

Capítulo 2 – Amplificador Operacional – Aplicações Lineares

Neste capítulo são apresentados o Amplificador Operacional (A.O ou AmpOp) e as principais aplicações básicas: Amplificador Inversor, Amplificador Não Inversor, Buffer, Amplificador Somador, Amplificador Diferencial e Amplificador diferencial de Instrumentação.

2.1. Introdução

O amplificador operacional (AO) é um dispositivo em circuito integrado (CI) que tem grandes aplicações em todas as áreas da eletrônica (filtros, aplicações lineares, aplicações não lineares, áudio, controle, operações aritméticas, etc). Como o circuito interno é muito complexo toda a análise será feita considerando o modelo (circuito equivalente) mostrado na Figura 1.1b, o qual é adequado para a maioria das aplicações. A Figura 1.1a mostra o símbolo do AO e a Figura 1.1b o circuito equivalente simplificado.

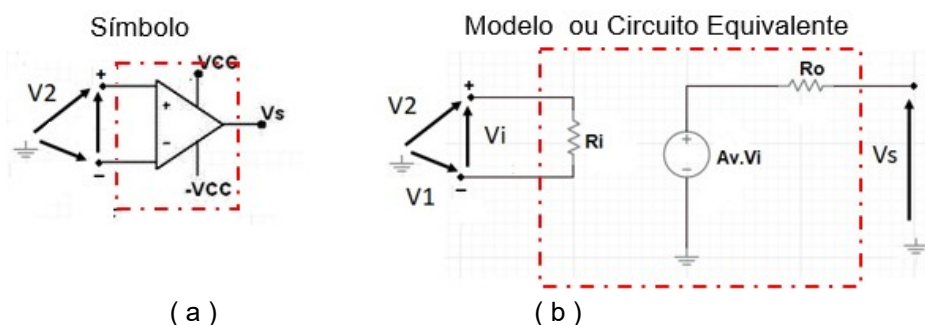


Figura 2.1 – Amplificador operacional (a) Símbolo (b) Circuito equivalente

Na Figura 2.1

- $V1$ e $V2$ são as tensões de entradas e $V_i = V2 - V1$ entrada diferencial;
- V_s tensão de saída;
- $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ alimentação simétrica;
- A_v é o ganho diferencial em malha aberta (ganho de tensão em malha aberta);
- R_i e R_o são as resistências de entrada e saída em malha aberta.

O AO tem duas entradas, uma chamada de entrada inversora (-) e outra chamada de não inversora (+), sendo assim chamadas pois uma tensão

aplicada na entrada inversora (-) a resposta na saída estará defasada de 180°, e se o mesmo sinal for aplicado na entrada não inversora (+) a resposta na saída estará em fase com a entrada.

Av é o ganho em malha aberta (sem realimentação) tem um valor muito alto, no caso do 741 tipicamente $A_v=100.000$

Ri é a **resistência de entrada** em malha aberta, e tem um valor muito alto (no caso do 741 $R_i = 1M\ \Omega$)

Ro é a **resistência de saída** em malha aberta, tem um valor baixo (no caso do 741 $R_o = 75\ \Omega$)

Vi = $V_2 - V_1$ = sinal erro ou sinal diferença, é o que é amplificado efetivamente, isto é, a tensão na saída será proporcional à diferença entre as duas tensões de entrada

$$V_s = A_v.V_i = A_v.(V_2 - V_1)$$

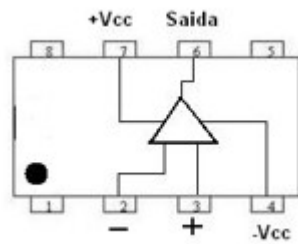
Um AO idealmente deveria ter as seguintes características:

- a) Resistência de entrada infinita (R_i);
- b) Resistência de saída nula (R_o);
- c) Ganho de tensão em malha aberta infinito (A_v);
- d) Largura de faixa infinito (LF);
- e) Ausência de offset na saída ($V_s = 0$ se $V_1 = V_2$);
- f) Slew rate infinito (S.R).

Existem vários tipos de amplificadores operacionais, um para cada tipo de aplicação.

O AO mais simples e mais conhecido é o 741

A Figura 2.2 a pinagem e o aspecto físico do 741 no encapsulamento D.I.P (*Dual In line Package*) de 8 pinos.



(a)



(b)

Figura 2.2 – Amplificador operacional 741 (a) Pinagem (b) Aspecto físico

Amplificador Operacional em Malha Aberta

Malha aberta significa que não existe conexão entre a saída e nenhuma das entradas. Nessas condições a tensão de saída se relaciona com as entradas por:

$$V_s = A_v \cdot (V_+ - V_-)$$

Onde A_v é o ganho em malha aberta

V_+ tensão aplicada na entrada não inversora

V_- tensão aplicada na entrada inversora

Como A_v é muito grande (100.000 por exemplo) a saída satura facilmente (atinge valor máximo). Na realidade basta que V_i ser da ordem de 1 mV para a saída atingir 10 V.

A Figura 2.3 mostra situações onde o A.O satura e uma terceira que se o A.O for ideal a saída é nula.

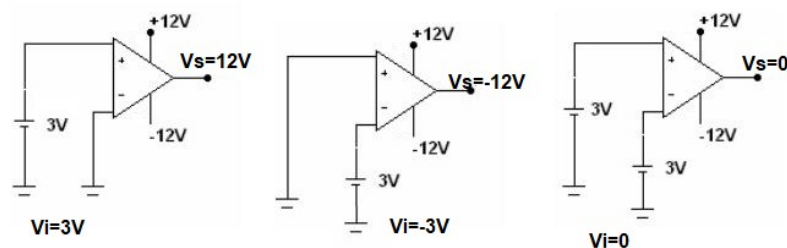


Figura 2.3 – Amplificador Operacional em malha aberta

Arquivo Multisim Live - Amp op em malha aberta

<https://www.multisim.com/content/uWhUgED3uMRdVGhkKfH9DF/amplificador-operacional-exp01-malha-aberta/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/XT-KO25uyz0>

2.2. O Amplificador inversor

O circuito da Figura 2.4 é chamado de **amplificador inversor**, pois a tensão de saída (V_s) está defasada de 180° em relação à entrada (V_e), valendo para tensão alternada e contínua. Observar que existe realimentação (conexão entre saída e entrada) e é negativa, pois a saída é ligada a entrada inversora (-).

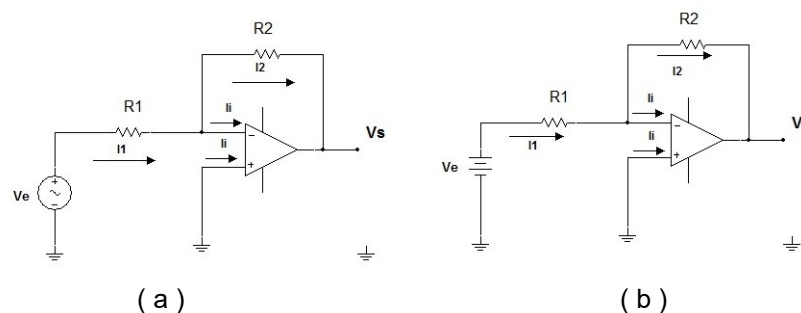


Figura 2.4 – Amplificador inversor (a) em CA (b) em CC

Para deduzir a expressão do ganho com realimentação ($A_{vf} = V_s/V_e$) as seguintes características de um AO é ideal devem ser consideradas:

- Ganho de malha aberta **infinito**, logo $V_i = V_s/A_v = 0$. (V_i é a tensão entre a entrada + e a entrada -). Portanto na Figura 2.4 a tensão em R_1 vale V_e , as duas entradas estão "em curto circuito". É um curto circuito virtual.
- Impedância de entrada **infinita**, conseqüentemente as correntes nas duas entradas + e - valem zero, $I_i = 0$, portanto na Figura 2.4 podemos afirmar que $I_1 = I_2$.

Curto circuito virtual

Como a tensão entre as duas entradas é nula (curto circuito), mas apesar disso a corrente é nula (não esqueça em um curto circuito a corrente é máxima), por causa disso dizemos que entre as duas entradas existe um "curto circuito " virtual e que na entrada inversora temos uma terra virtual. Do circuito na Figura 2.4, em função das **observações pode ser deduzido que**.

Portanto o ganho do circuito será:

$$A_{vf} = V_s/V_e = (-R_2.I_2)/R_1.I_1 \quad \text{e como } I_1=I_2$$

$$\mathbf{A_{vf} = - R_2/R_1}$$

O sinal negativo indica defasagem de 180° entre V_e e V_s .

Obs: f de feedback (Realimentação)

A Realimentação Negativa

É obtida conectando a saída, V_s , à entrada inversora (caso a saída estivesse conectada com a entrada não inversora a realimentação seria positiva).

Todos os **amplificadores** com AO, obrigatoriamente terão realimentação negativa. A realimentação negativa confere aos amplificadores algumas características interessantes tais como: estabilidade do ganho, aumento na largura de faixa, diminuição na distorção e modificação na impedância de entrada e saída.

Mais uma vez:

"Para qualquer amplificador a realimentação (conexão entre a saída e a entrada) deverá ser negativa (saída conectada com a entrada inversora)".

Como pode ser verificado, da expressão do ganho do amplificador inversor, o ganho "não depende da carga " nem do AO. A impedância de entrada desse circuito é igual a **R1** e a impedância de saída dada por:

$R_{of} = (R_o.R2)/A_v.R1$ é um valor MUITO BAIXO

Onde R_o é a resistência de saída sem realimentação e A_v é o ganho em malha aberta.

A resistência de entrada do circuito é dada por $R_{if} = R1$ (é a resistência efetivamente “vista” pela fonte V_e).

Exercícios resolvidos

Ex. Resol.1. Calcule a tensão na saída do AO (V_s), a corrente na saída do AO (I_{AO}) e na carga (I_L) no circuito.

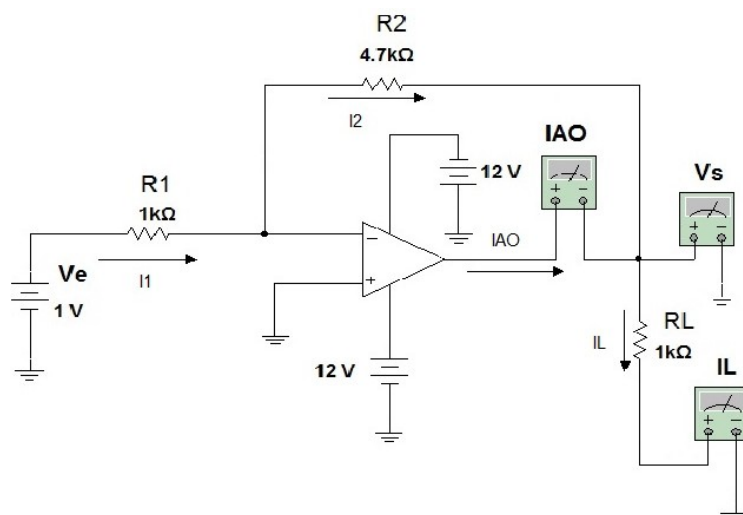


Figura 2.5 – Amplificador inversor em CC

Solução:

$V_e = 1\text{ V}$

Ganho em malha fechada: $A_{vf} = -4\text{K}7/1\text{K} = -4,7$

Logo $V_s = A_{vf} \times V_e = -4,7 \times 1\text{V} = -4,7\text{ V}$

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/jqUQKnSjSPMuWa7sUciSWi/exercicio-resolvido-21/open>

Vídeo Comentado_

<https://youtu.be/ZHb9wWIsPo8>

Ex. Resol.2. Para o circuito a seguir pedem-se:

- a) Desenhar os gráficos de V_{sxt} e V_{ext} se $V_e = 1.\text{sen}\omega t$ (V)
- b) Desenhar a curva característica de transferência ($V_s \times V_e$) se a tensão de saturação é dada $V_{\text{sat}} = \pm 12\text{V}$.
- c) Desenhar o gráfico da saída se $V_e = 2.\text{sen}\omega t$ (V)

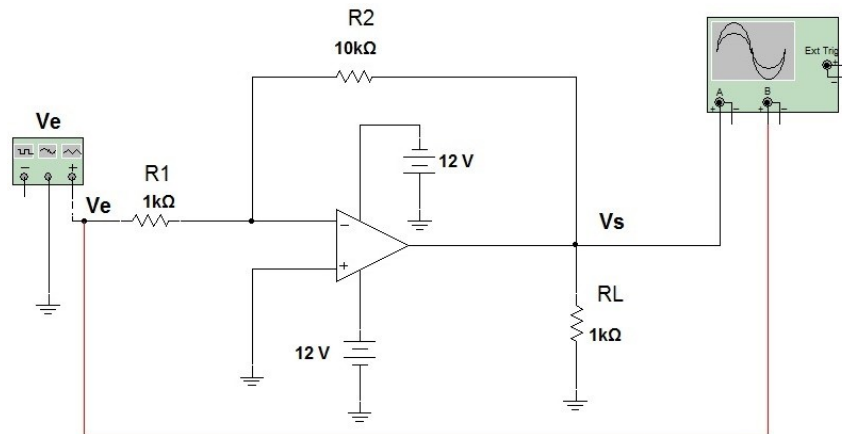


Figura 2.6 – Amplificador inversor em CA

Arquivo Multisim Live - Ex. Resol.1 – Amplificador Inversor em CA

<https://www.multisim.com/content/JMmp6A7KhWZDnmcSNx2Htb/exercicio-resolvido-22/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/BNzFtWjiMQY>

Solução:

- a) O ganho do circuito vale $A_{vf} = -10\text{k}/1\text{k} = -10$ a saída é dez vezes maior que a entrada e defasada de 180° .

$$V_s = -10.\text{sen}(\omega t) \text{ (V)}$$

Os gráficos obtidos no Multisim:

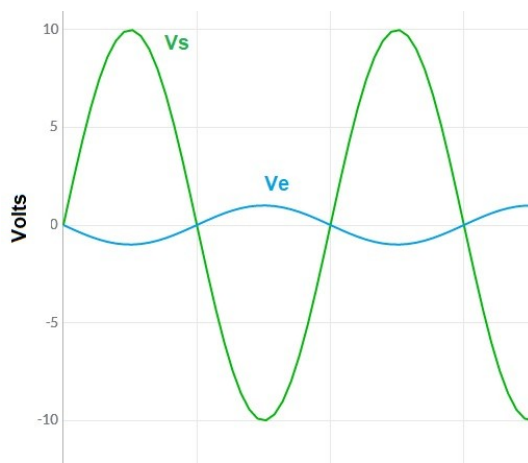


Figura 2.7 – Formas de onda de entrada e saída do exercício proposto 2.6

- b) A curva característica de transferência de qualquer dispositivo relaciona a variável de entrada com a variável de saída. Por exemplo, em um motor a variável de entrada pode ser tensão no enrolamento e a variável de saída, a rotação no eixo.

No caso do circuito da Figura 2.7, a entrada é uma tensão (V_e) e a saída é tensão (V_s).

A curva de transferência é basicamente a representação gráfica da equação $V_s = -10 \cdot V_e$ dentro da região linear, isto é, para saturar (atingir 12 V na saída) a entrada deve valer $\pm 1,2$ V. Matematicamente escrevemos:

$$V_s = -10 \cdot V_e \quad \text{é válido para} \quad -1,2\text{V} < V_e < 1,2\text{V}$$

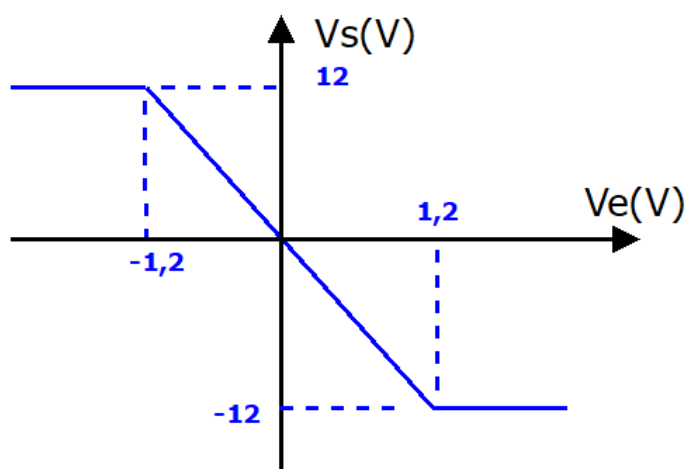


Figura 2.8 – Curva característica do circuito da Figura 2.7

Obs: A máxima tensão na saída (saturação) depende do valor da alimentação simétrica. Normalmente é um pouco menor, em modulo, que a alimentação.

- c) Se a máxima saída é $V_{\text{sat}} = \pm 12\text{V}$, quando $V_e = 2\text{ V}$ a saída não será -20 V , saturando antes. Nesse caso os picos da senoide serão ceifados em aproximadamente $+12\text{ V}$ e -12 V como na Figura 2.9.

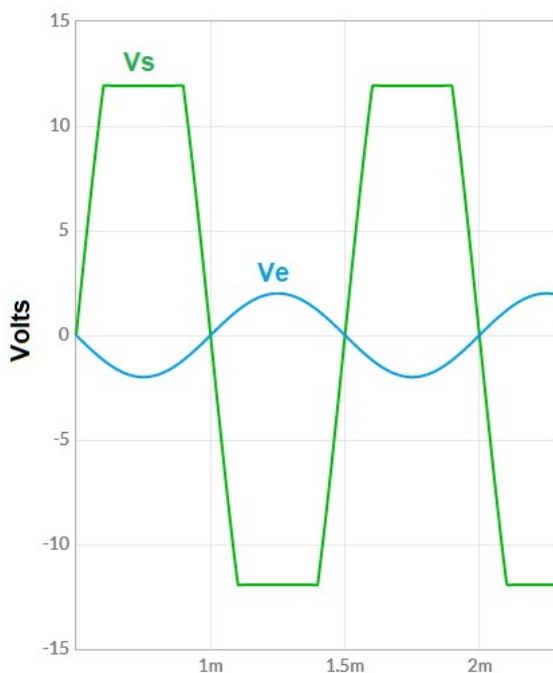


Figura 2.9 – Tensões de entrada e saída no circuito da Figura 2.6 para $V_e = 2\text{V}_{\text{pico}}$

2.3. O Amplificador não inversor

Em um **Amplificador Não Inversor**, Figura 2.10, a tensão de saída V_s , está em fase com a tensão de entrada, V_e .

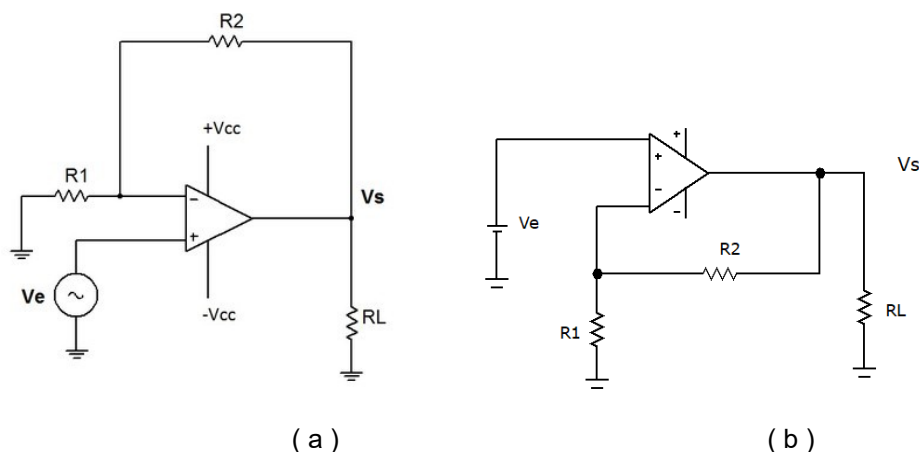


Figura 2.10 – Amplificador Não Inversor (a) CA (b) CC

Obs: Na Figura 2.10 a configuração é a mesma tanto para o Amplificador CA como para o CC, A realimentação continua a ser negativa, mas agora a tensão de entrada é aplicada na entrada não inversora, portanto a tensão de saída, V_s , está em fase com a de entrada, V_e .

O Ganho de malha fechada (com Realimentação)

O Ganho com realimentação é calculado por:

$$A_{vf} = V_s / V_e$$

Obs: f de feedback (realimentação em português)

A dedução pode ser feita da mesma forma que foi feita para o circuito inversor. Assim como no amplificador inversor, o circuito apresenta estabilidade no ganho devido à realimentação negativa, isto é, o ganho só depende da relação entre duas resistências (R_1 e R_2) e é dado por:

$$A_{Vf} = \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Impedância de entrada com realimentação (R_{if})

A impedância de entrada com realimentação é muito alta sendo dada por:

$$R_{if} = \frac{R_i \cdot A_v}{A_{vf}}$$

É muito alta!

Impedância de saída com realimentação (Rof)

A impedância de saída com realimentação é muito alta sendo dada por:

$$R_{Of} = R_O \cdot \frac{A_{vf}}{A_v}$$

onde R_O é a resistência de saída em malha aberta e A_v é o ganho em malha aberta (obtido do manual) e A_{vf} é o ganho em malha fechada.

É muito baixa!

Exercícios Resolvidos

Ex. Resol.3. No circuito determinar a tensão de saída, V_s .

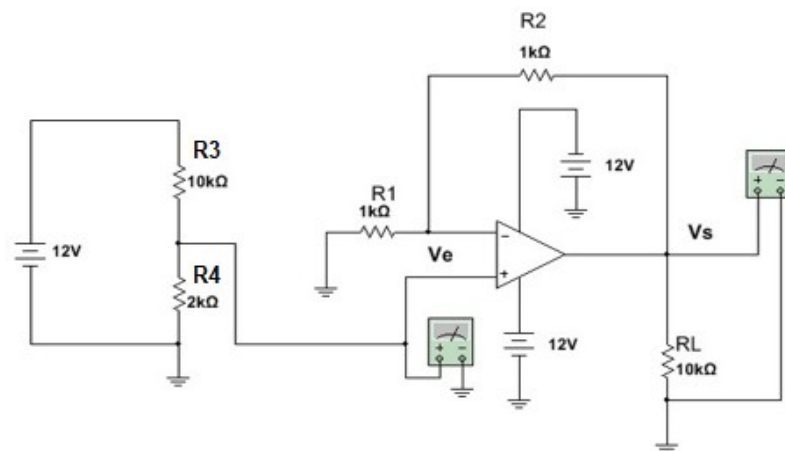


Figura 2.11 – Amplificador Não Inversor

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/2tnGf5xchFvaNFjZFWJHPB/exresol3/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/mW9G6oEkyoc>

Solução:

A tensão de entrada do circuito, V_e , é obtida no divisor de tensão:

$$V_e = (2k \cdot 10V) / (2k + 10k) = 2 \text{ V}$$

Como o ganho $(1 + R_2/R_1)$ é igual a 2 a tensão de saída, V_s , será igual a:

$$V_S = \text{Ganho} \cdot V_e = (2) \cdot 2V = 4 \text{ V}$$

Ex. Resol.4 Em relação ao circuito da Figura 2.11 determinar:

- a) Qual a máxima amplitude que pode ter a tensão de entrada V_e , no Ex. Resol.3, para que a saída não sature distorcendo a senoide de saída?
- b) Qual deve ser o valor de R_4 no item a)?
- c) Desenhar a curva de transferência, V_{sx}/V_e

Dado: $V_{sat} = \pm 12V$

Arquivo Multisim - Ex. Resol.3

<https://www.multisim.com/content/6dMvRPQjE5xSLR6KSQAQZc/exresol4/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/mW9G6oEkyoc>

Solução:

- a) A máxima amplitude de saída é 12 V, e como o ganho é $AV_f = 1 + 1k/1k = 2$ a máxima amplitude da entrada será:

$$V_{e\text{máx}} = V_{s\text{máx}}/2 = 12V/2 = 6 \text{ V}$$

b) Aplicando o valor de a) ao divisor de tensão

$$6 = (R_4 \cdot 12V) / (R_4 + 10k) \text{ ou } 6 \cdot (R_4 + 10k) = 12 \cdot R_4$$

$$6 \cdot R_4 + 60 = 12 \cdot R_4 \gggg 60 = 12 \cdot R_4 - 6R_4$$

$$R_4 = 60/6 = 10 \text{ k}$$

c) Como o ganho vale 2 para saturar $V_e \geq 6V$ resultará o gráfico da Figura 2.12.

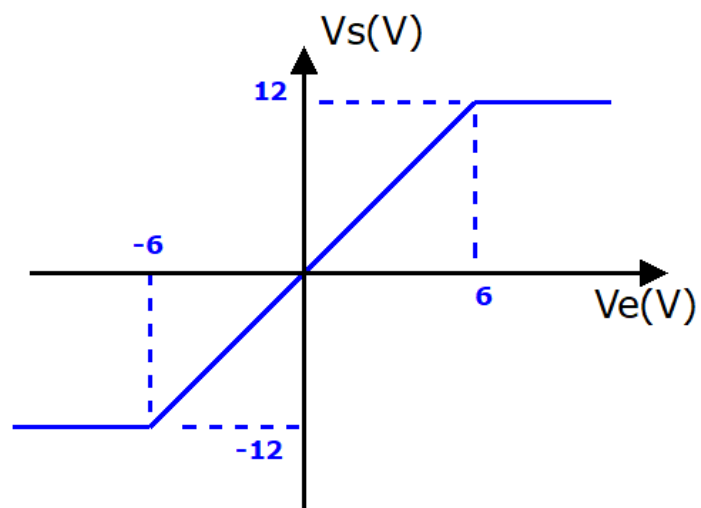


Figura 2.12 – Curva de transferência do circuito da Figura 2.11

2.3.1. Buffer

Um Buffer ou Seguidor de Tensão é um circuito derivado do Amplificador Não Inversor quando na Figura 2.10, R2 é zero e R1 é infinito, resultando o circuito da Figura 2.15.

Um Buffer ou seguidor de tensão tem três características:

- Altíssima impedância de entrada;
- Impedância de saída muito baixa e;
- Ganho unitário (portanto a tensão de saída é igual à de entrada).

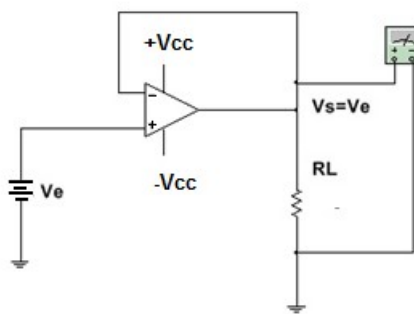


Figura 2.15 – Buffer ou Seguidor de Tensão

A principal aplicação dos Buffers é como elemento "casador" de impedância e como interface entre circuitos que consomem corrente e circuito que não dispõe de capacidade de corrente.

O Amplificador Não Inversor tem a expressão do ganho dada por:

$$A_{Vf} = \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Se R_2 é zero e R_1 infinito resulta o circuito da Figura 2.15 onde o ganho com realimentação vale:

$$A_{Vf} = \frac{V_s}{V_e} = 1$$

Isto é, $V_s = V_e$.

Aplicação

Considere o circuito da Figura 2.16. O circuito é um divisor de tensão, V_e (2 V) e R_s (10 k) podem representar a saída de um amplificador, onde R_s é a resistência de saída, e R_L é a carga. Qual o valor da tensão na carga de 1 k (R_L)?

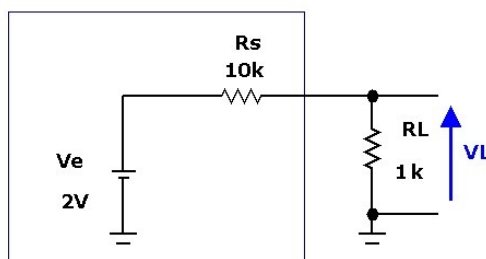


Figura 2.16 – Circuito para exemplificar de uso do Buffer

É um divisor de tensão logo:

$$V_L = \frac{1k \cdot 2V}{10k + 1k} = 0,182 V = 182 mV$$

Esse valor de tensão é baixo devido ao fato da resistência de saída (R_s) do amplificador ser muito maior do que o valor da carga (R_L). Para obter na carga o maior valor possível de tensão, entre a carga e a saída do amplificador deve ser inserido um Buffer que tem as características já citadas (impedância de entrada altíssima, impedância de saída baixíssima e ganho de tensão 1), Figura 2.17.

O resultado é que agora a tensão na carga (V_L) será praticamente igual à tensão da fonte de sinal, no exemplo 2 V. Lembrando que a corrente na carga é fornecida pelo AmOp Op nesse caso.

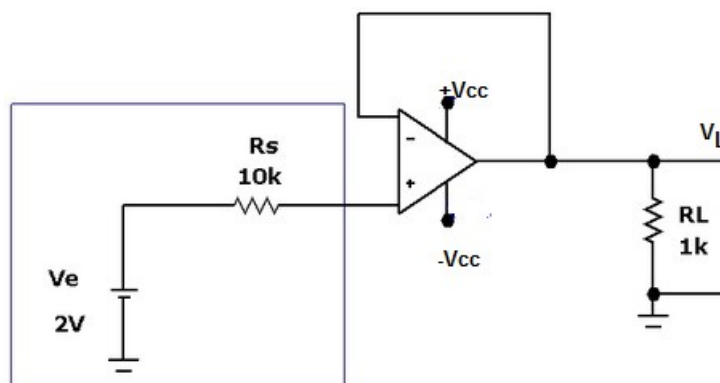


Figura 2.17 – Buffer inserido entre circuito com impedância de saída alta e carga de valor baixo

Arquivo Multisim Live - Buffer

https://www.multisim.com/content/UPd39kNFCMAZHhidYYYQbJ/circuito-para-exemplificar-buffer-2_17/open

Vídeo Comentado

https://youtu.be/K7_6hMd16H8

Conclusão: Colocando entre a carga, R_L , e a fonte, V_e , um Buffer a tensão na carga será praticamente igual a tensão da fonte e a corrente na carga é fornecida agora pelo Buffer, Figura 2.17.

2.4. Saída de potência

A máxima corrente de saída de um AO é baixa (no caso do 741 é aproximadamente 20 mA).

Quando a carga solicitar uma corrente maior, é necessário colocar entre a carga e o AO um reforçador de corrente que é em geral um transistor na configuração coletor comum (também chamado de Buffer discreto). A Figura 2.18 é um circuito não-inversor com saída de potência. Observar que a entrada deve ter sempre a polaridade indicada, portanto não permite entrada senoidal.

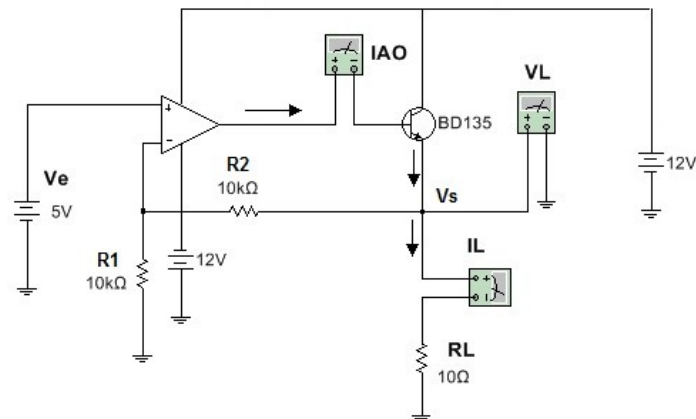


Figura 2.18 – Amplificador Não Inversor com saída de potência

Arquivo Multisim Live - Saída de potência em CC

<https://www.multisim.com/content/g9VDCv8YX3oNQQEaVZU2HV/amplificado-nao-inversor-com-saida-de-potencia-em-cc/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/dRaTChNJERg>

Quando a tensão de entrada, V_e , é alternada, por exemplo senoidal, é necessária uma saída do tipo classe B como na Figura 2.19. Nesse circuito, no semiciclo positivo do sinal de entrada, a saída é negativa e conduz o transistor Q2. No semiciclo negativo da entrada a saída será positiva, neste caso conduz o transistor Q1.

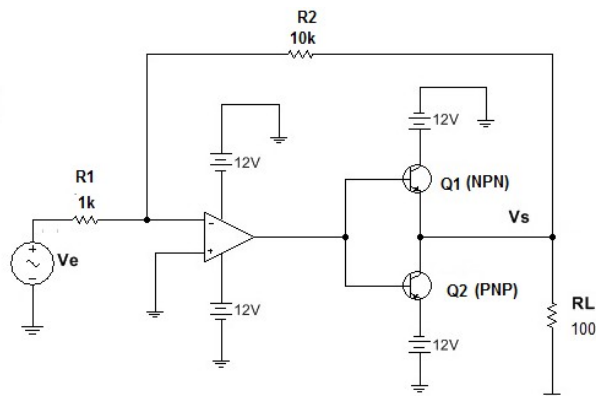


Figura 2.19 – Amplificador Inversor com saída de potência

Arquivo Multisim Live - Saída de potência em CA

<https://www.multisim.com/content/XJL7YZ4iSFpBg3CBygkyti/amplificador-inversor-com-saida-de-potencia-em-ca-1/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/iXKmAR0gGMo>

Exercícios Resolvidos

ExResol.6. No circuito da Figura 2.20 qual o valor de R para que $V_S=6$ V?

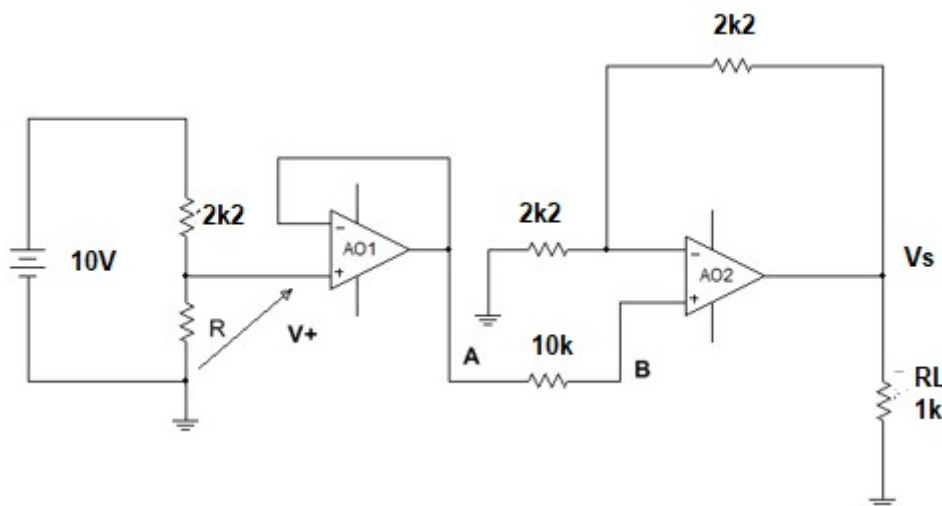


Figura 2.20 – Circuito para Ex. Resol.6.

Arquivo Multisim Live - ExResol.6.

<https://www.multisim.com/content/S8h6gKpEFQud6VhQqArMia/exresol6/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/sFQoLVGFVkg>

Solução:

A tensão no ponto A é igual à tensão no ponto B (a corrente através do 10 k é nula). Como o ganho do segundo AO vale 2, com $V_S = 6$ V a tensão na entrada (ponto B) será igual a:

$$V_B = 6V/2 = 3V.$$

O primeiro AO é um buffer, a sua tensão de saída (V_A) é igual tensão de entrada (V_+), portanto:

$$V_+ = R \cdot 10V / (R + 10k) = 3V \gg R = 943 \text{ Ohms}$$

ExResol.7. No circuito da Figura 2.21 pede-se calcular:

- a) Corrente na carga (IL)
- b) Corrente na saída do AO (IAO)
- c) Potência dissipada na carga.

Dado: $\beta = 125$

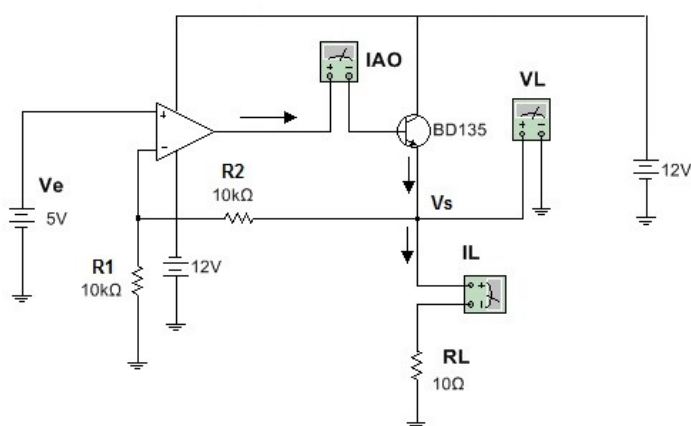


Figura 2.21 – Circuito para ExResol.15.

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/g9VDCv8YX3oNQQEaVZU2HV/amplificado-nao-inversor-com-saida-de-potencia-em-cc/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/dRaTChNJERg>

Solução:

a) Por causa do curto circuito virtual $V_{R1} = V_e = 5\text{ V}$ logo

$$I_{R1} = V_{R1}/R1 = 5\text{V}/10\text{ k} = 0,5\text{ mA} = I_{R2} \quad \text{logo} \quad V_{R2} = 10\text{k} \cdot 0,5\text{ mA} = 5\text{ V}$$

como $V_L = V_{R1} + V_{R2} = 5 + 5 = 10\text{ V}$ logo $I_L = 10\text{V}/10\text{ Ohms} = 1\text{ A}$.

b) $I_E = I_{R2} + I_L = 0,5 + 1000 = 1000,5\text{ mA} = I_C$

$$I_{AO} = I_B = I_C / \beta = 1000,5 \text{ mA} / 125 = 8 \text{ mA}$$

c) $P_{DRL} = V_L \cdot I_L = 10 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 10 \text{ W}$

A potência dissipada transistor é calculada por

$$P_{DTR} = V_{CE} \cdot I_C = (12 - 10) \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 2 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 2 \text{ W}.$$

ExResol.8. Calcule a potência dissipada na carga R_L no circuito considerando que a entrada é de 1Vpp. Observe que a entrada é senoidal e que a saída tem 2 transistores, um NPN (o de cima) e um PNP (o de baixo). É uma saída de potencia chamada classe B.

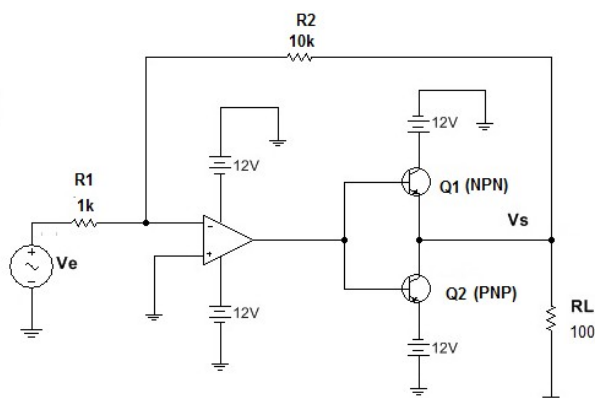


Figura 2.22 – Circuito para exercício ExResol.8

Arquivo Multisim Live – Saída de potencia em CA

<https://www.multisim.com/content/jDpv6GSvdG8i9WNx4xdUZT/amplificador-inversor-com-saida-de-potencia-em-ca-exresol8/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/iXKmAR0gGMo>

Solução:

No Semiciclo positivo conduz Q2 e Q1 corta, e considerando o valor de pico da entrada (0,5 V), a tensão na carga será

$$V_s = A_{Vf} \cdot V_e = (-10) \cdot 0,5 \text{ V} = -5 \text{ V}.$$

V_e : Semiciclo positivo

V_e : Semiciclo negativo

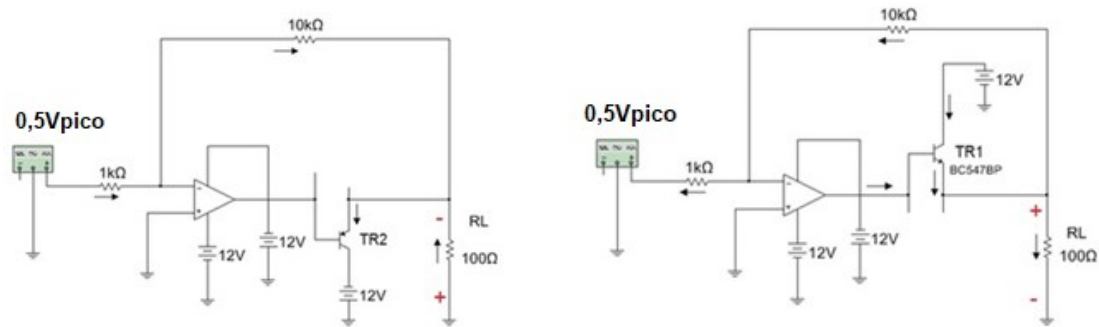


Figura 2.23 - Saída de potência em CA (a) entrada positiva (b) entrada negativa

A tensão de pico na carga é $V_P = 5\text{ V}$ como é uma tensão senoidal o seu valor eficaz é:

$$V_{RMS} = \frac{5V}{\sqrt{2}} = 3,52V$$

Portanto a potência dissipada na carga será:

$$P = \frac{(3,52)^2}{100} = 0,124W$$

A

2.5. Amplificador somador inversor

É um dos circuitos que justificam o nome de amplificador operacional. A Figura 2.24 é o circuito básico no qual todas as resistências são diferentes. O circuito é derivado do amplificador inversor já visto e a obtenção da expressão da tensão de saída em função das entradas é feita considerando que o ganho do AO em malha aberta é infinito (resultando $V_i=0$) e que a impedância de entrada é infinita (resultando $I_i=0$).

É importante notar que as tensões de entrada podem ser alternadas ou contínuas, e em qualquer instante o circuito soma e inverte todas as tensões de entrada.

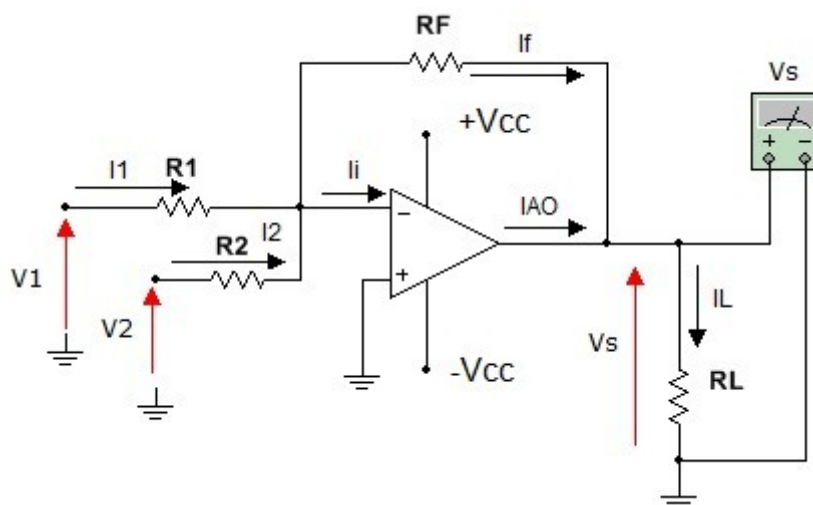


Figura 2.24 – Amplificador somador inversor – todas resistências iguais

A expressão da tensão de saída em função das entradas é dada por:

$$V_s = -R_F \cdot \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$

ExResol.9. Calcule a tensão de saída, V_s , no circuito da Figura 2.24 se $R_1=1k$, $R_2=2k$, $R_F=3k$, $V_1=2V$ e $V_2=-2V$.

Solução:

$$V_s = -3k \cdot \left(\frac{2V}{1k} + \frac{-2V}{2k} \right) = -3V$$

Arquivo Multisim – Amplificador somador – Resistências de entrada diferentes

<https://www.multisim.com/content/NQborFpqMcnfJswBE5mbcZ/amplificador-somador-inversor-exresol9/open>

Vídeo Comentado

<https://youtu.be/QxgPq00hkgg>

Caso as resistências de entrada, R_1 e R_2 , sejam iguais a R , resulta o circuito da Figura 2.25.

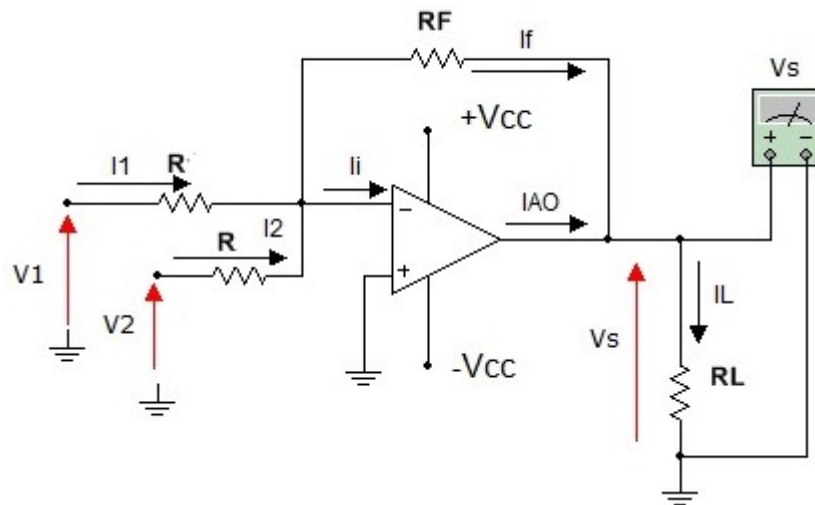


Figura 2.25 – Amplificador somador inversor - resistências de entradas iguais

$$V_s = \frac{-R_F}{R} \cdot (V_1 + V_2)$$

ExResol.10. Calcule a tensão de saída, V_s , no circuito da Figura 2.25 se $R_1=1k$, $R_2= 1k$, $R_F= 4k$, $V_1= 2V$ e $V_2 = -1V$.

Solução:

$$V_s = \frac{-4k}{1k} \cdot (2V - 1V) = -4V$$

Arquivo Multisim Live – Somador com resistências de entrada iguais
<https://www.multisim.com/content/Ham6cLVtWruYYPNbpioGU/amplificador-somador-inversor-exresol10/open>

Vídeo Comentado
<https://youtu.be/46omwS8JX1U>

Quando todas as resistências são iguais, Figura 2.26, a equação da saída em função das entradas é:

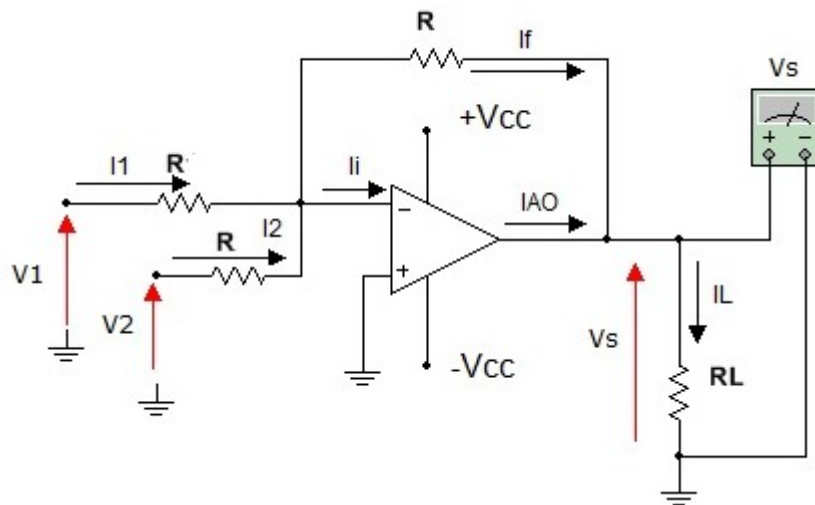


Figura 2.26 – Amplificador somador inversor – Todas as resistências iguais

$$V_s = -(V_1 + V_2)$$

A tensão de saída, V_s , é a soma das entradas invertida. Para obter o valor da soma basta adicionar em seguida um circuito com ganho -1.

ExResol.11. Calcule a tensão de saída, V_s , no circuito da Figura 2.26 se $R_1=1k$, $R_2= 1k$, $R_F= 1k$, $V_1= -2V$ e $V_2 = -1V$.

Solução:

$$V_s = -(-2V - 1V) = 3V$$

Arquivo Multisim Live - Resistencias de entrada e realimentação iguais
<https://www.multisim.com/content/EFKNnYckhoqpGw5mHWHjy/amplificador-somador-inversor-exresol11/open>

2.6. Amplificador somador não inversor

Neste caso as entradas são aplicadas na entrada não inversora, Figura 2.27.

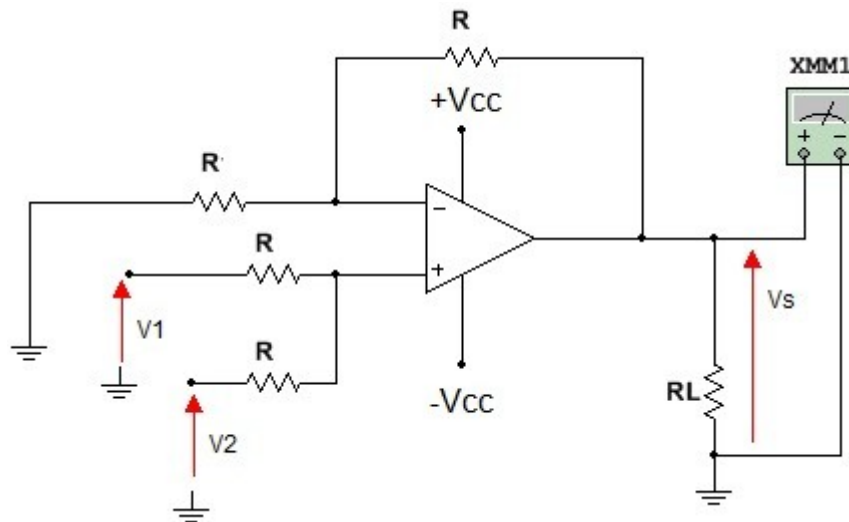


Figura 2.27 – Amplificador somador não inversor

A expressão da tensão de saída do circuito da Figura 2.27 é:

$$V_s = (V_1 + V_2)$$

ExResol.12. Calcule a tensão de saída, V_s , no circuito da Figura 2.27 se $R=1k$, $V_1= 2V$ e $V_2 = 3V$.

Solução:

$$V_s = (2V + 3V) = 5V$$

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/7SAdWKXYKY2kY32Gz88Qyv/amplificador-somador-nao-inversor-exresol12/open>

2.7. Amplificador diferencial – Amplificador Subtrator

É um circuito derivado do inversor e do não inversor, a Figura 2.28 mostra o circuito básico.

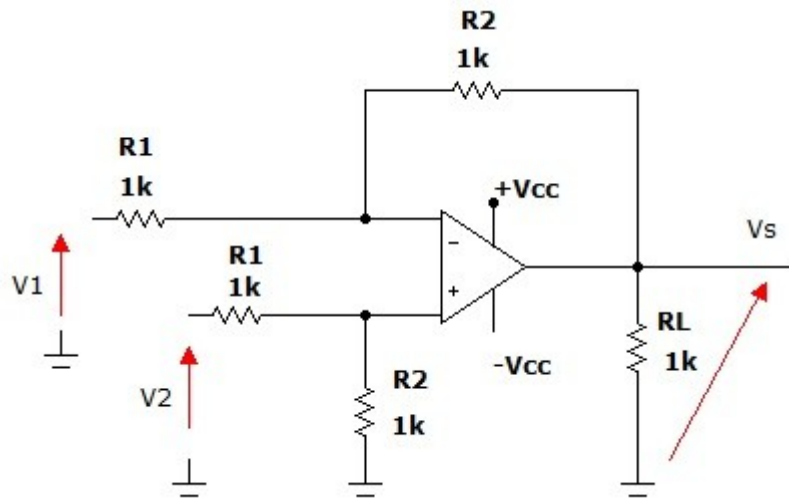


Figura 2.28 – Amplificador Diferencial

A expressão da saída é dada por:

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1)$$

$$A_d = \frac{R_2}{R_1} = \text{Ganho diferencial}$$

Se $R_2 = R_1 = R$ A tensão de saída vale:

$$V_s = V_2 - V_1$$

A tensão de saída é igual à diferença das duas tensões de entrada e, portanto, se $V_1 = V_2$ (modo comum) a saída será nula.

Obs: A dedução das expressões acima pode ser feita pelo teorema da superposição de efeitos.

Primeiro considere a entrada V_2 aterrada ($V_2 = 0$), em seguida determine a expressão da saída em função de V_1 . Chame de V_{s1} .

Em seguida considere $V_1 = 0$, e determine a expressão da saída em função de V_2 . Chame de V_{s2} . Para obter a expressão da saída em função de V_1 e V_2 basta somar V_{s1} com V_{s2} . Tente fazer.

Amplificador diferencial com entradas bufferizadas

Um grande inconveniente do amplificador diferencial da Figura 2.27 é a resistência de entrada que é relativamente baixa e a necessidade de casar (tornar iguais) as duas resistências R_1 e as duas resistências de valor R_2 . A solução para o primeiro problema é colocar dois buffers em cada uma das entradas, Figura 2.29.

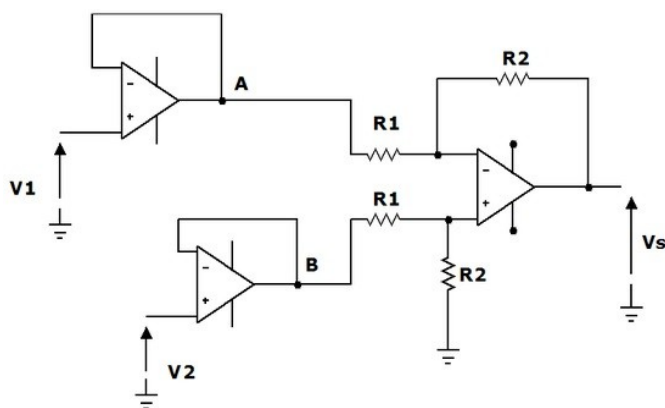


Figura 2.29 – Amplificador diferencial com entradas bufferizadas

Como a tensão no ponto A é igual a V_1 e a tensão no ponto B é igual a V_2 , então a tensão de saída, V_s é dada pela expressão:

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1)$$

Portanto a mesma expressão do circuito da Figura 2.28.

Uma aplicação para o circuito da Figura 2.29 é obter a informação de um sensor em uma ponte de Wheatstone sem que a ponte influencia o valor do ganho. Os dois buffers isolam o amplificador da ponte, desta forma as tensões podem ser calculadas como em um divisor de tensão em aberto.

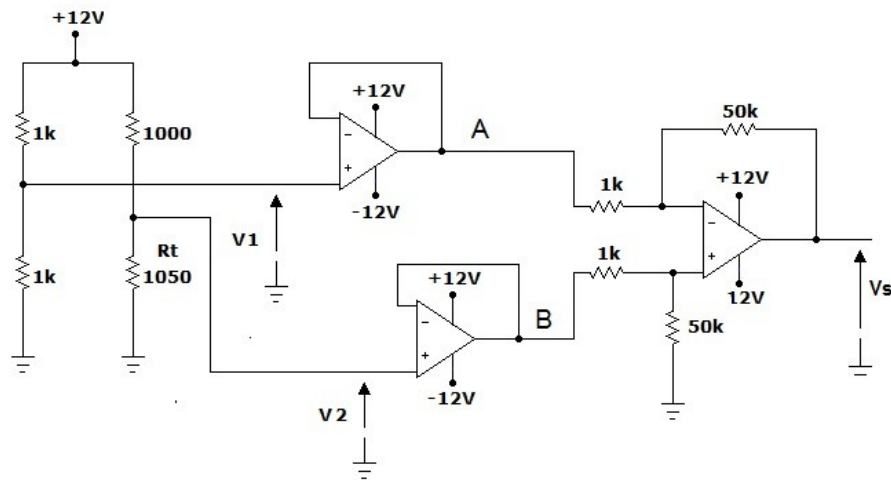


Figura 2.30 – Amplificador diferencial com entradas bufferizadas – exemplo de aplicação

Arquivo Multisim Live - A.D com AmOp entradas com Buffer

https://www.multisim.com/content/eA9xVNSBnaF5FBXsSfczHZ/exercicio-da-figura2_30_exemplo/
open

Considerando os valores do circuito da Figura 2.30:

$$V_1 = \frac{1k}{1k+10k} \cdot 12V = 6V = V_A$$

A tensão de entrada V_2 vale:

$$V_2 = \frac{1,05k}{1k+1,05k} \cdot 12V = 6,146V = V_B$$

Como o ganho do amplificador diferencial vale 50 o valor da tensão na saída será igual a:

$$V_s = 50 \cdot (V_2 - V_1) = 50 \cdot (6,146 - 6) = 7,3V$$

Essa resistência (R_t) pode ser um sensor de temperatura cuja resistência varia com a temperatura. Cada valor de temperatura está associado um valor de resistência e,

portanto, uma tensão. Um voltímetro analógico na saída pode ser calibrado para medir temperatura ou esses valores podem ir para um conversor A/D que pode estar ligado a um microcontrolador.

O problema de ter-se resistências iguais é resolvido com resistências de precisão ($<0,1\%$) e a questão de variar o ganho com uma única resistência variável é através de um circuito chamado **amplificador operacional de instrumentação**. É um CI dedicado e usado especificamente para essa finalidade.

ExResol.13. No circuito da Figura 2.31 determinar V_s para cada valor de V_1 e V_2 da tabela.

V1(V)	2	-2	2	-2
V2(V)	2	-2	-2	2
Vs(V) Calculado				
Vs(V) Medido				

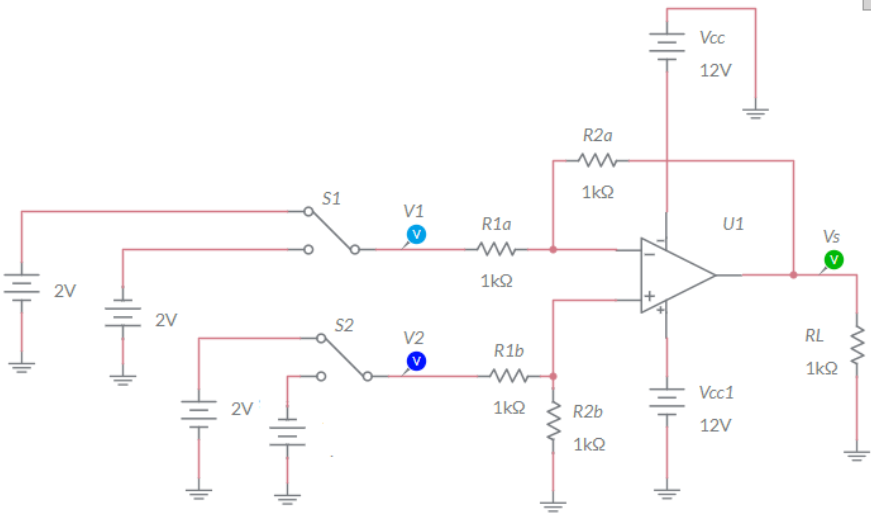


Figura 2.31 – Circuito para exercício **ExResol.13**

Arquivo Multisim Live - AmOp como subtrator

<https://www.multisim.com/content/kf4eyhLkRZCvEKZ2NHsCkx/amplificadordiferencial-exresol13/open>

Solução:

A expressão da tensão de saída, V_s , em função das entradas no circuito da Figura 2.31 é:

$$V_s = V_2 - V_1$$

Com $V_1 = 2 \text{ V}$ e $V_2 = 2 \text{ V}$ \ggggggg $V_s = 2\text{V} - 2\text{V} = 0 \text{ V}$

Com $V_1 = -2 \text{ V}$ e $V_2 = -2 \text{ V}$ \ggggggg $V_s = -2\text{V} - (-2\text{V}) = 0 \text{ V}$

Com $V_1 = 2 \text{ V}$ e $V_2 = -2 \text{ V}$ \ggggggg $V_s = -2\text{V} - (2\text{V}) = -4 \text{ V}$

Com $V_1 = -2 \text{ V}$ e $V_2 = 2 \text{ V}$ \ggggggg $V_s = 2\text{V} - (-2\text{V}) = 4 \text{ V}$

2.8. Amplificador Diferencial de Instrumentação

Uma das restrições do amplificador diferencial estudado anteriormente é o fato da sua impedância de entrada não ser muito alta, e mais ainda, os valores são diferentes para as duas entradas sendo função de R_1 e R_2 , não sendo adequado para muitas aplicações, como em instrumentação. Além disso o circuito tem um inconveniente muito grave: **para variar o ganho é preciso variar o valor de duas resistências iguais (R_2 ou R_1).**

No circuito da Figura 2.32 o último circuito (AO3) é um amplificador diferencial tradicional de ganho diferencial igual a 1, logo $V_s = V_s'$. O primeiro circuito (AO1 e AO2) além de apresentar uma altíssima impedância de entrada permite variar o ganho através de uma única resistência (R_G).

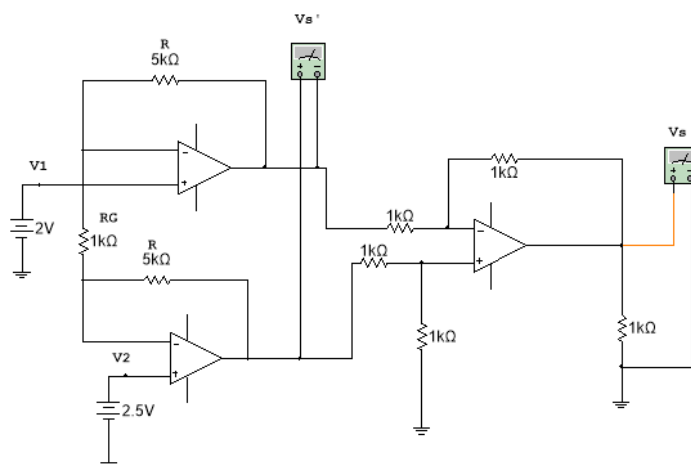


Figura 2.32 – Amplificador diferencial de instrumentação "discreto"

Arquivo Multisim Live – Amplificador de Instrumentação

https://www.multisim.com/content/UqTpRdAoHMmMJVe6jDteaR/cursoao-figura2_32-adi/open

A expressão da tensão de saída, V_s , no circuito da Figura 2,32 é dada por:

$$V'_s = V_s = \left(1 + \frac{2 \cdot R}{R_G}\right) \cdot (V_2 - V_1)$$

Obs: A dedução dessa expressão pode ser feita usando o Teorema da Superposição de Efeito.

Na prática não há necessidade de construir um amplificador de instrumentação com 3 AO's, pois o mesmo já se encontra integrado com os três AOs em um mesmo encapsulamento. A Figura 2.33 mostra um exemplo deste amplificador, o ADC620, da Analog Devices, que permite variar o ganho através de um resistor externo R_G entre os pinos 1 e 8. Como o amplificador vem perfeitamente balanceado de fábrica, não existe necessidade de fazer o ajuste de *offset*. A entrada inversora, $-IN$ (V_1), é no pino 2, a não inversora, $+IN$ (V_2), no pino 3. A alimentação positiva, V_s ($+V_{CC}$) no pino 7 e a negativa $-V_s$ ($-V_{CC}$) pino 4. A saída,

OUTPUT (V_s) é no pino 6. O pino 5, REF, permite aplicar uma tensão CC que desloca a saída para valores positivos ou negativos. Pode ser usado para eventualmente corrigir *offset* (saída diferente de zero quando as entradas são iguais), normalmente é aterrada.

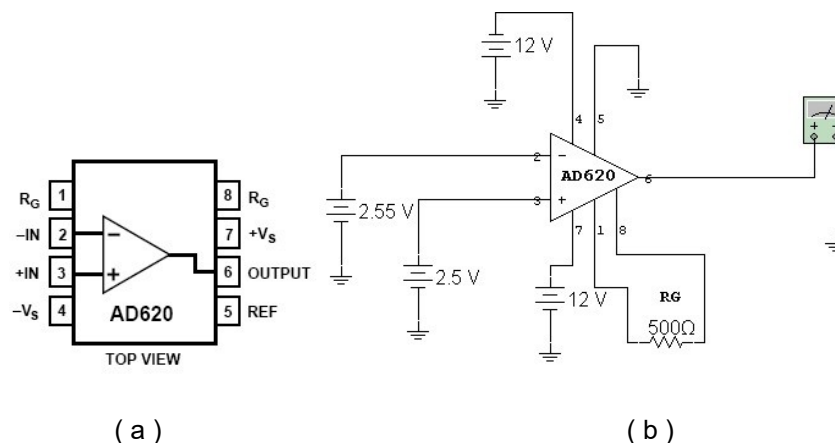


Figura 2.33 – Exemplo de amplificador diferencial de instrumentação integrado AD620 (a) Pinagem (b) Circuito de aplicação

2.9. Circuito integrador

No circuito da Figura 2.34 a tensão de saída, V_s , é proporcional à integral da tensão de entrada, V_e .

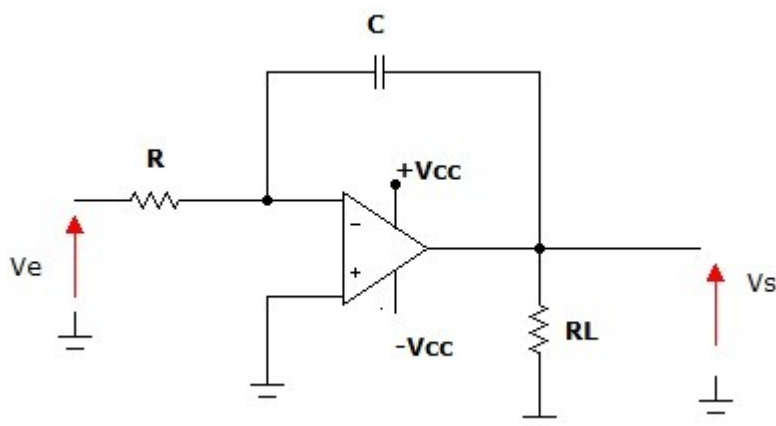


Figura 2.34 – Circuito integrador

A expressão da tensão na saída, V_s , do circuito é dada por:

$$V_s = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int V_e$$

Obs: O símbolo \int □

Representa o operador matemático chamado integral.

Se você não conhece o que é integral, procure entender que o circuito tem como finalidade provocar modificações em uma forma de onda (Por exemplo converter uma onda quadrada em onda triangular).

Na prática o circuito da Figura 2.34 é afetado pela tensão de *offset* de entrada (V_{io}) fazendo o AO saturar com $+V_{CC}$ ou $-V_{CC}$, isto porque em CC não existindo realimentação negativa (o capacitor é circuito aberto em CC) o ganho será muito alto (por exemplo 10^5) fazendo o AO saturar com tensões de entrada tão baixas como 2 mV (V_{io}).

A solução é colocar um resistor, R_P , em paralelo com C, desta forma limitando o ganho a R_P/R em CC, Figura 2.35. Porém o circuito só será integrador para frequências muito acima da frequência de corte.

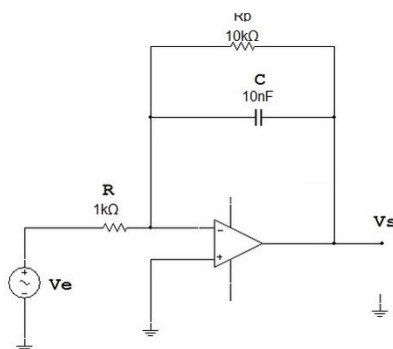


Figura 2.35 – Circuito prático de um integrador com AO

Arquivo Multisim Live - Integrador

https://www.multisim.com/content/35oaZDpwzhmC6n7i42kaXc/cursoaofigura2_35/open

O circuito, porém, só será integrador para frequência muito acima da frequência de corte do circuito a qual é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_p C}$$

Onde C é a capacitância em Farads (F)

R_p é a resistência em Ohms (Ω)

f_c a frequência de corte em Hertz (Hz)

Dizer que o circuito só se comporta como integrador para frequências muito acima da frequência de corte significa dizer que $X_c \ll R_p$ isto é, nessas condições X_c em paralelo com R_p resulta aproximadamente X_c , o equivalente é capacitivo com características próximas ao circuito da Figura 2.34.

Na Figura 2.35 a frequência de corte vale $f_c = 1,59$ kHz. A Figura 2.36 mostra as formas de onda de entrada (V_e) e saída (V_s) para uma onda quadrada de entrada de $0,5V_{pico}$ e frequência de 15 kHz.

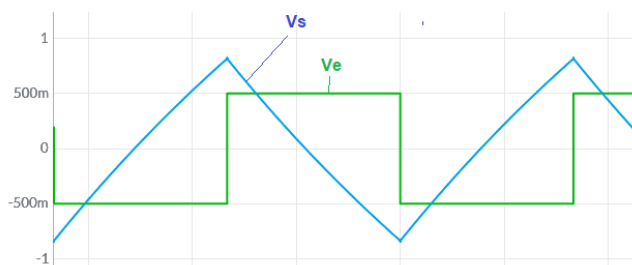


Figura 2.36 – Formas de onda de entrada (V_e) e saída (V_s) do circuito da Figura 2.35 para entrada quadrada de frequência 15 kHz

https://www.multisim.com/content/35oaZDpwzhmC6n7i42kaXc/cursoaofigura2_35/open

A Figura 2.37 mostra as formas de onda de entrada e saída em 15 kHz para uma entrada senoidal. Observe que a saída é cossenoidal que é a integral do seno.

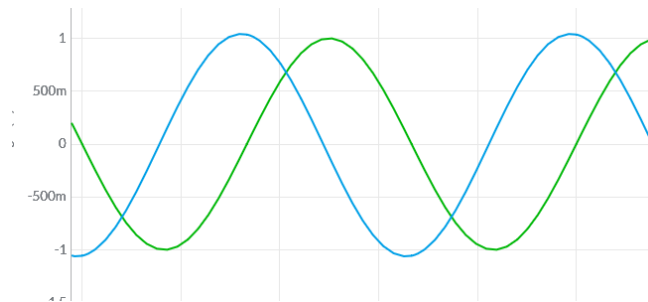


Figura 2.37 – Formas de onda de entrada (Ve) e saída (Vs) do circuito da Figura 2.35 para entrada senoidal de frequência 15 kHz

Arquivo Multisim Live - Integrador

https://www.multisim.com/content/35oaZDpwzhmC6n7i42kaXc/cursoaofigura2_35/open

2.10. Diferenciador

No circuito da Figura 2.38 a tensão de saída, Vs, é proporcional à derivada da tensão de entrada, Ve.

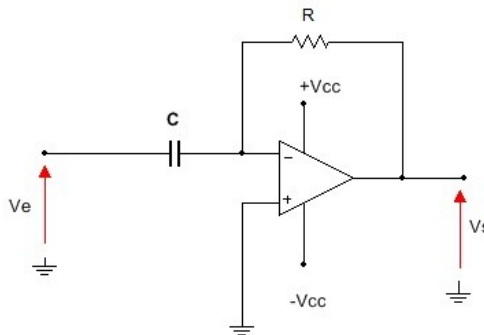


Figura 2.38 – Circuito diferenciador

A expressão da tensão na saída do circuito é dada por:

$$V_s = -R.C. \frac{dV_e}{dt}$$

OBS: Se você não conhece o que é derivada, procure compreender que, o circuito tem como finalidade provocar modificações em uma forma de onda, por exemplo, converter uma onda triangular em onda quadrada).

Na prática o circuito da Figura 2.38 é afetado por sinais de alta frequência, principalmente devido à ruídos, provocando picos de saturação (não esqueça que $X_C = 1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$).

A solução é limitar o ganho nas altas frequências colocando em série com C um resistor R_S . Este resistor introduz uma frequência de corte ($f_c = 1/2 \cdot \pi \cdot R_S \cdot C$) e desta forma o circuito só funcionará como diferenciador para frequências muito abaixo desta frequência. A Figura 2.39 mostra o circuito e a curva de resposta em frequência.

Se $f \ll f_c$ ($f \ll 1/2 \cdot \pi \cdot R_S \cdot C$) significará que $R_S \ll X_C$ e desta forma $R_S + X_C$ é aproximadamente X_C , portanto o circuito da Figura 2.39 tem praticamente o mesmo comportamento do circuito da Figura 2.38.

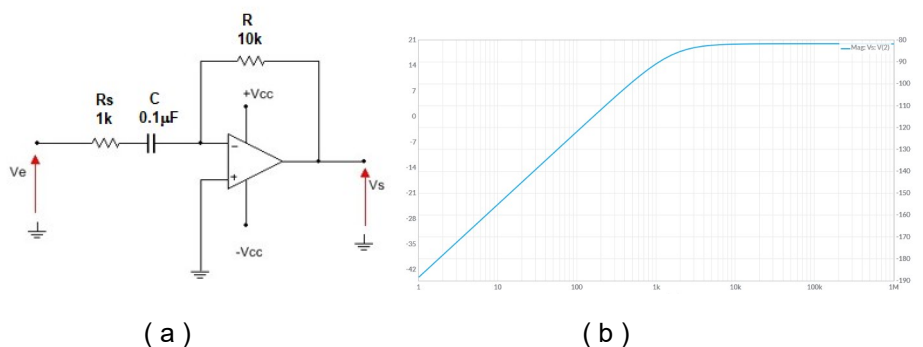


Figura 2.39 – Circuito diferenciador prático (a) circuito (b) Curva de resposta em frequência

https://www.multisim.com/content/jMHDHXJb4Hhe47EMh5DAU2/cursoaodiferenciadorfigura2_39/open

<https://www.multisim.com/content/XCZQVkJG2WAmYbxhGm9G8MH/cursoaodiferenciadorresposta-em-frequencia/open>

Observe que o circuito é basicamente um filtro passa altas. Como o ganho no patamar é maior do que 1 o filtro é chamado de **Filtro Ativo**. O

circuito pode se comportar como um amplificador inversor de ganho - R/R_s se a frequência de operação for maior que a frequência de corte que calculada por:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_s \cdot C}$$

Onde

R_p resistência em Ohms (Ω)

C capacitância em Farads (F)

f_c frequência de corte em Hertz (Hz)

Com os valores da Figura 2.39 a frequência de corte valerá:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1k \cdot 0,1 \mu F} = 1592 \text{ Hz}$$

Diferenciador - A entrada é onda quadrada

Se a entrada é uma onda quadrada de frequência muito menor que a frequência de corte (1,6 kHz) a tensão na saída serão pulsos positivos na descida da onda quadrada e pulsos negativos na subida. Não esquecer que o circuito é inversor, Figura 2.40.

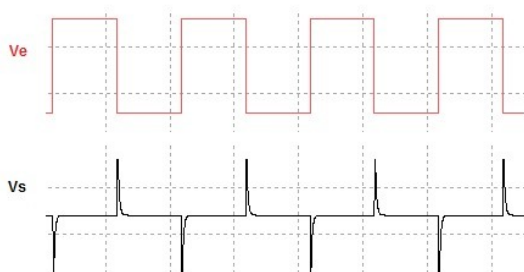


Figura 2.40 – Formas de onda de entrada, V_e , e saída, V_s , de um circuito diferenciador, quando a entrada é quadrada

https://www.multisim.com/content/jMHDHXJb4Hhe47EMh5DAU2/cursoaodiferenciadorfigura2_39/open

Diferenciador - A entrada é uma onda triangular

Se a entrada for uma onda triangular a saída é constante e nega durante a rampa de subida e positiva durante a descida, Figura 2.41. Não esquecer a derivada de $y=5.x$ é 5!

Como a entrada é uma rampa de inclinação constante, a derivada é uma constante e de valor negativo quando a inclinação é positiva (não esqueça que o circuito é inversor), e saída é positiva quando a entrada tem inclinação negativa, Figura 2.41.

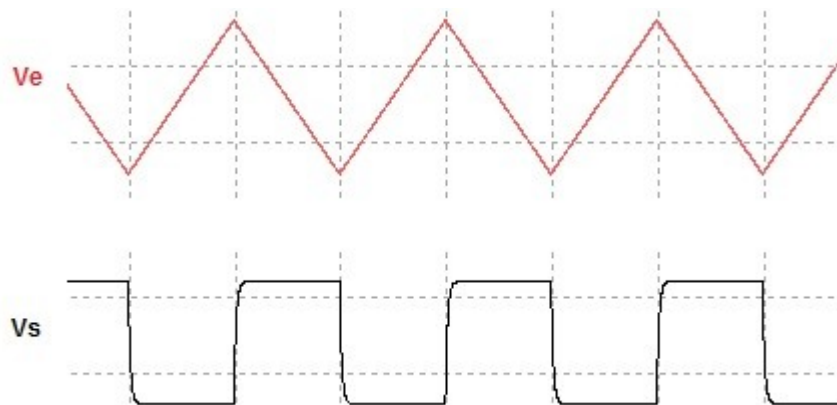


Figura 2.41 – Diferenciador com entrada triangular e de frequência adequada ($f \ll f_c$)

Arquivo Multisim Live - Diferenciador

https://www.multisim.com/content/8fZbZV4eq5Hysq7fEqcaAY/corsoaodiferenciadorfigura2_41/open/

Exercícios Propostos

- 1) Determinar o valor da tensão de saída em cada caso

