

Experiência 4 TRANSISTOR BIPOLAR

Equation Chapter 4 Section 1 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:

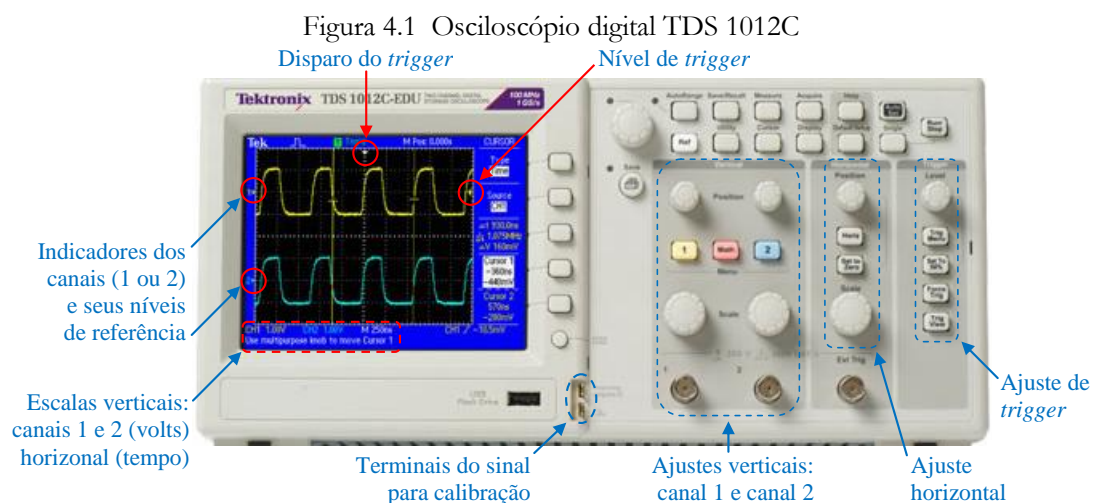
- Circuito emissor comum com transistor NPN (apostila C06)
- Circuito de acionamento de led com transistor NPN (apostila C06)
- Amplificador classe A (apostila C07)

DATASHEET: consulte também o *datasheet* do transistor 2N2222, disponível em anexo.

PARTE A MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Osciloscópio Digital

A Figura 4.1 mostra os principais indicadores do painel do osciloscópio digital TDS 1012C.



REVISE os seguintes tópicos na apostila da experiência anterior:

- 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.

4.2 Fonte Tripla de Tensão

A Figura 4.2 mostra o painel frontal da fonte de tensão Minipa MPC-3003D e seus principais elementos. Pode-se dizer que ela é composta por três fontes independentes.

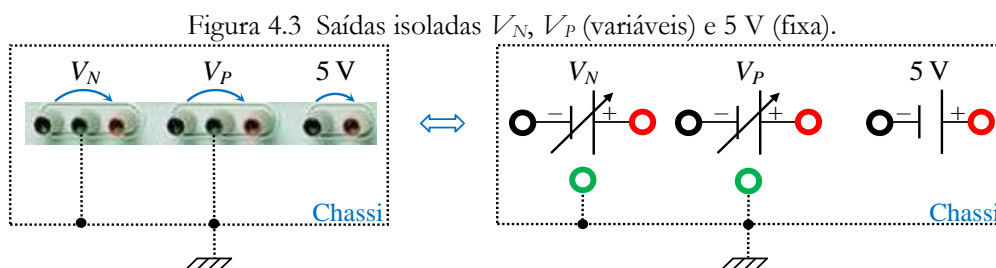
- **Saídas Variáveis:** as duas saídas indicadas por V_N e V_P fornecem tensões variáveis, ou seja, com valor de tensão e limite de corrente de saída ajustáveis.
- **Saída Fixa de 5 V:** a terceira saída fornece 5 V de tensão, também chamada de *saída TTL*.

Figura 4.2 Fonte de tensão Minipa MPC-3003D



4.2.1 Saídas Isoladas

As três saídas são *isoladas*, o que significa que os bornes negativos (pretos) de cada conjunto não estão eletricamente interligados (*não estão em curto*), o mesmo acontece com os bornes positivos (vermelhos). A Figura 4.3 ilustra a correspondências entre os bornes das saídas com três fontes de tensão separadas.



- **Chassi e Aterramento:** os bornes verdes (centrais) das saídas variáveis estão conectados ao chassi da fonte, representado na Figura 4.3 pelo símbolo “ \equiv ”. Por sua vez, o chassi está ligado ao pino de aterramento (terceiro pino) do cabo de alimentação do equipamento.

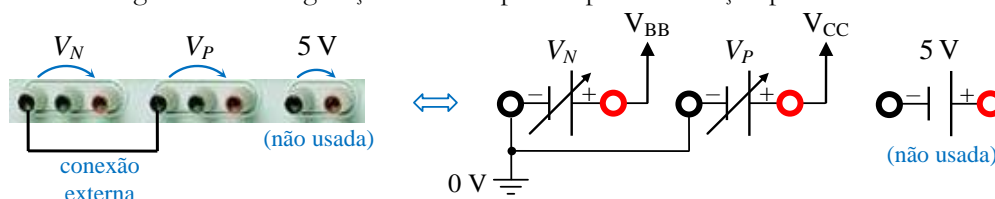
LEMBRE-SE: o aterramento *não é* a mesma coisa que o *terra* do seu circuito. O *aterramento* faz parte da malha de proteção elétrica do prédio, enquanto que o *terra* (ou GND) é o ponto do circuito adotado como referencial para medidas de tensão (ao qual se atribui tensão nula).

Por serem isoladas, as saídas podem alimentar partes diferentes de um mesmo circuito livremente. No entanto, na prática é mais comum interconectar as saídas para se ter tensões relativas umas às outras.

Exemplo 4.1 Fonte positiva dupla.

Nesta experiência, precisaremos de duas tensões positivas (a fonte fixa de 5 V não será usada). Como mostra a Figura 4.4, os terminais negativos devem ser interligados para que as duas saídas variáveis tenham o mesmo referencial, e que será adotado como *terra* do circuito.

Figura 4.4 Configuração da fonte para dupla alimentação positiva.

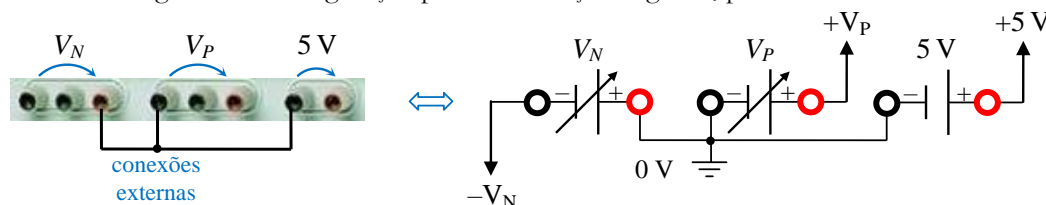


Fontes negativa, positiva e fixa.

A Figura 4.5 mostra uma configuração muito usada.

- A saída da esquerda fornece tensões negativas ($-V_N$);
- A saída do meio, tensões positivas ($+V_P$);
- A saída fixa fornece 5 V de tensão.

Figura 4.5 Configuração para alimentação negativa, positiva e fixa 5 V.



As três saídas são interconectadas para terem um referencial comum. Para que a primeira saída seja negativa com relação às outras duas, liga-se o terminal positivo desta aos terminais negativos das demais.

Saídas simétricas.

Tensões de mesma amplitude e sinais contrários são chamadas de *tensões simétricas*. Caso V_N e V_P sejam ajustadas para terem o mesmo valor na Figura 4.5, as saídas $-V_N$ e $+V_P$ serão simétricas.

Em particular, a fonte Minipa MPC-3003D permite configurar as saídas variáveis para que permaneçam iguais (*modo série*), como veremos a seguir.

4.2.2 Ajustes das Saídas Variáveis

Os mostradores do painel mostram o valor da corrente **ou** da tensão fornecidas pelas fontes variáveis, conforme a posição das chaves deslizantes que se encontram entre eles: AMPS ou VOLTS.

Os botões redondos VOLTAGE servem para ajustar as tensões de saída V_N e V_P . Já os botões CURRENT servem para estabelecer **limites** para as correntes fornecidas – se um dos leds vermelhos CC acender, significa que o limite foi ultrapassado e a fonte desligou a saída automaticamente para protegê-la. Por isso, quando for usar uma fonte variável, **NÃO ZERE** totalmente o botão CURRENT dela.

A forma com que as tensões são ajustadas depende da configuração dos dois pequenos botões verdes que se encontram no centro do painel (acima da palavra “TRACKING”).

- **Modo independente:** ambos desapertados. V_N e V_P podem ser ajustadas separadamente pelos respectivos botões CURRENT e VOLTAGE. Esta será a configuração que usaremos na experiência.
- **Modo série:** esquerdo apertado e o direito solto. Ambas as saídas fornecem a mesma tensão ($V_N = V_P$), ajustável pelo botão VOLTAGE da direita (*master*) e o da esquerda (*slave*) fica desativado. Os limites de corrente de V_N e V_P continuam a ser ajustados separadamente pelos respectivos botões CURRENT. Isso é usado para se ter uma fonte *simétrica* ($-V$ e $+V$), mas deve-se ainda ligar o borne positivo de V_N ao borne negativo de V_P .
- **Modo paralelo:** ambos apertados. As fontes se comportam como uma só ($V_N = V_P$), obedecendo aos botões VOLTAGE e CURRENT de V_P (*master*). Com isso, consegue-se o dobro da capacidade de corrente.

4.3 Gerador de Funções

O gerador de funções é um equipamento de testes utilizado para injetar sinais em circuitos eletrônicos. No laboratório, dispomos do gerador Minipa MFG-4210C.

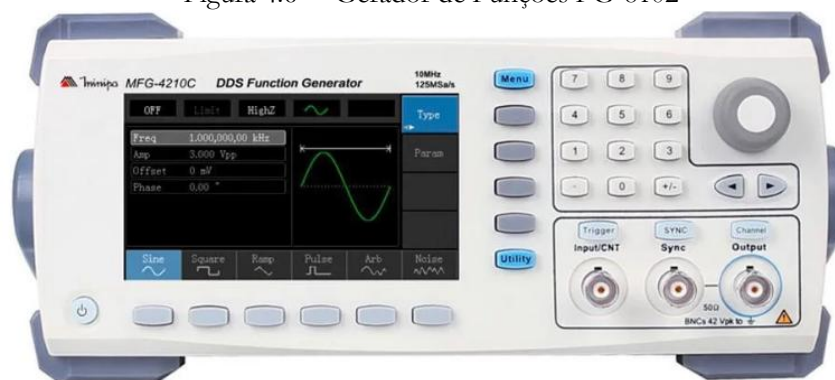
Note que há dois conectores BNC de saída à direita do gerador de funções. A indicação “50 Ω ” próxima a elas se refere à *impedância de saída*, ou seja, o valor da resistência em série com um gerador de sinal ideal hipotético.

- **Sync:** pulsos sincronizados com o início de cada período da forma de onda selecionada.
- **Output:** tensão de saída da forma de onda.

Nesta experiência, usaremos apenas a saída *Output*. O painel contém também um conector BNC de entrada de sincronismo, indicado por “Input/CNT”, que também não será usado.

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

Figura 4.6 Gerador de Funções FG-8102

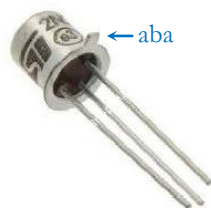


4.4 Transistor 2N2222

Nesta experiência utilizaremos o transistor NPN 2N2222, com encapsulamento metálico padrão TO18, que confere robustez e boa dissipação de potência. A Figura 4.7 mostra alguns detalhes.

Figura 4.7 Transistor 2N2222 em encapsulamento TO18.

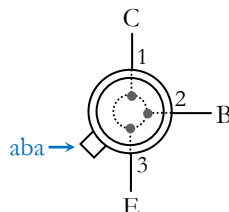
a) Imagem ilustrativa



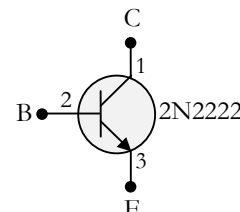
b) Vista lateral



c) Vista superior



d) Símbolo



O invólucro metálico possui uma pequena aba metálica na base, que fica próximo do pino 3 (emissor). Para montar o transistor no circuito, guie-se por ela.

Vamos precisar de alguns parâmetros que se encontram no *datasheet* em anexo. Vamos adotar os valores tabelados para a condição mais próxima da operação dos circuitos que montaremos. Ou seja,

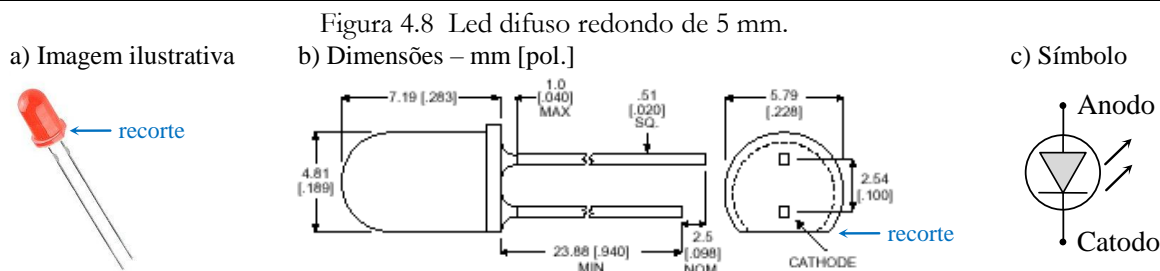
- o Corrente de coletor I_C da ordem de 10 mA; e
- o Tensão coletor-emissor V_{CE} de 10 V.
- o Temperatura do encapsulamento (T_{case}) de 25 °C.

Como esses parâmetros serão usados para estimar algumas correntes e tensões do circuito (fazer continhas), podemos também adotar números aproximados, tomando os valores das tabelas como referência de ordem de grandeza.

- **Tensão coletor-emissor de saturação** (V_{CEsat}): a condição $I_C = 150$ mA e $I_B = 15$ mA da tabela corresponde a uma forte saturação (ganho de corrente forçado de apenas 10 vezes), mas é mais próxima que a outra disponível. Vamos adotar $V_{CEsat} = 0,3$ V, mas como é um limite máximo, provavelmente será menor.
- **Tensão base-emissor de saturação** (V_{BEsat}): na mesma condição anterior ($I_C = 150$ mA e $I_B = 15$ mA), o valor mínimo é de 0,6 V. Como nos nossos circuitos essas corrente serão bem menores, vamos adotar $V_{BEsat} = 0,6$ V.
- **Ganho de Corrente** (β ou h_{FE}): vai de 75 a 300 A/A; vamos adotar $\beta = 200$.

4.5 Diodo Emissor de Luz

Usaremos um *led* (*Light Emission Diode*) de 5 mm, de lente plástica redonda e emissão luminosa difusa. São leds de baixo custo, com baixa eficiência luminosa, muito usados em sinalização de painéis. A Figura 4.8 mostra alguns detalhes do led.

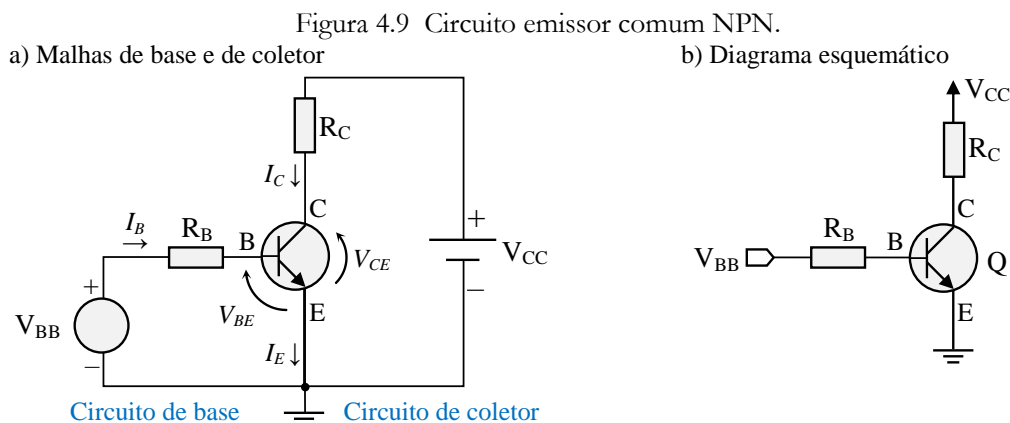


A lente plástica tem um recorte lateral para indicar o lado do terminal de catodo (negativo).

Usaremos um led vermelho, comprimento de onda de 615 a 625 nm, feitos de arsenieto de gálio (GaAs). Para que acendam com razoável brilho, devem conduzir entre 10 a 20 mA de corrente direta. A tensão de condução direta (V_F) é de 1,8 a 2 V.

4.6 Transistor NPN e Circuito Emissor Comum

A Figura 4.9 mostra o primeiro circuito a ser montado e testado nesta experiência.

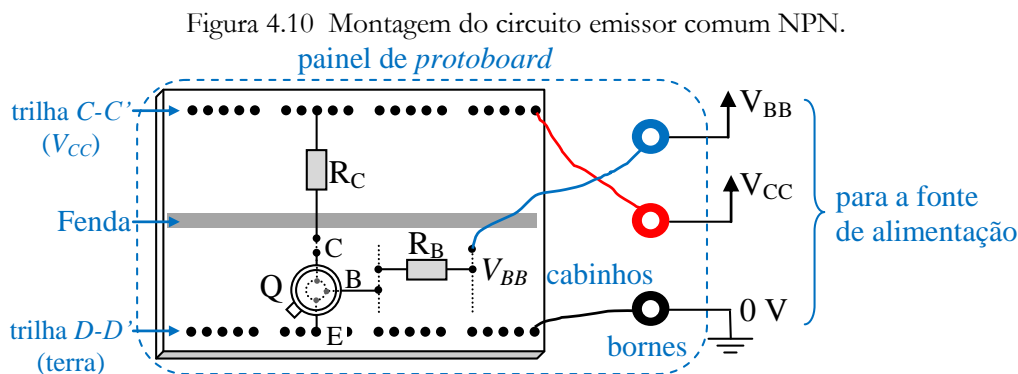


O transistor Q será o 2N2222. Para o projeto do circuito, foram adotados os parâmetros β , V_{CEsat} e V_{BEsat} descritos anteriormente (seção 4.4).

Os resistores serão: $R_B = 39 \text{ k}\Omega$ (ou 39k) e $R_C = 470 \Omega$ (ou 470R), ambos de 5% de precisão e 1/4 W de potência.

A tensão de alimentação V_{CC} será de 12 V e a tensão do circuito de base V_{BB} será variada para observar o comportamento do transistor. Essas tensões serão fornecidas pelas saídas variáveis da fonte Minipa MPC-3003D. Para tanto, elas devem ser conectadas conforme descrito no Exemplo 4.1 (seção 4.2.1), em *modo independente* (os dois botões “Tracking” devem ficar desapertados).

A Figura 4.10 mostra como montar o circuito no *protoboard*. Repare que o circuito de base vai ficar à direita do transistor (Q). Olhando o transistor de cima, a aba metálica ficará na posição mostrada na figura (entre “6 e 9 horas”), com a base (B) no meio, o coletor (C) acima e o emissor (E) abaixo. Visualmente o circuito ficará semelhante ao diagrama, mas espelhado.



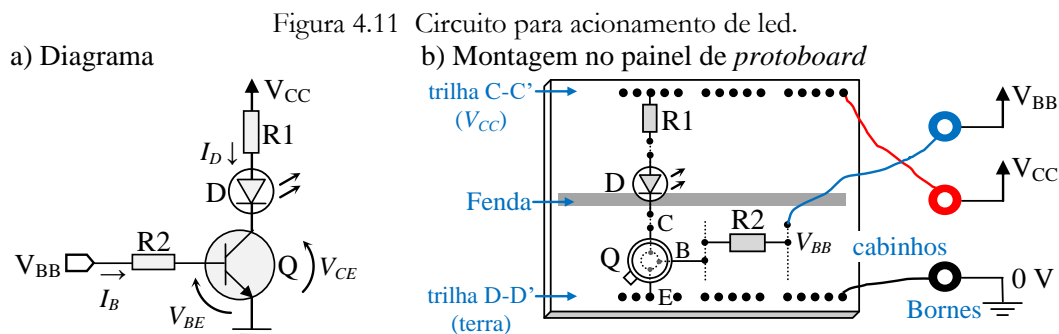
Para reduzir o uso de cabinhos, aproveitaremos os próprios terminais metálicos dos componentes para fazer as conexões, mas é preciso saber claramente quais trilhas do *protoboard* estão em curto e quais não estão. Por exemplo:

- O terminal de emissor (E) está inserido num furo da trilha de terra (D-D'), e *não* na mesma trilha vertical em que está o terminal de coletor (C), para que não fiquem em curto.
- O terminal do coletor e o inferior do resistor R_C estão em furos da mesma trilha vertical para que fiquem em contato.

Convém que você posicione o painel de *protoboard* com o lado dos bornes de conexão voltado para a sua direita. Use cabinhos de cores diferentes para fazer as conexões entre os bornes e o circuito: vermelho para V_{CC} , preto para o terra (0 V), e outra cor para V_{BB} .

4.7 Acionamento de Led

Vamos aproveitar o circuito anterior para acender um led por meio da tensão V_{BB} . A Figura 4.11 mostra o diagrama esquemático do circuito final e a forma de montá-lo no *protoboard*.



O transistor Q (2N2222) e a tensão de alimentação V_{CC} (12 V) foram mantidas.

O diodo D é um led vermelho difuso de 5 mm, descrito anteriormente. A corrente nominal de acionamento é de 20 mA, com tensão nominal de 2 V.

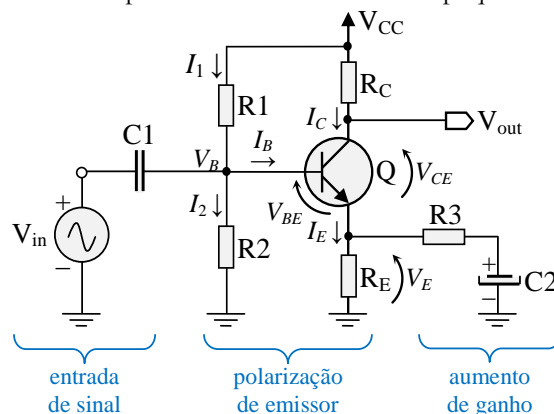
O circuito deve deixar o transistor Q em *saturação fraca* (corrente de base I_B cinco vezes maior que a corrente de limiar de saturação) e acender o led com V_{BB} igual a 5 V.

Devido a essas especificações, juntamente com os parâmetros β , V_{CEsat} e V_{BEsat} do transistor dados na seção 4.4, os resistores são: $R_1 = 470 \, \Omega$ (ou 470R) e $R_2 = 8,2 \, k\Omega$ (8k2), ambos de 5% e 1/4 W.

4.8 Amplificador Classe A

A Figura 4.12 mostra o circuito completo do amplificador, que será montado e testado por partes.

Figura 4.12 Amplificador NPN classe A de pequenos sinais.



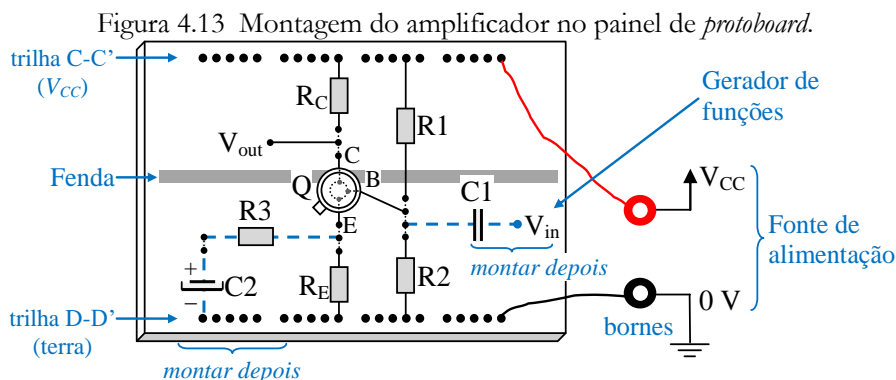
Para o projeto do amplificador, foi adotada a frequência nominal de 10 kHz (f_{nom}).

O transistor Q é o mesmo usado nos circuitos anteriores (2N2222), mantendo-se os parâmetros β , $V_{CE\text{sat}}$ e $V_{BE\text{sat}}$ descritos anteriormente (seção 4.4). A tensão de alimentação V_{CC} (12 V) também é a mesma.

Os resistores do circuito de polarização de emissor são: $R_C = 4\text{k}\Omega$; $R_E = 1\text{k}\Omega$; $R_1 = 8\text{k}\Omega$ e $R_2 = 1\text{k}\Omega$, de 5% de precisão e 1/4 W de potência.

Para operação em CA, os componentes são: $C_1 = 100\text{ kF}$ (nF); $C_2 = 22\text{ uF}$ (μF); $R_3 = 470\Omega$.

A Figura 4.13 ilustra como o circuito será montado no laboratório. O transistor Q deve ser montado com a base para a direita, coletor acima e emissor abaixo (guie-se pela aba metálica), e o circuito ficará espelhado com relação ao diagrama da Figura 4.12.



O circuito será testado inicialmente em modo CC, e por isso montaremos apenas o circuito de polarização de emissor. Os componentes que atuam apenas em modo CA (em tracejado) podem ser montados depois: o capacitor C_1 de entrada de sinal, e o capacitor C_2 e o resistor R_3 de aumento de ganho.

O sinal de entrada V_{in} será injetado no terminal do capacitor C_1 . O gerador de funções descrito anteriormente fornecerá o sinal senoidal V_{in} .

4.9 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

Exercício 2 b) $I_C = 8,51\text{ mA}$; $V_{BB} = 2,26\text{ V}$.

Exercício 5 a) $V_{CE} = 12\text{ V}$; $I_D = I_C = 0$. b) $V_{CE} = 0,3\text{ V}$; $I_D = 20,54\text{ mA}$; $I_B = 0,537\text{ mA}$; $I_B/I_{B\text{lim}} = 5,2$ (fraca). c) $V_B = 1,45\text{ V}$.

Exercício 7 a) $V_B = 1,86\text{ V}$; $V_E = 1,26\text{ V}$. b) $I_E = I_C = 1,26\text{ mA}$. c) $V_{CE} = 4,48\text{ V}$. d) $I_B = 6,28\text{ }\mu\text{A}$ ($I_B/I_1 = 0,51\%$).

Exercício 9 g) $13,8\text{ V/V}$ ($r_E = 320\text{ m}\Omega$; $V_T = 257\text{ mV}$)