

Experiência 5 Amplificador Operacional

Esta experiência aborda o funcionamento do transistor de junção bipolar.

- Estude a apostila, faça os **exercícios** e tire dúvidas com os professores com antecedência.
- **Traga** para a aula a Parte B (Prática) **impressa em papel**.
- Haverá uma **prova escrita** no início da aula. **Chegue pelo menos 10 minutos antes**.

REVISE os tópicos a seguir:

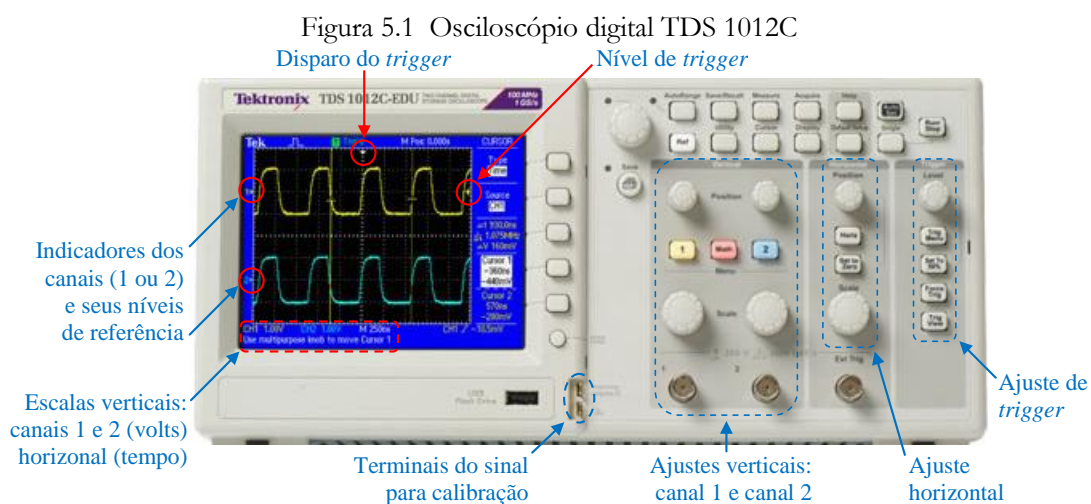
- Amplificadores não inversor e inversor (apostila D01)
- Saturação (apostila D02)

DATASHEET: consulte também o *datasheet* do amp-op integrado TL081, disponível em anexo.

PARTE A MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Osciloscópio Digital

A Figura 5.1 mostra os principais indicadores do painel do osciloscópio digital TDS 1012C.



REVISE os seguintes tópicos nas apostilas das experiências anteriores:

- Seleção, ajuste e atenuação dos canais 1 e 2.
- Diferença e uso do acoplamento AC e DC.
- Funcionamento do sistema de *trigger*.
- Calibração das pontas de prova
- Recomendações e cuidados, principalmente com relação aos pontos de terra.

5.2 Fonte Simétrica

A figura 5.2 mostra o painel da fonte de tensão Minipa MPC-3003D, disponível no laboratório.

REVISE os seguintes tópicos nas apostilas das experiências anteriores:

- Descrição das saídas variáveis V_N e V_P e da saída fixa “5 V”.
- Exibição de corrente ou tensão no mostrador (chave “AMPS/VOLTS”).
- Limitação de corrente (botões “CURRENT”).
- Modos de operação das saídas variáveis (botões “TRACKING”).

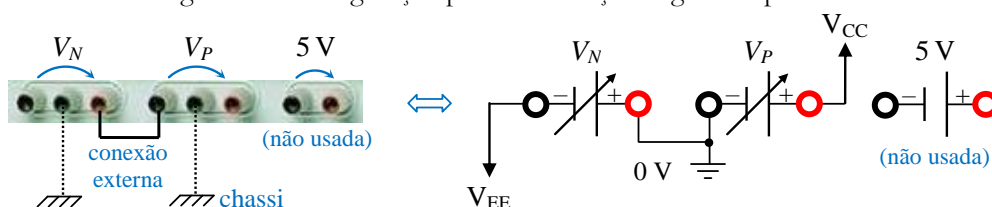
Figura 5.2 Fonte de tensão Minipa MPC-3003D.



As três saídas da fonte são *isoladas*, o que significa que os bornes de cada conjunto não estão eletricamente interligados.

- **Fontes Simétricas:** nesta experiência, precisaremos de duas tensões simétricas – uma negativa e outra positiva, de mesma amplitude. Para isso, é preciso conectar o terminal positivo com o negativo das saídas variáveis, como mostra a figura 5.3.

Figura 5.3 Configuração para alimentação negativa e positiva.



Com essa configuração, temos:

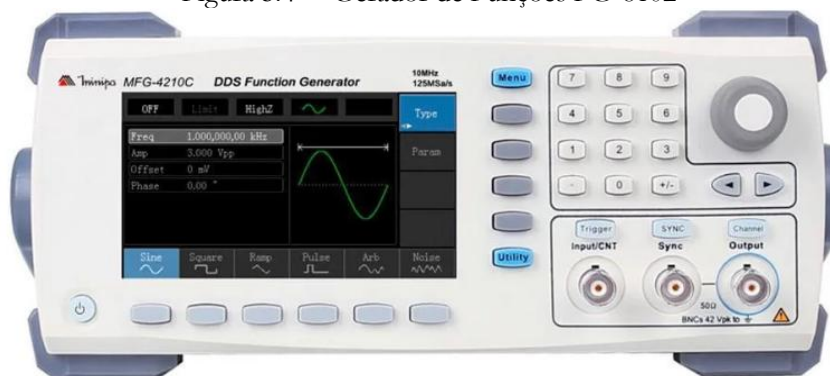
- a fonte V_N fornece a alimentação negativa V_{EE} .
- a fonte V_P , a alimentação positiva V_{CC} .

ATENÇÃO: os bornes negativos das saídas V_N e V_P são os da esquerda (pretos), e os bornes positivos são os da direita (vermelhos). Entre eles se encontram os bornes ligados ao chassi da fonte (verdes), que não serão usados. Confira na figura 5.3.

5.3 Gerador de Funções

A figura 5.4 mostra o painel frontal do gerador de funções Minipa MFG-4210C, disponível no laboratório.

Figura 5.4 Gerador de Funções FG-8102



REVISE a descrição do gerador nas apostilas das experiências anteriores.

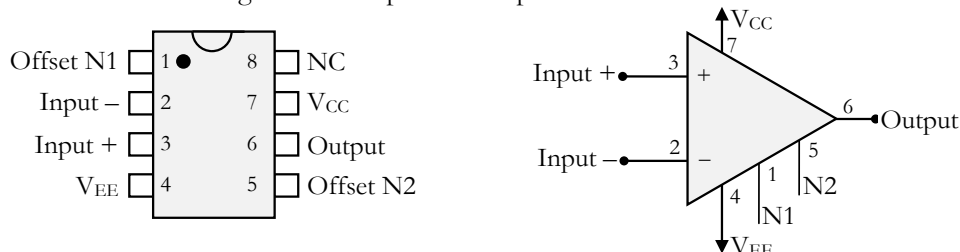
NOTA: o painel mostra apenas uma ilustração da forma do sinal. Para observar o sinal gerado, é necessário usar o osciloscópio.

5.4 Amplificador Operacional TL081

5.4.1 Encapsulamento e Pinagem

O circuito integrado (CI) a ser utilizado nesta experiência é o TL081 (*datasheet* em anexo). A figura 5.5 ilustra o encapsulamento e a numeração dos pinos do CI. O lado do pino 1 costuma ser indicada por um recorte rebaixado ou por um ponto.

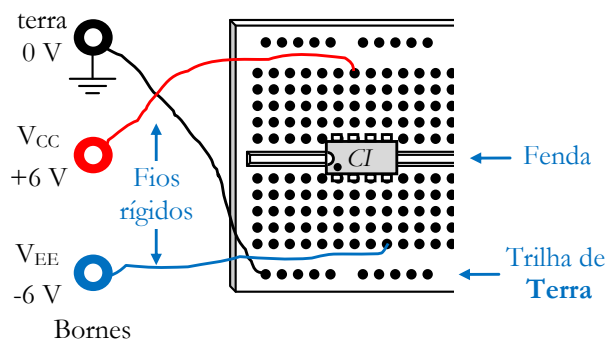
Figura 5.5 Amplificador operacional TL081.



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}⁻”.

A figura 5.6 ilustra como o TL081 será montado e alimentado no *protoboard*.

Figura 5.6 Montagem do amp-op TL081 na barra de *protoboard*.



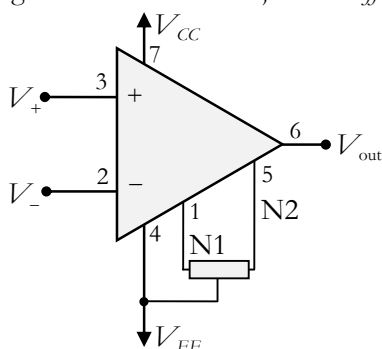
Use a trilha horizontal inferior como terra do circuito, já que haverá vários pontos do circuito ligados a ele. As tensões de alimentação V_{CC} e V_{EE} podem ser ligadas diretamente aos pinos correspondentes do TL081.

5.4.2 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. 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.

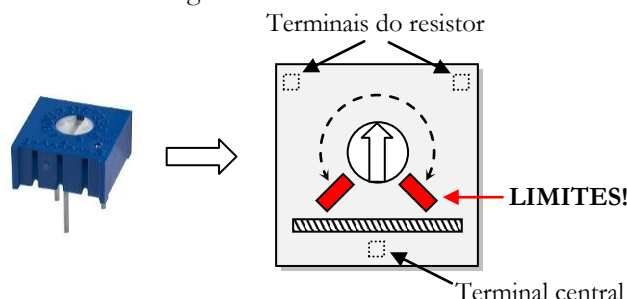
Os pinos N1 e N2 são destinados ao ajuste de *offset* de saída. O *datasheet* recomenda conectar entre esses pinos um potenciômetro com o terminal central ligado à alimentação negativa do amp-op, como mostra a figura 5.7.

Figura 5.7 Circuito de ajuste de *offset*.

5.5 Potenciômetro

Usaremos o potenciômetro de filme de carbono mostrado na figura 5.8. Ajusta-se a resistência entre o terminal central e os outros dois terminais de 0 a 100% girando-se o parafuso plástico.

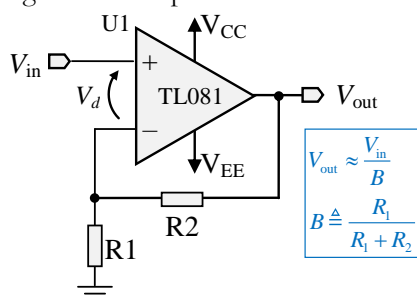
Figura 5.8 Potenciômetro.



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!

5.6 Circuito Amplificador Não Inversor

Figura 5.9 Amplificador não inversor.

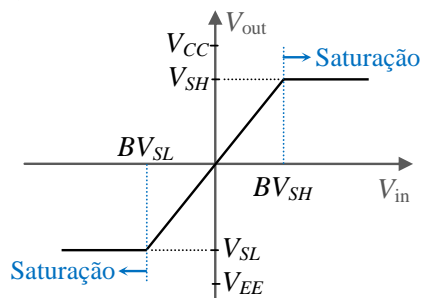
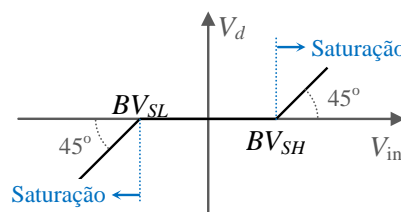


A Figura 5.9 mostra o circuito do amplificador não inversor que será montado, usando o amp-op TL081. Usaremos a seguinte configuração: $R_1 = R_2 = 2k\Omega$, $V_{CC} = +6\text{ V}$, $V_{EE} = -6\text{ V}$.

NOTA: não usaremos o potenciômetro de ajuste de *offset* nessa montagem. O correto seria zerar o *offset* ANTES de usar o circuito, mas veremos como fazer isso por último em caráter ilustrativo. Como estamos usando sinais de amplitude considerável, o erro de *offset* será desprezível.

Como mostra a figura 5.10a, desde que a tensão de saída V_{out} não sature, o amplificador opera em regime linear e a saída V_{out} acompanha a entrada V_{in} , multiplicada pelo ganho em malha fechada ($1/B$, neste caso). Nessa condição, a realimentação negativa ajusta a saída para que tensão diferencial V_d seja praticamente nula, como mostra a figura 5.10b. Como diferença entre as tensões nas entradas não inversora (+) e inversora (-) é praticamente zero, temos entre elas o chamado *curto-circuito virtual*.

Figura 5.10 Saída e entrada diferencial do amplificador não inversor em função da entrada.

a) Saída V_{out} × entrada V_{in} b) Entrada diferencial V_d × entrada V_{in} 

Quando a amplitude da tensão de entrada excede a faixa de operação linear, a tensão de saída não acompanha mais a entrada e satura nos limites impostos pelas tensões de alimentação: V_{SH} (saturação superior) ou V_{SL} (saturação inferior).

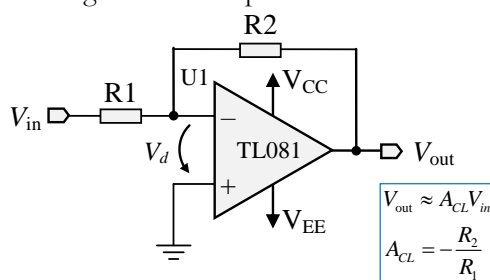
Nessa condição, a entrada diferencial V_d não é mais nula, e temos

$$V_{in} \leq BV_{SL} \Rightarrow V_{out} = V_{SL} \text{ e } V_d = V_{in} - BV_{SL} \text{ (saturação inferior),} \quad (5.1)$$

$$V_{in} \geq BV_{SH} \Rightarrow V_{out} = V_{SH} \text{ e } V_d = V_{in} - BV_{SH} \text{ (saturação superior).} \quad (5.2)$$

5.7 Circuito Amplificador Inversor

Figura 5.11 Amplificador inversor.

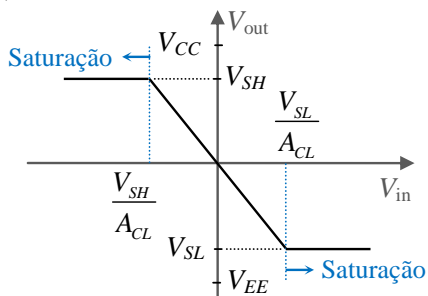
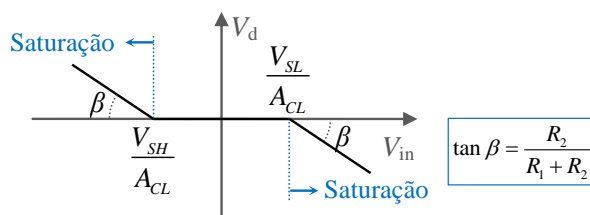


Vamos montar e testar um amplificador inversor mostrado na figura 5.9, com a seguinte configuração: $R_1 = 2k\Omega$, $R_2 = 5k\Omega$, $V_{CC} = +6V$, $V_{EE} = -6V$, inicialmente SEM o potenciômetro de ajuste de *offset*.

Desde que a tensão de saída V_{out} não sature, o amplificador opera em regime linear e a saída V_{out} acompanha, com *sinál invertido*, a entrada V_{in} , uma vez que ganho em malha fechada vale $-R_2/R_1$. Nessa condição, a realimentação negativa ajusta a saída para que tensão diferencial V_d seja praticamente nula, como mostra a figura 5.10b.

Como a tensão na entrada inversora ('-') é próxima de zero, temos nessa entrada o chamado *terra virtual*. Com isso, o resistor R_1 fica aterrada e a corrente fornecida pela fonte de sinal de entrada V_{in} vale V_{in}/R_1 . Portanto, a resistência de entrada do circuito, vista pela fonte V_{in} , é igual a R_1 .

Figura 5.12 Saída e entrada diferencial do amplificador inversor em função da entrada.

a) Saída V_{out} × entrada V_{in} b) Entrada diferencial V_d × entrada V_{in} 

Quando a amplitude da tensão de entrada excede a faixa de operação linear, a tensão de saída não

acompanha mais a entrada e satura nos limites impostos pelas tensões de alimentação: V_{SH} (saturação superior) ou V_{SL} (saturação inferior).

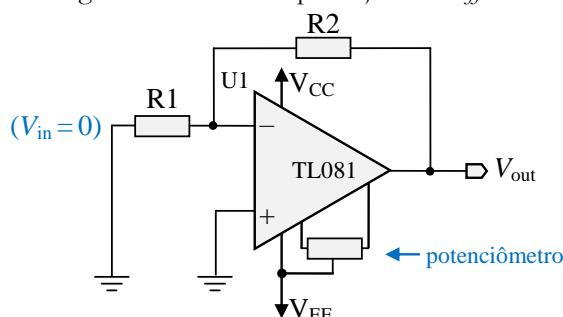
Nessa condição, a entrada diferencial V_d não é mais nula, e temos

$$V_{in} < \frac{V_{SH}}{A_{CL}} \Rightarrow V_d = -\frac{R_2 V_{in} + R_1 V_{SH}}{R_1 + R_2} \quad (\text{saturação superior}), \quad (5.3)$$

$$V_{in} > \frac{V_{SL}}{A_{CL}} \Rightarrow V_d = -\frac{R_2 V_{in} + R_1 V_{SL}}{R_1 + R_2} \quad (\text{saturação inferior}). \quad (5.4)$$

5.8 Ajuste de *Offset*

Figura 5.13 Circuito para ajuste de *offset*.



Vamos incluir o potenciômetro de ajuste de *offset* no amplificador inversor como mostra a figura 5.13, mantendo os resistores e as tensões de alimentação do circuito anterior.

NOTA: o correto seria ter feito esse procedimento antes de usar tanto o amplificador não inversor com o amplificador inversor.

5.9 Pré-Relatório e Relatório

O formulário que se encontra na PARTE B da apostila constitui tanto o pré-relatório como o relatório desta experiência. Existem dois tipos de itens que você deverá responder:

- **Exercícios:** constituem o *pré-relatório* e devem ser feitos *antes* da aula. Faça os exercícios a lápis. Eles deverão ser conferidos e corrigidos durante a aula.
- **Anotações:** devem ser feitas em grupo *durante* a aula.

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.

Algumas respostas dos exercícios da parte B

Exercício 2) $A_{CL} = 2 \text{ V/V}$ (6 dB).

Exercício 3) I_1 máximo: 1,1 mA.

Exercício 4) ($V_{in} = -4 \text{ V}$) $V_d = -1,25 \text{ V}$; ($V_{in} = 4 \text{ V}$) $V_d = 1,25 \text{ V}$.

Exercício 6) $A_{CL} = -2,1 \text{ V/V}$ (6,3 dB).

Exercício 7) $Z_{in} = 2\text{k}\Omega$; $I_{inMáx} = 0,37 \text{ mA}$.

Exercício 8) ($V_{in} = -4 \text{ V}$) $V_d = 0,91 \text{ V}$; ($V_{in} = 4 \text{ V}$) $V_d = -0,91 \text{ V}$.