

Transistor BJT

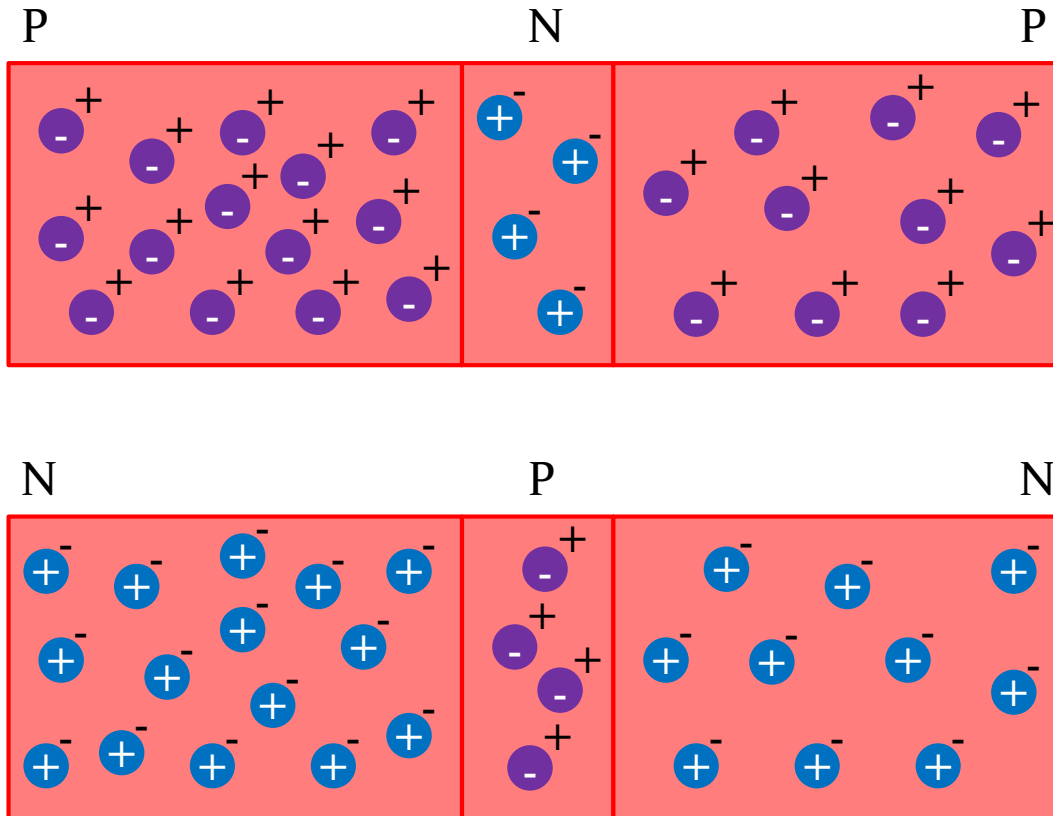
FABRÍCIO – RONALDO - DORIVAL

BJT

- Construção
 - ▣ Transistor Bipolar de Junção (BJT)
 - ▣ Construção análoga à do diodo.
 - No **diodo**, junta-se semicondutores do tipo P e N, com **mesmo nível de dopagem**.
 - ▣ Temos dois tipos de combinação para formar o BJT:
 - Junção de materiais do tipo P, N, e P
 - Junção de materiais do tipo N, P e N

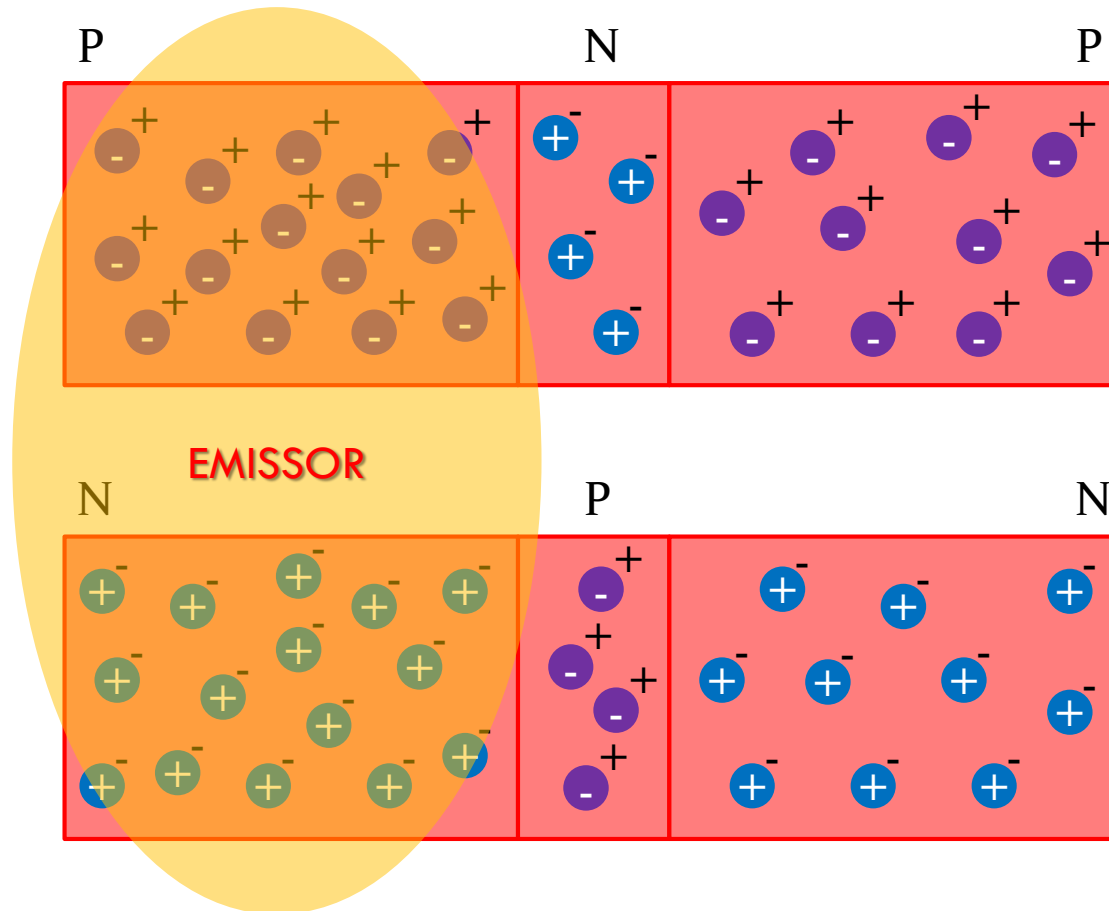
BJT

□ Construção



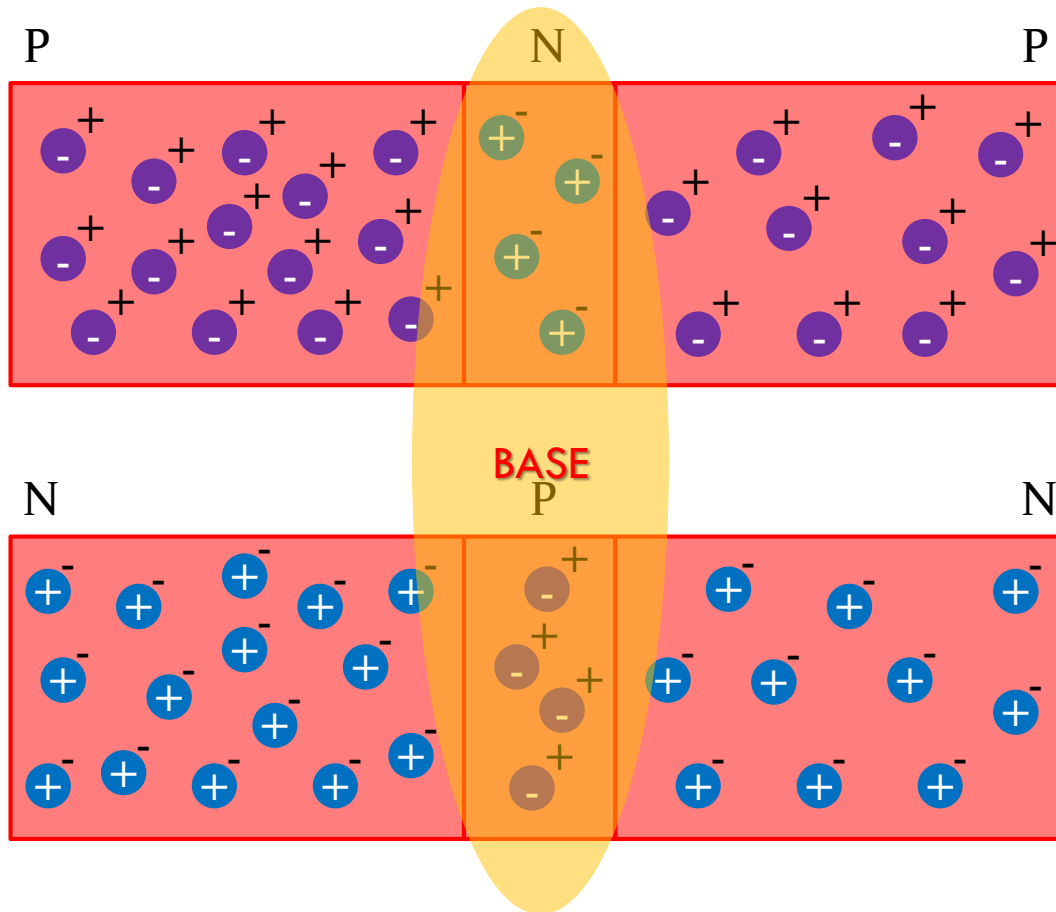
BJT

□ Construção



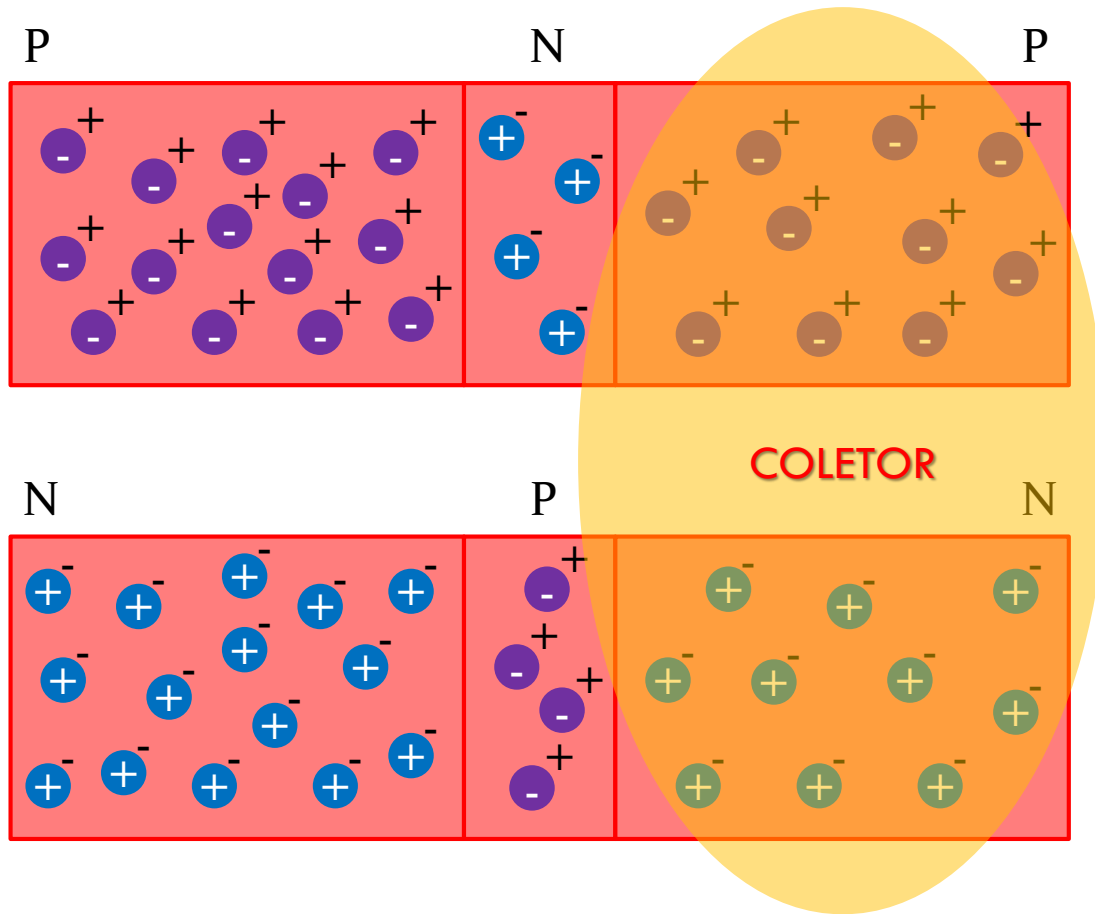
BJT

□ Construção



BJT

□ Construção



BJT

□ Construção

□ Emissor

- Material fortemente dopado.

□ Base

- Material levemente dopado (resistência alta).
- Largura $150 \times$ menor do que a largura do transistor.

□ Coletor

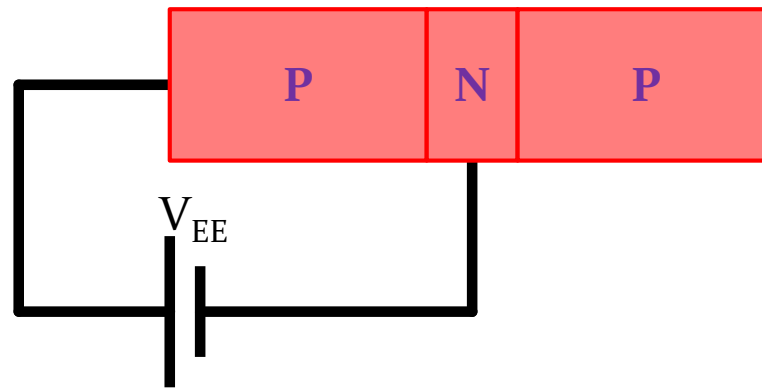
- Material moderadamente dopado.

□ Importante

- Diferentes dopagens para os materiais do transistor.

BJT

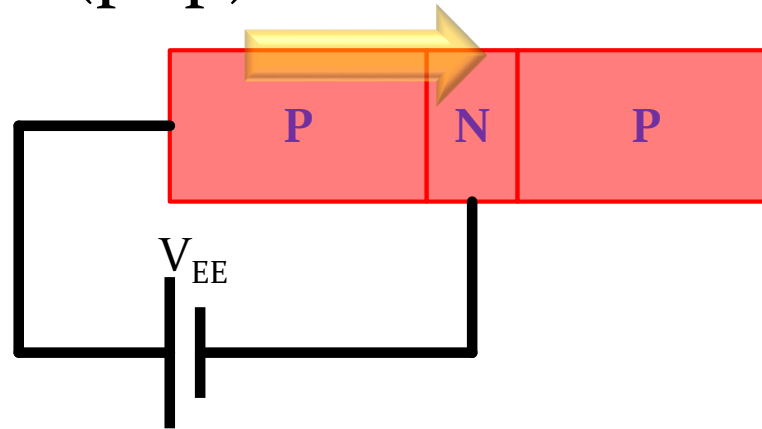
□ Operação (pnp)



- Com tensão V_{EE} aplicada na junção base-emissor,
 - **Polarização direta.**
 - Redução da zona de depleção na junção p-n.
 - fluxo de portadores majoritários.

BJT

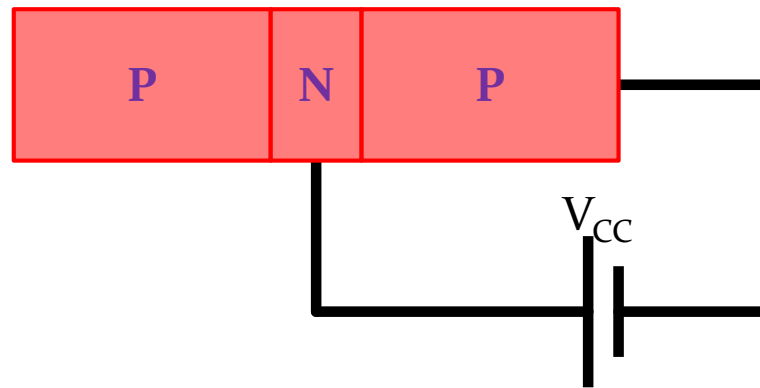
□ Operação (pnp)



- Com tensão V_{EE} aplicada na junção base-emissor,
 - **Polarização direta.**
 - Redução da zona de depleção na junção p-n.
 - fluxo de portadores **majoritários.**

BJT

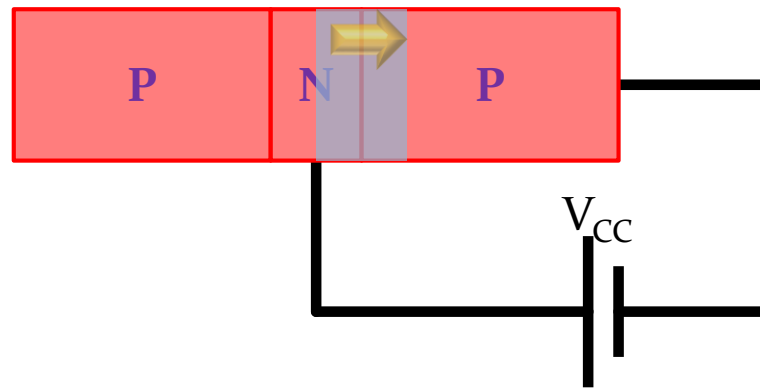
□ Operação (pnp)



- Com tensão V_{CC} aplicada na junção coletor-base,
 - **Polarização reversa.**
 - Aumento da zona de depleção na junção p-n.
 - fluxo de portadores minoritários.

BJT

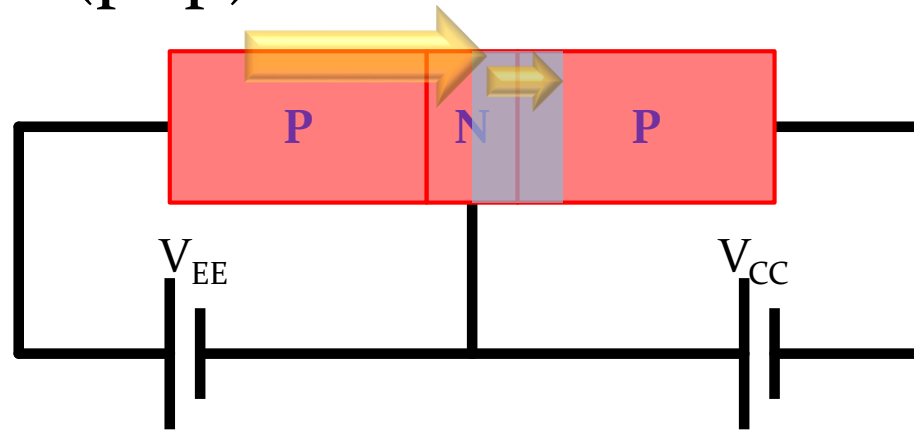
□ Operação (pnp)



- Com tensão V_{CC} aplicada na junção coletor-base,
 - **Polarização reversa.**
 - Aumento da zona de depleção na junção p-n.
 - fluxo de portadores **minoritários**.
 - Tal fluxo depende da temperatura.

BJT

□ Operação (pnp)

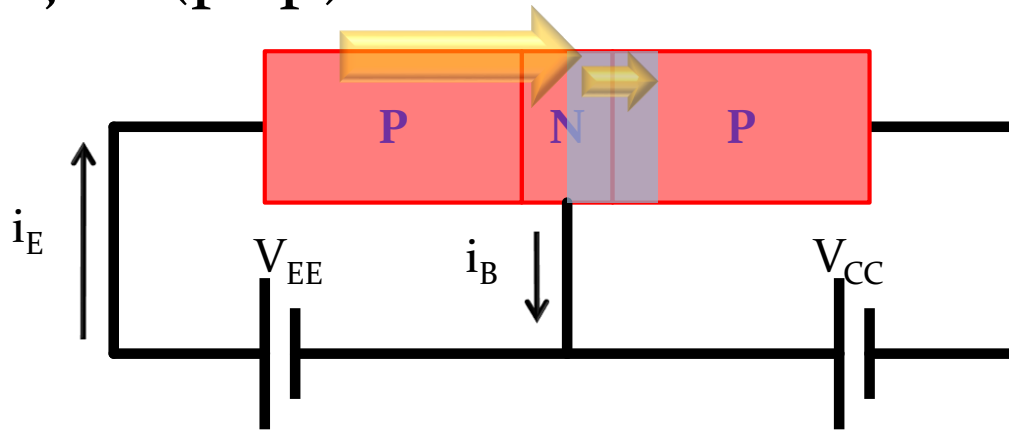


□ Polarização:

- Direta na junção base-emissor
- Reversa na junção coletor-base

BJT

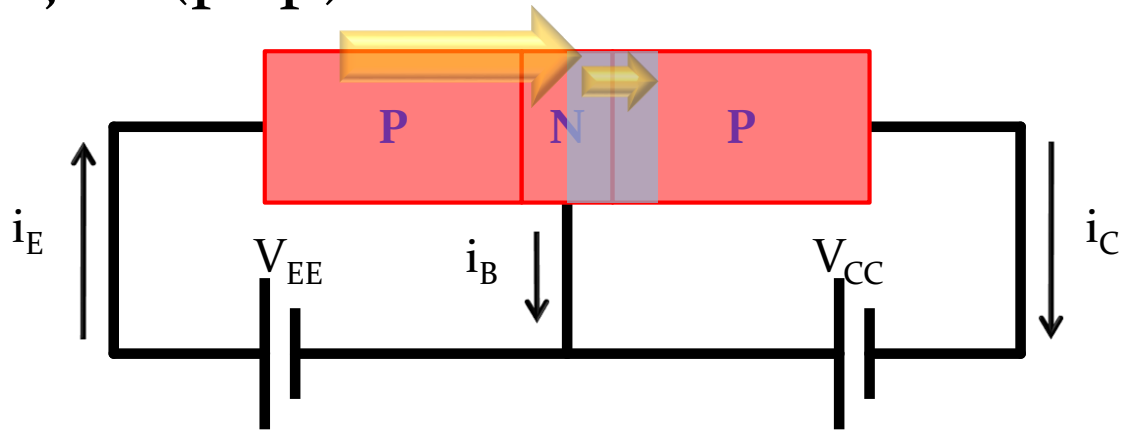
□ Operação (pnp)



- i_E ➡ corrente no emissor
 - Induzida pela polarização direta
- i_B ➡ corrente na base
 - Pela **baixa dopagem**, parte dos portadores majoritários do emissor seguem pela base (ordem de μA)

BJT

□ Operação (pnp)

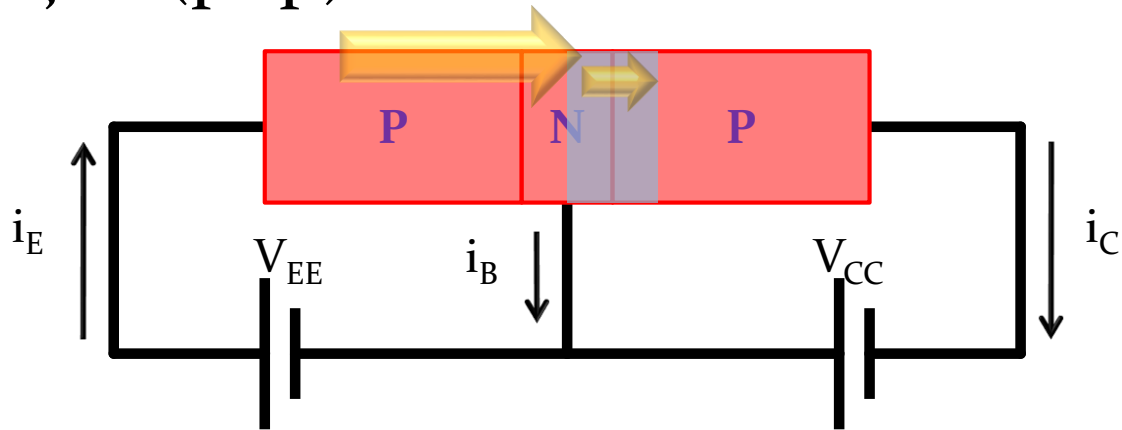


□ i_C \leftarrow corrente no coletor

- Parcela devida aos portadores minoritários (i_{CO})
- Parcela devido aos portadores majoritários da junção emissor-base, que se tornam “minoritários” para a junção base-coletor ($i_{C\text{-majoritários}}$).

BJT

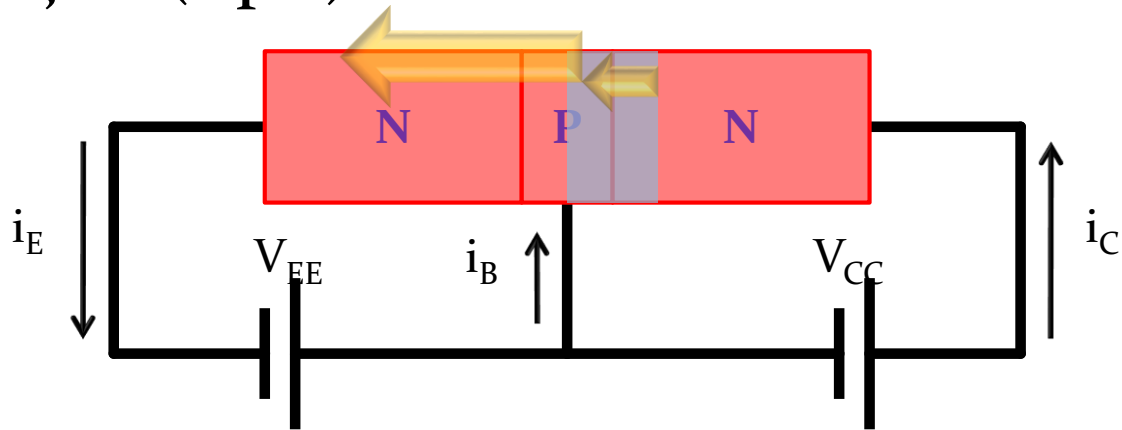
□ Operação (pnp)



- i_C \rightarrow corrente no coletor
 - Injeção de “minoritários” no material de base.
 - $i_C = i_{CO} + i_{C\text{-majoritários}}$
- Lei das correntes: $i_E = i_C + i_B$

BJT

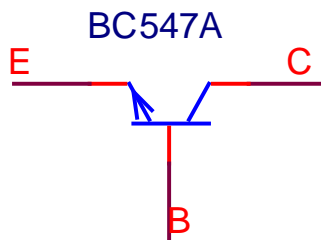
□ Operação (npn)



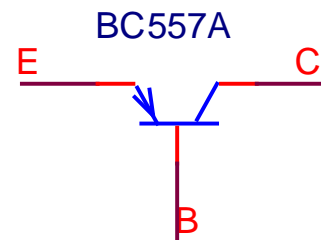
- $i_C = i_{CO} + i_{C\text{-majoritários}}$
- Lei das correntes: $i_E = i_C + i_B$

BJT

- Os transistores BJT operam sempre que:
 - ▣ Junção base-emissor é polarizada diretamente.
 - ▣ Junção coletor-base é polarizada reversamente.



NPN



PNP

BJT

- Configurações
 - ▣ Analisaremos configurações-padrão com BJT
 - São circuitos cujo comportamento foi analisado experimentalmente.
 - ▣ Conceito de entrada e saída do transistor.
 - Entrada
 - Seção do circuito na qual tensão e/ou corrente são exigidos para ativação (ou não) do transistor.
 - Saída
 - Seção do circuito na qual tensão e/ou corrente são obtidos a partir da ativação (ou não) do transistor.

BJT

- Configurações

- Base-comum

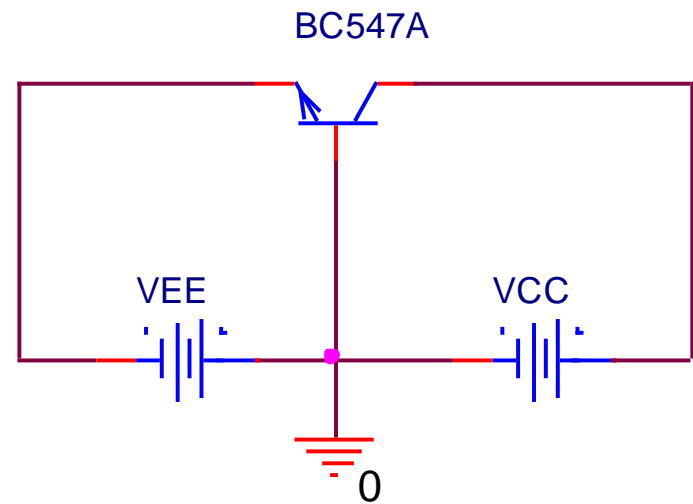
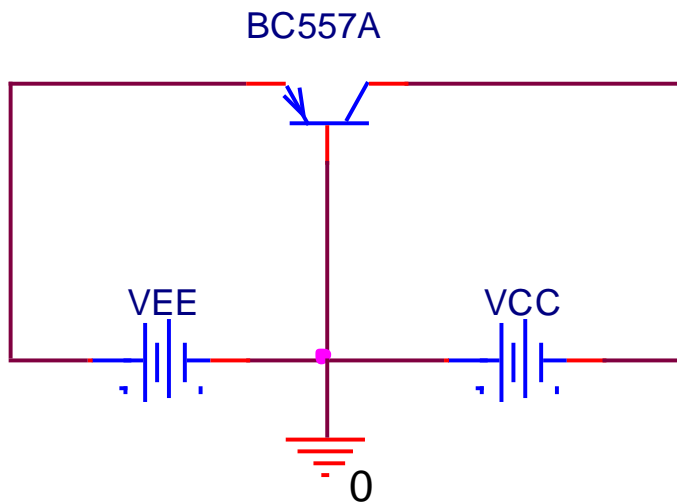
- Emissor-comum

- Coletor-comum

- O termo “comum” refere-se a qual terminal do transistor é comum às suas seções de entrada e de saída.

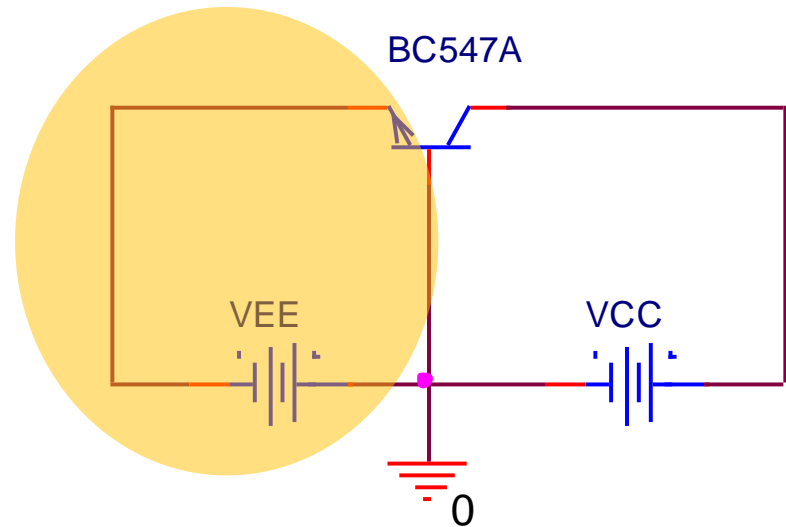
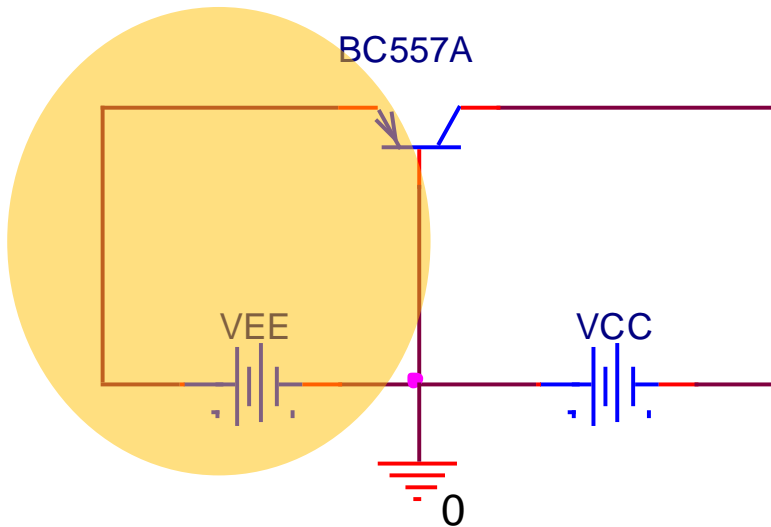
BJT

□ Base comum



BJT

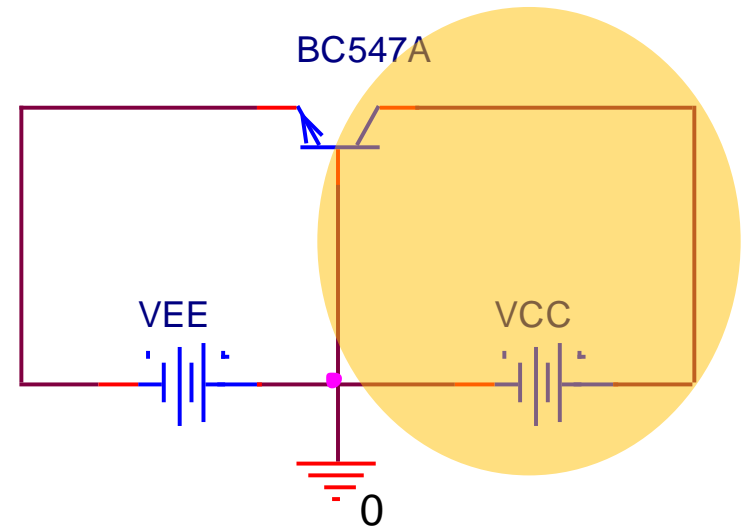
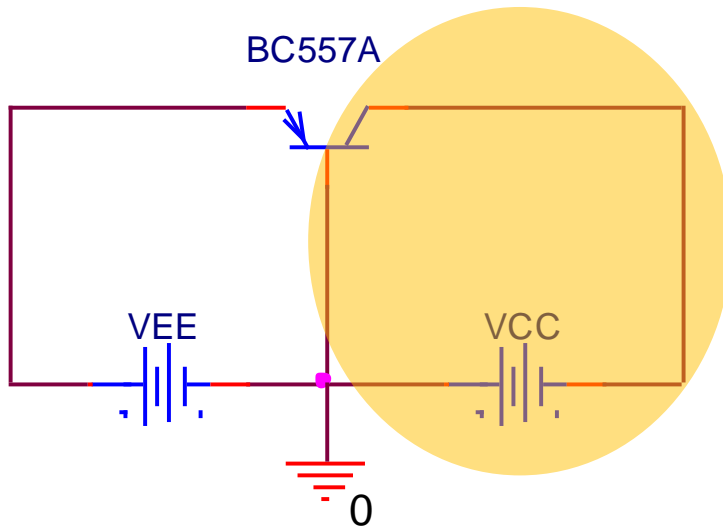
□ Base comum



Seção de excitação ou Seção de entrada ou Seção de ativação
(lembre-se de que polarizamos diretamente a junção base-emissor)

BJT

□ Base comum



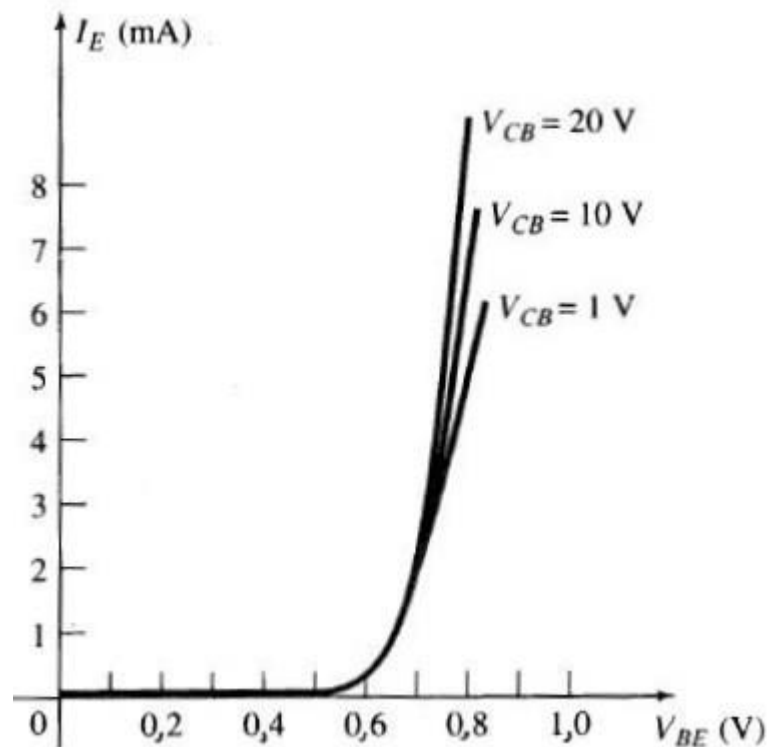
Seção de Saída

(lembre-se de que polarizamos reversamente a junção coletor-base)

BJT

□ Base comum

- Corrente do emissor \times Tensão da junção base-emissor.



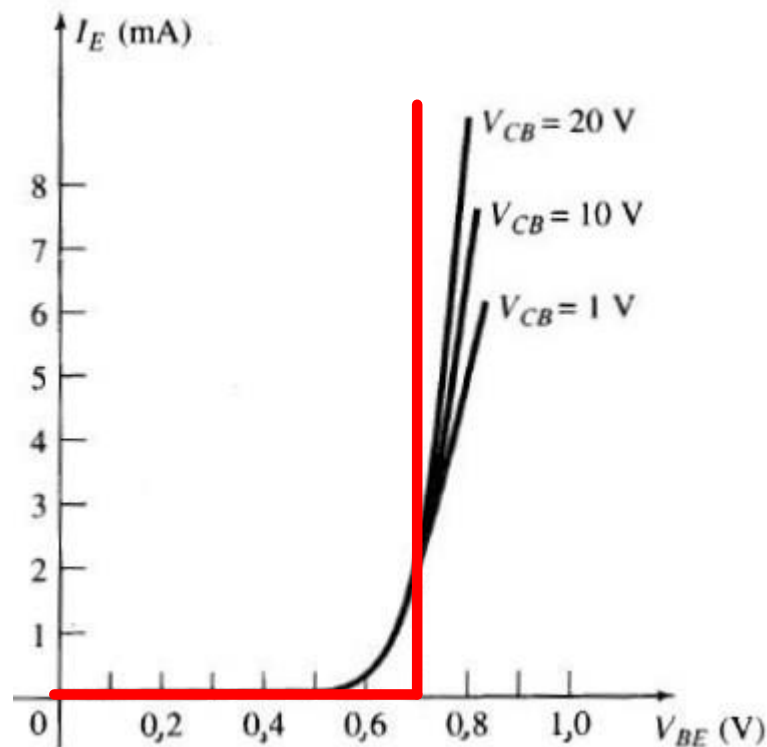
BJT

- Base comum
 - ▣ Tensões abaixo de um patamar não polarizam diretamente a junção base-emissor (v_{BE}).
 - Semelhante ao diodo.
 - **Independente** da tensão na junção coletor-base.
 - Desde que ($v_{CB} > 0$) ↗ veremos a seguir.
 - Corrente no emissor (i_E) é forçada a zero.
 - ▣ A partir desse patamar, a corrente sofre leve influência da tensão na junção coletor-base (v_{CB}).
 - ▣ “Geralmente”, podemos assumir $v_{BE} = 0,7$ como tensão para “ligar” o transistor.

BJT

□ Base comum

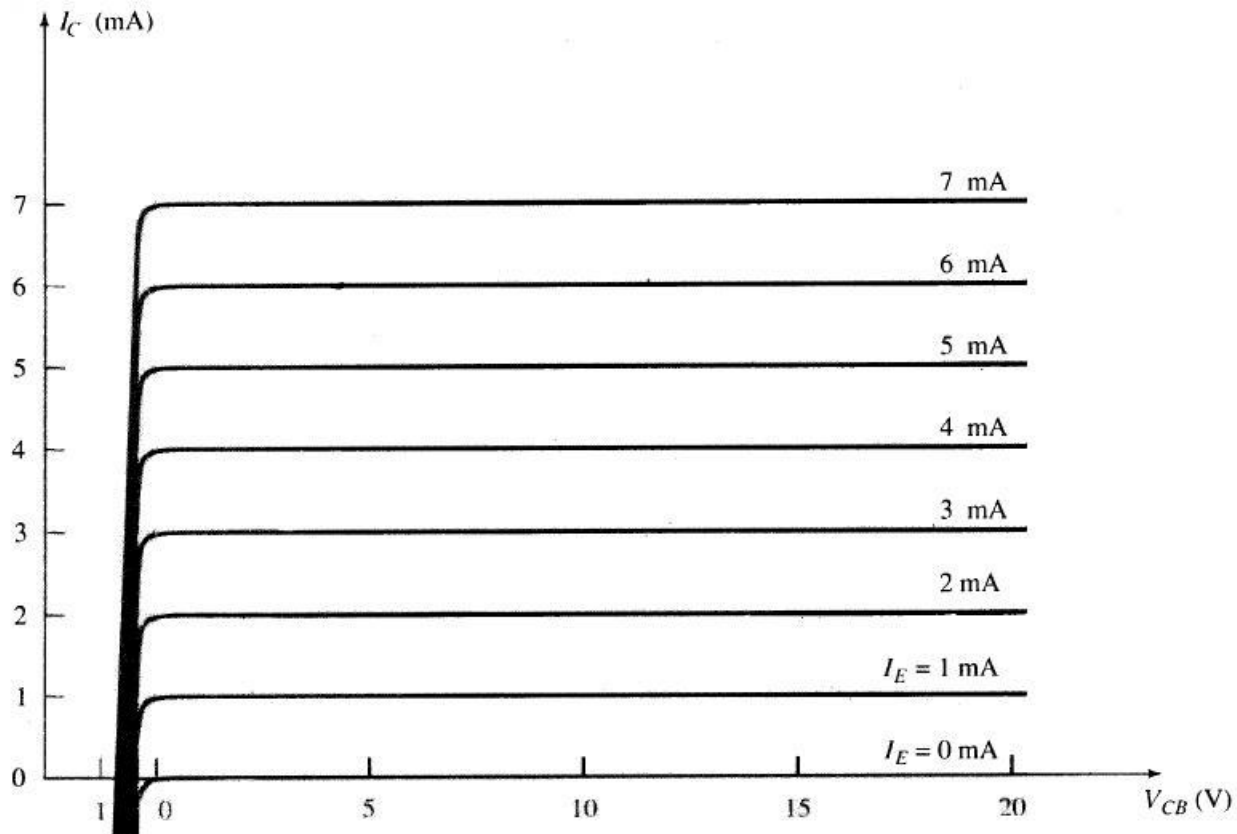
- Corrente do emissor \times Tensão da junção base-emissor.



BJT

□ Base comum

- Corrente do coletor × Tensão da junção coletor-base.



BJT

□ Base comum

▣ Situações observadas:

■ Quando

- A junção base-emissor é polarizada **diretamente** ($v_{BE} > 0$)
- A junção coletor-base é polarizada **diretamente** ($v_{CB} < 0$),

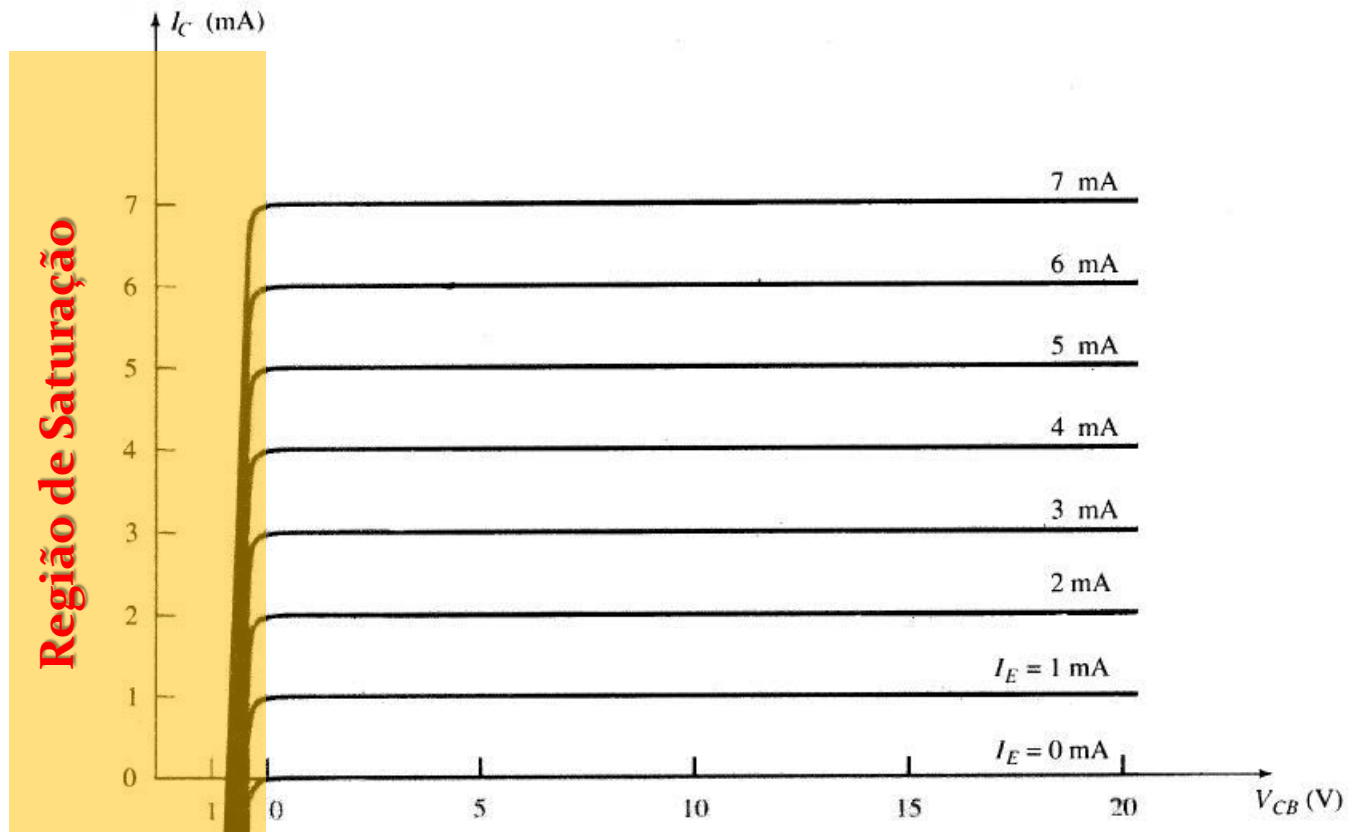
■ Então

- Qualquer pequena variação positiva de v_{BE} provoca aumento exponencial da corrente no coletor (i_C)
- Temos então a **saturação** do transistor.
 - Resistência nula na junção “virtual” emissor-coletor.

BJT

□ Base comum

- Corrente do coletor × Tensão da junção coletor-base.



BJT

□ Base comum

□ Situações observadas:

■ Quando

- A junção base-emissor é polarizada **reversamente** ($v_{BE} \leq 0$)
- A junção coletor-base é polarizada **reversamente** ($v_{CB} \geq 0$),

■ Então

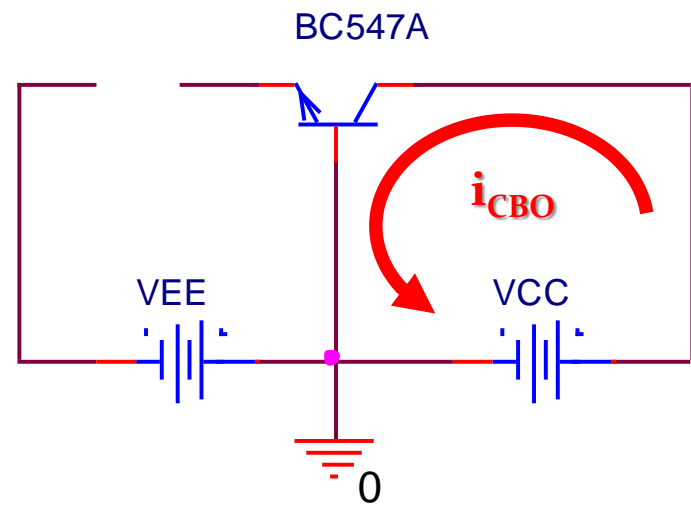
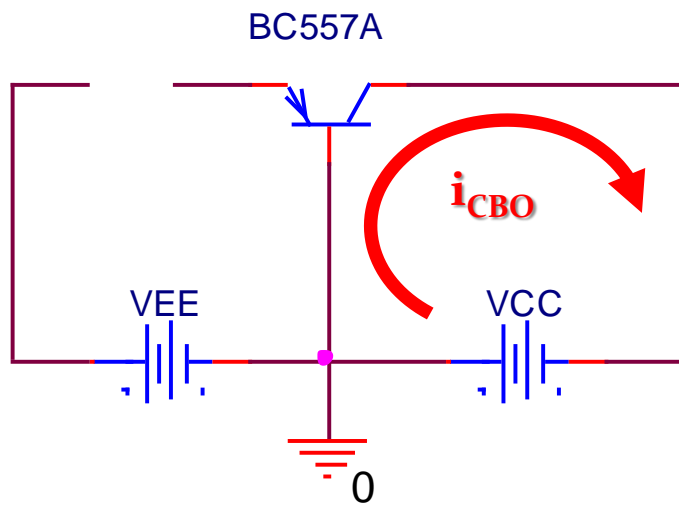
- Não temos fluxo de portadores majoritários ($i_{C\text{-majoritários}} = 0$)
- Apenas fluxo de portadores minoritários ($i_{CBO} = i_{CO} > 0$)
 - Lembre-se... i_{CO} é da ordem de μA
 - i_{CBO} \leftarrow corrente em “CB” quando “E” é aberto.

■ Temos então o **corte** do transistor.

- Resistência elevada na junção “virtual” coletor-emissor.

BJT

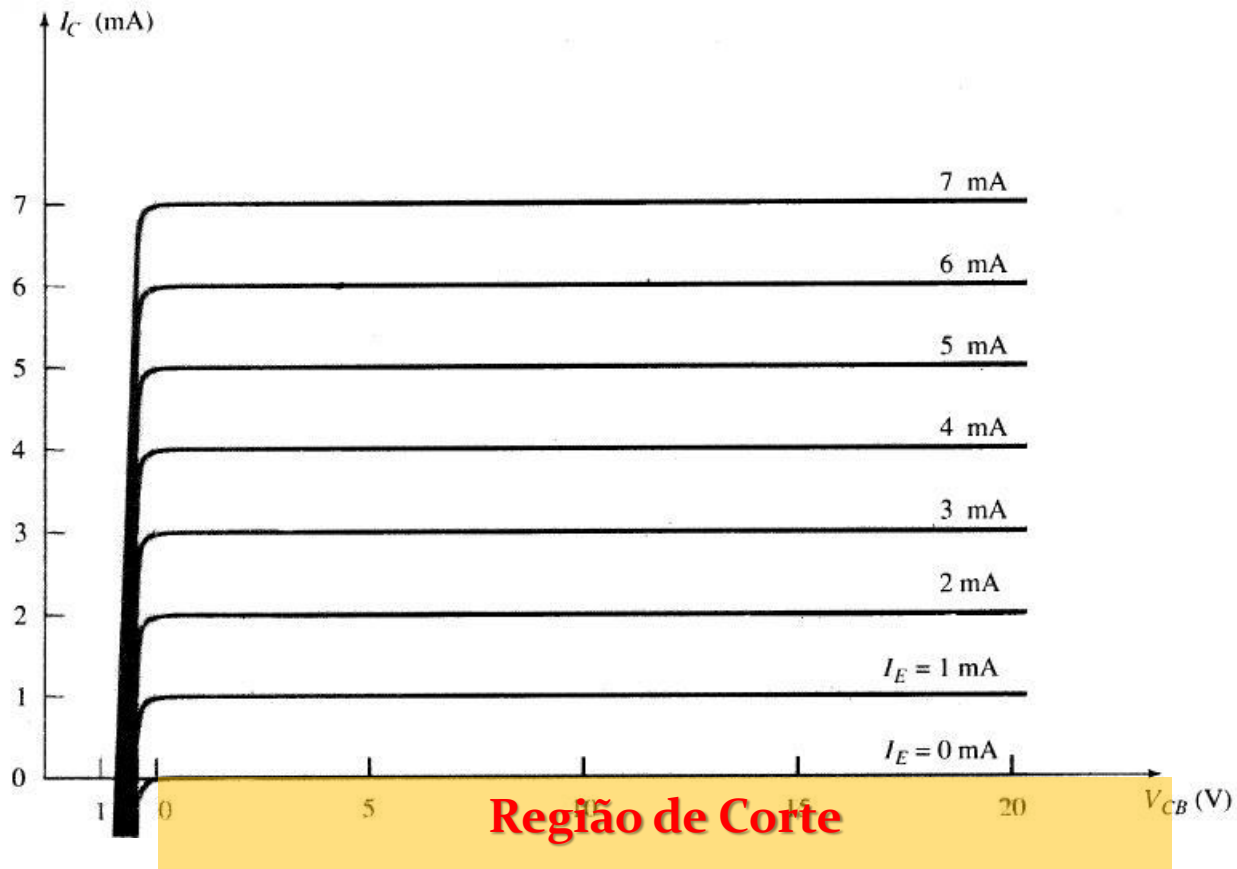
□ Base comum



BJT

□ Base comum

- Corrente do coletor × Tensão da junção coletor-base.



BJT

□ Base comum

▣ Situações observadas:

■ Quando

- A junção base-emissor é polarizada **diretamente** ($V_{BE} > 0$)
- A junção coletor-base é polarizada **reversamente** ($V_{CB} \geq 0$),

■ Então

- Temos fluxo de portadores majoritários e minoritários

■ Temos então o transistor está **operacional**

- Pode funcionar como amplificador.

BJT

□ Base comum

- Corrente do coletor × Tensão da junção coletor-base.



BJT

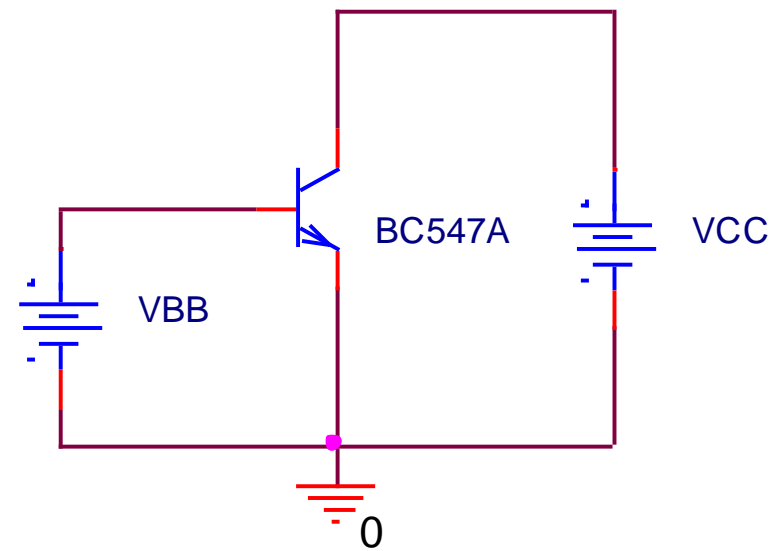
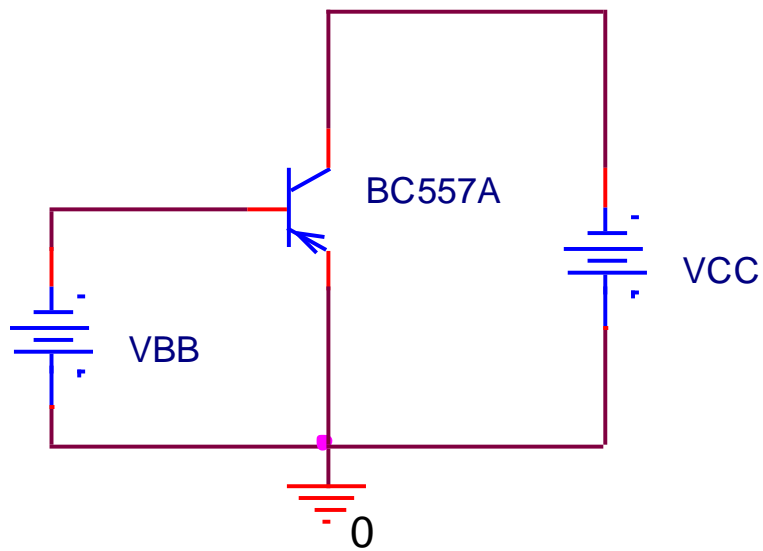
- Na região de operação, notamos:
 - ▣ Similaridade entre i_C e i_E .
 - ▣ Na prática temos:
 - $\alpha_{DC} = i_{C\text{-majoritários}}/i_E$
 - O índice DC refere-se a valor de A definido em um ponto da curva na região de operação.
 - $\alpha_{AC} = \Delta i_{C\text{-majoritários}}/\Delta i_E$
 - O índice AC refere-se a variação de I_C em relação a I_E em um ponto da curva na região de operação (para um v_{CB} específico).

BJT

- Na região de operação, notamos:
 - Ou seja:
 - $i_C = \alpha i_E + i_{CO}$
 - Geralmente
 - $\alpha_{DC} = \alpha_{AC} = \alpha$
 - Lembrando que:
 - Lei das correntes: $i_E = i_C + i_B$
 - $i_E \approx i_C$
 - Então: (para efeitos de análise):
 - $i_B \approx \text{zero}$

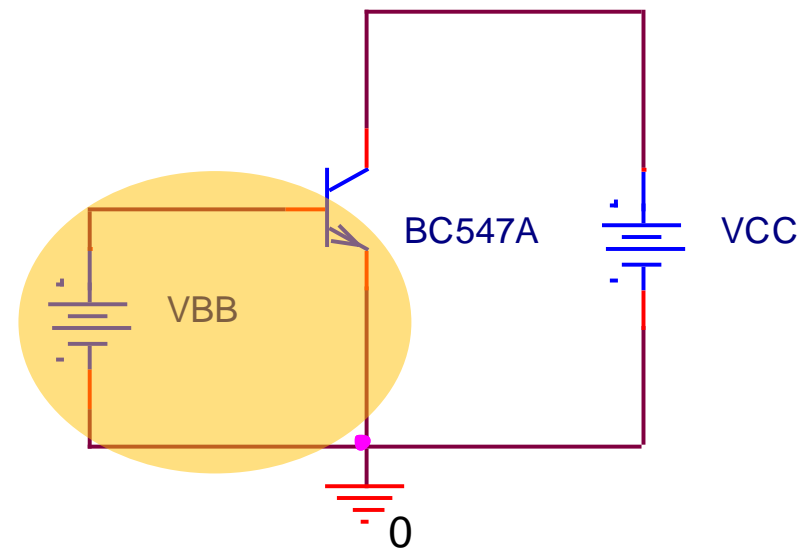
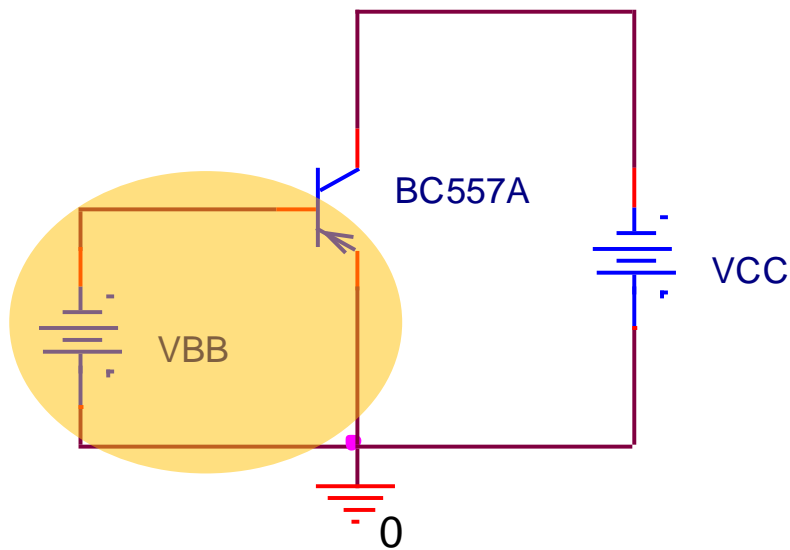
BJT

□ Emissor comum



BJT

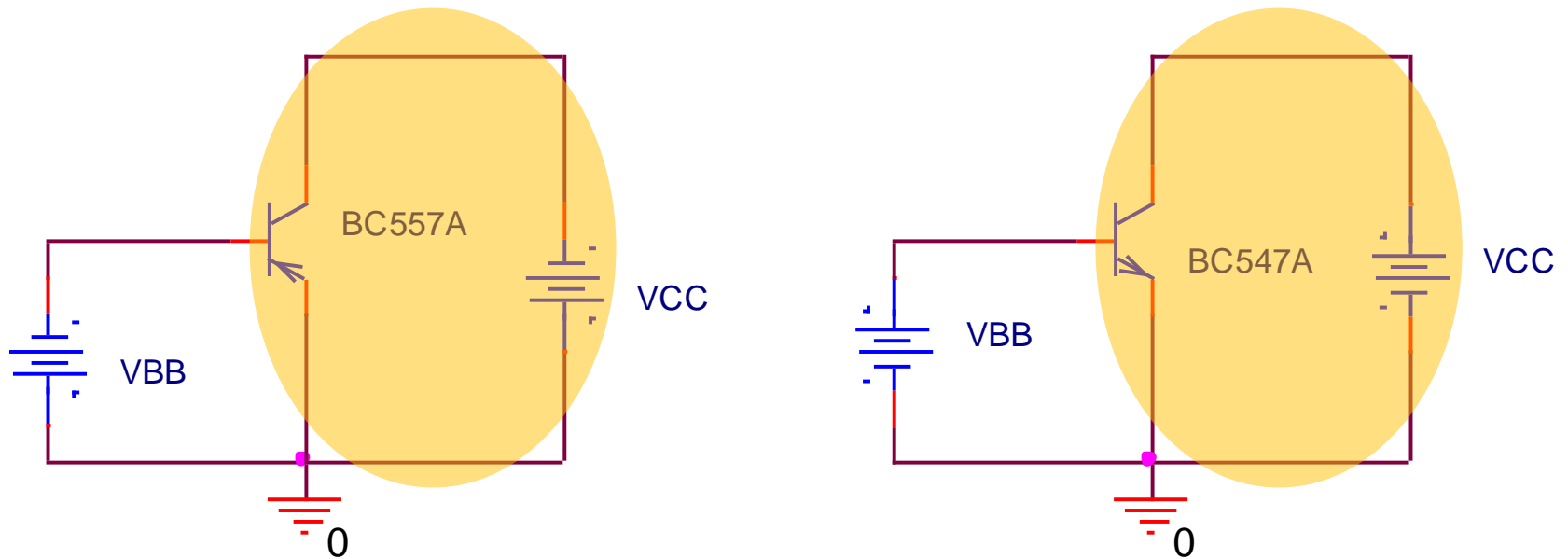
□ Emissor comum



Seção de excitação ou Seção de entrada ou Seção de ativação
(lembre-se de que polarizamos diretamente a junção base-emissor)

BJT

□ Emissor comum



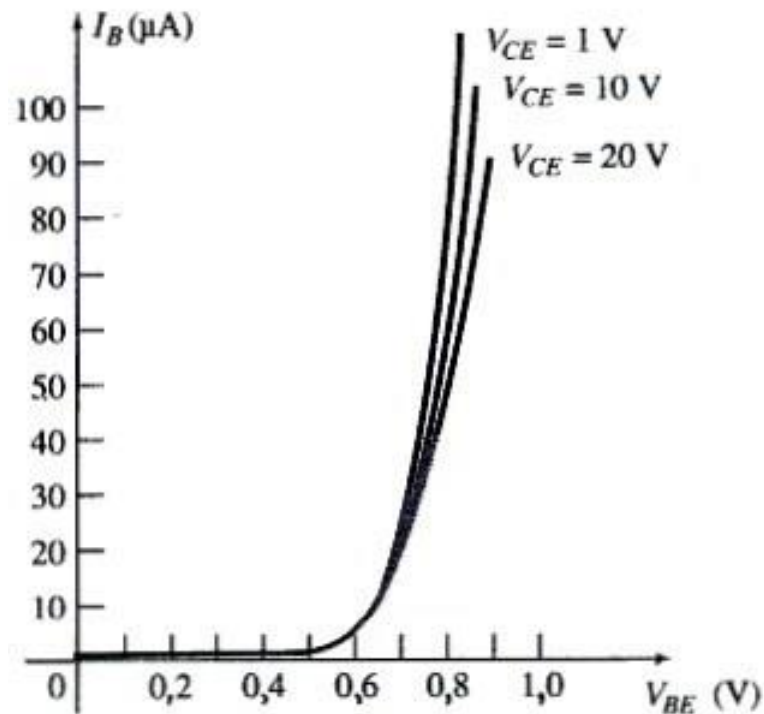
Seção de Saída

(lembre-se de que polarizamos reversamente a junção coletor-base através da tensão coletor-emissor)

BJT

□ Emissor comum

- Corrente da base \times Tensão da junção base-emissor.



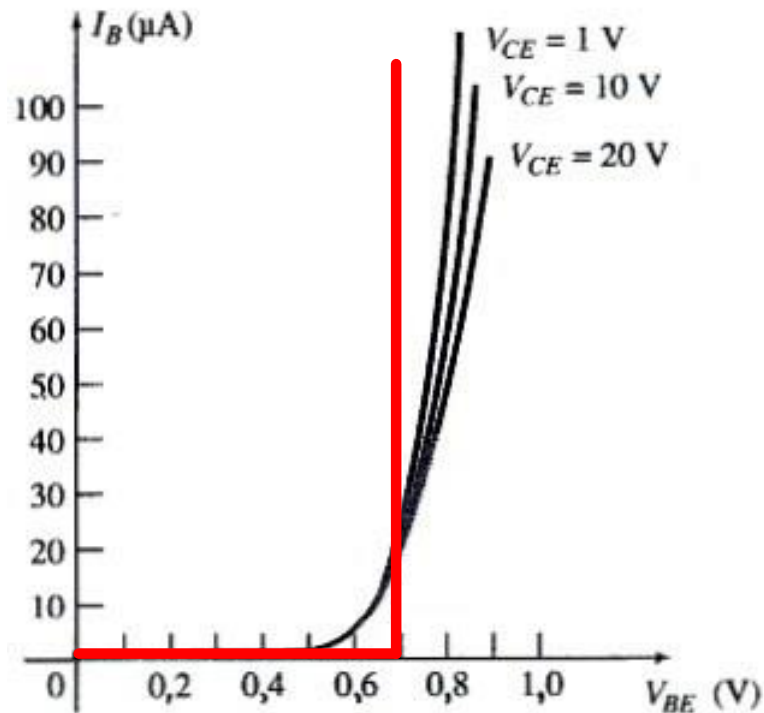
BJT

- Emissor comum
 - ▣ Tensões abaixo de um patamar não polarizam diretamente a junção base-emissor (v_{BE}).
 - Semelhante ao diodo.
 - **Independente** da tensão na junção coletor-emissor.
 - Desde que ($v_{CE} > 0$) ↗ veremos a seguir.
 - Corrente na base (i_B) é forçada a quase zero.
 - ▣ A partir desse patamar, a corrente sofre influência da tensão na junção coletor-emissor (v_{CE}).
 - ▣ “Geralmente”, podemos assumir $v_{BE} = 0,7$ como tensão para “ligar” o transistor.

BJT

□ Emissor comum

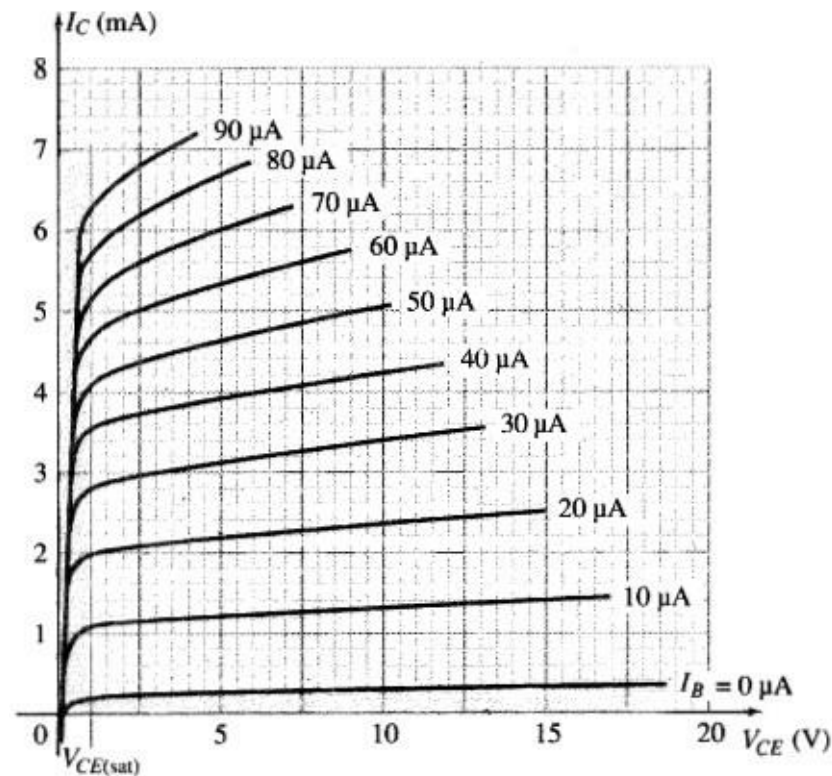
- Corrente da base \times Tensão da junção base-emissor.



BJT

□ Emissor comum

- Corrente do coletor × Tensão da junção coletor-emissor.



BJT


□ Emissor comum

▣ Situações observadas:

■ Quando

- A junção base-emissor é polarizada **diretamente** ($v_{BE} > 0$)
- A junção coletor-base é polarizada **diretamente** ($v_{CB} < 0$),

■ Assim

- Alguma tensão resultante sobre v_{CE} produz polarização reversa na junção coletor-base (lei das tensões).
- Tensão V_{CE-sat}  Tensão de saturação entre coletor e emissor.

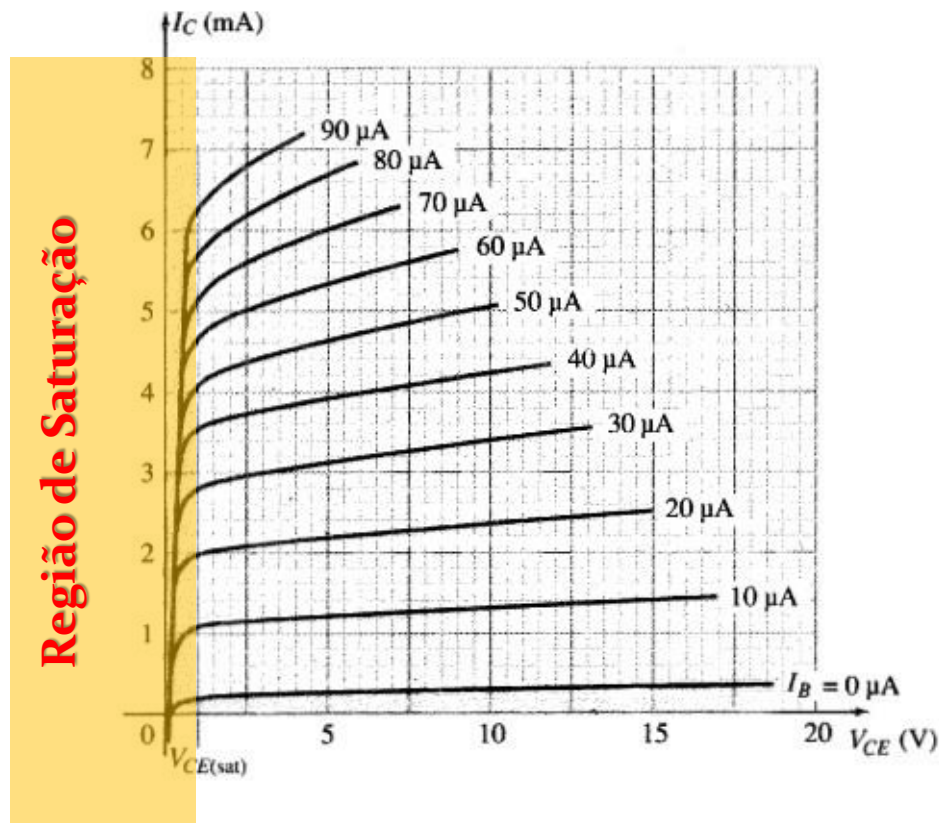
BJT

- Emissor comum
 - ▣ Situações observadas:
 - Então
 - Qualquer pequena variação positiva de v_{BE} provoca aumento exponencial da corrente no coletor (i_C)
 - Temos então a **saturação** do transistor.
 - Resistência nula na junção “virtual” coletor-emissor.

BJT

□ Emissor comum

- Corrente do coletor \times Tensão da junção coletor-emissor.



BJT

□ Emissor comum

▣ Situações observadas:

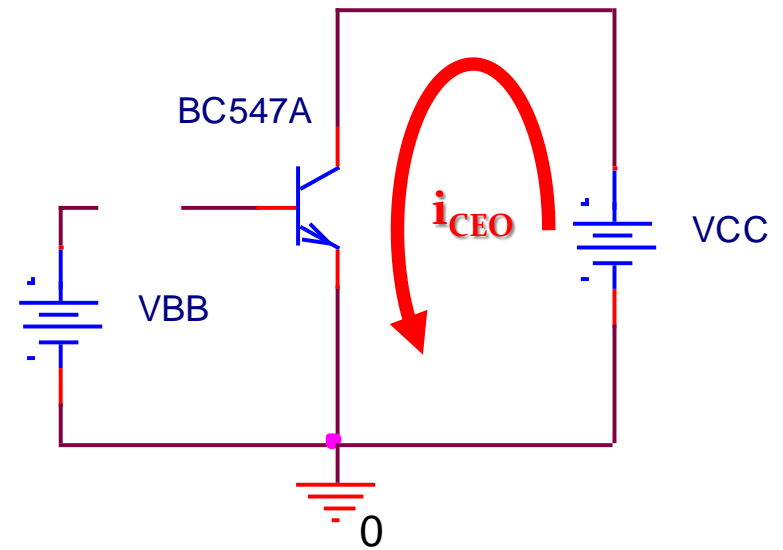
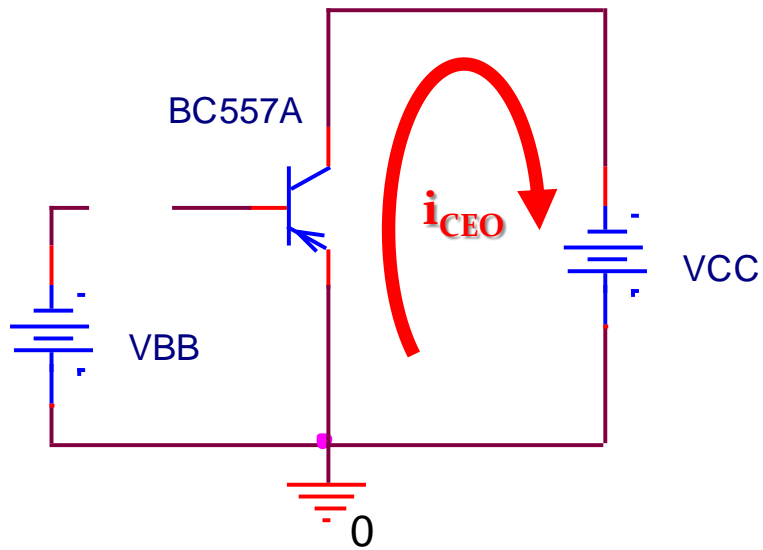
- Quando a corrente na base é zero, temos uma corrente não-nula no coletor.
 - Temos que $i_C = \alpha i_E + i_{CO} = \alpha (i_C + i_B) + i_{CO}$
 - Rearranjando: $i_C = [\alpha i_B / (1 - \alpha)] + [i_{CO} / (1 - \alpha)]$
 - Para a situação de $i_B = \text{zero}$: $i_C = i_{CO} / (1 - \alpha)$
- Considere um $\alpha = 0,996$
 - $i_C = 250 i_{CO}$
- Definiremos então a grandeza
 - $i_{CEO} = i_{CO} / (1 - \alpha)$ ou $i_{CEO} = i_C$ para $i_B = \text{zero}$.
 - i_{CEO} depende da temperatura pois i_{CO} comporta-se assim.

BJT

- Emissor comum
 - ▣ Situações observadas:
 - Quando
 - A junção base-emissor é polarizada **reversamente** ($v_{BE} \leq 0$)
 - A junção coletor-base é polarizada **reversamente** ($v_{CB} \geq 0$),
 - Temos então o **corte** do transistor.
 - Resistência elevada na junção “virtual” coletor-emissor.

BJT

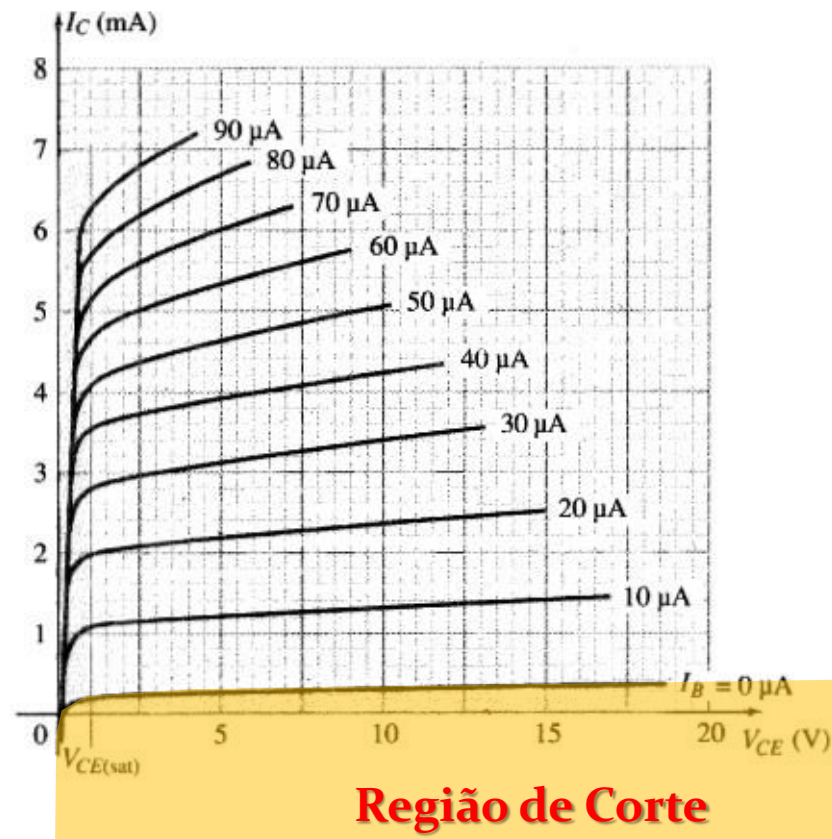
□ Emissor comum



BJT

□ Emissor comum

- Corrente do coletor \times Tensão da junção coletor-emissor.



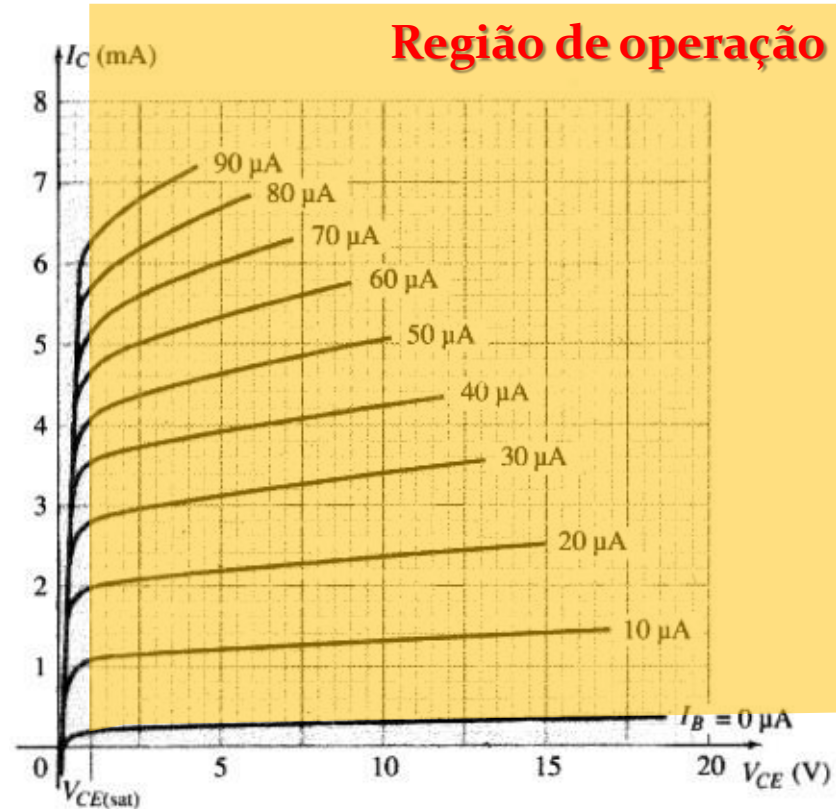
BJT

- Emissor comum
 - ▣ Situações observadas:
 - Quando
 - A junção base-emissor é polarizada **diretamente** ($V_{BE} > 0$)
 - A junção coletor-base é polarizada **reversamente** ($V_{CB} \geq 0$),
 - Então
 - Temos fluxo de portadores majoritários e minoritários
 - Temos então o transistor está **operacional**
 - Pode funcionar como amplificador.

BJT

□ Emissor comum

- Corrente do coletor \times Tensão da junção coletor-emissor.



BJT

- Na região de operação, notamos:
 - ▣ Há relação entre i_C e i_B .
 - ▣ Na prática temos:
 - $\beta_{DC} = i_C/i_B$
 - O índice DC refere-se a valor de A definido em um ponto da curva na região de operação.
 - $\beta_{AC} = \Delta i_C/\Delta i_B$
 - O índice AC refere-se a variação de I_C em relação a I_E em um ponto da curva na região de operação (para um v_{CE} específico).

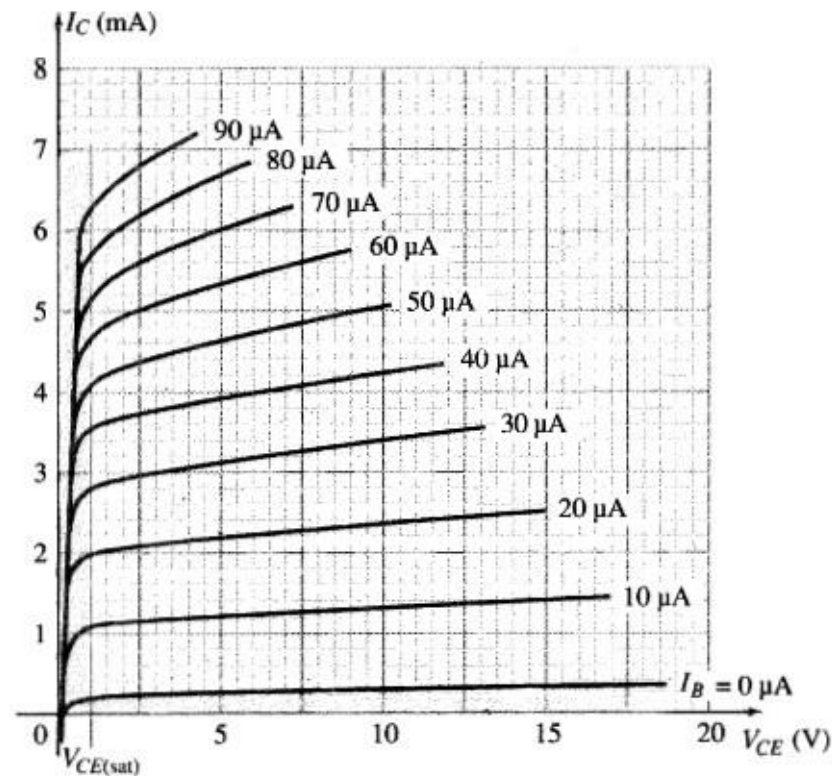
BJT

- Na região de operação, notamos:
 - $\beta_{DC} = h_{FE}$ (em folha de dados)
 - $\beta_{AC} = h_{fe}$ (em folha de dados)
 - São “fatores de amplificação de corrente direta em emissor comum”.
 - Termo “h” vem do modelo híbrido do transistor
 - (estudá-lo-emos depois).
 - Termos “fe” e “FE” são “**f**orward current in common-**e**missor configuration”
 - h_{FE} é obtido da curva a partir do ponto de operação Q.
 - h_{fe} é obtido da curva a partir do intervalo de variação em torno de Q.

BJT

□ Emissor comum

- Calcule h_{fe} e h_{FE} para $i_B = 25 \mu\text{A}$ e $v_{CE} = 7,5\text{V}$.



BJT

- Na região de operação, notamos:
 - ▣ $\beta_{DC} \neq \beta_{AC}$ por causa de $i_{CEO} \neq \text{zero}$
 - Se $i_{CEO} = \text{zero} \Rightarrow \beta_{DC} = \beta_{AC}$.
 - ▣ Considere que as curvas $i_C \times v_{CE}$ para diversos i_B s.
 - Assumindo que na região de operação elas são retas...
 - Projetando essas retas na direção de v_{CE} negativos...
 - Essas retas interceptarão a abscissa em um ponto v_A .
 - Esse ponto é chamado **tensão de Early**
 - É um parâmetro do transistor (folha de dados)
 - Da ordem de -50 a -100V.

BJT

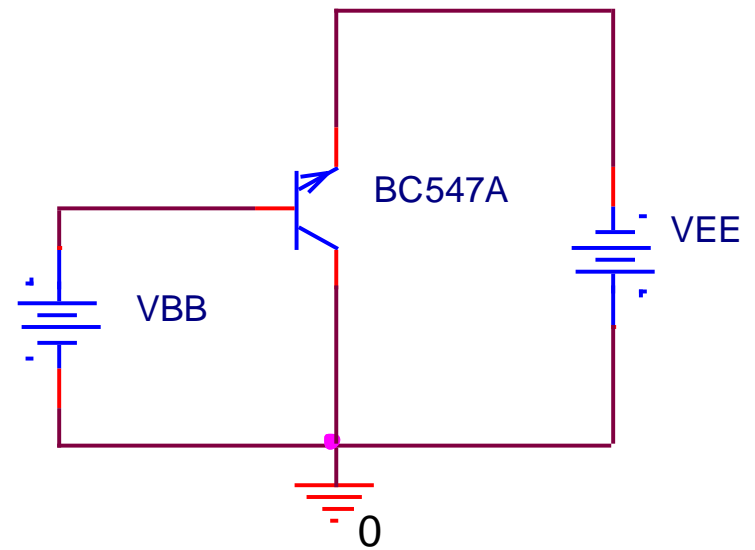
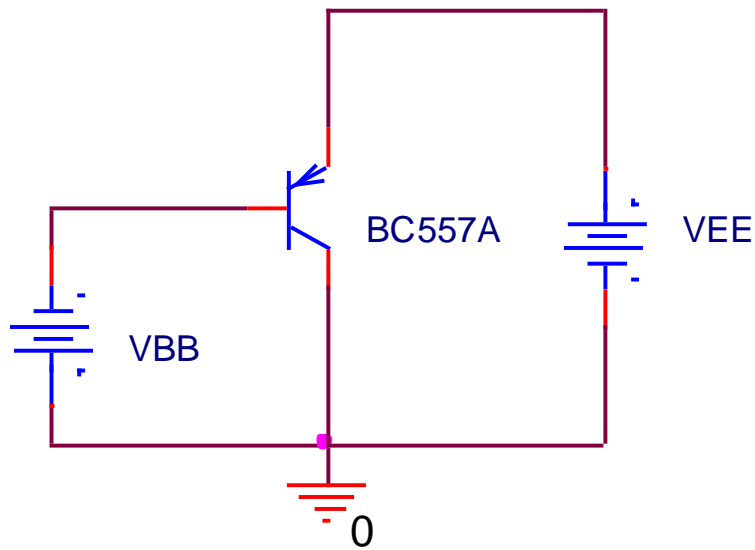
- Na região de operação, notamos:
 - ▣ As curvas $i_C \times v_{CE}$ possuem uma inclinação
 - Resistência intrínseca na saída do emissor-comum.
 - $r_o = [\partial i_C / \partial v_{CE}]^{-1}$ para um v_{BE} específico.

BJT

- Na região de operação, notamos:
 - ▣ Primeiramente, relacionando α e β
 - $i_E = i_C + i_B \Rightarrow i_C / \alpha = i_C + i_C / \beta$
 - $\alpha = \beta / (\beta + 1)$ ou $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$
 - ▣ Isso implica em:
 - $i_{CEO} = (\beta + 1) i_{CBO}$
 - $i_E = (\beta + 1) i_B$
 - ▣ Essas são relações importantes para análise de circuitos com transistores.

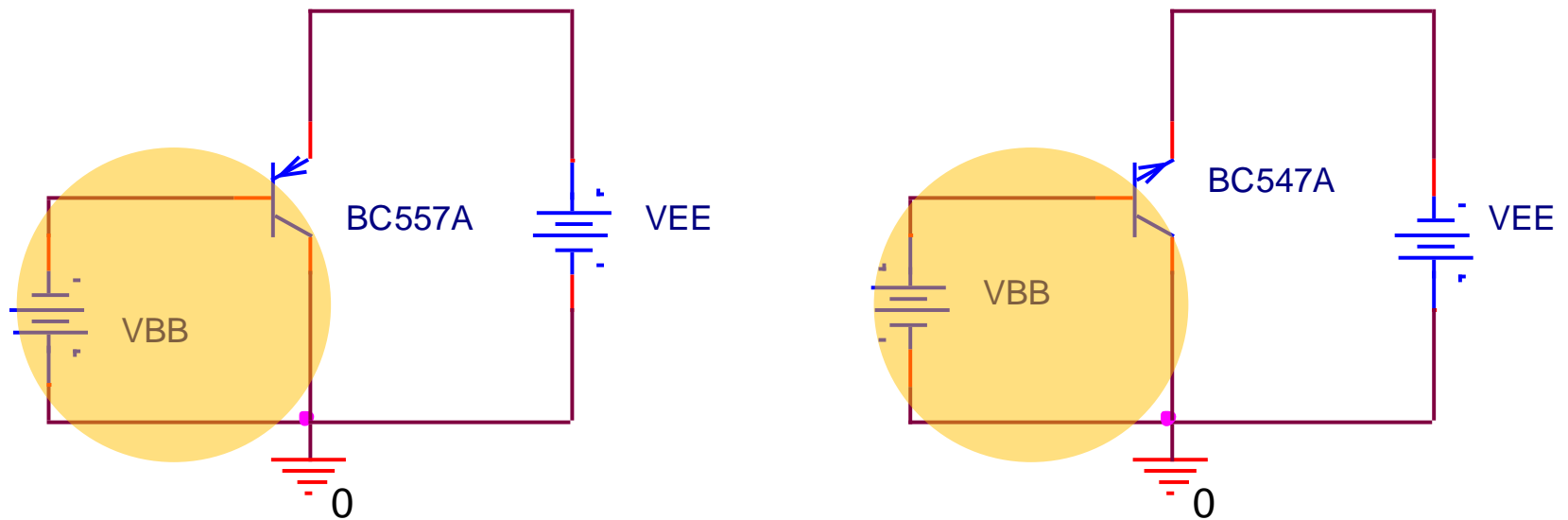
BJT

□ Coletor comum



BJT

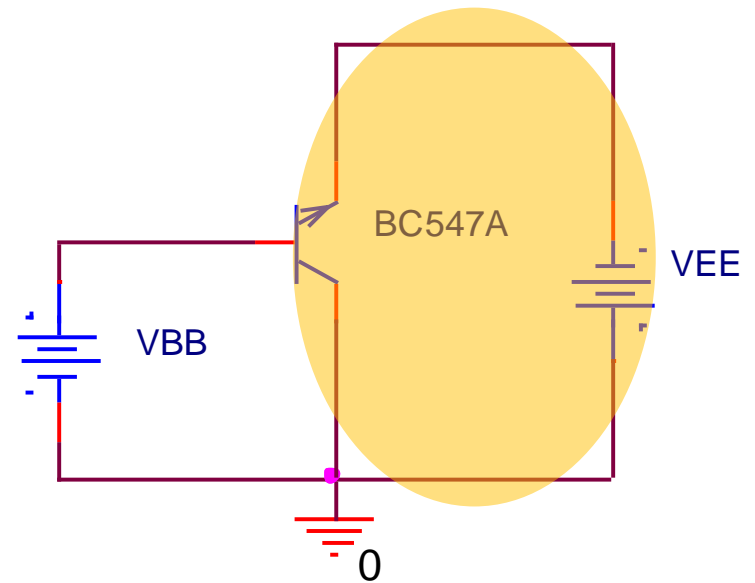
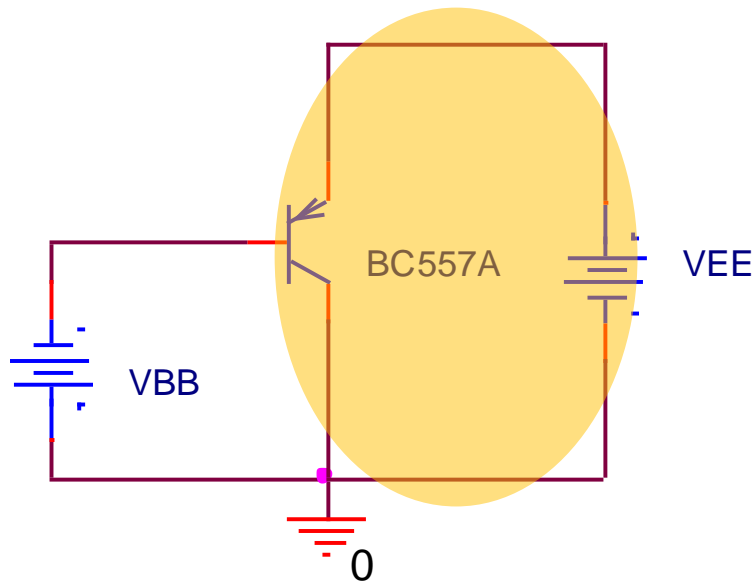
□ Coletor comum



Seção de excitação ou Seção de entrada ou Seção de ativação
(lembre-se de que polarizamos diretamente a junção base-emissor através da tensão emissor-coletor)

BJT

□ Coletor comum



Seção de Saída

(lembre-se de que polarizamos reversamente a junção coletor-base)

BJT

□ Coletor comum

- As curvas de comportamento são aproximadamente as mesmas do emissor comum.
 - Entrada: $i_B \times v_{BE}$ para diferentes valores de v_{EC}
 - v_{BE} é determinado pela diferença entre v_{EE} e v_{CC} .
 - Saída: $i_E \times v_{EC}$ para diferentes valores de i_B
 - E não v_{CE} .
 - Como é i_E e não i_C , haverá pequena diferença devido a α .
 - $i_C = \alpha i_E$.
 - Se α fosse 1, as curvas de saída das configurações emissor-comum e coletor-comum seriam iguais.

BJT

- Limites de operação
 - ▣ Condições para o transistor não queimar:
 - Corrente máxima no coletor ($i_{C-\max}$)
 - Tensão máxima coletor-emissor ($v_{CE-\max}$)
 - “breakdown” – $v_{(br)CE}$
 - Potência máxima de dissipação ($P_{C-\max}$)
 - $P_{C-\max} = v_{CE} i_C$
 - ▣ Contidas na folha de dados do transistor.