Na expressão apresentada, $f_{m\acute{a}x}$ é máxima frequência de funcionamento do amplificador operacional (ou a máxima frequência permitida ao sinal de entrada), U_p a amplitude do sinal de entrada, e S_R a taxa de salto do amplificador operacional (ou a máxima taxa de variação permitida ao sinal de entrada SS).

Pode então concluir-se que se $SS \leq S_R$, não existirá distorção do sinal de saída; se $SS > S_R$, a saída apresentará distorção.

Deve existir portanto, um compromisso entre o valor da máxima frequência da onda a processar e o seu valor de amplitude máxima, de modo a que a taxa de variação da onda de entrada, esteja adequada ao valor da taxa de salto do circuito a que ela vai ser aplicada.

Correntes de polarização

As impedâncias de entrada dos amplificadores operacionais são muito elevadas (da ordem dos megaohm), o que provoca que as correntes nas entradas dos amplificadores operacionais sejam de valor muito reduzido (da ordem dos nano amperes).

Estas correntes, são as correntes que percorrem as bases dos dois transístores que compõem o amplificador diferencial de entrada do amplificador operacional, e mesmo quando as entradas são ligadas à massa, o seu valor é suficiente para alimentar as bases destes transístores.



Designa-se por corrente de polarização média do amplificador ($I_i(\text{bias})$), o valor médio das correntes destas duas entradas, ou seja:

$$I_{i(\text{bias})} = \frac{I_{i(+)} + I_{i(-)}}{2}$$

A diferença das duas correntes de entrada, designa-se por corrente diferencial de entrada do amplificador ($I_i(\text{off})$), e vem dada por:

$$I_{i(\text{off})} = I_{i(+)} - I_{i(-)}$$

Esta corrente diferencial constitui uma fonte de problemas, pois dá origem a uma queda de tensão diferencial de entrada, ou tensão de desvio, que se projetará também na saída do amplificador.

Por esta razão é necessário provocar a sua anulação, ou seja, conduzir a que as duas correntes sejam de valor igual, através da colocação de uma resistência de compensação em série com o terminal sem realimentação, com valor igual à resistência equivalente da malha de realimentação, vista do terminal sem realimentação (ver figura seguinte).

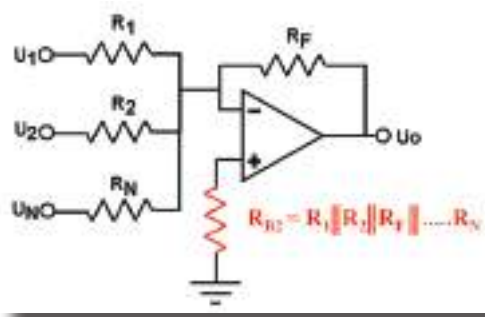


Fig. 9: Exemplo de compensação da corrente diferencial de entrada

Tensão de desvio (“offset”)

Num amplificador operacional ideal, quando se ligam as duas entradas à massa, obtém-se na saída, uma tensão nula.

Mas no amplificador real, tal não se verifica, fundamentalmente pelas diferenças entre os diversos componentes, considerados idealmente como iguais.



Os dois transístores utilizados no amplificador diferencial de entrada, bem assim como as resistências das bases, apresentam diferenças entre eles (embora considerados como iguais), pelo que essas diferenças são a razão para a corrente diferencial de entrada, que gera uma tensão diferencial de entrada.

Esta tensão diferencial de entrada é designada por tensão de desvio de entrada ($U_{o(off)}$). A tensão de desvio de entrada, aparece na saída, amplificada pelo ganho do amplificador, designando-se então como tensão de desvio de saída ($U_o(off)$).

Qualquer outro sinal presente na entrada, mesmo sendo um sinal indesejado (ruído), aparecerá também na saída, provocando erros nos valores pretendidos.

Impedância de entrada

A impedância de entrada (Z_i) define-se como a oposição que um circuito ou componente ativo apresenta à entrada de corrente.

Consideremos a figura seguinte, em que R_G representa a resistência interna do gerador de tensão U_G .

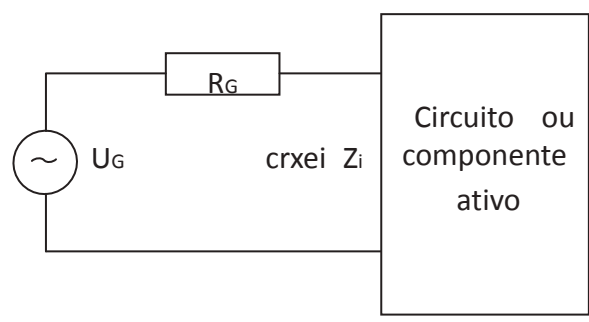


Fig. 10: Impedância de entrada

Se a impedância de entrada apresentasse valores semelhantes aos da resistência interna do gerador, a tensão deste iria repartir-se pelas duas resistências, existindo assim uma perda de tensão significativa, na aplicação da tensão do gerador ao circuito.

Torna-se assim necessário que a impedância de entrada do circuito apresente valores muito elevados, o que efetivamente acontece nos amplificadores operacionais, em que este valor se situa na ordem dos megaohms.

No caso do circuito operacional 741C, o seu valor é de $2\text{ M}\Omega$.



Impedância de saída

A impedância de saída (Z_o) define-se como a oposição que um circuito ou componente ativo apresenta à saída de corrente.

Consideremos agora a figura seguinte, em que se representa a saída do circuito, com a resistência de carga R_L .

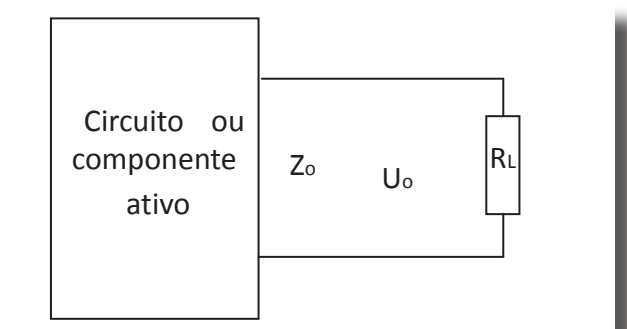


Fig. 11: Impedância de saída

Neste caso, de modo contrário ao que se passa na entrada, pretende-se que a resistência do circuito seja muito baixa relativamente ao valor da impedância de carga, para que se consiga fornecer a esta a quase totalidade de tensão disponível na saída, sem perda de tensão na parte interna do circuito.

Nos circuitos amplificadores operacionais a impedância de saída do circuito apresenta valores muito baixos, com valores situados na ordem das dezenas de ohms.

No caso do circuito operacional 741C, o seu valor é de 75Ω .

Amplificadores operacionais comerciais

Existem vários modelos de circuitos amplificadores operacionais, com diferentes características, e provenientes de diversos fabricantes.

Na tabela seguinte, apresenta-se um resumo das principais características de alguns destes componentes, mais divulgados no mercado.



CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DE ALGUNS AMPLIFICADORES OPERACIONAIS					
Designação comercial	U _{i(off)} (mV)	I _{i(bias)} (nA)	I _{i(off)max} (mA)	f _u (MHz)	SR (V/μs)
LF351	5	0,05	20	4	13
LM318	4	150	21	15	70
LM324	2	45	20	1	0,5
LM741C	2	80	25	1	0,5
LM1458	1	200	20	1	0,5
TL072	3	0,03	10	3	13

Fig. 12: Características principais de alguns amplificadores operacionais

Entre os diversos amplificadores operacionais utilizados, o 741 é porventura o de mais ampla utilização.

É constituído por duas entradas e por um única saída, sendo um amplificador de baixa potência (< 1W), existindo em três versões de encapsulamento, metálico (TO-99), plástico em linha dupla (DLP) e, plano ("Flat-Pack").

A versão plástica é a mais utilizada, apresentando-se na figura seguinte.

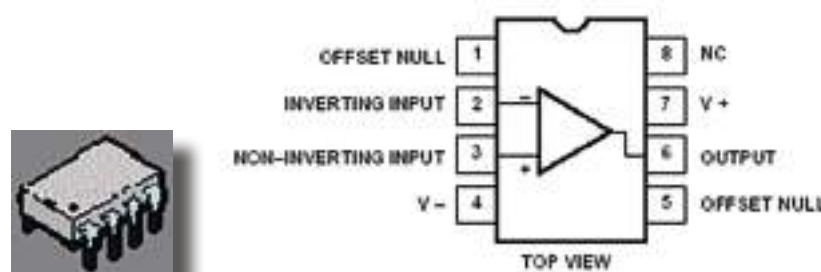


Fig. 13: Encapsulamento DLP e ligações dos terminais do 741

As ligações dos terminais são as que a seguir se indicam.

- Terminal 1 - Utilizado para anular a tensão de desvio;
- Terminal 2 - Entrada inversora (-);
- Terminal 3 - Entrada não inversora (+);
- Terminal 4 - Alimentação negativa (UEE ou U-);
- Terminal 5 - Utilizado também para anular a tensão de desvio;



- Terminal 6 - Saída;
- Terminal 7 - Alimentação positiva (UCC ou U+);
- Terminal 8 - Não ligado (NC);

Se se proceder à consulta das folhas de características (“datasheet”) de um 741C, entre muita outra informação disponível, destacam-se as seguintes:

- Tensão de alimentação (+UCC e -UEE), com intervalo de valores entre ± 3 V e ± 18 V;
- Tensão de entrada máxima igual a ± 15 V;
- Corrente de entrada $< 1 \mu\text{A}$;
- Corrente de polarização de entrada (valor típico) igual a 80 nA;
- Corrente máxima de saída (corrente de curto-circuito) igual a 25 mA;
- Tensão de desvio de entrada (“offset”) de 2 mV a 6 mV;
- Potência dissipada máxima de 50 mW a 85 mW;
- Ganho máximo de tensão em malha aberta igual a 100000 (= 100 dB);
- Frequência máxima igual a 1 MHz;
- Impedância de entrada igual a 2 M Ω ;
- Impedância de saída $\leq 100 \Omega$;
- Taxa de salto (“slew rate”) igual a 0,5 V/ μs ;
- Fator de rejeição de modo comum de 70 dB a 90 dB.

Relativamente à frequência máxima de funcionamento, pode acrescentar-se que a 1 MHz em malha aberta, o ganho é unitário; a 0 Hz, o ganho é 100000 / $\sqrt{2}$, ou seja, tem uma perda de 3 dB; de 10 Hz a 1 MHz, há uma perda de 20 dB, por cada década de frequência. Acima de 1 MHz, o ganho é inferior a 1, ou seja, ele passa a ser atenuador, pelo que não existe interesse prático na utilização do circuito acima deste valor de frequência.

Realimentação

Vamos agora abordar com mais detalhe os conceitos de malha aberta e de malha fechada já referidos anteriormente, e entender melhor o conceito de realimentação associado à malha fechada.



Assim, dizemos que um amplificador funciona em malha aberta, quando não existe nenhum tipo de retorno do sinal (realimentação) da saída, para qualquer das entradas, inversora ou não inversora, como se pode ver na figura seguinte.

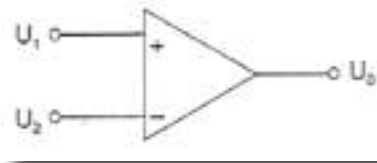


Fig. 14: Amplificador em malha aberta (não realimentado)

Neste caso, o ganho do amplificador base não é afetado, sendo dado pelo valor do ganho do componente (para o amplificador operacional 741C, será de 100000), mas apresenta uma elevada instabilidade.

Dizemos que um amplificador funciona em malha fechada, quando existe um tipo de retorno do sinal (realimentação) da saída, para qualquer das entradas, inversora ou não inversora.

Se o sinal proveniente da saída for aplicado na entrada inversora, como se pode ver na figura seguinte, diz-se que a realimentação é negativa.

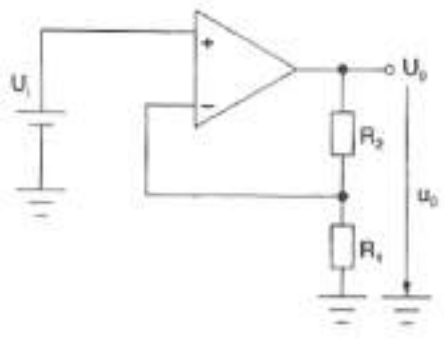


Fig. 15: Amplificador em malha fechada (realimentado negativamente)

Com realimentação negativa, o ganho resultante é bastante mais baixo que o ganho em malha aberta, mas o circuito torna-se muito mais estável, sendo por isso, a montagem habitualmente utilizada como amplificador de tensão.

Se o sinal proveniente da saída for aplicado na entrada não inversora, como se pode ver na figura seguinte, diz-se que a realimentação é positiva.



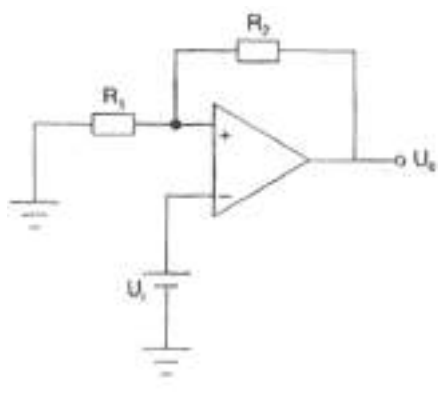


Fig. 16: Amplificador em malha fechada (realimentado positivamente)

No funcionamento com realimentação positiva, o amplificador torna-se muito estável, embora seja utilizado nesta configuração em algumas aplicações, que serão analisadas no capítulo seguinte.

Comportamento do circuito em malha aberta (sem realimentação)

Tal como em malha fechada com realimentação negativa, a curva de transferência apresenta na sua parte inicial uma zona linear, seguida de uma zona de saturação, na qual a tensão de saída já não aumenta mais, quando aumenta a tensão de entrada.

Na figura seguinte, apresenta-se a caraterística de transferência de tensão de um amplificador em malha aberta.

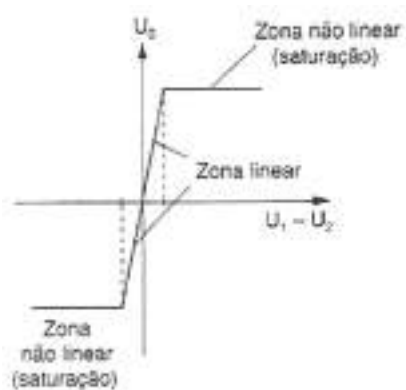


Fig. 17: Caraterística de transferência de tensão do amplificador em malha aberta



O ganho em tensão na zona linear vem dado pela expressão já analisada anteriormente.

$$A_{vol} = \frac{U_o}{U_i}$$

Na zona não linear, a tensão de saída não varia linearmente com a tensão de entrada, pois atinge um valor máximo de saturação, que toma valores aproximados de $U_{sat} = U_{CC} - 2 \text{ V}$ e $-U_{sat} = U_{EE} + 2 \text{ V}$.

Quando aplicamos a um circuito amplificador operacional em malha aberta duas tensões U_1 e U_2 às suas entradas, não inversora e inversora respetivamente, o valor da tensão de saída será dado por:

$$U_o = A_{vol} \times (U_1 - U_2)$$

A diferença das tensões ($U_1 - U_2$) designa-se por tensão diferencial de entrada do amplificador operacional, tratando-se habitualmente de um valor bastante baixo.

Como a zona linear das tensões de entrada em malha aberta é bastante reduzida, é fácil o amplificador atingir a saturação, provocando uma tensão de saída não linear (saturada). Se uma das entradas for ligada à massa (0 V) e a outra alimentada, o amplificador continuará a funcionar.

Se for ligada à massa a entrada inversora (alimentando somente a entrada não inversora), o valor da tensão de saída será dado por:

$$U_o = A_{vol} \times (U_1 - 0) = A_{vol} \times U_1$$

Daqui se conclui que a tensão de saída está em fase com a tensão de entrada, se estiverem a ser usadas tensões alternadas, e ambas positivas ou ambas negativas, se estiverem a ser usadas tensões contínuas.

Por um raciocínio inverso, se for ligada à massa a entrada não inversora (alimentando somente a entrada inversora), o valor da tensão de saída será dado por:

$$U_o = A_{vol} \times (0 - U_2) = -A_{vol} \times U_2$$



Daqui se conclui que a tensão de saída está em oposição de fase (desfasada de 180º) com a tensão de entrada, se estiverem a ser usadas tensões alternadas, e uma positiva e outra negativa, se estiverem a ser usadas tensões contínuas.

Comportamento do circuito em malha fechada (com realimentação)

Como já referido anteriormente, o amplificador em malha aberta apresenta vários problemas, particularmente a sua elevada instabilidade.

Assim sendo, as montagens mais utilizadas são as que usam malha fechada, particularmente com realimentação negativa.

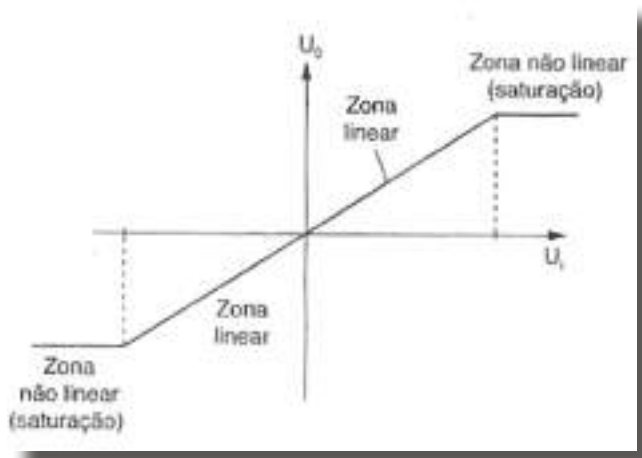


Fig. 18: Característica de transferência de tensão do amplificador com realimentação negativa

Pela comparação das características de tensão em malha aberta e em malha fechada com realimentação negativa, pode concluir-se que, embora o comportamento seja semelhante, com uma zona linear e uma zona de saturação em ambas, em malha aberta o intervalo de valores da tensão de entrada da zona linear é muito mais apertado.

Efetivamente, na malha fechada com realimentação negativa, este intervalo situa-se na ordem de alguns volts, sendo que em malha aberta ele é apenas de alguns milivolts.

Para além das diferenças apontadas, o que foi referido para o ganho em malha aberta é também válido para o ganho em malha fechada, com a necessária adaptação de valores.



Na realimentação positiva (caraterística representada na figura seguinte), esta curva é bastante diferente das anteriores, apresentando histerese e não possuindo zona linear.

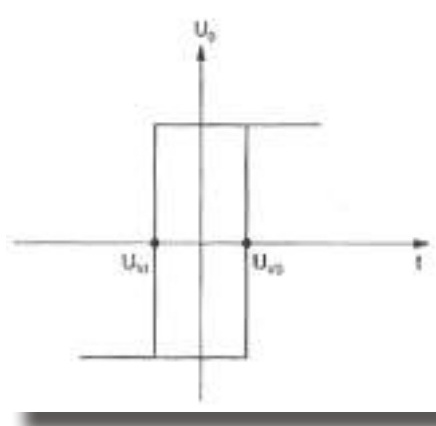


Fig. 19: Caraterística de transferência de tensão do amplificador com realimentação positiva

A tensão de saída comuta bruscamente da saturação negativa para a saturação positiva, quando a tensão de entrada atinge um determinado valor positivo (U_{vs}).

E comuta bruscamente da saturação positiva para a saturação negativa, quando a tensão de entrada atinge um determinado valor negativo ($-U_{vi}$).

Na situação de realimentação positiva, o amplificador operacional assume um funcionamento instável, sendo mesmo assim, utilizado em diversas aplicações,

Atividades propostas

TRABALHO DE GRUPO:

CIRCUITOS AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

1. INTRODUÇÃO

Após o estudo dos diversos parâmetros dos circuitos amplificadores operacionais, torna-se agora importante a sintetização das suas caraterísticas e a comparação entre os diferentes circuitos existentes no mercado.



2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a. Identificar as diversas características técnicas dos amplificadores operacionais.
- b. Estabelecer uma comparação entre os diferentes circuitos existentes no mercado.

3. RECURSOS NECESSÁRIOS

- Computador com acesso à internet;
- Manuais de fabricantes de componentes eletrónicos;

4. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- a. Elaborar lista de fabricantes e respetivos modelos de circuitos amplificadores operacionais;
- b. Elaborar uma tabela com as características relevantes para os diversos tipos de circuito.

5. TABELA COMPARATIVA DE CARACTERÍSTICAS

A tabela comparativa de características a elaborar, deverá contemplar no mínimo, os seguintes aspetos (alguns já indicados neste manual):

- Ganho de tensão em malha aberta;
- Frequência de ganho unitário;
- Impedância de entrada;
- Impedância de saída;
- Corrente de polarização de entrada;
- Corrente de desvio (offset) de entrada;
- Tensão de desvio (offset) de entrada;
- Fator de rejeição de modo comum;
- Preço de mercado;
- Outras características relevantes.

6. DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



7. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO DE SÍNTESE

Elaborar um relatório por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

a. Cabeçalho:

- Nome da Escola
- Nome da Disciplina
- Número e nome do Módulo
- Nome dos alunos, números, ano e turma
- Identificação do trabalho

b. Conteúdo (Mínimo):

- 1 - Objetivos
- 2 - Recursos necessários
- 3 - Procedimentos de trabalho
- 4 - Tabela de características
- 5 - Relatório de síntese

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

Para além dos circuitos listados neste manual



Principais montagens

Introdução

Vamos neste capítulo analisar algumas montagens com amplificadores operacionais, o que permitirá uma melhor compreensão do seu funcionamento.

Como foi já referido, o amplificador operacional, quando a funcionar em malha aberta, apresenta valores de ganho muito elevados, mas tem baixa estabilidade, o que acarreta que seja pouco utilizado nesta configuração.

As utilizações em malha aberta resumem-se essencialmente à utilização como comparador de tensão, fazendo a deteção de várias grandezas (intensidade de corrente, tensão, intensidade luminosa, temperatura, humidade, etc.), provocando a sua comparação com valores de referência.

Dessa comparação, resulta um sinal simples na saída do integrado, que será posteriormente utilizado de diversas formas.

De entre os circuitos em malha fechada, assumem especial destaque os de realimentação negativa, face aos de realimentação positiva.

Vamos unicamente analisar neste capítulo, os de realimentação negativa.

Amplificador inversor

O amplificador inversor, tal como a designação sugere, é aquele que amplifica na saída um sinal, provocando simultaneamente a sua inversão de fase (desfasamento de 180° ou π radianos).

Na figura seguinte, representa-se um circuito amplificador inversor.

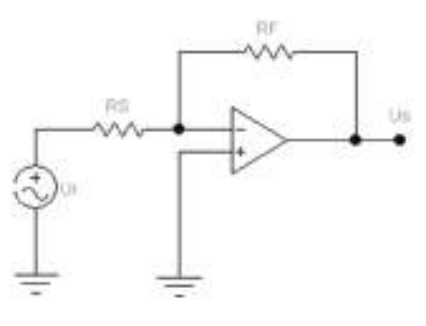


Fig. 21: Amplificador inversor



Aplicação da realimentação negativa

Os conceitos de realimentação positiva e negativa já foram introduzidos anteriormente neste manual.

A realimentação negativa de um amplificador, é conseguida através da ligação entre a sua saída e o terminal inversor (-) da entrada (ver figura seguinte).

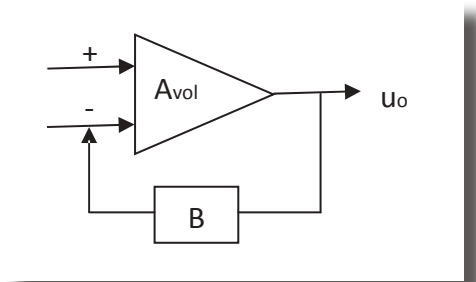


Fig. 22: Realimentação negativa

Neste tipo de realimentação, o sinal de saída (que se encontra desfasado de 180° relativamente à entrada) é injetado na entrada (inversora) através da malha B, habitualmente uma malha simples resistiva.

Este sinal proveniente da realimentação vai permitir reduzir o sinal na entrada (dado ser negativo), voltando de seguida a ser amplificado, operação está, realizada continuamente. Dito de outro modo, vai acontecer uma realimentação negativa desde a saída para a entrada, que produz o abaixamento da tensão na entrada, provocando seguidamente um abaixamento da tensão na saída, e assim sucessivamente, até estabilizar.

No circuito representado na figura anterior a esta, a malha de realimentação (B) é constituída simplesmente pela resistência R_F , a qual conduz o sinal proveniente da saída para a entrada inversora do circuito operacional, o que permitirá reduzir o ganho mantendo-o estável.

Conceito de terra virtual

O amplificador operacional ideal caracteriza-se por uma impedância de entrada (Z_i) infinita e um ganho em tensão (A_{vol}) também infinito.

Portanto, as correntes de entrada $i_i(+)$ e $i_i(-)$ são nulas e iguais entre si.



No amplificador operacional real tal não se verifica, existindo um valor para estas correntes na casa dos nano amperes, portanto considerado muito baixo para os circuitos que aqui estão a ser tratados.

Tendo em atenção a figura seguinte e dado que o ganho do amplificador ideal é infinito, conclui-se que a tensão U_d será igual a zero, pois o ganho em tensão em malha fechada será $Av_{cl} = U_o / U_d = U_o / 0 = \infty$.

Como a entrada não inversora se encontra ligada à massa ($U_{i(+)} = 0$) e atendendo a que $U_d = 0$, também será nula a entrada inversora ($U_{i(-)}$).

Efetivamente, esta entrada não está fisicamente ligada à massa, mas tem um potencial nulo, equivalente ao da entrada não inversora, esta sim, fisicamente ligada à massa.

Por isso se diz que, no amplificador inversor, é uma massa (terra) virtual.

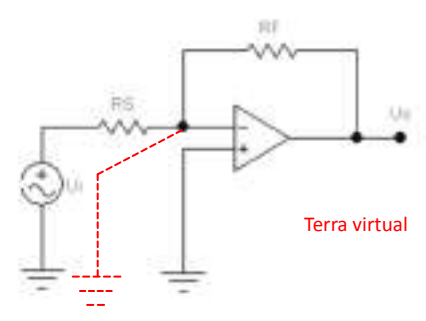


Fig. 23: Conceito de terra virtual

Ganho em tensão

Para o cálculo do ganho em tensão, relembremos que o facto de termos uma terra virtual conduz a que $U_{i(-)} = 0$.

Pela aplicação da lei dos nós na entrada e sabendo que $i_{i(-)} = 0$, teremos (ver figura seguinte) $I_S = I_F$.

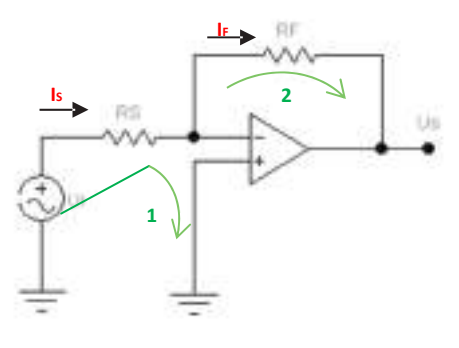


Fig. 24: Determinação do ganho em tensão do amplificador inversor



Considerando a malha de entrada assinalada (malha 1), obteremos ao fazer a respectiva circulação da corrente de malha:

$$U_i = R_S \times I_S + 0 \text{ (terra virtual)} \Leftrightarrow U_i = R_S \times I_S$$

Considerando a malha de saída assinalada (malha 2), obteremos ao fazer a respectiva circulação da corrente de malha:

$$0 \text{ (terra virtual)} = R_F \times I_F + U_o \Leftrightarrow U_o = -R_F \times I_F = -R_F \times I_S$$

Calcula-se então o ganho em tensão em malha fechada (A_{vcl}), obtendo o quociente entre U_o / U_i .

$$A_{vcl} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-R_F \times I_S}{R_S \times I_S} = -\frac{R_F}{R_S}$$

O ganho em tensão em malha fechada será determinado pelos valores das resistências R_S e R_F escolhidas (deverão ser sempre superiores a 1 K Ω), sendo muito inferior ao ganho em tensão em malha aberta e de valor negativo (sinal -), o que representa a inversão de fase entre entrada e saída para tensões alternadas.

Largura de banda

O ganho em malha aberta de um amplificador operacional, tem como foi visto anteriormente, um valor reduzido, devido fundamentalmente ao condensador de compensação interna que o integrado possui.

Em malha fechada, como o ganho em tensão é muito mais baixo, é possível aplicar ao amplificador, valores de frequência muito mais elevados, sem perda de ganho.

Neste caso, a largura de banda varia de modo inversamente proporcional com o ganho em tensão (em malha fechada).



Considerando f_{ccl} a frequência de corte em malha fechada, f_u a frequência de ganho unitário e $|A_{vcl}|$ o módulo ou valor absoluto do ganho em tensão em malha fechada, estabelece-se a relação seguinte.

$$f_{ccl} = \frac{f_u}{|A_{vcl}| + 1} \Leftrightarrow f_u = (|A_{vcl}| + 1) \times f_{ccl}$$

Convém realçar que a largura de banda corresponde à banda de frequências que se estende desde a frequência 0 Hz, até ao valor da sua frequência de corte ($LB = f_{ccl} - 0 = f_{ccl}$).

No diagrama da figura seguinte representa-se a relação entre a largura de banda e o ganho em tensão, para um amplificador operacional em malha fechada.

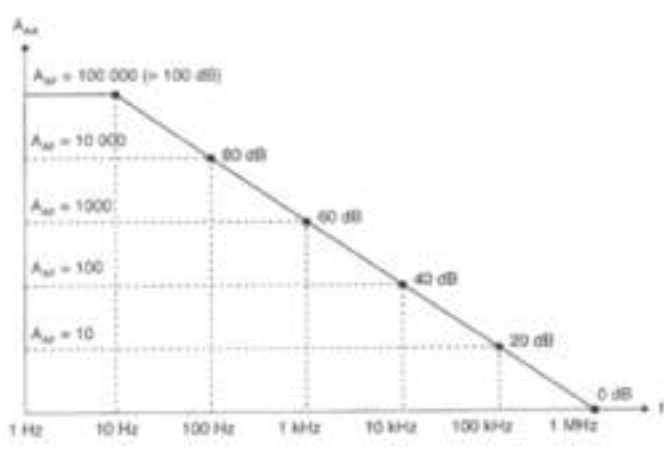


Fig. 25: Gráfico de largura de banda em função do ganho (com realimentação negativa)

Impedância de entrada

A impedância de entrada do amplificador inversor, é a impedância “vista” do gerador de sinal para a entrada, sendo igual ao valor de R_S .

$$Z_i = R_S$$



Resumo das características do amplificador inversor

O amplificador inversor em malha fechada com realimentação negativa, quando comparado com o amplificador em malha aberta, ou com o amplificador com realimentação positiva, apresenta um conjunto de diferenças a realçar, que se indicam de seguida:

- Ganho finito, constante e determinado pelo valor das resistências usadas para o projeto do circuito;
- Funcionamento linear, com sinal de saída semelhante ao de entrada, exceto se o amplificador atingir a saturação;
- Inversão de fase (desfasamento de 180° ou π radianos) do sinal de saída, relativamente ao sinal de entrada, para tensões e correntes alternadas;
- Saída com sinal contrário, relativamente à entrada, para tensões e correntes contínuas;
- Impedância de entrada igual à resistência interna do gerador de sinal e da resistência de proteção do circuito (se existir).

Para além destes aspetos, convém referir também que este tipo de montagem tem várias aplicações, em circuitos lineares.

Amplificador não inversor

O amplificador não inversor (representado na figura seguinte), é uma montagem com um circuito amplificador operacional a funcionar em malha fechada, com realimentação negativa.

Diferencia-se do amplificador inversor, fundamentalmente pelo facto de não apresentar inversão de fase do sinal de saída, relativamente à entrada.

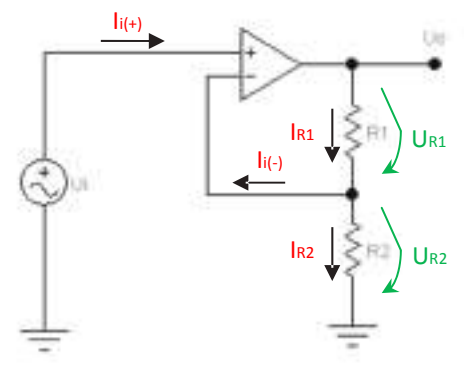


Fig. 26: Amplificador não-inversor



O sinal proveniente do gerador é aplicado diretamente à entrada não inversora (+) de sinal, sendo amplificado positivamente para a saída e em fase (desfasamento nulo) com a tensão de entrada.

A realimentação negativa faz com que a fração de tensão de saída (U_{R2}) seja aplicada à entrada inversora, reduzindo o ganho, mas conferindo ao amplificador uma maior estabilidade.

Conceito de curto-circuito virtual

Recorrendo ao conceito de amplificador ideal, para melhor compreensão, sabe-se que $U_d = U_{i(+)} - U_{i(-)}$, ou seja $U_{i(+)} = U_{i(-)}$.

Sendo $U_{i(+)}$ igual à tensão do gerador de sinal U_i , concluímos que $U_{i(+)} = U_{i(-)} = U_i$.

Assim, a tensão a aplicar entre as duas entradas do amplificador, terá um valor nulo, o que corresponde à existência de um curto-circuito entre estes dois terminais, embora não exista nenhuma ligação física entre eles (ver figura seguinte).

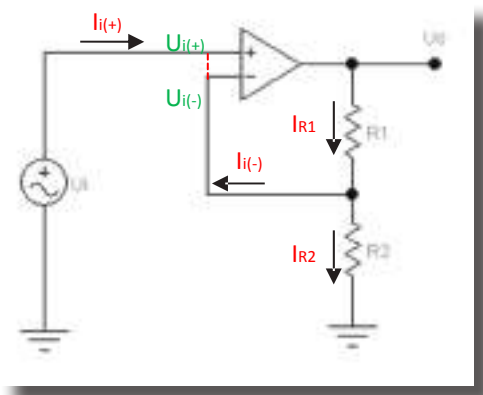


Fig. 27: Conceito de curto-circuito virtual

Diz-se então que existe um curto-circuito virtual entre as entradas, inversora e não inversora, do circuito amplificador operacional.

Pode dizer-se que neste tipo de montagem, o sinal de tensão aplicado à entrada não inversora, é também aplicado à entrada inversora.



Ganho em tensão

Considerando o curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada, conclui-se que a resistência R_2 fica sujeita à tensão de entrada U_i .

Como a impedância de entrada do amplificador operacional ideal é infinita, as correntes existentes nas entradas inversora e não inversora são nulas (elas existem, na prática, embora assumindo um valor muito baixo, pelo que são desprezáveis).

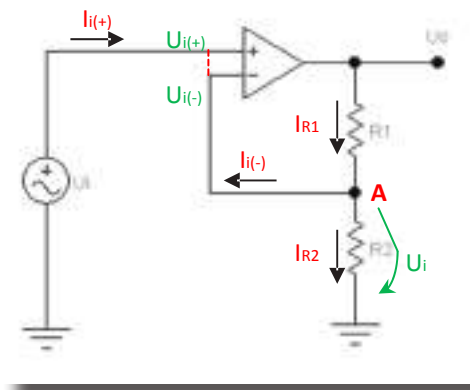


Fig. 28: Determinação do ganho em tensão do amplificador não inversor

Sendo a corrente $I_i(-)$ nula, resulta que $I_{R1} = I_{R2}$ no divisor de tensão constituído por estas duas resistências.

Podemos escrever então as expressões para a tensão de entrada e para a tensão de saída.

$$U_i = R_2 \times I_2 \quad U_o = (R_1 + R_2) \times I_2$$

Calcula-se então o ganho em tensão em malha fechada (A_{vcl}), obtendo o quociente entre U_o / U_i .

$$A_{vcl} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{(R_1 + R_2) \times I_2}{R_2 \times I_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Desta expressão pode concluir-se que o ganho será sempre superior a 1, qualquer que seja o valor de R_1 (seria apenas igual a 1, se R_1 fosse nulo).

Confirma-se também que a tensão de saída estará em fase com a tensão de entrada (desfasamento de 0°).



Largura de banda

À semelhança do que foi abordado no circuito amplificador inversor, o efeito da realimentação negativa conduz à redução do ganho e ao aumento da largura de banda. De modo também semelhante se obtém o valor correspondente à frequência de corte.

$$f_{ccl} = \frac{f_u}{A_{vcl}} \Leftrightarrow f_u = A_{vcl} \times f_{ccl}$$

Convém realçar que a largura de banda corresponde à banda de frequências que se estende desde a frequência 0 Hz, até ao valor da sua frequência de corte ($LB = f_{ccl} - 0 = f_{ccl}$).

Impedância de entrada

A impedância de entrada do circuito amplificador não inversor apresenta um valor muito elevado, podendo dizer-se que é infinito.

De facto, a impedância de entrada vai corresponder à impedância de entrada do circuito amplificador operacional.

$$Z_i \rightarrow \infty$$

Resumo das características do amplificador não inversor

O amplificador não inversor é muito semelhante ao amplificador inversor, com duas principais diferenças, que são a relação de fase entre entrada e saída e, a impedância de entrada.

Resumindo as suas principais características, pode dizer-se:

- Ganho finito, constante e determinado pelo valor das resistências usadas para o projeto do circuito;
- Funcionamento linear, com sinal de saída semelhante ao de entrada, exceto se o amplificador atingir a saturação;
- Sinal de saída em fase (desfasamento de 0o) com o sinal de entrada, para tensões e correntes alternadas;



- Saída com o mesmo sinal, relativamente à entrada, para tensões e correntes contínuas;
- Impedância de entrada muito elevada, teoricamente infinita.

Para além destes aspetos, convém referir também que este tipo de montagem tem várias aplicações, em circuitos lineares.

Seguidor de tensão

O circuito designado por seguidor de tensão (ver figura seguinte) é uma versão do amplificador não inversor, com a particularidade de ter um ganho em malha fechada igual a 1 (unitário).

Neste circuito, a realimentação negativa é máxima, recolocando na entrada a totalidade do sinal presente na saída.

A malha de realimentação (B) é conseguida com um condutor simples, sem qualquer componente, interligando a saída do amplificador operacional e a entrada inversora deste.

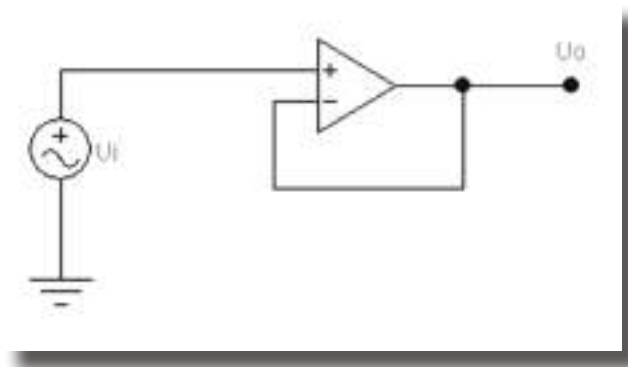


Fig. 29: Seguidor de tensão

Calculando o ganho em tensão em malha fechada, como $U_o = U_i(-) = U_i(+) = U_i$, obtemos a expressão indicada a seguir.

$$A_{\text{vof}} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U_i}{U_i} = 1$$



Embora o funcionamento do seguidor de tensão seja bastante semelhante ao do seguidor de emissor feito com o transístor bipolar já estudado, esta montagem com recurso ao amplificador operacional realimentado, apresenta uma muito maior impedância de entrada, o que permite que este dispositivo alimente cargas de baixo valor.

Por esta razão, o seguidor de tensão se utiliza com frequência em montagens adaptadoras de impedância.

Devido a este facto, é habitualmente chamado como isolador ou “buffer”.

Amplificador somador inversor

O amplificador somador inversor adiciona sinais e amplifica este sinal resultante, colocando-o na saída, mas invertido, pois trata-se de uma montagem inversora.

Na figura seguinte, representa-se uma destas montagens, neste caso destinada a somar apenas dois sinais.

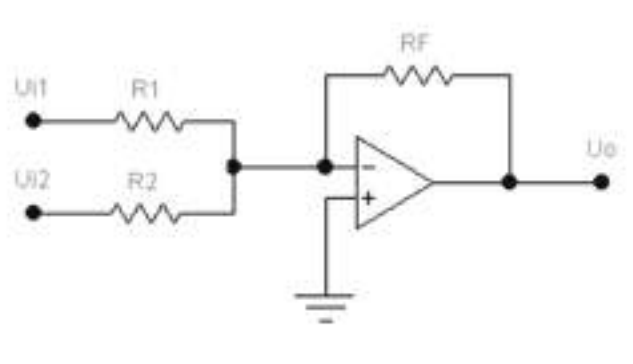


Fig. 30: Amplificador somador inversor (soma de dois sinais)

Pode, no entanto, conseguir-se a soma de diversos sinais, tendo apenas como limitações os valores máximos de tensões e correntes que o circuito é capaz de processar, sem se danificar, ou sem provocar a saturação do mesmo.

O sinal de saída, é calculado pela expressão seguinte.

$$U_o = - \left(\frac{R_F}{R_1} \times U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} \times U_{i2} \right)$$



Se considerarmos n fontes de sinal de entrada (para efetuar a soma dos diversos sinais), o valor da saída, é calculado pela expressão seguinte.

$$U_o = - \left(\frac{R_F}{R_1} \times U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} \times U_{i2} + \dots + \frac{R_F}{R_n} \times U_{in} \right)$$

Amplificador subtrator

O circuito subtrator de tensão (representado na figura seguinte) é constituído por um amplificador inversor (A1) e por um somador inversor (A2).

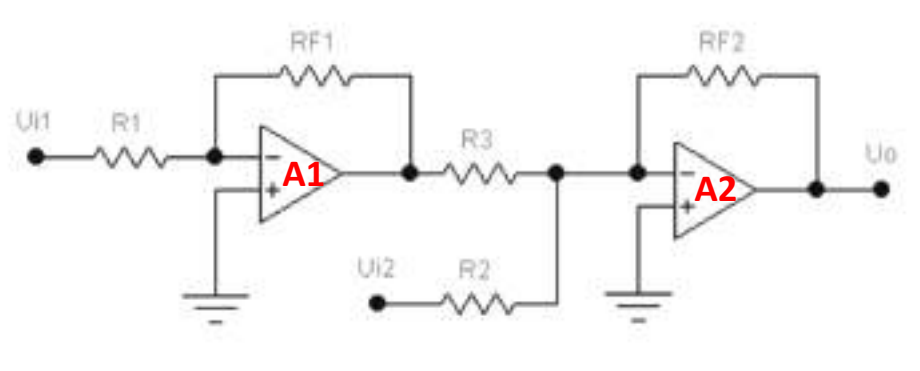


Fig. 31: Amplificador subtrator

Escolhendo de igual valor todas as resistências ($R_1 = R_2 = R_3 = R_{F1} = R_{F2} = R$), obtemos ganhos dos amplificadores unitários.

Deste modo, o amplificador A1 inverte o sinal U_{i1} , colocando na sua saída $-U_{i1}$.

Este sinal (que voltará a ser invertido), será adicionado com U_{i2} (também invertido) na entrada inversora do amplificador A2.

Deste modo, na saída vamos ter um sinal correspondente à expressão seguinte.

$$U_o = -(-U_{i1}) + (-U_{i2}) = U_{i1} - U_{i2}$$



Amplificador calculador de média aritmética

O amplificador calculador de média aritmética, como o nome indica, permite calcular a média aritmética de vários sinais (nesta figura, representa-se um amplificador para o cálculo da média de quatro sinais).

Para que tal aconteça é necessário que as resistências a utilizar tenham uma relação de grandeza múltipla do valor da resistência de realimentação R.

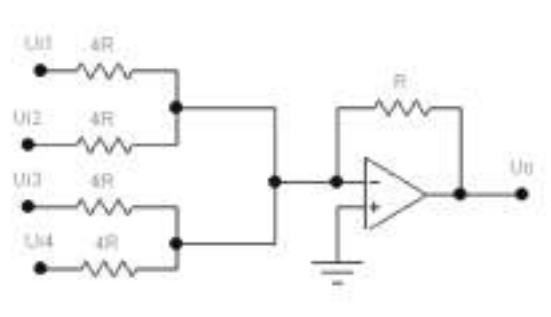


Fig. 32: Amplificador calculador de média aritmética

No caso do circuito representado na figura, as resistências a usar em paralelo com as fontes de sinal, devem ser de valor quatro vezes superior a R.

Por extensão de raciocínio, para n resistências, as resistências devem ter um valor n vezes superior ao de R.

As expressões seguintes, permitem calcular o sinal de saída (média) de quatro sinais e de n sinais respetivamente.

$$U_o = \frac{-(U_{i1} + U_{i2} + U_{i3} + U_{i4})}{4}$$

$$U_o = \frac{-(U_{i1} + U_{i2} + \dots + U_{in})}{n}$$



Conversor digital-analógico

O circuito conversor de digital para analógico, permite determinar o valor de tensão correspondente a um código binário (no caso representado na figura seguinte, de quatro dígitos).

Os valores das resistências, devem ter os valores indicados, proporcionais ao valor R escolhido.

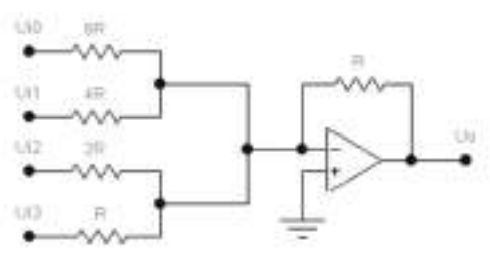


Fig. 33: Conversor analógico-digital

O valor da tensão de saída, vem dada por expressão seguinte.

$$\begin{aligned}
 U_o &= -\left(\frac{U_{i0}}{8} + \frac{U_{i1}}{4} + \frac{U_{i2}}{2} + \frac{U_{i3}}{1}\right) = \\
 &= -(0,125 \times U_{i0} + 0,25 \times U_{i1} + 0,5 \times U_{i2} + 1 \times U_{i3})
 \end{aligned}$$

Se por exemplo, utilizarmos um código binário em que o “1” lógico corresponda a 5 V e o “0” lógico a 0 V, as palavras 0000, 1001 e 1111, terão respetivamente, os valores apresentados a seguir.

$$U_o = -(0,125 \times 0 + 0,25 \times 0 + 0,5 \times 0 + 1 \times 0) = 0V$$

$$U_o = -(0,125 \times 5 + 0,25 \times 0 + 0,5 \times 0 + 1 \times 5) = -5,625V$$

$$U_o = -(0,125 \times 5 + 0,25 \times 5 + 0,5 \times 5 + 1 \times 5) = -9,375V$$



Amplificador elevador de corrente

O amplificador elevador de corrente é um amplificador destinado a fazer aumentar a corrente na saída da montagem, dado que as correntes dos amplificadores operacionais têm valores muito baixos (tipicamente na ordem das dezenas de miliamperes).

Para isso, a montagem apresenta na saída um transístor bipolar, que permite fazer esta função, tal como se representa na figura seguinte.

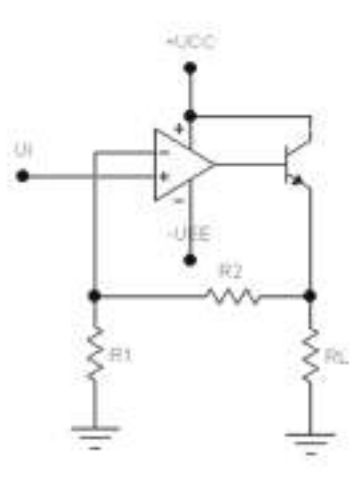


Fig. 34: Amplificador elevador de corrente

A corrente que será aplicada à carga, resulta da corrente de saída do amplificador operacional, que é aplicada à base do transístor, que por sua vez é amplificada por este, devido ao ganho de tensão em corrente contínua do transístor, o parâmetro β ($I_L = I_E \approx \beta \times I_B$).

O ganho do amplificador (A_{vcl}) não inversor, que serve de base a esta montagem, é dado pela expressão seguinte.

$$A_{vcl} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

A tensão de saída (U_o), a aplicar à carga (R_L), será dada pela expressão seguinte.

$$U_o = A_{vcl} \times U_i = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times U_i$$

Finalmente, a corrente na carga vem dada pela expressão indicada a seguir.

$$I_L = \frac{U_o}{R_L}$$



Fonte de corrente controlada por tensão

Este circuito destina-se a produzir na saída uma corrente constante, que seja independente do valor da carga.

Ao ser aplicada uma tensão (U_i) à entrada não inversora, essa mesma tensão fica aplicada à entrada inversora, como já visto anteriormente.

Portanto, a resistência R também fica sujeita a esta tensão de entrada.

A corrente que se vai desenvolver na resistência R será praticamente a mesma que vai percorrer a carga, pois a corrente que deriva da entrada inversora é aproximadamente nula (ver o circuito representado a seguir).

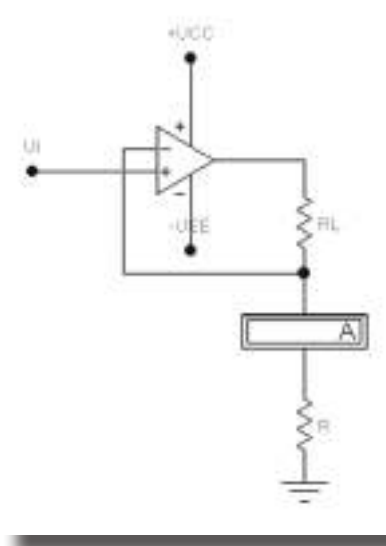


Fig. 35: Fonte de corrente controlada por tensão

A corrente na resistência R (I_R) será dada pela expressão seguinte.

$$I_R = I_L = \frac{U_i}{R}$$

A corrente na carga não depende do valor da resistência de carga (R_L), mas depende unicamente da tensão U_i e da resistência R , funcionando o circuito como se estivéssemos na presença de uma fonte de corrente.



Inversor não inversor comutável

Esta montagem funciona como inversor ou não inversor, a partir de um comando manual externo, realizado através de um interruptor.

Dependendo da posição do interruptor, estaremos na situação de ter o ganho igual a 1 (interruptor ligado à tensão de entrada), ou ganho igual a -1 (com o interruptor ligado à massa), conforme se pode ver na figura seguinte.

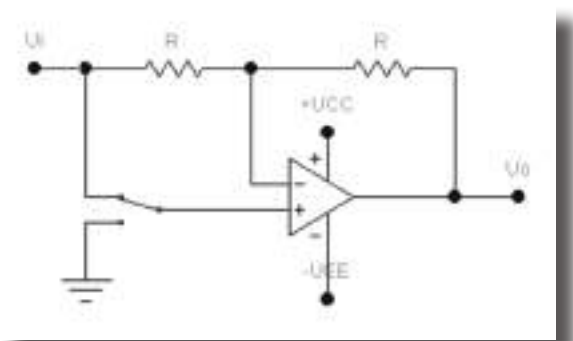


Fig. 36: *Inversor não inversor comutável*

Com o interruptor comutado para a tensão de entrada, a montagem é não inversora e a expressão do ganho é a seguinte.

$$A_{vol} = \frac{R}{R} = 1$$

Com o interruptor comutado para a massa, a montagem é inversora e a expressão do ganho é a seguinte.

$$A_{vol} = \frac{-R}{R} = -1$$

Inversor com ganho ajustável

O inversor com ganho ajustável é um amplificador inversor, em que o seu ganho é controlável por acionamento de um potenciómetro (ver figura seguinte).



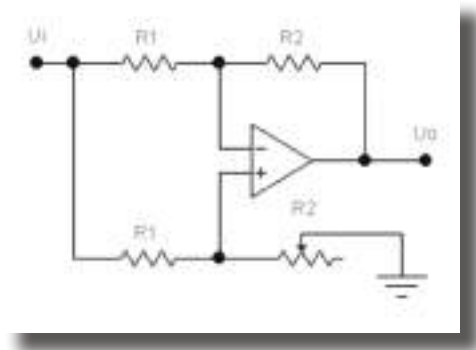


Fig. 37: Amplificador não-inversor

Quando o valor do potenciômetro R2 for nulo, o ganho do amplificador vem dado pela expressão seguinte.

$$A_{vcl} = \frac{-R_2}{R_1}$$

Quando o valor do potenciômetro R2 atingir o valor máximo, o ganho anula-se.

Portanto, o ganho deste amplificador inversor, variará de $\pm R_2/R_1$ até zero, de acordo com o posicionamento do potenciômetro R2.

Circuito desfasador

Este circuito utiliza-se para provocar alteração de fase, nos sinais nele introduzido.

Esta alteração, tem por base o comportamento do condensador C e a consequente reactância capacitiva X_C .

A reactância capacitiva (supondo o condensador ideal), como se sabe, é dada pela expressão indicada a seguir.

$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}$$

Daqui se conclui que quanto maior for a frequência da tensão aplicada, menor será o valor da reactância, e inversamente, quanto menor for a frequência da tensão aplicada, maior será o valor desta, ou seja a frequência e a reactância estão relacionadas por uma proporcionalidade inversa.



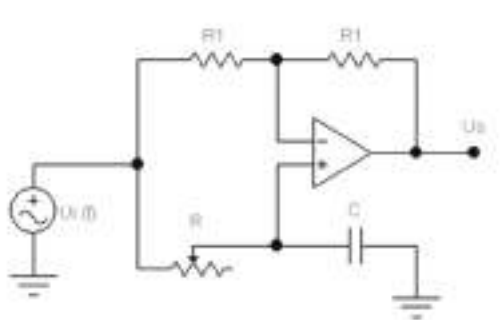


Fig. 38: Circuito desfasador

Consultando o circuito da figura anterior, pode concluir-se que, quando a frequência for muito alta, a reatância pode considerar-se desprezável face à resistência R, ficando o terminal inversor ligado à massa, sendo a sua tensão nula.

Portanto, o circuito tem um comportamento de inversor normal, sendo o seu ganho dado pela expressão seguinte.

$$A_{vct} = \frac{-R_1}{R_1} = -1$$

Esta situação corresponde à introdução de um desfasamento de 180o ou π radianos.

Se a frequência assumir um valor muito baixo, a reatância assumirá um valor muito elevado em comparação com a resistência R (o condensador comportar-se-á como um circuito aberto).

Neste caso, o ganho correspondente assume o valor 1 (positivo).

Esta situação corresponde à introdução de um desfasamento de 0o, ou seja, à ausência de alteração de fase.



Atividades propostas

TRABALHOS PRÁTICOS:

TRABALHO PRÁTICO n.º 01 – Amplificador Inversor.

1. INTRODUÇÃO

O ganho de tensão do amplificador inversor (Figura 1), considerando-se como amplificador ideal é determinado pela expressão:

$$A_{vcl} = -\frac{R_F}{R_1}$$

O amplificador inversor, do ponto de vista da realimentação, é um amplificador de transresistência, em que $U_o/I_i = C.te = R_r$, mantendo-se constante a grandeza da transresistência. A resistência R_1 pode ser considerada como a resistência da fonte que dá origem à corrente I_i . Neste amplificador, a impedância de entrada é baixa, enquanto a impedância de saída é elevada.

2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a. Determinar o ganho em tensão.
- b. Verificar que o ganho de transresistência é constante.
- c. Determinar as impedâncias de entrada e de saída.
- d. Observar o desfasamento entre os sinais de entrada e de saída.

3. MATERIAL NECESSÁRIO

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrônica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Gerador de BF;
- 1 Multímetro;
- 1 Circuito integrado $\mu A741$;



- 5 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 2,2 \text{ K}\Omega$, $3,3 \text{ K}\Omega$, $4,7 \text{ K}\Omega$, $10 \text{ K}\Omega$ e $R_f = 15 \text{ K}\Omega$);
- 1 Potenciómetro linear de $1 \text{ K}\Omega$;
- 1 Potenciómetro linear de $10 \text{ K}\Omega$;

4. ESQUEMA DE LIGAÇÕES DO CIRCUITO

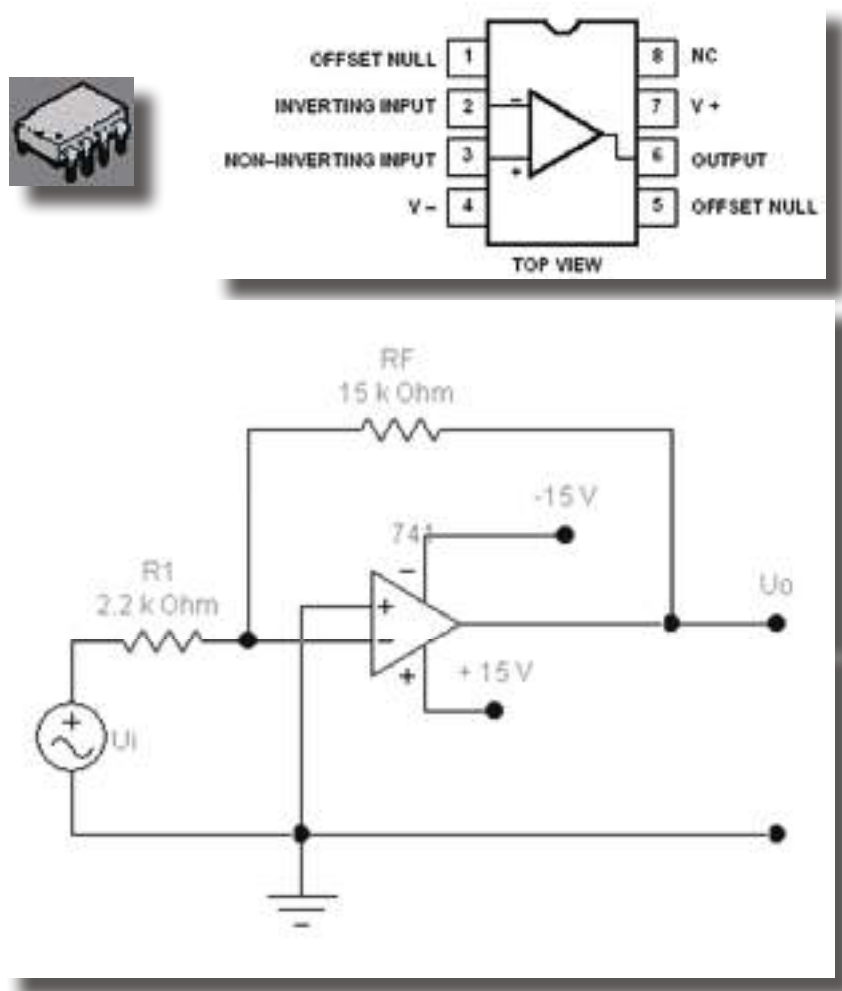


Figura 1

5. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1), começando por fazer $R_1 = 2,2 \text{ K}\Omega$;
- Aplicar à entrada do amplificador um sinal sinusoidal de 1 KHz e ligar os canais do osciloscópio às respectivas entrada e saída;
- Aumentar a tensão do gerador de modo a obter na saída um sinal sem distorção;
- Registrar os valores medidos no quadro 1;



- e. Repetir os procedimentos b), c) e d), substituindo R_1 sucessivamente por 3,3K Ω , 4,7 K Ω e 10 K Ω , registrando os valores medidos no quadro 1;
- f. Completar o quadro 1, tendo em consideração os valores determinados;
- g. Determinar a impedância de entrada Z_i , utilizando um potenciômetro de 10 K Ω ;
- h. Determinar a impedância de saída Z_o , utilizando um potenciômetro de 1 K Ω ;
- i. Verificar o desfasamento entre os sinais de entrada e de saída, por observação simultânea de ambos, desenhando-os na figura 2.

6. QUADRO DE REGISTO DE VALORES

$R_1 (\Omega)$	U_o (Tensão de pico)	U_i (Tensão de pico)	I_i (Corrente de pico)	Ganho em tensão		Ganho de transresistência	
				Calculado	Medido	Calculado	Medido
(Ω)	(V)	(V)	$\frac{U_i}{R_1}$	$\frac{U_o}{U_i}$	$\frac{U_o}{U_i}$	$\frac{U_o}{I_i}$	$\frac{U_o}{I_i}$
2,2 K Ω							
3,3 K Ω							
4,7 K Ω							
10 K Ω							

Quadro 1



Figura 2



7 – QUESTÕES FINAIS

Completar as duas frases seguintes, apresentando-as nas conclusões do relatório:

- Por observação dos valores do quadro 1, verifica-se que o amplificador tem um ganho de _____ constante, porque $U_o/I_i = \text{constante}$.
- É um amplificador de _____.
- Analisando os sinais representados na figura 2, verifica-se que a tensão de entrada está desfasada _____ em relação à tensão de saída.

8. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- Cabeçalho:
 - Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- Conteúdo (Mínimo):
 - 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



TRABALHO PRÁTICO n.º 02 – Amplificador não Inversor.

1. INTRODUÇÃO

Os amplificadores operacionais são amplificadores DC de ganho elevado ($\geq 10^6$), com uma banda passante pequena e uma frequência de transição ≥ 1 MHz. Foram concebidos para trabalharem com realimentação negativa. A realimentação negativa baixa o ganho, mas em compensação introduz outros benefícios ao amplificador, tais como o aumento da largura de banda passante e uma melhor estabilidade, tornando-o praticamente independente das características do amplificador operacional, ficando apenas dependente dos componentes exteriores.

O amplificador não inversor tem as características de um amplificador de tensão, apresentando uma impedância de entrada elevada e uma baixa impedância de saída.

Se se considerar o amplificador ideal, o ganho em tensão é dado pela relação:

$$A_{vcl} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Como é um amplificador realimentado negativamente, o ganho em tensão vem dado pela expressão:

$$A_{vcl} = \frac{A_{vol}}{1 + B \times A_{vol}} \Rightarrow A_{vcl} \cong \frac{1}{B} \quad \text{sendo} \quad B = \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

$$\text{ou seja, } A_{vcl} \cong \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a. Determinar o ganho em tensão.
- b. Verificar que o ganho em tensão é constante.
- c. Determinar as impedâncias de entrada e de saída.



3. MATERIAL NECESSÁRIO

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrónica ("Breadboard");
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Gerador de BF;
- 1 Multímetro;
- 1 Circuito integrado $\mu A741$;
- 3 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 15\text{ k}\Omega$, $R_2 = 120\text{ k}\Omega$ e $R_c = 10\text{ k}\Omega$);
- 1 Potenciómetro linear de $1\text{ k}\Omega$;
- 1 Potenciómetro linear de $10\text{ M}\Omega$;

4. ESQUEMA DE LIGAÇÕES DO CIRCUITO

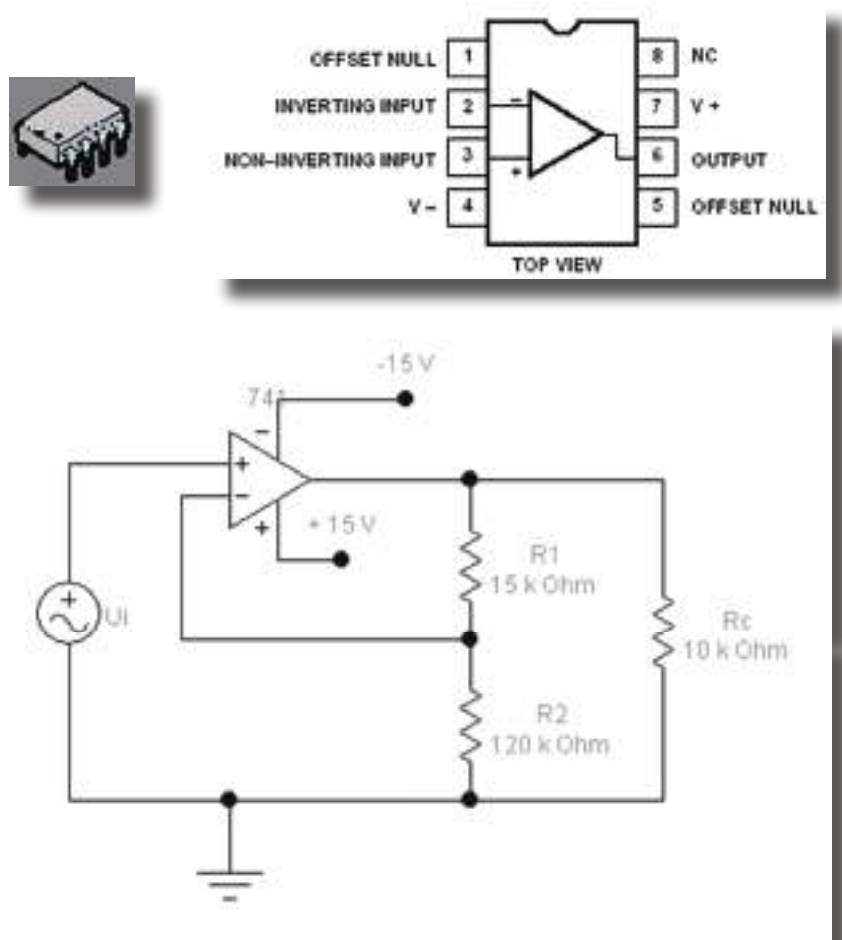


Figura 1



5. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Aplicar à entrada do amplificador um sinal sinusoidal de 1 KHz e ligar os canais do osciloscópio às respectivas entrada e saída;
- Variar a tensão do gerador de modo a obter na entrada os valores indicados no quadro 1 seguinte (Ponto 6);
- Registrar para cada um dos valores de U_i do quadro 1, os respectivos valores de U_o ;
- Determinar a impedância de entrada Z_i , utilizando um potenciômetro de 10 M Ω ;
- Determinar a impedância de saída Z_o , utilizando um potenciômetro de 1 K Ω ;
- Calcular os ganhos em tensão para os diferentes valores de U_i , completando o quadro 1;
- Verificar o desfasamento entre os sinais de entrada e de saída, por observação simultânea de ambos, desenhando-os na figura 2.

6. QUADROS DE REGISTO DE VALORES

Valor máximo (pico)		Com os valores medidos	Calculado	Medido	
U_i (V)	U_o (V)	$A_{vcl} = \frac{U_o}{U_i}$	A_{vcl}	Z_i	Z_o
0,5					
1					
1,5					
2					

Quadro 1



Figura 2



7. QUESTÕES FINAIS

Completar as duas frases seguintes, apresentando-as nas conclusões do relatório:

- a. Analisando a figura 2, verifica-se que o ganho em tensão é _____, sendo por isso um amplificador de _____.
- b. Por observação dos sinais, verifica-se que a tensão de entrada é _____ do sinal de saída;

8. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a. Cabeçalho:
 - Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b. Conteúdo (Mínimo):
 - 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



TRABALHO PRÁTICO n.º 03 – AMPLIFICADOR SOMADOR INVERSOR.

1. INTRODUÇÃO

A figura 2 representa um amplificador somador inversor. A tensão de saída determina-se pela expressão:

$$U_o = -R_F \times \left[\left(\frac{U_1}{R_1} \right) + \left(\frac{U_2}{R_2} \right) + \left(\frac{U_3}{R_3} \right) \right]$$

Se $R_1=R_2=R_3=R_F$, vem $U_{o1} = -(U_1+U_2+U_3)$.

Se à saída do amplificador somador inversor ligarmos um amplificador inversor de ganho -1, teremos na sua saída:

$$U_{o2} = (U_1+U_2+U_3).$$

Quando se trata de circuitos com amplificadores operacionais operando em corrente contínua (DC) e realizando operações analógicas ou de instrumentação, é necessário proceder à anulação da tensão de “offset” do amplificador operacional.

Deverá ser feita a montagem que se encontra na figura 1, deslocando o potenciómetro até que o voltímetro indique tensão nula.

2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a. Anular a tensão de “offset”.
- b. Analisar experimentalmente um circuito somador inversor.
- c. Utilizar um amplificador inversor de ganho unitário para inversão do sinal.

3. MATERIAL NECESSÁRIO

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrónica (“Breadboard”);
- Condutores;
- 1 Multímetro;



- 2 Circuitos integrados $\mu A741$;
- 13 Resistências de $\frac{1}{4}$ W (2 de 1 K Ω , 2 de 3,9 K Ω , 7 de 10 K Ω e 1 de 12 K Ω);
- 2 Potenciômetros lineares de 10 K Ω ;

4. ESQUEMA DE LIGAÇÕES DO CIRCUITO

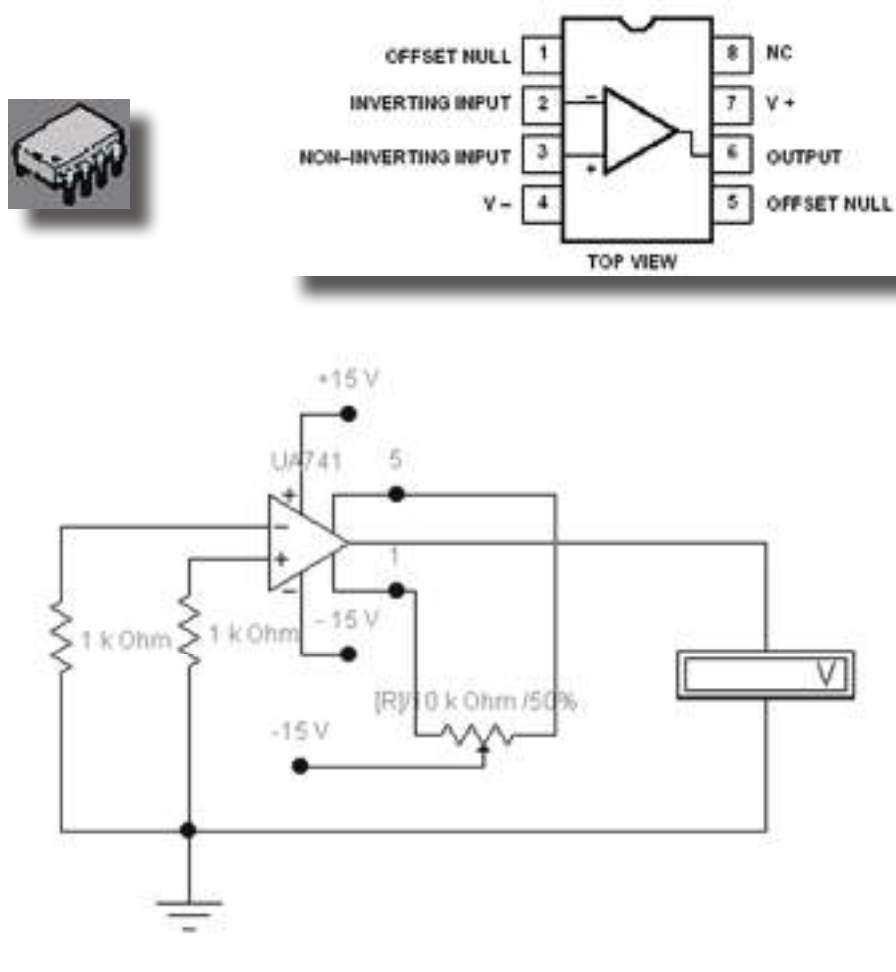


Figura 1



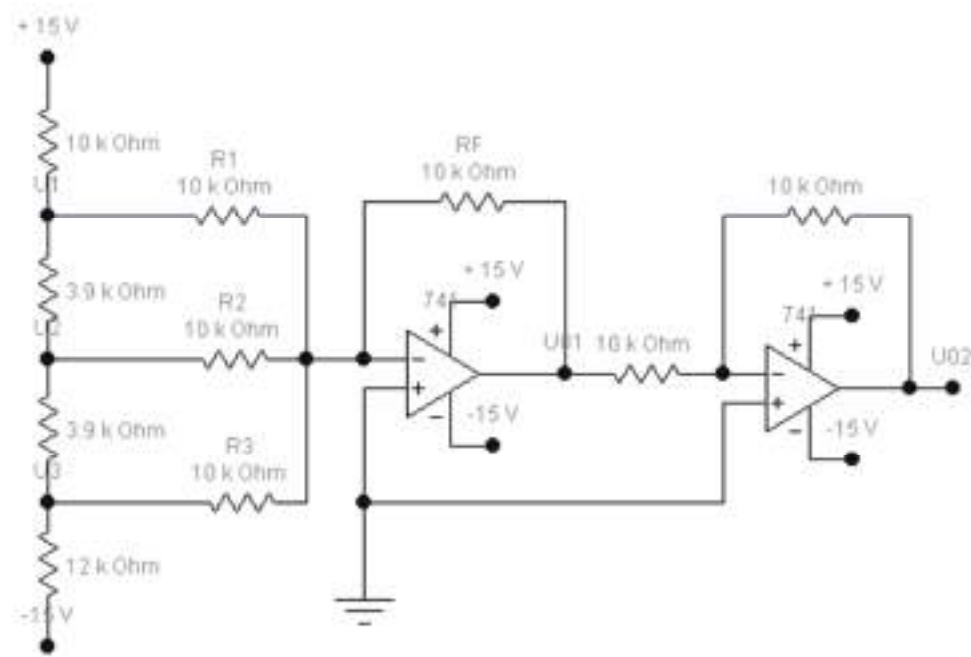


Figura 2

5. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito para o primeiro amplificador operacional, de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Regular o primeiro potenciômetro para proceder à anulação da tensão de “offset” do primeiro amplificador operacional;
- Montar o circuito para o segundo amplificador operacional, de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Regular o segundo potenciômetro para proceder à anulação da tensão de “offset” do segundo amplificador operacional;
- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 2), para obter as tensões U_1 , U_2 e U_3 .

6. QUESTÕES FINAIS

Concluir o trabalho com os seguintes passos:

- Calcular as tensões U_{01} e U_{02} .
- Medir as tensões U_{01} e U_{02} .
- Comparar os valores calculados com os valores obtidos experimentalmente.



8. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

a. Cabeçalho:

- Nome da Escola
- Nome da Disciplina
- Número e nome do Módulo
- Nome dos alunos, números, ano e turma
- Identificação do trabalho

b. Conteúdo (Mínimo):

- 1 – Objetivos
- 2 – Recursos necessários
- 3 – Procedimentos do trabalho
- 4 – Dificuldades encontradas
- 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
- 6 – Esquemas das montagens
- 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



Exercícios propostos

Perguntas de exemplo sobre este módulo:

1. Qual o principal objetivo para a construção do Amplificador Operacional?
2. Qual o valor da Impedância de Entrada?
3. Diga o valor da Impedância de Saída?
4. Qual o valor do ganho de um Circuito Amplificador Operacional?
5. Qual é a máxima tensão de saída de um amplificador operacional?
6. O que significa impedância de entrada?
7. O que significa um amplificador funcionar em malha fechada?
8. Quais as utilizações dos amplificadores operacionais em malha aberta?
9. Qual a amplificação de uma montagem amplificadora inversora?
10. Qual a diferença entre a montagem inversora e a não inversora?
11. Qual o valor do ganho do circuito Seguidor de Tensão?
12. Qual o funcionamento da montagem Somador Inversor?
13. O que faz o amplificador Calculador de Média Aritmética?
14. Qual é a função do Conversor de Digital para Analógico?
15. Onde se utiliza o amplificador Elevador de Corrente?



16. Qual a função da montagem fonte de corrente controlada por tensão?
17. Qual a utilização do inversor com ganho ajustável?
18. Onde se utiliza a montagem desfasador?
19. Desenhe a montagem de um Amplificador Inversor.
20. Desenhe a montagem de um amplificador seguidor de tensão.



Bibliografia

ANGULO, J. M., Enciclopédia de Electrónica Moderna, Vol. 4. Madrid. Editorial Paraninfo. (s.d.).

MALVINO, Electrónica, Vol. 2. McGrawHill. (s.d.).

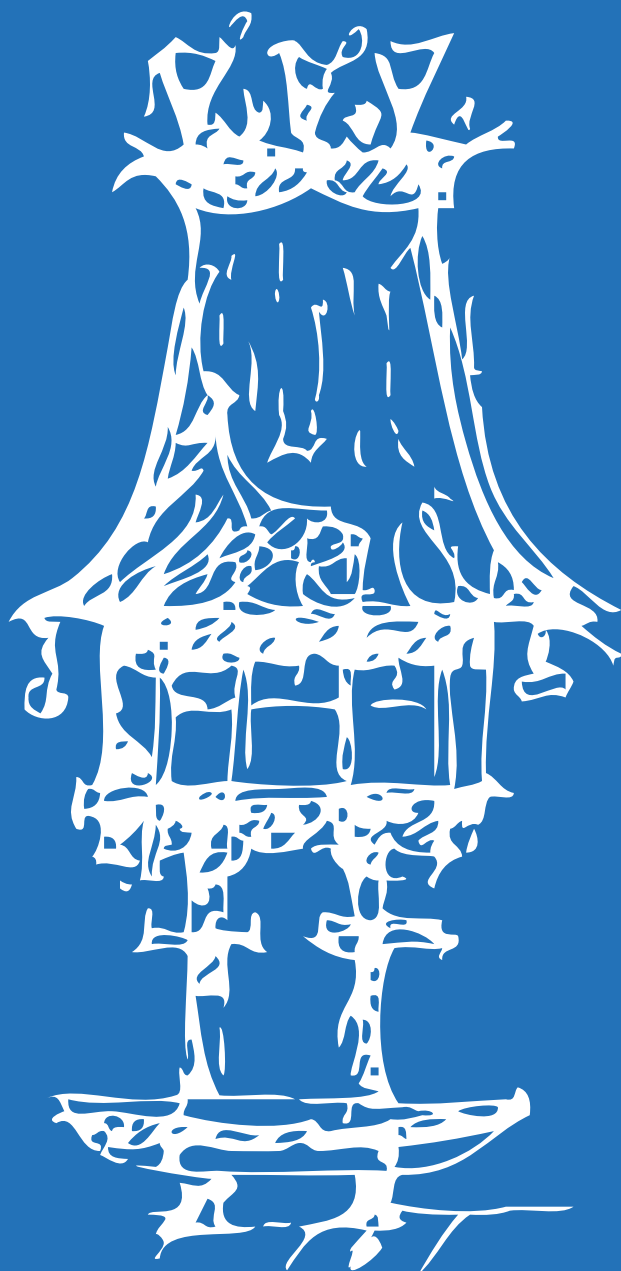
MALVINO, Electrónica no Laboratório. McGrawHill. (s.d.).


PEREIRA, A. Silva e outros. Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 11.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros, Sistemas Analógicos e Digitais, 11.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).

PINTO, António; CALDEIRA, José, Tecnologias, 12.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).







Aplicações com Amplificadores Operacionais

Módulo 10

Apresentação

Este módulo tem carácter teórico-prático, por isso deverá decorrer em parte em ambiente laboratorial de forma a permitir aos alunos verificarem e comprovarem os conceitos teóricos estudados relativos às características, funcionamento e aplicações dos Amplificadores Operacionais – A.O.

Esta disciplina tem como intenção tornar o aluno apto a compreender a linguagem e as técnicas utilizadas, possibilitando assim um melhor aproveitamento na sequência dos estudos desta e das outras disciplinas técnicas e também na comunicação adequada com os profissionais da área.

Introdução

A abordagem deste módulo de Aplicações com Amplificadores Operacionais leva-nos a uma melhor compreensão dos vários tipos de aparelhos, que incorporam circuitos que utilizam estas características, existentes no mercado assim como a melhor escolha deste tipo de equipamentos para que se ajuste às crescentes evoluções disponíveis pelas diversas marcas. Este módulo requer um conhecimento básico de matemática e análise de circuitos eletrónicos básicos.

Objetivos de aprendizagem

Compreender o funcionamento de circuitos lineares e não lineares com amplificadores operacionais - AMPOP`s.

Identificar, analisar e implementar circuitos lineares e não lineares com AMPOP`s.

- Simular em computador, com recurso a *software* apropriado, o comportamento de circuitos eletrónicos com AMPOP`s.

Âmbito de conteúdos

- Circuitos lineares com AMPOP`S: Amplificadores, somadores.
- Circuitos não lineares com AMPOP`S: Comparadores, Diferenciadores, Schmit-Trigger, Integradores, Conversores, Filtros Ativos, Retificadores.



Circuitos não lineares

Introdução

Este módulo será um complemento do módulo anterior.

Tratamos anteriormente dos circuitos lineares, constituídos com circuitos integrados amplificadores operacionais.

Abordaremos agora as montagens também com circuitos integrados amplificadores operacionais, mas em que o seu comportamento não é linear, ou seja, em que o componente é levado a situações de saturação, para podermos tirar partido desse comportamento não linear.

Os circuitos abordados contemplarão montagens em malha aberta, em malha fechada com realimentação positiva, e em malha fechada com realimentação negativa.

Na figura seguinte relembrem-se os conceitos de linearidade e de não linearidade.

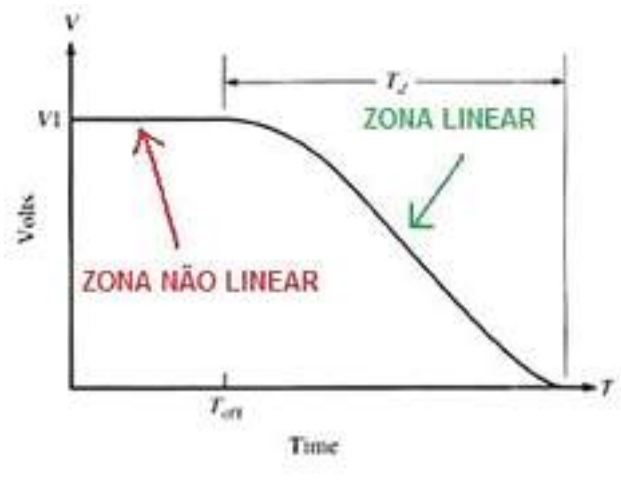


Fig. 1: Conceito de linearidade e não linearidade

Diz-se que um circuito com amplificadores operacionais funciona em zona linear ou com linearidade, quando o sinal apresentado na sua saída varia linearmente.

Dito de outro modo, o sinal apresentado na saída, varia de modo proporcional ao sinal injetado na entrada do circuito.



Encontramos esta situação na realimentação negativa, quando se não atinge a saturação e o sinal de saída apresenta a mesma forma do sinal de entrada, embora multiplicado por um valor constante, correspondente ao ganho do circuito.

Ao contrário, diz-se que um circuito com amplificadores operacionais funciona em zona não linear ou sem linearidade, quando o sinal apresentado na sua saída não varia linearmente.

Dito de outro modo, o sinal apresentado na saída, varia de modo não proporcional ao sinal injetado na entrada do circuito, apresentando em grande parte das situações uma resposta contínua (caso da saturação) e independente do valor da entrada.

Encontram-se nesta situação os circuitos em malha aberta que saturam facilmente em ambos os sentidos, para diferentes valores da tensão de entrada.

Também se verifica esta situação em realimentação positiva, em que existe a saturação dos amplificadores.

Há ainda alguns circuitos, a funcionar com realimentação negativa, que apresentam na saída sinais não lineares com os sinais de entrada, como é o caso dos circuitos integradores ou circuitos diferenciadores.

Convém também lembrar o que ficou dito no módulo anterior sobre a zona linear dos circuitos em malha aberta.

Nestas montagens a zona linear existente representa um espaço muito reduzido de variação dos sinais de entrada, como se pode ver na figura seguinte.



Fig. 2: Característica de transferência de tensão do amplificador em malha aberta



De facto, para muito pequenas variações do sinal de entrada, com cerca de $\pm 0,15$ mV e com tensões de alimentação de ± 15 V, o amplificador entra em saturação positiva ou negativa.

Estes valores são realmente muito reduzidos face às necessidades da maioria das aplicações, sendo apenas toleráveis em certos processos de medida.

Entre os circuitos não lineares a abordar neste módulo, destacam-se os comparadores de tensões simples, o comparador Schmitt-Trigger, o comparador de janela, o integrador, o diferenciador, os conversores de formas de onda, os geradores de PWM, os retificadores ativos com díodos e os filtros ativos.



Montagens com amplificadores operacionais

Introdução

Vamos então abordar um conjunto de circuitos com amplificadores operacionais a funcionar em zona não linear, agrupados em comparadores, integradores, diferenciadores, conversores de formas de onda, circuitos ativos com díodos, e filtros.

Será feita uma abordagem breve ao funcionamento destes circuitos, a apresentação das expressões que permitem calcular os diversos parâmetros importantes, e a referência à suas aplicações típicas.

Circuitos comparadores

Os circuitos comparadores utilizam as duas tensões de entrada, que após um processo de comparação para determinar qual delas é maior, leva a que o amplificador sature positivamente ou negativamente.

Com exceção de algumas montagens, como é o caso do comparador Schmitt-Trigger inversor, a generalidade dos comparadores funciona em malha aberta.

Existem comparadores com referência nula, em que uma das entradas se encontra ligada à massa, ou com referência não nula e, comparadores com duas alimentações (UCC e -UEE), ou com uma única alimentação (caso particular, em que uma das alimentações se encontra ligada à massa).

Comparador não inversor com referência nula

No comparador não inversor com referência nula, o sinal para comparação é ligado à entrada não inversora, ficando a entrada inversora ligada à massa (ver figura seguinte).



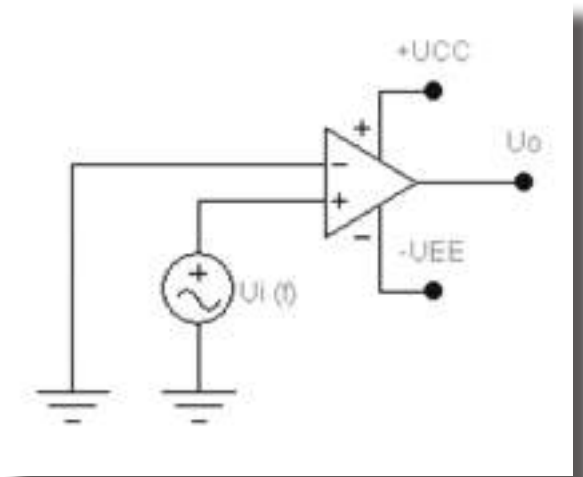


Fig. 3: Comparador não inversor com referência nula

Neste caso, a tensão de referência utilizada para fazer a comparação com o sinal de entrada (U_{REF}), é de 0 V, ou seja o potencial da massa.

O circuito satura positivamente, quando a tensão de entrada for superior à tensão de referência ($U_i > U_{REF}$).

O circuito satura negativamente, quando a tensão de entrada for inferior à tensão de referência ($U_i < U_{REF}$).

Na figura seguinte representa-se a característica de transferência deste comparador, onde se compreende melhor o que foi dito atrás.

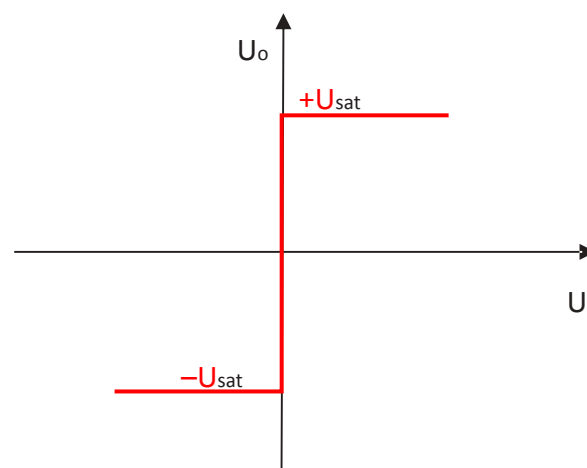


Fig. 4: Curva característica do comparador não inversor com referência nula



No entanto, esta curva corresponde a um amplificador ideal.

Na verdade, como foi visto anteriormente, existe uma zona linear muito reduzida, dentro da qual o amplificador não satura, ou seja, não é exatamente a 0 V que se dá a comutação.

Dependendo do circuito a ser utilizado como comparador, poderemos determinar o valor das tensões, mínima e máxima, para que o circuito funcione fora do intervalo linear.

Se tomarmos como exemplo o $\mu A741C$, que apresenta um ganho em malha aberta de 100000 e uma tensão de saturação de 13,5 V (corresponde ao valor de UCC reduzido de cerca de 1,5 V), podemos calcular estas tensões, mínima e máxima.

A tensão mínima que provoca a saturação do amplificador virá dada pelo valor determinado pela expressão seguinte.

$$U_{i,min} = \frac{+U_{sat}}{A_{vol}} = \frac{+13,5}{100000} = \pm 0,135mV$$

Assim, o circuito encontra-se na zona linear dentro destes dois limites, em saturação positiva acima de +0,135 mV, e em saturação negativa abaixo de -0,135 mV, conforme se pode ver na figura seguinte.

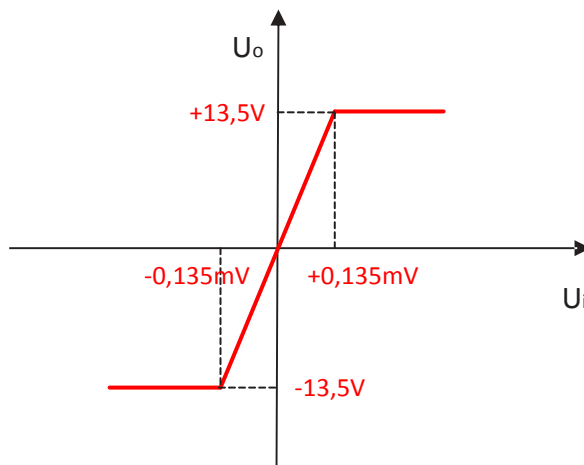


Fig. 5: Curva caraterística do comparador não inversor com referência nula

Portanto, em termos práticos, devemos atender a estes valores, quando seja feita a definição do ponto de comutação, pois existe um pequeno intervalo de valores durante o qual a resposta do amplificador não é uma saída saturada.



Este circuito também se designa por detetor de passagem por zero, dado permitir referenciar o sinal alternado de entrada a um valor de comparação igual a zero.

São muitas as aplicações deste tipo de circuito, em inúmeras áreas da eletrónica e em setores muito diversificados.

Destacam-se as aplicações como conversor de formas de onda e como dispositivo de ligação ou acoplamento (“interface”) entre circuitos analógicos e circuitos digitais.

Comparador inversor com referência nula

No caso do comparador inversor com tensão de referência nula, é agora a entrada não inversora que fica ligada à massa, sendo o sinal aplicado na entrada inversora, como se pode ver na figura seguinte.

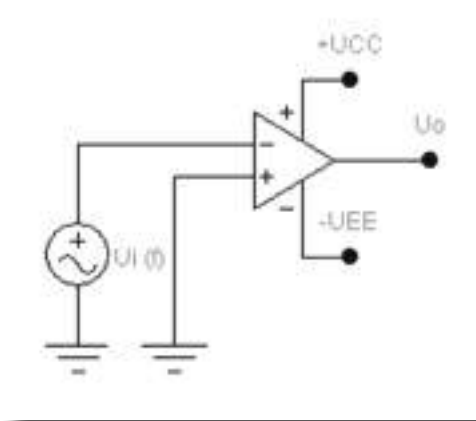


Fig. 6: Comparador inversor com referência nula

Neste caso, a tensão de referência utilizada para fazer a comparação com o sinal de entrada (U_{REF}), é também de 0 V, ou seja o potencial da massa.

O circuito satura positivamente, quando a tensão de entrada for inferior à tensão de referência ($U_i < U_{REF}$).

O circuito satura negativamente, quando a tensão de entrada for superior à tensão de referência ($U_i > U_{REF}$).

Na figura seguinte representa-se a característica de transferência deste comparador, onde se compreende melhor o que foi dito atrás.



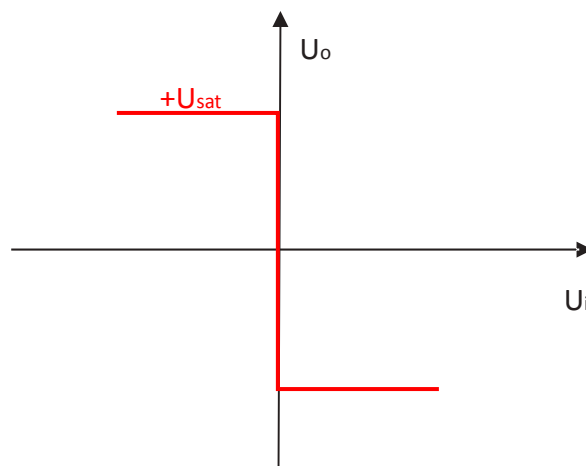


Fig. 7: Curva caraterística do comparador inversor com referência nula

Do mesmo modo que no circuito analisado anteriormente, esta curva corresponde a um amplificador ideal, pelo que este facto deverá ser levado em linha de conta no dimensionamento do circuito real.

Nos comparadores em malha aberta é usual serem utilizados díodos de proteção montados em antiparalelo entre ambas as entradas (como pode ser visto na figura seguinte), para proteção do circuito contra picos de tensão.

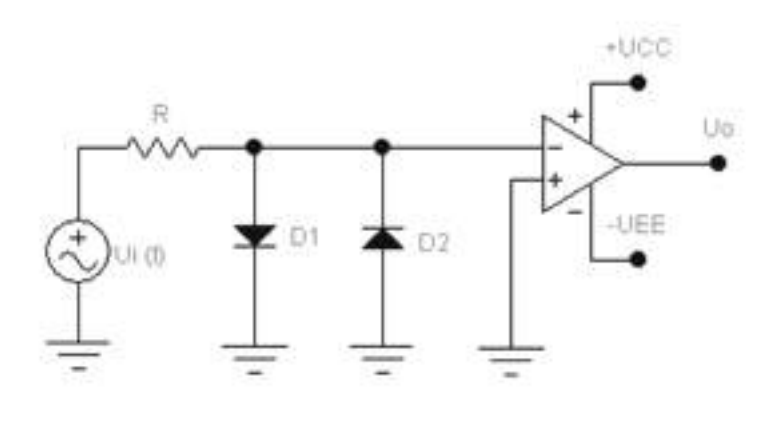


Fig. 8: Comparador inversor com referência nula, com entradas protegidas

Se considerarmos de novo o circuito integrado $\mu A741C$, sabemos que basta uma tensão de $0,135\text{ mV}$ para provocar a saturação do circuito.

Como os díodos entram em condução com uma tensão entre os 600 mV e os 700 mV (suficientemente superior aos $0,135\text{ mV}$), eles provocarão um curto-circuito na entrada, sempre que surja uma tensão elevada (indesejada), desviando esta tensão e protegendo assim o circuito.



A resistência R destina-se a fazer a proteção dos díodos.

De entre as aplicações do comparador inversor com tensão de referência nula, destaca-se a utilização como comparador com saída limitada, indicado na figura seguinte.

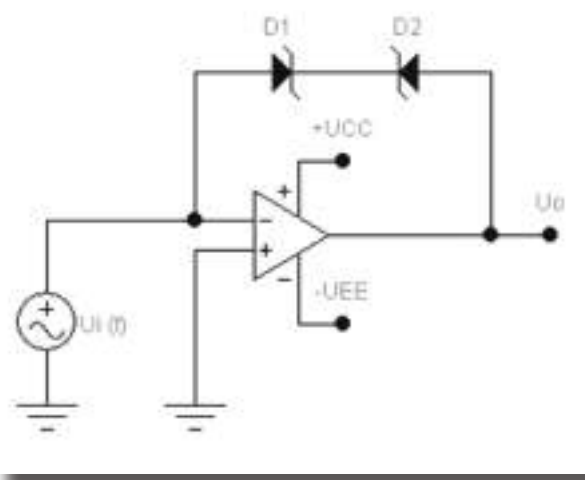


Fig. 9: Comparador com saída limitada

Supondo os díodos zéner iguais, quando a entrada for positiva, a saída será negativa e igual a $U_o = -V_Z - 0,7$ (V), e quando a entrada for negativa, a saída será positiva e igual a $U_o = +V_Z + 0,7$ (V).

Comparador não inversor com referência não nula

Dado haver muitas vezes a necessidade de comparar entradas com valores diferentes de zero, existem comparadores que têm uma referência não nula, ou seja as duas entradas, encontram-se ligadas a tensões diferentes de zero.

Este tipo de circuito e a sua característica, encontram-se representados nas duas figuras seguintes.

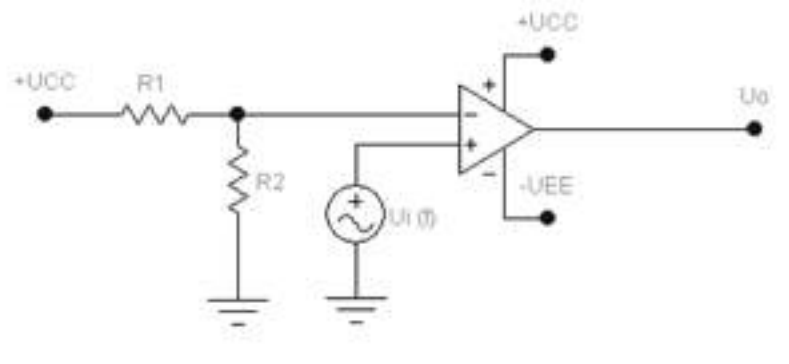


Fig. 10: Comparador não inversor com referência não nula (positiva)



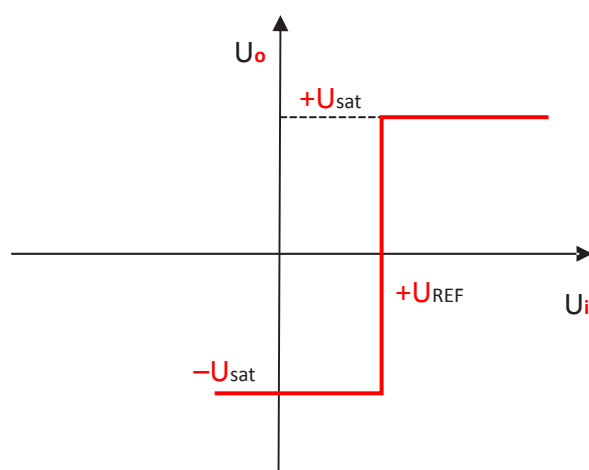


Fig. 11: Curva caraterística do comparador não inversor com referência não nula (positiva)

A tensão de referência é calculada a partir do divisor de tensão ligado à entrada inversora, e descrito pela equação seguinte.

$$U_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{CC}$$

Quando a tensão de referência for negativa, a malha divisora de tensão é constituída a partir de uma fonte de alimentação DC negativa (-UEE), estando representados nas duas figuras seguintes o circuito e a sua respetiva caraterística.

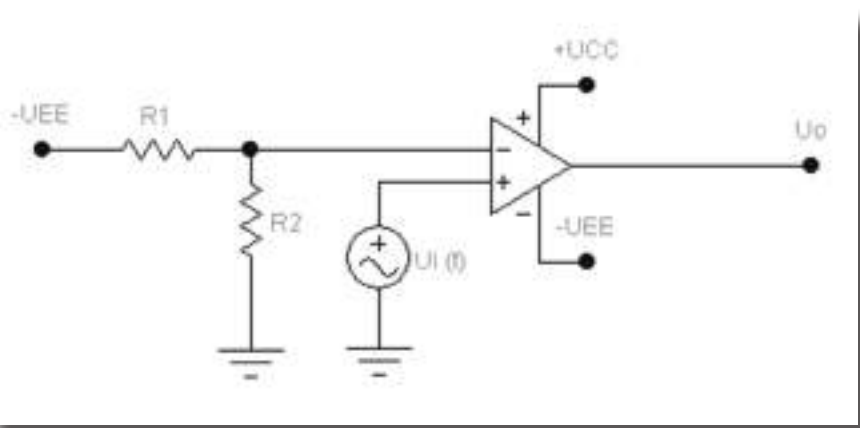


Fig. 12: Comparador não inversor com referência não nula (negativa)



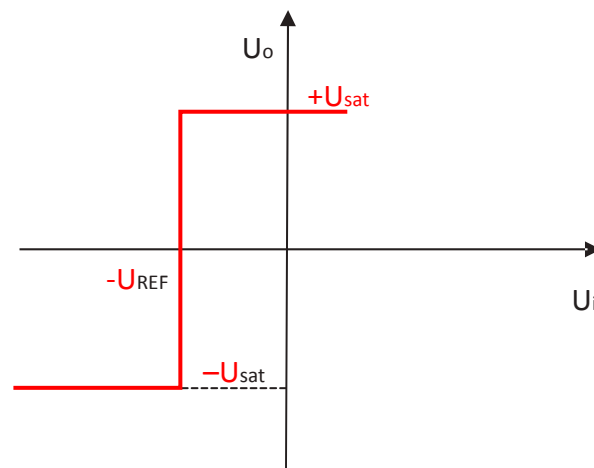


Fig. 13: Curva característica do comparador não inversor com referência não nula (negativa)

A tensão de referência é calculada a partir do divisor de tensão ligado à entrada inversora, e descrito pela equação seguinte.

$$U_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times (-U_{EE})$$

Comparador com uma única alimentação

Em determinadas situações, particularmente quando utilizados em aplicações destinadas a funcionar com sistemas digitais, com códigos binários “1” e “0”, torna-se vantajoso utilizar comparadores com uma única alimentação, conforme se indica nas duas figuras seguintes.

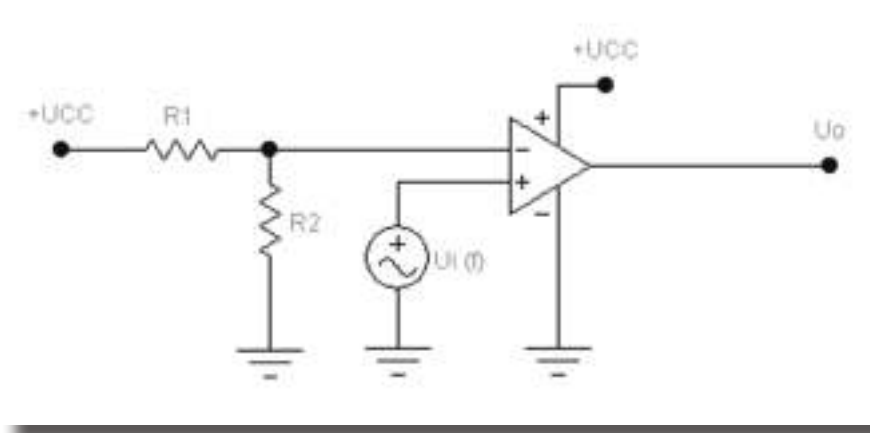


Fig. 14: Comparador com uma única alimentação



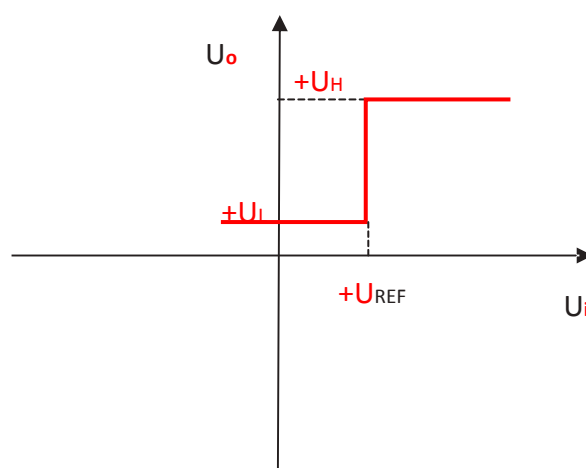


Fig. 15: Curva característica do comparador com uma única alimentação

A características de transferência encontra-se assim “deslocada” verticalmente, permitindo que se trabalhe com dois níveis de saída, um dito de nível alto (U_H), e outro dito de nível baixo (U_L).

Quando a entrada U_i for maior que U_{REF} , a saída satura no nível alto U_H (no caso do exemplo do circuito binário, com 5 V), e quando a entrada U_i for menor que U_{REF} , a saída satura no nível baixo U_L (no caso do exemplo do circuito binário, com 0 V).

Comparador de janela

Relativamente aos outros circuitos comparadores, a principal diferença para o comparador de janela, reside na existência de dois pontos (tensões) de comparação, dentro dos quais (a janela) temos a saída saturada no nível alto ou no nível baixo, consoante o tipo de montagem, e fora deste intervalo de valores, acontece a saturação no nível contrário.

Neste caso, o comparador é realizado com recurso a dois amplificadores operacionais preferencialmente iguais.

Na figura seguinte representa-se um comparador de janela com saída baixa entre limites.



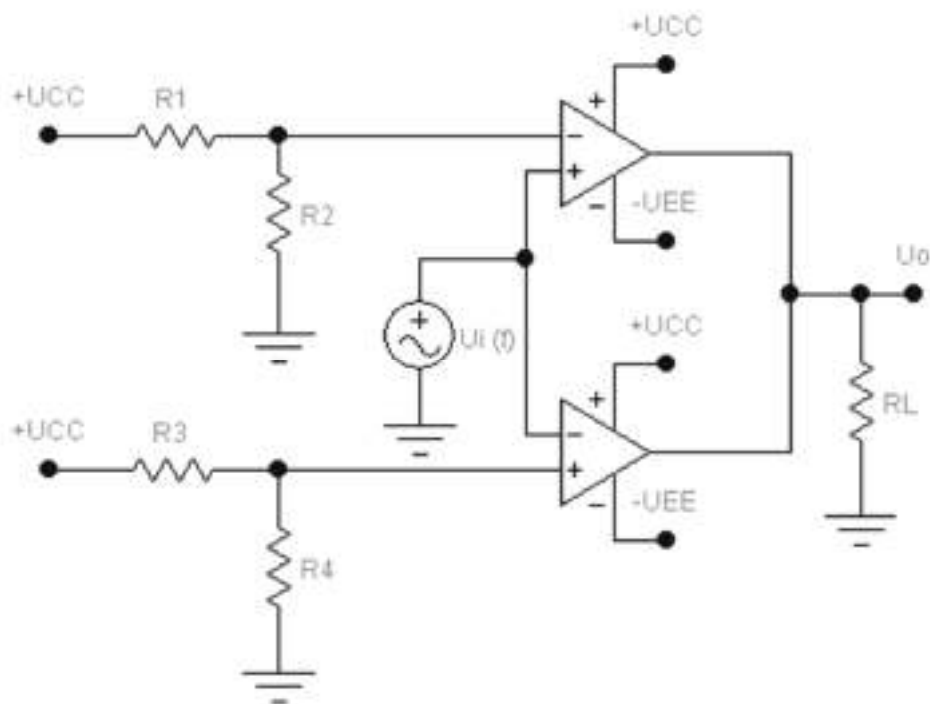


Fig. 16: Comparador de janela com saída baixa entre limites

Neste tipo de comparador, o nível de referência baixo (LTP), que fica ligado à entrada inversora do amplificador superior, vem dado pela expressão seguinte.

$$LTP = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times (U_{CC})$$

O nível de referência alto (UTP), que fica ligado à entrada não inversora do amplificador inferior, vem dado pela expressão seguinte.

$$UTP = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times (U_{CC})$$



Na figura seguinte representa-se a característica de transferência do comparador de janela com saída baixa entre limites.

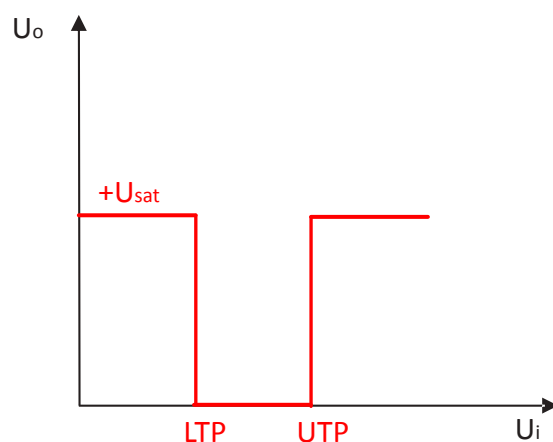


Fig. 17: Curva caraterística do comparador de janela com saída baixa entre limites

No caso de se pretender um comparador de janela com saída alta entre limites (caraterística inversa da anterior), utiliza-se uma montagem como a que se indica na figura seguinte.

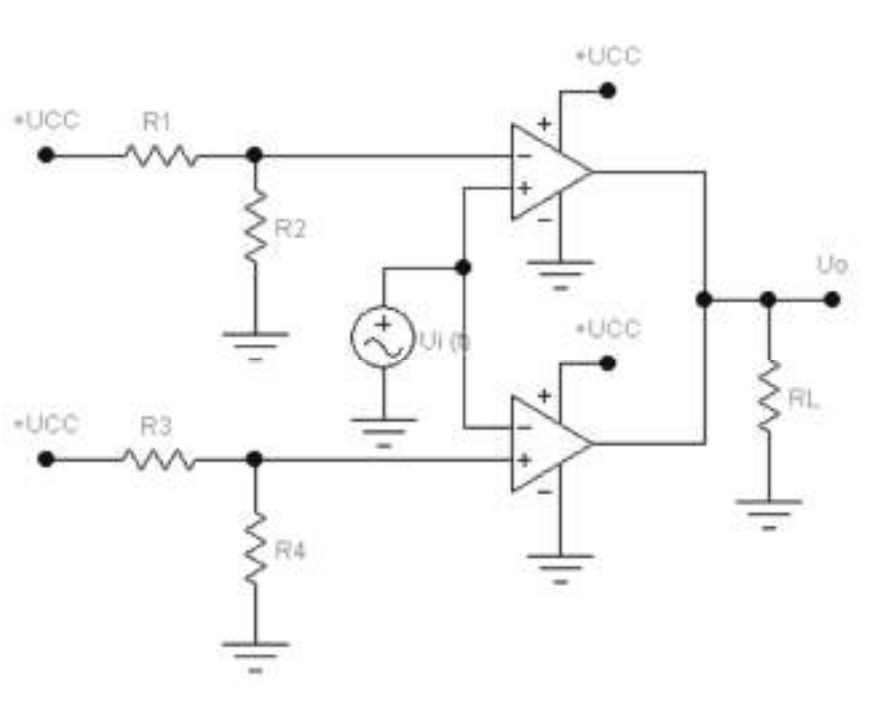


Fig. 18: Comparador de janela com saída alta entre limites



Neste tipo de comparador, o nível de referência alto (UTP), que fica ligado à entrada inversora do amplificador superior, vem dado pela expressão seguinte.

$$UTP = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times (U_{CC})$$

O nível de referência baixo (LTP), que fica ligado à entrada não inversora do amplificador inferior, vem dado pela expressão seguinte.

$$LTP = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times (U_{CC})$$

Na figura seguinte representa-se a característica de transferência do comparador de janela com saída baixa entre limites.

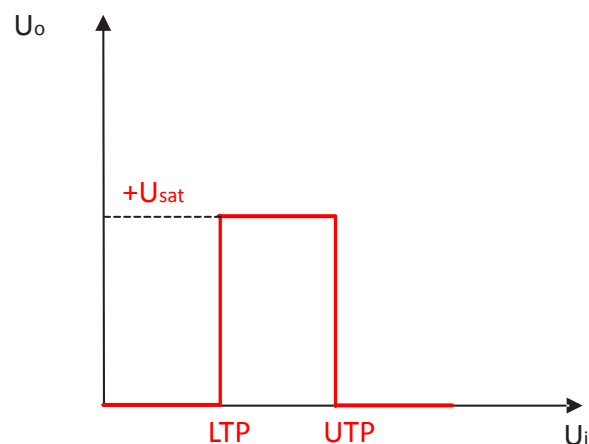


Fig. 19: Curva característica do comparador de janela com saída alta entre limites

Comparador com histerese (comparador Schmitt-Trigger)

O comparador com histerese, ou comparador de Schmitt-Trigger é um amplificador operacional com realimentação negativa, existente na configuração inversora e não inversora.

O comparador com histerese foi criado para eliminar um problema de interferência de ruído, muito comum nos amplificadores operacionais.



De facto, verifica-se que os ruídos captados pelas entradas dos amplificadores operacionais (sinais alternados de baixas amplitudes), atingem e ultrapassam frequentemente o diferencial mínimo ($\pm 0,15 \text{ mV}$), provocando a saturação do amplificador, positivamente ou negativamente.

Estes sinais indesejados (ruído), provocam com frequência erros nas saídas dos amplificadores.

Na figura seguinte representa-se um comparador de Schmitt-Trigger na configuração inversora.

Vamos proceder à análise do seu funcionamento, para melhor se perceber como é capaz de se tornar insensível ao ruído captado pelas suas entradas, que se comportam como antenas recetoras.

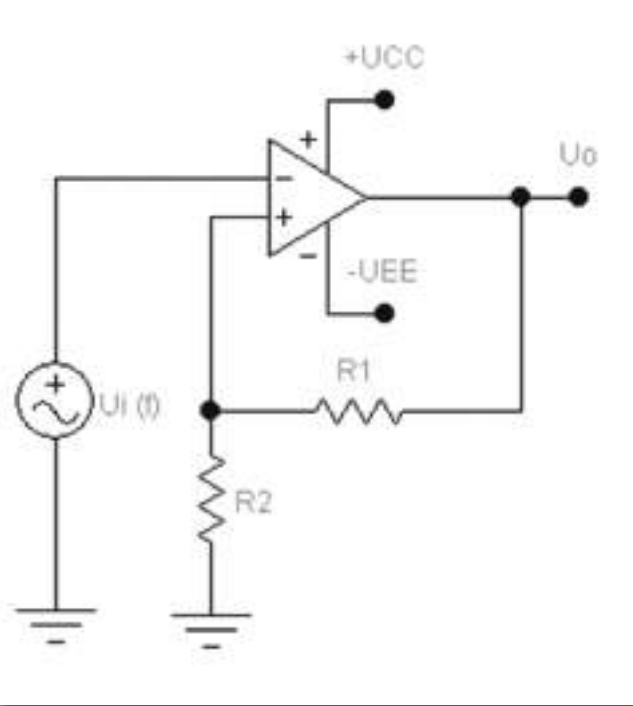


Fig. 20: Comparador com histerese (comparador Schmitt-Trigger) inversor

Como se vê da figura anterior, o sinal é aplicado à entrada inversora do amplificador operacional.



O divisor de tensão existente na malha de realimentação positiva, ligada à entrada não inversora, gera nesta entrada uma tensão de comutação (tensão de referência), quando a tensão de saturação é positiva, que vem dada pela expressão seguinte.

$$UTP = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times (U_{sat}) = B \times U_{sat}$$

Quando a tensão de saturação é negativa, tensão de comutação vem dada pela expressão seguinte.

$$LTP = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} \times (U_{sat}) = -B \times U_{sat}$$

B corresponde, como visto anteriormente, ao divisor de tensão que constitui a malha de realimentação.

$$B = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Quando o amplificador operacional está saturado positivamente, temos na entrada não inversora uma tensão de comutação positiva dada por $+B \times U_{sat}$.

Quando o amplificador operacional está saturado negativamente, temos na entrada não inversora uma tensão de comutação negativa dada por $-B \times U_{sat}$.

Quando a tensão da entrada aplicada ao terminal inversor for positiva e maior que $B \times U_{sat}$, o amplificador operacional fica saturado negativamente (porque é inversor), com o valor $-U_{sat}$.

Para que a saída atinja a saturação, agora positivamente, com o valor $+U_{sat}$, será necessário que a tensão de entrada seja negativa e ainda, que seja menor que $-B \times U_{sat}$. Daqui se conclui que o comparador de Schmitt-Trigger tem uma margem de segurança entre $-B \times U_{sat}$ e $+B \times U_{sat}$, sem que se verifique alteração de estado na saída, o que permite que se torne insensível aos sinais de ruído captados pelas entradas.

Esta margem de segurança correspondente a $2 \times B \times U_{sat}$, funciona como uma barreira ao ruído, que terá que ter uma amplitude superior a este intervalo, para poder causar perturbações no circuito.



Tal comportamento é visível na característica de transferência apresentada na figura seguinte.

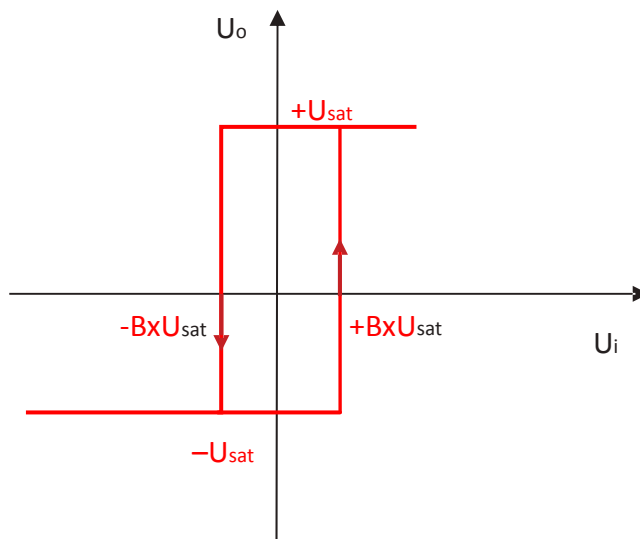


Fig. 21: Curva caraterística do comparador com histerese (comparador Schmitt-Trigger) inversor

Esta margem de segurança referida, define-se como histerese e é dada pela expressão seguinte.

$$H = UTP - LTP = (B \times U_{sat}) - (-B \times U_{sat}) = 2 \times B \times U_{sat}$$

Nas duas figuras seguintes representam-se, a montagem de um comparador de Schmitt-Trigger na configuração não inversora, e a respetiva característica de transferência.

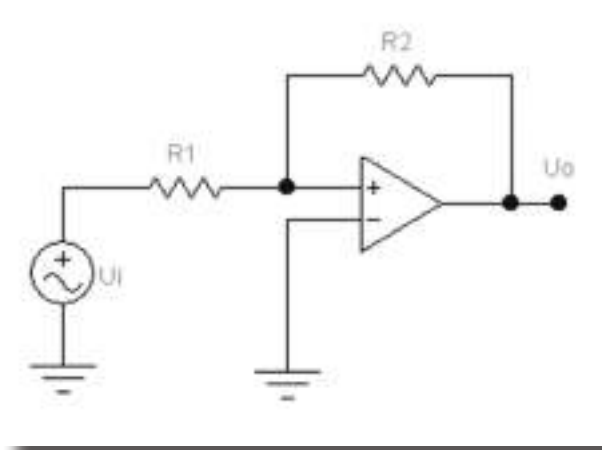


Fig. 22: Comparador com histerese (comparador Schmitt-Trigger) não inversor



A tensão de comutação (tensão de referência), quando a tensão de saturação é positiva, vem dada pela expressão seguinte.

$$UTP = \frac{R_1}{R_2} \times (U_{sat}) = B \times U_{sat}$$

Quando a tensão de saturação é negativa, a tensão de comutação vem dada pela expressão seguinte.

$$LTP = -\frac{R_1}{R_2} \times (U_{sat}) = -B \times U_{sat}$$

B corresponde, como visto anteriormente, ao divisor de tensão que constitui a malha de realimentação.

$$B = \frac{R_1}{R_2}$$

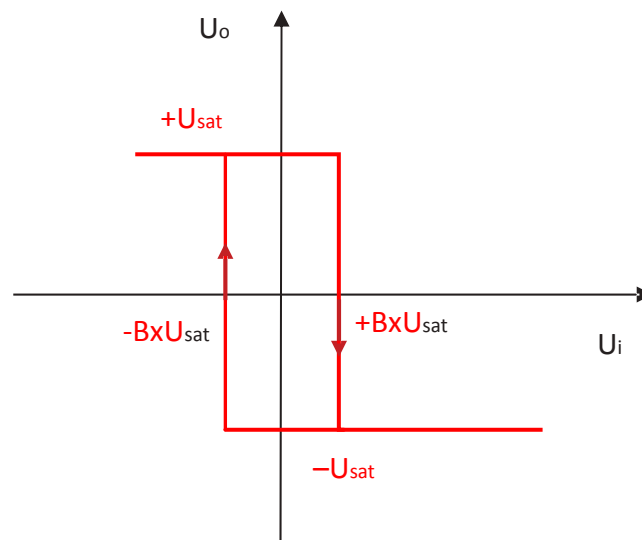


Fig. 23: Curva característica do comparador com histerese (comparador Schmitt-Trigger) não inversor



Gerador de PWM como comparador

O amplificador operacional PWM na sua versão como comparador, para além das aplicações já abordadas, é utilizado com bastante importância como gerador de PWM (“Pulse Width Modulation”), ou gerador de modulação de largura de impulsos.

As principais versões são o gerador de PWM de simples magnitude e o gerador de PWM de antifase.

Na figura seguinte, encontra-se representado um destes circuitos, o de simples magnitude.

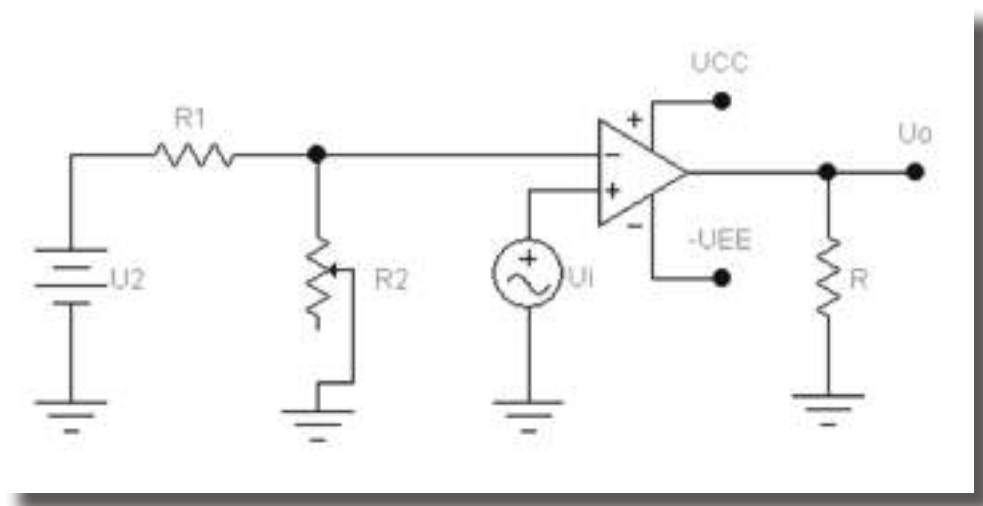


Fig. 24: Gerador de PWM com comparador

Circuitos integradores

O circuito integrador é aquele que executa a operação matemática designada por integração.

Esta função é inversa da função diferenciação, que será analisada de seguida.

Se obtivermos um determinado sinal por um processo de integração, se diferenciarmos este sinal obtido, voltaremos a ter o sinal original, e vice-versa.

Para analisar o comportamento do circuito integrador, vamos considerar duas situações distintas, a primeira, em que se considera na entrada do circuito um sinal de duração limitada T , e a segunda, em que são aplicados sinais contínuos, tais como senoide, onda quadrada e onda triangular.



Considerando o circuito da figura seguinte, um circuito com realimentação negativa, realizada através da malha que constituída pelo condensador C , e com a tensão de entrada a ser aplicada através de uma resistência R , conclui-se que se está perante uma malha RC série.

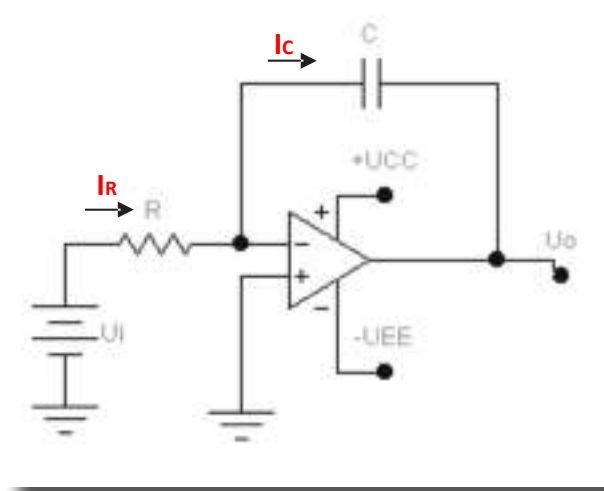


Fig. 25: Circuito integrador

Verifica-se que $I_R = I_C$, pois no nó de ligação destes dois componentes e de ligação à entrada inversora do circuito, $I_R = I_{i(-)} + I_C$, sendo $I_{i(-)} = 0$ (existência de uma massa virtual).

Analisando a malha de entrada, como $I_R = I_C = U_i / R$, conclui-se que o condensador vai carregar linearmente, pois o valor I_C é constante.

Analisando agora a malha de saída, conclui-se que $U_{i(-)} = U_C + U_o$, ou seja $U_o = -U_C$, pois $U_{i(-)} = 0$, o que significa que o condensador se vai carregando linearmente, em vez de ter uma carga típica (logarítmica), como se pode ver na figura seguinte.

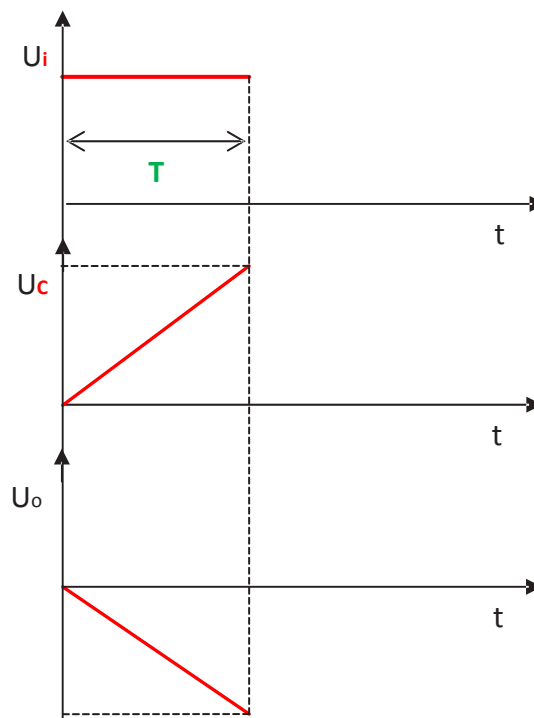


Fig. 26: Tensões no circuito integrador, com impulso U_i na entrada



Conclui-se então que aplicando na entrada uma tensão constante, se obtém na saída uma rampa com declive negativo, entre 0 V e $-U_i$ V, sendo a tensão de carga do condensador dada pela expressão seguinte.

$$U_c = \frac{T}{R \times C} \times U_i$$

A tensão na saída terá o valor dado pela expressão seguinte.

$$U_o = -\frac{T}{R \times C} \times U_i$$

Considerando agora, uma onda quadrada, que na realidade é um trem ou sequência de impulsos, aplicado ao circuito integrador, obtém-se na saída uma onda triangular, tal como se vê na figura seguinte.

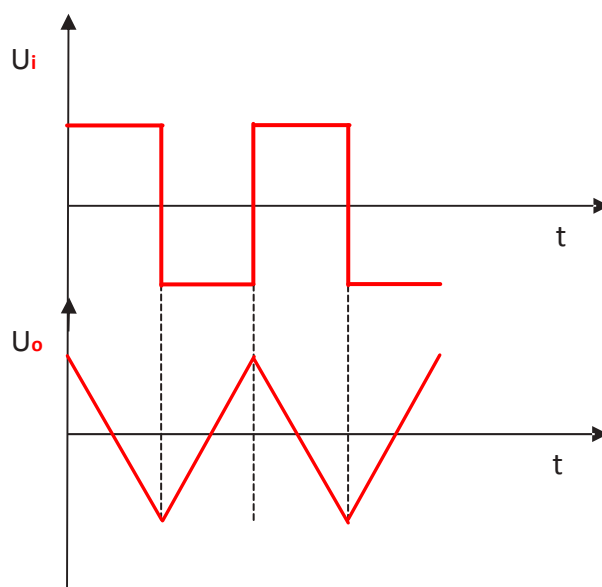


Fig. 27: Tensões no circuito integrador, com onda quadrada na entrada

Sendo U_{ip} a tensão de pico da onda quadrada na entrada, o correspondente valor da tensão de pico da onda triangular na saída (U_{op}), será dado pela expressão seguinte.

$$U_{op} = -\frac{U_{ip}}{4 \times f \times R \times C}$$



Se agora for aplicada uma onda sinusoidal ao circuito integrador, a saída será também uma onda sinusoidal, mas desfasada de 90° ($\pi/2$) em avanço relativamente à entrada, como se pode ver na figura seguinte (ou seja, matematicamente, a integração de um seno produzirá um cosseno e vice-versa).

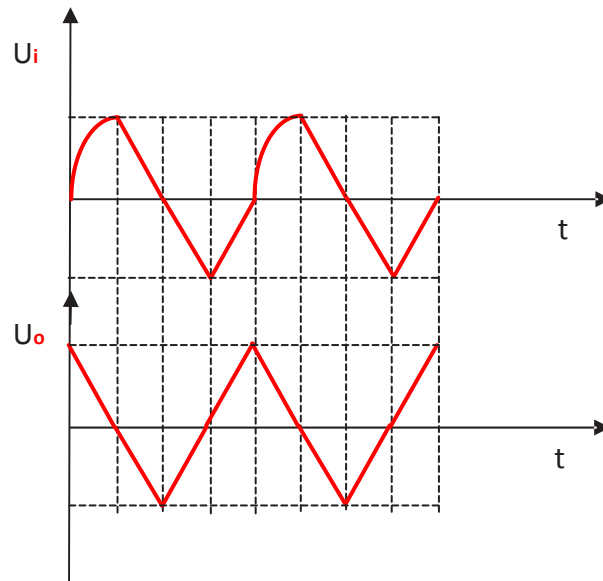


Fig. 28: Tensões no circuito integrador, com onda sinusoidal na entrada

Em termos práticos, o facto de este circuito incluir um condensador, faz com que o seu comportamento seja afetado pelo valor da frequência da onda utilizada.

Para baixas frequências, o ganho aumenta bastante, tornando-se o circuito instável e podendo saturar com facilidade.

Para resolver este problema, os circuitos integradores práticos, apresentam na malha de realimentação uma resistência em paralelo com o condensador, conforme se representa na figura seguinte.

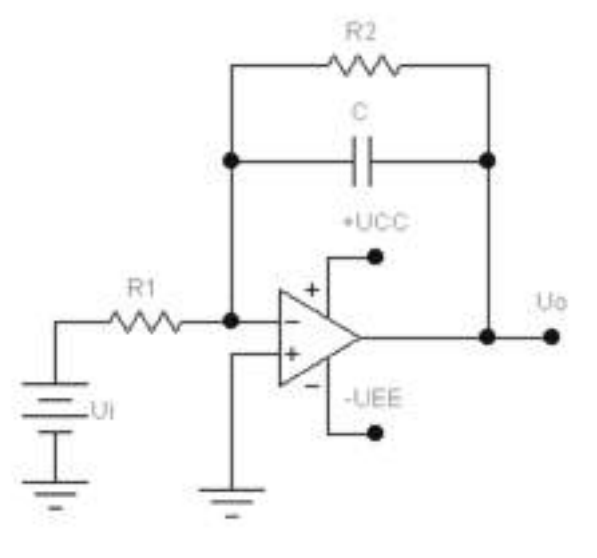


Fig. 29: Circuito integrador prático



Para garantir a estabilidade necessária ao correto funcionamento do circuito, é preciso que a resistência R2 tenha um valor maior ou igual a dez vezes R1.

$$R_2 \geq 10 \times R_1$$

Para além desta condição, é também necessário que se verifique outra condição fundamental, descrita na expressão seguinte, em que T representa o período da onda ($T = 1 / f$).

$$R_1 \times C \geq 10 \times T$$

Quando a frequência baixa e se aproxima de 0 Hz, o integrador comporta-se como um simples circuito amplificador inversor.

Define-se então uma frequência limite (f_L), que determina se o circuito integrador se comporta como um verdadeiro circuito integrador, ou como um simples circuito amplificador inversor.

$$f_L = \frac{1}{2 \times \pi \times R_2 \times C}$$

Abaixo deste valor de f_L , o circuito comporta-se como amplificador inversor.

Acima deste valor de f_L , o circuito comporta-se como integrador.

O integrador é utilizado muito habitualmente em conversores de forma de onda.

Circuitos diferenciadores

O circuito diferenciador é aquele que executa a operação matemática designada por derivação ou diferenciação.

Este circuito é análogo ao circuito integrador, apresentando o condensador e a resistência em posições trocadas em relação ao integrador, como se pode ver na figura seguinte.



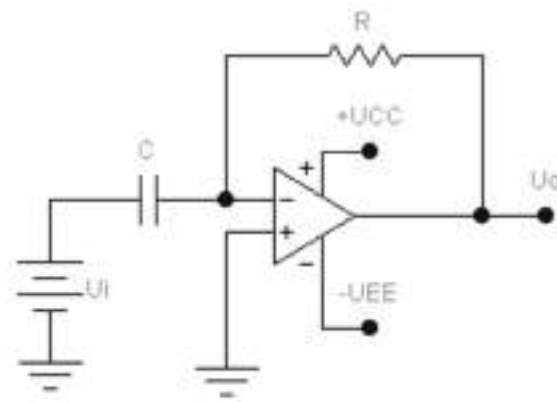


Fig. 30: Circuito diferenciador

Ao aplicar uma tensão a um condensador, a corrente que flui para ele tem um pico inicial, decrescendo progressivamente até se anular, quando o condensador ficar carregado com o valor da tensão que lhe é aplicada, conforme se vê na figura seguinte.

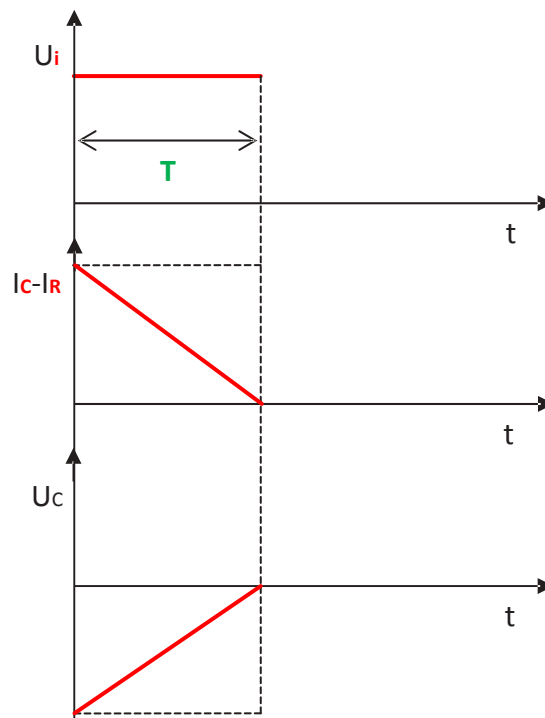


Fig. 31: Tensões no circuito diferenciador, com impulso U_i na entrada

Da figura, pode observar-se que estas duas características (corrente e tensão) têm características inversas, o que é facilmente entendível.



A tensão de saída será simétrica da tensão existente aos terminais da resistência R2, ou seja $U_o = -UR_2$.

Se aplicarmos agora uma onda quadrada ao condensador, ele irá carregar e descarregar sucessivamente, produzindo uma série ou trem de impulsos, como pode ser visto na figura seguinte.

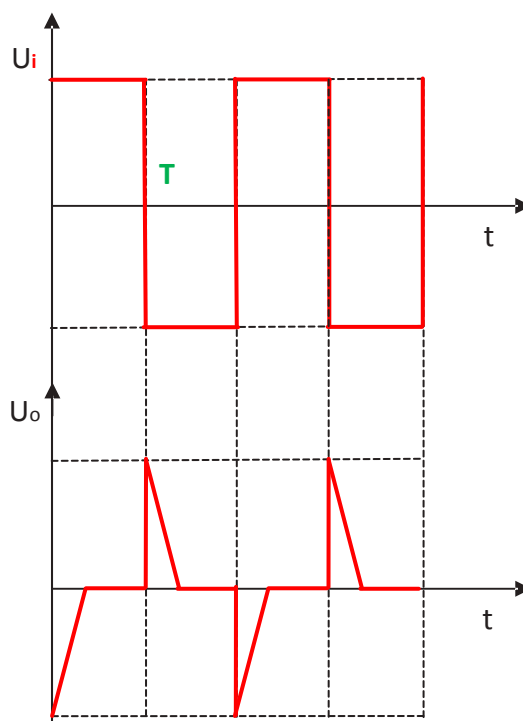


Fig. 32: Tensões no circuito diferenciador, com onda quadrada na entrada

Se aplicarmos agora uma onda triangular ao circuito diferenciador, vamos obter na saída uma onda quadrada.

As curvas características encontram-se representadas na figura seguinte.

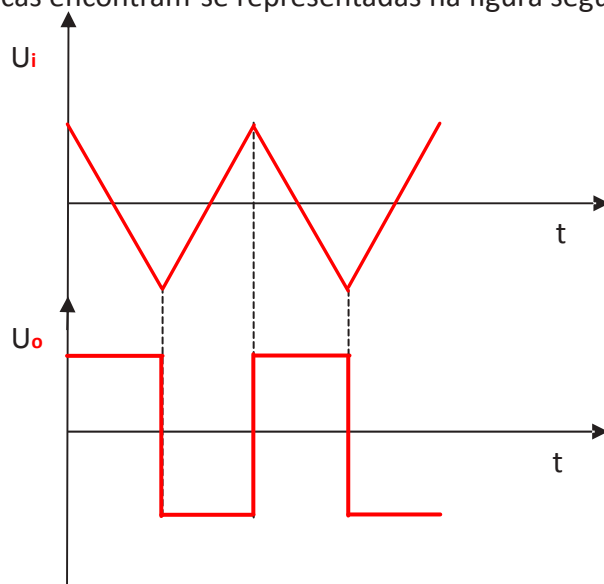


Fig. 33: Tensões no circuito diferenciador, com onda quadrada na entrada



A tensão de pico da onda quadrada vem dada pela expressão indicada a seguir.

$$U_{op} = 4 \times R_2 \times C \times f \times U_{ip}$$

Tal como acontece no circuito integrador, pela mesma razão (existência do condensador), o comportamento do circuito será afetado pelo valor da frequência de funcionamento. Quando a frequência for muito alta, o ganho tende para um valor constante, pelo que o circuito passa a comportar-se como se de um amplificador inversor se tratasse. Para eliminar este problema, utiliza-se uma resistência em série com o condensador, como se pode ver na figura seguinte.

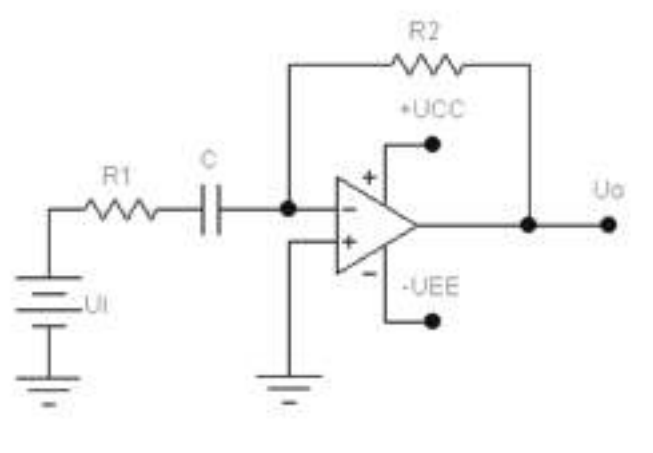


Fig. 34: Circuito diferenciador prático

Para garantir a estabilidade necessária ao correto funcionamento do circuito, é preciso que a resistência R2 tenha um valor maior ou igual a dez vezes R1.

$$R_2 \geq 10 \times R_1$$

Para além desta condição, é também necessário que se verifique outra condição fundamental, descrita na expressão seguinte, em que T representa o período da onda ($T = 1 / f$).

$$R_1 \times C \geq T/10$$



Quando a frequência for muito elevada, o diferenciador comporta-se como um simples circuito amplificador inversor.

Define-se então uma frequência limite (f_L), que determina se o circuito diferenciador se comporta como um verdadeiro circuito diferenciador, ou como um simples circuito amplificador inversor.

$$f_L = \frac{1}{2 \times \pi \times R_1 \times C}$$

Abaixo deste valor de f_L , o circuito comporta-se como diferenciador.

Acima deste valor de f_L , o circuito comporta-se como amplificador inversor.

O diferenciador, tal como o integrador, é utilizado em conversores de forma de onda, circuitos que transformam um determinado tipo de sinal ou forma de onda, noutro de tipo diferente, como será visto seguidamente.

Conversores de forma de onda

Os conversores de forma de onda, são então circuitos que permitem transformar as formas de onda noutros tipos de formas de onda.

Alguns foram já abordados anteriormente, como sejam os casos dos circuitos integradores e diferenciadores, no fundo, a base dos conversores de forma de onda.

As principais conversões de forma de onda são:

- De qualquer tipo de onda (sinusoidal, quadrada, triangular), para onda quadrada;
- De onda quadrada, para onda triangular;
- De onda triangular, para onda quadrada;
- De onda quadrada, para série ou trem de impulsos.

Entre as ondas triangulares, merece destaque a chamada onda de dente de serra, em que um dos lados do triângulo é vertical, utilizada em determinadas aplicações, como seja o caso dos cinescópios ou tubo de raios catódicos.



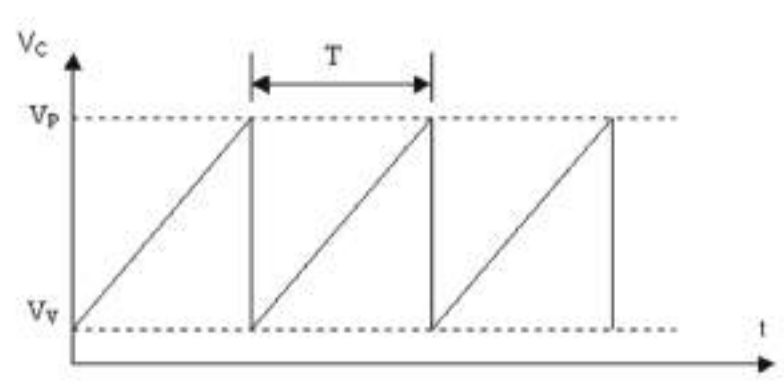


Fig. 35: Representação da onda dente de serra

Vejamos agora alguns circuitos para converter os diferentes tipos de onda.

Conversor de qualquer tipo de onda para onda quadrada

O circuito comparador com referência nula, representado na figura seguinte, converte qualquer tipo de onda (sinusoidal, quadrada, triangular).

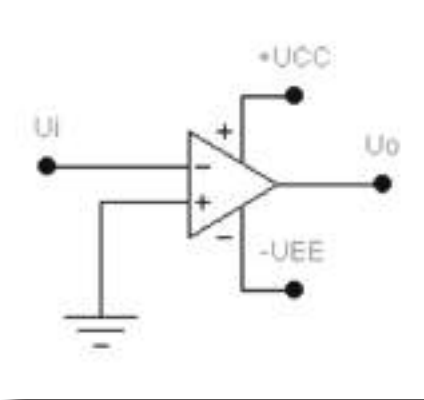


Fig. 36: Conversor de qualquer tipo de onda para onda quadrada

Quando a tensão de entrada for positiva, a saída satura positivamente, e quando for negativa, satura negativamente.

Para reduzir as eventuais interferências de ruído, pode ser usado um comparador de Schmitt Trigger para produzir a onda quadrada.



Conversor de onda quadrada para onda triangular

O circuito integrador é uma das aplicações típicas para a conversão de onda quadrada em onda triangular (ver figura seguinte).

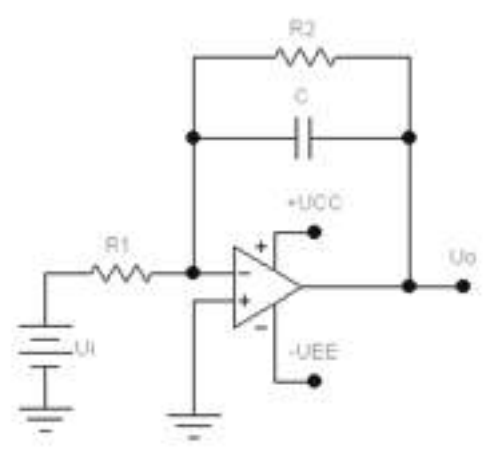


Fig. 37: Conversor de onda quadrada para onda triangular

A relação entre a tensão de saída pico a pico (U_{opp}) e a tensão de entrada de pico (U_{ip}), é dada pela expressão seguinte.

$$U_{opp} = \frac{T}{2 \times R_1 \times C} \times U_{ip} = \frac{U_{ip}}{2 \times f \times R_1 \times C}$$

Conversor de qualquer tipo de onda para série ou trem de impulsos

Como conversor deste tipo de onda, utiliza-se o comparador com tensão de referência não nula e com uma única alimentação.

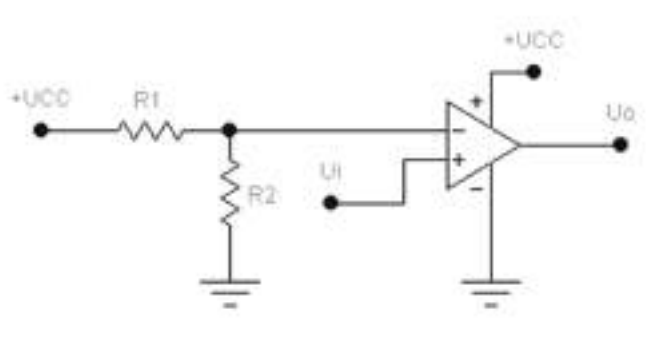


Fig. 38: Conversor de qualquer tipo de onda para série ou trem de impulsos



A largura do impulso gerado é controlada pelo valor da resistência R2.

Se for utilizado um potenciômetro em lugar desta resistência, passa a poder ser ajustado o valor da largura do impulso, por simples atuação no potenciômetro.

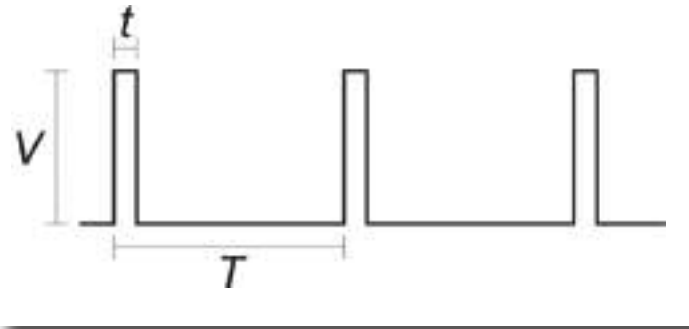


Fig. 39: Relação do período da onda com a largura do impulso

Circuitos ativos com díodos

Os processos de retificação foram já estudados em módulos anteriores, pelo que aqui nos focaremos essencialmente nos circuitos que permitem fazer retificação com recurso a amplificadores operacionais.

Como se sabe, a retificação pode ser simples ou de meia onda, e retificação de onda completa. A retificação simples consegue-se pela simples colocação de um díodo (ver figura seguinte).

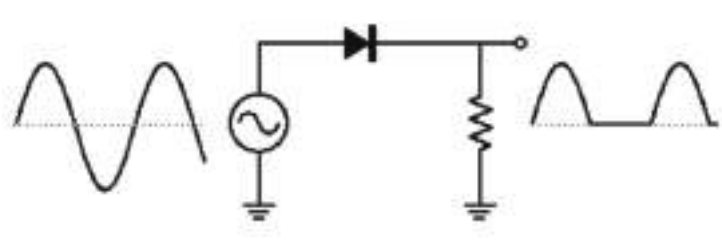


Fig. 40: Retificação simples ou de meia onda com díodo



A retificação de onda completa, é habitualmente conseguida com recurso a dois díodos e um transformador com ponto médio, ou com recurso a uma ponte retificadora de díodos (ver figura seguinte).

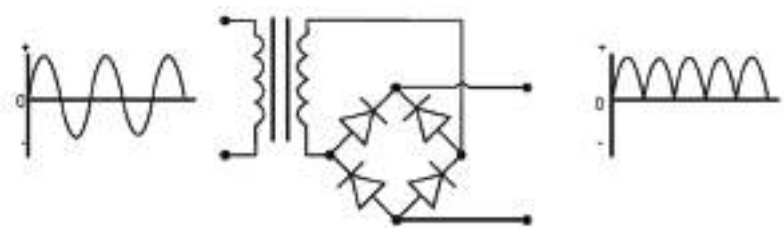


Fig. 41: Retificação de onda completa com ponte de díodos

Mas em qualquer destes métodos se torna necessário que a tensão a retificar tenha uma amplitude de vários volts, pois cada díodo só começa a conduzir se tiver aos seus terminais uma tensão de 0,7 V (nos díodos de silício, os mais habituais), para começar a conduzir. Para tensões inferiores a este valor, não é possível fazer retificação com estes circuitos. Para resolver o problema recorreremos a circuitos retificadores ativos, construídos com recurso a amplificadores operacionais.

Retificador ativo simples ou de meia onda

Na figura seguinte representa-se um retificador de ativo simples ou de meia onda.

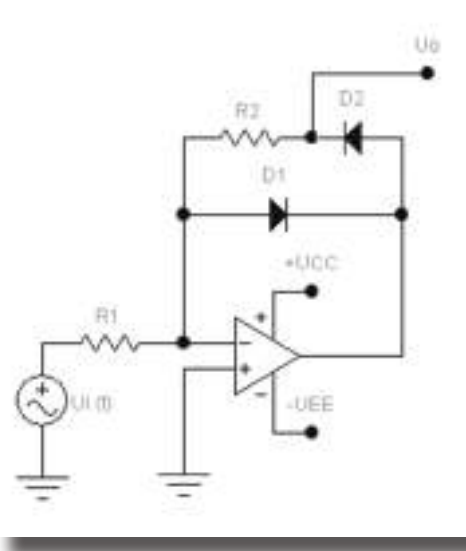


Fig. 42: Retificação simples ou de meia onda com amplificador operacional



Retificador ativo de onda completa

Na figura seguinte representa-se um retificador de ativo de onda completa.

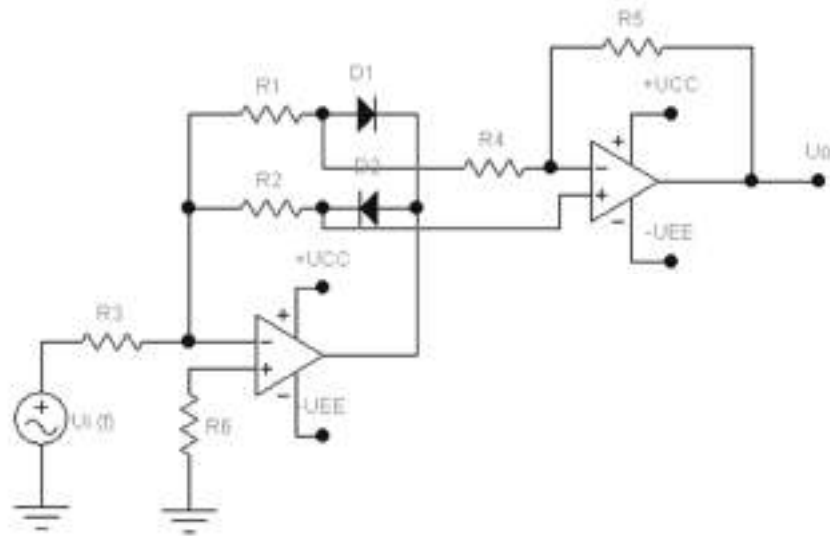


Fig. 43: Retificação de onda completa com amplificador operacional

Filtros

Os filtros são dispositivos com crescente importância no domínio da eletrônica, não só porque é grande a expansão dos sistemas eletrônicos nas diversas áreas de atividade, mas também porque, especialmente no domínio das comunicações, são cada vez mais elevadas as frequências utilizadas, e portanto, a separação destas torna-se fundamental, processo que é feito essencialmente recorrendo à filtragem.

Além do mais, o aumento de aplicação destas tecnologias, traz associada a geração de ruído, resultante da emissão de harmónicos de frequências (frequências elevadas, múltiplas das frequências originais).

Posto isto, os filtros são dispositivos que impedem a passagem de uma dada gama de frequências num circuito ou numa parte de um circuito.

Existem dois tipos de filtros, quanto à forma como são constituídos, os filtros passivos e os filtros ativos.

Os filtros passivos são aqueles que são constituídos com base nos chamados componentes passivos, resistências, condensadores e bobinas.



A gama de frequências que cobrem situa-se acima de 1 MHz, não apresentam ganho em potência e tornam-se difíceis de sintonizar, ou seja, é difícil o ajuste da sua frequência de corte.

Os filtros ativos, para além de utilizarem também componentes passivos (essencialmente resistências e condensadores), baseiam as suas características de funcionamento nos chamados componentes ativos, transístores e circuitos amplificadores operacionais.

Já são capazes de funcionar a frequências inferiores a 1 MHz, apresentam baixos custos, têm elevada impedância de entrada e apresentam facilidade em amplificar sinais fracos. Os filtros classificam-se de três formas, quanto à sua qualidade de filtragem, quanto à função, e quanto ao tipo de resposta em frequência.

Quanto à qualidade de filtragem, os filtros classificam-se em filtros de 1ª ordem (1 polo), filtros de 2ª ordem (2 polos) e filtros de ordem n (n polos).

Num filtro de 1ª ordem só existe uma malha RC ou RLC.

Num filtro de 2ª ordem existem duas malhas RC ou RLC.

E num filtro de ordem n , existem n malhas destes tipos.

Quanto à função, os filtros dividem-se em filtros passa baixo, filtros passa alto, filtros passa banda, e filtros rejeita banda (ou corta banda).

Um filtro passa baixo, é aquele que elimina (atenua) todas as frequências abaixo de uma determinada frequência de referência, chamada frequência de corte do filtro.

Um filtro passa alto, é aquele que elimina (atenua) todas as frequências acima de uma determinada frequência de referência, chamada também frequência de corte do filtro.

Um filtro passa banda, é aquele que elimina (atenua) todas as frequências fora de um intervalo de frequências (banda passante), limitado por duas frequências, uma superior (chamada frequência de corte superior), e outra, inferior (chamada frequência de corte inferior).

Um filtro rejeita banda ou corta banda, é aquele que elimina (atenua) todas as frequências no interior de um intervalo de frequências (banda de corte), limitado por duas frequências, uma superior (chamada frequência de corte superior), e outra, inferior (chamada frequência de corte inferior).



Neste último tipo de filtro, a banda passante situa-se fora do intervalo, ou seja, está dividida em duas, como se fosse a junção de um filtro passa baixo com frequência de corte igual à frequência de corte inferior do rejeita banda, e um filtro passa alto com frequência de corte igual à frequência de corte superior do rejeita banda.

Existem também os chamados filtros universais, que permitem acumular as funções de passa baixo, passa alto e passa banda, consoante as necessidades.

Neste tipo de filtro, realizado com diversos componentes discretos, ou com componentes integrados, existem saídas para cada uma das opções (passa baixo, passa alto, ou passa banda).

Restará apenas, selecionar a ligação pretendida.

Quanto ao tipo de resposta em frequência, existem vários tipos de filtros, sendo os mais importantes o filtro Butterworth, o filtro Chebyshev e o filtro Bessel.

Na figura seguinte apresenta-se um gráfico dos valores de ganho deste filtro (eixo vertical) em função da frequência de funcionamento (eixo horizontal).

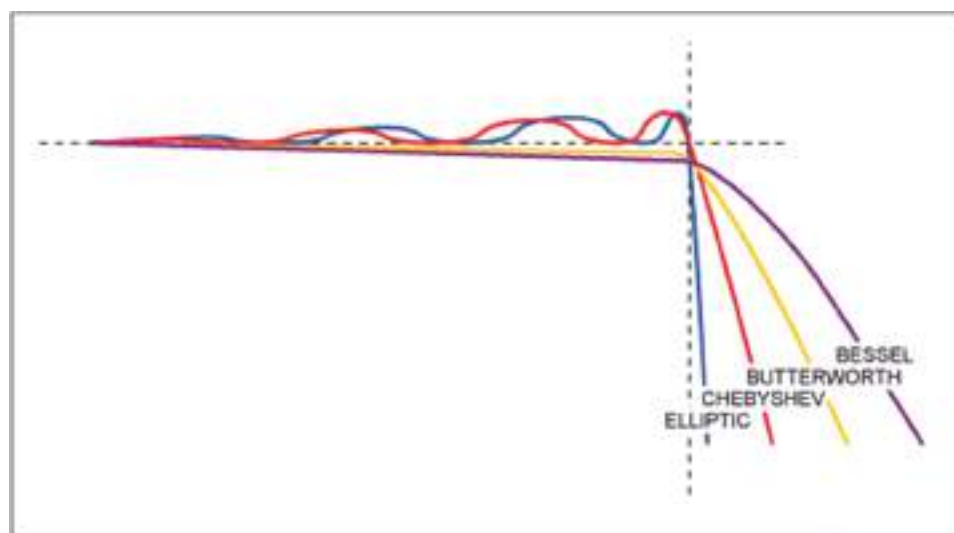


Fig. 44: Tipos de resposta dos filtros

O filtro Butterworth é um filtro que apresenta uma resposta plana ao longo de toda a banda passante, até à sua frequência de corte.

Acima da frequência de corte, o ganho cai com uma perda de -20 dB / década.



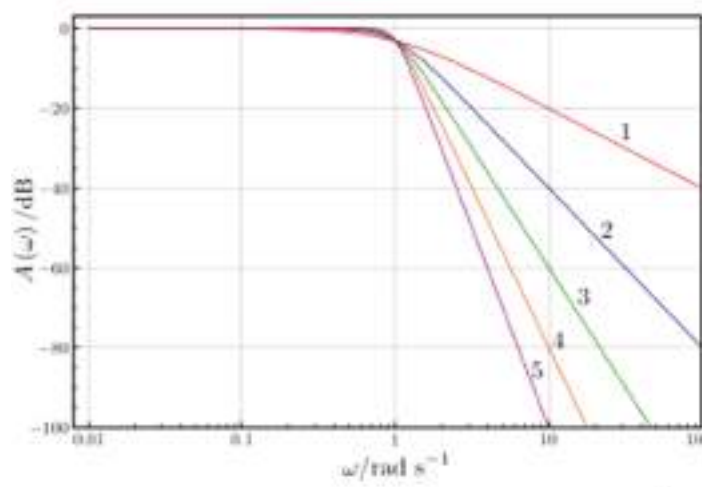


Fig. 45: Caraterística de um filtro Butterworth até à 5ª ordem

O filtro Chebyshev é um filtro que apresenta uma resposta não plana, com ondulações na banda passante, até à sua frequência de corte, mas apresentando uma queda (corte) mais rápida após esta frequência, o que se torna numa vantagem, por eliminar mais rapidamente as frequências indesejadas.

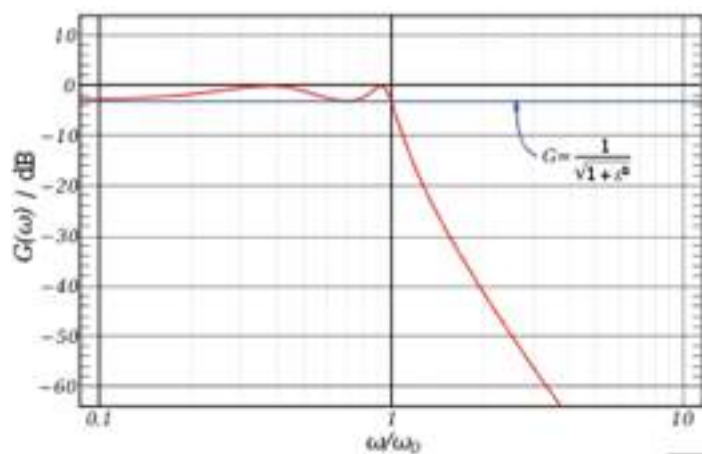


Fig. 46: Caraterística de um filtro Chebyshev de 4ª ordem

O filtro Bessel é um filtro que apresenta uma resposta plana na banda passante, tal como o filtro Butterworth, mas tem uma inclinação menos atenuada do que este na banda cortante.

A sua principal vantagem, reside no facto de produzir menor distorção do que os outros dois filtros, com sinais sinusoidais aplicados.

Todos os filtros de 1ª ordem (só com malhas RC ou RLC), apresentam somente respostas Butterworth, que se caracterizam por não ter ondulação, embora com corte pouco rápido.



O fator de qualidade dos filtros (Q), que será abordado um pouco mais à frente, está relacionado com o tipo de resposta que o filtro produz, conforme se vê na figura seguinte.

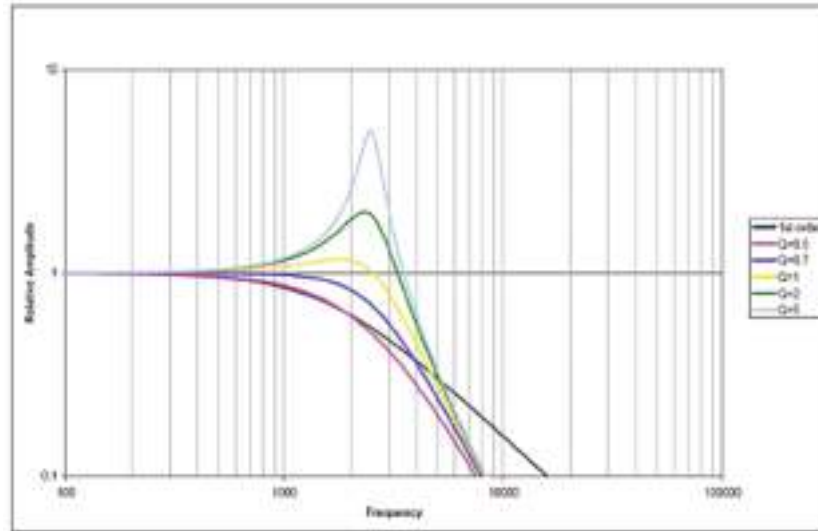


Fig. 47: Influência do fator de qualidade Q na resposta do filtro

Um filtro de 2ª ordem com $Q = 0,707$ é sempre um filtro de Butterworth, portanto, com uma resposta plana na banda passante.

Um filtro de 2ª ordem com $Q = 0,577$ é sempre um filtro de Bessel, também com uma resposta plana na banda passante, mas com uma taxa de inclinação menor do que a do filtro Butterworth.

Se o filtro de tiver $Q > 0,707$, existem ondulações na banda passante, que serão tanto maiores, quanto maior for o fator de qualidade do filtro.

Os filtros de 2ª ordem e de ordens superiores, são de cálculo bastante complexo.

Vamos agora analisar os filtros passivos e os ativos, com maior destaque para estes, pois são os que vão albergar amplificadores operacionais.

Começaremos pelos filtros passivos, para uma melhor compreensão dos processos de filtragem.



Filtros passivos

Os filtros passivos contêm normalmente várias malhas RC, RL ou RLC, sendo tanto mais complexos, quanto maior seja a necessidade de obter um fator de qualidade elevado.

Para o estudo dos filtros passivos, vamos utilizar por simplicidade, um filtro simples RC de primeira ordem.

Vamos começar por abordar o filtro passa baixo, representado na figura seguinte.

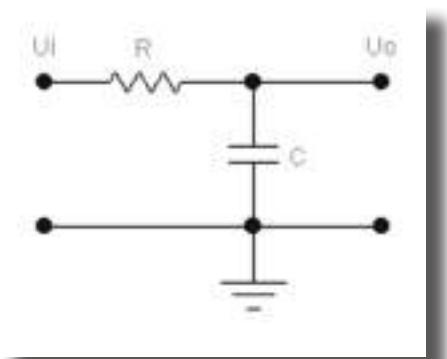


Fig. 48: Filtro passivo RC passa baixo

A resistência R está montada em série com a fonte de sinal e o condensador está colocado em paralelo com a carga (RL) a ligar ao circuito.

Se tivermos atenção à expressão da reatância do condensador, representada a seguir compreenderemos melhor o comportamento do circuito com a frequência.

$$X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}$$

Para frequências elevadas, a reatância vai-se tornando muito pequena, comportando-se o condensador como se de um curto-circuito se tratasse.

Nesta situação, as frequências elevadas do sinal que entra no circuito são desviadas para a massa, não passando para a carga.

Apenas as frequências mais baixas vão encontrar um valor de impedância do condensador que lhes permite serem desviadas para a carga.

Define-se então uma frequência, até à qual o circuito conduz para a carga estas frequências de entrada, e a partir da qual, as desvia para a massa.



Este valor de frequência vai chamar-se frequência de corte, e é dada pela expressão indicada a seguir.

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

O ganho em tensão do circuito, é dado pela expressão seguinte.

$$A_v = \frac{U_o}{U_i}$$

A característica do filtro passa baixo está representada na figura seguinte.

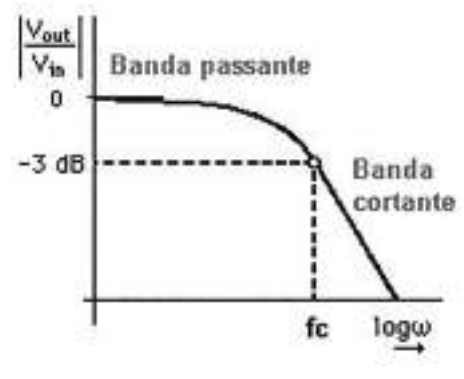


Fig. 49: Característica de um filtro passivo RC passa baixo

A banda de frequências fica dividida em duas, a chamada banda passante, em que o sinal passa para a carga, sem atenuação, e a chamada banda cortante, em que o sinal não passa para a carga, por ser fortemente atenuado.

Analisando agora o filtro RC passa alto (representado na figura seguinte), vemos que essencialmente, o condensador se encontra trocado de posição com a resistência, relativamente ao filtro RC passa baixo.

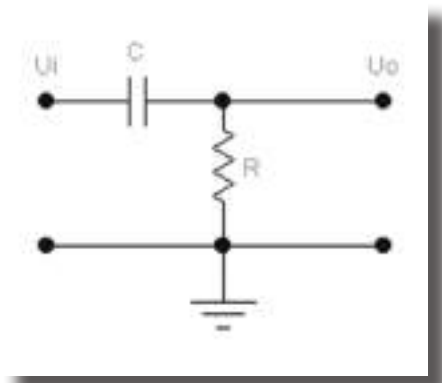


Fig. 50: Filtro passivo RC passa alto



Relembrando novamente a expressão da reatância do condensador, concluímos outra vez que quando as frequências forem elevadas, a impedância deste tende para um valor nulo, deixando portanto passar estas frequências.

Como o condensador não está montado em paralelo com a carga e ligado à massa como anteriormente, mas em série com a fonte, vai desempenhar um papel diferente, pois vai atenuar as baixas frequências, não as deixando atingir a carga, permitindo apenas a passagem das frequências altas.

Vai também existir aqui um valor de frequência que vai chamar-se frequência de corte, e que é dada pela expressão indicada a seguir.

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

Na figura seguinte apresenta-se a característica do filtro passa alto.

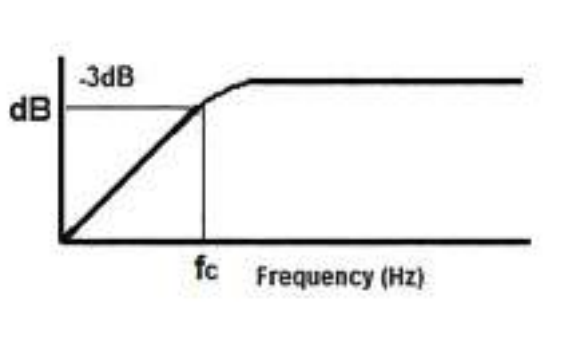


Fig. 51: Caraterística de um filtro passivo RC passa alto

Analisando agora o filtro RC passa banda (representado na figura seguinte), vemos que temos dois condensadores e duas resistências, numa montagem que é uma combinação dos dois circuitos RC passa baixo e RC passa alto.

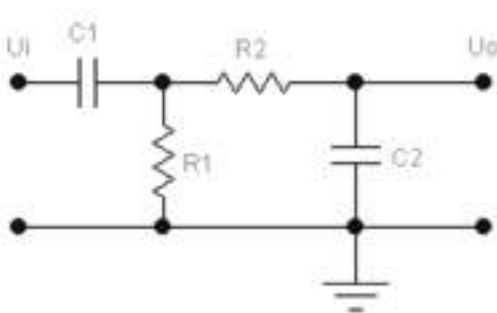


Fig. 52: Filtro passivo RC passa banda



A característica apresentada por esta montagem, está representada na figura seguinte.

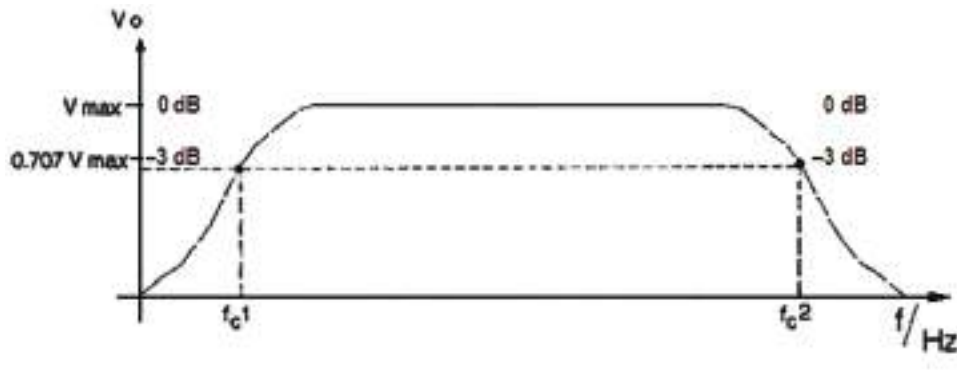


Fig. 53: Característica de um filtro passivo RC passa banda

Temos agora duas frequências de corte, uma superior (f_{CS}) e outra inferior (f_{CI}).

A frequência inferior de corte é dada pela expressão seguinte.

$$f_{CI} = \frac{1}{2 \times \pi \times R_1 \times C_1}$$

A frequência superior de corte é dada pela expressão seguinte.

$$f_{CS} = \frac{1}{2 \times \pi \times R_2 \times C_2}$$

A largura de banda (LB) do circuito é dada pela diferença entre a frequência superior de corte e a frequência inferior de corte.

$$LB = f_{CS} - f_{CI}$$

A frequência central da banda (f_o) é dada pela expressão seguinte.

$$f_o = \sqrt{f_{CS} \times f_{CI}}$$

O fator de qualidade do filtro (Q), é um fator adimensional e calcula-se pela expressão seguinte.

$$Q = \frac{f_o}{LB}$$



Filtros ativos

Os filtros ativos, utilizam como se disse, para além de elementos passivos, amplificadores operacionais.

Como estes amplificadores têm uma elevada impedância de entrada, consegue-se uma baixa atenuação nos sinais a aplicar à carga.

No entanto, as frequências de funcionamento ficam limitadas à máxima frequência com que o amplificador é capaz de operar.

Vamos abordar apenas filtros de 1ª e 2ª ordem, dada a complexidade de analisar filtros de ordem superior à 2ª.

Para se obterem filtros de ordem superior à 2ª, é necessário recorrer à montagem de filtros em cascata, no número necessário, até perfazer a ordem que se pretende obter.

Por exemplo, um filtro de 7ª ordem, necessita de montagem em cascata de três filtros de 2ª ordem e de um filtro de 1ª ordem, como se pode ver na figura seguinte.

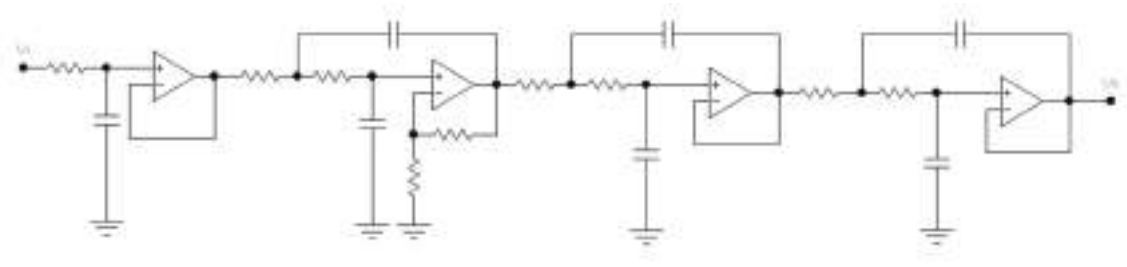


Fig. 54: Filtro ativo passa baixo de 7ª ordem, em cascata

Filtros ativos passa baixo

Na figura seguinte representa-se um filtro ativo com 1 polo (1ª ordem) e ganho unitário.

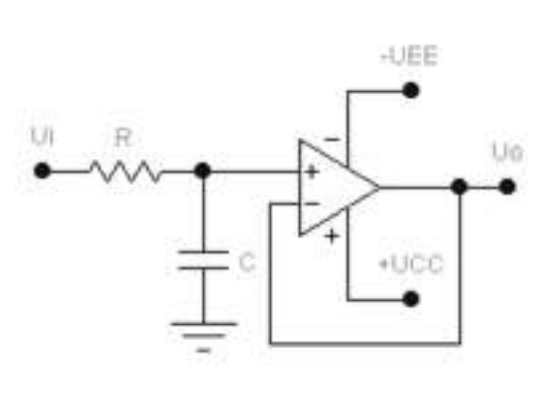


Fig. 55: Filtro ativo passa baixo com 1 polo e ganho unitário



O seu ganho em tensão vem dado pela expressão seguinte.

$$A_v = \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

A sua frequência seguinte calcula-se a partir da expressão seguinte (igual aos casos passivos anteriores).

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

Na figura seguinte representa-se um filtro ativo com 1 polo (1ª ordem), mas com ganho não unitário.

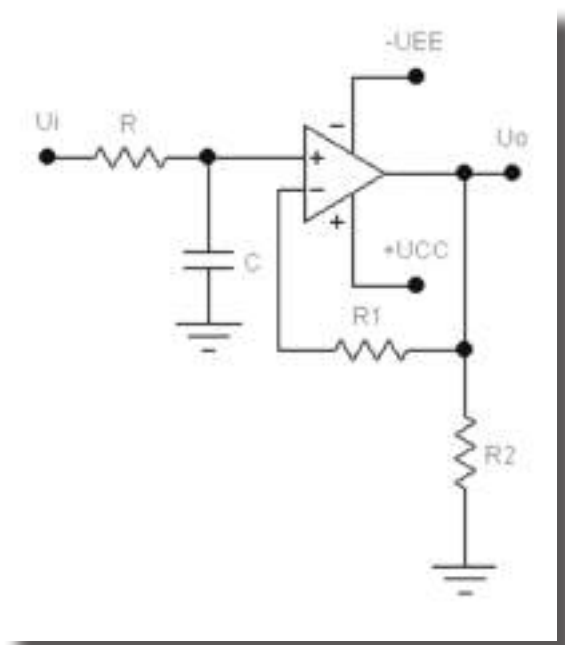


Fig. 56: Filtro ativo passa baixo com 1 polo e ganho não unitário

O seu ganho em tensão vem dado pela expressão seguinte.

$$A_v = \frac{U_o}{U_i} = 1$$

A sua frequência seguinte calcula-se a partir da expressão seguinte (igual aos casos passivos anteriores).

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



Na figura seguinte representa-se uma característica típica de um filtro passa baixo.

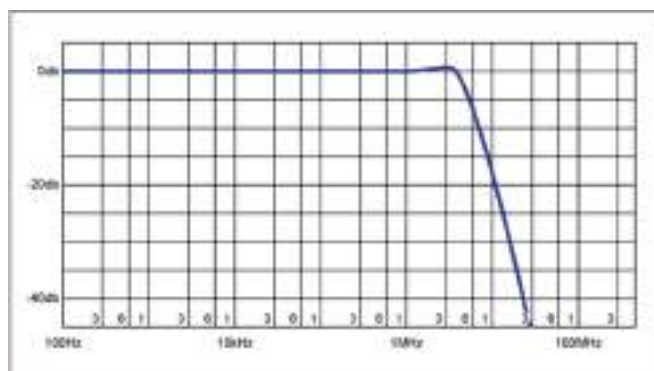


Fig. 57: Característica típica de um filtro passa baixo

Na figura seguinte representa-se um filtro ativo com 2 polos (2ª ordem) e ganho unitário.

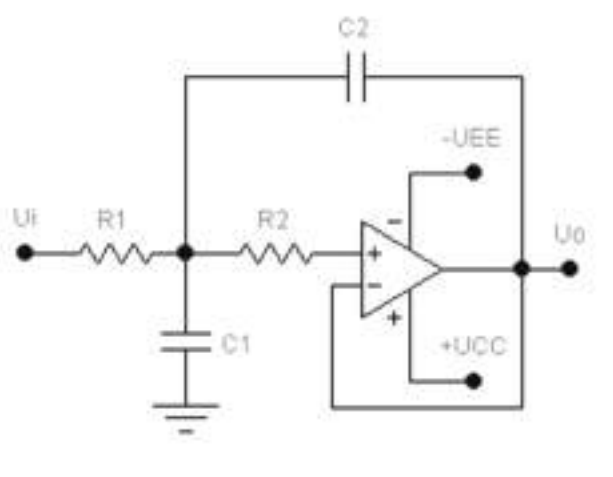


Fig. 58: Filtro ativo passa baixo com 2 polos e ganho unitário

Se considerarmos que $R1 = R2 = R$, já sabemos que o valor do ganho em tensão tem o valor 1, conforme indicado na expressão seguinte.

$$A_v = \frac{U_o}{U_i} = 1$$

O fator de qualidade do filtro é dado pela expressão seguinte.

$$Q = 0,5 \times \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$



A sua frequência de corte calcula-se a partir da expressão seguinte (considerando $R_1 = R_2 = R$).

$$f_c = \frac{K_c}{2 \times \pi \times \sqrt{R_1 \times R_2 \times C_1 \times C_2}} = \frac{K_c}{2 \times \pi \times R \times \sqrt{C_1 \times C_2}}$$

O fator K_c é determinado a partir da consulta da tabela seguinte.

TABELA DE VALORES DE K_c		
Q	K_c	Tipo de resposta
0,577	0,786	Bessel
0,707	1	Butterworth
0,75	0,471	
0,8	0,661	
0,9	0,874	
1	1,000	
2	1,322	
3	1,374	
4	1,391	
5	1,400	
6	1,402	
7	1,404	
8	1,406	
9	1,408	
10	1,410	
100	1,414	

Fig. 59: Tabela de valores da constante K_c



Consideremos agora um filtro ativo com 2 polos (2ª ordem) e com ganho não unitário, como o representado na figura seguinte.

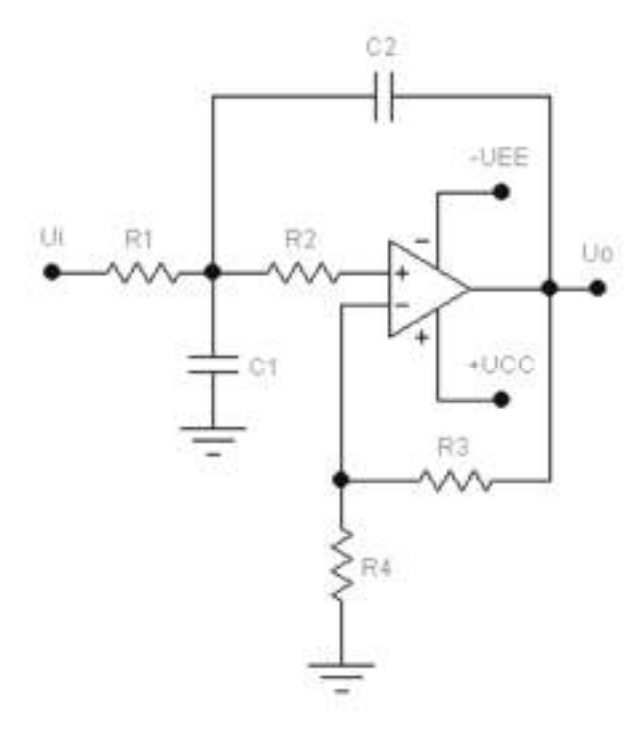


Fig. 60: Filtro ativo passa baixo com 2 polos e ganho não unitário

E se considerarmos $R_1 = R_2$ e $C_1 = C_2$, e para um circuito com ganho superior a 1, o fator de qualidade será dado pela expressão seguinte.

$$Q = \frac{1}{3 - A_v}$$

O ganho será dado pela expressão seguinte.

$$A_v = \frac{R_3 + R_4}{R_4}$$

A frequência de corte vem dada pela expressão que a seguir se indica.

$$f_c = \frac{K_c}{2 \times \pi \times R \times C}$$



Na situação de ganho mínimo ($A_v = 1$), o fator de qualidade é igual a 0,5 e, quando o ganho atingir o valor 3, o fator de qualidade tenderá para infinito.

Portanto, na prática, o ganho deverá situar-se entre estes dois valores ($1 < A_v < 3$).

Filtros ativos passa alto

A característica de um filtro ativo passa alto, é semelhante à da figura seguinte.

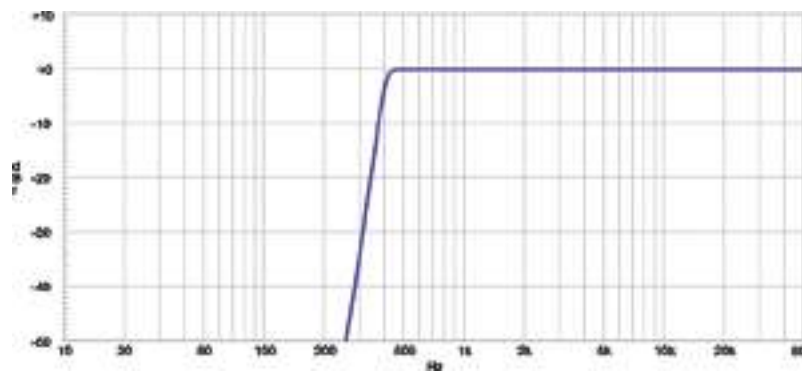


Fig. 61: Característica típica de um filtro ativo passa alto

Na figura seguinte representa-se o circuito de um filtro ativo com 1 polo (1ª ordem) e com ganho não unitário.

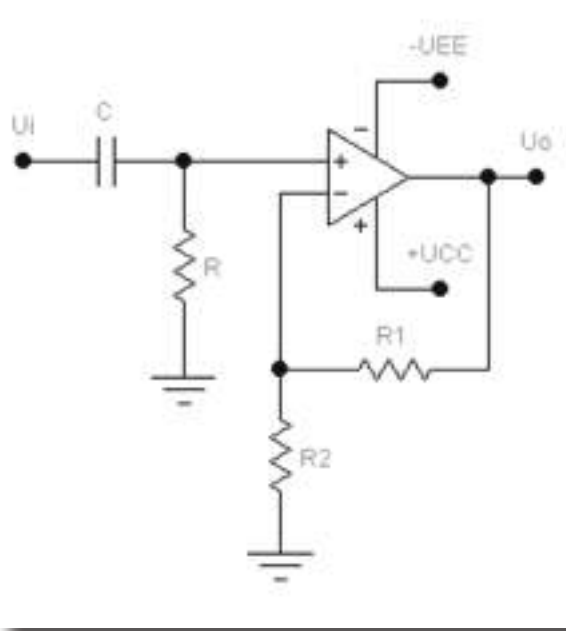


Fig. 62: Filtro ativo passa alto com 1 polo e ganho não unitário



Para o circuito representado, de modo semelhante aos circuitos anteriores, a frequência de corte vem dada pela expressão seguinte

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

Abaixo da frequência de corte o ganho decresce a uma taxa de -20 dB / década.

Considerando agora um filtro ativo passa alto de ganho unitário com dois polos (2ª ordem), se fizermos $C = C_1 = C_2$, obtemos o esquema de circuito da figura seguinte.

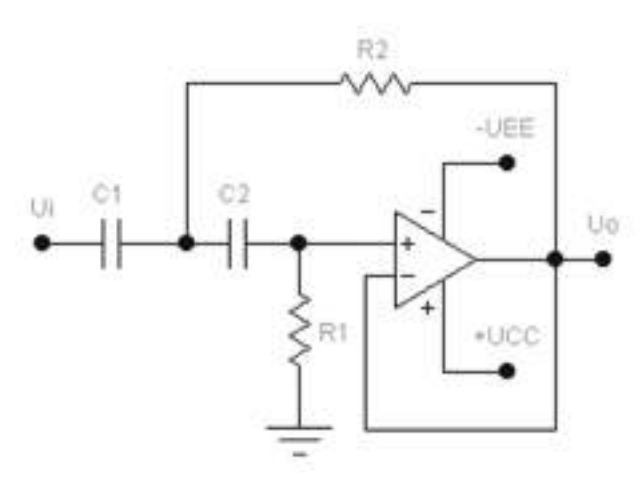


Fig. 63: Filtro ativo passa alto com 1 polo e ganho não unitário

Para este circuito, o ganho é unitário e o fator de qualidade do filtro é dado pela expressão seguinte.

$$Q = 0,5 \times \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$

A sua frequência de corte calcula-se a partir da expressão seguinte (considerando $C_1 = C_2 = C$).

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times C \times \sqrt{R_1 \times R_2}}$$



Considerando agora um filtro ativo passa alto de 2 polos (2ª ordem) com ganho não unitário, fazendo $C1 = C2$ e $R1 = R2$, obtemos o circuito da figura seguinte.

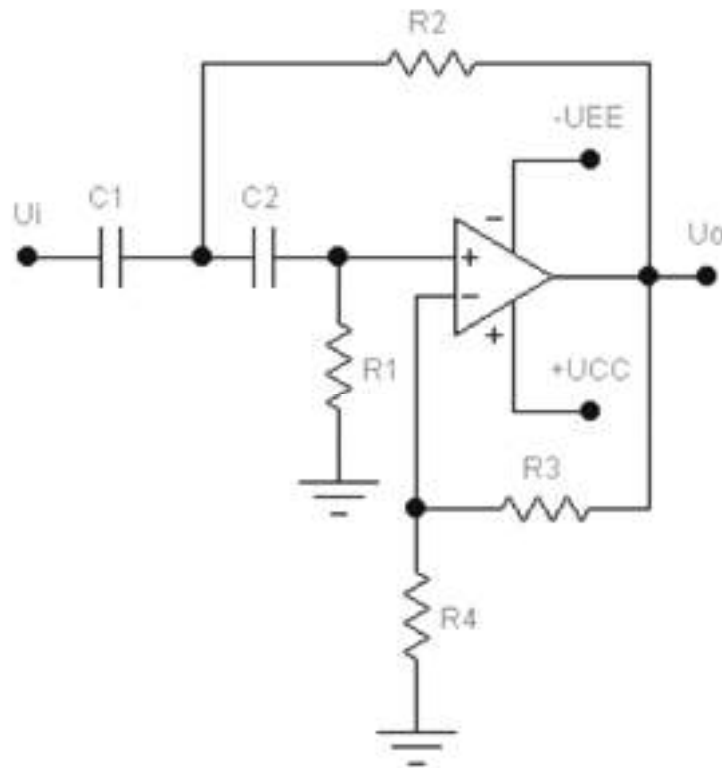


Fig. 64: Filtro ativo passa alto com 2 polos e ganho não unitário

E se considerarmos então $R1 = R2$ e $C1 = C2$, e para um circuito com ganho superior a 1, o fator de qualidade será dado pela expressão seguinte.

$$Q = \frac{1}{3 - A_v}$$

O ganho será dado pela expressão seguinte.

$$A_v = \frac{R_3 + R_4}{R_4}$$

A frequência de corte vem dada pela expressão que a seguir se indica.

$$f_c = \frac{K_c}{2 \times \pi \times R \times C}$$



Similarmente ao que foi visto anteriormente, na situação de ganho mínimo ($A_v = 1$), o fator de qualidade é igual a 0,5 e, quando o ganho atingir o valor 3, o fator de qualidade tenderá para infinito.

Portanto, na prática, o ganho deverá situar-se entre estes dois valores ($1 < A_v < 3$).

Filtros ativos passa banda

Os filtros passa banda, como se sabe, deixam passar um determinado conjunto de frequências, designado por banda de frequências, definido entre um limite inferior (f_{CI}), a frequência de corte inferior, e um limite superior (f_{CS}), a frequência de corte superior. Na figura seguinte apresenta-se uma característica típica de um filtro ativo passa banda.

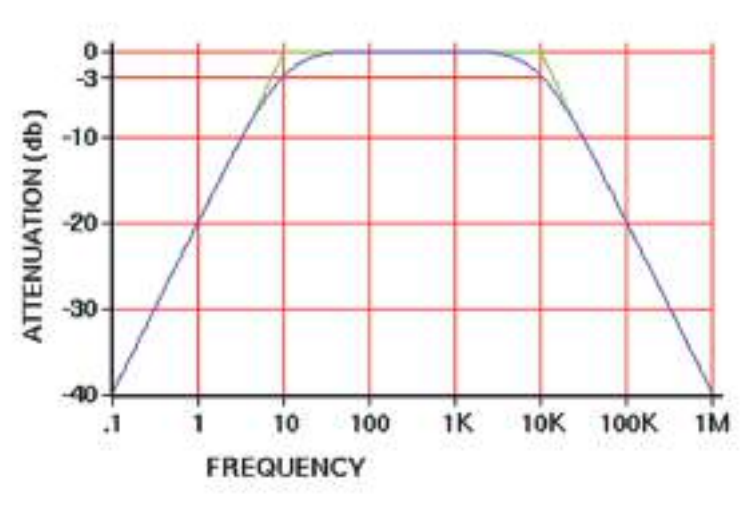


Fig. 65: Característica típica de um filtro ativo passa banda

Os filtros passa banda são classificados como de banda estreita, ou de banda larga.

Os filtros de banda larga apresentam um fator de qualidade menor que 1 ($Q < 1$), enquanto que os de banda estreita apresentam um fator de qualidade com valor elevado ($Q \gg 1$). Vamos analisar cada um deles.

Na figura seguinte representa-se o circuito de um filtro, basicamente constituído por um filtro passa alto em série (cascata) com um filtro passa baixo.



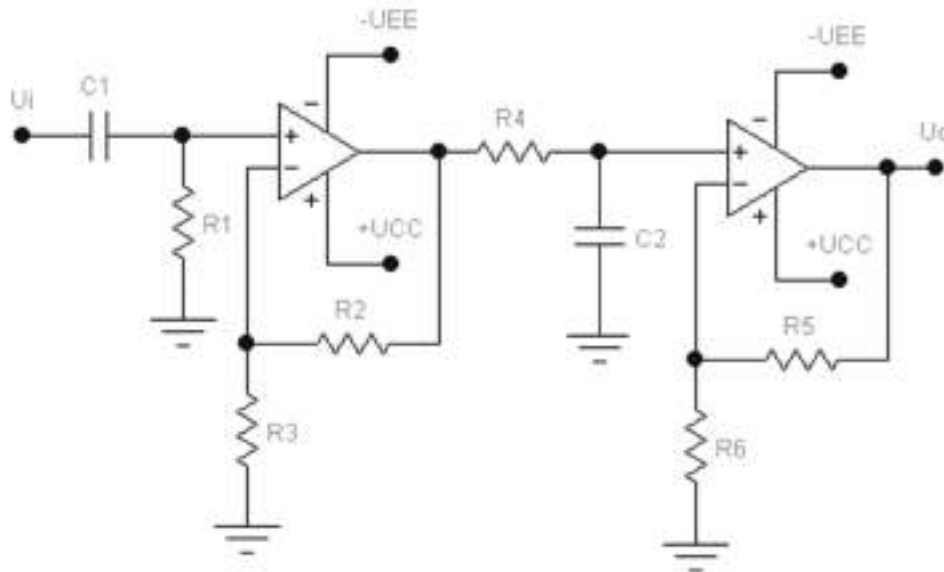


Fig. 66: Filtro ativo passa banda com 1 polo e banda larga

Também agora temos duas frequências de corte, uma superior (f_{CS}) e outra inferior (f_{CI}). A frequência inferior de corte é dada pela expressão seguinte.

$$f_{CI} = \frac{1}{2 \times \pi \times R_1 \times C_1}$$

A frequência superior de corte é dada pela expressão seguinte.

$$f_{CS} = \frac{1}{2 \times \pi \times R_4 \times C_2}$$

A largura de banda (LB) do circuito é dada pela diferença entre a frequência superior de corte e a frequência inferior de corte.

$$LB = f_{CS} - f_{CI}$$

A frequência central da banda (f_o) é dada pela expressão seguinte.

$$f_o = \sqrt{f_{CS} \times f_{CI}}$$



O fator de qualidade do filtro (Q), é um fator adimensional e calcula-se pela expressão seguinte.

$$Q = \frac{f_o}{LB}$$

Vamos agora analisar o filtro passa banda de banda estreita, como o representado na figura seguinte.

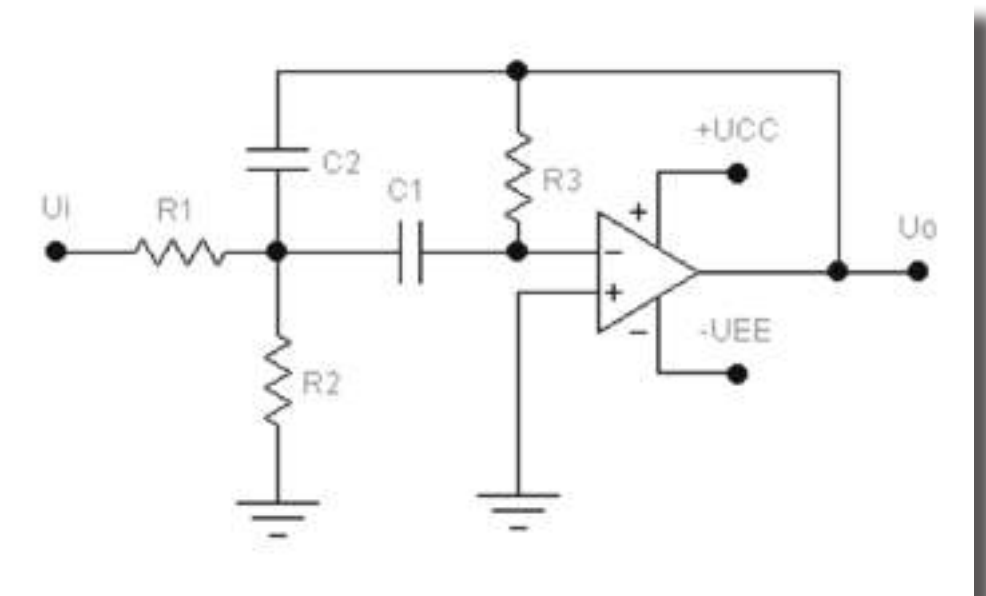


Fig. 67: Filtro ativo passa banda com amplificador inversor e banda estreita

No circuito representado, a realimentação é feita através de R3 e C2.

As altas frequências têm um caminho mais favorável pelo condensador, enquanto as baixas frequências o têm pela resistência.

A frequência central calcula-se através da expressão seguinte.

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{(R_1 // R_2) \times R_3 \times C_1 \times C_2}}$$

O fator de qualidade do filtro (Q), é um fator adimensional e calcula-se pela expressão seguinte.



$$Q = 0,5 \times \sqrt{\frac{R_3}{(R_1 // R_2)}}$$

A largura de banda (LB) calcula-se pela expressão seguinte.

$$LB = \frac{f_o}{Q}$$

A frequência inferior de corte é dada pela expressão seguinte.

$$f_{ci} = f - \frac{LB}{2}$$

A frequência superior de corte é dada pela expressão seguinte.

$$f_{cs} = f + \frac{LB}{2}$$

O ganho em tensão do circuito é dado pela expressão seguinte.

$$A_v = -\frac{R_3}{R_1}$$

Quando projetamos um filtro, definimos estes parâmetros estudados, pelo que se torna mais simples apresentar estas expressões, manipuladas para se determinar os valores dos componentes a utilizar.

Supondo então que $Q = f_o / LB$ e $C = C_1 = C_2$, obtemos as expressões seguintes.

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

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

$$R_3 = \frac{Q}{\pi \times f_o \times C}$$



Para o cálculo de condensador C, podemos usar a tabela empírica apresentada na tabela seguinte.

TABELA DE VALORES EMPÍRICOS DE C		
fCl (Hz)	fCS (Hz)	C (nF)
20	80	330
80	300	82
300	1200	22
1200	4800	5,6
4800	20000	1,5

Fig. 68: Tabela de valores empíricos de C

Para os valores não indicados na tabela, deverá ser feita uma interpolação de valores, ou recorrer à fórmula empírica seguinte.

$$C(\mu F) = \frac{10}{f_o(Hz)}$$

TRABALHOS PRÁTICOS:

TRABALHO PRÁTICO n.º 01 - COMPARADOR DE JANELA.

1. INTRODUÇÃO

O comparador de janela é um circuito que genericamente, tem a possibilidade de detetar a existência de uma tensão entre duas tensões limite (janela).

2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a. Traçar a característica de transferência do comparador de janela.

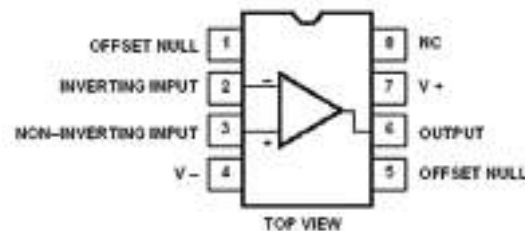
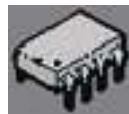
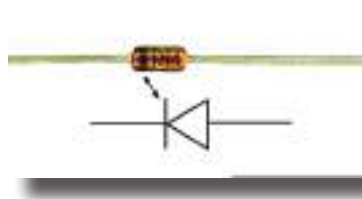


3. RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrônica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Multímetro;
- 2 Circuitos integrados $\mu A741$;
- 5 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 1,5 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 1\text{K}\Omega$, $R_3 = 2,2 \text{ K}\Omega$, $R_4 = 470 \Omega$ e $R_5 = 1,5\text{K}\Omega$);
- 1 Resistência ajustável ($R = 10 \text{ K}\Omega$);
- 2 Díodos 1N4148;
- 1 LED vermelho (10 mA, 1,8 V)
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;

4. ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.



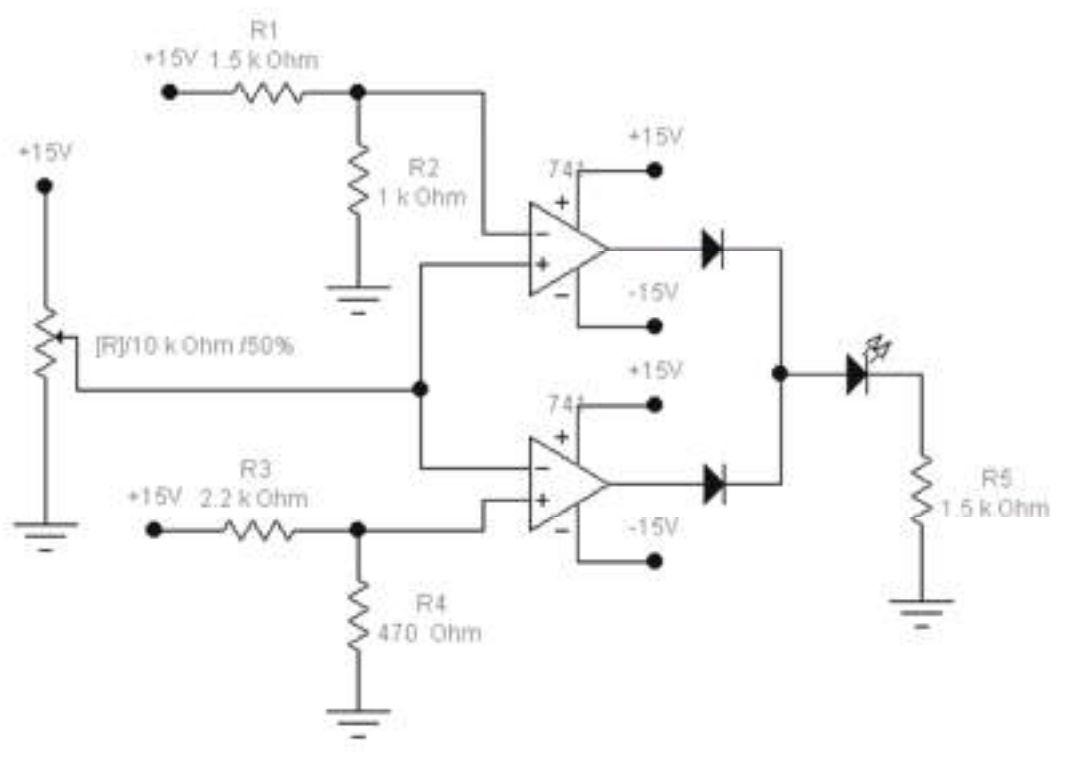


Figura 1

5. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- a. Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- b. Variando a tensão de entrada através do potenciômetro R, determinar os pontos em que a tensão de saída comuta;
- c. Traçar a característica de transferência do comparador na figura 2.



Figura 2



6. DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

7. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a. Cabeçalho:
- Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b) Conteúdo (Mínimo):
- 1 - Objetivos
 - 2 - Recursos necessários
 - 3 - Procedimentos do trabalho
 - 4 - Dificuldades encontradas
 - 5 - Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 - Esquemas das montagens
 - 7 - Conclusões finais

II - MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III - PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



TRABALHO PRÁTICO n.º 02 - CIRCUITO INTEGRADOR.

1. INTRODUÇÃO

A figura 1 representa um circuito integrador prático, sendo o seu ganho dado pela expressão:

$$|A_{vcl}| = \frac{\frac{R_F}{R_1}}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f C_1 R_1)^2}}}$$

O circuito integrador teórico não inclui a resistência R_F , tornando o circuito instável pelo facto do ganho em tensão depender da frequência. Para que isso não aconteça, é necessário incluir uma resistência de realimentação negativa R_F em paralelo com o condensador C_1 .

Verifica-se que quando $f \rightarrow 0$, o ganho em tensão é dado por:

$$|A_{vcl}| = \frac{R_F}{R_1}$$

A inclusão da resistência R_F torna o ganho praticamente independente da frequência.

Quando a frequência aumenta, o ganho em tensão $|A_{vcl}|$ tende para R_F/R_1 , o que o torna praticamente independente da frequência.

Para que o circuito funcione como integrador, a frequência do sinal de entrada terá que ser muito maior que $f = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$ e $R_F \approx 10 \times R_1$.

2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a. Comprovar que a integração de um sinal de onda quadrada é um sinal triangular.

3. RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrónica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;



- 1 Gerador de BF;
- 1 Multímetro;
- 1 Circuito integrado $\mu A741$;
- 3 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_L = 10\text{k}\Omega$ e $R_F = 100\text{k}\Omega$);
- 1 Condensador de $0,1 \mu\text{F}$.
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos.

4. ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.

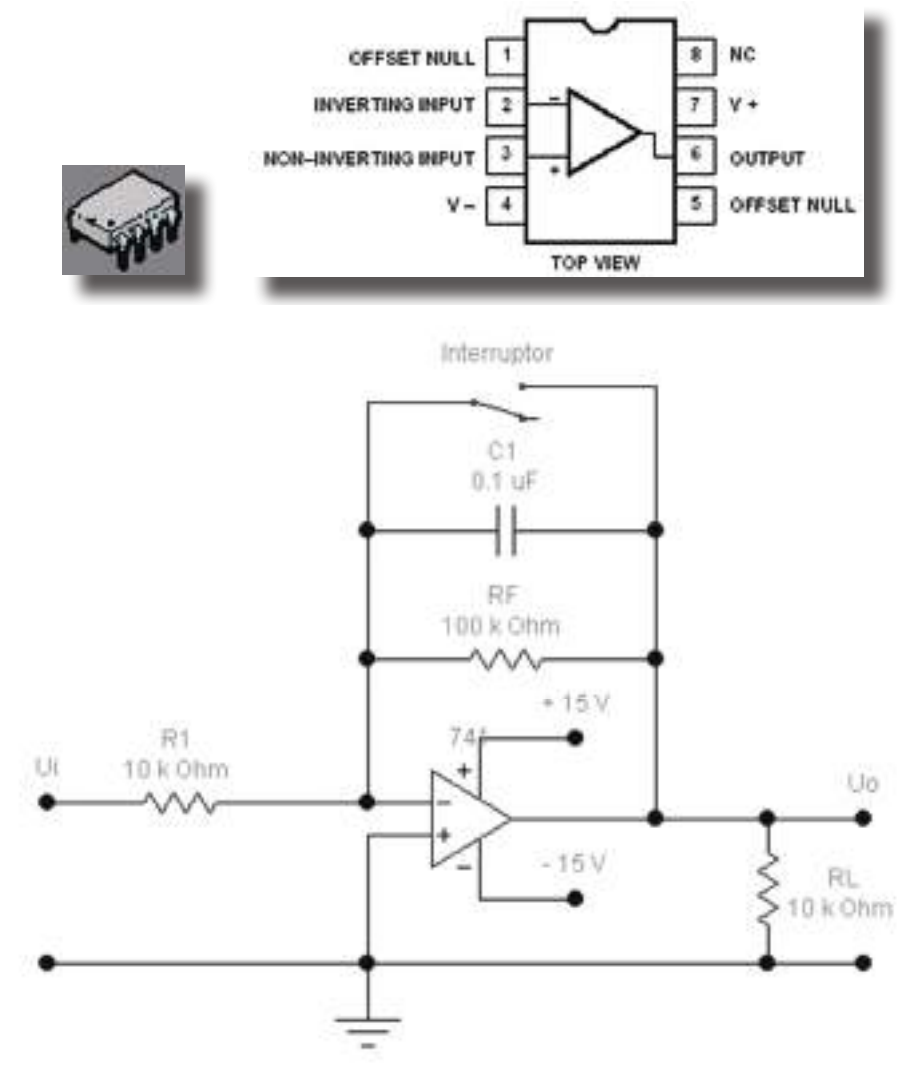


Figura 1



5. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Observar os sinais U_i e U_o , ligando os canais do osciloscópio respectivamente na entrada e na saída;
- Aplicar um sinal triangular de frequência 3KHz e de 2V de pico;
- Verificar se a frequência do sinal a integrar obedece às condições impostas;
- Representar na figura 2 os sinais de entrada e de saída;

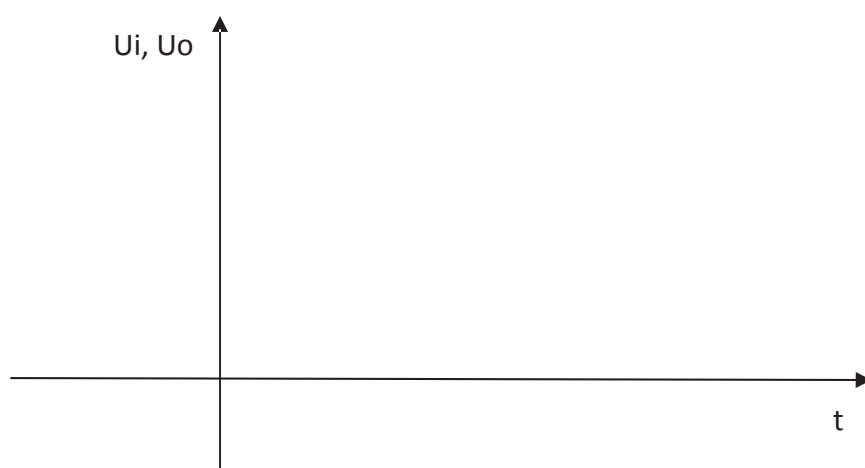


Figura 2

6. DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

7. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- Cabeçalho:
 - Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho



- b. Conteúdo (Mínimo):
- 1 - Objetivos
 - 2 - Recursos necessários
 - 3 - Procedimentos do trabalho
 - 4 - Dificuldades encontradas
 - 5 - Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 - Esquemas das montagens
 - 7 - Conclusões finais

II - MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III - PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

TRABALHO PRÁTICO n.º 03 - CIRCUITO DIFERENCIADOR.

1. INTRODUÇÃO

O circuito diferenciador teórico tem tendência para oscilar, devido ao facto do ganho em tensão ser proporcional à frequência, como se verifica pela expressão do ganho em tensão:

$$|A_{vcl}| = \frac{R_F}{X_c} = 2\pi f R_F C_1$$

Se se ligar uma resistência em série com o condensador, como se mostra na figura 1, o ganho em tensão é dado pela expressão:

$$|A_{vcl}| = \frac{\frac{R_F}{R_1}}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f C_1 R_1)^2}}}$$

Quando a frequência aumenta, o ganho em tensão $|A_{vcl}|$ tende para R_F/R_1 , o que o torna praticamente independente da frequência.



Para evitar a instabilidade resultante do ganho em tensão ser dependente da frequência, coloca-se uma resistência $R_1 \approx R_f/10$ em série com o condensador, como se exemplifica na figura 1.

Para que o circuito funcione como diferenciador, será então necessário que a frequência do sinal a diferenciar seja muito menor que $f = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$

2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

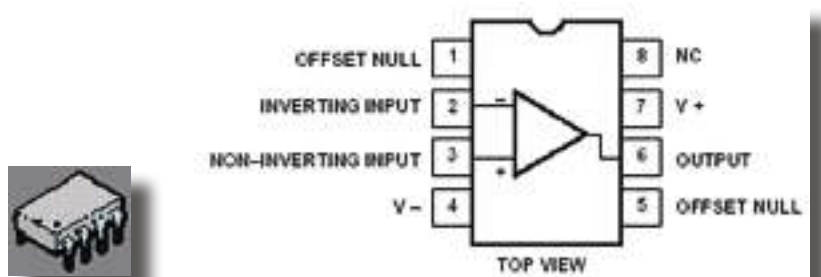
- a. Transformar um sinal sinusoidal num sinal de onda quadrada.

3. RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrônica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Gerador de BF;
- 1 Multímetro;
- 1 Circuito integrado $\mu A741$;
- 4 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 330\Omega$, $R_2 = 10K\Omega$ e $R_3 = R_C = 3,3K\Omega$);
- 1 Condensador de 220 nF.
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;

4. ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.



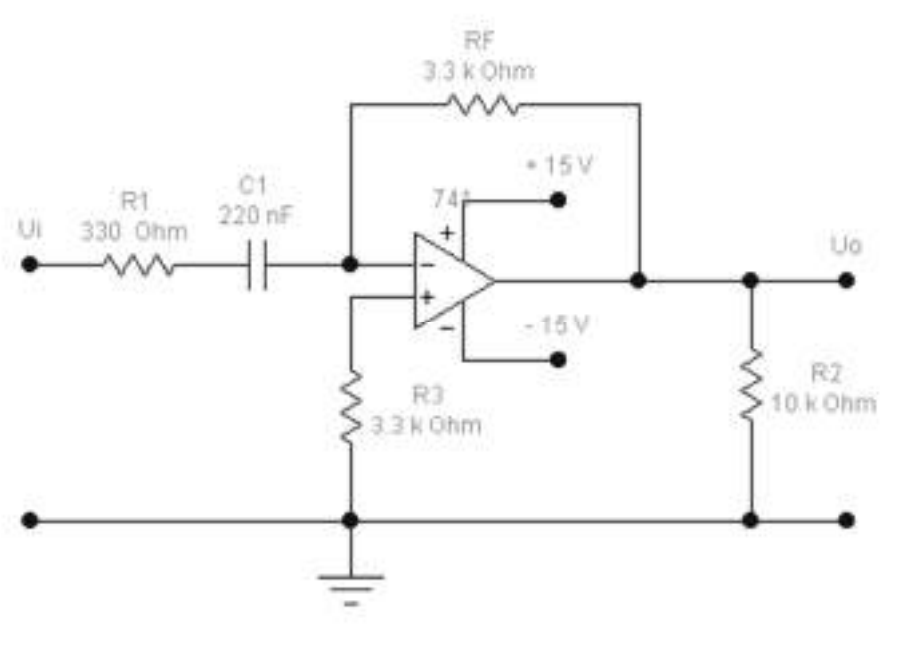


Figura 1

5. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Observar os sinais U_i e U_o , ligando os canais do osciloscópio respectivamente na entrada e na saída;
- Aplicar um sinal triangular de frequência 200KHz e de 2V de pico;
- Verificar se a frequência do sinal a diferenciar obedece às condições impostas;
- Representar na figura 2 os sinais de entrada e de saída;
- Aplicar um sinal de onda quadrada, de frequência 200KHz e de 0,5V de pico;
- Representar na figura 3 os sinais de entrada e de saída.

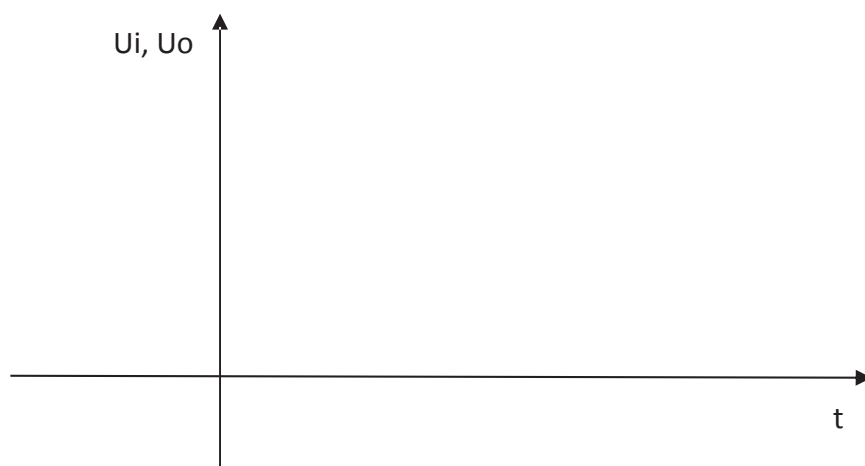


Figura 2



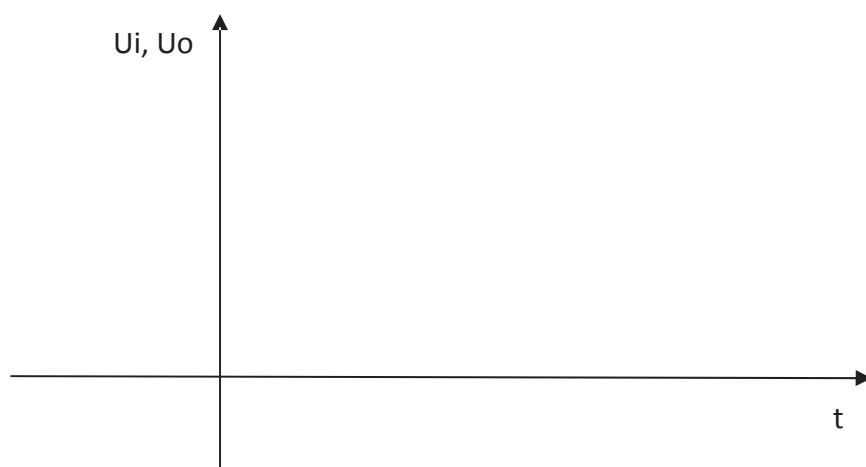


Figura 3

6. DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

7. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a. Cabeçalho:
- Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b. Conteúdo (Mínimo):
- 1 - Objetivos
 - 2 - Recursos necessários
 - 3 - Procedimentos do trabalho
 - 4 - Dificuldades encontradas
 - 5 - Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 - Esquemas das montagens
 - 7 - Conclusões finais



II - MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

TRABALHO PRÁTICO n.º 04 - FILTRO PASSA BAIXO.

1. INTRODUÇÃO

Os filtros ativos são utilizados em baixas frequências, dadas as limitações dos amplificadores operacionais quanto à resposta em frequência.

As vantagens dos filtros ativos resultam de:

- Utilizações de componentes mais pequenos (apenas resistências e condensadores), evitando-se as indutâncias, que para as baixas frequências seriam volumosas e pesadas;
- Inexistência do efeito de carga. O amplificador operacional tem uma alta impedância de entrada e uma baixa impedância de saída;
- Possibilidade de amplificação nos casos de sinais fracos.

Os filtros tipo *Butterworth* apresentam uma resposta mais plana, pelo que sendo os mais usados, vamos utilizá-los na análise dos filtros.

O número de polos dos filtros corresponde ao número de malhas RC. Se um circuito tiver uma malha RC, o filtro será de um polo. Quanto maior for o número de polos, mais o filtro se aproxima do ideal.

A inclinação é normalmente referida em dB/década ou dB/oitava. Se a variação for de 10^n , diz-se que a variação foi de n décadas. Se a variação for de 2^n , diz-se que a variação foi de n oitavas (exemplo: 5 dB/década).

O filtro ativo indicado na figura 1 é um filtro de dois polos (duas malhas RC), sendo o amplificador operacional do tipo $\mu A741$, com ganho $A_{vcl} \approx 1$.



A frequência de corte é dada pela expressão:

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

Como utilizamos $R=R_1=R_2$ e $C=C_1=C_2$, obtemos, $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a. Traçar a curva de resposta do filtro.
- b. Determinar a frequência de corte superior do filtro.
- c. Comparar o valor da frequência de corte obtido experimentalmente com o valor calculado.
- d. Determinar a inclinação da curva da frequência de corte.

3. RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrónica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Gerador de BF (audiofrequência);
- 1 Multímetro;
- 1 Circuito integrado $\mu A741$;
- 3 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 1 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ K}\Omega$ e $R_L = 10 \text{ K}\Omega$);
- 2 Condensadores ($C_1=22 \text{ nF}$ e $C_2= 22 \text{ nF}$).
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;



4. ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.

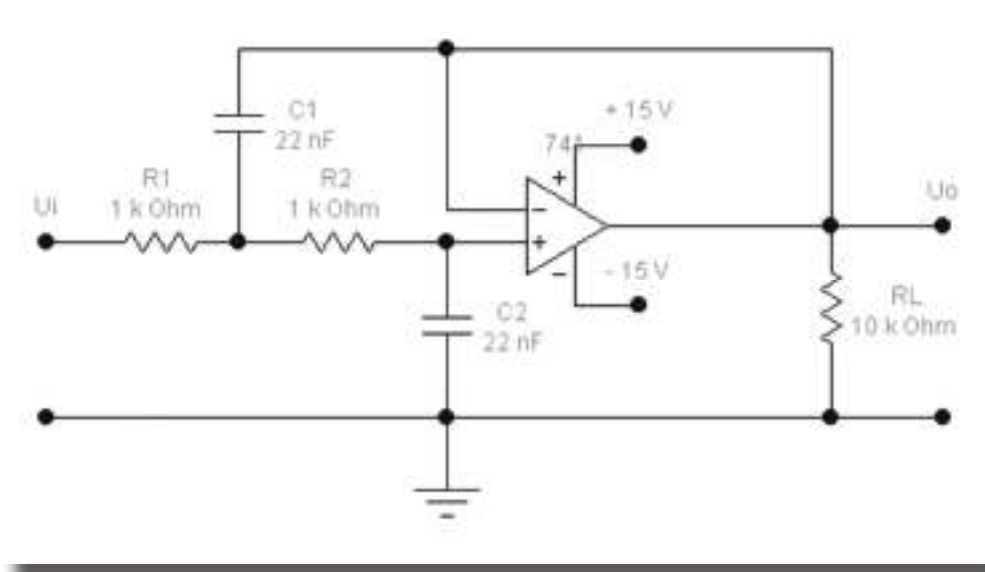
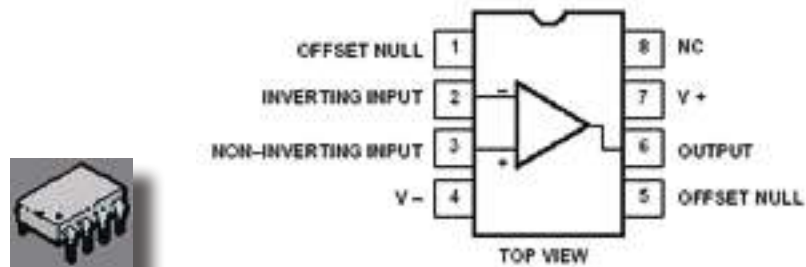


Figura 1

5. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Ligar o gerador de frequência à entrada do filtro e os canais do osciloscópio respectivamente à entrada e à saída do filtro;
- Variar a frequência do gerador de acordo com os valores indicados no quadro 1, mantendo U_i constante (100 mV);
- Registrar para cada um dos valores de U_i (valor que deve ser constante) do quadro 1, os respectivos valores de U_o ;
- Traçar a curva de resposta do filtro na figura 2;
- Determinar a frequência superior de corte;
- Determinar a inclinação da curva de corte em db/década.



f (Hz)	6000	7000	7500	7600	7800	8000	8200	8400	8600	8800	9000
U _i (mV)											
U _o (mV)											

Quadro 1



Figura 2

6. DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

7. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I - ESTRUTURA

- a. Cabeçalho:
- Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho

- b. Conteúdo (Mínimo):
- 1 - Objetivos
 - 2 - Recursos necessários
 - 3 - Procedimentos do trabalho
 - 4 - Dificuldades encontradas



5 - Estratégia de resolução das dificuldades

6 - Esquemas das montagens

7 - Conclusões finais

II - MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

TRABALHO PRÁTICO n.º 05 - FILTRO PASSA ALTO.

1. INTRODUÇÃO

Os filtros passa alto podem ser obtidos a partir dos filtros passa baixo, trocando as resistências pelos condensadores e vice-versa.

O filtro apresentado na Figura 1 é um filtro de dois polos (duas malhas RC), sendo o amplificador um operacional com $A_{VOL}=1$.

A frequência de corte é dada pela expressão:

$$f_{ci} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 \times R_2 \times C_1 \times C_2}}$$

Como utilizamos $R=R_1=R_2$ e $C=C_1=C_2$, obtemos, $f_{ci} = \frac{1}{2\pi RC}$

2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- Traçar a curva de resposta do filtro passa alto.
- Determinar a frequência de corte inferior do filtro.
- Comparar o valor da frequência de corte obtido experimentalmente com o valor calculado.
- Determinar a inclinação da curva da frequência de corte.



3. RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrônica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Gerador de BF (audiofrequência);
- 1 Multímetro;
- 1 Circuito integrado $\mu A741$;
- 3 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R1 = 27\text{ K}\Omega$, $R2 = 27\text{ K}\Omega$ e $R_L = 10\text{ K}\Omega$);
- 2 Condensadores ($C1=2,2\text{ nF}$ e $C2= 2,2\text{ nF}$).
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;

4. ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.

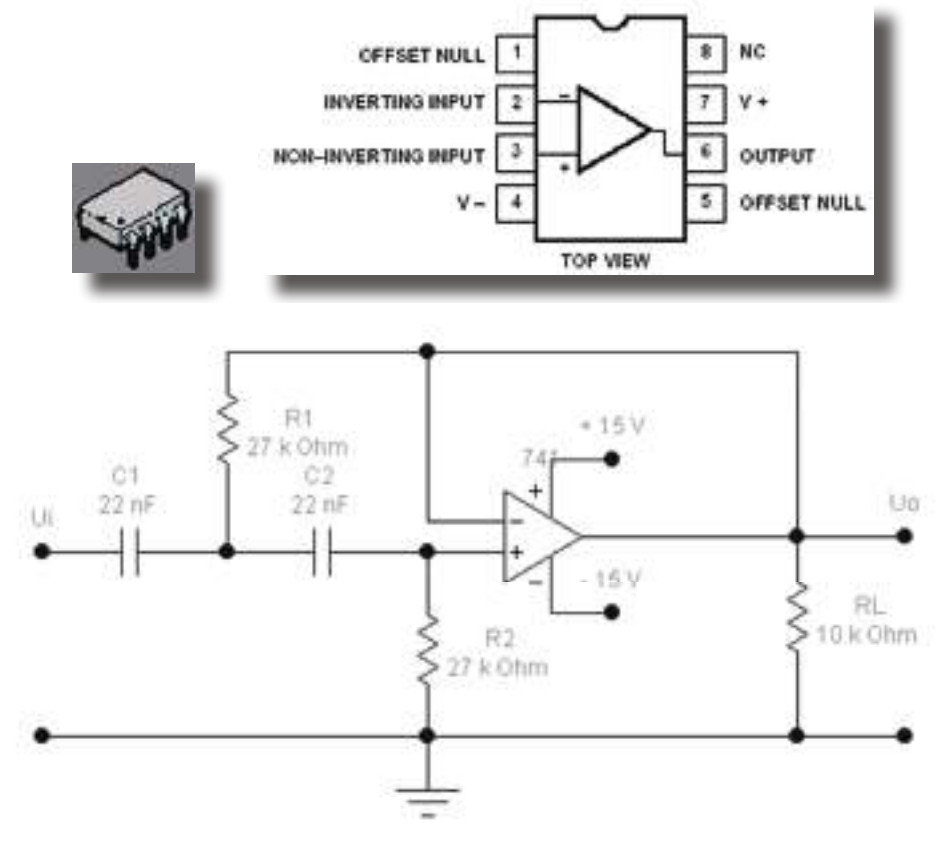


Figura 1



5. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Ligar o gerador de frequência à entrada do filtro e os canais do osciloscópio respectivamente à entrada e à saída do filtro;
- Variar a frequência do gerador de acordo com os valores indicados no quadro 1, mantendo U_i constante (100 mV);
- Registrar para cada um dos valores de U_i (valor que deve ser constante) do quadro 1, os respectivos valores de U_o ;
- Traçar a curva de resposta do filtro na figura 2;
- Determinar a frequência inferior de corte, f_{ci} ;
- Determinar a inclinação da curva de corte em db/década.

f (Hz)	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3500	4000	4500	5000
U_i (mV)											
U_o (mV)											

Quadro 1



Figura 2

6. DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



7. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

a. Cabeçalho:

- Nome da Escola
- Nome da Disciplina
- Número e nome do Módulo
- Nome dos alunos, números, ano e turma
- Identificação do trabalho

b. Conteúdo (Mínimo):

- 1 - Objetivos
- 2 - Recursos necessários
- 3 - Procedimentos do trabalho
- 4 - Dificuldades encontradas
- 5 - Estratégia de resolução das dificuldades
- 6 - Esquemas das montagens
- 7 - Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

TRABALHO PRÁTICO n.º 06 -- FILTRO PASSA BANDA.

1. INTRODUÇÃO

Os filtros passa banda são constituídos por um filtro passa alto ligado em cascata a um filtro passa baixo.

A largura de banda depende da frequência de corte de cada um dos filtros.

O filtro ativo indicado na figura 1 é um filtro passa banda com realimentação múltipla.

Esta montagem apresenta inversão de fase.



Para o cálculo do filtro utilizam-se as seguintes expressões:

$$R_1 = \frac{Q}{A_{VOL} \times 2\pi \times f_o \times C}$$

$$R_2 = \frac{1}{Q \times 4\pi \times f_o \times C - \frac{1}{R_1}}$$

$$R_3 = \frac{Q}{\pi \times f_o \times C}$$

sendo que:

$$R' = \frac{R_3 \times R_1}{R_3 + R_1} \quad \text{e} \quad f_o = \frac{1}{2\pi \times C \times \sqrt{R' \times R_2}},$$

pelo que
$$Q = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{R_2}{R'}}$$

Obtemos assim para as frequências, inferior e superior de corte:

$$f_i = \frac{f_o}{2Q} \times (\sqrt{1+4Q^2} - 1) \quad \text{e} \quad f_s = \frac{f_o}{2Q} \times (\sqrt{1+4Q^2} + 1)$$

2. OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- Traçar a curva de resposta do filtro.
- Determinar as frequências de corte inferior e superior do filtro.
- Comparar o valor das frequências de corte obtido experimentalmente com o valor calculado.

3. RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrônica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);



- Condutores;
- 1 Gerador de BF (audiofrequência);
- 1 Multímetro;
- 1 Circuito integrado $\mu A741$;
- 4 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 100\text{ K}\Omega$, $R_2 = 100\text{ K}\Omega$, $R_3 = 100\text{ K}\Omega$ e $R_L = 10\text{ K}\Omega$);
- 2 Condensadores ($C_1=2,2\text{ nF}$ e $C_2= 2,2\text{ nF}$).
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;

4. ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.

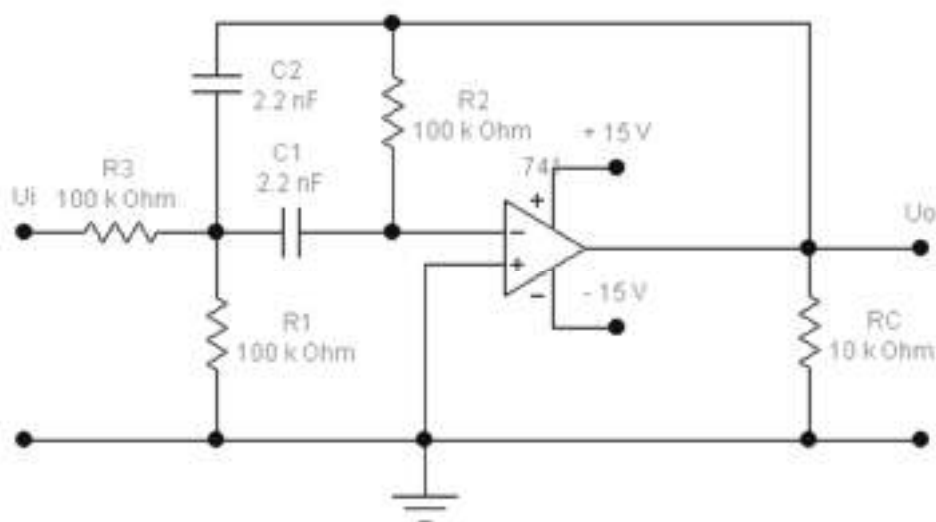
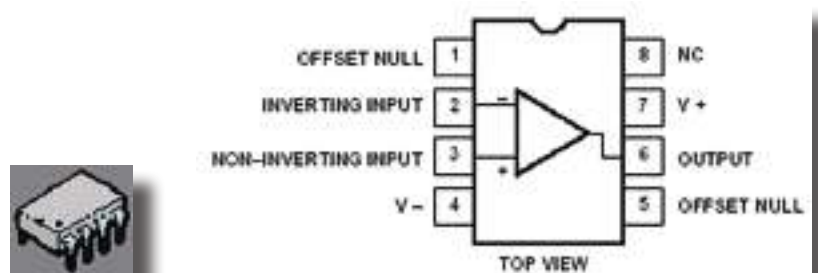


Figura 1



5. PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- a. Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- b. Ligar o gerador de frequência à entrada do filtro e os canais do osciloscópio respectivamente à entrada e à saída do filtro;
- c. Variar a frequência do gerador de acordo com os valores indicados no quadro 1, mantendo U_i constante (100 mV);
- d. Registrar para cada um dos valores de U_i (valor que deve ser constante) do quadro 1, os respectivos valores de U_o ;
- e. Traçar a curva de resposta do filtro na figura 2;
- f. Determinar a frequência inferior de corte e a frequência superior de corte;
- g. Determinar a frequência de ressonância f_o .

f (Hz)	100	200	500	600	700	800	1000	1200	1400	1600	1800
U_i (mV)											
U_o (mV)											

Quadro 1



Figura 2

6. DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



7. ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

a. Cabeçalho:

- Nome da Escola
- Nome da Disciplina
- Número e nome do Módulo
- Nome dos alunos, números, ano e turma
- Identificação do trabalho

b. Conteúdo (Mínimo):

- 1 - Objetivos
- 2 - Recursos necessários
- 3 - Procedimentos do trabalho
- 4 - Dificuldades encontradas
- 5 - Estratégia de resolução das dificuldades
- 6 - Esquemas das montagens
- 7 - Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

Exercícios propostos

Perguntas de exemplo sobre este módulo:

1. Quando é que um circuito com amplificadores operacionais funciona em zona linear?
2. Quando é que um circuito com amplificadores operacionais funciona em zona não linear?



3. Como funcionam os circuitos comparadores?
4. Que outro nome pode ter o comparador não inversor com referência nula?
5. Qual a aplicação que se destaca da montagem do comparador inversor com tensão de referência nula?
6. Qual a necessidade de existir a montagem Comparador não inversora com referência não nula?
7. Porque temos a necessidade de utilizar a montagem comparador com uma única alimentação?
8. Qual a principal diferença do comparador de janela relativamente a outras montagens?
9. O que faz o comparador com histerese?
10. Porque foi criado o comparador com histerese?
11. Para que utilização é aplicado o amplificador operacional PWM na sua versão como comparador?
12. O que faz o circuito integrador?
13. O que executa o circuito diferenciador?
14. Para que são utilizados os conversores de forma de onda?
15. Quais as principais conversões de forma de onda?
16. Para que se utiliza o comparador com referência nula?



17. O que são os filtros?
18. Que tipos de filtros existem?
19. Como se classificam os filtros?
20. Como se classificam os filtros quanto à sua função?



Bibliografia

MALVINO, Electrónica, Vol. 2. McGrawHill. (s.d.).

PINTO, António; CALDEIRA, José, Tecnologias, 12.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).

PINTO, António, Práticas Oficinas e Laboratoriais, 12.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).



