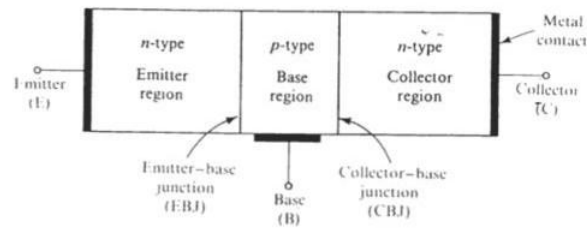


# TRANSISTOR BIPOLAR:

①



- DEPENDENDO DAS CONDIÇÕES DE POLARIZAÇÃO, PODEREMOS TER 3 MODOS DE OPERAÇÃO:

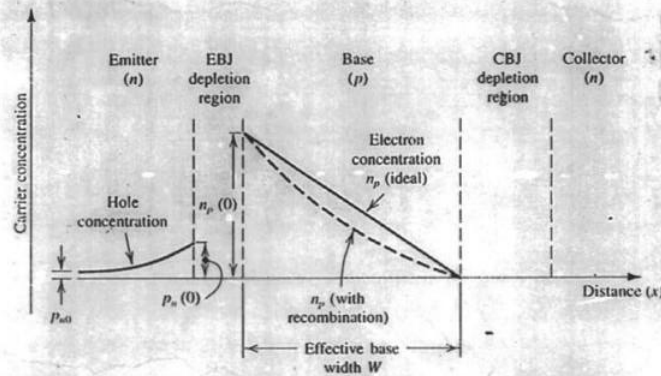
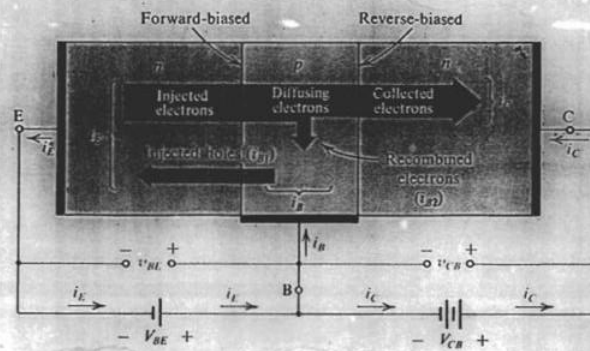
MODO	EBJ	CBJ
CORTE	IP	IP
ACTIVO	DP	IP
SATURAÇÃO	DP	DP

- ZONA ACTIVA — FUNCIONAMENTO DO TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR

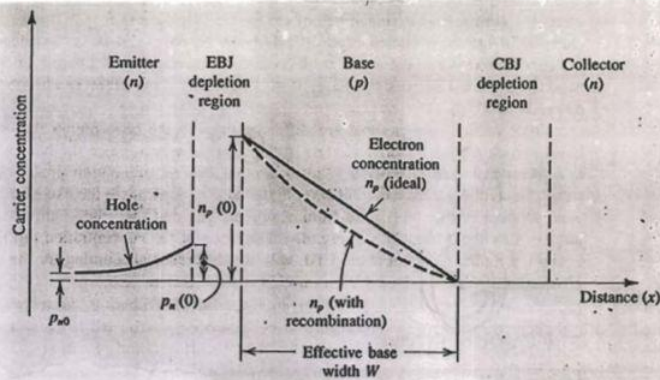
- SATURAÇÃO E CORTE — CIRCUITOS LÓGICOS

## TRANSISTOR BIPOLAR NA ZONA ACTIVA;

2



- CONSIDERAM-SE APENAS AS CORRENTES DE DIFUSÃO
- AS CORRENTES DE DRIFT SÃO DESPREZÁVEIS
- JUNÇÃO EB DIRECTAMENTE POLARIZADA ⇒ CONDUÇÃO
- CORRENTE TEM 2 COMPONENTES:
  - ELECTRÕES INJECTADOS DO EMISSOR;
  - LACUNAS INJECTADAS DA BASE;
- INTERESSA - NOS (POR RAZÕES QUE SE TORNARÃO EVIDENTES MAIS À FRENTE) QUE A 1ª COMPONENTE SEJA MAIS FORTE → DOPAGEM LEVE DA BASE



- COMO A BASE É MUITO ESTREITA, A CONCENTRAÇÃO DE ELECTRÕES NA BASE (INJECTADOS A PARTIR DO EMISSOR) É QUASE UMA LINHA RECTA
- CONCENTRAÇÃO DE ELECTRÕES JUNTO À JUNÇÃO CB É ZERO PQ ESTES SÃO ARRASTADOS PARA O COLECTOR PELO CAMPO ELÉCTRICO AÍ EXISTENTE

$$- n_p(0) = n_{p0} e^{V_{BE}/V_T}$$

$$V_T \approx 25 \text{ mV (T. AMBIENTE)}$$

$n_{p0}$  - CONCENTRAÇÃO DE EQUILÍBRIO DOS ELECTRÕES NA BASE

- CORRENTE DE DIFUSÃO NA BASE:

$$I_m = A_E q D_m \frac{dn_p(0)}{dx} = A_E q D_m \left( - \frac{n_p(0)}{W} \right)$$

$A_E$  - ÁREA SECÇÃO RECTA JUNÇÃO BE

$q$  - CARGA ELECTRÃO

$D_m$  - DIFUSIBILIDADE DOS ELECTRÕES NA BASE

$W$  - LARGURA EFECTIVA DA BASE

- O DESVIO DA CONCENTRAÇÃO FACE À RETA DEVE-SE À RECOMBINAÇÃO
- COMO A BASE É MUITO ESTREITA, É QUASE IRRELEVANTE.

### CORRENTE DE COLECTOR:

- CONSTITUÍDA POR ELECTRÕES  $Q$ , POR DIFUSÃO, CONSEGUEM ATINGIR A JUNÇÃO CB E SÃO ARRASTADOS PARA O COLECTOR PLO CAMPO ELÉCTRICO AÍ EXISTENTE

$$- i_c = I_m$$

$$i_c = I_s e^{V_{BE}/V_T}$$

$$- I_s = A_E q D_m n_{p0} / W \quad n_{p0} = \frac{n_i^2}{n_A}$$

$n_i$  - DENSIDADE INTRÍNSECA DE PORTADORES

$n_A$  - CONCENTRAÇÃO DE DOPAGEM NA BASE

$$- I_s = \frac{A_E q D_m n_i^2}{n_A W}$$

- $i_c$  INDEPENDENTE DE  $V_{CB}$  (SÓ SERVE PARA MANTER  $J_{CB}$  I.P.)
- COLECTOR COMPORTA-SE COMO FONTE CORRENTE
- $I_s$  DEPENDE  $n_i^2 \Rightarrow$  GRANDE DEPENDÊNCIA  $\gamma$  TEMP.

## CORRENTE DE BASE:

$i_B$  TEM 2 COMPONENTES:

- $i_{B1}$ : DEVIDA AS LACUNAS INJECTADAS DA BASE DO EMISSOR

$$i_{B1} = \frac{A E q D_p n_i^2}{N_D L_p} e^{U_{BE}/V_T}$$

$D_p$  - DIFUSIBILIDADE DAS LACUNAS NO EMISSOR

$L_p$  - COMPRIMENTO DIFUSÃO DO EMISSOR

$N_D$  - CONCENTRAÇÃO DE DOPAGEM NO EMISSOR

- $i_{B2}$ : LACUNAS FORNECIDAS PELO CIRCUITO EXTERIOR PARA SUBSTITUIR LACUNAS PERDIDAS POR RECOMBINAÇÃO

$$i_{B2} = \frac{1}{2} \frac{A e q W n_i^2}{\tau_b N_A} e^{U_{BE}/V_T}$$

$\tau_b$  - TEMPO MÉDIO DE UMA RECOMBINAÇÃO

$$i_B = i_{B1} + i_{B2} = I_s \left( \frac{D_p N_A W}{D_n N_D L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right) e^{U_{BE}/V_T}$$

$1/\beta$  (CONSTANTE)

$$i_B = \frac{i_C}{\beta}$$

$$i_B = \frac{I_s}{\beta} e^{U_{BE}/V_T}$$

- $\beta$  É CONSTANTE PARA UM DADO TRANSISTOR (100-200)
- $\beta$  - GANHO DE CORRENTE EM EMISSOR COMUM

## CORRENTE DE EMISSOR:

6

- APLICANDO A LEI DOS NODOS, VEM:

$$i_E = i_C + i_B$$

$$i_E = \frac{\beta+1}{\beta} i_C = \frac{\beta+1}{\beta} I_S e^{\frac{qV_{BE}}{kT}}$$

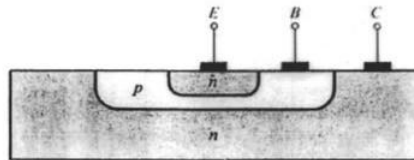
$$i_C = \alpha I_E \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

-  $\alpha \approx 1$

-  $\alpha$  - GANHO DE CORRENTE DE BASS COMUM

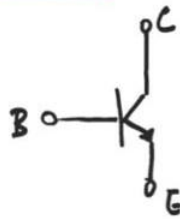
## ESTRUTURA TRANSISTORES REAIS:



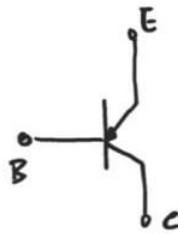
## TRANSISTORES PNP: DUAIS DOS NPN

## SIMBOLOGIA:

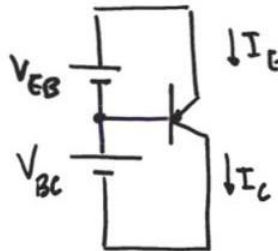
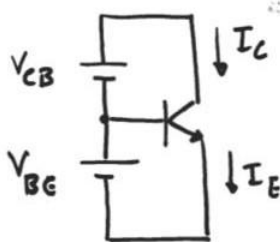
7



NPN



PNP



NOTA: COLECTOR E EMISSOR PODEM SER TROCADOS MAS OBTÉM-SE UM  $\alpha$  MUITO MENOR

## SUMÁRIO DE RELAÇÕES IMPORTANTES:

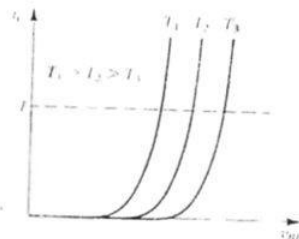
- $i_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$
- $i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_S}{\beta} e^{V_{BE}/V_T}$
- $i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \frac{I_S}{\alpha} e^{V_{BE}/V_T}$
- $i_C = \alpha i_E$     •  $i_B = (1-\alpha) i_E = \frac{i_C}{\beta+1}$
- $i_C = \beta i_B$     •  $i_E = (\beta+1) i_B$
- $\beta = \frac{\alpha}{\alpha-1}$     •  $\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$
- $V_T = kT/q$  (25 mV a Temp. AMBIENTE)

## REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CARACTERÍSTICAS DOS

### TRANSISTORES:

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} \quad I_E = \frac{I_C}{\alpha} \quad I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

- VARIAÇÃO DE  $V_{BE}$  COM TEMP.  $\rightarrow -2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$



- A CORRENTE DO COLECTOR É INDEPENDENTE DO  $V_{CE}$ , PELO QUE O COLECTOR SE COMPORTA COMO UMA FONTE DE CORRENTE IDEAL
- NA PRÁTICA Ñ É ASSIM DEVIDO AO EFEITO DE EARLY:

$V_{BE}$  const:

$V_{CE} \uparrow$

$\downarrow$

JUNÇÃO CB + CONTRAPOLARIZADA

$\downarrow$

REGIÃO DEPLECÇÃO  $\uparrow$

$\downarrow$

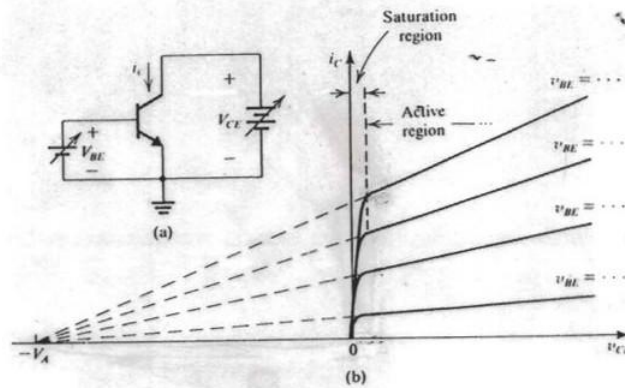
$W_{base} \downarrow$

$\downarrow$

AUMENTO  $I_C \Rightarrow$  AUMENTO DE  $I_C$

- ASSIM, O QUE SE TEM É:

8



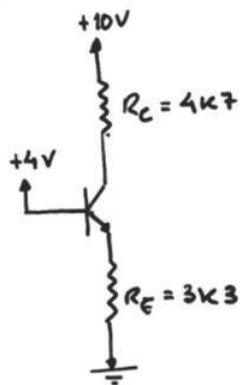
- PARA PEQUENOS VALORES DE  $V_{CE}$  ( $V_{CE} < V_B$ ), A JCB ESTÁ D.P.  $\Rightarrow$  REGIÃO SATURAÇÃO
- REGIÃO ACTIVA  $\Rightarrow$  RECTAS (SE Ñ FOSSE O EFEITO EARLY SERIAM HORIZONTAIS)
- QUANDO EXTRAPOLADAS, AS RECTAS INTERSECTAM-SE NUM PONTO  $V_A \Rightarrow$  TENSÃO DE EARLY
- $V_A$  É UM PARÂMETRO DO TRANSISTOR
- VALORES TÍPICOS: 50 - 100 V
- O DECLIVE DA RECTA É A RESISTÊNCIA DE SAÍDA DO TRANSISTOR, VISTA DO COLECTOR

$$r_o \approx \frac{V_A}{I_C} \rightarrow \text{CORRENTE, PARA UM DADO } V_{BE}, \text{ NA TRANSIÇÃO PARA A SATURAÇÃO}$$

## ANÁLISE DE CIRCUITOS c/ TRANSISTORES EM DC:

9

1.  $\beta = 100$



→ COMEÇA-SE POR CONSIDERAR QUE O TRANSISTOR ESTÁ NA ZONA ACTIVA

→ SE TAL NÃO FOR VERDADE, NO DECURSO DA ANÁLISE APARECERÁ UMA CONDIÇÃO REVELADORA DESSE FACTO

$V_{BE} \approx 0.7V$  (MODELO DE TENSÃO CONSTANTE PARA JUNÇÃO DIRECTA/ POLARIZADA)

- $V_E = V_B - V_{BE} = 4 - 0.7 = 3.3V$

- $I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3.3}{3k\Omega} \approx 1mA$

- $I_C = \alpha I_E$
- $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \approx 0.99 \Rightarrow I_C \approx 0.99mA$

- $V_C = 10 - I_C R_C \approx +5.3V$

- $V_{CB} = V_C - V_B = 1.3V \Rightarrow$  JUNÇÃO CB INV. POLARIZADA

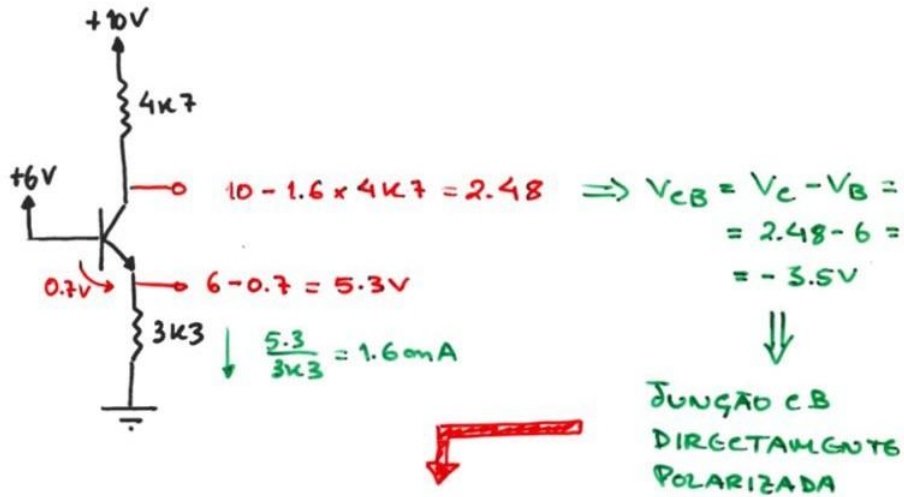
↙  
TRANSISTOR NA ZONA ACTIVA

- $I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} \approx 0.01mA$

NOTA:  $\alpha \approx 1$ , pelo que se pode quase sempre considerar  $I_C \approx I_E$

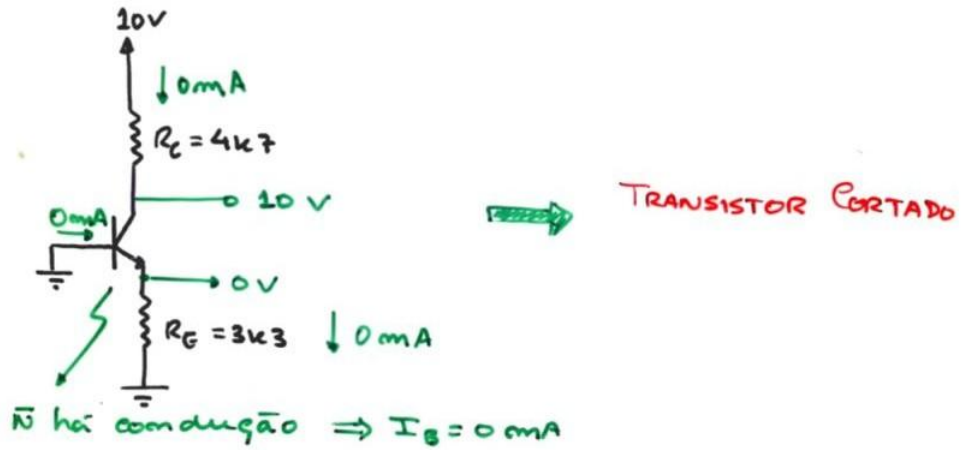
2.

10

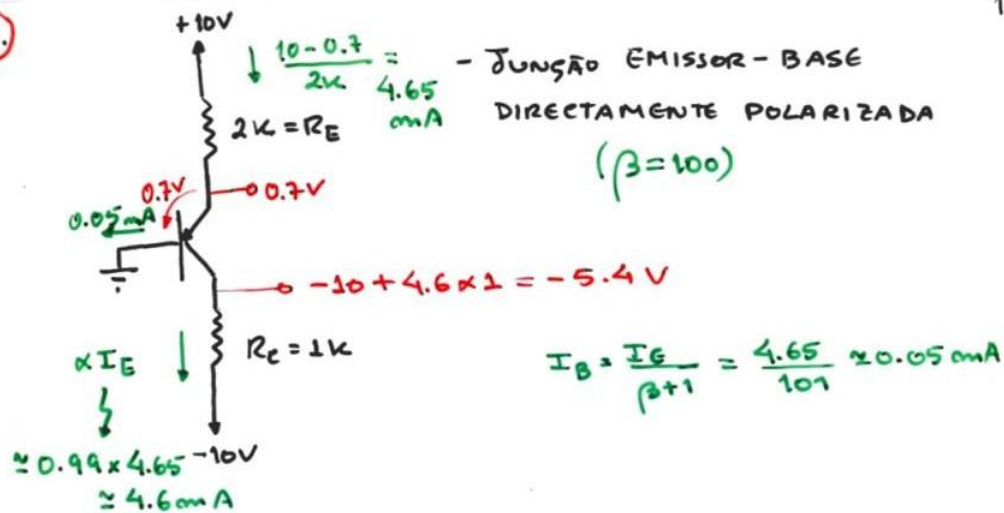


TRANSISTOR SATURADO

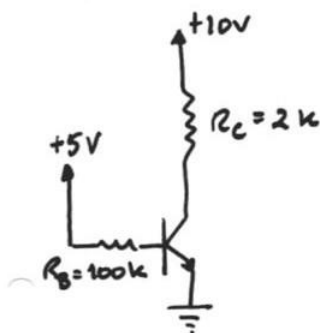
3.



4.



5.

 $\beta = 100$ 

- JUNÇÃO BE DIRECTA/ POLARIZADA

$$I_B = \frac{+5 - V_{BE}}{R_B} \approx \frac{5 - 0.7}{100k} = 0.0043 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0.0043 = 4.3 \text{ mA}$$

$$V_C = 10 - I_C R_C = 10 - 4.3 \times 2 = 1.4V$$

$$V_B = V_{BE} \approx 0.7V$$

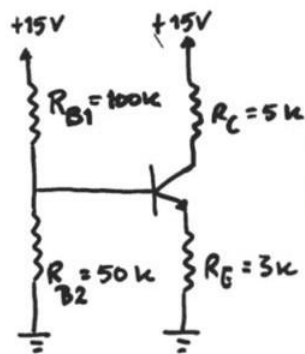
$$I_E = (\beta + 1) I_B \approx 4.3 \text{ mA}$$

TRANSISTOR  
 NA REGIÃO  
 ACTIVA  
 (PORQUÊ?)

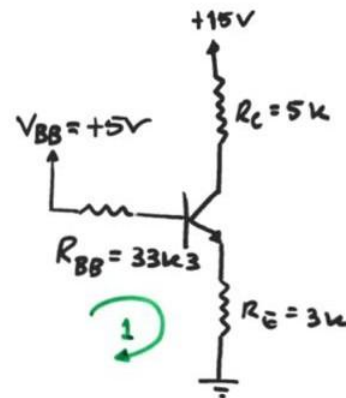
6.

$$\beta = 100$$

12



TEOREMA  
THEVENIN



$$V_{BB} = +15 \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = +5V$$

$$R_{BB} = R_{B1} \parallel R_{B2} = 33k\Omega$$

EQUAÇÃO DA MALHA 1:  $V_{BB} = I_B R_{BB} + V_{BE} + I_E R_E$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} \longrightarrow I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + [R_{BB} / (\beta + 1)]} = 1.29 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{1.29}{101} = 0.0128 \text{ mA}$$

$$V_B = V_{BE} + I_E R_E = 0.7 + 1.29 \times 3 = 4.57 \text{ V}$$

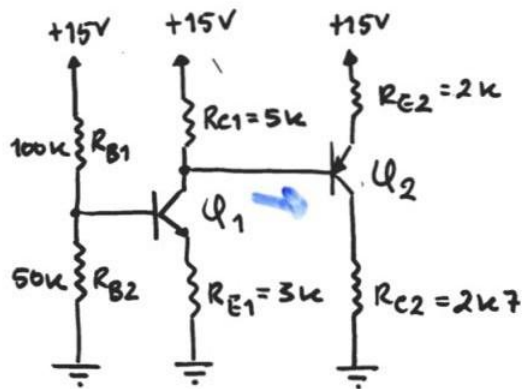
$$I_C = \alpha I_E = 0.99 \times 1.29 = 1.28 \text{ mA} \quad (\text{ASSUMINDO ZONA ACTIVA})$$

$$V_C = 15 - R_C I_C = 15 - 1.28 \times 5 = 8.6 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_B = 8.6 - 4.57 = 4.03 \Rightarrow \text{TRANSISTOR NA ZONA ACTIVA EFECTIVAMENTE}$$

7.

13



Do PROBLEMA ANTERIOR, TEMOS:

$$V_{B1} = 4.57V \quad I_{E1} = 1.29mA$$

$$I_{B1} = 0.0128mA \quad I_{C1} = 1.28mA$$

→ A TENSÃO DO COLECTOR VAI SER DIFERENTE, JÁ QUE PARTE DE  $I_C$  FLUI PARA A BASE DO 2º TRANSISTOR ( $I_{B2}$ )

→ ASSUMINDO  $I_{B2} \ll I_C$

$$V_{C1} \approx 15 - I_{C1} R_{C1} = 15 - 1.28 \times 5 = 8.6V$$

→ PARA Q2: (JUNÇÃO EB D.P.)

$$V_{E2} = V_{C1} + V_{EB} \approx 8.6 + 0.7 = 9.3V$$

$$I_{E2} = \frac{15 - V_{E2}}{R_{E2}} = 2.85mA$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_{E2} \quad (\text{ASSUMINDO REGIÃO ACTIVA})$$

$$= 0.99 \times 2.85 = 2.82mA \quad (\beta_2 = 100)$$

$$V_{C2} = I_{C2} R_{C2} = 2.82 \times 2.7 = 7.62V$$

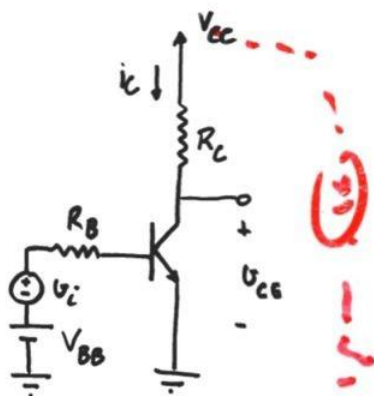
TRANSISTOR EFECTIVAMENTE ACTIVO

AVALIANDO O ERRO DA APROXIMAÇÃO ANTERIOR:

14

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{\beta_2 + 1} = \frac{2.85}{101} = 0.028 \text{ mA}$$

↳ E' EFECTIVAMENTE  
 $\ll I_{C1}$



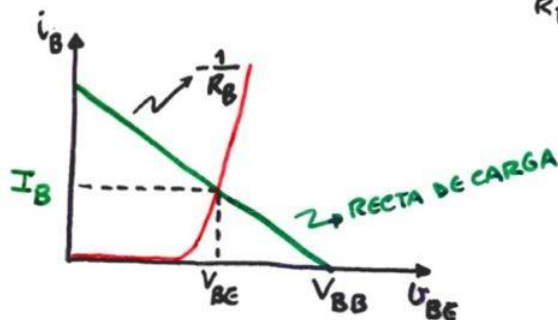
- SÓ É APLICÁVEL A CIRCUITOS SIMPLES.
- TORNA-SE MUITO COMPLICADA PARA CIRCUITOS MAIS COMPLEXOS.

- PONTO DE FUNCIONAMENTO A DC

$$V_i = 0$$

$$-V_{BB} + R_B i_B + V_{BE} = 0$$

$$i_B = \frac{-V_{BE} + V_{BB}}{R_B} = -\frac{1}{R_B} V_{BE} + \frac{V_{BB}}{R_B}$$



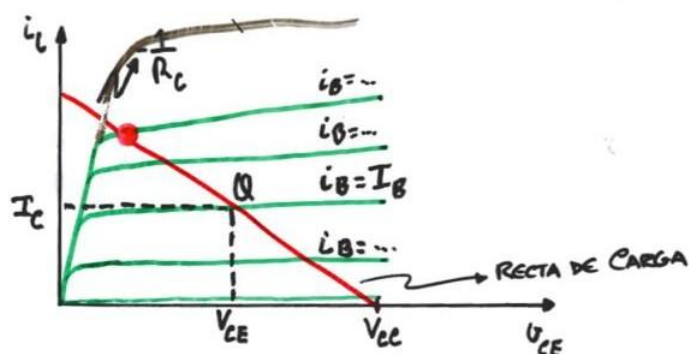
RECTA NO GRÁFICO  $i_B - V_{BE}$

- SABENDO O  $I_B$  E O  $V_{BE}$ , AVANÇA-SE PARA A FAMÍLIA DE CURVAS  $i_C - V_{CE}$

- O PONTO DE FUNCIONAMENTO DEVERÁ ENCONTRAR-SE SOBRE A CURVA CORRESPONDENTE AO VALOR DE  $I_B$  (ou  $V_{BE}$ ) ANTERIORMENTE DETERMINADO

$$V_{CE} = V_{CC} - i_C R_C \Leftrightarrow i_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{1}{R_C} V_{CE}$$

RECTA NO GRÁFICO  $i_C - V_{CE}$



- CONSOANTE A POSIÇÃO DO PONTO Q, ASSIM O TRANSISTOR ESTÁ NA SATURAÇÃO, ZONA ACTIVA OU CORTE.

### QUANDO $U_i \neq 0$ :

- CONSIDERE-SE QUE  $U_i(t)$  É UM SINAL TRIANGULAR
- O SINAL GLOBAL É  $V_{BB} + U_i(t)$
- PARA CADA VALOR INSTANTÂNEO DE  $V_{BB} + U_i(t)$  PODE-SE DESENHAR UMA RECTA DE CARGA
- EXEMPLO NA FIGURA QUE SE SEGUE
- ATENTAR NA APROXIMAÇÃO PARA PEQUENOS SINAIS  $\Rightarrow$  SINAIS À SAÍDA SÃO DA MESMA FORMA DO SINAL À ENTRADA
- ATENTAR NA EXCURSÃO DE SINAL E NA POSSIBILIDADE DE O TRANSISTOR ENTRAR NAS REGIÕES DE CORTE E SATURAÇÃO.



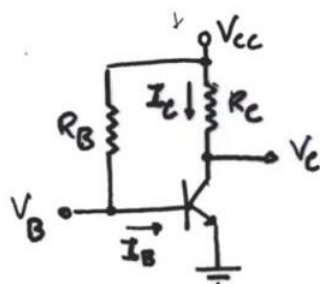
NECESSIDADE DE POLARIZAÇÃO CUIDADA

## POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES:

17

- CONSISTE EM ESTABELECEER UM PONTO DE FUNCIONAMENTO DE QUE SATISFAÇA OS NOSSOS PROPÓSITOS DE UTILIZAÇÃO DO TRANSISTOR.
- DEVE SER POUCO VARIÁVEL C/ A TEMPERATURA E PERMITIR A MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL POSSÍVEL

### POLARIZAÇÃO Ñ ESTABILIZADA:



$$V_C = V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

- $V_C$  DEPENDE FORTEMENTE DE  $\beta$ :
  - GRANDE DEPENDÊNCIA C/ A TEMPERATURA;
  - GRANDE VARIABILIDADE ENTRE TRANSISTORES DO MESMO TIPO.
- TORNA-SE DIFÍCIL PREVER O DESEMPENHO DO CIRCUITO

Ex:  $V_{CC} = 15V$  ;  $\beta = 50$  ;  $I_{Cmax} = 50mA$

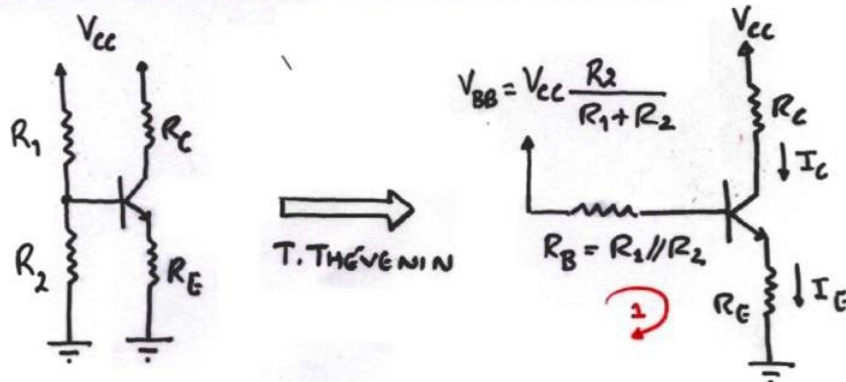
MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL  $\Rightarrow V_C = \frac{V_{CC}}{2}$

ARBITRANDO  $I_C = 5mA \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC} - V_{CC}/2}{I_C} = 1k\Omega$

$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 100\mu A$       $R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = 150k\Omega$

## POLARIZAÇÃO ESTABILIZADA C/ UMA SÓ FONTE:

18



$$\textcircled{1} \quad I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + R_B / (\beta + 1)}$$

→ PARA QUE  $I_E$  SEJA INSENSÍVEL À TEMPERATURA E VARIAÇÕES DE  $\beta$ , FAZ-SE C/ QUE:

$$V_{BB} \gg V_{BE} \quad 1.$$

$$R_E \gg \frac{R_B}{\beta + 1} \quad 2.$$

1. ASSEGURA QUE PEQUENAS VARIAÇÕES DE  $V_{BE}$  ( $\approx 0.7V$ ) SEJAM INSIGNIFICANTES RELATIVAMENTE A  $V_{BB}$

- HÁ LIMITES PARA  $V_{BB} \Rightarrow$  Qto. MAIOR FOR, MENOR SERÁ A SOMA DE  $V_{RC}$  C/  $V_{CE}$

- QUER-SE  $V_{RC}$  ELEVADO PARA GARANTIR EXCURSÃO DE SINAL ELEVADA (ANTES DO CORTE)

- QUER-SE  $V_{CE}$  ELEVADO (OU  $V_{CC}$ ) PARA GARANTIR EXCURSÃO DE SINAL ELEVADA (S/ ATINGIR A SATURAÇÃO)

CONFLITO  $\Rightarrow$  SOLUÇÃO COMPROMISSO (VER EX.)

2.

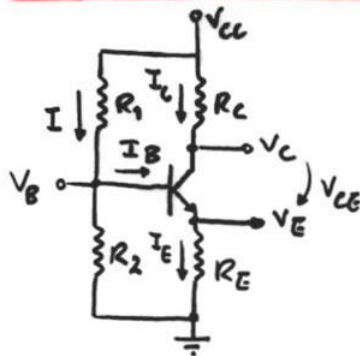
19

- FAZ C/ QUE  $I_E$  SEJA INSENSÍVEL ÀS VARIAÇÕES DE  $\beta$
- PARA SATISFAZER A CONDIÇÃO, BASTA FAZER C/ QUE  $R_B$  SEJA PEQUENO  $\Rightarrow R_1$  e  $R_2$  PEQUENOS
- $R_1$  e  $R_2$  PEQUENOS  $\Rightarrow$  - "SACAR" MAIS CORRENTE À FONTE
  - RESISTÊNCIA DE ENTRADA BAIXA

### COM PROMISSO

- ESTA CONDIÇÃO SIGNIFICA QUE SE QUER QUE A TENSÃO DE BASE SEJA INDEPENDENTE DE  $\beta$  E DETERMINADA EXCLUSIVAMENTE PELO DIVISOR RESISTIVO
- ISSO É POSSÍVEL SE A CORRENTE  $I$  (DIVISOR) FOR  $\gg$  QUE A CORRENTE DE BASE
- CONSEGUE-SE ESCOLHENDO  $R_1$  e  $R_2$  DE FORMA A QUE A CORRENTE  $I$  SEJA PRÓXIMA DE  $I_E$  ( $0,1 I_E$  A  $I_E$ )

### ABORDAGEM DO PROBLEMA TENDO EM CONTA ESTAS CONDIÇÕES:



$$I_B \ll I$$

$$V_B = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad V_E = V_B - V_{BE}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

$$V_C = V_{cc} - R_C I_C = V_{cc} - R_C \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

- $V_C$  SÓ DEPENDE DE PARÂMETROS EXTERNOS AO TRANSISTOR

## EXCURSÃO DE SINAL:

20

- MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL É ENCONTRADA ENTRE AS 2 SITUAÇÕES EXTREMAS DE FUNCIONAMENTO DO TRANSISTOR: CORTE E SATURAÇÃO.

- CORTE**
- O TRANSISTOR ESTÁ AO CORTE QUANDO  $I_C = 0$
  - Isto implica  $V_C = V_{CC}$
  - MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL POSITIVA:  $E_P = V_{CC} - V_{CQ}$

- SATURAÇÃO**
- $V_{CE}$  PARA O QUAL SE ENTRA NA ZONA DE SATURAÇÃO  $V_{CE} \approx 0.2V \rightarrow$  A CORRENTE COLECTOR É MÁXIMA
  - USUALMENTE, USA-SE UM  $V_{CEmin} \approx 1$  A  $2V$

A PARTIR DA FIGURA VEM:

$$V_{CC} = V_E + V_{CE} + R_C I_C$$

NO LIMITE, TEMOS:

$$V_{CC} = V_{E_{MAX}} + V_{CEmin} + R_C \times I_{C_{MAX}}$$

$$V_{E_{MAX}} = R_E I_{C_{MAX}} \Rightarrow I_{C_{MAX}} = \frac{V_{CC} - V_{CEmin}}{R_C + R_E}$$

- MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL NEGATIVA:

$$\begin{aligned} E_N &= V_{CQ} - (V_{E_{MAX}} + V_{CEmin}) = \\ &= V_{CQ} - (R_E I_{C_{MAX}} + V_{CEmin}) \end{aligned}$$

MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL = 2x O MENOR DO  $E_N$  E  $E_P$

### EXEMPLO:

21

$$V_{CC} = 15 \text{ V}$$

$$\beta = 100$$

- ARBITRA-SE  $I_C = 3 \text{ mA}$
- PARA GARANTIR UM BOM COMPROMISSO ENTRE MÁX. EXCURSÃO DE SINAL E BOA ESTABILIDADE DO PUNTO DE FUNCIONAMENTO, FAZ-SE:

$$V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2} = 7.5 \text{ V} \quad V_E = \frac{V_{CC}}{5} = 3 \text{ V}$$

$$- V_C = V_E + V_{CE} = 10.5 \text{ V} \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC} - V_C}{I_C} = \frac{4.5}{3 \times 10^{-3}} = 1.5 \text{ k}\Omega$$

$$- I_C \approx I_E, \text{ DONDE: } R_E = V_E / I_E = 3 / 3 \times 10^{-3} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$- V_B = V_E + V_{BE} = 3 + 0.7 = 3.7 \text{ V}$$

$$- \text{ARBITRANDO } I = 1 \text{ mA} \quad (I \gg I_B \approx 30 \mu\text{A})$$

$$R_2 = \frac{V_B}{I} = \frac{3.7}{1 \times 10^{-3}} = 3.7 \text{ k}\Omega \quad R_1 = \frac{V_{CC} - V_B}{I} = \frac{15 - 3.7}{1 \times 10^{-3}} = 11.3 \text{ k}\Omega$$

- MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL:

$$E_P = V_{CC} - V_{CEQ} = 15 - 10.5 = 4.5 \text{ V}$$

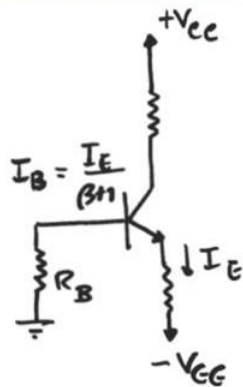
$$I_{C\text{MAX}} = \frac{V_{CC} - V_{CE\text{MIN}}}{R_C + R_E} = \frac{15 - 1}{(1.5 + 1) \times 10^3} = 5.6 \text{ mA}$$

$$E_N = V_{CEQ} - (R_E I_{C\text{MAX}} + V_{CE\text{MIN}}) = 4 \text{ V}$$

$$\text{EXCURSÃO MÁXIMA} = 2 \times 4 = 8 \text{ V}_{pp}$$

## POLARIZAÇÃO COM 2 FONTES DE ALIMENTAÇÃO:

22



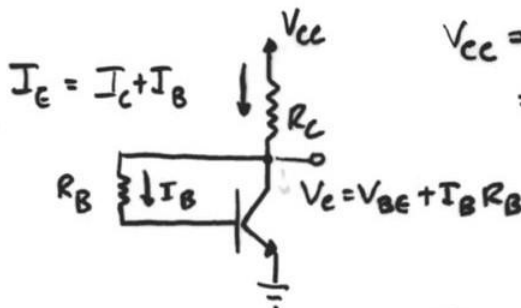
$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E + R_B / (\beta + 1)}$$

- AS CONDIÇÕES ANTERIORES SÃO VÁLIDAS:

$$- V_{EE} \gg V_{BE}$$

$$- R_E \gg \frac{R_B}{\beta + 1}$$

## POLARIZAÇÃO ALTERNATIVA:



$$\begin{aligned} V_{CC} &= I_E R_C + I_B R_B + V_{BE} = \\ &= I_E R_C + \frac{I_E}{\beta + 1} R_B + V_{BE} \end{aligned}$$

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B / (\beta + 1)}$$

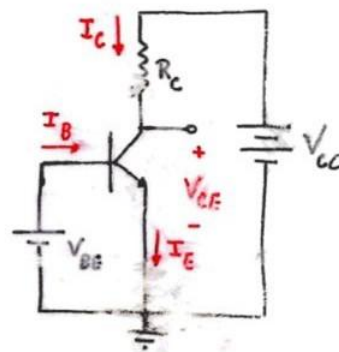
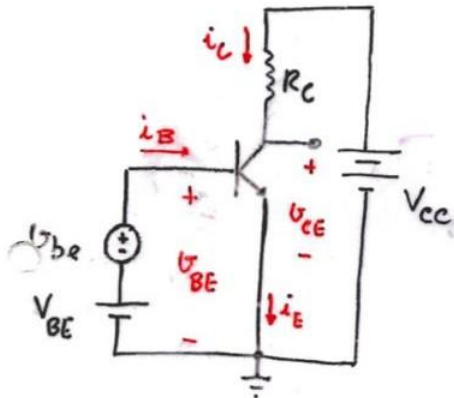
$$\bullet V_{CC} \gg V_{BE}$$

$$\bullet R_C \gg R_B / (\beta + 1) \quad V_{CB} = I_B R_B = I_E \frac{R_B}{\beta + 1}$$

## TRANSISTOR BIPOLAR COMO IC DE:

23

- COMO JÁ VIMOS NA ANÁLISE GRÁFICA, O TRANSISTOR DEVE ESTAR NA ZONA ACTIVA
- CONSIDERE-SE O CIRCUITO:



$$V_{BE} = 0.7V$$

### ANÁLISE DC (PONTO DE FUNCIONAMENTO):

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_E = I_C / \alpha$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$V_C = V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

→  $V_C > V_B$  PARA GARANTIR FUNCIONAMENTO NA ZONA ACTIVA

→  $V_C - V_B$  TEM DE ASSUMIR UM VALOR SUFICIENTE PARA A EXCURSÃO DE SINAL PRETENDIDA

## CORRENTE DE COLECTOR:

cap:

24

$$v_{be} \neq 0$$

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$$

$$i_c = I_s e^{v_{BE}/V_T} = I_s e^{(V_{BE} + v_{be})/V_T}$$

$$= \underbrace{I_s e^{V_{BE}/V_T}}_{I_C} \cdot e^{v_{be}/V_T}$$

$$i_c = I_C e^{v_{be}/V_T}$$

Se  $v_{be} \ll V_T$  (APROXIMAÇÃO DOS PEQUENOS SINAIS)

- Ao expandir a exponencial em série, podemos aproveitar-se apenas os 2 primeiros termos

$$i_c \approx I_C \left( 1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right)$$

$$i_c = I_C + \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

- A componente de sinal desta corrente é:

$$i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be} \quad \text{NA NENHUM}$$

$$i_c = g_m v_{be} \quad g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$g_m \Rightarrow$  TRANS CONDUTÂNCIA

25  
NOTA: A TRANSCONDUTÂNCIA É DIRECTA/ PROPORCIONAL  
À CORRENTE DE COLECTOR.

→ PARA OBTER  $g_m$  CONSTANTE  $\Rightarrow I_C$  CONSTANTE

→ PROVA-SE A NECESSIDADE DE UMA POLARIZAÇÃO  
ESTABILIZADA

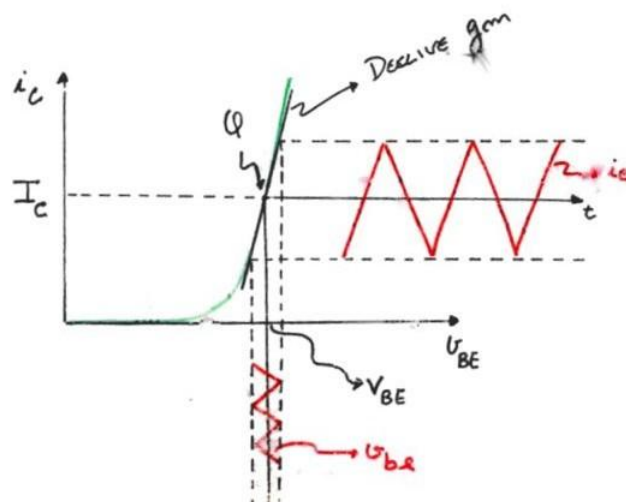
-  $g_m$  ASSUME VALORES ELEVADOS PARA A MAIORIA DOS  
BJT'S

Ex:  $I_C = 1 \text{ mA} \Rightarrow g_m = 40 \text{ mA/V}$

### INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DO $g_m$ :

-  $g_m$  É O DECLIVE DA CARACTERÍSTICA  $i_C - V_{BE}$   
PARA  $i_C = I_C$  (PONTO DE FUNCIONAMENTO).

$$g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial V_{BE}} \right|_{i_C = I_C}$$



- A APROXIMAÇÃO DOS PEQUENOS SINAIS IMPLICA MANTER A AMPLITUDE DO SINAL SUFICIENTEMENTE PEQUENA PARA QUE O FUNCIONAMENTO DO TRANSISTOR SE RESTRIJA A UMA PORÇÃO APROXIMADA/ LINEAR DA CURVA

$$i_c - v_{be}$$

- UM AUMENTO MUITO GRANDE DO SINAL IMPLICA QUE A CORRENTE DE COLECTOR TENHA COMPONENTES QUE NÃO ESTÃO LINEARMENTE RELACIONADAS C/  $v_{be}$  (DISTORÇÃO DO SINAL).
- TODA A ANÁLISE ANTERIOR LEVA A QUE POSSAMOS ENCARAR O TRANSISTOR (PARA PEQUENOS SINAIS) COMO UMA FONTE DEPENDENTE DE CORRENTE CONTROLADA POR TENSÃO.

### CORRENTE DE BASE E RESISTÊNCIA DE ENTRADA NA BASE:

$$\Rightarrow i_B = \frac{i_c}{\beta} = \underbrace{\frac{I_C}{\beta}}_{I_B} + \underbrace{\frac{1}{\beta} \left( \frac{I_C}{V_T} v_{be} \right)}_{i_b} \quad \text{with } g_m \text{ pointing to } \frac{I_C}{V_T}$$

$$i_B = I_B + i_b$$

$$i_b = \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{g_m}{\beta} v_{be}$$

$$\Rightarrow r_{\pi} \equiv \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$\frac{I_C}{\beta} = I_B$$

$$\Rightarrow r_{\pi} = \frac{V_T}{I_B}$$

### CORRENTE DE EMISSOR E RESISTÊNCIA DE ENTRADA DO EMISSOR:

27

$$\rightarrow i_E = \frac{i_c}{\alpha} = \frac{I_c}{\alpha} + \frac{i_c}{\alpha}$$

$$i_E = I_E + i_e$$

$$i_e = \frac{i_c}{\alpha} = \frac{I_c}{\alpha V_T} v_{be} = \frac{I_E}{V_T} v_{be}$$

$$\rightarrow r_e = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m} \approx \frac{1}{g_m}$$

### RELAÇÃO ENTRE $r_{\pi}$ e $r_e$ :

$$v_{be} = i_b r_{\pi} = i_e r_e$$

$$r_{\pi} = \frac{i_e}{i_b} r_e$$

$$r_{\pi} = (\beta + 1) r_e$$

### GANHO DE TENSÃO:

$$\begin{aligned} v_c &= V_{cc} - i_c R_c = \\ &= V_{cc} - (I_c + i_e) R_c = \\ &= (V_{cc} - I_c R_c) - i_e R_c = \\ &= V_c - i_e R_c \end{aligned}$$

$$v_o = -i_e R_c = -g_m v_{be} R_c = -g_m R_c v_{be}$$

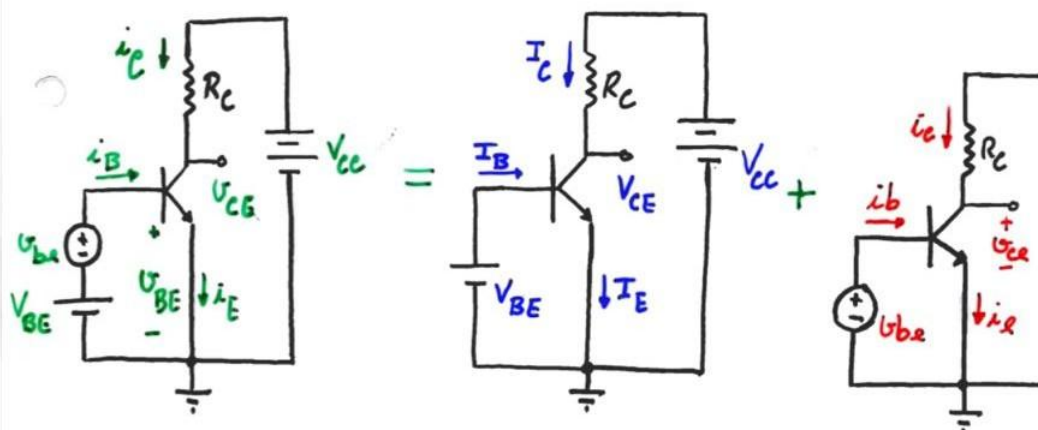
$$\text{GANHO EM TENSÃO} \equiv \frac{v_o}{v_{be}} = -g_m R_c$$

## MODELO EQUIVALENTE DO TRANSISTOR PARA PEQUENOS SINAIS: 2.8

- A ANÁLISE ANTERIOR MOSTRA-NOS QUE TODAS AS CORRENTES SÃO CONSTITUÍDAS POR DUAS COMPONENTES:

- COMPONENTE DC;
- COMPONENTE DE SINAL;

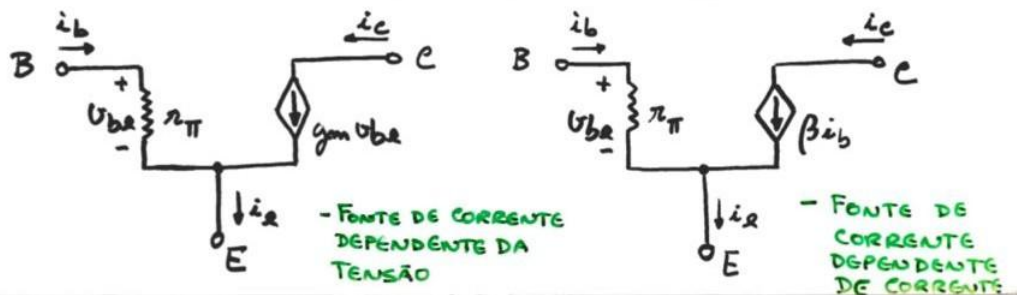
- ASSIM SENDO:



ESTAS RELAÇÕES PODEM SER TRADUZIDAS POR UM CIRCUITO EQUIVALENTE (NÃO ESQUECER QUE ISTO SE APLICA APENAS A PEQUENOS SINAIS)

$$\begin{cases} i_c = \frac{v_{be}}{r_o} \\ i_b = \frac{v_{be}}{r_{\pi}} \\ i_c = g_m v_{be} \end{cases}$$

## MODELO $\pi$ -HÍBRIDO PARA PEQUENOS SINAIS:



- A ANÁLISE DO CIRCUITO I ANTERIOR RESULTA NAS RELAÇÕES DA APROXIMAÇÃO PARA PEQUENOS SINAIS:

$$i_e = g_m v_{be}$$

$$i_b = \frac{v_{be}}{r_{\pi}}$$

$$\begin{aligned} i_e &= \frac{v_{be}}{r_{\pi}} + g_m v_{be} = \frac{v_{be}}{r_{\pi}} (1 + g_m r_{\pi}) = \\ &= \frac{v_{be}}{r_{\pi}} (1 + \beta) = \frac{v_{be}}{\frac{r_{\pi}}{1 + \beta}} \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{i_e = \frac{v_{be}}{r_e}}$$

- O CIRCUITO II PODE SER OBTIDO A PARTIR DO CIRCUITO I, FAZENDO:

$$g_m v_{be} = g_m (i_b r_{\pi}) = (g_m r_{\pi}) i_b = \beta i_b$$

- OS CIRCUITOS APRESENTADOS CONSTITUEM O MODELO  $\pi$ -HÍBRIDO SIMPLIFICADO
- O MODELO COMPLETO INCLUI O COMPORTAMENTO  $\bar{N}$  LINEAR DO TRANSISTOR.

- PERMITE A APLICAÇÃO DE UM PROCESSO SISTEMÁTICO DE ANÁLISE DOS CIRCUITOS COM TRANSISTORES:

1. DETERMINAÇÃO DO PONTO DE FUNCIONAMENTO DO BJT (C/ PARTICULAR  $I_C$ )
2. CÁLCULO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO MODELO PARA PEQUENOS SINAIS:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} \quad r_o = \frac{V_T}{I_C} \approx \frac{1}{g_m}$$

3. ELIMINAR AS FONTES DC
4. SUBSTITUIR O BJT PELO CIRCUITO EQUIVALENTE
5. ANALISAR O CIRCUITO RESULTANTE

- EVIDENTEMENTE QUE, COM UM POUCO DE PRÁTICA, SE PODE PASSAR POR CIMA DO PONTO 4. E ANALISAR O CIRCUITO DIRECTAMENTE, UTILIZANDO O MODELO IMPLICITAMENTE.

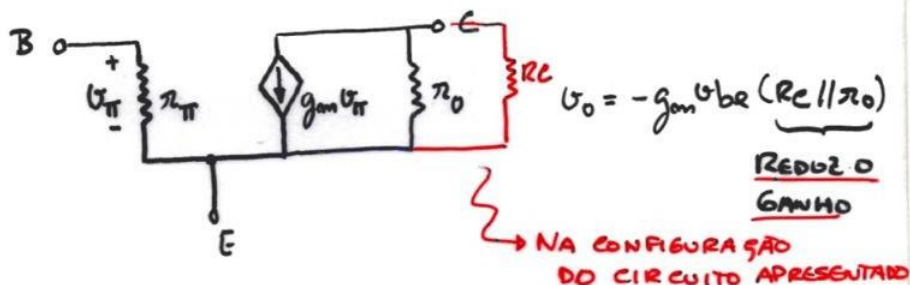
NOTA: EXEMPLOS DE APLICAÇÃO SERÃO RESOLVIDOS NA AULA PRÁTICA.

## MODELO $\pi$ -HÍBRIDO E EFEITO DE EARLY:

31

- VIMOS JÁ QUE, DEVIDO AO EFEITO DE EARLY, O COLECTOR N SE COMPORTA COMO UMA FONTE IDEAL, APRESENTANDO UMA DEPENDÊNCIA DE  $V_{CE}$ .
- ASSOCIAMOS A ESSA DEPENDÊNCIA UMA RESISTÊNCIA

$$r_o \approx \frac{V_A}{I_C} \quad \begin{array}{l} \rightarrow \text{TENSÃO DE EARLY} \\ \rightarrow \text{CORRENTE DE POLARIZAÇÃO} \end{array}$$



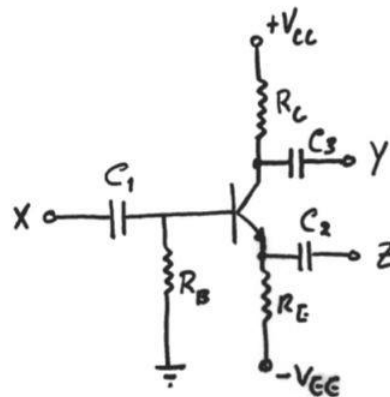
- SE  $r_o \gg R_C$ , A ALTERAÇÃO DO GANHO SERÁ DESPREZÁVEL.

## SUMÁRIO DAS RELAÇÕES IMPORTANTES PARA O MODELO:

- $g_m = \frac{I_C}{V_T}$  •  $r_e = \frac{V_T}{I_E} = \alpha \frac{V_T}{I_C} = \frac{\alpha}{g_m} \approx \frac{1}{g_m}$
- $r_{\pi} = \frac{V_T}{I_B} = \beta \frac{V_T}{I_C} = \frac{\beta}{g_m}$  •  $r_{\pi} = (\beta + 1) r_e$
- $g_m + \frac{1}{r_{\pi}} = r_e$

## CONFIGURAÇÕES BÁSICAS DE AMPLIFICADORES C/ BJT'S: 32

- CONSIDERE-SE O CIRCUITO QUE SE SEGUE:



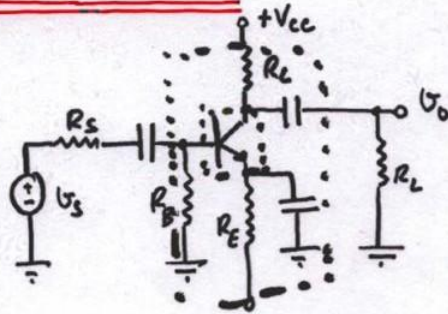
- $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  DE VALOR ELEVADO PARA PODEREM SER CONSIDERADOS CURTO-CIRCUITOS ÀS FREQ. DE INTERESSE. FUNCIONAM ASSIM COMO BYPASS OU ACOPLEMENTO
- SUPÕE-SE IGUALMENTE QUE A GAMA DE FREQUÊNCIAS A QUE SE VAI TRABALHAR É INTERMÉDIA.
- PARA SINAL, A POLARIZAÇÃO É IGUAL AO CIRCUITO ACIMA.

### EXISTEM 3 CONFIGURAÇÕES BÁSICAS:

- X À MASSA → BASE COMUM
- Z À MASSA → EMISSOR COMUM
- Y E À MASSA → COLECTOR COMUM

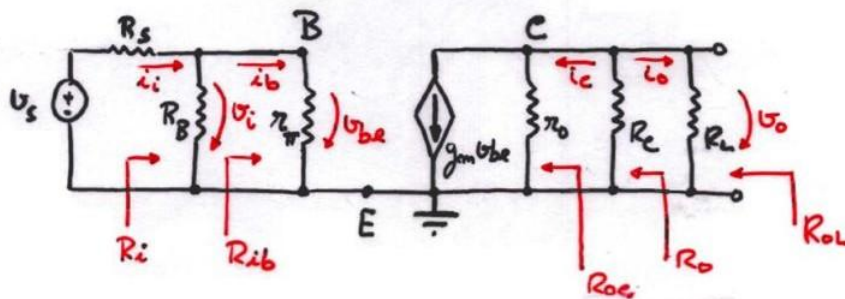
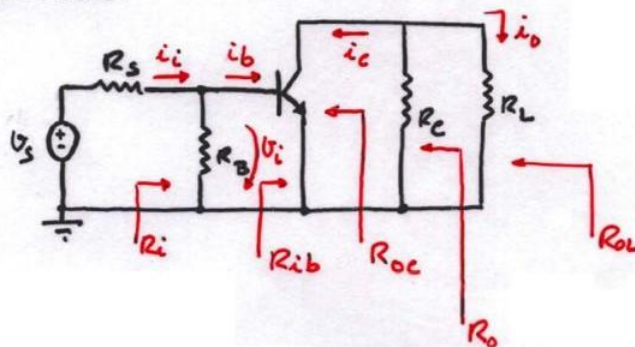
## EMISSION COMUM:

33



- $U_s, R_S$  PODE SER O EQUIVALENTE DE THÉVENIN DO ANDAR A MONTANTE
- $R_L$  PODE SER A RESISTÊNCIA DE ENTRADA DO ANDAR A JUSANTE.

- PARA SINAL:



- $R_{ib} = \frac{U_i}{i_b} = r_{\pi}$
- $R_i = R_B // R_{ib}$
- $R_{oc} = \frac{U_o}{i_c} \Big|_{U_s=0} = r_o$
- $R_o = R_{oc} // R_C$
- $R_{oL} = R_o // R_L$

$$\bullet A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \frac{v_i}{v_s} = A_{vi} \frac{v_i}{v_s}$$

$$\bullet A_{vi} = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (\tau_o \parallel R_c \parallel R_L) = -\frac{\beta}{r_\pi} (\tau_o \parallel R_c \parallel R_L)$$

$$\bullet \frac{v_i}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

$$\Rightarrow \text{Se } R_s \ll R_i \Rightarrow A_v \approx A_{vi}$$

$$\bullet A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_o}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_i} = A_{ib} \frac{i_b}{i_i}$$

$$\bullet A_{ib} = \frac{i_o}{i_b} = -g_m r_\pi (\tau_o \parallel R_c \parallel R_L) = -\beta (\tau_o \parallel R_c \parallel R_L)$$

$$\bullet \frac{i_b}{i_i} = \frac{R_B}{R_B + R_{ib}}$$

$$\Rightarrow \text{Se } \tau_o \gg R_c (R_c \parallel R_L) \text{ Temos, SIMPLIFICADA/ :}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_o}{i_c} \cdot \frac{i_c}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_i}$$

$$\frac{i_o}{i_c} = -\frac{R_c}{R_c + R_L}$$

$$\frac{i_c}{i_b} = g_m r_\pi = \beta = h_{fe} \quad \frac{i_b}{i_i} = \frac{R_B}{R_B + R_{ib}}$$

### RESUMO:

→  $R_i$  MUITO ELEVADA

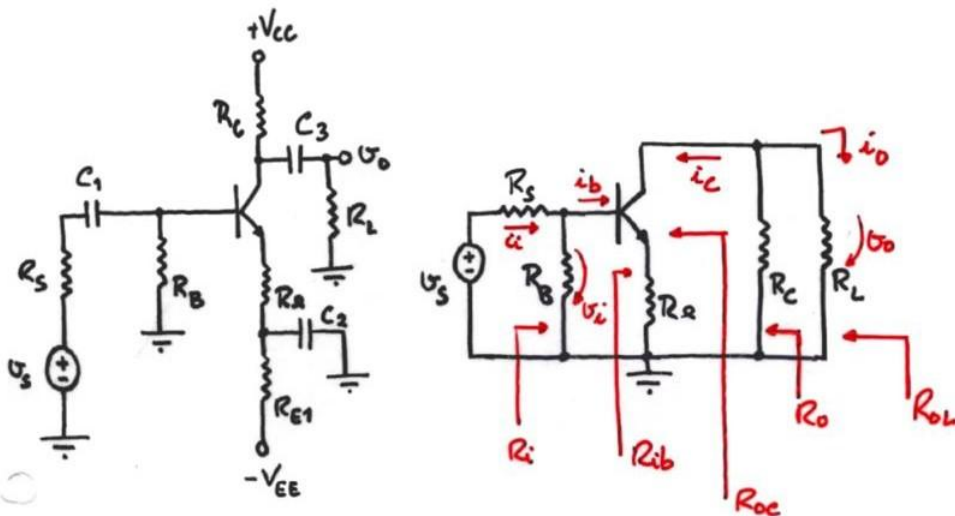
→  $R_o$  RAZOAVEL/ ELEVADA

→  $A_v$  NEGATIVO RAZOAVEL/ ELEVADO

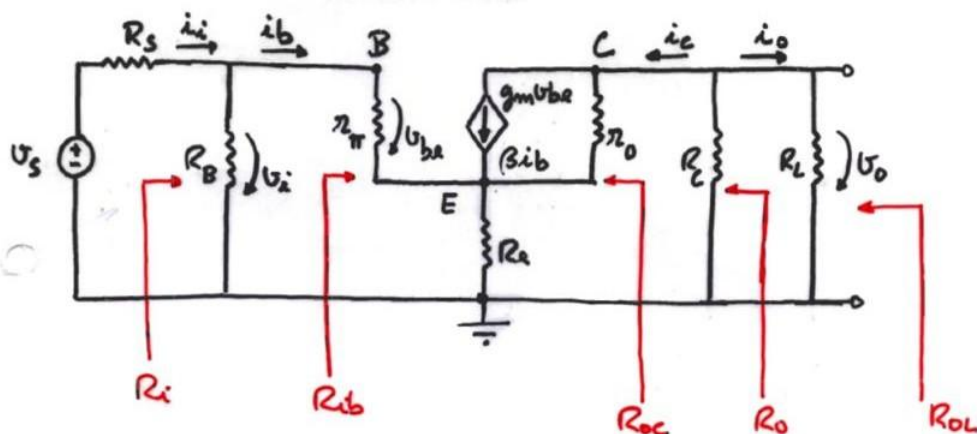
→  $A_i$  NEGATIVO RAZOAVEL/ ELEVADO

→  $R_B$  BAIXA DEGRADA  $R_i$  E  $A_v$

→  $R_L$  BAIXO DEGRADA  $A_v$



→ Se considerarmos que  $r_o \gg (R_C // R_L) + R_e$  podemos desprezar o efeito de  $r_o$ .



- $R_{ib} = \frac{v_i}{i_b} = r_{\pi} + (1 + g_m r_{\pi}) R_e = r_{\pi} + (1 + \beta) R_e$
- $R_i = R_B // R_{ib}$
- $R_{oc} = \frac{v_o}{i_c} \Big|_{v_s=0} = \left[ r_o \left( 1 + \frac{\beta R_e}{r_{\pi} + (R_B // R_S)} \right) \right] + [R_e // (r_{\pi} + (R_B // R_S))]$
- $R_o = R_{oc} // R_C \quad R_{OL} = R_o // R_L$

$$\bullet A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = A_{vi} \frac{v_i}{v_s}$$

$$\bullet A_{vi} = \frac{v_o}{v_i} = -g_m r_{\pi} (R_c \parallel R_L) / R_{ib} = -\frac{\beta (R_c \parallel R_L)}{R_{ib}}$$

$$\bullet \frac{v_i}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

$$- \text{Se } \underline{\beta \gg 1} \text{ e } \underline{\beta R_e \gg r_{\pi}} \Rightarrow A_{vi} = -\frac{R_c \parallel R_L}{R_e}$$

$A_{vi}$  INDEPENDENTE DE  $\beta$ !!!

$$\bullet A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_o}{i_c} \cdot \frac{i_c}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_i}$$

$$\bullet \frac{i_o}{i_c} = -\frac{R_c}{R_c + R_L} \quad \bullet \frac{i_c}{i_b} = g_m r_{\pi} = \beta = h_{fe}$$

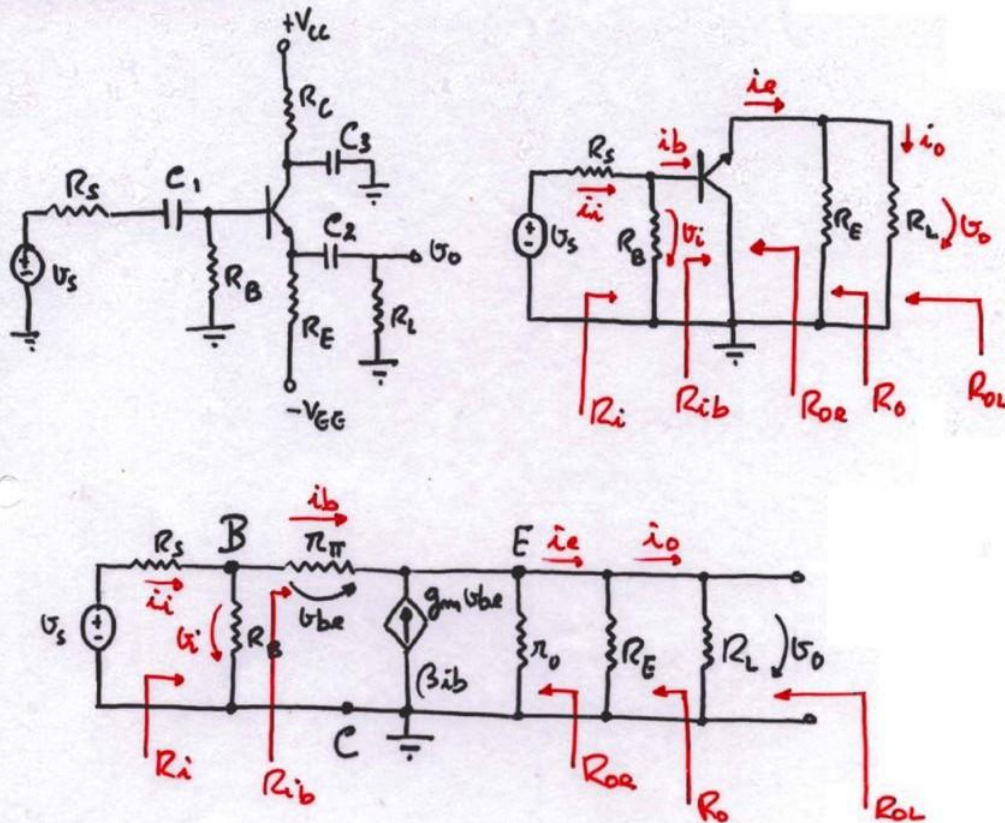
$$\bullet \frac{i_b}{i_i} = \frac{R_B}{R_B + R_{ib}}$$

### RESUMO:

- $R_i$  ELEVADA
- $R_o$  RAZOÁVEL / ELEVADA
- $A_v$  NEGATIVO RAZOÁVEL
- $A_i$  NEGATIVO, RAZOÁVEL / ELEVADO
- $R_B$  BAIXA DEGRADA  $R_i$  e  $A_v$
- $R_L$  BAIXA  $\Rightarrow A_v \downarrow$ , MAS  $A_i \uparrow$

## COLECTOR COMUM:

37



NOTA: É FREQUENTE  $R_C = 0$

$$\begin{aligned} R_{ib} &= \frac{v_i}{i_b} = r_{\pi} + (1 + \beta) (r_o \parallel R_E \parallel R_L) = \\ &= r_{\pi} + (1 + g_m r_{\pi}) (r_o \parallel R_E \parallel R_L) \end{aligned}$$

$$R_i = R_B \parallel R_{ib}$$

$$R_{oe} = \left. \frac{v_o}{-i_e} \right|_{v_s=0}$$

$$R_{oR} = \left[ \frac{r_{\pi} + (R_B \parallel R_s)}{1 + \beta} \right] \parallel r_o$$

$$R_o = R_{oe} \parallel R_E$$

$$R_{oL} = R_o \parallel R_L$$

- $A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = A_{v_i} \frac{v_i}{v_s}$
- $A_{v_i} = \frac{v_o}{v_i} = (1+\beta)(r_o \parallel R_E \parallel R_L) / R_{ib} = 1 - \underbrace{(r_{\pi} / R_{ib})}_{R_{ib} \gg r_{\pi}} \approx 1$
- $\frac{v_i}{v_s} = R_i / (R_i + R_s)$
- $A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_o}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_i} = A_{ib} \cdot \frac{i_b}{i_i}$
- $A_{ib} = \frac{i_o}{i_b} = (1+\beta)(r_o \parallel R_E \parallel R_L) / R_L$
- $\frac{i_b}{i_i} = \frac{R_B}{R_B + R_{ib}}$

⇒ Se  $R_B \gg R_{ib} \wedge R_L \ll R_E \ll r_o \Rightarrow A_i \approx 1+\beta$

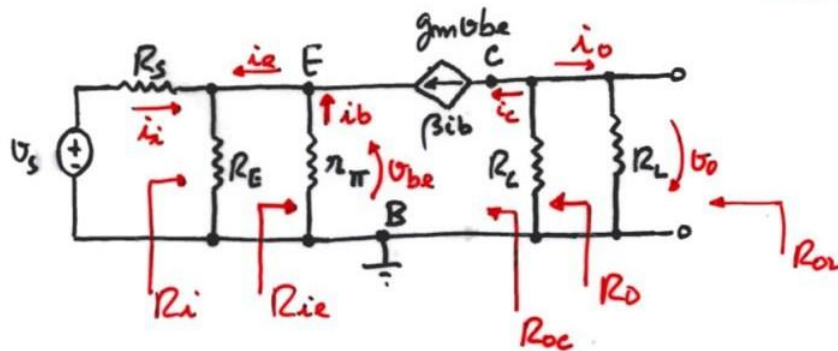
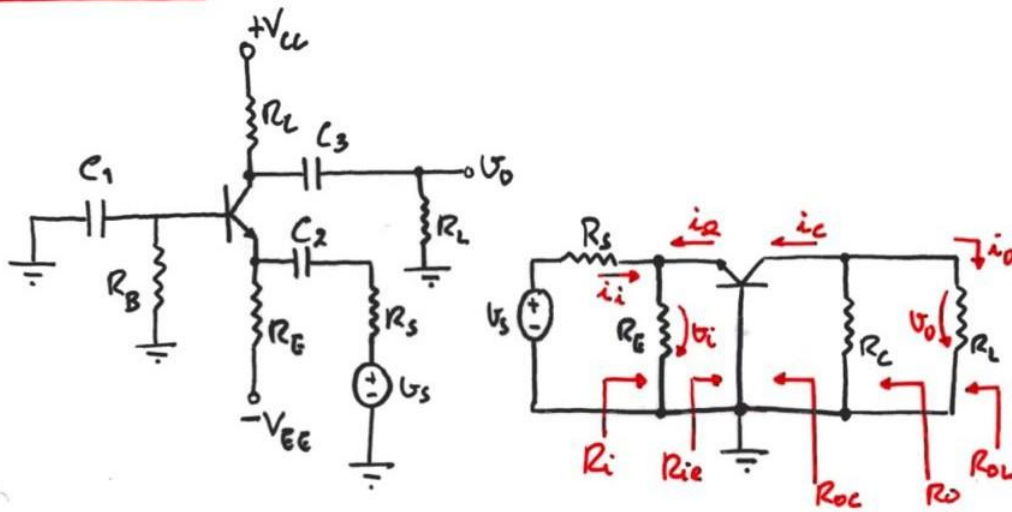
### Resumo:

- $R_i$  ELEVADA -  $R_o$  MUITO BAIXA
- $A_v$  POSITIVO INFERIOR A 1
- $A_i$  POSITIVO, RAZOAVEL / ELEVADO
- $R_B$  BAIXA  $\Rightarrow$  DEGRADAÇÃO DE  $R_i$  E  $A_v$
- MUITO UTILIZADO COMO "BUFFER"
- EMITTER FOLLOWER

NOTA IMPORTANTE: SE  $R_L$  FOR BAIXO, O CORTE APARECE MUITO CEDO (VER PQ)

## BASE COMUM:

39



- O EFEITO DE  $R_o$  É DESPREZÁVEL

$$R_{ie} = \frac{V_i}{-i_e} = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{\pi \pi}{1 + \beta} = \frac{\pi \pi}{1 + g_m \pi \pi} = \pi \pi \approx \frac{1}{g_m}$$

$$R_i = R_E \parallel R_{ie}$$

$$R_o = \left. \frac{V_o}{i_c} \right|_{V_s=0} \quad R_o = R_{oc} \parallel R_C \approx R_C \parallel R_{OL} = R_o \parallel R_L$$

- $A_b = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = A_{vi} \cdot \frac{v_i}{v_s}$
- $A_{vi} = \beta (R_c \parallel R_L) / r_{\pi} = g_m (R_c \parallel R_L) \simeq (R_c \parallel R_L) / R_{ie}$
- $\frac{v_i}{v_s} = R_i / (R_i + R_s)$
- $A_i = i_o / i_i = (i_o / i_e) (i_e / i_e) (i_e / i_i)$
- $\frac{i_o}{i_e} = - \frac{R_c}{R_c + R_L}$       •  $\frac{i_e}{i_e} = \frac{\beta}{1 + \beta} \simeq 1$
- $\frac{i_e}{i_i} = - \frac{R_e}{R_e + R_{ie}}$

### RESUMO:

- $R_i$  MUITO BAIXA
- $R_o$  RAZOAVEL / ELEVADA
- $A_v$  POSITIVO RAZOAVEL / ELEVADO
- $A_i$  POSITIVO, INFERIOR A 1
- USADO COMO ADAPTADOR DE IMPEDÂNCIAS
- USADO EM AMPLIFICADORES CASCODE.