

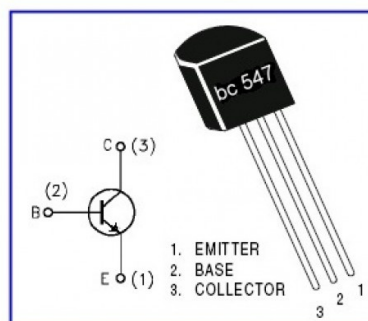
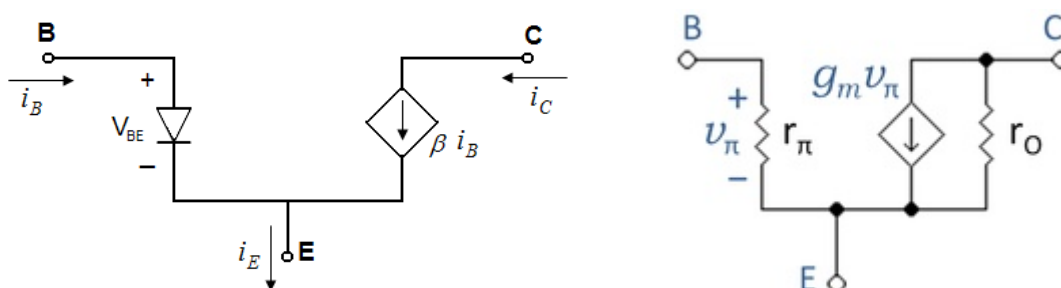
**Introdução**

Este trabalho de laboratório é dedicado ao estudo de amplificadores realizados com transistores bipolares (BJT - "bipolar junction transistor"). O transistor utilizado é o de polaridade **npn**. Os dispositivos reais são da série BC546/7/8/9, B ou C. A diferença significativa entre eles é que os transistores 'C' têm *ganho de corrente*  $\beta$  superior aos 'B'. No entanto, para cálculos aproximados, pode considerar  $\beta=h_{fe}=h_{FE}=400$ . Na prática, o  $\beta$  varia muito com o lote de fabrico e com a temperatura, entre outros factores.

Os amplificadores amplificam sinais variáveis no tempo: em corrente, tensão, ou em potência. Os BJTs com funções de amplificação deverão estar polarizados (e "centrados") na *zona activa* para não criarem distorção excessiva no sinal de saída.

Para analisar ou projectar amplificadores, realizam-se duas etapas: (1) **a polarização**, para colocar os transistores na zona activa (a polarização do transistor é também denominada de PFR – ponto de funcionamento em repouso, ou ponto quiescente), usando o modelo de sinais fortes do transistor; (2) **a análise incremental**, ou de sinais fracos, assenta em modelos incrementais dos transistores (os modelos híbrido ou pi-híbrido) e estuda os parâmetros relacionados com amplificação – níveis de impedância e ganhos, essencialmente.

Os modelos de sinais fortes (para a polarização) e incremental (variante pi-híbrido) **do transistor npn na zona activa (ZA)** encontram-se na figura. O pin-out do BC54X também.



Para além da zona activa, as outras principais zonas de funcionamento do transistor bipolar são a *zona de saturação* e a *zona de corte*. Não têm habitualmente aplicação em amplificadores (a não ser que o projecto esteja errado).

Na polarização, se o transistor npn estiver na ZA então teremos  $V_{BE} \sim 0.7 \text{ V}$ ,  $I_C = \beta I_B$  e  $V_{CE} > 0.3 \text{ V}$  (mas menor que  $V_{CC}$ ). Caso estas condições não se verifiquem, o transistor não se encontra na ZA. Os sentidos das correntes no transistor mostrados na figura correspondem a valores positivos na maioria dos circuitos práticos, satisfazendo  $i_E = i_B + i_C$ .

Os parâmetros do modelo incremental dependem dos valores da polarização, essencialmente de  $I_C$ . Assim,  $g_m = I_C/V_T$  (onde  $I_C$  é a corrente de polarização e  $V_T$  é a tensão térmica que vale cerca de 25 mV à temperatura ambiente) e  $\beta = g_m r_\pi$ . Quanto a  $r_o$ , tipicamente valerá entre 10 k $\Omega$  e 50 k $\Omega$ . (Use 50 k $\Omega$  em caso de dúvida; em muitos cálculos pode considerá-la infinita.)

Nos circuitos mostrados no final deste guia, deverá realizar as seguintes tarefas: (1) construir o circuito no laboratório; (2) medir, ou estimar, as tensões nodais e as correntes de polarização (ou quiescentes) nos BJTs; (3) medir os ganhos de tensão e impedâncias de entrada e saída, sempre que possível, verificando que não há distorção na amplificação; (4) realizar cálculos aproximados que confirmem as medidas; (5) finalmente, simular os circuitos, obtendo-se assim valores muito precisos sobre as variáveis do circuito, quer de polarização quer incrementais. (Nota: a simulação deverá ser realizada em casa e, em caso de falta de tempo, os cálculos também o deverão ser, de preferência previamente à sessão de laboratório.)

**Observação importante:** os condensadores utilizados nos circuitos são **electrolíticos**; assim, para respeitar a sua polarização a tensão DC tem de estar de acordo com a marcação (+) e (-) dos terminais (habitualmente só está marcado o (-)).

## Tarefa 1 (experimental)

Realize esta actividade **experimental** nos circuitos das figs. 1, 2 e 3 (respectivamente andares em *emissor comum*, *base comum* e *colector comum*), **um circuito de cada vez**. Tente efectuar a maior quantidade de medidas que conseguir no tempo de laboratório de que dispõe, sem menosprezar a verificação do correcto funcionamento dos circuitos.

i) Meça as tensões nodais DC. A partir delas e do valor nominal das resistências, calcule as correntes DC experimentais nos transístores.

ii) De seguida aplique na entrada  $u_g$  dos referidos circuitos um sinal sinusoidal com uma frequência nominal aproximada de 1 kHz e algumas centenas de mV de amplitude. Observe no osciloscópio simultaneamente  $u_g$  e  $u_o$  e registe o ganho em tensão  $u_o/u_g$  e a defasagem entre os sinais. Registe também a amplitude do sinal  $u_i$ . Se o sinal de saída  $u_o$  não for aproximadamente sinusoidal, isto é, se estiver distorcido, reduza a amplitude da entrada  $u_g$  até a distorção desaparecer.

Varie a frequência para valores muito maiores e menores que o nominal até o ganho ser significativamente menor que o medido a 1 kHz. Registe os valores para três frequências diferentes.

## Tarefa 2 (analítica, a realizar de preferência no laboratório)

i) Com **cálculos** expeditos, estime os valores quiescentes das correntes  $I_C$  e das tensões  $V_{CE}$  nos transístores das figs. 1, 2 e 3 admitindo  $h_{FE} = \beta = 400$  para todos eles e, no caso da fig.2, uma tensão de condução directa de 2 V no diodo emissor de luz (LED). Presuma que todos os transístores funcionam na zona activa. Nesta análise DC os condensadores equivalem a circuitos abertos. Compare com os valores experimentais da alínea (i) da Tarefa 1.

ii) Para os cálculos respeitantes ao regime incremental ou de sinais fracos, considere que, às frequências de trabalho os condensadores têm uma impedância desprezável face aos restantes elementos e podem, por isso, ser considerados um curto-circuito incremental. Calcule os parâmetros incrementais do BJT usando os valores de polarização calculados em (i).

ii-a) Relativamente ao circuito da fig.1, calcule os ganhos em tensão,  $u_o/u_i$  e em corrente,  $i_c/i_b$  do *amplificador em emissor comum* (considere a entrada do amplificador entre a base e o emissor, e a saída entre o colector e o emissor). A resistência  $R_2$  está inserida no circuito apenas para permitir a determinação experimental de  $i_b$ ; considere  $R_3$  como a resistência de carga do amplificador. Como aqui utilizou valores típicos para os parâmetros, diga se considera razoáveis as diferenças observadas relativamente aos valores experimentais.

ii-b) Calcule os ganhos em tensão,  $u_o/u_i$ , e em corrente,  $i_c/i_e$ , do *amplificador em base comum* da fig.2 considerando a entrada do amplificador entre o emissor e a base, e a saída entre o colector e a base;  $R_4$  é a resistência de carga;  $R_2$  serve apenas para permitir a determinação experimental de  $i_e$ . Compare com os valores experimentais da Tarefa 1.

ii-c) Calcule os ganhos em tensão,  $u_o/u_i$  e  $u_o/u_g$ , e em corrente,  $i_o/i_b$ , do *amplificador em colector comum* da fig.3, considerando a entrada do amplificador entre a base e o colector, e a saída entre o emissor e o colector. Considere  $R3$  como parte da resistência interna do gerador  $u_g$  e  $R4$  como a resistência de carga do amplificador. Justifique a designação de **seguidor de emissor** geralmente dada ao amplificador em colector comum.

### Tarefa 3 (analítica, a realizar a posteriori)

Estudou-se o transistor nas configurações fundamentais de amplificação relativamente aos ganhos. Para fazer a correspondente comparação das impedâncias de entrada (definida com a resistência de carga ligada) e de saída (definida com o gerador de entrada substituído pela sua resistência interna, e com a resistência de carga desligada) desses amplificadores, utilizam-se novamente os circuitos das figs.1 a 3, e os mesmos parâmetros para os transistores.

i) Para o amplificador em emissor comum da fig. 1 considere, de novo, que a entrada do amplificador é a base do transistor. Verifique (com cálculos) que a impedância de entrada é independente da resistência de carga e tente justificar isto observando o modelo incremental. Calcule o valor desta impedância e compare com estimativas obtidas a partir das medidas da alínea (ii) da Tarefa 1. Calcule também o valor da impedância de saída supondo que  $R3$  é a carga.

ii) Para o amplificador em base comum considere que a entrada do amplificador é o emissor do transistor. Mostre que a impedância de entrada deste circuito é aproximadamente  $\beta$  vezes menor que a impedância de entrada do emissor comum. Justifique o facto de o andar em base comum ser muito utilizado como amplificador de corrente. Mais uma vez, compare com estimativas obtidas a partir das medidas da alínea (ii) da Tarefa 1. Calcule também o valor da impedância de saída (suponha que  $R4$  é a carga.)

iii) Para o seguidor de emissor (ou colector comum) da fig. 3 considere, como anteriormente, que  $R3$  faz parte da resistência do gerador. Esta configuração é a que, em condições típicas, apresenta a maior impedância de entrada; calcule-a com o modelo incremental do circuito. É também a configuração que apresenta a menor impedância de saída; mostre que esta impedância é aproximadamente igual a  $(r_{\pi}+R_g)/\beta$  (onde  $R_g$  é a impedância interna do gerador  $u_g$ ). Calcule também o valor da impedância de saída (suponha que  $R4$  é a carga).

### Tarefa 4 (analítica, a realizar a posteriori)

Determine aproximadamente os PFR dos transistores da fig. 4 (amplificador bi-andar EC-CC) admitindo que ambos os transistores têm  $\beta = 400$ . Calcule os parâmetros incrementais dos dois transístores.

Admita que os condensadores têm uma capacidade elevada e desenhe o circuito incremental equivalente do amplificador. Determine os ganhos em tensão e em corrente, a impedância de entrada e a impedância de saída do amplificador considerando  $R3$  como a resistência de carga. Discuta se o conjunto destes valores poderia ser obtido com um único dos amplificadores uniandar estudados nas tarefas anteriores.

### Anotações sobre as medidas laboratoriais

Para permitir uma verificação rápida da correcção do circuito laboratório e, assim, acelerar as medidas experimentais, indicam-se aqui valores típicos para as tensões DC nodais (relativas à massa) que deverão ser medidas polarização dos circuitos (as incertezas devem-se aos valores de  $\beta$  que poderão variar entre 300 e 600, aproximadamente).

1. Emissor comum (EC), fig. 1:  $V_B \sim 0.7$  V;  $V_C \sim 5$  a  $10$  V.
2. Base comum (BC), fig. 2:  $V_B \sim 2.0$  V;  $V_E \sim 1.3$  V;  $V_C \sim 10$  V.
3. Colector comum (CC), ou seguidor de emissor, fig. 3:  $V_B \sim 6.5$  V;  $V_E \sim 6$  V;
4. Andar composto EC-CC, fig. 4:  $V_{B1} \sim 0.7$  V;  $V_{C1} = V_{B2} \sim 5$  a  $10$  V;  $V_{E2} \sim 4$  a  $9$  V;

