



Nome: _____ N° USP: _____

Experiência 3 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O objetivo desta experiência é apresentar as características básicas dos amplificadores operacional e alguns circuitos fundamentais em que são aplicados. Para isso, você deve fazer uma revisão do capítulo 8 do livro-texto (“Practical Electronics”) até a seção 8.4.

- Estude a apostila **com antecedência**. Sua compreensão será avaliada na aula por **ARGUIÇÃO ORAL**.
- Faça os **EXERCÍCIOS** contidos na apostila e tire dúvidas com os professores **com antecedência**.
- Traga para a aula a apostila **IMPRESSA**.

PARTE A TEORIA

3.1 O amplificador operacional

Um amplificador operacional (ou, abreviadamente, *amp-op*) é um circuito para amplificar diferenças de tensão. A Figura 3.1 mostra o seu símbolo. Os terminais ‘+’ e ‘-’ são chamados respectivamente de *entrada não inversora* e de *entrada inversora*, e V_+ e V_- são as tensões de entrada aplicadas. O terminal direito é a saída e V_{out} é a tensão de saída.

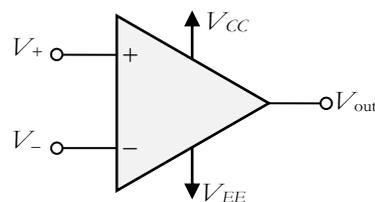


Figura 3.1 Símbolo do amplificador operacional.

Basicamente, um amp-op entrega na saída uma tensão proporcional à diferença das tensões de entrada. Na Figura 3.2a, vemos que a saída provém do gerador de tensão controlada tal que

$$V_{out} = A_O V_d, \quad (3.1)$$

onde a constante A_O (lê-se “*a-ob*”) representa o ganho em *malha aberta* (*Open Loop*) ou ganho *diferencial* do amplificador. A tensão V_d é a chamada *tensão diferencial* e por definição é igual à diferença entre as tensões de entrada. Ou seja,

$$V_d = V_+ - V_-. \quad (3.2)$$

Temos ainda que R_i é a resistência de entrada.

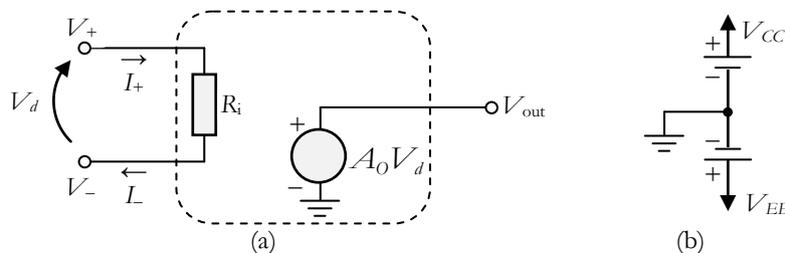


Figura 3.2 Modelo do amplificador operacional (a), e detalhe das tensões de alimentação (b).

O amp-op precisa ser alimentado por fontes externas de tensão como mostra a Figura 3.1b. A tensões de alimentação são indicadas por V_{CC} e V_{EE} . Frequentemente usam-se *tensões simétricas* (isto é, de amplitudes iguais e sinais contrários), tanto que no *datasheet* em anexo do amp-op TL081 que usaremos no laboratório, as tensões são chamadas de $+V_{CC}$ e $-V_{CC}$, mas isso não é obrigatório. É preciso sim que se tenha $V_{CC} > V_{EE}$.

3.1.1 O amp-op ideal

No caso de um amplificador operacional **ideal**, temos as seguintes propriedades:

- Resistência de entrada elevada ($R_i \rightarrow \infty$, e as correntes de entrada tendem a zero).
- Ganho de tensão diferencial elevado ($A_O \rightarrow \infty$, e qualquer $V_d \neq 0$ faz a saída tender a saturar em V_{CC} ou V_{EE}).

Mesmo no caso do amp-op que usaremos no laboratório, essas suposições são bastante razoáveis. Veja o *datasheet* do TL081 em anexo: temos R_i da ordem de TERA Ohms (10^{12}) e A_O típico de 200 V/mV (ou 200.000 V/V).

Pela primeira hipótese, podemos assumir que

$$I_+ \cong 0 \quad \text{e} \quad I_- \cong 0. \quad (3.3)$$

Já a segunda merece uma análise mais cuidadosa. Sem controle, um amp-op com ganho A_O elevado não parece ser muito útil pois seria praticamente impossível manter a tensão de saída V_{out} em um valor estável. Para uma tensão de entrada diferencial V_d um pouco maior que zero, V_{out} tende a se elevar e acaba por *saturar* em um valor próximo a V_{CC} . Analogamente, uma tensão V_d negativa faz com que V_{out} sature numa tensão próxima de V_{EE} . Em ambas situações, V_{out} deixa de ser proporcional à V_d (em módulo, passa-se a ter $|V_{out}| < |A_O V_d|$).

No entanto, realimentando a tensão de saída na entrada inversora, podemos construir circuitos em que o ganho pode ser ajustado com precisão. É o que chamamos de *malha fechada* com *realimentação negativa*. Com isso, é possível estabilizar a tensão de saída em um valor desejado, e nessa situação o ganho elevado implica em um efeito pouco óbvio: a tensão diferencial de entrada V_d tende a **zero**! Mais detalhes logo mais à frente.

3.1.2 Ganho na escala Decibel

Por envolver valores elevados, o ganho de tensão dos amplificadores normalmente é dado em decibéis (dB), ou seja

$$|A_O|_{dB} = 20 \log \left| \frac{V_{out}}{V_d} \right|, \quad (3.4)$$

onde $\log()$ é a função logarítmica em base dez. Por exemplo, uma amplificação A_O de 10.000 vezes corresponde a um ganho de +80 dB, e no TL081 o A_O típico de 200.000 V/V equivale a um ganho de +106 dB.

Como a potência de um sinal é proporcional ao quadrado da tensão, o ganho em dB equivale à

$$|A_O|_{dB} = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \text{ dB}, \quad (3.5)$$

onde P_{out} é a potência do sinal de saída e P_{in} é a potência do sinal de entrada.

Em particular, **+3 dB** é um valor notável que corresponde a um ganho de $\sqrt{2}$ em amplitude (confira na sua calculadora), ou equivalentemente tem-se que a potência do sinal dobra. Inversamente, **-3 dB** corresponde a uma **atenuação** de $\sqrt{2}$ (amplitude dividida por esse valor), ou equivalentemente quando a potência do sinal cai pela metade. Essa faixa de 3 dB é usada na definição da *frequência de corte* de filtros e outros sistemas dinâmicos, como você já deve saber.

3.2 Amplificador não inversor

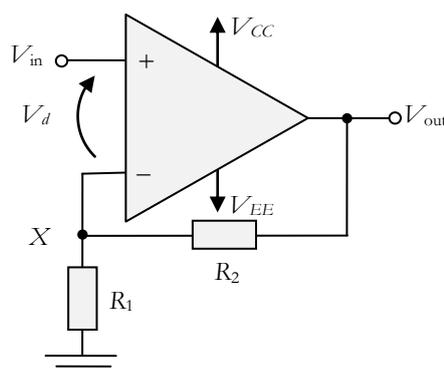


Figura 3.3 Circuito amplificador não inversor

As principais características dos amp-ops podem ser entendidas a partir da análise do circuito mostrado na Figura 3.3. Trata-se de um circuito clássico denominado *Amplificador não Inversor*.

Admitindo que o amp-op seja ideal, vamos mostrar que

$$V_{\text{out}} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) V_{\text{in}}. \quad (3.6)$$

Ou seja, a tensão de saída é igual à tensão de entrada multiplicada por um fator A_{CL} , denominado *ganho de malha fechada* (ou *closed loop gain*), que nesse caso é positivo e sempre maior que 1. Da expressão anterior, tem-se

$$A_{CL} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \text{ para o amplificador não inversor.} \quad (3.7)$$

Note que o circuito não mostra explicitamente qualquer conexão do amp-op ao terra (referencial 0 V), mas isso se dá por meio das fontes de tensão de V_{CC} e V_{EE} .

3.2.1 Ganho em malha fechada do amplificador não inversor

Para se chegar à expressão 3.7, vamos adotar duas hipóteses simplificadoras:

- $I \cong 0$: como o amp-op tem impedância de entrada infinita, nenhuma corrente passa pela entrada ‘-’. Assim, toda corrente que chega ao ponto X através do resistor R_2 é desviada para o resistor R_1 .
- $V_d \cong 0$: como o ganho A_O tende a infinito e assumindo que a saída não esteja saturada, a tensão diferencial de entrada V_d tende a zero (lembre-se, $V_d = V_{\text{out}}/A_O$). Com isso temos V_+ aproximadamente igual à V_- , e como V_+ está ligado à V_{in} , temos também V_- aproximadamente igual à V_{in} .

Com tais aproximações, o amp-op pode ser ignorado, restando o circuito equivalente mostrado na Figura 3.4.

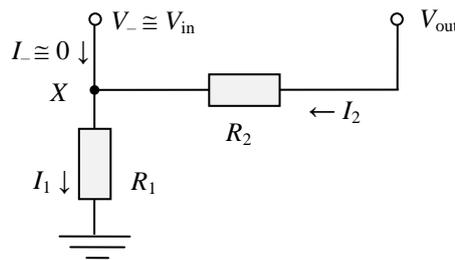


Figura 3.4 Circuito aproximado do amplificador não inversor (para amp-op ideal)

Podemos então determinar a corrente que passa pelo resistor R_1 como sendo

$$I_1 = \frac{V_-}{R_1} \cong \frac{V_{\text{in}}}{R_1}, \quad (3.8)$$

e como as corrente I_1 e I_2 são praticamente iguais, a tensão de saída será

$$V_{\text{out}} = R_1 I_1 + R_2 I_2 \cong V_{\text{in}} + R_2 \frac{V_{\text{in}}}{R_1}, \quad (3.9)$$

que é equivalente à expressão do ganho dada na equação 3.6.

3.2.2 Fração de realimentação

Pode parecer estranho que o ganho A_O , por ser muito elevado, force a tensão diferencial de entrada V_d para zero. Na verdade, o amp-op ajusta a tensão de saída V_{out} de tal forma que o valor de V_d se aproxime de zero. Isso acontece devido à *realimentação negativa* que existe no circuito.

Repare que uma fração da tensão de saída V_{out} é realimentada para a entrada inversora (“-”) do amp-op através do divisor resistivo formado por R_1 e R_2 , tal que

$$V_- = B V_{\text{out}}, \quad (3.10)$$

onde B é a chamada *fração de realimentação*, e vale

$$B = \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (3.11)$$

Veja como a realimentação negativa atua. No circuito da Figura 3.3, suponha que a tensão V_+ na entrada não inversora aumente ligeiramente, fazendo V_d aumentar também. Com isso, a tensão de saída V_{out} aumenta instantaneamente, forçando a tensão V_- na entrada inversora a aumentar (conforme a expressão 3.10), de modo a zerar novamente a tensão V_d , anulando dessa forma o incremento inicial em V_+ .

Em amp-ops reais, o ganho A_O não é infinito e a tensão V_d não é exatamente zero; porém seu valor é tão baixo que pode ser ignorado. Por exemplo, para um ganho $A_O = 100.000$ (100 dB) e supondo $V_{out} = 10,0$ V, a tensão V_d seria de apenas $0,1 \mu\text{V}$!

3.2.3 Dimensionamento dos resistores: corrente de polarização

Repare que o ganho em malha fechada A_{CL} (expressão 3.7) fornece apenas uma relação entre os resistores R_1 e R_2 . Para projetar um amplificador não inversor e especificar completamente os resistores, temos que usar outros critérios. Um critério importante é a *corrente de polarização* que passa por R_1 e R_2 . Como desprezamos a corrente I de entrada do amp-op, a corrente de polarização é dada por

$$I_1 \cong I_2 \cong \frac{V_{out}}{R_1 + R_2}. \quad (3.12)$$

Então, primeiramente ela deve ser muito maior que I para que esta última possa ser desprezada. Como $I = V_d/R_i$ (confira na Figura 3.2), equivalentemente R_1 e R_2 devem ser muito menores que R_i . Como R_i é da ordem de Tera Ohms, e como resistores de Giga Ohms ou maiores raramente são usados na prática, esse critério é naturalmente atendido usando-se resistores comerciais.

Por outro lado, $R_1 + R_2$ não deve ser muito baixo para que a corrente de polarização seja menor que a corrente máxima que a saída do amp-op é capaz de fornecer ou drenar.

Nos exercícios do pré-relatório você encontrará um exemplo de como especificar as correntes I_1 e I_2 .

3.2.4 Saturação da tensão de saída

Lembre-se que a excursão da tensão de saída V_{out} do amp-op é limitada. O que acontece então quando se aplica um sinal de entrada V_{in} de amplitude muito elevada?

Suponha que o amp-op da Figura 3.3 seja alimentado com as tensões V_{CC} e V_{EE} . Na prática, a tensão de saída V_{out} satura antes de atingir esses limites, de modo que a excursão útil de saída se limita a

$$V_{out} \geq V_{SL} > V_{EE} \quad e \quad V_{out} \leq V_{SH} < V_{CC}, \quad (3.13)$$

onde V_{SL} é a tensão de saturação inferior e V_{SH} a superior. Tipicamente, a saturação ocorre entre $0,1$ V a 1 V acima de V_{EE} ou abaixo de V_{CC} .

Se $V_{in} > V_{SH}/A_{CL}$, a saída *satura* no limite superior V_{SH} , como se vê no lado direito da curva da Figura 3.5.

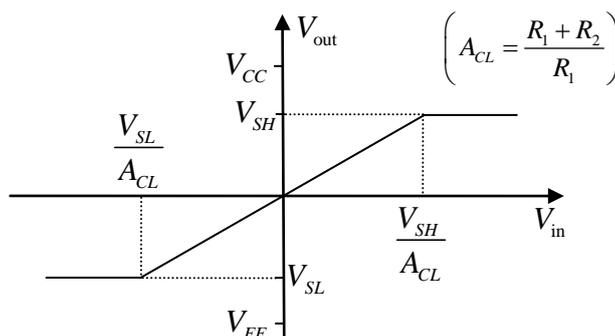


Figura 3.5 Curva de entrada e saída com saturação do amplificador não inversor

O resultado disso não chega a ser catastrófico (respeitada a máxima tensão de entrada suportada pelo amp-op, é claro), mas uma importante simplificação deixa de valer: a tensão diferencial de entrada V_d **não é mais próxima de zero**. Ela passa a ser significativa e pode ser estimada da seguinte forma.

Quando a tensão de entrada ultrapassa o limiar superior, temos

$$V_{in} > \frac{V_{SH}}{A_{CL}} \Rightarrow V_{out} = V_{SH}, \quad (V_{out} \text{ em saturação superior}). \quad (3.14)$$

Da mesma forma, se $V_{in} < V_{SL}/A_{CL}$, a saída satura no limite inferior V_{SL} no lado esquerdo da Figura 3.5

$$V_{in} < \frac{V_{SL}}{A_{CL}} \Rightarrow V_{out} = V_{SL}, \quad (V_{out} \text{ em saturação inferior}). \quad (3.15)$$

No circuito da Figura 3.4, a corrente de entrada do amp-op continua a ser muito baixa (isto é, $I \cong 0$) e a tensão V_- continua sendo definida pelo divisor resistivo formado por R_1 e R_2 . Portanto

$$V_- \cong \left(\frac{V_{\text{out}}}{R_1 + R_2} \right) R_1. \quad (3.16)$$

Tanto na saturação superior como inferior, a tensão diferencial de entrada V_d **não é** mais nula. Lembrando que temos V_{in} aplicado na entrada V_+ do amp-op (veja a Figura 3.3), será dada por

$$V_d = V_{\text{in}} - V_-, \text{ no amplificador não inversor.} \quad (3.17)$$

3.2.5 Impedância de entrada elevada

No circuito amplificador não inversor (Figura 3.3), o sinal de entrada V_{in} é aplicado diretamente à entrada não inversora do amp-op. Como vimos, as correntes I_+ e I_- nas entradas do amp-op são muito baixas, e portanto a corrente que a fonte do sinal V_{in} deve fornecer é praticamente nula.

Como veremos mais à frente, define-se a *impedância de entrada* de um circuito como sendo a impedância equivalente vista pela fonte do sinal de entrada (V_{in} neste caso). Com isso, temos uma característica importante desse circuito: a impedância de entrada é igual à resistência de entrada R_i do amp-op, que na prática é muito elevada.

3.3 Amplificador inversor

A Figura 3.6 mostra outro circuito clássico com realimentação negativa, denominado *amplificador inversor*. Note que a entrada não inversora e a entrada inversora foram trocadas de posição no símbolo do amp-op.

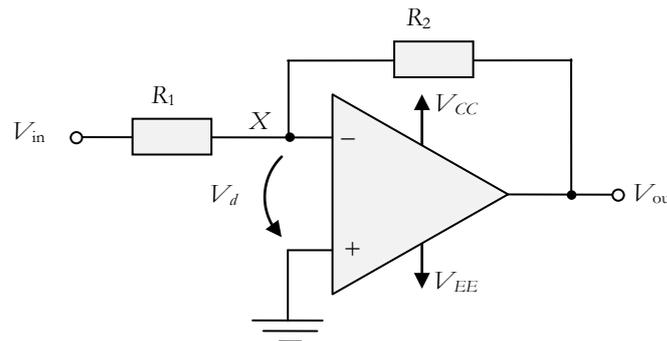


Figura 3.6 Circuito do Amplificador Inversor

Assumindo que o amp-op seja ideal, vamos mostrar que a tensão de saída é dada por

$$V_{\text{out}} = -\frac{R_2}{R_1} V_{\text{in}}. \quad (3.18)$$

Dessa expressão, vê-se que o ganho em malha fechada A_{CL} é **negativo**, ou seja, o sinal da tensão de saída será o inverso do sinal da tensão de entrada.

$$A_{CL} = -\frac{R_2}{R_1}, \text{ para o amplificador inversor.} \quad (3.19)$$

Também costumamos representar o módulo do ganho A_{CL} em dB, mas tome um cuidado: se por exemplo $A_{CL} = -10$, temos +20 dB de ganho e subentende-se que haverá inversão de sinal por ser um amplificador inversor. Note: o ganho neste caso **não é -20 dB**, pois -20 dB corresponderia a uma *atenuação* de 0,1 vezes!

3.3.1 Ganho em malha fechada do amplificador inversor

Para deduzir a expressão 3.18, vamos usar as duas simplificações adotadas na análise do amplificador não inversor.

- $I \cong 0$: como a impedância entre as entradas '+' e '-' é elevada, a corrente que passa por elas é desprezível
- $V_d \cong 0$: com ganho A_O infinito e assumindo que a saída não está saturada, a tensão diferencial V_d deve ser próxima de zero. Como V_+ é zero (está aterrado), o valor de V_- é aproximadamente zero.

Usando essas hipóteses, o circuito pode ser simplificado como mostra a Figura 3.7.

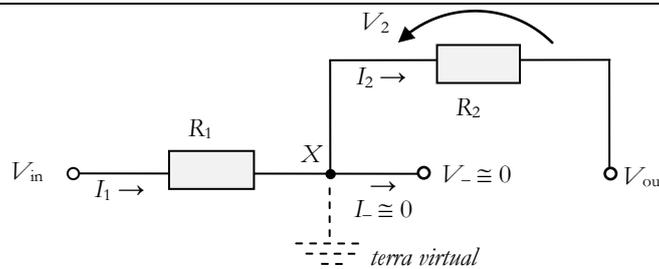


Figura 3.7 Circuito aproximado do amplificador inversor (para amp-op ideal)

Como a tensão no ponto X é próxima de zero, a corrente no resistor R1 será

$$I_1 = \frac{V_{in} - V_-}{R_1} \cong \frac{V_{in}}{R_1} \tag{3.20}$$

Desprezando L no nó X, temos que as corrente I1 e I2 são aproximadamente iguais, e portanto a tensão sobre resistor R2 pode ser aproximada por

$$V_2 = R_2 I_2 \cong R_2 \frac{V_{in}}{R_1} \tag{3.21}$$

Na Figura 3.7, a tensão V- é praticamente nula e temos que tensão de saída Vout pode ser expressa por

$$V_{out} = V_- - V_2 \cong 0 - R_2 \frac{V_{in}}{R_1} \tag{3.22}$$

Dessa forma, chega-se à expressão 3.18. Como no circuito anterior, a realimentação negativa e o ganho Ao elevado fazem com que a tensão de saída se ajuste automaticamente para manter a tensão diferencial de entrada Vd próxima de zero. Veja como isso funciona neste caso.

Se por algum motivo a tensão no ponto X tender a aumentar, Vd se tornará negativo e Vout instantaneamente diminuirá de modo a fazer a tensão no ponto X diminuir e fazer Vd voltar a zero.

3.3.2 Terra virtual

No circuito mostrado na Figura 3.6 (conhecido como configuração inversora), o ponto X é denominado terra virtual.

Esse ponto tem suas peculiaridades: a tensão nele é praticamente igual a zero. No entanto, o ponto não está conectado diretamente ao terra, e sim através da entrada de alta impedância do amp-op. Portanto praticamente nenhuma corrente passa do ponto X para a malha de terra do circuito.

Em um amp-op ideal, o ponto X tem tensão idealmente nula mas está idealmente isolado do terra.

O terra virtual é um conceito importante e aparecerá em outros circuitos.

3.3.3 Impedância de entrada do amplificador inversor

A Figura 3.8 esquematiza um circuito elétrico qualquer. Define-se a impedância de entrada Zin como sendo a impedância vista pela fonte de sinal Vin, que se traduz na corrente Iin que ela deve fornecer. Ou seja,

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \tag{3.23}$$

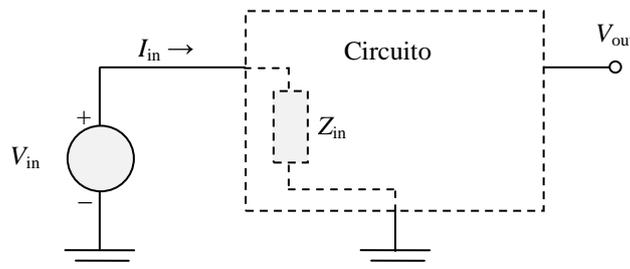


Figura 3.8 Impedância de entrada

No caso do circuito do amplificador inversor, temos que a corrente de entrada Iin será dada por I1, conforme mostra a Figura 3.7. Como o ponto X é um terra virtual, a impedância de entrada desse circuito deriva da equação 3.20 e é dada pela resistência R1.

Desta forma, podemos usar Zin como critério para dimensionar R1 (e depois definir R2 de acordo com o ganho ACL desejado). De forma semelhante ao caso do amplificador não inversor, R1 deve ser muito menor que a

resistência R_i de entrada do amp-op para que a corrente I sobre este último possa ser desprezada. E, como já vimos, o uso de os resistores comerciais é suficiente para atender esse critério.

Por outro lado, R_1 não deve ser muito baixo para que a corrente I_1 sobre ele fique abaixo da corrente máxima que a fonte V_{in} pode fornecer ou drenar.

Nos exercícios do pré-relatório, você encontrará um exemplo de como usar este critério.

3.3.4 Saturação do amplificador inversor

Quando a saída do circuito amplificador inversor (Figura 3.6) satura, não podemos mais considerar que a tensão diferencial de entrada (V_d) seja próxima de zero. Com a saída saturada, V_d pode ser estimada como se segue.

No caso do amplificador inversor, o ganho A_{CL} é **negativo**. Por isso, uma tensão de entrada muito negativa fará a saída saturar no limite superior V_{SH} , enquanto que uma entrada muito alta fará a saída saturar no limite inferior V_{SL} , como mostra a Figura 3.9. Lembrando que A_{CL} é **negativo**, em resumo temos

$$V_{in} < \frac{V_{SH}}{A_{CL}} \Rightarrow V_{out} = V_{SH}, \quad (V_{out} \text{ em saturação superior}). \quad (3.24)$$

$$V_{in} > \frac{V_{SL}}{A_{CL}} \Rightarrow V_{out} = V_{SL}, \quad (V_{out} \text{ em saturação inferior}). \quad (3.25)$$

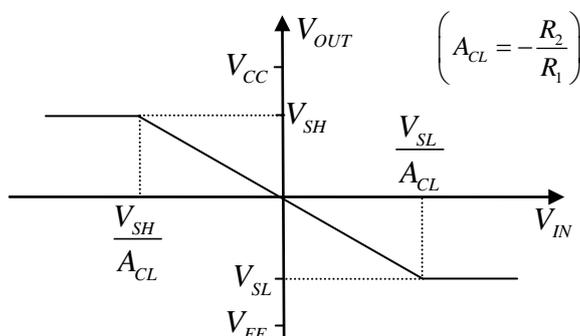


Figura 3.9 Curva de entrada e saída com saturação do amplificador inversor

No circuito de realimentação do amplificador inversor (Figura 3.7), o terra virtual deixa de existir na saturação e a tensão V_- passa a ser significativa. No entanto, a impedância de entrada do amp-op continua sendo elevada e podemos continuar desprezando a corrente I de entrada. Com isso, as correntes nos resistores ainda podem ser consideradas praticamente iguais e dadas por

$$I_1 \cong I_2 \cong \frac{V_{in} - V_{out}}{R_1 + R_2}, \quad (3.26)$$

e a tensão na entrada inversora pode ser calculada por

$$V_- = V_{in} - R_1 I_1 \quad (\text{ou equivalentemente, } V_- = V_{out} + R_2 I_2). \quad (3.27)$$

Como a entrada não inversora do amp-op está aterrada ($V_+ = 0$), tem-se que a tensão de erro é dada por

$$V_d = -V_-, \quad \text{no amplificador inversor.} \quad (3.28)$$

3.4 Terminologia

Alguns termos são usados para caracterizar um amp-op real.

- **Tensão de Offset de Entrada** Tensão diferencial que deve ser aplicada na entrada, ou seja, $(V_+ - V_-)$, para que a saída seja zero. No amp-op ideal, este valor deve ser zero.
- **Corrente de Offset de Entrada** Corrente drenada pelas entradas, ou seja, $(I_+ - I_-)$, quando a saída é zero. Esse valor é idealmente zero.
- **Ganho comum** (A_{CM}): ganho que se aplica a *tensão média* entre as duas entradas e que adiciona uma componente indesejada na saída, dada por $A_{CM}(V_+ + V_-)/2$. Idealmente, A_{CM} é zero
- **Razão de Rejeição de Modo Comum (CMRR)** Razão entre o ganho diferencial A_O e o ganho comum A_C . Como idealmente o ganho comum A_C é zero, em um amp-op ideal o CMRR seria infinito.
- **Máxima Excursão de Saída** Máxima amplitude de variação que a saída pode assumir sem saturação.

- **Ganho de tensão** É o valor de A_O , da ordem de 10^6 em amp-ops reais, e infinito em amp-ops ideais.
- **Banda de Potência Total** É a maior frequência na qual a máxima excursão de saída ainda é obtida. Para frequências maiores, o ganho diferencial A_O diminui drasticamente. Idealmente, a banda deveria ser infinita.
- **Banda de Ganho Unitário** Como o ganho A_O diminui com a frequência, em uma dada frequência o ganho cai para um ($A_O = 1$) e essa frequência determina a banda de ganho unitário.
- **Slew Rate** É a máxima taxa de variação de voltagem de saída. Um *slew rate* de $10 \text{ V}/\mu\text{seg}$, por exemplo, significa que é impossível variar a tensão de saída do amp-op a uma taxa superior a 10 V por μseg .

3.5 Cancelamento da tensão de *Offset*

Amp-ops costumam ser usados em circuitos de precisão, em que os níveis CC dos sinais não podem ser descartados. No entanto, os amp-ops apresentam imperfeições que geram uma tensão de saída não nula mesmo quando a tensão diferencial de entrada é zero, ou seja, quando as entradas + e - se encontram em curto. Equivalentemente, esse problema pode ser modelado por uma tensão muito baixa que se encontra internamente entre as entradas diferenciais, chamada *tensão de offset*.

Para compensar o desbalanceamento entre as entradas e zerar o *offset*, muitos amp-ops comerciais dispõem de terminais adicionais nos quais se pode conectar um potenciômetro – uma resistência que varia por meio de um ajuste mecânico. É o caso do amp-op TL081 que usaremos.

3.6 Materiais e equipamentos

3.6.1 Fonte simétrica

Como vimos na experiência anterior, a fonte de tensão do laboratório (Minipa MPC-3003D) possui duas saídas variáveis (que chamamos de V_N e V_P) e mais uma saída fixa de 5 V . Essas três saídas são eletricamente isoladas entre si, conforme ilustra a Figura 3.10. Lembrando ainda que os bornes verdes (centrais) das saídas variáveis estão conectados eletricamente ao chassi da fonte, que por sua vez está ligado ao pino de aterramento (terceiro pino) do plugue de alimentação – e NÃO É necessariamente o TERRA do circuito!

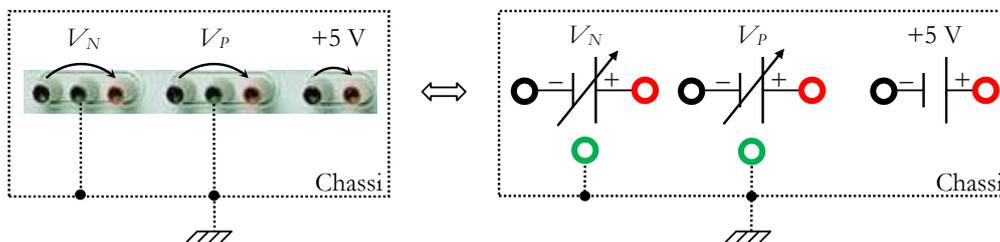


Figura 3.10 Isolação entre as saídas V_N , V_P (variáveis) e $+5 \text{ V}$ (fixa).

Para se alimentar um circuito com tensões diferentes é necessário interconectar as saídas adequadamente. Por exemplo, para se ter duas tensões positivas, deve-se interligar os terminais negativos (bornes pretos) das duas.

Nesta experiência, precisaremos de duas tensões SIMÉTRICAS: uma negativa e outra positiva. Para isso, é preciso conectar o terminal positivo com o negativo das saídas variáveis, como mostra a Figura 3.11. Com essa configuração, temos:

- a fonte da esquerda fornece a alimentação negativa V_{EE} ;
- a do meio, a alimentação positiva V_{CC} ;
- a fonte fixa de $+5 \text{ V}$ não será usada e por isso fica isolada das demais.

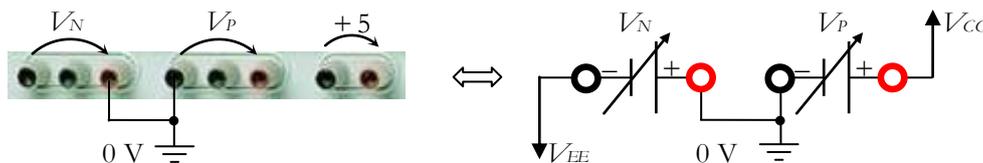


Figura 3.11 Configuração para alimentação negativa e positiva.

3.6.2 Amplificador Operacional TL081

O circuito integrado (CI) a ser utilizado nesta experiência é o TL081 (*datasheet* em anexo). A Figura 3.12 ilustra o encapsulamento e a numeração dos pinos do CI. O lado do pino 1 costuma ser indicada por um chanfro ou por um ponto.

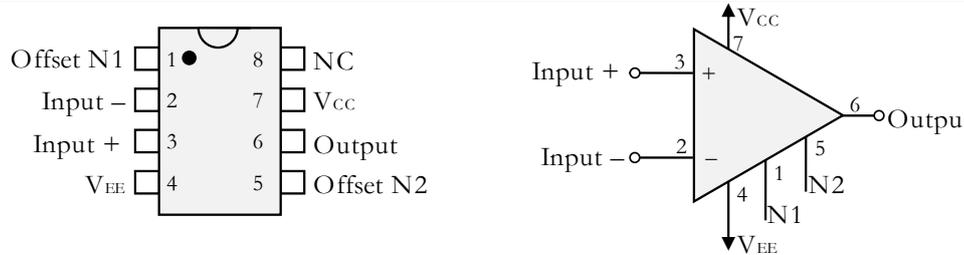
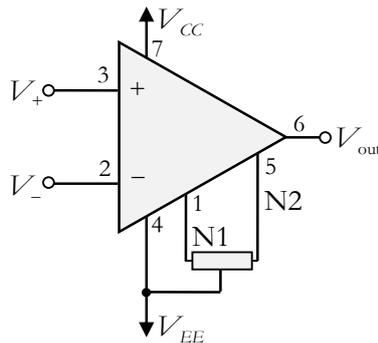


Figura 3.12 Amplificador operacional TL081

O pino 8 não é usado e por tem a indicação NC (não conectado). Note que no *datasheet* o pino 4 (alimentação negativa) está indicado como V_{CC^-} .

Os pinos N1 e N2 são destinados ao ajuste de offset de saída. Pelo *datasheet*, deve-se conectar entre esses pinos um potenciômetro com o terminal central ligado à alimentação negativa do amp-op, como mostra a Figura 3.13.

Figura 3.13 Circuito de ajuste de *offset*

3.6.3 Potenciômetro

Usaremos o potenciômetro de filme de carbono mostrado na Figura 3.14. Ajusta-se a resistência entre o terminal central e os outros dois terminais de 0 a 100% girando-se o parafuso plástico.

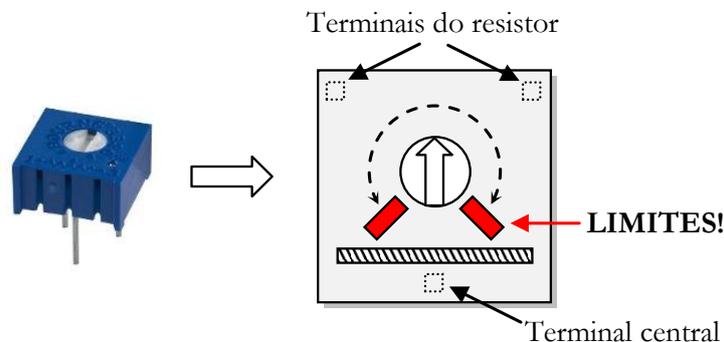


Figura 3.14 Potenciômetro

ATENÇÃO: O parafuso NÃO GIRA uma volta completa e há marcas indicando os limites de giro da fenda. O potenciômetro é MUITO delicado! Gire o parafuso devagar e NÃO FORCE!

3.7 Pré-Relatório e Relatório

A Parte B da apostila contém dois tipos de itens que você deverá responder:

- **Exercícios:** constituem o *pré-relatório*; podem ser feitos antes da aula, mas recomendamos que sejam feitos com antecedência para que se possa aproveitar melhor o tempo no laboratório.
- **Anotações:** devem ser feitas individualmente *durante* a aula e constituem o *relatório*.

ATENÇÃO: leia as atividades da PARTE B e não apenas os enunciados dos exercícios do pré-relatório

Muitos detalhes necessários para fazer os exercícios estão descritos nas atividades em que se inserem. Além disso, você já terá uma noção do que deverá fazer e perderá menos tempo com a leitura durante a aula.