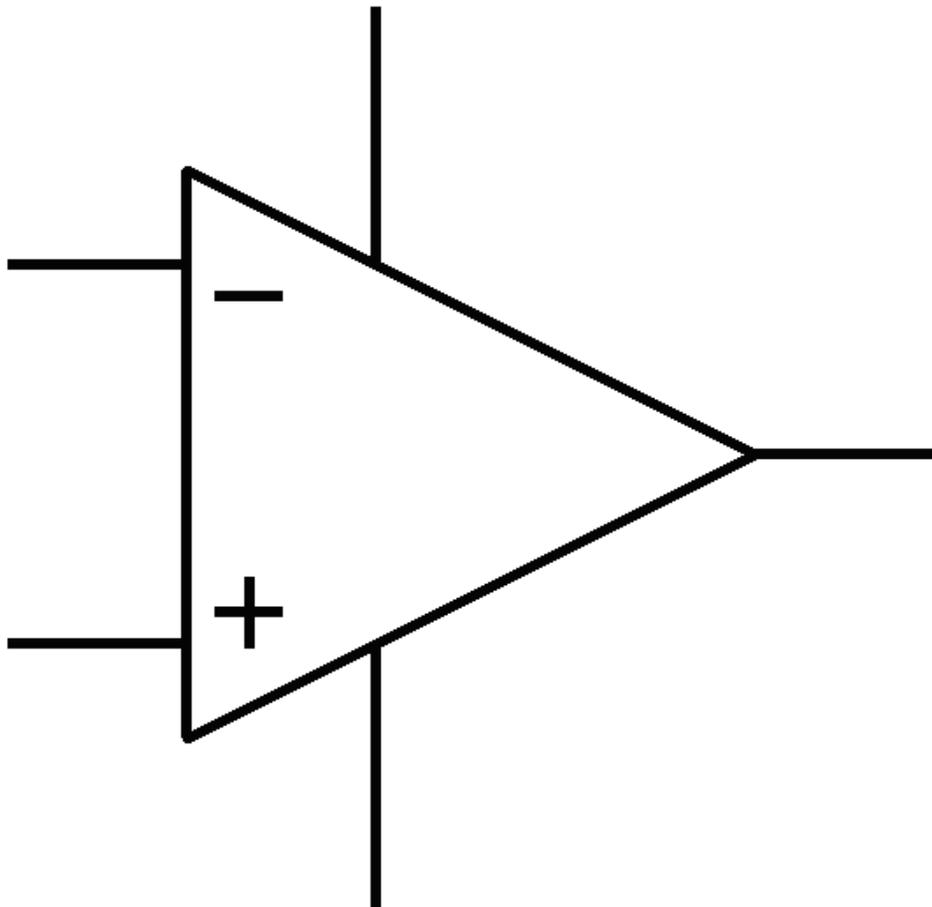


Amplificadores Operacionais



Índice

Introdução.....	4
1 – Conceitos Fundamentais.....	4
1.1 – Definição.....	4
1.2 – Simbologia.....	4
1.3 – Descrição Básica de um AOP.....	5
1.3.1 – Modo de funcionamento básico.....	5
1.4 – Conceito de Amplificador Diferencial.....	6
1.5 – Tensão de <i>Offset</i>	6
1.6 – Ganho de Tensão de um Amplificador.....	7
1.7 – Características de um Amplificador Operacional.....	8
1.7.1 – Impedância de Entrada e Saída.....	8
1.7.2 – Ganho de Tensão.....	10
1.7.3 – Resposta de Frequência (BW).....	10
1.7.4 – Sensibilidade à Temperatura (DRIFT).....	10
1.8 – Modos de Operação.....	10
1.8.1 – Sem Realimentação.....	10
1.8.2 – Realimentação Positiva.....	11
1.8.3 – Realimentação Negativa.....	11
1.9 – Alimentação do AOP.....	12
1.10 – Exercícios de Fixação.....	12
2 – Comparadores de Tensão.....	13
2.1 – Comparador Não-Inversor com V_R Nula.....	13
2.2 – Comparador Inversor com V_R Nula.....	14
2.3 – Comparador Não-Inversor com $V_R > 0$	15
2.4 – Comparador Inversor com $V_R > 0$	16
2.5 – Exercícios de Fixação.....	17
3 – Circuitos Básicos com AOP.....	19
3.1 – Amplificador Inversor.....	19
3.2 – Amplificador Não-Inversor.....	19
3.3 – Seguidor Unitário.....	20
3.4 – Amplificador Somador.....	21
3.5 – Amplificador Somador Não-Inversor.....	22
3.6 – Amplificador Diferencial ou Subtrator.....	23
3.7 – Diferenciador.....	23

3.8 – Integrador	24
3.9 – Ajuste de <i>Offset</i> (Considerações Práticas)	24
3.9.1 – Terminais Específicos	24
3.9.2 – Resistor de Equalização (Balanceamento Externo)	25
3.10 – Amplificador de CA com AOP	26
3.11 – Exercícios de Fixação	27
4 - Proteção em Circuitos com AOP	29
4.1 – Proteção das Entradas de Sinal	29
4.2 – Proteção de Saída	30
4.3 – Proteção nas Entradas de Alimentação	30
4.4 – Proteção contra Ruídos	30
5 – Análises Práticas de Falhas	31
6 – Experiências de Laboratório	33
6.1 – Experiência 1: Realimentação Negativa	33
6.2 – Experiência 2: Ajuste de <i>Offset</i>	35
6.3 – Experiência 3: Amplificador Somador	37
6.4 – Experiência 4: Amplificador Subtrator	39
7 – Problemas Analíticos	41
Bibliografia	44

Introdução

É muito difícil enumerar a totalidade das aplicações desse fantástico componente denominado Amplificador Operacional. De modo geral, podemos dizer que suas aplicações estão presentes nos sistemas eletrônicos de controle industrial, na instrumentação industrial, na instrumentação médica (eletromedicina ou bioeletrônica), nos equipamentos de telecomunicações, nos equipamentos de áudio, nos sistemas de aquisição de dados, etc.

Apresentamos um conteúdo básico para o conhecimento e utilização de Amplificadores Operacionais.

1 – Conceitos Fundamentais

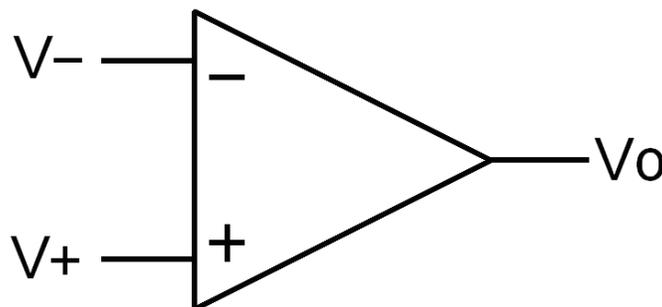
1.1 – Definição

O Amplificador Operacional (AOP) é um amplificador multiestágio com entrada diferencial cujas características se aproximam das de um amplificador ideal.

As características ideais de um AOP são:

- a) Impedância de entrada infinita;
- b) Impedância de saída nula;
- c) Ganho de tensão infinito;
- d) Resposta de frequência infinita;
- e) Insensibilidade à temperatura.

1.2 – Simbologia



- V_- – entrada inversora;
- V_+ – entrada não-inversora;
- V_o – saída.

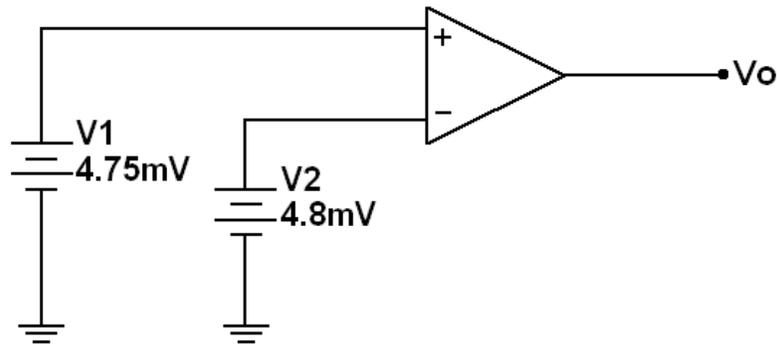
1.3 – Descrição Básica de um AOP

O AOP possui duas entradas e uma saída, que possui um valor múltiplo da diferença entre as duas entradas. O fator A é o ganho de tensão do Amplificador Operacional, ou seja, a relação entre a tensão de entrada diferencial e a de saída do dispositivo:

$$V_o = A \cdot [(V_+) - (V_-)]$$

1.3.1 – Modo de funcionamento básico

Consideremos o circuito abaixo:



Supondo que o ganho A seja de 100.000, obtemos a tensão de saída V_o :

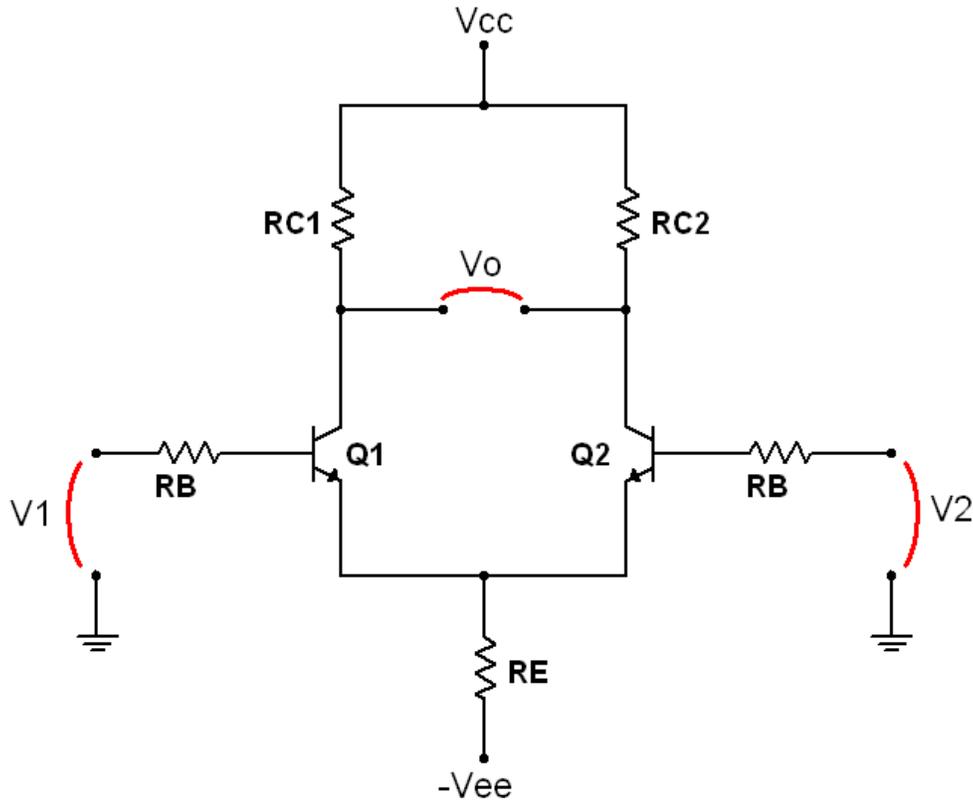
$$V_o = 100000 \cdot (4,75 \cdot 10^{-3} - 4,8 \cdot 10^{-3})$$

$$\therefore V_o = -5V$$

Por definição sempre o fator A será positivo e sempre que $V_1 - V_2$ for menor que zero a tensão de saída será negativa ou vice versa.

1.4 – Conceito de Amplificador Diferencial

Na figura abaixo, temos o circuito de um amplificador diferencial elementar:



Supondo idealmente o circuito simétrico, os transistores Q1 e Q2 idênticos, podemos observar que a tensão de saída V_o será diretamente proporcional à diferença entre as tensões de entrada V_1 e V_2 , o que faz com que a tensão de saída seja zero quando $V_1=V_2$.

1.5 – Tensão de *Offset*

Idealmente, a tensão de saída do amplificador diferencial da figura anterior deveria ser nula quando $V_1=V_2=0$. Todavia, devido às diferenças existentes nas características de Q1 e Q2, tem-se um desbalanceamento das correntes no circuito e, conseqüentemente:

$$V_{BE1} \neq V_{BE2}$$

A diferença, em módulo, entre esses valores de V_{BE} é denominada “Tensão de *Offset* de Entrada”, e será representada por $V_i(\text{offset})$:

$$V_i(\text{offset}) = \left| V_{BE1} - V_{BE2} \right|$$

Essa tensão de *offset* de entrada age como um sinal diferencial aplicado nas entradas do AOP e produz uma tensão diferencial na saída (proporcional ao ganho A) do mesmo. Essa tensão de saída é denominada “Tensão de *Offset* de Saída” (ou tensão de erro de saída) e será representada por $V_o(\text{offset})$.

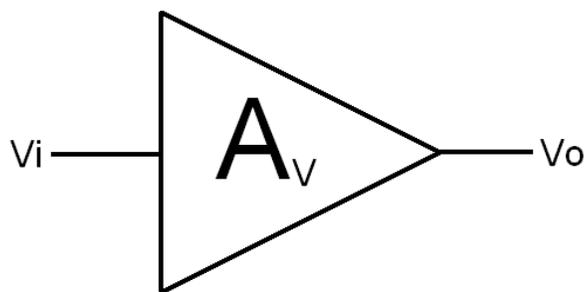
Em circuitos de alta precisão, é necessário minimizar ou eliminar essa tensão de erro na saída do dispositivo.

No caso de um AOP, o cancelamento ou balanceamento dessa tensão de erro é obtido através de um divisor de tensão conectado ao estágio diferencial de entrada. Esse divisor de tensão irá permitir o balanceamento das correntes de base e de coletor, de tal forma que a diferença entre os valores de V_{BE1} e V_{BE2} se anule. Esse ajuste deve ser feito com as entradas inversora e não-inversora conectadas ao terra. Após o balanceamento, pode-se proceder a montagem do circuito desejado, tomando-se cuidado para não alterar o ajuste efetuado.

Alguns AOP possuem os terminais próprios para o ajuste da tensão de *offset* de saída. Entretanto, existem outros que não possuem esses terminais e o usuário deverá montar um circuito externo convenientemente conectado às entradas do AOP para executar o ajuste. O procedimento para a execução do ajuste será abordado posteriormente.

1.6 – Ganho de Tensão de um Amplificador

Na figura abaixo, temos o símbolo de um amplificador genérico:



Sendo:

- V_i – sinal de entrada;
- V_o – sinal de saída;
- A_v – ganho de tensão.

Conceitua-se ganho de tensão, o fator pelo qual a tensão de entrada é multiplicada resultando a saída do dispositivo.

Assim, podemos escrever:

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} \qquad A_V (dB) = 20 \log \frac{V_o}{V_i}$$

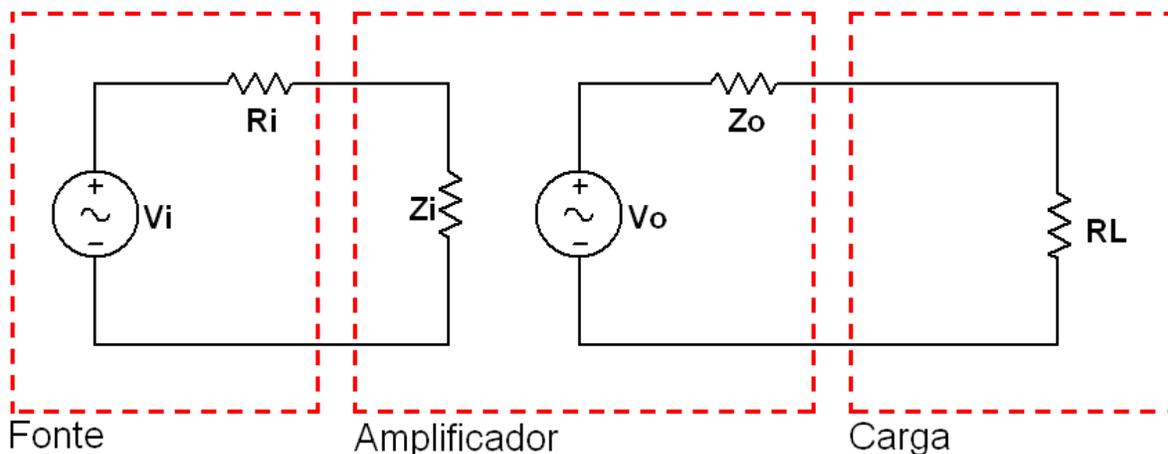
A importância da utilização do ganho de tensão em decibéis (dB) justifica-se quando são utilizados grandes valores para A_V .

1.7 – Características de um Amplificador Operacional

Discutiremos sobre as características ideais que qualquer amplificador deveria ter. Os AOP reais tentam se aproximar dessas características ideais.

1.7.1 – Impedância de Entrada e Saída

Consideremos o circuito abaixo representa o modelo de uma fonte alimentando um amplificador, e este, alimentando uma carga:



Sendo:

- V_i – gerador;
- R_i – resistência interna do gerador;
- Z_i – impedância de entrada do amplificador;

- V_o – gerador do sinal amplificado ($A \cdot V_{Zi}$);
- Z_o – impedância de saída do amplificador;
- R_L – carga.

Observando o modelo anterior, podemos determinar que a tensão de entrada no amplificador (V_{Zi}) é determinada por:

$$V_{Zi} = \left(\frac{Z_i}{R_i + Z_i} \right) V_i$$

Ou seja, quanto maior for o valor da impedância de entrada (Z_i) do amplificador, maior será o *percentual* de tensão do gerador na entrada no amplificador, portanto podemos concluir que:

$$Z_i \rightarrow \infty \Rightarrow V_{Zi} \rightarrow V_i$$

Já em relação à impedância de saída (Z_o), a partir da equação da malha de saída do amplificador, podemos concluir que:

$$V_{RL} = V_o - i_L \cdot Z_o$$

Portanto, para se obter todo sinal de saída sobre a carga, é necessário que a impedância de saída do amplificador seja muito baixa, ou seja:

$$Z_o \rightarrow 0 \Rightarrow V_{RL} \rightarrow V_o$$

Observação: Nos manuais de fabricantes são fornecidos os valores das resistências (impedâncias) de entrada e saída do AOP, as quais representaremos, respectivamente, por R_i e R_o .

1.7.2 – Ganho de Tensão

Para que a amplificação seja viável, inclusive para sinais de baixa amplitude, como sensores, é necessário que o amplificador possua um alto ganho de tensão. Idealmente esse ganho seria infinito.

Nos manuais dos fabricantes encontra-se o valor do ganho de tensão dos AOP, o qual representaremos por A_V . Para o AOP 741 o valor típico de A_V é de 200.000, porém existem AOP com A_V da ordem de 10^7 ou mais.

1.7.3 – Resposta de Frequência (BW)

É necessário que um amplificador tenha uma largura de faixa muito ampla, de modo que um sinal de qualquer frequência possa ser amplificado sem sofrer corte ou atenuação. Idealmente BW deveria se estender desde zero a infinitos hertz.

Nos manuais dos fabricantes encontra-se o valor de largura de faixa máxima do AOP, geralmente de maneira gráfica, a qual representamos genericamente por BW (*bandwidth*).

1.7.4 – Sensibilidade à Temperatura (DRIFT)

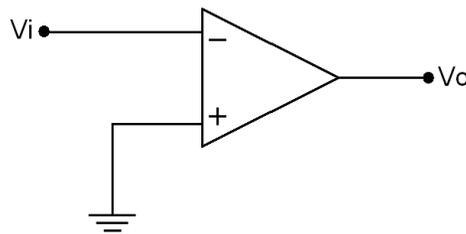
As variações térmicas podem provocar alterações acentuadas nas características elétricas de um amplificador. A esse fenômeno chamamos DRIFT. Seria ideal que um AOP não apresentasse sensibilidade às variações de temperatura.

Nos manuais de fabricantes encontram-se os valores das variações de corrente e tensão no AOP, provocadas pelo aumento de temperatura. A variação da corrente é representada por $\Delta I/\Delta T$ e seu valor é fornecido em nA/°C. A variação da tensão é representada por $\Delta V/\Delta T$ e seu valor é fornecido em $\mu V/°C$.

1.8 – Modos de Operação

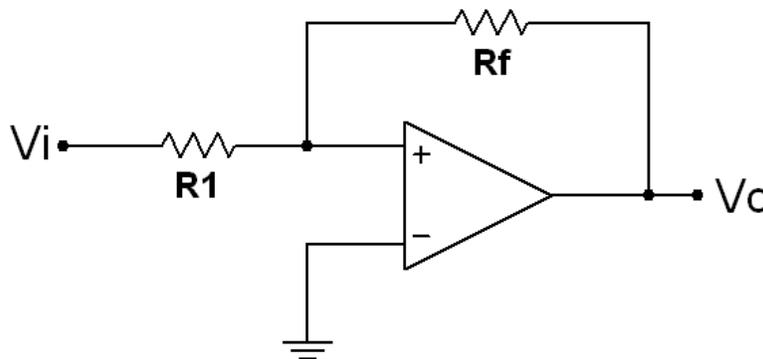
1.8.1 – Sem Realimentação

Este modo é também denominado operação em malha aberta e o ganho do AOP é estipulado pelo próprio fabricante, ou seja, não se tem controle sobre o mesmo. Esse tipo de operação é muito útil quando se utiliza circuitos comparadores. Na figura abaixo temos um AOP em malha aberta. Este circuito é um comparador e será estudado posteriormente:



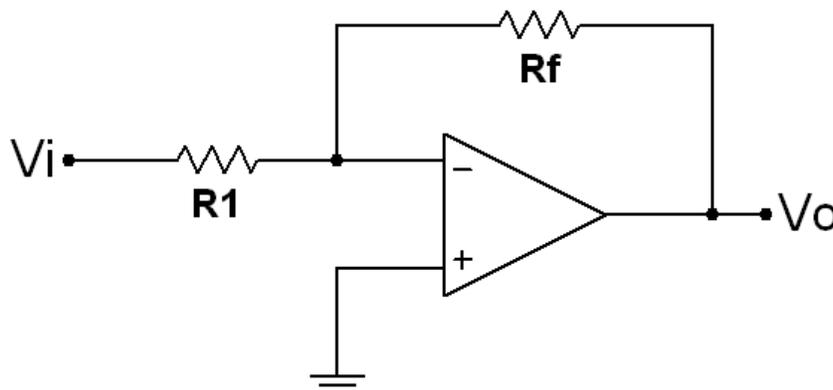
1.8.2 – Realimentação Positiva

Esse tipo de operação é denominada operação em malha fechada. Apresenta como inconveniente o fato de conduzir o circuito à instabilidade. Uma aplicação prática da realimentação positiva está nos circuitos oscilados. A figura abaixo mostra um AOP submetido à realimentação positiva:



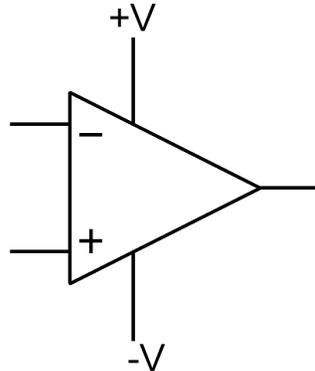
1.8.3 – Realimentação Negativa

Esse modo de operação é o mais importante em circuitos com AOP, também é um modo de operação em malha fechada, porém com resposta linear e ganho controlado. Na figura abaixo temos um AOP operando com realimentação negativa.



1.9 – Alimentação do AOP

Os AOP são comumente representados pela simbologia abaixo, onde são representados seus terminais de alimentação, denominados $+V$ e $-V$:



Esses valores representam o máximo de tensão (positiva ou negativa) que o dispositivo poderá fornecer.

Num primeiro momento, idealmente, fixemos que esses são os potenciais extremos do dispositivo e, posteriormente, analisaremos situações específicas.

1.10 – Exercícios de Fixação

- 1) Defina AOP.
- 2) Citar as características ideais de um AOP e explicar o significado de cada uma delas.
- 3) Explicar o conceito de Tensão de *Offset*.
- 4) Conceituar ganho de tensão.
- 5) Se pelo Teorema da Máxima Transferência de Potência obtemos o maior rendimento de transferência de potência quando a resistência da fonte e a resistência da carga (no caso na impedância de entrada do AOP) são iguais, explique por que, em termos de AOP, busca-se uma impedância de entrada tendendo ao infinito (idealmente) e não uma impedância igual à resistência do gerador.

- 6) Sabemos que os AOP são baseados em elementos semicondutores (principalmente transistores). Pesquise qual a influência da temperatura nos semicondutores em termos de portadores de carga.

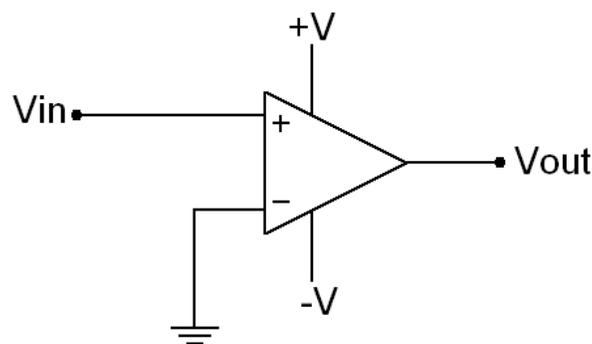
2 – Comparadores de Tensão

São circuitos que utilizam AOP em malha aberta, sem realimentação, ou seja, com $A_V \rightarrow \infty$. O valor de V_o é determinado apenas pela alimentação do dispositivo.

Circuitos comparadores farão a comparação entre dois sinais distintos ou entre um sinal distinto e um de referência (V_R). Se a diferença entre os sinais foi positiva ($V_+ - V_- > 0$), o dispositivo ficará saturado (devido à relação $A_V \rightarrow \infty$) e forçará uma saída $V_o \rightarrow +V$, caso ocorra o inverso, devida a mesma saturação (em sentido inverso), a saída será $V_o \rightarrow -V$, onde $\pm V$ são os valores da alimentação do AOP.

Observação: Em alguns AOP, quando saturados, não enviam seus sinais $\pm V$ para a saída, e sim valores menores que $+V$ e maiores que $-V$, devida a utilização de parte dessa tensão de alimentação para o funcionamento interno do dispositivo. Portanto podemos entender $+V$ e $-V$ como os limites máximos de tensão na saída do AOP.

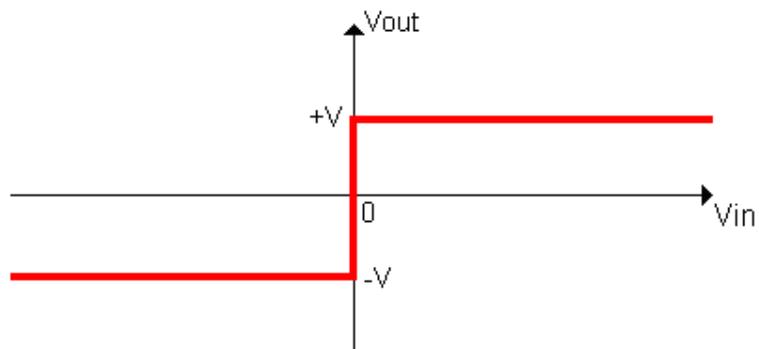
2.1 – Comparador Não-Inversor com V_R Nula



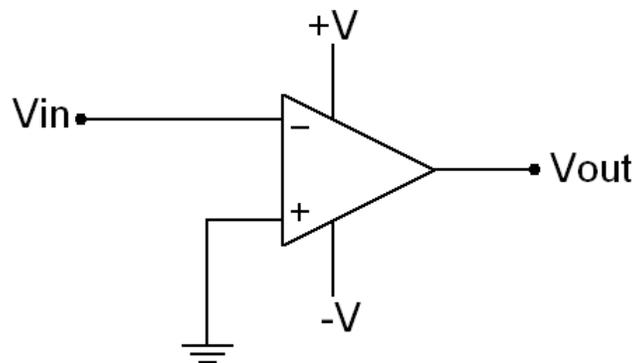
A partir do circuito podemos concluir que:

$$se \begin{cases} V_{in} > 0 \Rightarrow V_{out} = +V \\ V_{in} < 0 \Rightarrow V_{out} = -V \end{cases}$$

Com essa conclusão, podemos construir um gráfico da função de transferência do circuito:



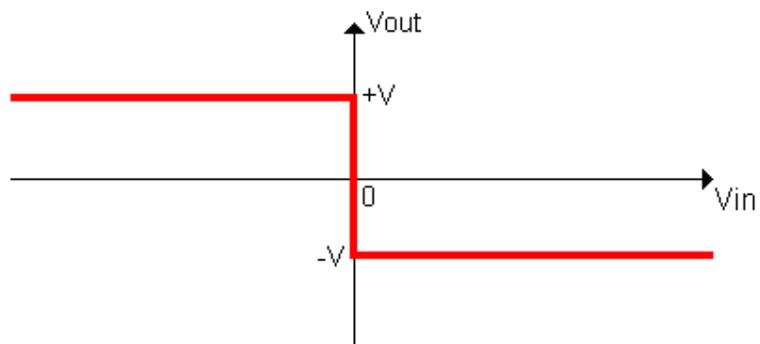
2.2 – Comparador Inversor com V_R Nula



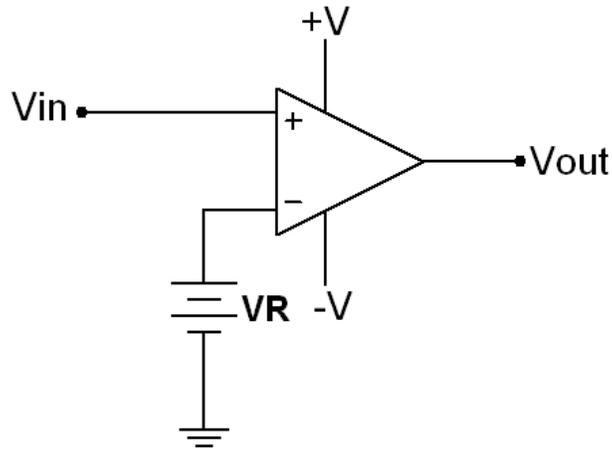
A partir do circuito podemos concluir que:

$$se \begin{cases} V_{in} > 0 \Rightarrow V_{out} = -V \\ V_{in} < 0 \Rightarrow V_{out} = +V \end{cases}$$

Com essa conclusão, podemos construir um gráfico da função de transferência do circuito:



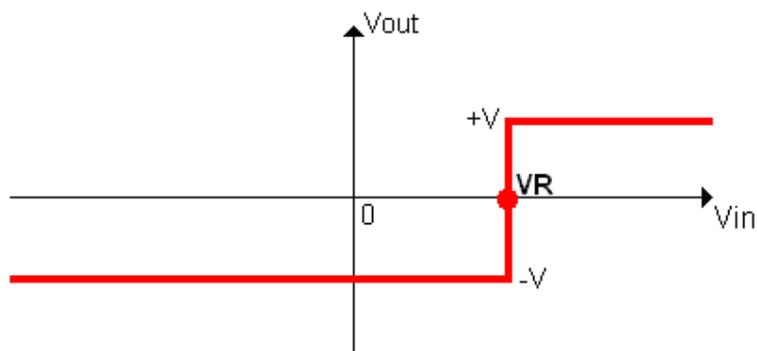
2.3 – Comparador Não-Inversor com $V_R > 0$



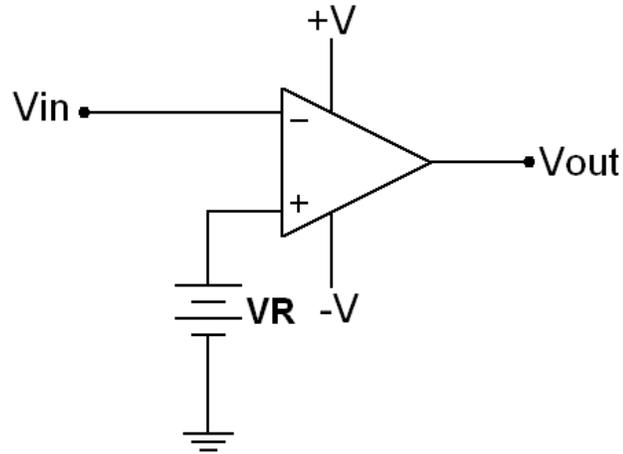
A partir do circuito podemos concluir que:

$$se \begin{cases} V_{in} > V_R \Rightarrow V_{out} = +V \\ V_{in} < V_R \Rightarrow V_{out} = -V \end{cases}$$

Com essa conclusão, podemos construir um gráfico da função de transferência do circuito:



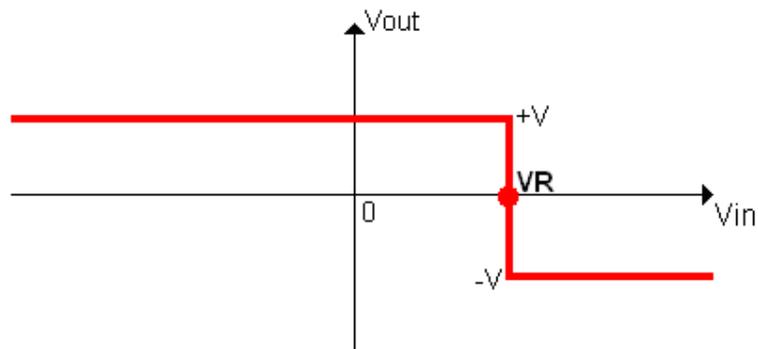
2.4 – Comparador Inversor com $V_R > 0$



A partir do circuito podemos concluir que:

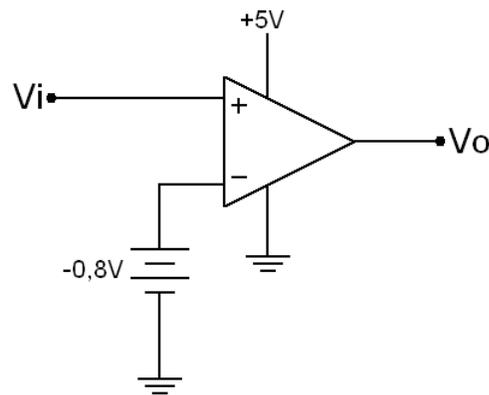
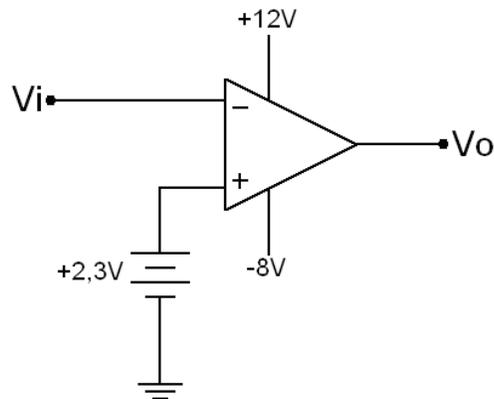
$$se \begin{cases} V_{in} > V_R \Rightarrow V_{out} = -V \\ V_{in} < V_R \Rightarrow V_{out} = +V \end{cases}$$

Com essa conclusão, podemos construir um gráfico da função de transferência do circuito:

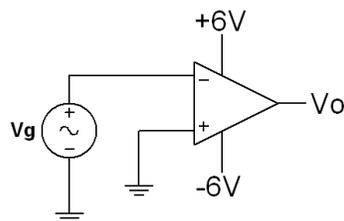


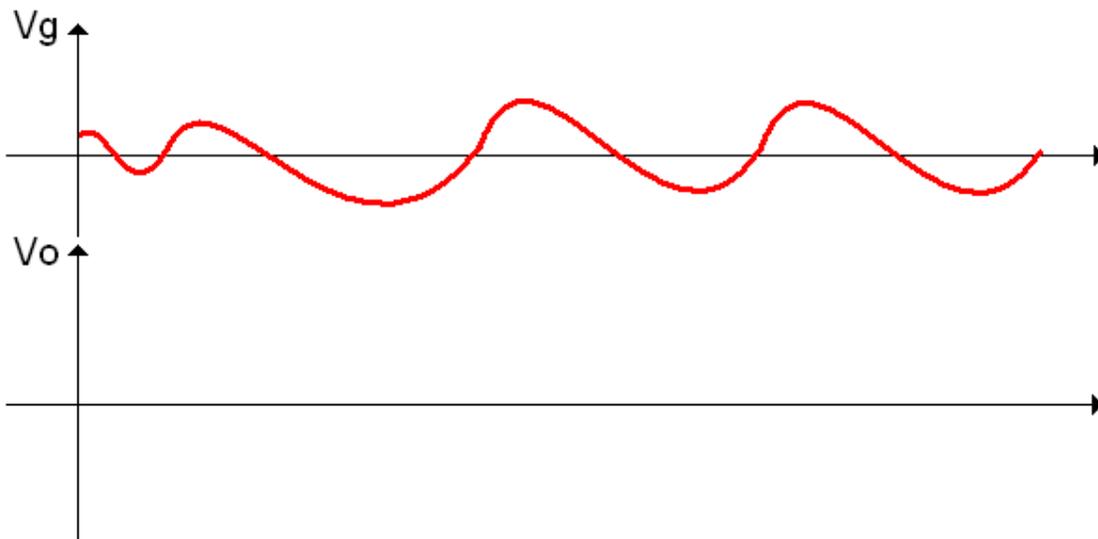
2.5 – Exercícios de Fixação

- 1) O que é um comparador?
- 2) Explicar os tipos básicos de comparadores, bem como os seus respectivos circuitos e características de transferência.
- 3) Construa as funções de transferência dos circuitos abaixo:

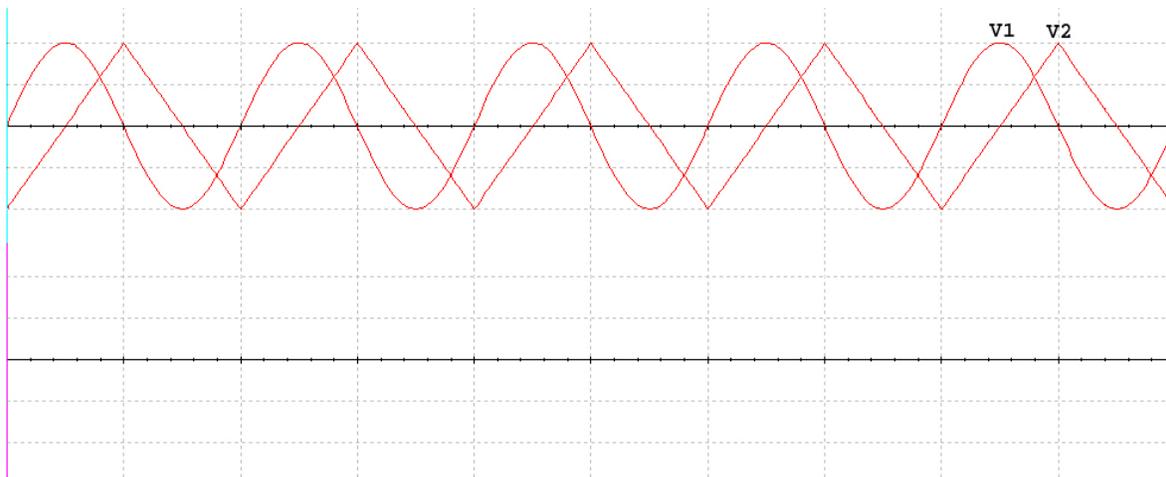
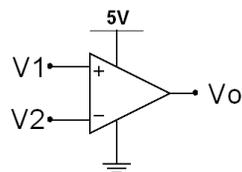


- 4) Com base no circuito e no gráfico da tensão de entrada no comparador abaixo, construa o gráfico da tensão de saída do AOP.





- 5) De acordo com o circuito abaixo, desenhe a forma de onda em V_o , sabendo que os sinais de entrada V_1 e V_2 seguem a figura abaixo:

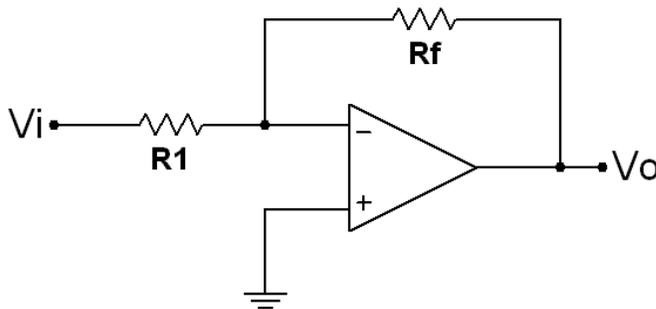


3 – Circuitos Básicos com AOP

Vamos estudar alguns circuitos que utilizam AOP e suas principais características, além de algumas considerações práticas para o uso do AOP.

3.1 – Amplificador Inversor

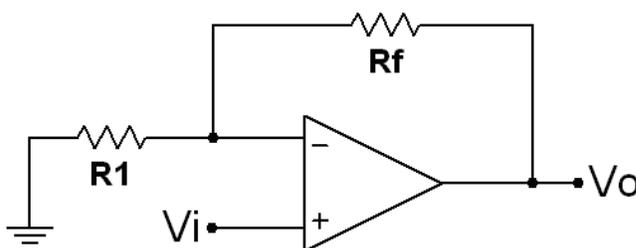
O amplificador de ganho constante mais amplamente utilizado é o amplificador inversor, mostrado abaixo. A saída é obtida pela multiplicação da entrada por um ganho (fator A) constante, fixado pelo resistor de entrada R_1 e o resistor de realimentação R_f . Essa saída também é invertida em relação à entrada.



$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_i$$

3.2 – Amplificador Não-Inversor

A figura abaixo mostra um circuito com AOP que trabalha como um amplificador não-inversor ou multiplicador de ganho constante. Observe que a conexão do amplificador inversor é mais utilizada por ser mais estável entre as duas.

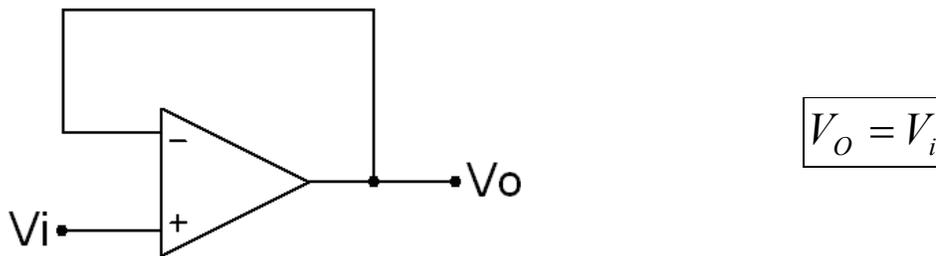


$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_i$$

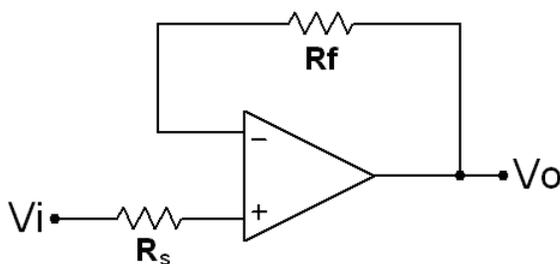
3.3 – Seguidor Unitário

O seguidor unitário, mostrado abaixo, fornece um ganho unitário (1) sem inversão de polaridade ou fase. Portanto a saída possui mesma amplitude, polaridade e fase da entrada.

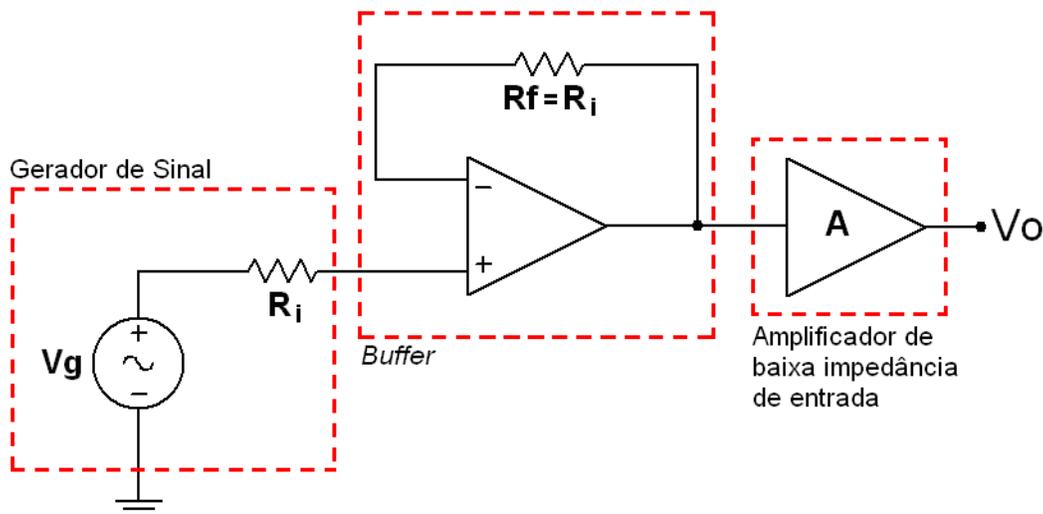
O circuito atua como isolador (*buffer*) de estágios, reforçador de correntes e casador de impedâncias.



Em alguns casos, um seguidor de tensão pode receber um sinal através de uma resistência em série, colocada no terminal não-inversor (R_s). Nesse caso, para se tenha um balanceamento do ganho, é usual a colocação de um outro resistor de mesmo valor na malha de realimentação. Na figura abaixo devemos ter $R_s=R_f$ para $A_v=1$.

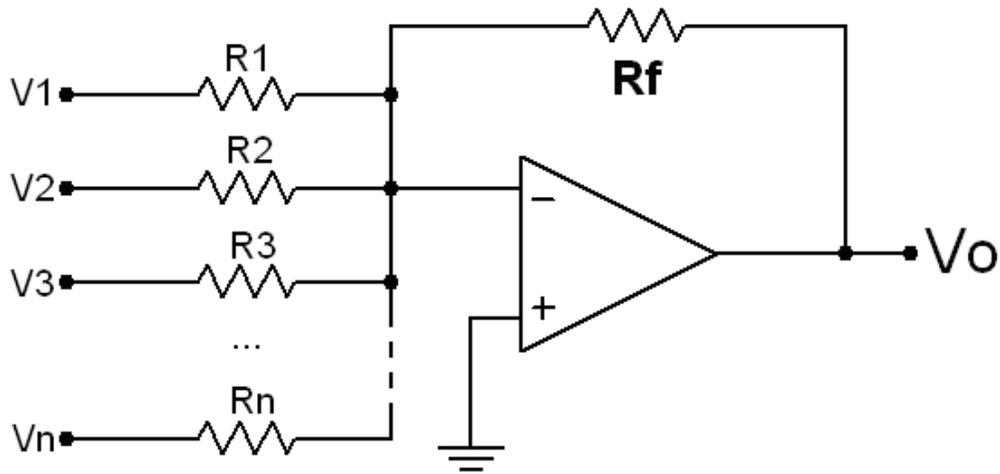


Uma aplicação prática do que foi dito é a utilização do *buffer* no casamento de impedância de saída de um gerador de sinal com um amplificador de baixa impedância de entrada, conforme ilustrado a seguir:



3.4 – Amplificador Somador

O circuito abaixo mostra um circuito amplificador somador de n entradas que fornece um meio de somar algebricamente (adicionando) n tensões, cada uma multiplicada por um fator de ganho constante. Em outras palavras, cada entrada adiciona uma tensão à saída, multiplicada pelo seu correspondente fator de ganho.

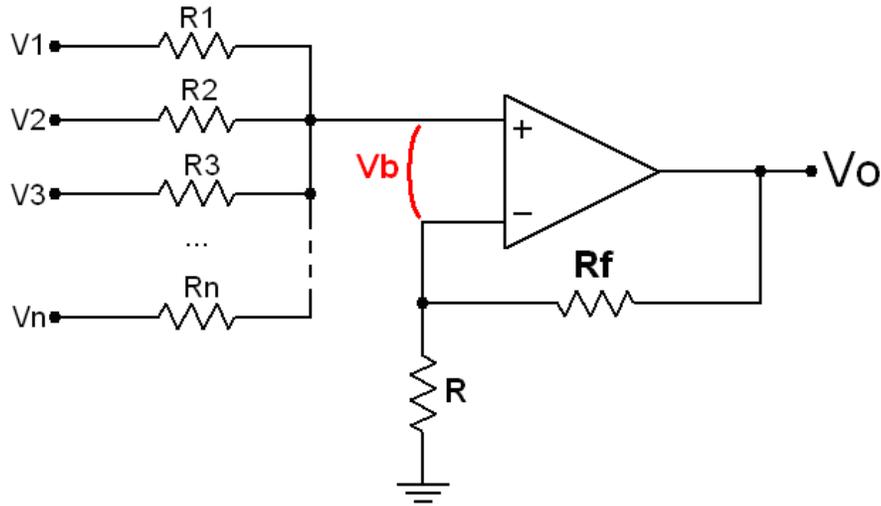


A saída V_O é determinada por:

$$V_O = -\sum_{i=1}^n \left(\frac{R_f}{R_i} V_i \right) = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 + \dots + \frac{R_f}{R_n} V_n \right)$$

3.5 – Amplificador Somador Não-Inversor

A figura abaixo nos apresenta a configuração de um somador especial, no qual a tensão de saída não sofre inversão:

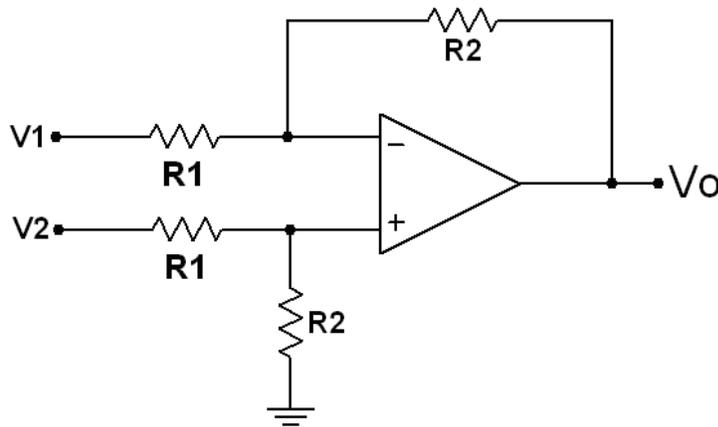


$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) V_b \quad V_b = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \dots + \frac{V_n}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

$$\therefore V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \left(\frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \dots + \frac{V_n}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} \right)$$

3.6 – Amplificador Diferencial ou Subtrator

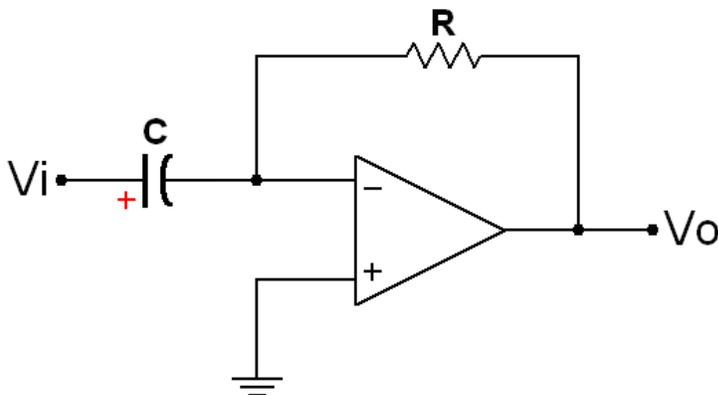
Este circuito permite que se obtenha na saída uma tensão igual à diferença entre os sinais aplicados, multiplicada por um ganho.



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

3.7 – Diferenciador

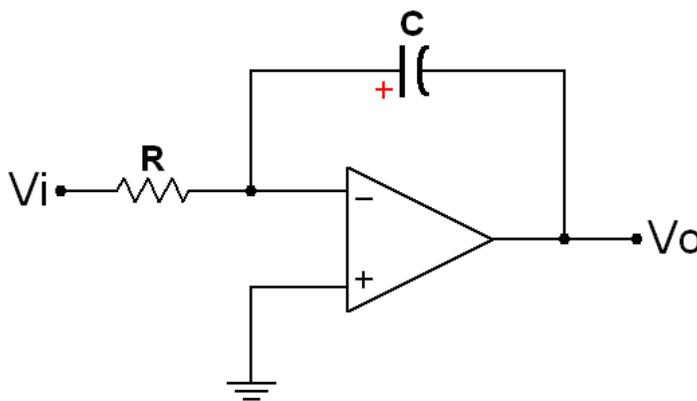
O diferenciador é um circuito que realiza a operação matemática da diferenciação. Ele produz uma tensão de saída proporcional à inclinação da função da tensão de entrada (taxa de variação).



$$V_o = -RC \frac{dV_i(t)}{dt}$$

3.8 – Integrador

O integrador é um circuito que executa a operação de integração, que é semelhante à de soma, uma vez que constitui uma soma da área sob a forma de onda ou curva em um período de tempo. Se uma tensão fixa for aplicada como entrada para um circuito integrador, a tensão de saída cresce sobre um período de tempo, fornecendo uma tensão em forma de rampa. A equação característica do integrador mostra que a rampa de tensão de saída (para uma tensão de entrada fixa) é oposta em polaridade à tensão de entrada e é multiplicada pelo fator $1/RC$.



$$V_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i(t) dt$$

3.9 – Ajuste de *Offset* (Considerações Práticas)

Já citamos que o AOP apresenta uma tensão de *offset* de saída mesmo quando as entradas estão aterradas. Para cancelar essa tensão podemos utilizar de dois métodos: Ajuste pelos terminais do AOP ou por circuitos resistivos externos.

3.9.1 – Terminais Específicos

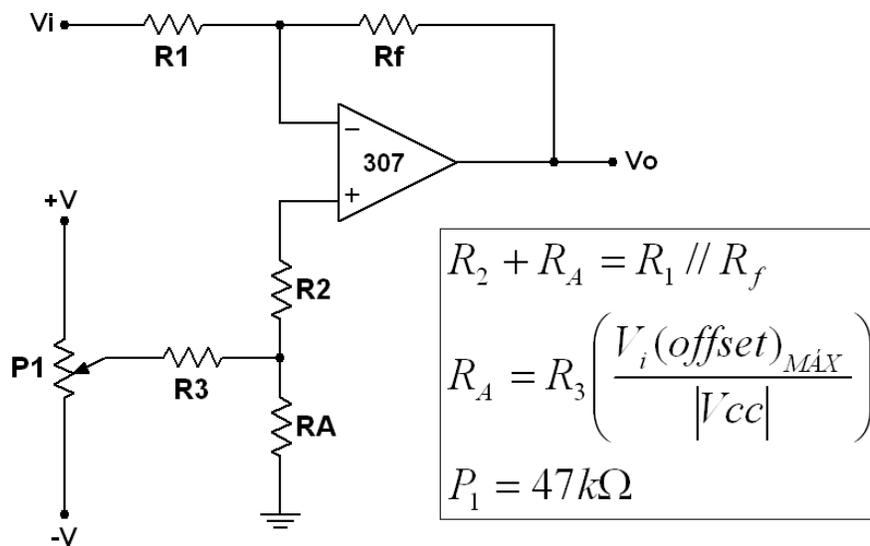
Os fabricantes de AOP costumam fornecer dois terminais dedicados no AOP, aos quais se conecta um potenciômetro. O cursor do potenciômetro é levado a um dos pinos de alimentação para prover o ajuste ou cancelamento dessa tensão. O cancelamento dessa tensão se dá pelo fato de os pinos citados estarem conectados ao estágio diferencial de entrada do AOP, permitindo, assim, o balanceamento das correntes de coletor dos transistores.

Esse balanceamento permitirá o cancelamento da pequena diferença de tensão existente entre os valores de V_{BE} dos transistores citados.

Em experiências práticas veremos como fazer esse ajuste.

3.9.2 – Resistor de Equalização (Balanceamento Externo)

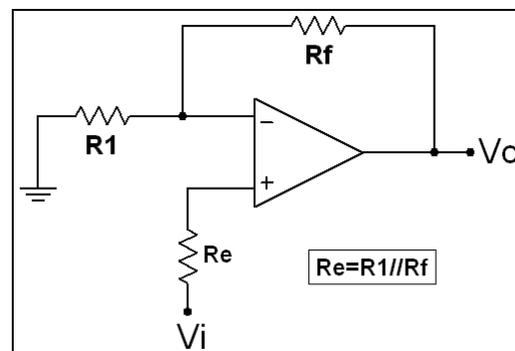
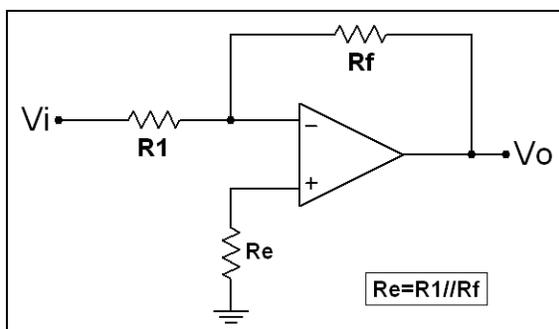
Quando o AOP não possui os terminais para o ajuste de *offset*, o mesmo deverá ser feito através de circuitos resistivos externos. A figura abaixo exemplifica o ajuste de *offset* por circuito resistivo externo em um AOP 307 em uma configuração inversora:

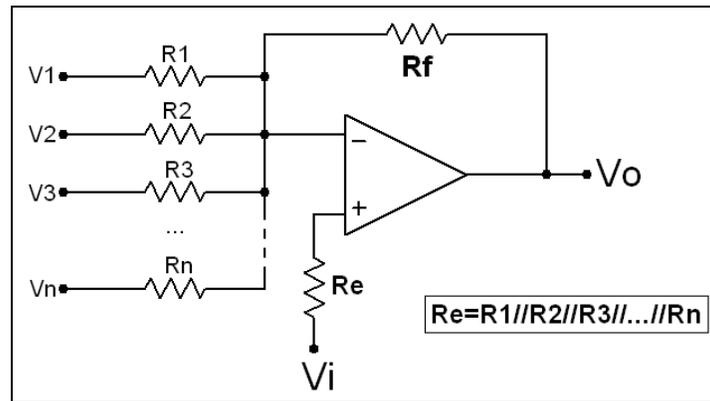


Percebe-se que a utilização de AOP sem terminais específicos para o ajuste de *offset* resulta numa grande perda de tempo e, dependendo do AOP e da precisão dos resistores que deverão ser utilizados, costuma sair mais caro do que a utilização de um AOP provido desses terminais específicos.

Porém, em qualquer caso, a tensão de *offset* poderá ser reduzida (mas não anulada), de forma bem mais simples e prática, colocando-se um resistor de equalização no terminal não-inversor. Esse procedimento é aconselhado pelos próprios fabricantes.

O resistor de equalização (R_e) nas figuras abaixo para cada um dos casos:

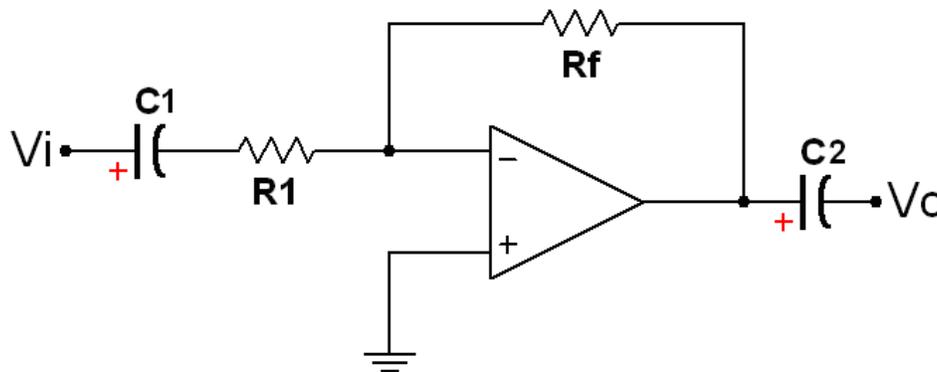




3.10 – Amplificador de CA com AOP

Existem ocasiões nas quais se torna necessário bloquear a componente CC de um sinal e amplificar apenas a sua componente CA. Esses amplificadores de CA são obtidos a partir das configurações já mencionadas anteriormente, com a inclusão de capacitores de acoplamento.

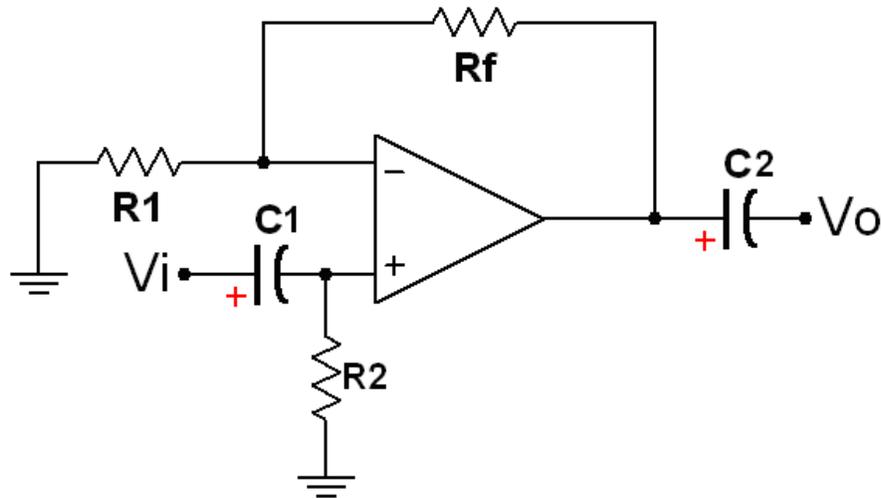
Para se obter um amplificador CA inversor basta acrescentar os capacitores C_1 e C_2 , respectivamente, na entrada de um inversor, conforme ilustra a figura abaixo:



É conveniente projetar o circuito anterior de tal modo que os capacitores não apresentem reatâncias muito elevadas. Assim sendo, costuma-se adotar como regra prática um valor de R_1 aproximadamente 10 vezes maior do que X_{C_1} , assim como o valor da carga conectada ao circuito deve ser aproximadamente 10 vezes maior do que X_{C_2} . Logo:

$$R_1 \geq \frac{10}{2\pi f C_1} \quad R_L \geq \frac{10}{2\pi f C_2}$$

Para a configuração não-inversora, deve-se utilizar um resistor R_2 em paralelo com a entrada não-inversora a fim de garantir a polarização dessa entrada e fazer com que o circuito funcione. Esse circuito apresenta Z_i não tão alta e costuma-se adotar R_2 na faixa de $10k\Omega$ a $100k\Omega$.



Evidentemente, o seguidor de tensão (*buffer*) para CA pode ser obtido do circuito anterior, fazendo $R_1 \rightarrow \infty$ (aberto) e $R_f = 0$ (curto).

3.11 – Exercícios de Fixação

- 1) Considere um amplificador inversor. Calcule o ganho de tensão para cada um dos conjuntos de resistores abaixo:
 - a. $R_1=1k\Omega$; $R_f=1,2k\Omega$;
 - b. $R_1=1k\Omega$; $R_f=4,7k\Omega$;
 - c. $R_1=2,4k\Omega$; $R_f=4,7k\Omega$;
 - d. $R_1=2,7k\Omega$; $R_f=8,2k\Omega$;
 - e. $R_1=1,2k\Omega$; $R_f=2,3k\Omega$;

- 2) Para cada um dos conjuntos de resistores do item anterior, calcule o ganho de tensão para um amplificador não-inversor.

- 3) Considere um amplificador inversor com um sinal de entrada de 12mV. Calcule o valor da tensão de saída para cada um dos conjuntos de resistores do item 1.
- 4) Idem para um amplificador não-inversor.
- 5) O que é resistor de equalização? Explique sua finalidade.
- 6) Como se calcula um resistor de equalização para um amplificador inversor? E para um não-inversor?
- 7) Dar a forma de onda do sinal de saída de um diferenciador quando em sua entrada aplicarmos os seguintes tipos de sinais:
 - a. Fixo ($V_i=K$)
 - b. Rampa ($V_i=Kt$)
 - c. Senoidal ($V_i=K\sin t$)
- 8) Repetir os itens (a) e (c) do exercício anterior para o caso de um integrador.

4 - Proteção em Circuitos com AOP

Abordaremos agora algumas técnicas de proteções para circuitos com AOP que permitem ao projetista aumentar a confiabilidade e a segurança de um sistema no qual esses circuitos se acham inseridos.

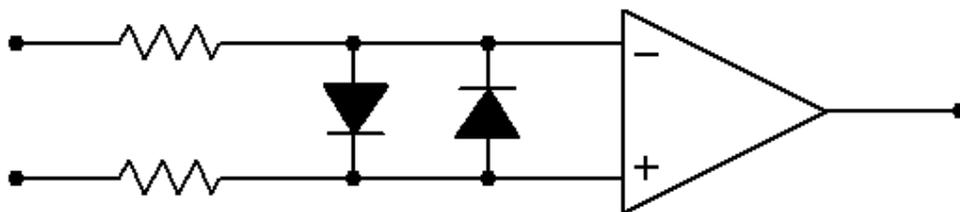
Sabemos que qualquer componente eletrônico possui especificações máximas para suas diversas características elétricas, tais como tensão, corrente, potência, etc. Se por algum motivo alguma dessas características for ultrapassada, o dispositivo poderá sofrer danos irreparáveis.

4.1 – Proteção das Entradas de Sinal

O estágio diferencial de um AOP poderá ser danificado, caso a máxima tensão diferencial de entrada do mesmo seja excedida. Para o AOP 741 essa tensão é da ordem de $\pm 30V$. Por definição, a tensão diferencial de entrada é medida a partir da entrada não-inversora para a entrada inversora do AOP.

A maneira mais comum de se proteger as entradas de um AOP consiste na utilização de dois diodos em antiparalelos conectados entre os terminais das entradas de sinal do AOP. Os diodos utilizados devem ser diodos retificadores do tipo 1N4001 ou equivalente. Costuma-se colocar resistores nas entradas para evitar uma provável queima dos diodos e garantir, assim, melhor proteção para o AOP.

Já podemos concluir que essa proteção impede que a tensão diferencial de entrada ultrapasse 700mV.



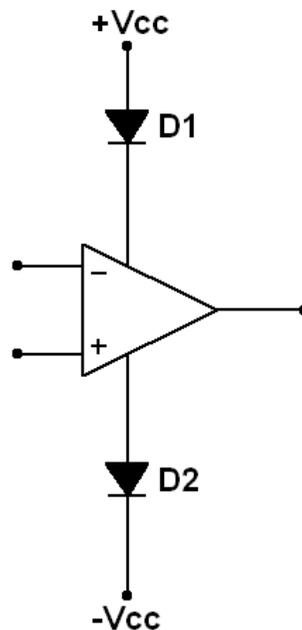
4.2 – Proteção de Saída

Atualmente a maioria dos AOP possui proteção interna contra curto-circuito na saída. O AOP 741, por exemplo, apresenta essa proteção. Se consultarmos a folha de dados do fabricante do AOP 741, encontraremos para a corrente de curto-circuito de saída um valor de 25mA. O fabricante garante que a duração do curto-circuito de saída pode ser ilimitada ou indeterminada, desde que a capacidade de dissipação térmica do componente não seja excedida. O AOP 709 não possui proteção interna contra curto-circuito na saída e, portanto, o fabricante recomenda a colocação de um resistor externo para essa finalidade.

4.3 – Proteção nas Entradas de Alimentação

Essa é uma das mais importantes técnicas de proteção de AOP, pois se a polaridade das tensões de alimentação do AOP forem invertidas, quase todos os componentes internos serão polarizados incorretamente, o que danificaria irreversivelmente o componente.

A figura abaixo mostra a forma correta de proteger um AOP contra uma provável inversão de polaridade da fonte de alimentação:

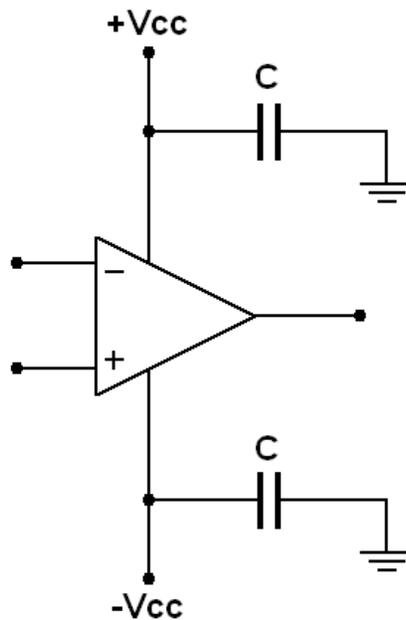


4.4 – Proteção contra Ruídos

A presença de fontes geradores de ruídos ou interferências, próximas aos circuitos com AOP, pode alterar o nível de tensão CC de alimentação do integrado, a qual deve ser estabilizada e de baixíssimo *ripple*.

Essa alteração pode prejudicar a resposta do circuito e, dependendo da aplicação e dos níveis dos sinais processados, poderá provocar erros grosseiros e perigosos ao sistema.

Para proteger o AOP contra ruídos e oscilações da fonte de alimentação, costuma-se colocar um capacitor da ordem de $0,1\mu\text{F}$ entre o terra e cada um dos terminais de alimentação do AOP. Os capacitores atuam como capacitores de passagem para as correntes parasitas, normalmente de alta frequência, produzidas ao longo dos condutores entre a fonte de alimentação e o circuito.



5 – Análises Práticas de Falhas

Fazemos agora uma pequena lista de procedimentos para determinação de falhas em circuitos com AOP:

- a. Conferir a polaridade da alimentação;
- b. Conferir as conexões de todos os pinos;
- c. Se o AOP estiver se aquecendo, verificar se a saída está curto-circuitada ou se a carga é muito alta (baixo valor ôhmico);
- d. Se a saída de um amplificador (inversor ou não-inversor) estiver saturada, verificar se a malha de alimentação está aberta ($R_f = \infty$) ou se o resistor de entrada está em curto ($R_1 = 0$);
- e. Verificar se o terra do sinal de entrada é o mesmo do AOP;

- f.** Verificar se a impedância de entrada do circuito não está muito baixa, comparada à impedância de saída da fonte de sinal;
- g.** Verificar continuidade dos condutores;
- h.** Verificar se as pistas e pinos metalizados da placa de circuito impresso não estão abertos ou curto-circuitados;
- i.** Verificar todos os pontos de solda (solda fria).

Algumas condições ambientes influenciam nas condições de funcionamento do circuito, podendo até mesmo danificá-lo, por isso deve-se levar em conta o grau de incidência dos seguintes fatores:

- a.** Umidade excessiva do ar;
- b.** Calor excessivo do ambiente;
- c.** Ácidos e gases corrosivos na atmosfera ambiente;
- d.** Partículas metálicas em suspensão;
- e.** Vibrações mecânicas frequentes;
- f.** Fontes de interferências frequentes.

6 – Experiências de Laboratório

6.1 – Experiência 1: Realimentação Negativa

Objetivos:

- Comprovar os efeitos da realimentação negativa no controle de ganho de tensão de um amplificador inversor e não-inversor.
- Comprovar a validade das equações que definem o ganho de tensão para essa configuração.

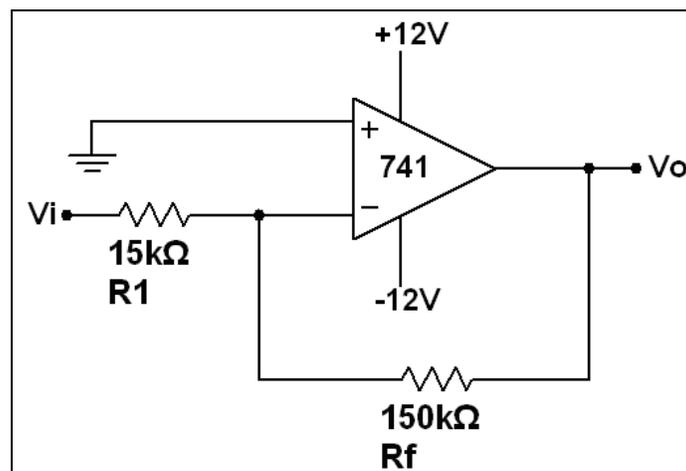
Materiais:

- 1 resistor de $150\text{k}\Omega$;
- 1 resistor de 15Ω ;
- 1 AOP LM741.

Procedimentos:

Parte I: Amplificador Inversor

- Montar o circuito abaixo:

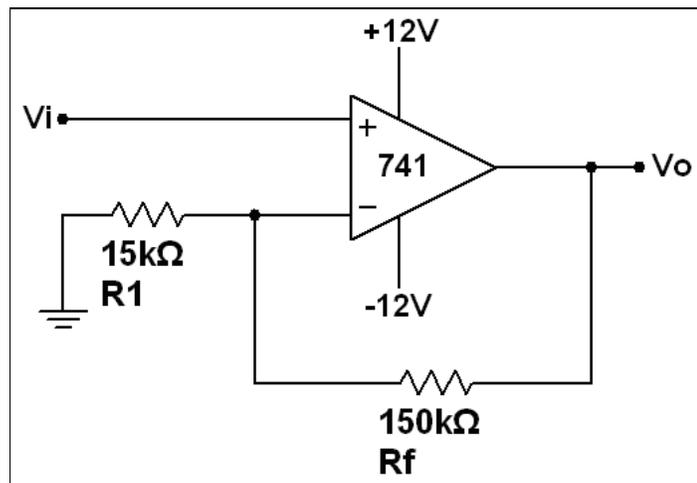


- Inserir uma onda senoidal de $100\text{mV}_p / 1\text{kHz}$.
- Conectar o canal 1 do osciloscópio na entrada V_i e o canal 2 na saída V_o .

- d. Observar as formas de onda de entrada e saída do circuito.
- e. Com o osciloscópio, medir as tensões de entrada e saída e, com base nesses valores, calcular o ganho de tensão (A_V).
- f. Comparar o ganho de tensão medido com o ganho ideal do circuito.
- g. Retirar o resistor de realimentação (R_f), verificar e explicar o que acontece com a saída do circuito.

Parte II: Amplificador Não-Inversor

- a. Montar o circuito abaixo:



- b. Realizar os mesmos procedimentos descritos de b até g da PARTE I.

Conclusão:

Elaborar a conclusão da experiência em cima dos dados observados aliados aos objetivos propostos.

6.2 – Experiência 2: Ajuste de *Offset*

Objetivos:

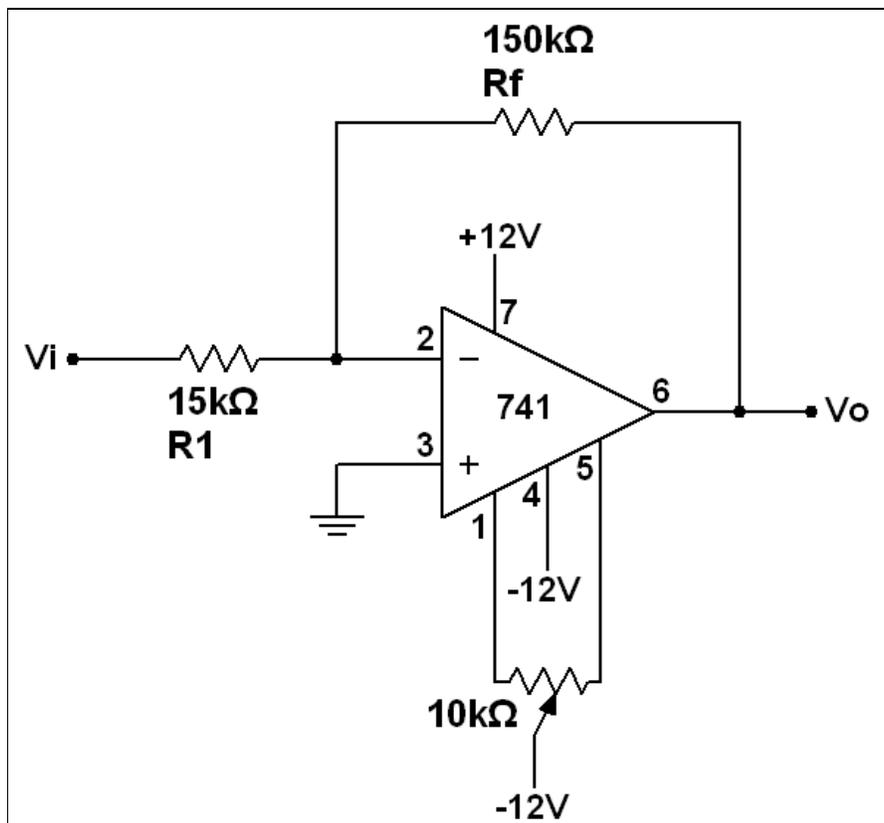
- Determinar o valor da tensão de *offset* de entrada do AOP 741.
- Fazer o balanceamento do circuito.

Materiais:

- 1 resistor de 150k Ω ;
- 1 resistor de 15k Ω ;
- 1 potenciômetro de 10k Ω ;
- 1 AOP LM741.

Procedimentos:

- Montar o circuito abaixo:



- b. Medir $V_o(\text{offset})$, com o potenciômetro desconectado.
- c. Determinar $V_i(\text{offset})$ e comparar com o valor fornecido pelo fabricante.
- d. Conectar o potenciômetro e zerar $V_o(\text{offset})$.

Conclusão:

Elaborar a conclusão da experiência em cima dos dados observados aliados aos objetivos propostos.

6.3 – Experiência 3: Amplificador Somador

Objetivos:

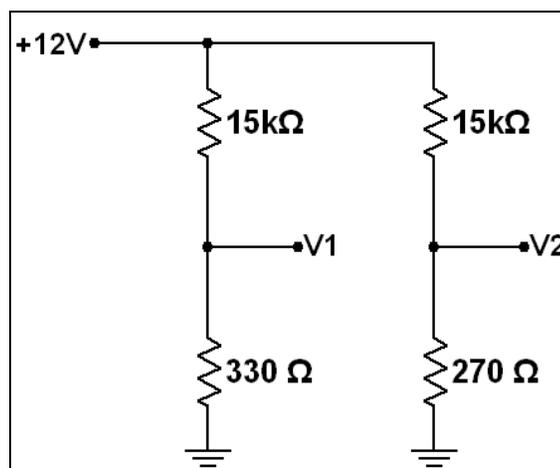
- Comprovar o funcionamento do amplificador somador de duas entradas.
- Comparar os resultados reais com os resultados teóricos.

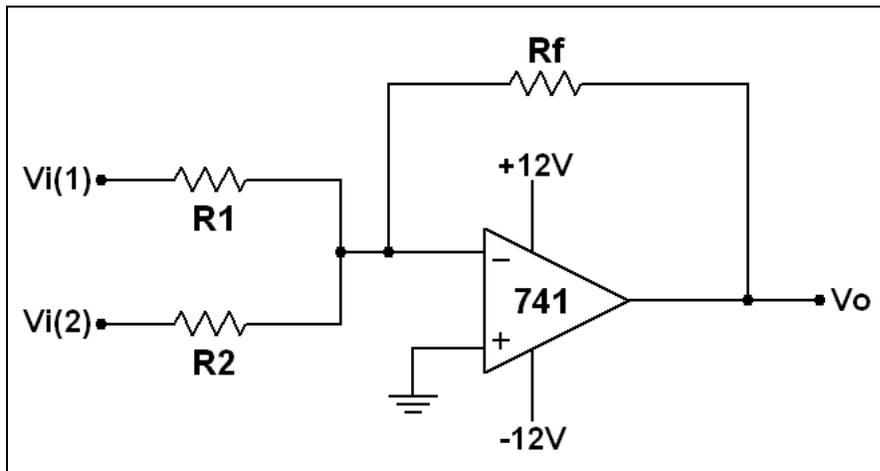
Materiais:

- 1 resistor de 270Ω ;
- 1 resistor de 330Ω ;
- 4 resistores de $15k\Omega$;
- 1 resistor de $33k\Omega$;
- 1 resistor de $47k\Omega$;
- 1 resistor de $150k\Omega$;
- 1 AOP LM741.

Procedimentos:

- Montar os circuitos abaixo:





- b. Aplicar a tensão V_1 na entrada $V_{i(1)}$ e a tensão V_2 na entrada $V_{i(2)}$.
- c. Medir as tensões $V_{i(1)}$, $V_{i(2)}$ e V_o preenchendo a tabela a seguir.
- d. Comparar os resultados reais (medidos) de V_o com os resultados teóricos esperados em cada uma das situações indicadas na tabela:

$R_f = 150k\Omega$		ENTRADAS		SAÍDAS	
R_1	R_2	$V_{i(1)}$	$V_{i(2)}$	V_o REAL	V_o TEÓRICO
15k Ω	15k Ω				
33k Ω	47k Ω				
47k Ω	33k Ω				
33k Ω	15k Ω				
47k Ω	15k Ω				

Conclusão:

Elaborar a conclusão da experiência em cima dos dados observados aliados aos objetivos propostos.

6.4 – Experiência 4: Amplificador Subtrator

Objetivos:

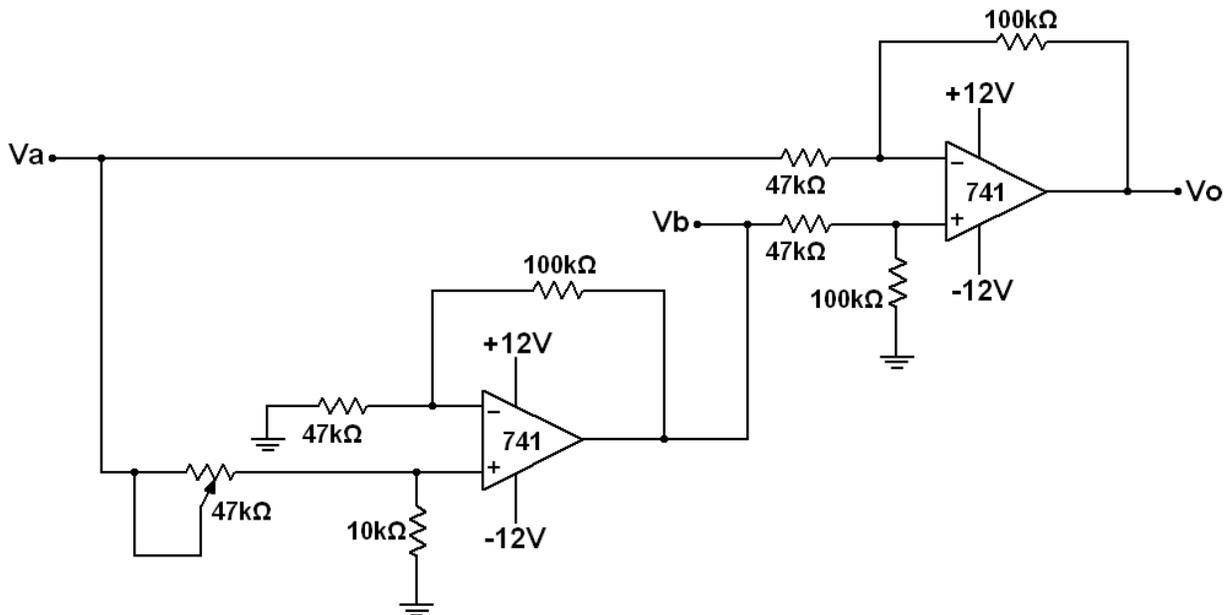
- Comprovar o funcionamento do amplificador diferencial ou subtrator.
- Comparar os resultados medidos com os resultados experimentais.

Materiais:

- 1 resistor de $10\text{k}\Omega$;
- 3 resistores de $47\text{k}\Omega$;
- 3 resistores de $100\text{k}\Omega$;
- 1 potenciômetro de $47\text{k}\Omega$;
- 2 AOP LM741.

Procedimentos:

- a. Montar o circuito abaixo:



- b. Ajustar o gerador de funções para fornecer uma tensão senoidal de $500\text{mV}_p / 1\text{kHz}$.
Aplicar essa tensão em V_a .
- c. Atuar no potenciômetro de modo a obter para V_b um sinal de 1V_p .

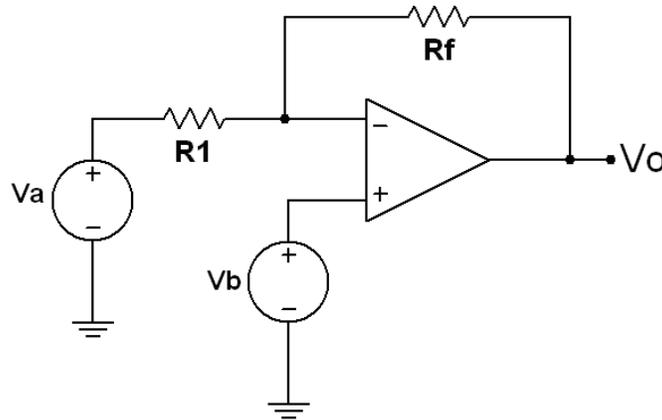
- d. Medir a tensão de saída e comparar com o valor ideal esperado (calculado).
- e. Conectar o canal 1 do osciloscópio no ponto V_b e o canal 2 na saída do circuito. Atuar lentamente no potenciômetro e verificar o que ocorre com as tensões V_b e V_o . Lembre-se que V_a é constante ($500mV_p$).
- f. Explicar como o sinal V_b é obtido.

Conclusão:

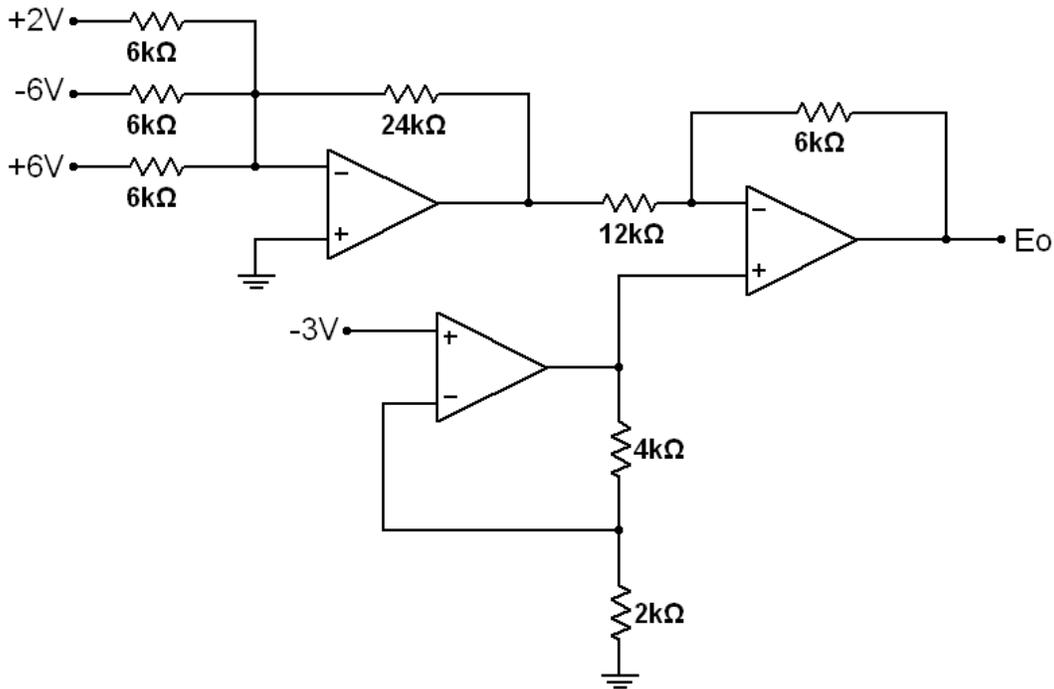
Elaborar a conclusão da experiência em cima dos dados observados aliados aos objetivos propostos.

7 – Problemas Analíticos

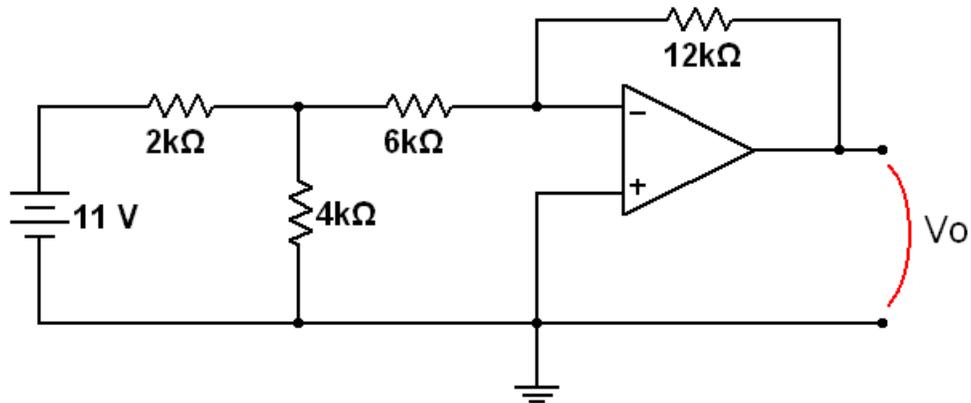
- 1) No circuito a seguir (com $R_1=1k\Omega$ e $R_f=100k\Omega$, supondo o AOP ideal, pede-se:
- Determinar a tensão V_O , em função de V_a e V_b .
 - Determinar o valor de V_O , quando $V_a=10mV$ e $V_b=20mV$.



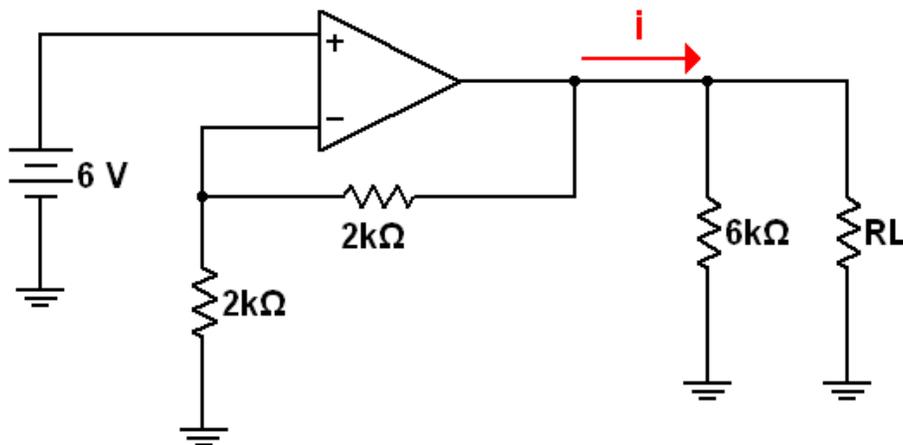
- 2) Calcular E_O no circuito abaixo. Supondo AOP ideais.



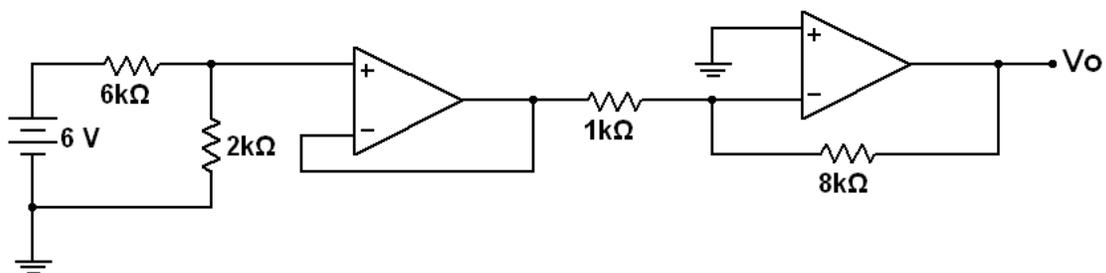
- 3) Determinar V_O no circuito abaixo. Supor o AOP ideal e alimentado com $\pm 15V$.



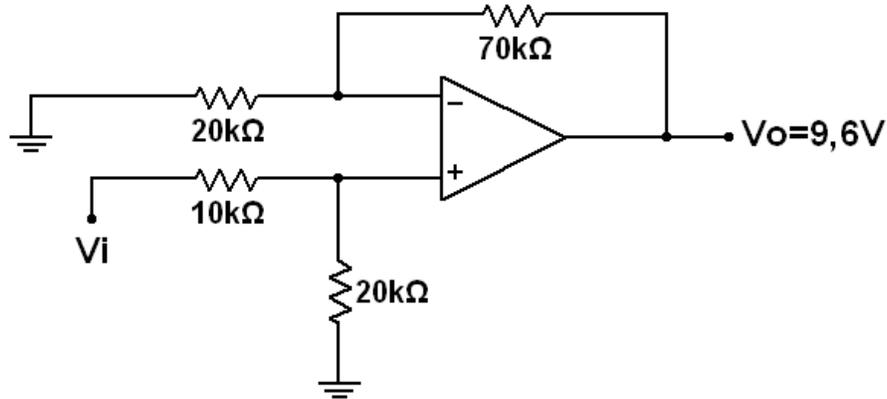
- 4) No circuito abaixo, determinar o valor mínimo e o valor máximo da carga (R_L), de modo que a corrente I esteja situada na faixa de 2mA a 8mA. Supor AOP ideal.



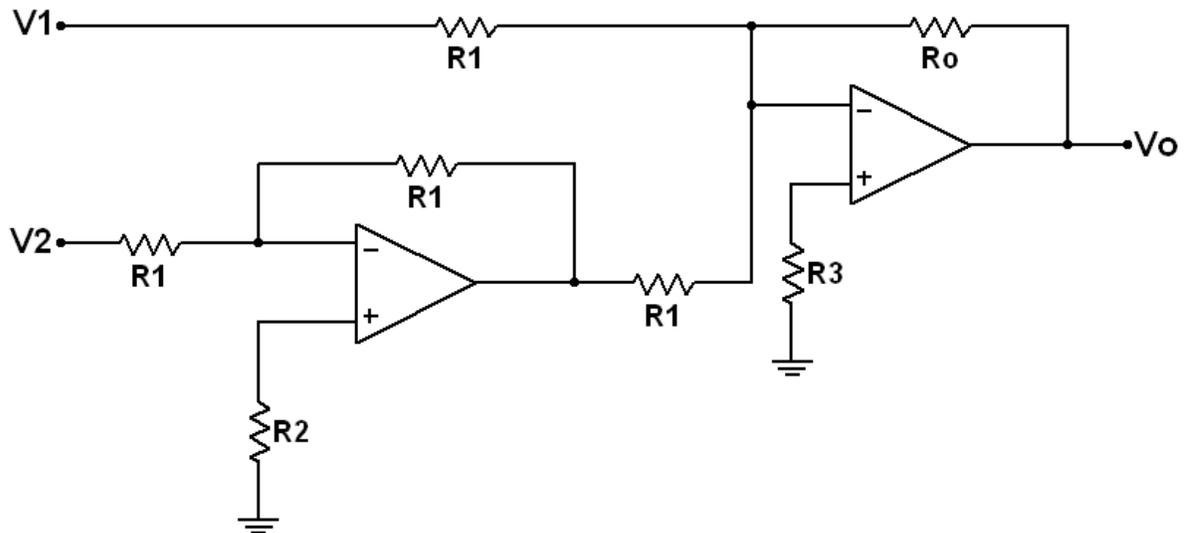
- 5) Determinar V_O no circuito abaixo. Supor AOP ideal.



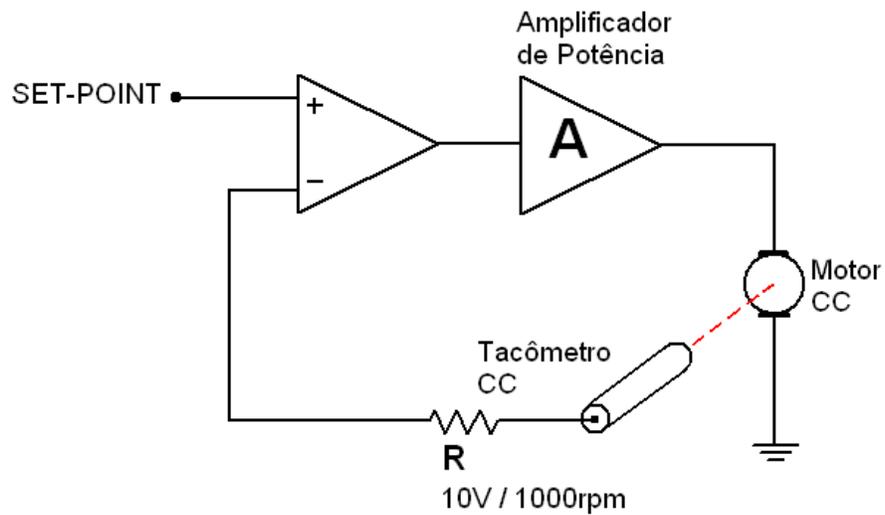
- 6) Dado o circuito a seguir, calcular V_i . Assumir AOP ideal.



- 7) Obter a equação de saída do circuito abaixo. Supor AOP ideais.



- 8) Um gerador tacométrico (ou tacômetro) é um tipo de gerador elétrico que fornece uma tensão de saída proporcional à velocidade do seu eixo, o qual é mecanicamente acoplado ao eixo de um motor, possibilitando assim, a medição e o controle da velocidade (em RPM) do motor. Na figura a seguir, temos o diagrama em blocos de um sistema de controle de velocidade de um motor CC. Explique o funcionamento desse sistema, bem como a função do *set-point* na entrada não-inversora do comparador.



Bibliografia

- PERTENCE JÚNIOR, Antonio. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. 302 p.
- BOYLESTAD, Robert L. NASHESKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 671 p.
- MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica Vol. II**. São Paulo: McGraw-Hill, 1987. 283 p.