

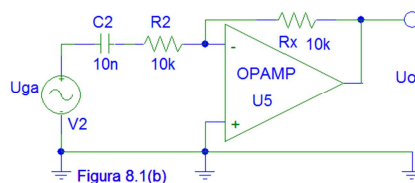
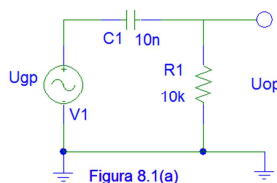
Prática n.º 8: Aplicações de circuitos com AmpOps - filtros passivos vs filtros activos

[Faça o estudo dos circuitos (cálculos e/ou simulações) antes da aula]

1. Preparação prévia:

Considere os circuitos da Fig. 8.1, e assuma que o amplificador operacional é ideal.

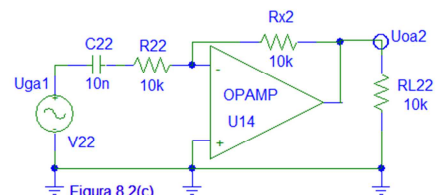
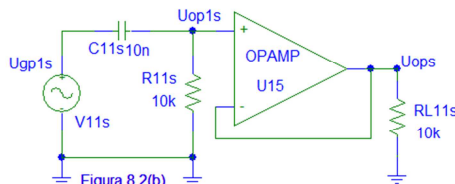
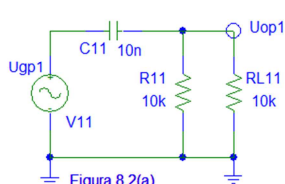
- i) Mostre que a corrente i_g que atravessa a série C-R do filtro passa-alto passivo (Fig. 8.1(a)) é igual à corrente que flui através da série C-R do filtro ativo (Fig. 8.1(b)).
- ii) Determine a resposta em frequência do ganho u_o/u_g (tensão de saída/tensão de entrada) de ambos os circuitos e trace/esboce os respetivos diagramas de Bode.
- iii) Determine a frequência f tal que $u_o(f) = u_g(f)/\sqrt{2}$, e tente relacioná-la com o produto RC.
- iv) Identifique as vantagens do filtro passa-alto ativo, Fig. 8.1(b), relativamente ao filtro passa-alto passivo da Fig. 8.1(a). Porque é que, apesar da complexidade, se tende a usar a montagem da Fig. 8.1(b) em vez o circuito da Fig. 8.1(a)?
- v) Utilize o simulador PSpice para verificar os resultados obtidos nas questões anteriores, usando AmpOp ideal que se encontra na biblioteca Analog, com designação OPAMP.



2. Execução experimental:

Monte ambos os circuitos da Fig. 8.1 na placa de teste, em duas regiões diferentes da placa.

- a) Aplique às entradas, simultaneamente, uma tensão sinusoidal U_g de 1 V de amplitude, ligando os terminais do gerador a um porto da placa de teste, e retirando os sinais U_{gp} e U_{ga} aplicar aos circuitos desse porto.
- b) Observe o comportamento da tensão de saída em ambos os circuitos, à medida que varia a frequência do sinal de entrada desde 100 Hz até 1 MHz, e observe as características passa-alto dos circuitos relativamente à frequência do sinal de entrada.
- c) Meça a frequência para a qual a amplitude das tensões $U_{op,a}$ é igual a $U_{gp,a}/\sqrt{2}$, e relacione-a com o produto RC. Compare os valores experimentais obtidos com os cálculos efetuados.
- d) Substitua a resistência R_x de 10 kΩ do circuito da Fig. 8.1(b) por outra de 33 kΩ, observe novamente a relação entre as tensões de entrada e de saída. Comente o que observou.
- e) Repita os procedimentos das alíneas anteriores para os circuitos da Fig. 8.2(a) e 8.2(c).
- f) Transforme o circuito da Fig. 8.2(a) no circuito da Fig. 8.2(b), e compare o seu funcionamento com o do circuito da Fig. 8.2(c).



Anexo A: filtros passivos vs filtros activos (versão em revisão)

Nos circuitos eléctricos com resistências, capacidades e indutâncias, a relação entre a intensidade de corrente e a tensão aos terminais dos diversos componentes é linear. Estes circuitos/elementos designam-se por **lineares**. Aplicando a um circuito linear um sinal sinusoidal, a resposta, em regime estacionário, é também um sinal sinusoidal, i.e., o sinal de saída tem a mesma forma que o sinal de entrada podendo, no entanto, a amplitude e a fase dos sinais sere diferente. Esta característica é exclusiva dos sinais sinusoidais. Para nenhuma outra forma de onda, periódica ou não, isto se verifica. De fato, o sinal de saída pode nem ter qualquer semelhança com o sinal de entrada.

Um filtro é um dispositivo/circuito electrónico que permite a passagem de determinada banda de frequências impedindo a passagem de outras que estão fora dessa banda, eliminando sinais indesejáveis e melhorando, por exemplo, a resolução de imagem e/ou fidelidade de som.

Em geral, os filtros são constituídos por componentes passivos, em particular por condensadores e bobines, que seleccionam a passagem de sinais sinusoidais em função do valor da sua frequência, permitindo a passagem exclusiva de sinais em determinada banda espectral. Quanto ao comportamento em frequência, existem quatro tipos básicos de filtros: **passa-baixo**, **passa-alto**, **passa-banda** e **rejeita-banda**.

Função de transferência de um circuito

Os filtros lineares, em geral, são circuitos com dois pares de terminais (um dos quais se considera como entrada do circuito e o outro como a saída), Fig. 1, e cuja resposta, isto é, a relação entre as variáveis de entrada V_{in} e I_{in} e as de saída V_{out} e I_{out} é dependente da frequência.

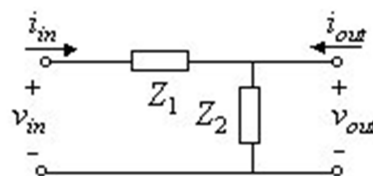


Fig. 1: Filtro linear constituído por dois componentes de espécies diferentes.

A razão V_{out}/V_{in} , com $I_{out} = 0$, corresponde à função de transmissão do circuito ou função de transferência do circuito, $T(\omega) = V_{out}/V_{in}$, e é, em geral, uma quantidade complexa.¹ Se o

¹ As grandezas e as funções complexas, como a impedância Z , os fasores de tensão e de corrente (V e I), a função resposta em frequência H , representam-se em estilo romano. No entanto, o módulo e a fase das grandezas complexas, como, por exemplo, da impedância, são representados em itálico (Z , ψ).

módulo da função de transferência for superior a 1, o seu valor designa-se ganho; se for inferior a 1 indica que ocorre atenuação do sinal. Neste trabalho estudaremos a resposta em frequência de filtros RC passivos e ativos.

Decibel (dB)

Para exprimir razões de potências, tensões, etc., é frequente usar-se o **decibel** (dB). Se a potência, a corrente e a tensão de entrada de um circuito são dadas por P_{in} , I_{in} e V_{in} , respectivamente, e a potência, a corrente e a tensão de saída por P_{out} , I_{out} e V_{out} , então a atenuação (ou ganho) do circuito em dB é:

$$\eta(\text{dB}) = 10 \cdot \log \left| \frac{P_{out}}{P_{in}} \right| = 20 \cdot \log \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|.$$

Se η é positivo, o circuito apresenta ganho (amplificador); se η é negativo, o circuito atenua o sinal de saída (atenuador).²

Usando o decibel, grandezas muito grandes ou muito pequenas são expressas usando números com poucos dígitos. Outra vantagem é que as atenuações (ou ganhos) em dB, de circuitos ligados em sucessão se somam, uma vez que o logaritmo do produto é igual à soma do logaritmo dos factores.

Largura de banda de um Circuito

Em corrente alternada (ca), a impedância de um filtro/circuito varia com a frequência. Define-se **largura de banda** de um circuito, como o espectro de frequências no qual o módulo da função de transferência (em tensão ou corrente), $|V_{out}/V_{in}|$ ou $(|I_{out}/I_{in}|)$, é maior ou igual a $(\sqrt{2})^{-1} \approx 0.707$ (ou -3 dB), ou o intervalo de frequências no qual a potência de saída é maior ou igual a metade (ou corresponde a -3 dB) da potência máxima do sinal de saída, Fig. 2. Também se costuma designar a largura de banda como a **banda passante** do circuito.

Na Fig.6, ω_{ci} e ω_{cs} representam as frequências de corte inferior e superior, respectivamente. Num circuito **passa-banda**, os sinais com frequências compreendidas entre ω_{ci} e ω_{cs} não são atenuados. Há circuitos em que a frequência de corte inferior é zero (**circuitos passa-baixo**), e circuitos em que a frequência de corte superior é infinita (**circuitos passa-alto**).

Num circuito **rejeita-banda**, os sinais com frequências compreendidas entre ω_{ci} e ω_{cs} são

² Note que nas medições dos pares I_{out} e I_{in} e V_{out} e V_{in} , se deve usar o mesmo valor de impedância, i.e., I_{out} e $Z_{in} = Z_{out}$.

atenuados. Quando a amplitude do sinal à saída é inferior à do sinal à entrada o circuito actua como um atenuador.



Fig. 2: Resposta espectral de um circuito. Largura de banda. Pontos -3 dB.

Há também circuitos em que a amplitude do sinal de saída é superior à do sinal de entrada num dado intervalo de frequências: os sinais são amplificados, o circuito atua como um amplificador nessa banda de frequências. Em termos físicos, a amplificação corresponde, em geral, à multiplicação do sinal aplicado à entrada por uma função complexa de módulo superior à unidade.

Amplificadores

Os sinais eléctricos provenientes de transdutores e de sensores são, em geral, de pequena amplitude e, portanto, insuficiente para excitar directamente a maioria dos sistemas electrónicos. O sinal gerado por um microfone, por exemplo, é da ordem de 10 mV, apresentando o sistema de captação uma resistência de saída da ordem de 50 kΩ. Se este sinal for aplicado directamente a um altifalante, não produzirá qualquer efeito sonoro. Torna-se necessário, pois, intercalar entre o transdutor (microfone) e o elemento de saída (altifalante/colunas), uma ou várias etapas que amplifiquem o sinal gerado pelo microfone, sem o deformar.

A importância da electrónica resulta do facto de poder manipular sinais eléctricos e, em especial, na capacidade de amplificar sinais de forma a permitir tratar e/ou enviar informação a longas distâncias. Até ao advento do transistor, as válvulas de vácuo (tríodo, pênodo, etc.) eram os elementos mais usados.³ A possibilidade de implementar vários elementos numa pastilha de silício - circuito integrado⁴ - permitiu o desenvolvimento de componentes amplificadores de grande fiabilidade.

A Fig. 4 representa de forma esquemática um (circuito) amplificador: um amplificador **A** com o correspondente equivalente de Thévenin do transdutor (v_g e R_g) e uma resistência de carga R_L aos terminais da qual é aplicado o sinal amplificado.

³ O uso de válvulas de vácuo está hoje reservado à amplificação de sinais de grande potência ou em amplificadores áudio de grande precisão.

⁴ Um circuito integrado é um elemento electrónico formado numa pequena porção de material semiconductor, que inclui vários componentes *elementares* (resistência, condensadores, díodos, e transístores; as bobines são de difícil implementação em materiais semicondutores), bem como as respectivas ligações.

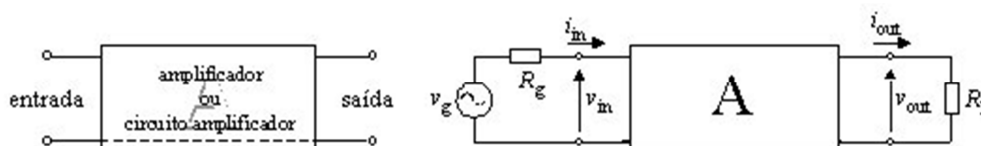


Fig. 4. Representação simbólica de um amplificador ou circuito amplificador, e o esquema do circuito amplificador *completo*.

Consoante a natureza dos sinais de entrada e de saída, um amplificador pode ser de tensão, de corrente, de transcondutância ou de transresistência:

- Amplificador de **corrente**: entrada em corrente e saída em corrente;
- Amplificador de **transimpedância**: entrada em corrente e saída em tensão;
- Amplificador de **transcondutância**: entrada em tensão e saída em corrente;
- Amplificador de **tensão**: entrada em tensão e saída em tensão.

O ganho do amplificador (em tensão, em corrente, ou em potência) corresponde à razão entre a amplitude (tensão/corrente/potência) do sinal à saída e a amplitude (tensão/corrente/potência) do sinal aplicado à entrada. Como referido, é comum expressar os ganhos em decibel (dB).

Além dos ganhos, é necessário ter em conta o valor das **resistências de entrada e de saída**. A resistência de entrada R_{in} é determinada com a carga R_L ligada: $R_{in}=v_{in}/i_{in}$. A resistência de saída R_{out} é obtida com a resistência de carga desligada e a fonte equivalente de Thévenin v_g da entrada substituída por um curto-circuito: $R_{out}=v_{out}/i_{out}$.

Dois grandes valores de importância, em determinados tipos de amplificadores e alguns circuitos realimentados, são a **transcondutância** e a **transresistência**.

A transcondutância corresponde à razão entre a corrente de saída e a tensão de entrada: $G_m=i_{out}/v_{in}$ (unidade SI, siemens S).

A transresistência define-se como a razão entre a tensão de saída e a corrente de entrada: $R_m=v_{out}/i_{in}$ (unidade SI ohm, símbolo Ω).

Estas duas grandezas são muitas vezes tratadas como representando ganhos, ainda que não correspondam a razões entre duas tensões ou duas correntes.

Como já foi referido, a finalidade de um circuito amplificador é fornecer à saída um sinal eléctrico de maior amplitude que o aplicado à entrada, mas proporcional a este. Contudo, o sinal amplificado não corresponde, muitas vezes, uma imagem fiel do sinal de entrada, isto é, o sinal amplificado apresenta-se com distorções. As distorções resultam fundamentalmente das não linearidades das características dos elementos que constituem o amplificador.

A distorção pode ser de amplitude (não linearidade da função de transferência), de frequência (sinais de frequências diferentes são amplificados de forma distinta, i.e., o ganho do

circuito varia com a frequência) ou de fase (quando o sinal de saída se encontra desfasado em relação ao de entrada).

As **distorções de frequência e de fase** estão relacionadas entre si, ambas são devidas aos condensadores existentes nos circuitos ou elementos amplificadores.

Diagramas de Bode

Um amplificador bem projectado, apresenta uma largura de banda na qual não se produz distorção, ou a distorção presente é admissível. Os fabricantes de circuitos ou componentes amplificadores costumam fornecer as curvas de ganho em tensão e do ângulo de mudança de fase, em função da frequência, i.e., a resposta em amplitude e em fase do amplificador em função da frequência.

O conjunto destas curvas, com o ganho expresso em dB, a mudança de fase em graus e o eixo das abcissas em Hz (frequência) numa escala logarítmica (base 10) é designado de diagramas de Bode, Fig. 5. Nestes gráficos as zonas lineares são aproximadas por rectas.

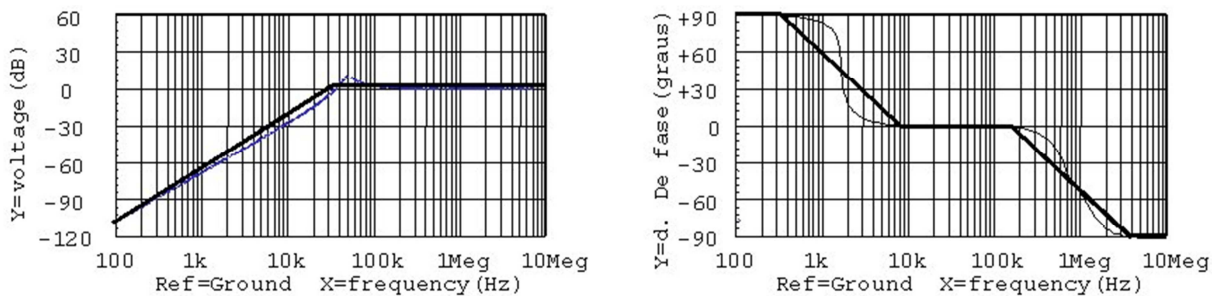


Fig. 5. Diagramas de Bode. Distorção de frequência e distorção de fase.

Filtros RC passivos

Os filtros RC são, normalmente, formados por uma resistência (condensador) em série e um condensador (resistência) em paralelo, tal como se mostra na Fig. 6. Recorde-se que a reactância capacitiva, i.e., a resistência que uma capacidade oferece à corrente alternada depende da frequência do sinal: é grande a frequências baixas e é pequena a frequências altas.

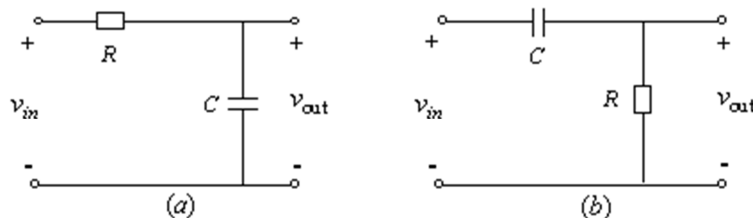


Fig. 6: a) Circuito RC passa-baixo. b) Circuito RC passa-alto.

A frequência de corte de um filtro RC corresponde à frequência para a qual o valor da

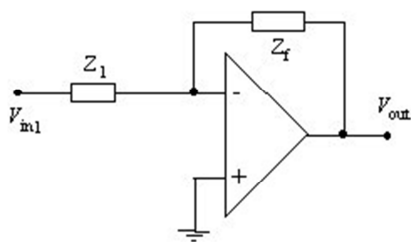
reactância do condensador iguala o valor da resistência, i.e., $(\omega_c C)^{-1} = R$ ou $\omega_c = (RC)^{-1}$.

O comportamento da função de transferência para frequências acima (passa-baixo) ou abaixo (passa-alto) da frequência de corte apresenta um declive de 20 dB/década (ou 6 dB/oitava).

Filtros ativos:

Consideremos os circuitos indicados na Fig. 7. Consideram-se como circuitos lineares aqueles em que o **amplificador não está saturado** (ou seja, que recorrem a realimentação negativa e a tensão à saída é inferior (em módulo) à tensão de alimentação/polarização do AmpOp). Nestas condições, devido ao elevado ganho do AmpOp em malha aberta, a diferença de potencial entre as entradas “+” e “-” é nula (diz-se que estamos perante um **curto-circuito virtual**), caso contrário o amplificador entraria, rapidamente, em saturação.

Da mesma forma que na montagem inversora puramente resistiva, o terminal inversor corresponde a uma “**terra virtual**”, e $I_f = I_1$.



A função de transferência em malha fechada é dada por:

$$V_{out}/V_{in1} = -Z_f/Z_1.$$

Para além do caso puramente resistivo, há duas topologias, simples, contendo um elemento capacitivo:

- amplificador diferenciador: $V_{out} = -R_f/X_C V_{in1}$
- amplificador integrador: $V_{out} = -X_C/R_1 V_{in1}$

Fig. 7: Montagem inversora com impedâncias.

Começemos por considerar $Z_1 \equiv R_1$ e $Z_f \equiv R_2$. Tendo em conta as características ideais do AmpOp, verifica-se que a corrente na resistência R_1 é $\frac{V_{in} - V_-}{R_1}$; por sua vez, a corrente na resistência de realimentação R_2 é $\frac{V_- - V_{out}}{R_2}$. Como v_- é igual a v_+ (AmpOp ideal), e $v_+ = 0$, resulta (dado que as correntes em R_1 e R_2 são iguais e as correntes de entrada nos terminais “+” e “-” do AmpOp são nulas):

$$\frac{V_{in} - 0}{R_1} = \frac{0 - V_{out}}{R_2}$$

donde resulta:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{in}$$

(1)

Consideremos agora as **configurações da Fig. 8(a)**, onde $Z_1 \equiv R$ e $Z_f \equiv C$, e da Fig. 8(b), onde $Z_1 \equiv C$ e $Z_f \equiv R$, que correspondem a filtros ativos passa-baixo e passa-alto, respectivamente. Começemos a análise pelo circuito da Fig. 8(a). A corrente na resistência R é: $I_1 = \frac{V_{in1}}{R}$, e como não “entra” corrente pela entrada inversora (-), tem-se $I_1 = I_f$. Portanto, o condensador vai carregar com uma corrente I_f , a qual é constante enquanto V_{in1} o for.

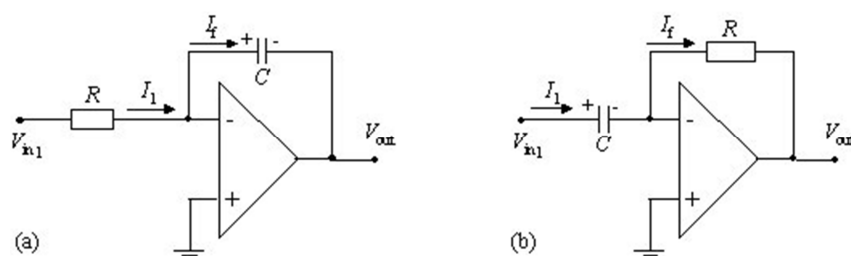


Fig. 8: Filtro ativos (a) passa-baixo e (b) Filtro passa-alto.

A tensão de saída V_{out} é função da carga do condensador, e esta da corrente:

$$V_{out} = -V_C = -\frac{Q}{C} \quad (2)$$

A carga Q no condensador é dada por:

$$Q = \int_{t_i}^{t_f} I_f dt, \text{ onde } I_f = \frac{V_{in1}}{R}.$$

Substituindo-se Q na expressão (2), obtém-se:

$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int_{t_i}^{t_f} V_{in1} dt,$$

e se $RC=1$,

$$V_{out} = -\int_{t_i}^{t_f} V_{in1} dt \quad (3)$$

A **configuração da Fig. 8(b)** corresponde à situação em que $Z_1 \equiv C$ e $Z_f \equiv R$. Da análise da Fig. 8(b), conclui-se que uma tensão de entrada V_{in1} constante produz uma corrente I_1 , apenas enquanto o condensador estiver a carregar-se. Nesta configuração:

$$V_{out} = -I_f R = -I_1 R.$$

Atendendo a que $Q = CV_{in1}$, e que $I_1 = \frac{dQ}{dt}$, obtém-se

$$V_{out} = -RC \frac{dV_{in1}}{dt}$$

e se $RC=1$,

$$V_{out} = -\frac{dV_{in1}}{dt} \tag{4}$$

É conhecido do estudo da corrente alternada sinusoidal, que as relações obtidas em corrente contínua são válidas em corrente alternada, desde que se substituam as resistências por impedâncias. Da análise da Fig. 8, e das relações (3) e (4) resultam as seguintes expressões para tensões de entrada sinusoidais $v_{in1}(t) = V_{in1}e^{j\omega t}$:

$$\begin{cases} V_{out} = -\frac{1}{j\omega CR} V_{in1} \\ V_{out} = -j\omega CR V_{in1} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} V_{out} = -\frac{1}{CR} \int v_{in1} dt \\ v_{out} = -CR \frac{dv_{in1}}{dt} \end{cases} \tag{5}$$

Resposta em frequência de montagens com AmpOps

A expressão (1) indica que o ganho da montagem amplificadora inversora é independente da frequência do sinal que se pretende amplificar. Na realidade tal não acontece já que, sendo o transístor e o circuito de polarização associado a um sistema físico, tem um tempo de resposta finito. Para sinais com variação “temporal” rápida (sinais com componentes espectrais de alta frequência), quando comparado com o tempo de resposta do circuito, o amplificador deixa de responder de forma eficiente.

No limite de sinais muito rápidos, o circuito não responde de todo. Na prática, isso traduz-se numa redução do ganho do circuito quando a frequência do sinal de entrada é superior a um determinado valor (frequência de corte do circuito, f_c). Considerando os mecanismos físicos de funcionamento dos constituintes do circuito amplificador existente no integrado, é possível obter uma expressão geral para o ganho do amplificador, a qual, para frequências baixas, coincide com a relação (1).

A apresentação da expressão geral do ganho das montagens amplificadoras em função da frequência está fora do âmbito destas notas e desta unidade curricular. Contudo, a verificação experimental da dependência do ganho na frequência é simples e constitui um dos objectivos deste trabalho. Para tal deve ter-se em consideração a resposta em frequência dos AmpOps (LM741 ou OPA551) usados nas atividades experimentais.

Largura de banda do AmpOP

No caso dum amplificador operacional ideal, a largura de banda (intervalo de frequências no qual o amplificador funciona com as suas características nominais, ou pouco se afasta delas) é infinita, isto é, estende-se de zero (cc/dc) até *frequências cujo valor tende para o infinito*. Contudo, é razoável esperar que o funcionamento de um amplificador operacional dependa da frequência. De fato, a largura de banda (também designada **banda passante**) é finita para qualquer amplificador real.

Seja um amplificador cujo ganho é A . Se a amplitude do sinal de entrada for constante, existirá uma frequência para a qual a amplitude do sinal de saída será máxima ($V_{out_{max}}$). Define-se largura de banda como o intervalo de frequências em que a amplitude do sinal de saída é superior a um valor pré-determinado, normalmente $1/\sqrt{2}$ da amplitude da tensão aplicada à entrada. Definição em termos de potência: quando a potência de saída se reduz a metade do valor máximo da potência do sinal de entrada - numa escala logarítmica, quando a potência de saída *cai* -3dB relativamente ao valor da potência do sinal de entrada).

No caso do 741, o valor máximo ocorre para $f_{ci}=0$ Hz, e o valor a -3dB ocorre para $f_{cs}=10$ Hz, em **malha aberta**. Usando malhas de realimentação negativa, consegue-se obter uma curva de resposta em frequência com largura de banda bastante superior. Normalmente verifica-se a relação produto *Ganho* \times *Largura de Banda* ~ 1 MHz.

Páginas com informação sobre os amplificadores operacionais LM741 e OPA551

LM741 [Datasheet](#)

http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ua741&gclid=Cj0KQCQjwvXeBRDDARIsAC38TP4L1PVU_0kBUTsdqp56empkEHYcwnp_TJFyxvDz8BBd0AGKMJeZLjcaAqs-EALw_wcB
www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf
https://pt.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/a741p.html>

OPA551 [Datasheet](#)

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/datasheet_opamp_opa551.pdf