

O *transístor bipolar de junções* (TBJ) é constituído por um cristal semiconductor com duas junções *p-n* suficientemente próximas para poderem interactuar. A zona intermédia designa-se por *base* (B) e as zonas das extremidades designam-se por *emissor* (E) e por *colector* (C). Conforme o tipo de impurezas de substituição de cada uma das zonas, os transístores designam-se por *p-n-p* ou *n-p-n*. Devido às dimensões em jogo, a baixa resistência apresentada por uma junção polarizada directamente pode ser transferida para a outra junção. Assim, uma junção inversamente polarizada pode estar associada a uma corrente elevada mesmo sem estar em disrupção, se a outra junção estiver polarizada directamente. É esta transferência de resistência, resultante da interacção entre duas junções muito próximas, que está na base do funcionamento do transístor bipolar e que é referida no acrónimo transístor (**TRANS**fer **resISTOR**).

O transístor bipolar de junções foi o primeiro transístor a ser produzido (*Laboratórios da Bell*, 1947) e constitui o único exemplo de um dispositivo de engenharia a que foi atribuído um Nobel (1956, a W. Brattain, J. Bardeen e W. Shockley). A possibilidade de integração do TBJ levou à sua disseminação em larga escala, conduzindo a uma verdadeira revolução na área dos componentes electrónicos e nos computadores, e tornando-se para muitos uma das maiores inovações tecnológicas da história moderna. Preço e facilidades de fabrico e de integração foram a chave do sucesso.

Na lista de problemas propostos e resolvidos é sempre calculado o *ponto de funcionamento em repouso* (PFR) do transístor, que define o seu funcionamento em regime estacionário. Neste

contexto, apresentam-se exemplos diversos de circuitos de polarização de transístores envolvendo uma ou mais fontes de alimentação (**Problemas TB1, TB2, TB3 e TB4**). Na maioria dos problemas é estudada a influência da variação do sinal de entrada nas tensões e/ou correntes em vários pontos do circuito. Nuns casos (**Problemas TB10, TB11**), a análise é feita em *regime quase-estacionário*, interpretando-se a variação como uma perturbação (ΔU_I) ao sistema, que se pretende pequena, e com efeitos desprezáveis nos diferentes pontos do circuito ($\Delta U_X / \Delta U_I \rightarrow 0$). Baixos valores desta relação são indicadores de grande estabilidade do circuito. Noutros casos (**Problemas TB7, TB8, TB9**), a análise é feita em *regime alternado sinusoidal incremental*, em que a variação corresponde a um *sinal* alternado sinusoidal de baixa amplitude colocado à entrada ($u_i(t)$), e com efeitos importantes definidos, por exemplo à saída, através do ganho do circuito amplificador ($u_o(t) = A_v \times u_i(t)$). As influências da escolha dos diversos dispositivos (resistências, fontes) ou dos parâmetros do transístor (β, V_A, g_m), nas diversas zonas de funcionamento do transístor (*Zona Activa Directa, Corte, Saturação, Disrupção*) são analisadas em alguns exemplos (**Problemas TB1, TB2, TB3, TB12 e TB13**). Noutros casos é feita uma escolha adequada dos diversos elementos de modo a que o transístor funcione de acordo com as especificidades definidas pelo fabricante (**Problema TB5**). São analisadas as montagens básicas com este dispositivo: montagem de *Emissor Comum* (EC) (**Problema TB7**), de *Colector Comum* (CC) (**Problema TB8**) e de *Base Comum* (BC) (**Problema TB9**). Finalmente, dão-se exemplos envolvendo o foto-transístor (**Problema TB14**) e os transístores bipolares de heterojunção (**Problema TB15**).

- *Amplificador*
- *Foto-transístor*
- *Montagem de base comum*
- *Montagem de colector comum*
- *Montagem de emissor comum*
- *Regime estacionário*
- *Regime incremental*
- *Regime quase-estacionário*
- *Transístor Bipolar de Heterojunções*

Nota importante: Na resolução dos problemas consideraram-se as equações de Ebers-Moll ou derivadas dadas por:

$$I_E = I_{ES} \left(e^{\frac{U_E}{U_T}} - 1 \right) - \alpha_R I_{CS} \left(e^{\frac{U_C}{U_T}} - 1 \right) \quad (\text{TB.1})$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \left(e^{\frac{U_E}{U_T}} - 1 \right) - I_{CS} \left(e^{\frac{U_C}{U_T}} - 1 \right) \quad (\text{TB.2})$$

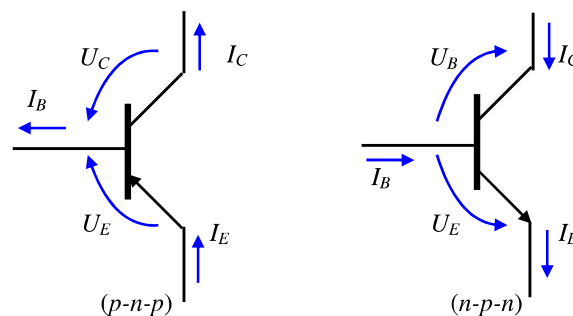
$$I_C = \beta_F I_B - I_{CE0} \left(e^{\frac{U_C}{U_T}} - 1 \right) \quad (\text{TB.3})$$

$$I_C = \alpha_F I_E - I_{CB0} \left(e^{\frac{U_C}{U_T}} - 1 \right) \quad (\text{TB.4})$$

$$I_E = -\beta_R I_B + I_{EC0} \left(e^{\frac{U_C}{U_T}} - 1 \right) \quad (\text{TB.5})$$

$$I_E = \alpha_R I_C + I_{EB0} \left(e^{\frac{U_C}{U_T}} - 1 \right), \quad (\text{TB.6})$$

onde os sentidos das correntes e tensões tomados como positivos são os representados nas figuras seguintes:



A norma seguida é comum aos 2 tipos de transístor. Em relação às tensões:

As tensões das junções colectora (U_C) e emissora (U_E) são sempre marcadas do lado p para o lado n . Deste modo, quando a junção estiver polarizada directamente (inversamente), a respectiva tensão é positiva (negativa).

Em relação às correntes:

Considera-se a corrente de emissor positiva quando concordante com o sentido da seta no símbolo, ou seja da zona p para a zona n . Se a corrente de emissor (I_E) sair pelo terminal, as correntes de colector (I_C) e de base (I_B) tomam-se como positivas quando entram. Inversamente, se a corrente de emissor entrar, as correntes de colector e de base tomam-se positivas quando saem.

De acordo com esta norma:

A potência posta em jogo no transístor é dada por $I_E \times U_E - I_C \times U_C$. Se o transístor estiver na zona activa directa (ZAD) a potência posta em jogo no transístor é aproximadamente igual a $-I_C \times U_C$, dado que U_E é desprezável e I_C é aproximadamente igual a I_E .

As equações TB1 a TB6 pressupõem que nenhuma das junções se encontre na disrupção.

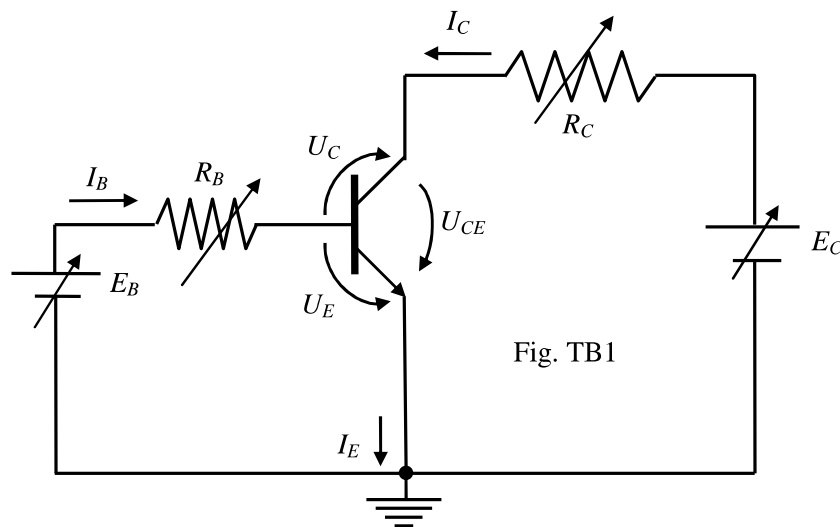
Problema TB1

(Polarização de um transistor. Utilização de duas fontes.)

Considerar a montagem da Fig. TB1. Verificar a influência de cada elemento do circuito na polarização do transistor. Como valores de referência considerar:

Para o TBJ: $\beta_F = 100$; $I_{CE0} = 1 \mu\text{A}$

Para o circuito: $E_B = 4 \text{ V}$; $E_C = 10 \text{ V}$; $R_C = 220 \Omega$; $R_B = 20 \text{ k}\Omega$.



Resolução

Os transistores têm como um dos grandes domínios de aplicação a área da *Electrónica Analógica*, sendo usados como *amplificadores*. Nessas condições exige-se que o transistor esteja a funcionar numa zona linear, de modo que o sinal de saída seja uma réplica amplificada do sinal de entrada. O transistor tem de estar a funcionar na *Zona Activa Directa (ZAD)*.

Na ZAD o TBJ tem a junção emissora directamente polarizada e a junção colectora inversamente polarizada. De acordo com a norma atrás estabelecida:

$$U_E > 0 \text{ e } U_C < 0.$$

Na ZAD a potência posta em jogo no transistor pode ser apreciável.

Caso o transístor entre na zona de corte ou de saturação, o sinal aparece distorcido.

Na saturação ambas as junções estão directamente polarizadas, isto é:

$$U_E > 0 \text{ e } U_C > 0.$$

No corte ambas as junções estão inversamente polarizadas:

$$U_E < 0 \text{ e } U_C < 0.$$

A potência posta em jogo no corte é desprezável, porque as correntes são desprezáveis; na saturação a potência posta em jogo é baixa, porque as tensões nas junções têm um baixo valor.

Por inspeção, verifica-se que a junção emissora está polarizada directamente ($U_E > 0$).

Admita-se que a junção colectora está polarizada inversamente e não está em disrupção, isto é:

$$U_{Cdisr} \leq U_C \leq 0 \quad (\text{TB1.1})$$

Da análise da malha de entrada, desprezando a queda de tensão na junção emissora, uma vez que está polarizada directamente, tem-se:

$$I_B \cong \frac{E_B}{R_B} \cong 200 \mu\text{A} \quad (\text{TB1.2})$$

Tendo em conta a ZAD e (TB.3) tem-se:

$$I_C \cong \beta_F I_B + I_{CE0} \cong \beta_F I_B \cong 20 \text{ mA} \quad (\text{TB1.3})$$

Por circulação na malha de saída tem-se:

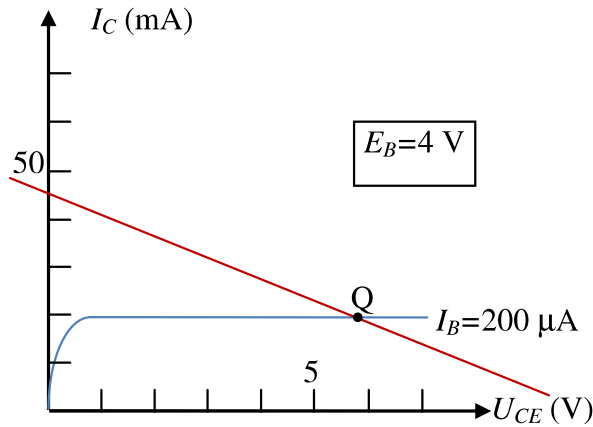
$$E_C = R_C I_C + U_{CE} \Rightarrow U_{CE} = E_C - R_C I_C = 5,6 \text{ V} \quad (\text{TB1.4})$$

Atendendo a que:

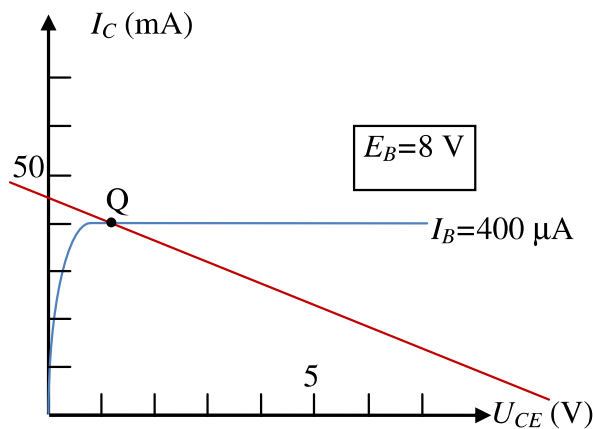
$$U_{CE} = U_E - U_C \cong -U_C \Rightarrow U_C \cong -5,6 \text{ V}, \quad (\text{TB1.5})$$

o que confirma a ZAD (TB1.1). O ponto Q de funcionamento em repouso (PFR) é pois definido por :

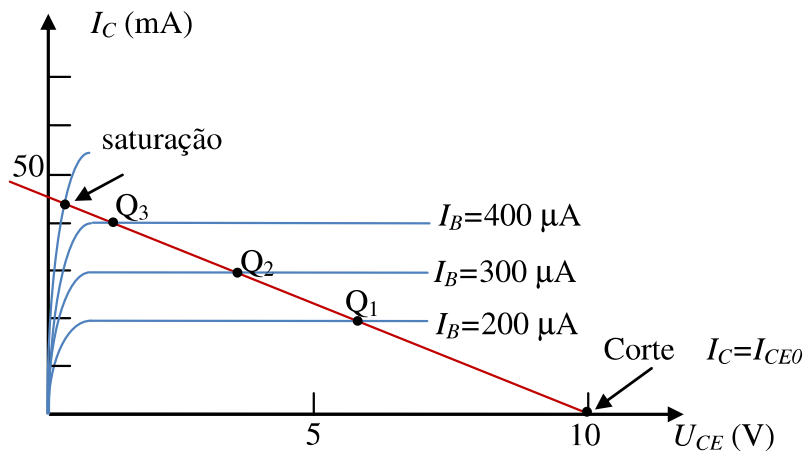
$$U_{CE} = 5,6 \text{ V}; I_C \cong 20 \text{ mA}; I_B \cong 200 \mu\text{A}; I_E \cong 20,2 \text{ mA}$$



Se se subir o valor de E_B , por exemplo, $E_B = 8 \text{ V}$:



A influência de E_B na polarização do TBJ está representada na figura seguinte:



Aumentar o valor da tensão da bateria de entrada E_B leva o PFR para a saturação. Pelo contrário, diminuir E_B ou, eventualmente, trocar a sua polaridade, conduz o TBJ para o corte.

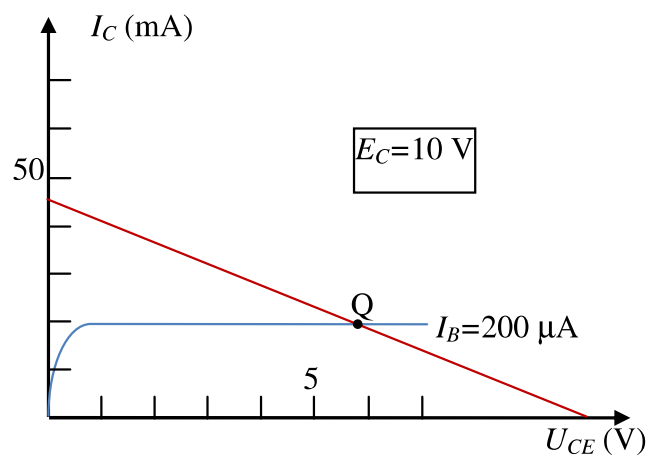
Considere-se agora a influência da bateria E_C na polarização do transístor. Se E_B se mantiver constante no circuito a corrente de base não varia. Admitindo ZAD a corrente de colector mantém-se constante de valor:

$$I_C \cong \beta_F I_B - I_{CE0} \cong \beta_F I_B \cong \beta_F \frac{E_B}{R_B}, \quad (\text{TB1.6})$$

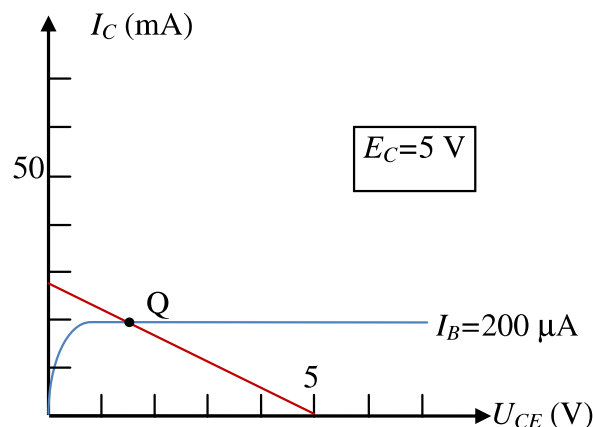
desde que se verifique a condição:

$$0 \leq U_{CE} = E_C - R_C I_C \leq -U_{C_{disr}} \quad (\text{TB1.7})$$

Com efeito, diminuir E_C leva o TBJ para a saturação, dado que a junção colectora, por influência de E_B , fica polarizada directamente. Por outro lado, aumentar E_C leva o transístor para a disrupção da junção colectora.

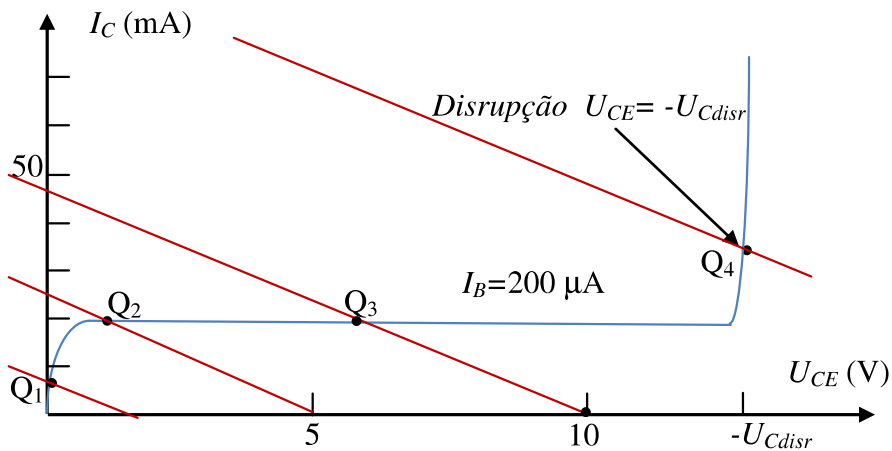


Se se descer o valor de E_C , por exemplo $E_C = 5\text{ V}$:



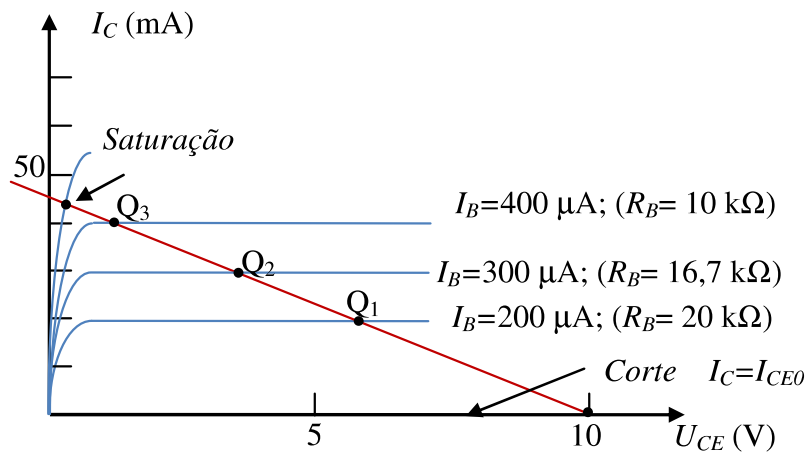
o PFR aproxima-se da saturação, mas uma vez que ainda se mantém na ZAD, a corrente de colector praticamente não varia (na aproximação de se desprezar o *efeito de Early*).

A influência de E_C na polarização do TBJ está representada na figura seguinte, onde o PFR evolui de Q1 para Q4 à medida que E_C aumenta.

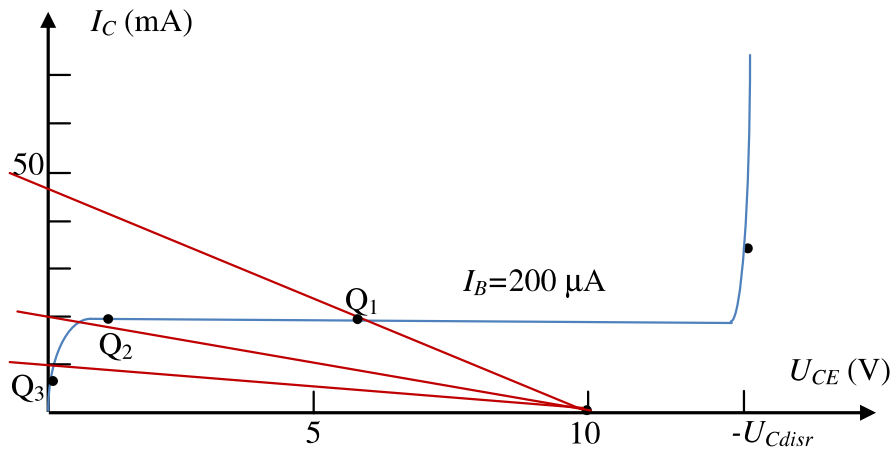


Diminuir o valor da tensão da bateria de saída E_C leva o PFR para a saturação. Pelo contrário, aumentar E_C , conduz o TBJ para a disrupção da junção colectora.

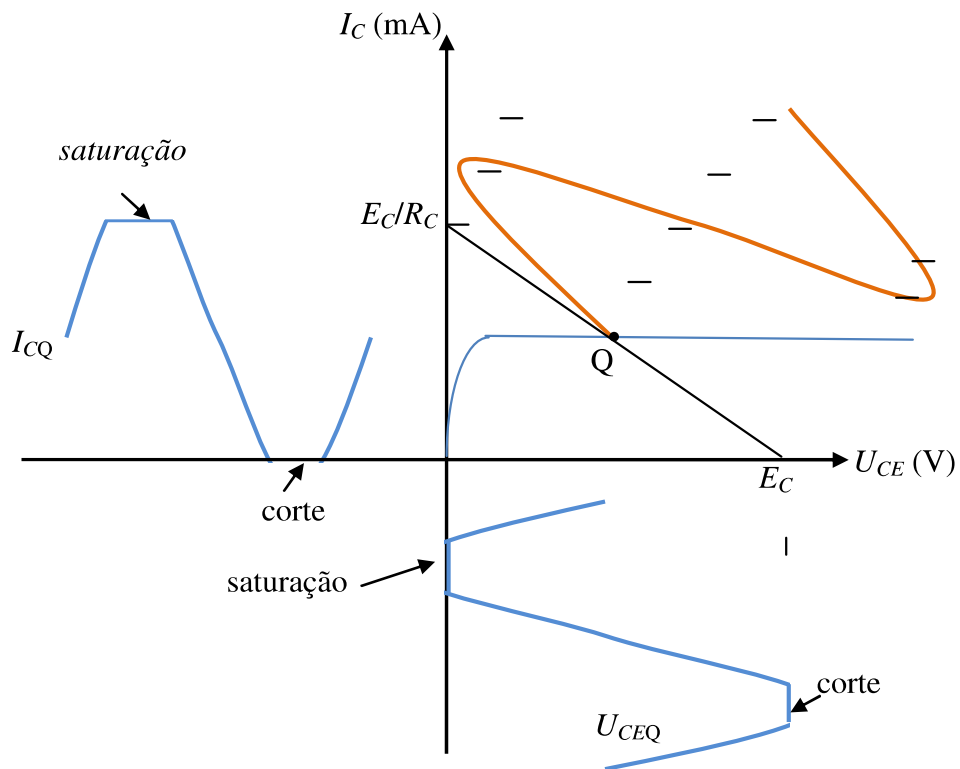
Finalmente, analisam-se as influências de R_B e de R_C na polarização. Da expressão (TB1.2) pode verificar-se que a diminuição de R_B provoca um aumento da corrente I_B e, portanto, da corrente I_C na ZAD: a curva característica correspondente a I_B constante passará mais acima na ZAD (ver figura). Mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, a subida de R_B afasta o TBJ da saturação ou, de forma equivalente, reforça a condição de ZAD.



Por outro lado, de acordo com (TB1.4), a subida de R_C provoca uma diminuição de U_{CE} e, portanto, aproxima o TBJ da saturação (ver figura). O PFR evolui de Q1 para Q3 à medida que R_C aumenta. Em Q1 tomou-se $R_C = 220 \Omega$, em Q2, $R_C = 500 \Omega$ e em Q3, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$.



Ao aplicar um sinal à entrada, para que o funcionamento seja linear o transístor não deve atingir em caso algum a saturação ou o corte, caso contrário existirá distorção do sinal à saída, como se mostra de forma esquemática na figura seguinte.



Problema TB2

(Polarização de um transistor. Utilização de uma fonte única.)

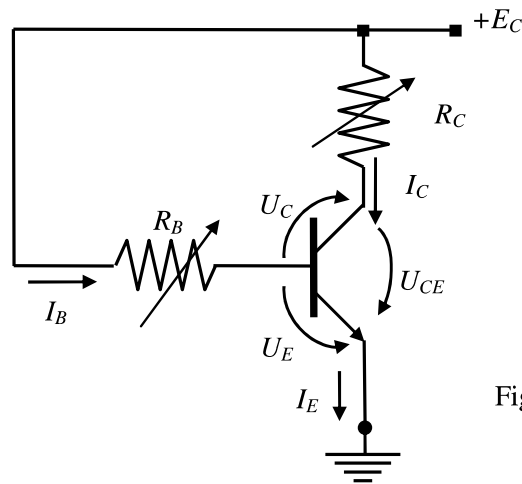


Fig.TB2

Considerar a montagem da Fig.TB2. Verificar a influência de cada elemento do circuito na polarização do transistor. Como valores de referência considerar:

Para o TBJ: $\beta_F = 100$; $I_{CE0} = 1 \mu A$. Para o circuito: $E_C = 10 V$; $R_C = 100 \Omega$; $R_B = 20 k\Omega$.



Resolução

Para que o TBJ esteja na ZAD, tem-se, de acordo com (TB1.1):

$$0 \leq U_{CE} \leq -U_{Cdisr} \tag{TB2.1}$$

Por análise da malha de entrada obtém-se:

$$E_C - R_B I_B \cong 0 \Rightarrow I_B \cong \frac{E_C}{R_B} \tag{TB2.2}$$

Por análise da malha de saída, admitindo a ZAD, tem-se:

$$E_C - R_C \beta_F I_B = U_{CE} \Rightarrow 0 \leq E_C - R_C \beta_F \frac{E_C}{R_B} \leq -U_{Cdisr}, \tag{TB2.3}$$

o que conduz a :

$$R_B \geq \beta_F R_C, \tag{TB2.4}$$

desde que:

$$E_C \leq \frac{-U_{Cdisr}}{1 - \frac{R_C \beta_F}{R_B}}. \quad (\text{TB2.5})$$

A não verificação de (TB2.4) conduz o TBJ para a saturação; a não verificação de (TB2.5) conduz à disrupção da junção colectora.

Para que a junção colectora atinja a disrupção é necessário que a tensão da bateria seja superior a $-U_{Cdisr}$.

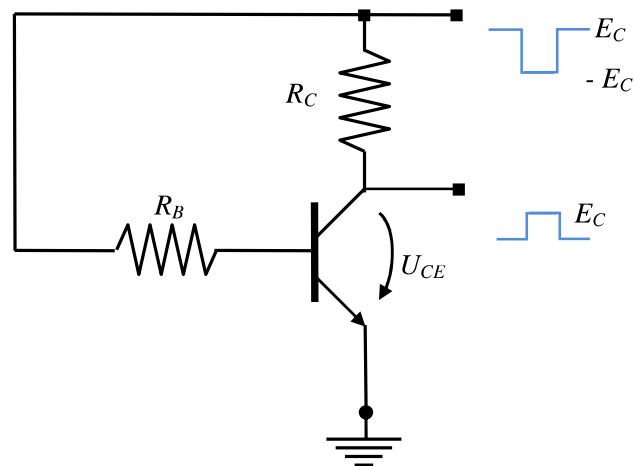
No caso dos dados do problema as condições (TB2.4) e (TB2.5) são satisfeitas, logo o PFR ($I_B = 0,2 \text{ mA}$; $I_C = 20 \text{ mA}$; $U_{CE} = 8 \text{ V}$) está na ZAD.

A diminuição de R_B ou o aumento de R_C conduzem o TBJ à saturação.

Tal como o circuito do problema TB1, este circuito apresenta como desvantagem, quando utilizado como amplificador, o facto do funcionamento ser sensível às variações com a temperatura dos parâmetros do transístor, nomeadamente de β_F .

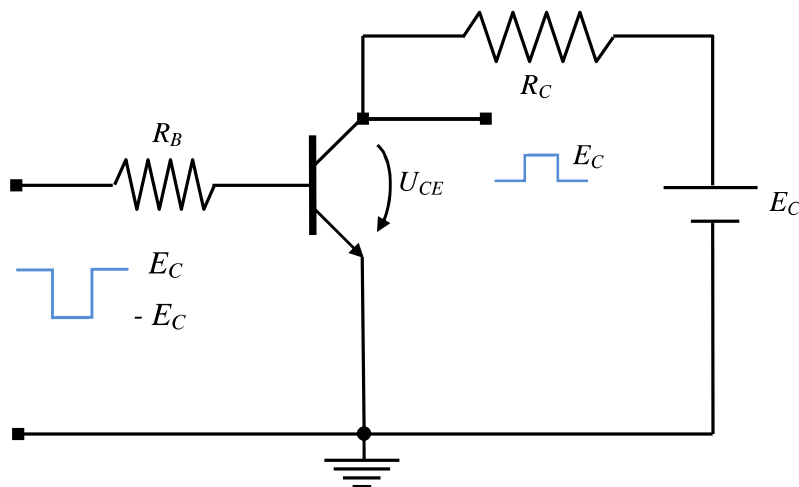
Uma das suas principais aplicações é a sua utilização como *interruptor*, onde o TBJ funciona ou no corte ou na saturação. Se neste circuito se substituir a bateria por uma onda rectangular que oscile entre $\pm E_C$ quando $R_B \leq \beta_F R_C$, o transístor estará na saturação e no corte, respectivamente, no meio ciclo positivo e no meio ciclo negativo da tensão no oscilador. Durante o meio ciclo, em que a tensão é positiva, as duas junções do TBJ estão polarizadas directamente e, portanto, $U_{CE} = U_E - U_C \cong 0$. Durante o meio ciclo negativo, as duas junções estão inversamente polarizadas, as correntes são desprezáveis e, portanto, $U_{CE} = -E_C$.

No circuito, quando a tensão à entrada varia entre $\pm E_C$, a saída varia entre 0 e E_C . É o *circuito inversor* e constitui um dos elementos básicos dos circuitos em *Electrónica Digital*.



Consegue-se um funcionamento similar com o circuito do problema TB1 (duas fontes), quando na entrada se substitui a bateria E_B por um oscilador de uma onda quadrada que oscila entre $\pm E_B$, de tal modo que:

$$E_B \geq \frac{R_B E_C}{R_C \beta_F} \tag{TB2.6}$$



Problema TB3

(Polarização de um transistor. Utilização de uma fonte. Degenerescência de emissor.)

Considerar a montagem da Fig.TB3. Estudar a influência da resistência R_E na polarização do transistor. Como valores de referência considerar:

Para o TBJ: $\beta_F = 100$; $I_{CE0} = 1 \mu A$;

Para o circuito: $E_C = 10 V$; $R_C = 100 \Omega$; $R_E = 100 \Omega$; $R_B = 20 k\Omega$.

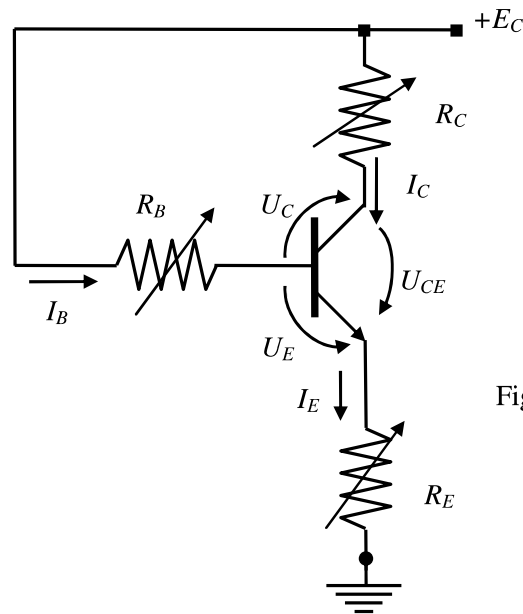


Fig.TB3



Resolução

O circuito da Fig.TB3 é semelhante ao da Fig.TB2, mas onde se incluiu uma resistência R_E no terminal de emissor. Esta resistência pertence simultaneamente a duas malhas do circuito, fazendo de certa forma uma ligação entre a malha da base e a malha do colector. No caso do circuito cuja entrada do sinal se faz pela base e a saída pelo colector, designado por *montagem de emissor comum* (EC), essa resistência retira parte do sinal da saída e recoloca-o à entrada, ou seja, faz a *retroacção* (*feedback*, na designação anglo-saxónica). Como o sinal de saída está em oposição à entrada, a retroacção diz-se *degenerativa* ou *negativa* (caso contrário, dir-se-ia *regenerativa* ou *positiva*). Vai analisar-se de seguida qual o efeito dessa resistência na polarização. Da malha de entrada tem-se a equação:

$$E_C = R_B I_B + U_E + R_E I_E \cong R_B I_B + R_E I_E \tag{TB3.1}$$

de onde se obtém, quando o transistor está polarizado na ZAD:

$$I_B \cong \frac{E_C}{R_B + (1 + \beta_F) R_E} \tag{TB3.2}$$

$$I_C \cong \frac{\beta_F E_C}{R_B + (1 + \beta_F) R_E} \tag{TB3.3}$$

O circuito do problema TB2 impõe praticamente a corrente de base como constante e torna a corrente de colector na ZAD muito dependente do parâmetro β_F e, portanto, da temperatura.

Nas condições do presente problema, o efeito do ganho em corrente β_F na corrente de colector pode ser muito menor, como se evidencia em (TB3.3), graças à inclusão da resistência R_E , tornando este circuito muito mais estável com a temperatura. Está ainda pressuposto que U_E seja desprezável face a E_C . No presente caso tem-se $I_B \cong 0,332$ mA, $I_C \cong 33,2$ mA, $U_{CE} \cong 3,36$ V. Considere-se, por exemplo, um aumento de 10% em β_F . No circuito da Fig. TB2 o resultado seria um aumento na corrente de colector de 10%. No entanto, no circuito da Fig. TB3, a corrente de colector tomará o valor 35,37 mA, ou seja um aumento de 6,5%. A insensibilidade à variação com a temperatura, ou seja, a estabilidade do circuito aumenta com o valor de R_E . No entanto, como se verá num dos problemas seguintes, o ganho em tensão do amplificador vem reduzido com o aumento do valor óhmico de R_E .

Os circuitos com *degenerescência de emissor* são mais estáveis com a temperatura. A estabilidade aumenta com o valor óhmico da resistência colocada no emissor.

Problema TB4

(Polarização de um transistor. Utilização de uma fonte de tensão: divisor de tensão)

Considerar a montagem da Fig. TB4.

- Estudar a influência das resistências R_{B1} e R_{B2} na polarização do transistor quando $R_E = 0$.
- Comparar as variações relativas de corrente I_C para uma variação de 10% do ganho de corrente β_F com a temperatura, para os circuitos com $R_E = 0$ e com $R_E = R_C$.

