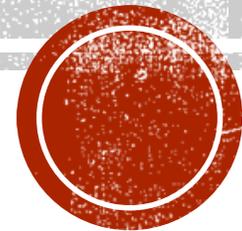


TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO (TBJ)

João Paulo Neto Torres



- Primeiro dispositivo de semiconductor desenvolvido tecnologicamente capaz de **amplificação de potência**.
- O seu princípio de funcionamento baseia-se no comportamento da junção $p-n$.
- É constituído por um cristal semiconductor com duas junções $p-n$ suficientemente próximas para poderem interatuar.

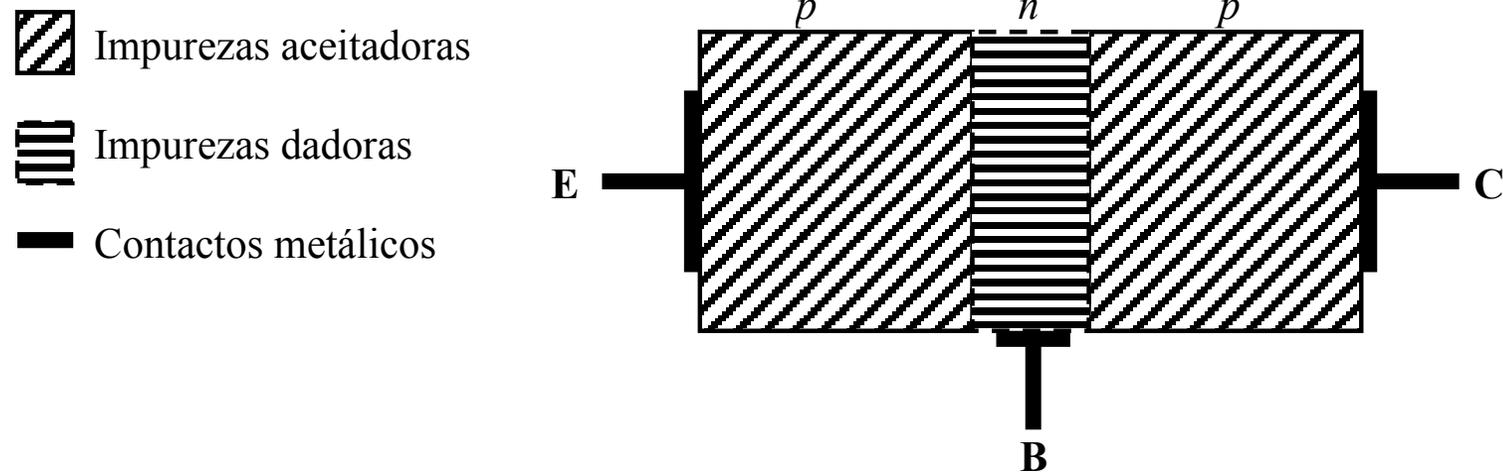


Fig. – Representação esquemática de um TBJ.



- A zona intermédia designa-se por **base** (B) e as zonas nas extremidades designam-se por **emissor** (E) e **coletor** (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 causa, a baixa resistência apresentada por uma junção polarizada diretamente pode ser transferida para a outra junção.
- É esta transferência de resistência, resultante da interação entre duas junções muito próximas, que está na base do funcionamento do transístor bipolar e que é traduzida no acrónimo **transístor** (***transfer resistor***).



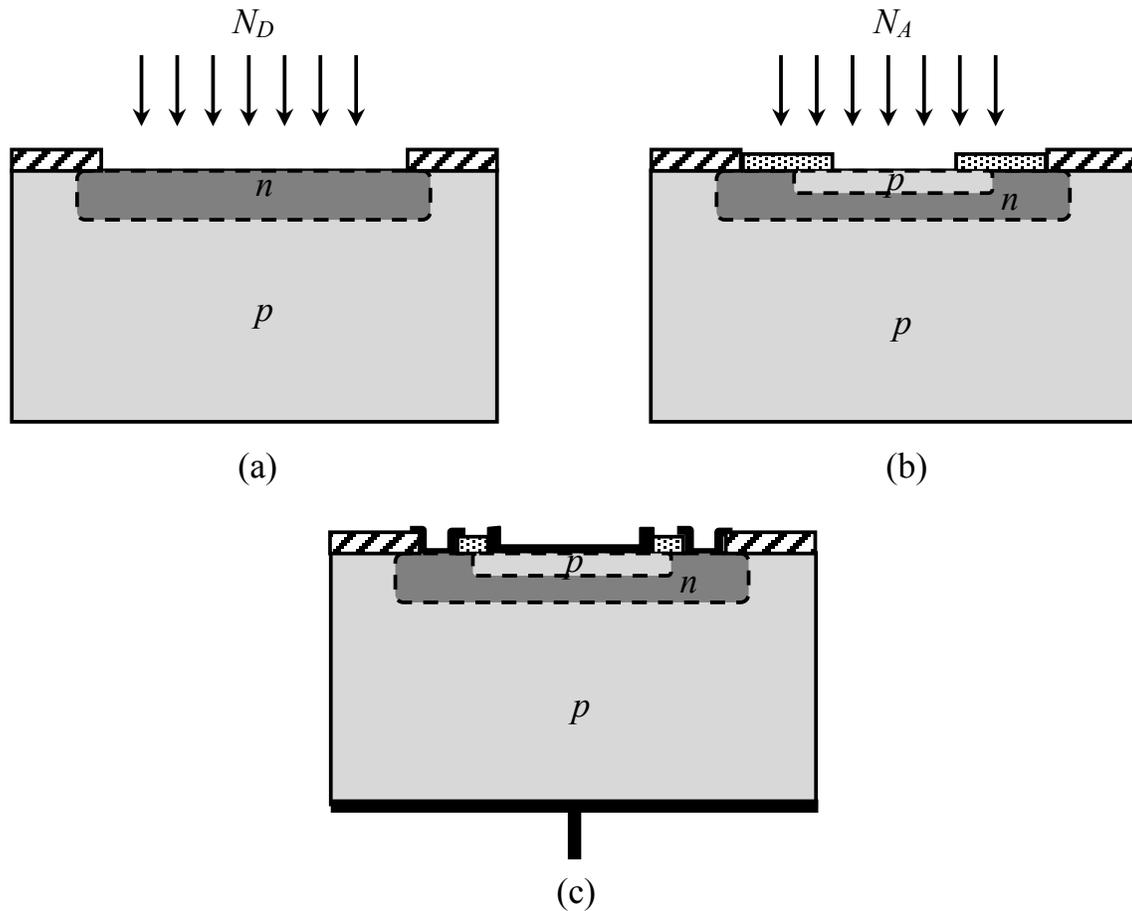
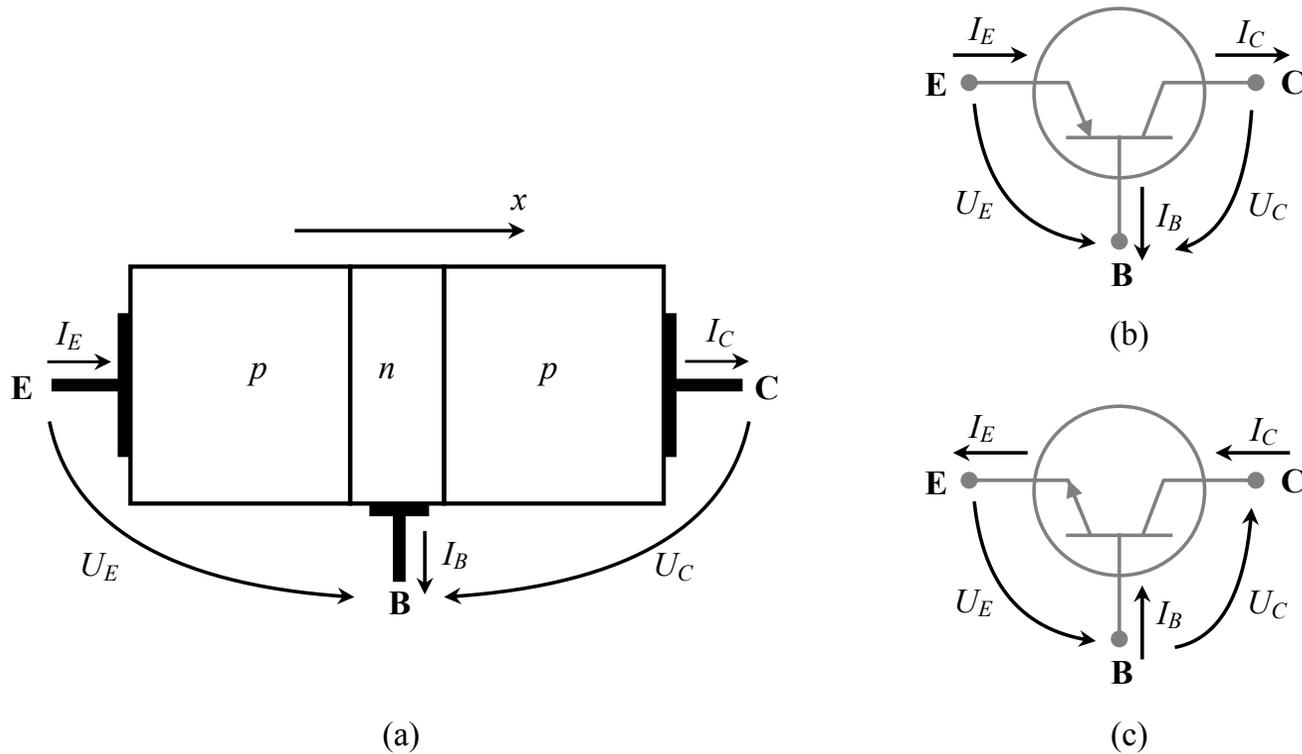


Fig. Processo planar de fabrico de TBJ.

- Considere-se um cristal do tipo p submetido, num ambiente a elevadas temperaturas, a uma atmosfera de um elemento que se comporte como dador, criando por difusão uma camada do tipo n .
- A janela é de novo isolada, remove-se seletivamente o óxido e submete-se o cristal a uma atmosfera aceitadora.
- Cria-se nova região de tipo p sobre a região n (Fig.(b)). Finalmente é removido o óxido, estabelecendo-se os acessos com todas as zonas criadas para se formarem os contactos metálicos.



- **Simbologia e zonas de funcionamento**



O terminal do emissor apresenta uma seta cujo sentido corresponde ao sentido da corrente quando a junção emissora está polarizada diretamente, ou seja, dirigida de p para n (para dentro no $p-n-p$; para fora no $n-p-n$).

Fig. – (a) Sentidos de referência; (b) $p-n-p$; (c) $n-p-n$.



- Se as duas junções estão polarizadas inversamente, as correntes nos três terminais são desprezáveis e o transistor diz-se ao corte.
- Se as duas junções estão diretamente polarizadas, as tensões U_{EB} , U_{CB} e, portanto, U_{CE} são desprezáveis, e o transistor diz-se na saturação.
- Se uma das junções está diretamente polarizada e a outra inversamente polarizada, o transistor diz-se na zona ativa.
 - A zona ativa é direta (ZAD) se a junção diretamente polarizada é a junção emissora.
 - A zona ativa é Inversa(ZAI) se a junção diretamente polarizada é a junção coletora.



- **Aplicações**
- **Em circuitos digitais** está-se habitualmente interessado em níveis de tensão ora elevados ora baixos, para se definirem os valores lógicos “1” e “0”.
- Para tal, os **transístores funcionam no corte** (nível elevado de tensão) **ou na saturação** (nível baixo de tensão).
- Em **aplicações analógicas**, geralmente pretende-se, à saída do circuito, uma tensão que seja uma réplica amplificada do sinal à entrada. O sistema deve ser linear. Polariza-se o **transístor na ZAD**.



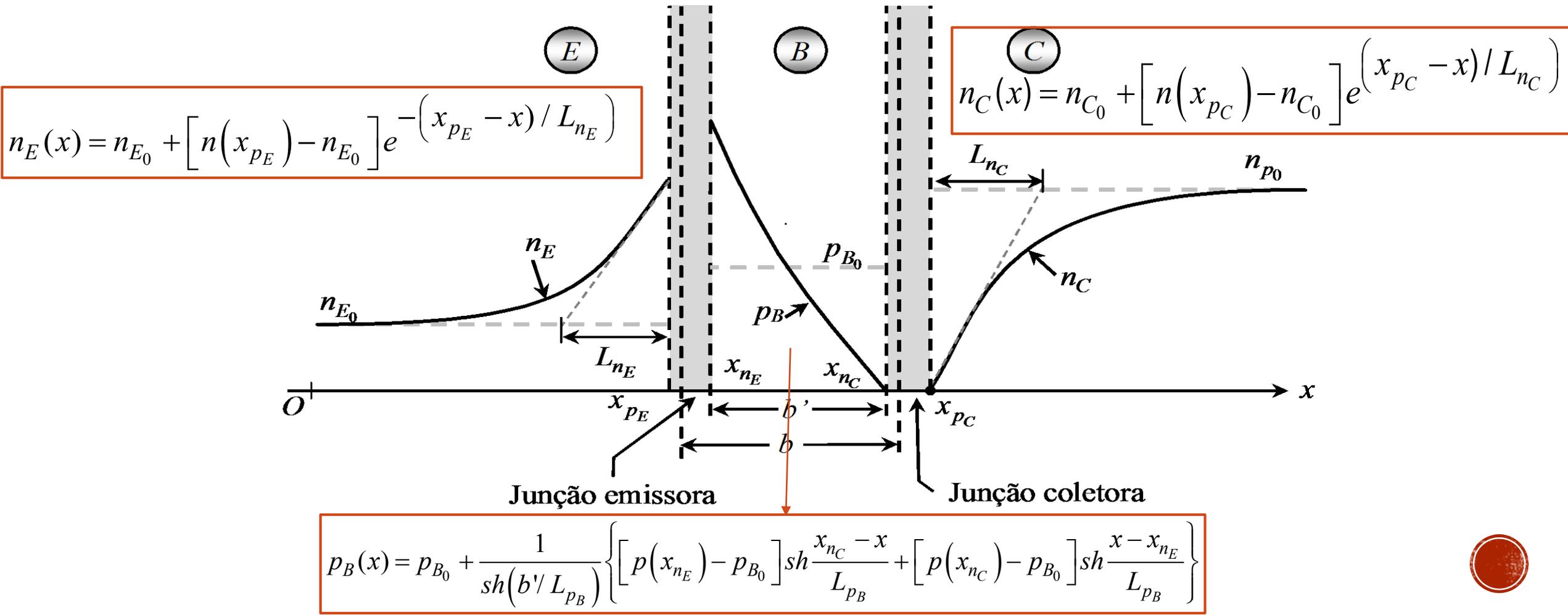
- **Transistor com polarização constante – equações de Ebers-Moll**

- Hipóteses simplificativas admitem-se as condições que se assumiram quando, no capítulo do díodo se deduziu a relação $I(U)$ para o díodo de junção $p-n$:
 - junções abruptas;
 - modelo unidimensional;
 - injeção fraca;
 - regiões emissora e coletora com comprimentos muito maiores do que o comprimento de difusão das minorias respetivas;
 - desprezo da geração e da recombinação nas regiões de transição;
 - desprezo das resistências associadas aos contactos e às regiões neutras



- **Porquê a designação de bipolar?**

- Porque nos transístores *p-n-p* ou *n-p-n* a corrente, associada aos processos de difusão, **depende de dois tipos de portadores**
- Nos limites das regiões de transição, os portadores de minoria têm valores que dependem exponencialmente das tensões aplicadas à respectiva junção



- A J em cada junção é calculada admitindo que não existe G nem R na zona de transição respetiva, ou seja, somando as J de elétrons e de buracos nas fronteiras dessa região. Estas são dadas para cada junção por:

$$J_E = J_{n_{dif}}(x_{pE}) + J_{p_{dif}}(x_{nE})$$

$$J_C = J_{n_{dif}}(x_{pC}) + J_{p_{dif}}(x_{nC})$$

e

$$J_{n_{dif}}(x) = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_{p_{dif}}(x) = -qD_p \frac{dp}{dx}$$



$$J_n(x_{pE}) = \frac{qD_{nE} n_{E0}}{L_{nE}} \left(e^{U_E/u_T} - 1 \right)$$

$$J_n(x_{pC}) = \frac{qD_{nC} n_{C0}}{L_{nC}} \left(e^{U_C/u_T} - 1 \right)$$

$$J_p(x_{nE}) = \frac{qD_{pB} p_{B0}}{L_{pB} sh(b'/L_{pB})} \left[\left(e^{U_E/u_T} - 1 \right) ch(b'/L_{pB}) - \left(e^{U_C/u_T} - 1 \right) \right]$$

$$J_p(x_{nC}) = \frac{qD_{pB} p_{B0}}{L_{pB} sh(b'/L_{pB})} \left[\left(e^{U_E/u_T} - 1 \right) - \left(e^{U_C/u_T} - 1 \right) ch(b'/L_{pB}) \right]$$

As correntes de emissor e de coletor são dadas, respectivamente, por:

$$I_E = AJ_E$$

$$I_C = -AJ_C$$



Por substituição das equações anteriores obtêm-se as seguintes equações:

$$I_E = I_{ES} \left(e^{U_E/u_T} - 1 \right) - \alpha_R I_{CS} \left(e^{U_C/u_T} - 1 \right)$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \left(e^{U_E/u_T} - 1 \right) - I_{CS} \left(e^{U_C/u_T} - 1 \right)$$

equações de Ebers-Moll

Onde

$$\alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{CS} = \frac{AqD_{pB} p_{B0}}{L_{pB} sh(b'/L_{pB})}$$

$$I_{ES} = Aq \left(\frac{D_{nE} n_{E0}}{L_{nE}} + \frac{D_{pB} p_{B0}}{L_{pB} th(b'/L_{pB})} \right)$$

$$I_{CS} = Aq \left(\frac{D_{nC} n_{C0}}{L_{nC}} + \frac{D_{pB} p_{B0}}{L_{pB} th(b'/L_{pB})} \right)$$

mostram que a corrente num dos terminais depende das tensões em ambas as junções. A influência cruzada é definida pelos parâmetros α_F e α_R associados às influências da junção emissora na corrente de coletor e da junção coletora na corrente de emissor, respectivamente.



- As equações de Ebers-Moll mostram que um transistor em regime estacionário pode ser modelado por associações paralelo de junções $p-n$ e fontes de corrente controladas por tensões

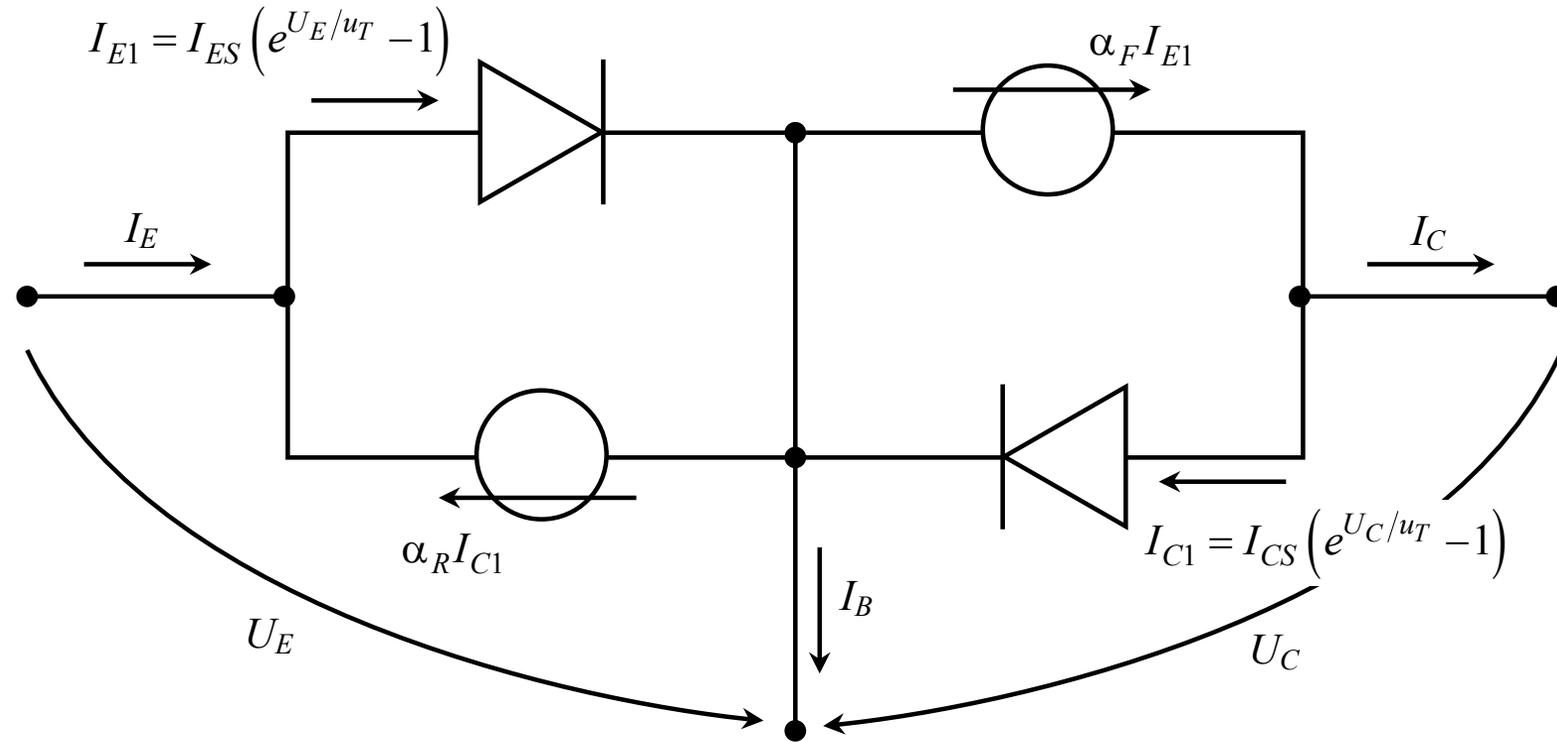


Fig. – Modelo de um transistor p-n-p.



A corrente I_{ES} (corrente inversa de saturação da junção emissora), resulta de se curto-circuitar a junção coletora.

A corrente I_{CS} (corrente inversa de saturação da junção coletora), resulta de se curto-circuitar a junção emissora.

As equações anteriores das correntes podem ainda ser reescritas como:

$$I_C = \alpha_F I_E - I_{CB0} \delta(U_C)$$

$$I_E = \alpha_R I_C + I_{EB0} \delta(U_E)$$

$$I_{CB0} = (1 - \alpha_F \alpha_R) I_{CS}$$

$$I_{EB0} = (1 - \alpha_F \alpha_R) I_{ES}$$

$$\delta(U_C) = \exp(U_C / u_T) - 1$$

$$\delta(U_E) = \exp(U_E / u_T) - 1$$



Se se atender a que

$$I_E = I_B + I_C$$

Então

$$I_C = \beta_F I_B - I_{CE0} \delta(U_C)$$

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}$$

$$I_{CE0} = \frac{I_{CB0}}{1 - \alpha_F} = (1 + \beta_F) I_{CB0}$$

De forma análoga obtem-se

$$I_E = -\beta_R I_B + I_{EC0} \delta(U_E)$$

$$\beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}$$

$$I_{EC0} = \frac{I_{EB0}}{1 - \alpha_R} = (1 + \beta_R) I_{EB0}$$



De assinalar que nas equações anteriores os parâmetros α e β podem aparecer como relações entre as variações de correntes, ou seja:

$$\alpha_F = \frac{I_C}{I_E} \Big|_{U_C=0}$$

$$\alpha_R = \frac{I_E}{I_C} \Big|_{U_E=0}$$

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{U_C=0}$$

$$\beta_R = -\frac{I_E}{I_B} \Big|_{U_E=0}$$

Definindo a corrente:

$$I_S = \alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{CS}$$

as equações de Ebers-Moll tomam a seguinte forma:

$$I_E = \frac{I_S}{\alpha_F} \left(e^{U_E/u_T} - 1 \right) - \underbrace{I_S \left(e^{U_C/u_T} - 1 \right)}_{I_{EC}}$$

$$I_C = \underbrace{I_S \left(e^{U_E/u_T} - 1 \right)}_{I_{CE}} - \frac{I_S}{\alpha_R} \left(e^{U_C/u_T} - 1 \right)$$



Para estas equações o circuito equivalente é o seguinte:

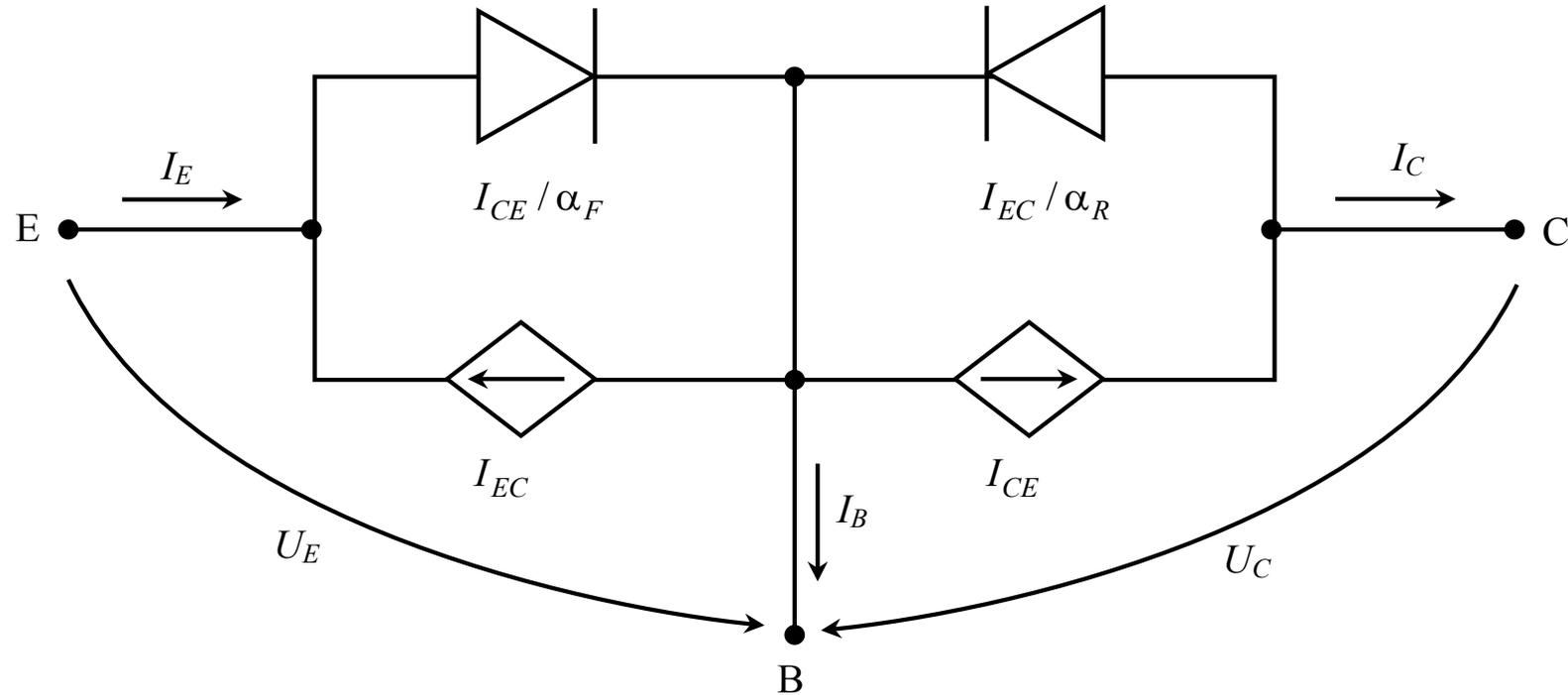


Fig. – Circuito elétrico equivalente do TBJ.

Os modelos anteriores possuem duas fontes de corrente dependentes. É, contudo, possível obter um circuito que permite modelizar o TBJ envolvendo uma única fonte de corrente



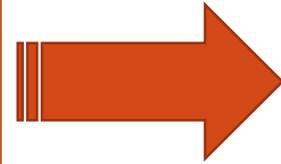
Como

$$\frac{1}{\alpha_F} = 1 + \frac{1}{\beta_F} \quad e \quad \frac{1}{\alpha_R} = 1 + \frac{1}{\beta_R}$$

Logo obtem-se

$$I_E = I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right) \left(e^{U_E/u_T} - 1 \right) - \underbrace{I_S \left(e^{U_C/u_T} - 1 \right)}_{I_{EC}}$$

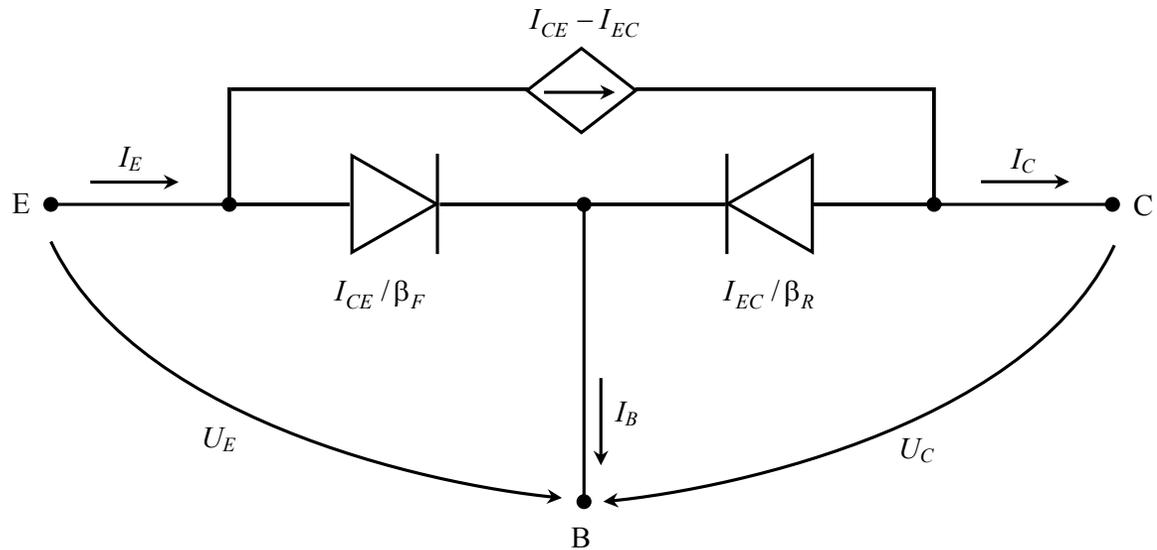
$$I_C = \underbrace{I_S \left(e^{U_E/u_T} - 1 \right)}_{I_{CE}} - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) \left(e^{U_C/u_T} - 1 \right)$$



Na ZAD

$$I_C \approx \left(\frac{1}{\beta_F} \right) I_S e^{U_E/u_T} = \frac{I_C}{\alpha_F}$$

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} e^{U_E/u_T} \approx \frac{I_C}{\beta_F}$$



Dispondo o transistor de três terminais, ao ser introduzido num circuito de modo a estabelecer relações entre dois pares de terminais, um dos terminais do transistor será comum à entrada e à saída do circuito. Conforme o caso, tem-se as montagens de **emissor comum (EC)**, de **coletor comum (CC)** ou de **base comum (BC)** (Fig.).

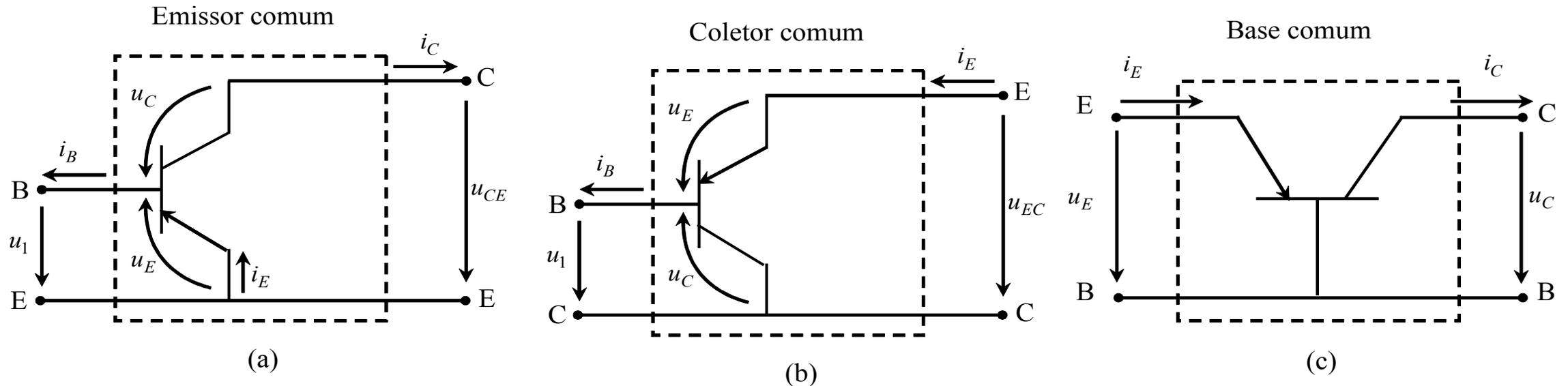
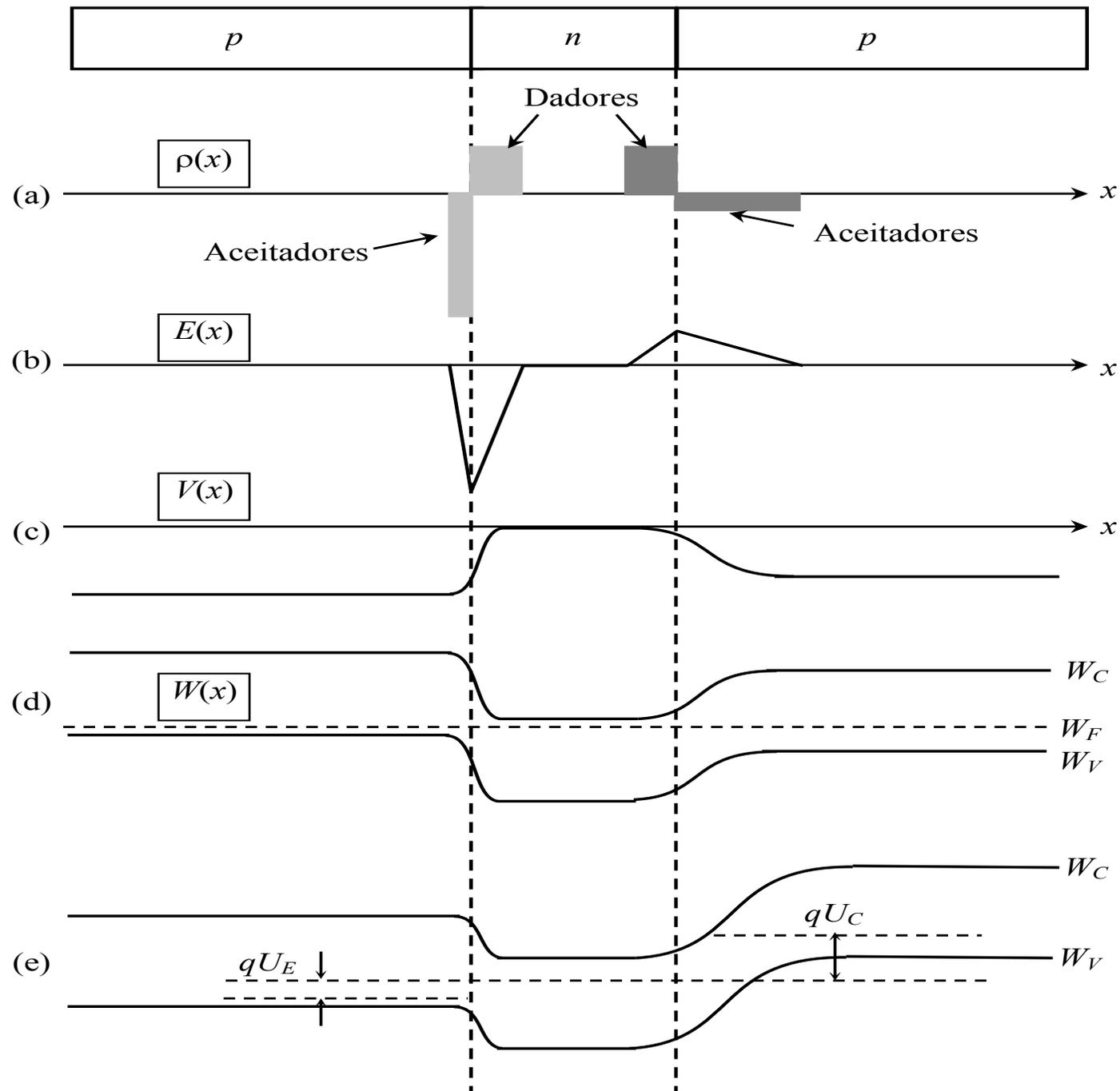


Fig. – Montagens básicas para o TBJ.





Para um transistor $p-n-p$ em equilíbrio termodinâmico, a Fig. representa os andamentos das distribuições de carga (a), do campo elétrico (b), do potencial (c) e das bandas de energia (d). Na Fig. (e) representam-se as bandas de energia do transistor a funcionar na ZAD.



A interação entre as duas junções num transistor $p-n-p$ dá-se através da corrente devida a buracos, que na base são transportados essencialmente por difusão. Para este caso, designa-se por **rendimento de injeção do emissor** γ a relação entre as densidades de corrente de buracos na junção emissora e a densidade de corrente total:

$$\gamma = \frac{J_{pE}}{J_{pE} + J_{nE}} \Big|_{U_C=0} \quad \longrightarrow \quad \gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_{nE}}{D_{pB}} \frac{L_{pB}}{L_{nE}} \frac{n_{E0}}{p_{B0}} \operatorname{th} \frac{b'}{L_{pB}}}$$

Designa-se por **fator de transporte na base** θ num transistor $p-n-p$ a relação entre as densidades de corrente de buracos na junção coletora e na junção emissora:

$$\theta = \frac{J_{pC}}{J_{pE}} \Big|_{U_C=0} = \frac{1}{\cosh(b'/L_{pB})}$$

ganho α_F pode ser interpretado como o produto do rendimento de injeção pelo fator de transporte:

$$\alpha_F = \gamma \times \theta$$



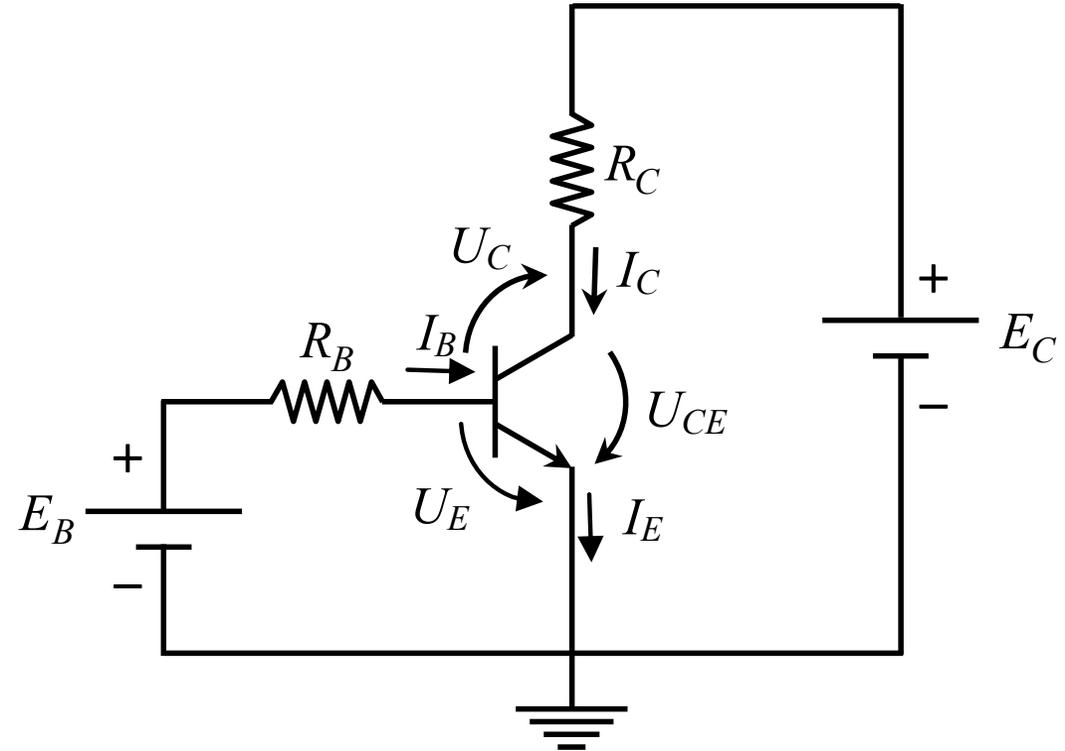
Exemplo: Pretende-se a zona de funcionamento e o ponto de funcionamento em repouso (PFR) do TBJ no circuito da figura.

$$\beta_F = 200; I_{CE0} = 1\mu\text{A}$$

$$U_{Gds} = -30\text{V}, P_{C_{\text{max}}} = 100\text{mW}$$

$$E_C = 40\text{V}, E_B = 20\text{V},$$

$$R_C = 10\text{k}\Omega, R_B = 1,3\text{M}\Omega.$$



Resolução

A determinação da zona de funcionamento e do PFR do TBJ deve ser feita em três passos:

1. Verificar qual a polarização mais provável das junções emissora e coletora do TBJ, atendendo à polaridade das baterias no circuito onde o transistor está inserido.
2. Avançar com uma hipótese relativamente à zona de funcionamento. Definida a zona de funcionamento, devem-se escolher as equações do transistor mais adequadas para resolver o problema com o mínimo de esforço e de tempo.
3. Confirmação, ou não, da hipótese.

A partir dos resultados obtidos, é obrigatório verificar se a hipótese é, ou não, confirmada. Neste último caso, os resultados obtidos não são corretos, pelo que o PFR deve ser, de novo, calculado para outra zona de funcionamento. Os resultados têm de ser consistentes com a zona de funcionamento correspondente.



Seguir-se-ão os passos anteriores para resolver o problema proposto.

A bateria E_B está ligada de modo a polarizar diretamente a junção emissora. Em relação à junção coletora, nada se pode dizer, uma vez que o valor de U_C depende de E_C e de E_B e de formas diferentes. Com efeito, o aumento de E_C favorece a polarização inversa da junção coletora, enquanto o aumento de E_B conduz à polarização direta dessa junção. Existem, portanto, duas zonas prováveis de funcionamento:

ZAD ($U_E > 0$, $U_C < 0$) ou

zona de saturação ($U_E > 0$, $U_C > 0$).

Em geral, deve escolher-se como primeira hipótese a ZAD porque permite utilizar expressões mais simples para o TBJ.

Considera-se, então, a hipótese de que o transistor está na ZAD.

Circulando na malha de entrada, obtém-se $I_B = (E_B - U_E)/R_B \cong E_B/R_B = 15,4 \mu\text{A}$, pois admitindo $U_E > 0$, pode-se desprezar U_E face a E_B .



Esta simplificação é aceitável, pois não é indicado o material semiconductor utilizado no fabrico do TBJ e, portanto, não se conhecem os valores típicos para as tensões de polarização direta das junções que, no entanto, se sabe ser da ordem de décimos de Volt. Para o Si, é usual utilizar $U_E \cong 0,7 \text{ V}$ quando se pretende obter um valor mais correto para I_B .

A corrente I_C dada por $I_C = \beta_F I_B + I_{CE0} [\exp(U_C/u_T) - 1]$ pode ser escrita como $I_C \cong \beta_F I_B + I_{CE0} = 3,08 \text{ mA}$, admitindo que $U_C \ll u_T$.

A corrente I_E obtém-se de $I_E = I_B + I_C = 3,09 \text{ mA}$. Com base nestes resultados, testa-se a hipótese considerada.

Começa-se por calcular a tensão aos terminais da junção coletora U_C .

$$U_C = R_{EC} I_C - E_C = -9,2 \text{ V.}$$



Verifica-se, portanto, que $U_{cdisr} < U_c \ll -u_T$, ou seja, que a junção coletora não está na disrupção. Embora sem calcular a tensão U_E , pode, por considerações de índole teórica, verificar-se se é positiva.

Recorre-se, assim, à equação de Ebers-Moll

$$I_E = I_{ES} \left[e^{(U_E/u_T)} - 1 \right] - \alpha_R I_{CS} \left[e^{(U_c/u_T)} - 1 \right]$$

, e, atendendo a que $U_c \ll -u_T$, pode-se escrever .

$$I_E = I_{ES} \left[e^{(U_E/u_T)} - 1 \right] + \alpha_R I_{CS}$$

Sendo $I_E > 0$ e com valores relativamente elevados, então, $U_E > 0$.

Os resultados obtidos confirmam que o TBJ está efetivamente na ZAD.



Os resultados permitem também verificar se o TBJ está, ou não, a trabalhar numa zona de funcionamento seguro. A potência posta em jogo no TBJ, na ZAD, é aproximadamente a potência posta em jogo na junção coletora. É dada por

$$P \simeq P_C = -U_C I_C = 28,3 \text{ mW}$$

ou seja, menor do que a potência máxima.

