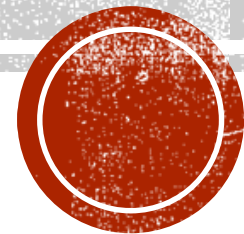


# TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO (TBJ)

João Paulo Neto Torres



- **Modelo  $\pi$ -híbrido**
- O tratamento matricial formal e bastante geral descrito anteriormente para o modelo incremental do TBJ possui algumas desvantagens.
  - cada parâmetro é, em geral, um **número complexo que varia, de uma forma mais ou menos complicada, com: a frequência, temperatura ambiente e PFR** e sem uma relação simples com a física do dispositivo.
- Um modelo incremental especialmente importante para o TBJ na ZAD é o modelo  $\pi$ -híbrido.
- TBJ está na ZAD, ou seja, com  $U_E > 0$  e  $U_C < 0$ , e suponha-se que as tensões sofrem variações incrementais, isto é,  $u_E$  varia de  $U_{E0}$  para  $U_{E0} + \Delta U_E$  e  $u_C$  de  $U_{C0}$  para  $U_{C0} + \Delta U_C$ , com  $\Delta U_E \ll U_{E0}$  e  $\Delta U_C \ll U_C$ .



Das equações de Ebers-Moll pode escrever-se:

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

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

$$U_{C_0} \ll$$



$$i_C \approx \alpha \left( e^{u_E/u_T} - 1 \right) - I_{CS}$$

$$U_{E_0} > 0$$

$$e^{u_E/u_T} \gg$$



$$i_C \approx \alpha e^{u_E/u_T}$$

ou seja, a variação  $\Delta U_C$  não afeta a corrente  $I_C$



A equação pode tomar a forma:

$$i_C \approx \alpha e^{U_{E0}/u_T} e^{\Delta U_E/u_T}$$

$$\Delta U_E \ll u_T$$

$$\exp(\Delta U_E / u_T) \approx 1 + \Delta U_E / u_T$$



$$i_C \approx \alpha e^{U_{E0}/u_T} \left( 1 + e^{U_{E0}/u_T} \Delta U_E / u_T \right)$$

ou seja:

$$i_C = \underbrace{\alpha e^{U_{E0}/u_T}}_{i_{C0}} \left( 1 + \underbrace{\alpha e^{U_{E0}/u_T}}_{\Delta i_C} \Delta U_E / u_T \right)$$



Sob o ponto de vista das pequenas variações, pode, então, escrever-se:

$$\Delta I_c = g_m \Delta U_E$$

em que  $g_m$  é designada por **condutância incremental** ou **transcondutância**, uma vez que traduz a influência que as variações da tensão de entrada têm nas variações da corrente de saída. É dada por:

$$g_m = \frac{\alpha_F I_{ES} e^{U_{E0}/u_T}}{u_T} = \frac{|I_{c0}|}{u_T}$$

A condutância incremental do transistor depende do PFR do transistor sendo, para uma dada temperatura, proporcional ao módulo da corrente de coletor no PFR.

A corrente de base varia igualmente com as variações de  $u_E$ .



- Na ZAD pode escrever-se:

$$I_B \cong (1 - \alpha_F) I_{ES} \delta(U_E)$$

- Para,  $\Delta U_E \ll$  obtém-se, então:

$$\Delta I_B = (1 - \alpha_F) I_{ES} e^{U_{E0}/u_T} \Delta U_E / u_T$$

$$\Delta I_B = g_\pi \Delta U_E$$

- onde:

$$g_\pi = \frac{(1 - \alpha_F) I_{ES} e^{U_{E0}/u_T}}{u_T} = \frac{|I_{B0}|}{u_T}$$

- é a condutância incremental de entrada, e, tal como , depende do PFR.



- A resistência incremental de entrada é dada por:

$$r_{\pi} = \frac{1}{g_{\pi}} = \frac{u_T}{|I_{B_0}|}$$

- Os parâmetros incrementais podem ser dados por:

$$g_m r_{\pi} = \beta_F$$

- Verifica-se que a resistência incremental de entrada está relacionada com a condutância incremental da junção emissora na ZAD, através da equação:

$$r_{\pi} = h_{i_e} = (1 + \beta_F) r_E = (1 + \beta_F) / g_E$$



- As equações de Ebers-Moll para a ZAD mostram que a corrente do coletor é constante e independente da tensão coletor-emissor para uma dada tensão na junção emissora.
- Na prática, a corrente no coletor sobe com o módulo da tensão entre o coletor e o emissor devido ao efeito Early. Sob o ponto de vista de sinal, este efeito é contabilizado em termos de uma resistência incremental de saída  $r_o$ , definida como:

$$(r_o)^{-1} = \left. \left( \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{CE}} \right) \right|_{I_B = C^{te}} = \frac{|I_c|}{V_A + |U_{CE}|}$$

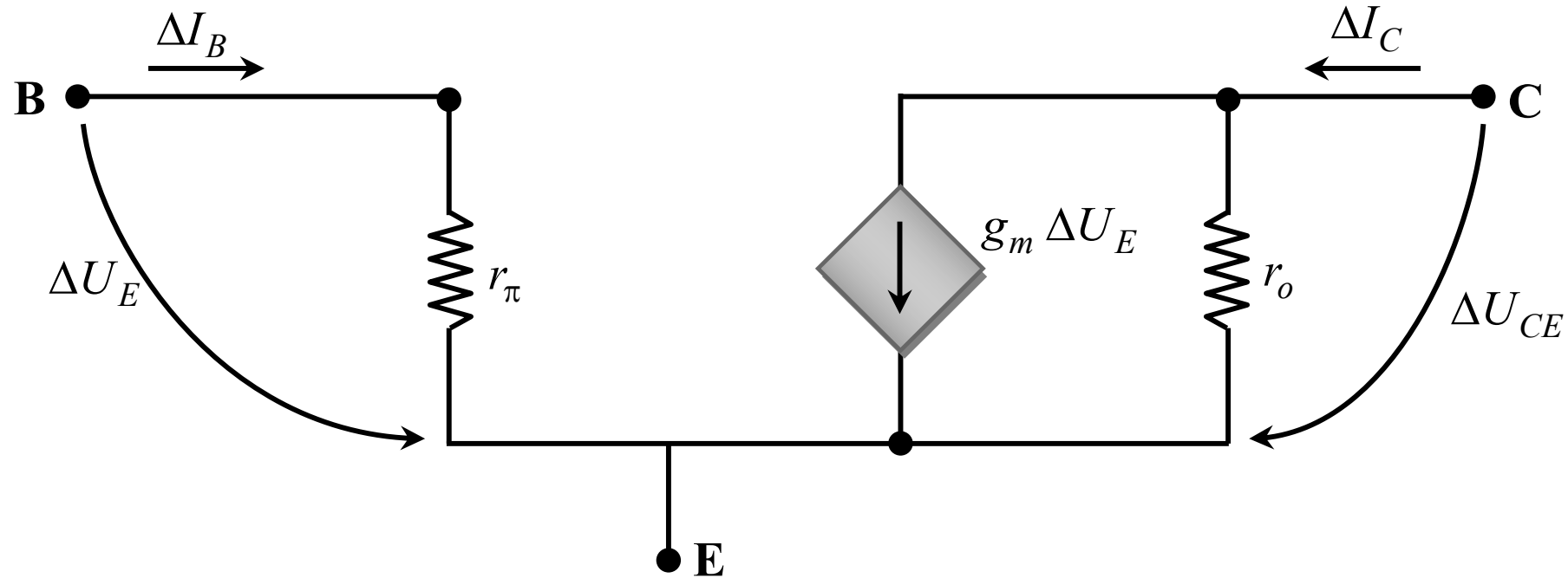
- onde  $V_A$  é o módulo da tensão de Early. A resistência incremental de saída está associada à tangente à curva  $I_C(U_{CE})$  no PFR na ZAD. Como, em geral,  $V_A \gg$  , admite-se:

$$r_o \approx \frac{V_A}{|I_C|}$$





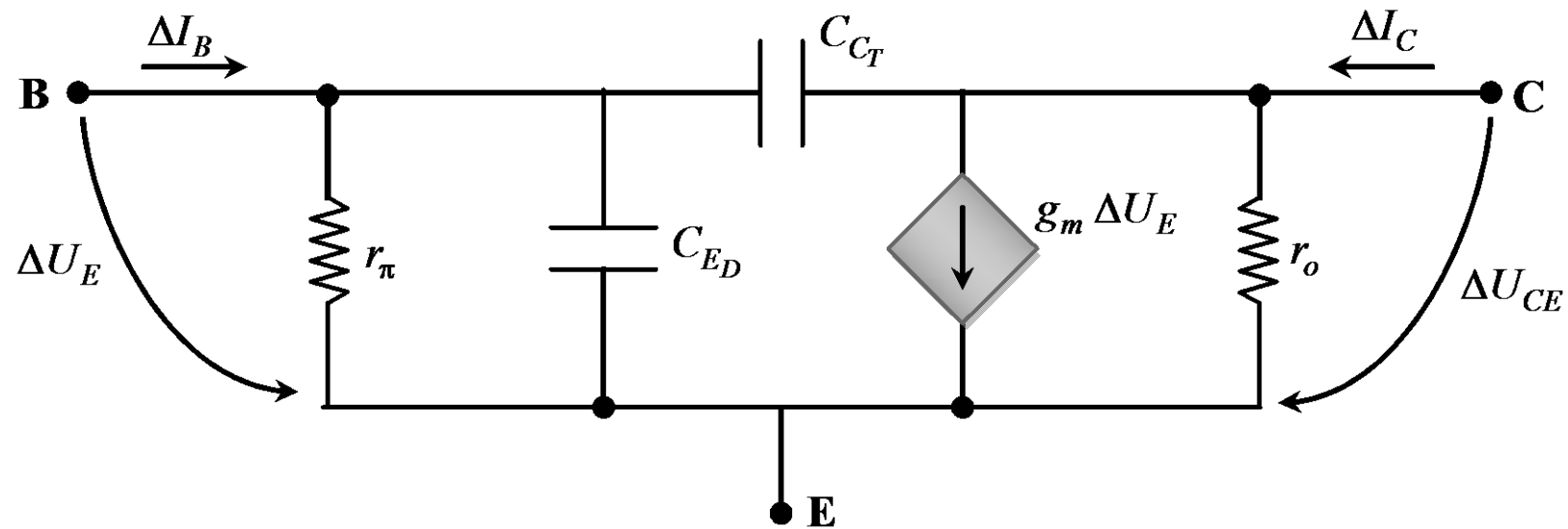
- A análise anterior permite estabelecer o modelo incremental do TBJ para baixas frequências, que se apresentado na Fig.



**Fig.**– Modelo incremental do TBJ para baixas frequências, onde se inclui o efeito de Early através de  $r_o$



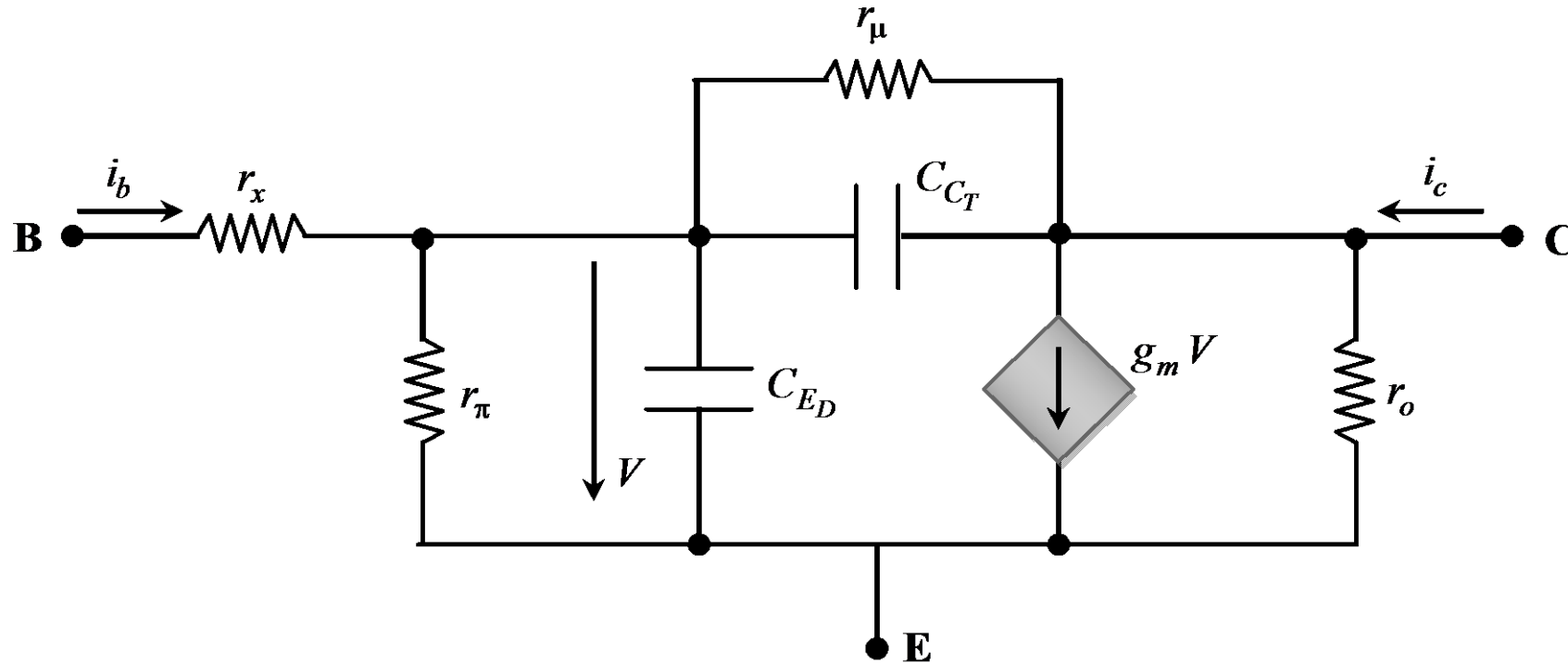
- Com o aumento da frequência, os efeitos capacitivos já se fazem sentir e devem ser incluídos no modelo incremental. Essas capacidades estão associadas às junções emissor e coletora fundamentalmente dados por  $C_{E_D}$  e  $C_{C_T}$ .
- Nessas condições, o modelo incremental do TBJ pode, então, ser representado pelo circuito  $\pi$ -híbrido da Fig.



**FIG.**– MODELO INCREMENTAL QUE INCLUI AS CAPACIDADES INTRÍNSECAS DO TBJ.



- Um modelo habitualmente utilizado está representado na Fig. É o modelo  $\pi$ -híbrido para altas frequências, sendo os sentidos válidos para um transistor n-p-n ou p-n-p.



**Fig.** – Modelo  $\pi$ -híbrido do TBJ para altas frequências e com inclusão das resistências de base e de coletor-emissor.

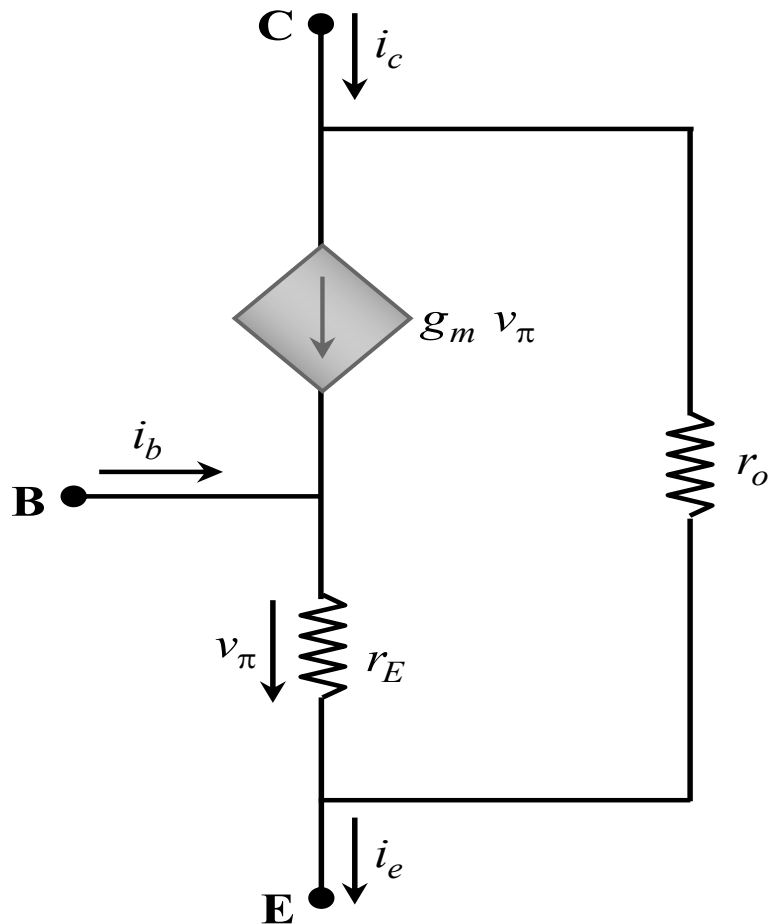
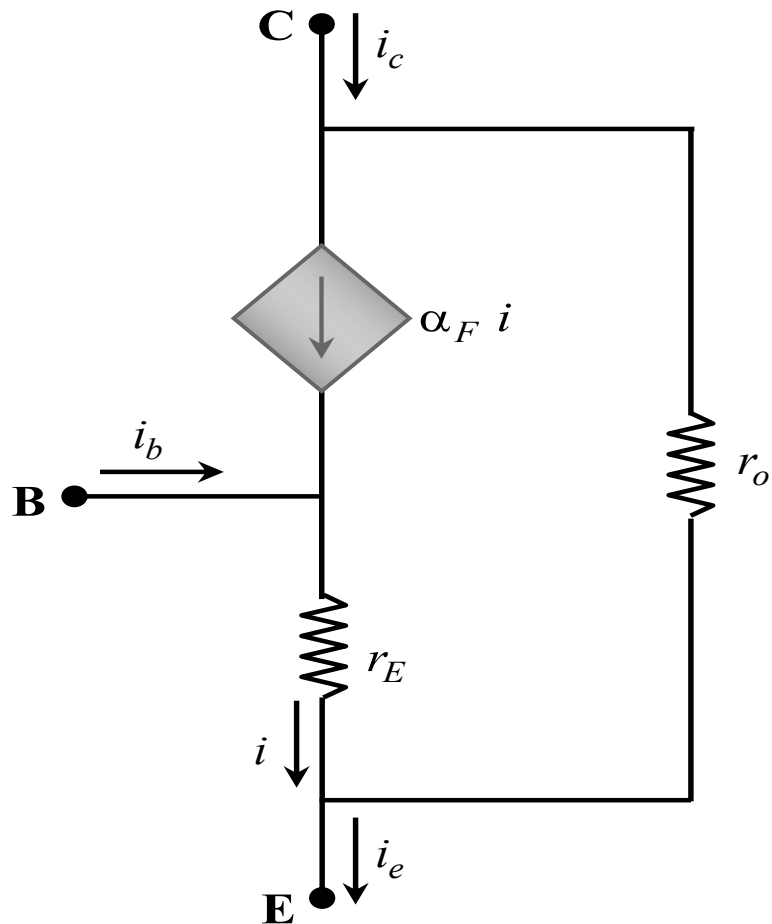


- Para qualquer estrutura TBJ, os sentidos para as correntes de base e de coletor devem ser concordantes (ambas a sair ou ambas a entrar), o sentido de  **$V$  concordante com  $i_b$**  e o sentido de  **$g_m V$  concordante com  $i_c$** .
- A inclusão de  $r_\pi$  no modelo permite dar conta da queda de tensão transversal na base do TBJ, que é efetivamente uma estrutura bidimensional. Em regime transitório, não pode ser desprezado, pois é responsável pela dinâmica de carga dos condensadores.



- **Modelo T**

- Este modelo incremental do TBJ traduz as **variações nas correntes do emissor e coletor em termos das variações das tensões do emissor e do coletor**. Está representado na Fig.



- Seguindo um raciocínio idêntico ao que foi utilizado para o modelo  $\pi$ -híbrido, define-se uma resistência incremental  $r_E$  que estabelece a relação entre a variação da tensão na junção emissora com a variação da corrente de emissor. É dada por:

$$r_E = \frac{u_T}{|I_E|}$$

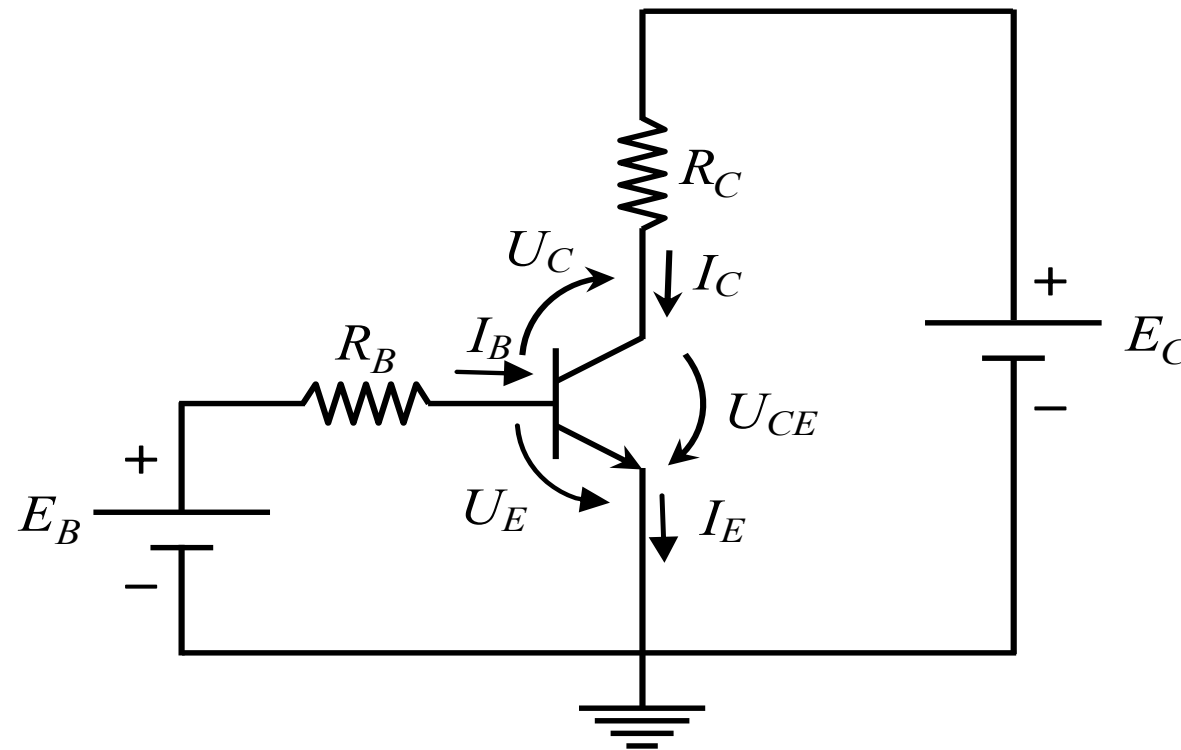
- as variações de corrente de coletor e de emissor estão ligadas através de  $\alpha_f$  que verifica a relação

$$g_m r_E = \alpha_F$$

- A resistência  $r_o$  modela o efeito de Early.



- **Exemplo:** Para o circuito EC (ver Fig. ) considere que a tensão  $E_B$  sofre uma variação  $\Delta E_B \ll E_B$ . Em regime quase-estacionário, calcular  $\Delta U_{CE} / \Delta E_E$  no PFR. Deduzir a expressão para a mesma relação mas utilizando o modelo  $\pi$ -híbrido para o transistor. Indicar as condições que garantem resultados idênticos para ambos os casos.



- Em regime quase-estacionário são válidas as equações utilizadas para a determinação do PFR. Aplicam-se variações nas grandezas afetadas e, por manipulação algébrica, determinam-se as relações pretendidas. Como o PFR está na ZAD, a relação para as correntes no TBJ é dada por:

$$I_C \simeq \beta_F I_B + I_{CE0}$$

- E a corrente de base por:  $I_B \simeq E_B / R_B$

- Da malha de saída tem-se  $U_{CE} = E_C - R_C I_C$

- Como as variações nas correntes e nas tensões só têm origem na variação de  $E_B$ , então, pode escrever-se:

$$\Delta I_B \simeq \Delta E_B / R_B$$

$$\Delta I_C \simeq \beta_F \Delta I_B$$

$$\Delta U_{CE} = -R_C \Delta I_C$$

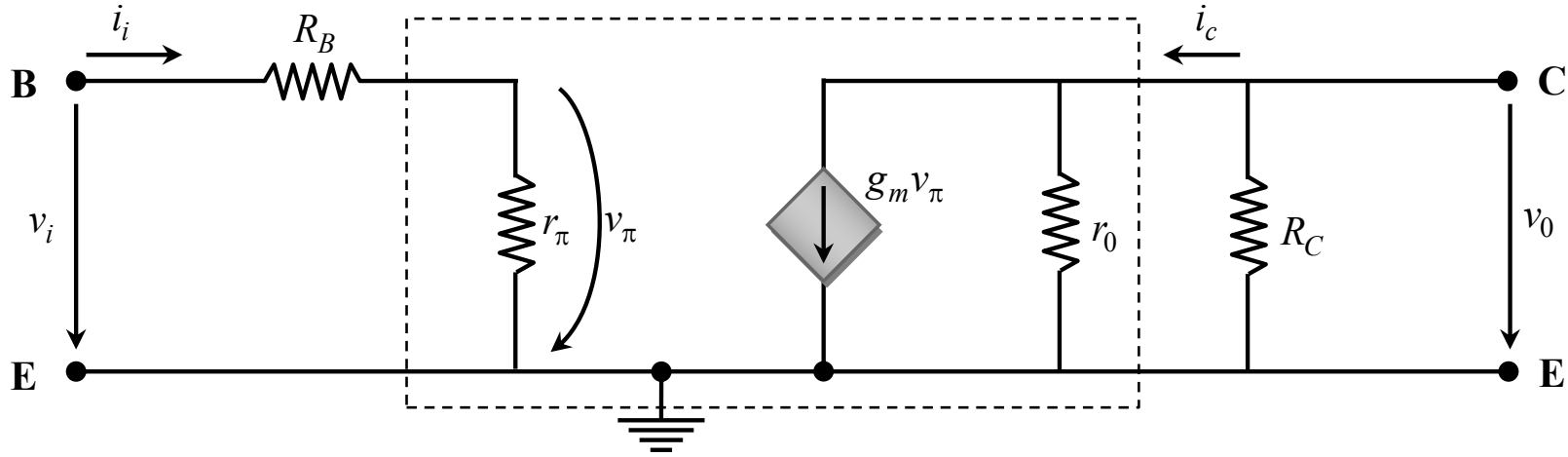




Destas relações obtém-se :  $\Delta U_{CE} / \Delta E_B = -\beta_F (R_C / R_B) = -1,54$ .

- A variação na tensão de saída é superior à da tensão na entrada. O sinal negativo indica que os sinais estão em oposição de fase.
- No entanto, deve-se ter em atenção que o PFR não deve, em caso algum, sair da ZAD, porque a expressão utilizada só é válida para essa região.
- É também possível utilizar o modelo  $\pi$ -híbrido para calcular a relação, já que o PFR está na ZAD. Sob o ponto de vista de sinal, o circuito a analisar está representado na figura seguinte.





$$A_v = v_o / v_i = -g_m \left[ r_\pi / (r_\pi + R_B) \right] (r_o // R_C)$$

$$A_i = -i_c / i_i = -g_m r_\pi \left[ r_o / (r_o + R_C) \right]$$



- **Aplicações: circuitos amplificadores**

- consideram-se alguns circuitos simples de aplicação do TBJ, nomeadamente os circuitos amplificadores envolvendo as montagens EC, (CC e BC). Em qualquer circuito amplificador, o TBJ deve estar a trabalhar na ZAD.

- **Montagens em circuitos analógicos:** definir-se os desempenhos através do ganho de tensão ( $A_v$ ), do ganho de corrente ( $A_i$ ), do ganho de potência ( $A_p$ ), da impedância de entrada ( $Z_i$ ) e da impedância de saída ( $Z_o$ ).

- **Circuitos de polarização**

- Na Fig, estão representados dois circuitos de polarização envolvendo duas fontes de alimentação. Do ponto de vista da estabilidade do PFR, o circuito (b) tem um melhor desempenho do que o circuito (a).



$$I_C \approx \beta_F \left( \frac{V_B - U_E}{R_B} \right)$$

$$I_C \approx \frac{-U_E}{R_E}$$

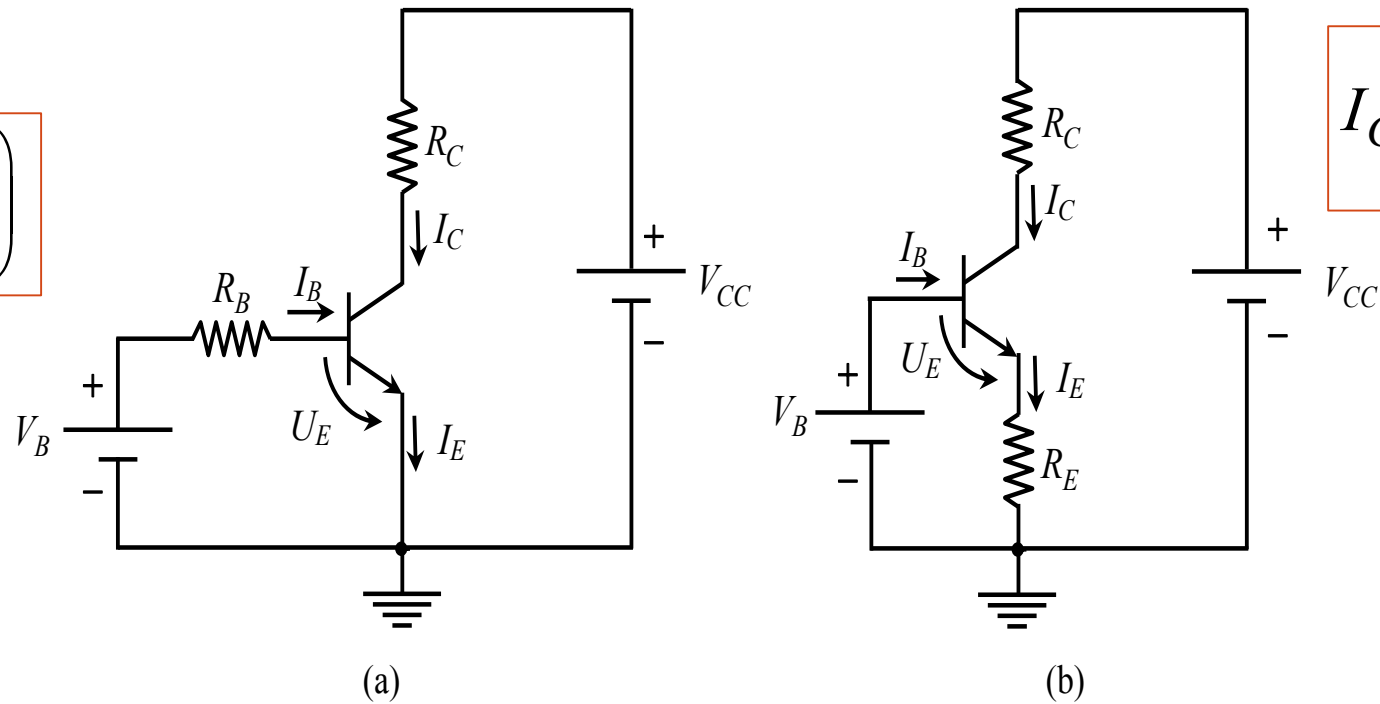


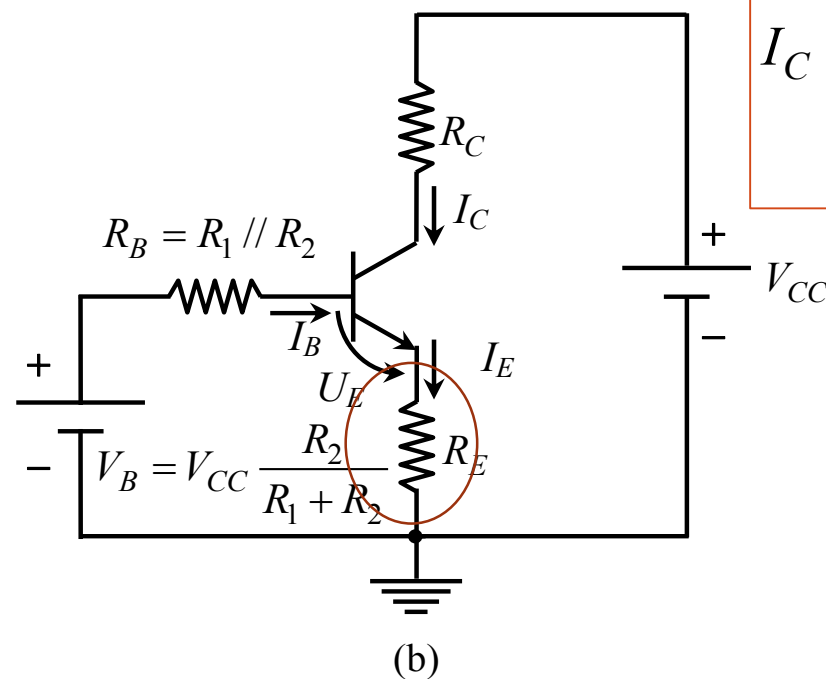
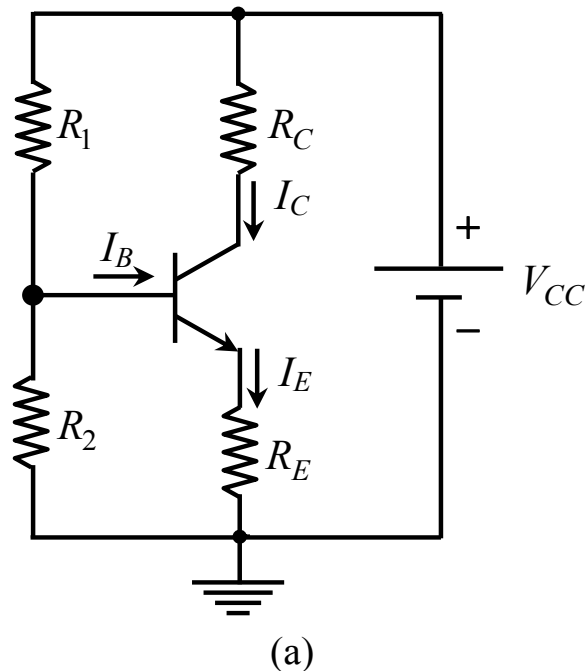
Fig. – Circuitos de polarização envolvendo duas fontes de alimentação:(a) Sem degeneração de emissor;  
(b) Com degeneração de emissor.

A equação mostra que a corrente  $I_C$  depende de  $\beta_F$  e de  $U_E$ , não sendo, por isso, possível definir completamente o seu valor, uma vez que:

- O ganho de corrente  $\beta_F$  varia de transistor para transistor mesmo dentro da mesma família;
- O ganho de corrente  $\beta_F$  varia com a temperatura;
- O ganho de corrente  $\beta_F$  varia com a corrente ;
- A tensão  $U_E$  varia com a temperatura.



- Para o circuito da Fig. b a corrente do coletor não depende do ganho de corrente.
- A resistência  $R_E$  estabelece a ligação entre as malhas de entrada e de saída, fazendo com que a saída influencie a entrada. Designa-se esta interação da saída na entrada por **retroacção** (*feedback*).
- Um circuito de polarização que, para além de estabilizar  $I_C$ , utiliza uma única fonte de alimentação, está representado na Fig. seguinte



$$I_C \approx \frac{V_B - U_E}{R_E + \frac{R_B}{1 + \beta_F}}$$

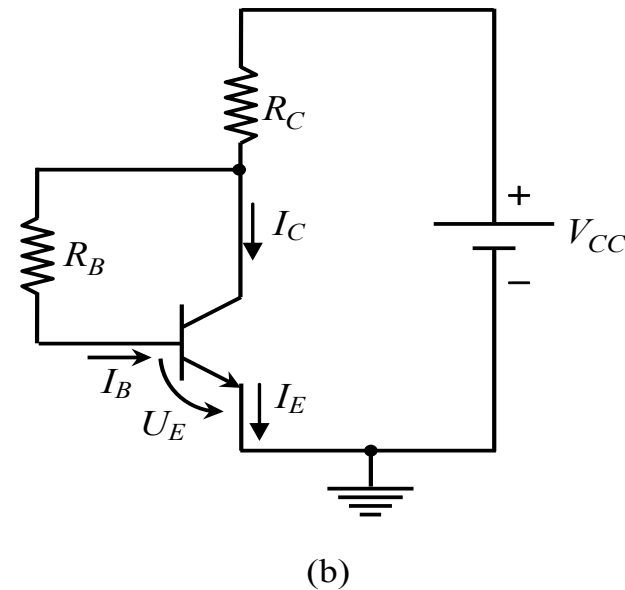
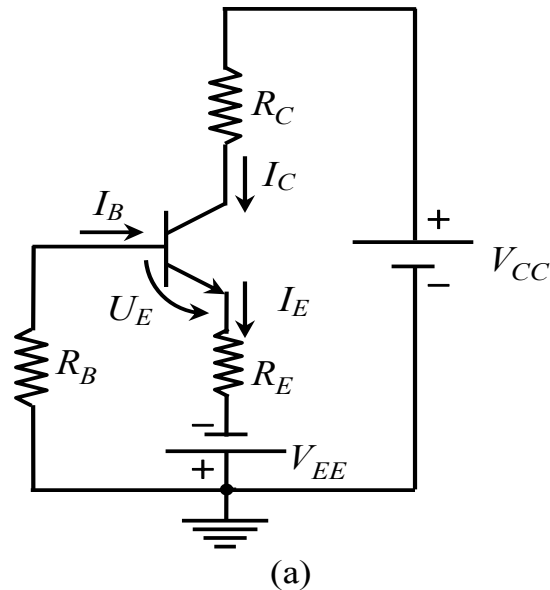


É usual dimensionar as resistências para que se verifique:

$$R_E I_E \cong R_C I_C \cong U_{CE} \cong V_{CC} / 3$$

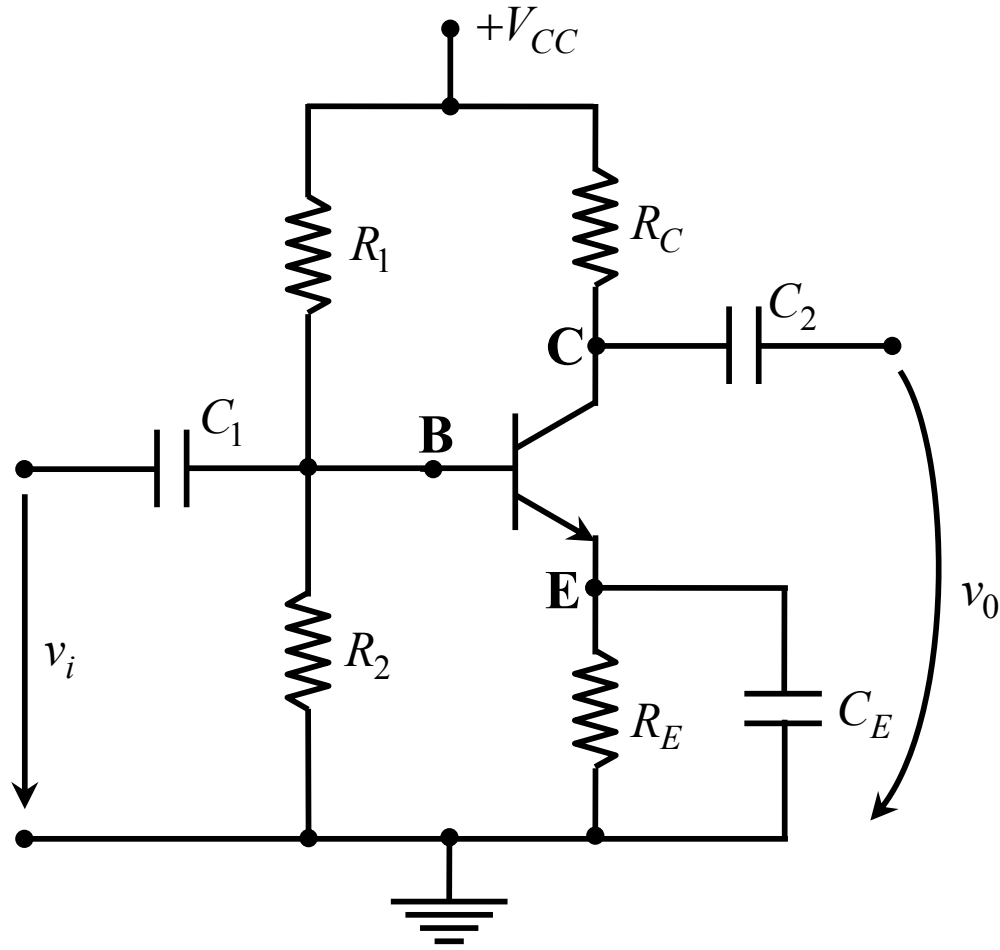
A resistência  $R_E$  permite uma melhor estabilização do PFR, porque um aumento de  $I_C$  produz um aumento da queda de tensão em  $R_E$  o que conduz a uma diminuição da tensão na junção emissora e, portanto, a uma diminuição do valor de  $I_C$ .

Uma situação semelhante à anterior e, de certo modo, mais simples de implementar está representada na Fig. (a), que envolve duas fontes de alimentação



- **Exemplo : Montagem de emissor comum (EC)**

- Um circuito amplificador típico da montagem EC está representado na Fig.



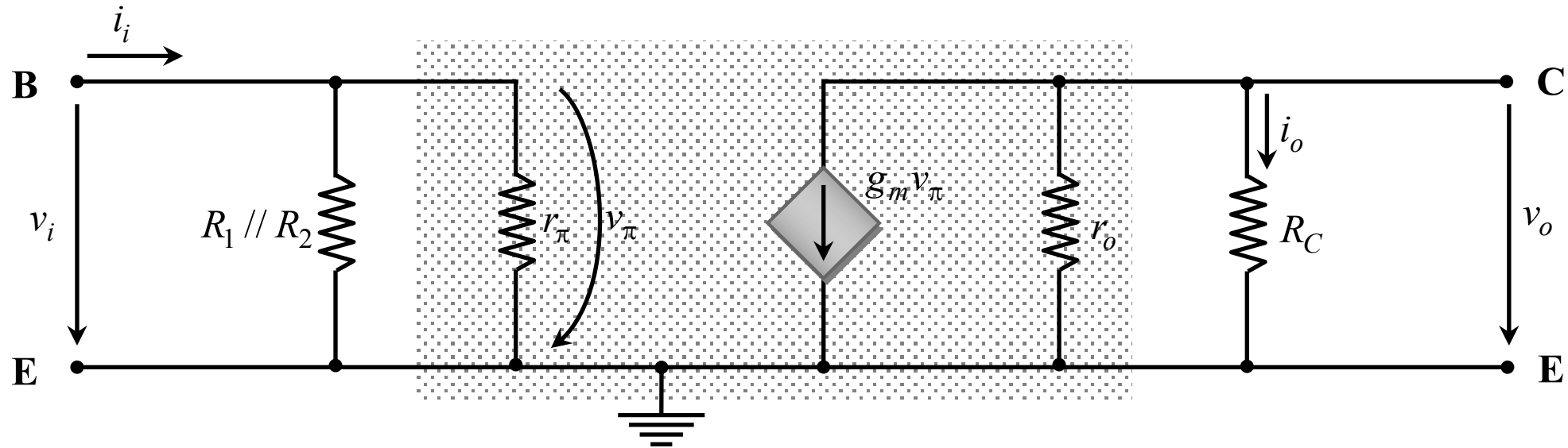
Os condensadores  $C_1$  e  $C_2$  bloqueiam a corrente contínua e são considerados como curto-circuitos para o sinal na gama de frequências de interesse.

**Análise do circuito:**

- Análise DC
- Análise AC



Nas frequências intermédias, em que os condensadores são curto-circuitos e os efeitos das capacidades incrementais do TBJ se podem desprezar, o circuito incremental correspondente à montagem EC da Fig.



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (r_o // R_C)$$

