

# Eletrônica A

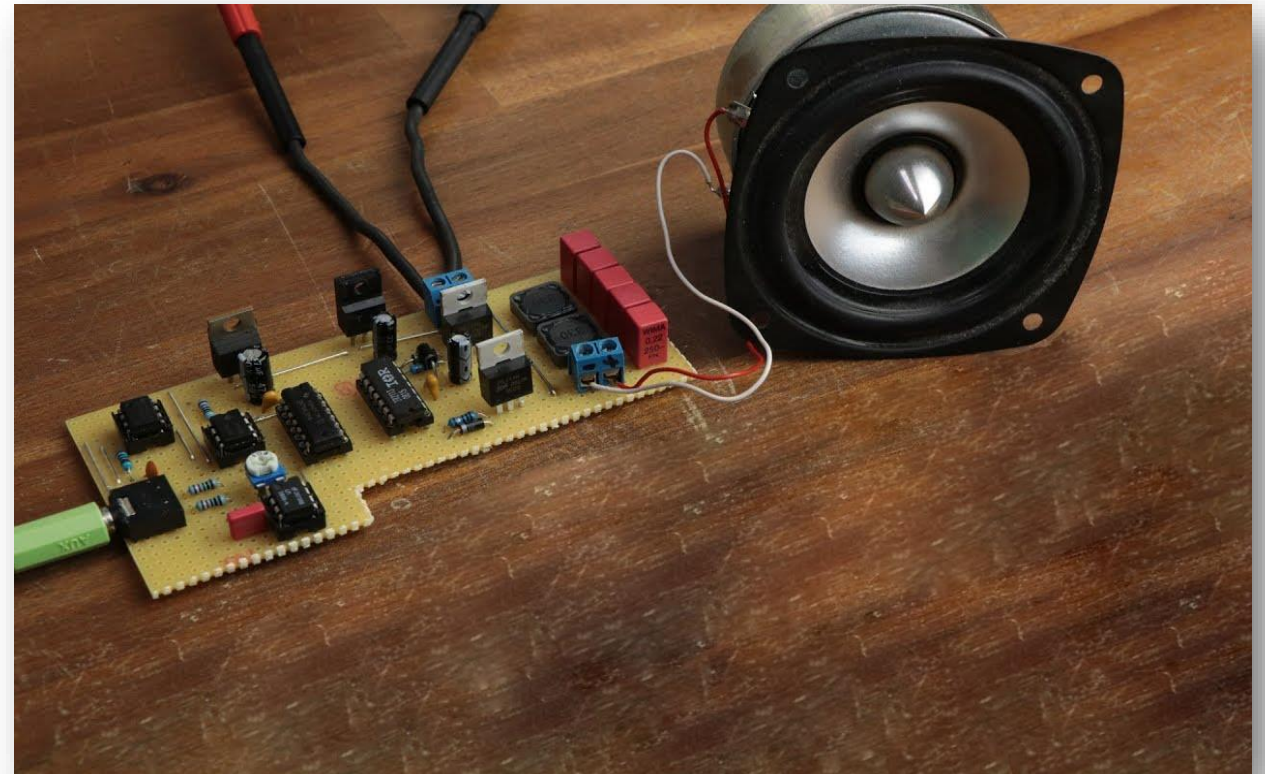
Transistores

# Transistores

- Dispositivo semicondutor de três terminais
- Um terminal controla a corrente entre os outros dois terminais
- Dois tipos principais:
  - BJT (esta aula)
  - MOSFET

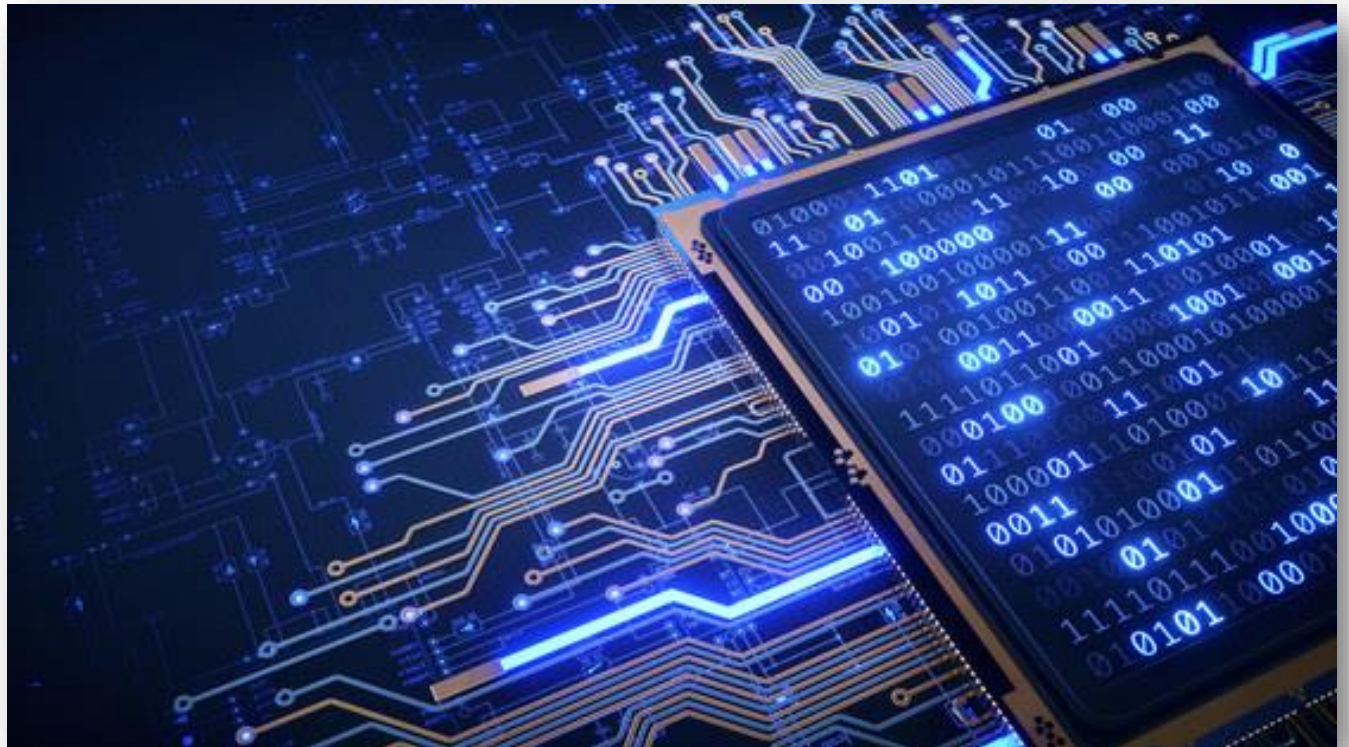
# Principais funções do BJT

- Amplificador linear
  - Quando operado na região ativa, a corrente entre dois terminais é controlada pelo terceiro terminal de forma contínua
  - Tratamento de sinais
  - Amplificadores de potência



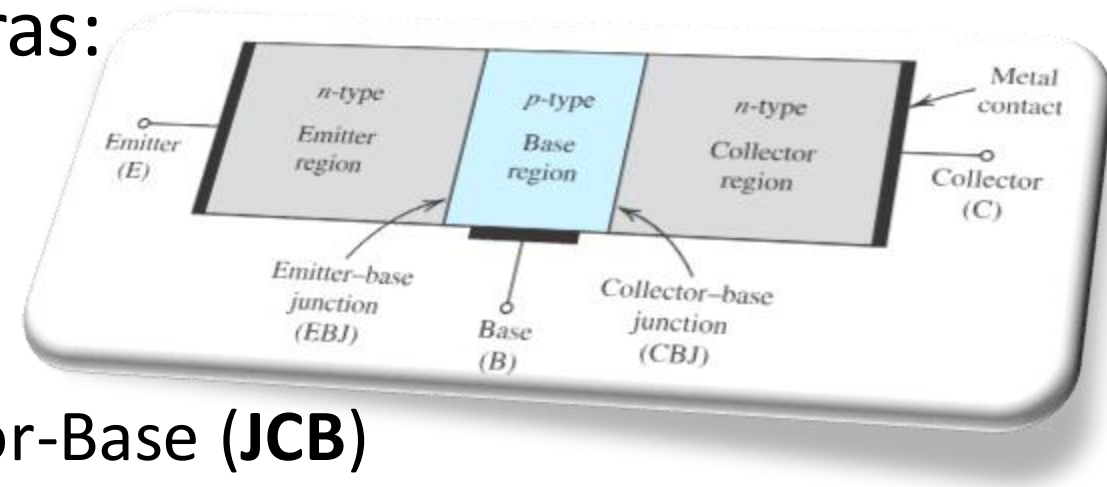
# Principais funções do BJT

- Chave controladora
  - Quando operado nas regiões de corte e saturação, se comporta como uma chave aberta ou fechada.
  - Circuitos lógicos
  - Circuitos de potência

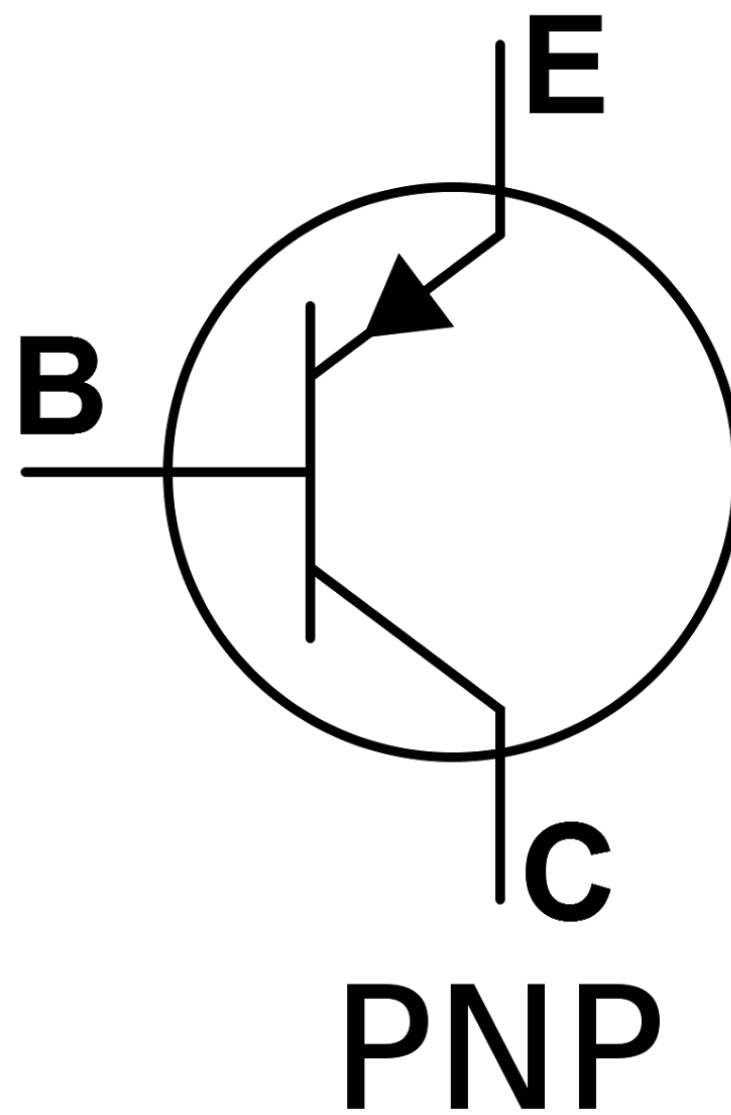
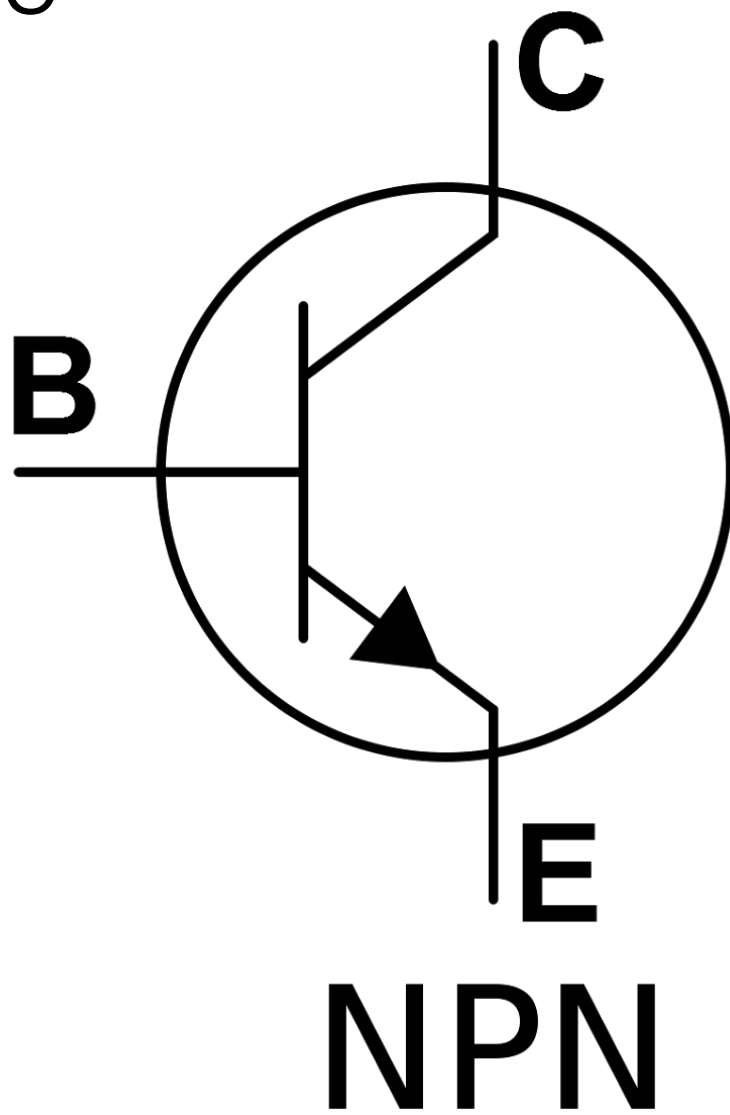


# Transistor bipolar de junção - TBJ

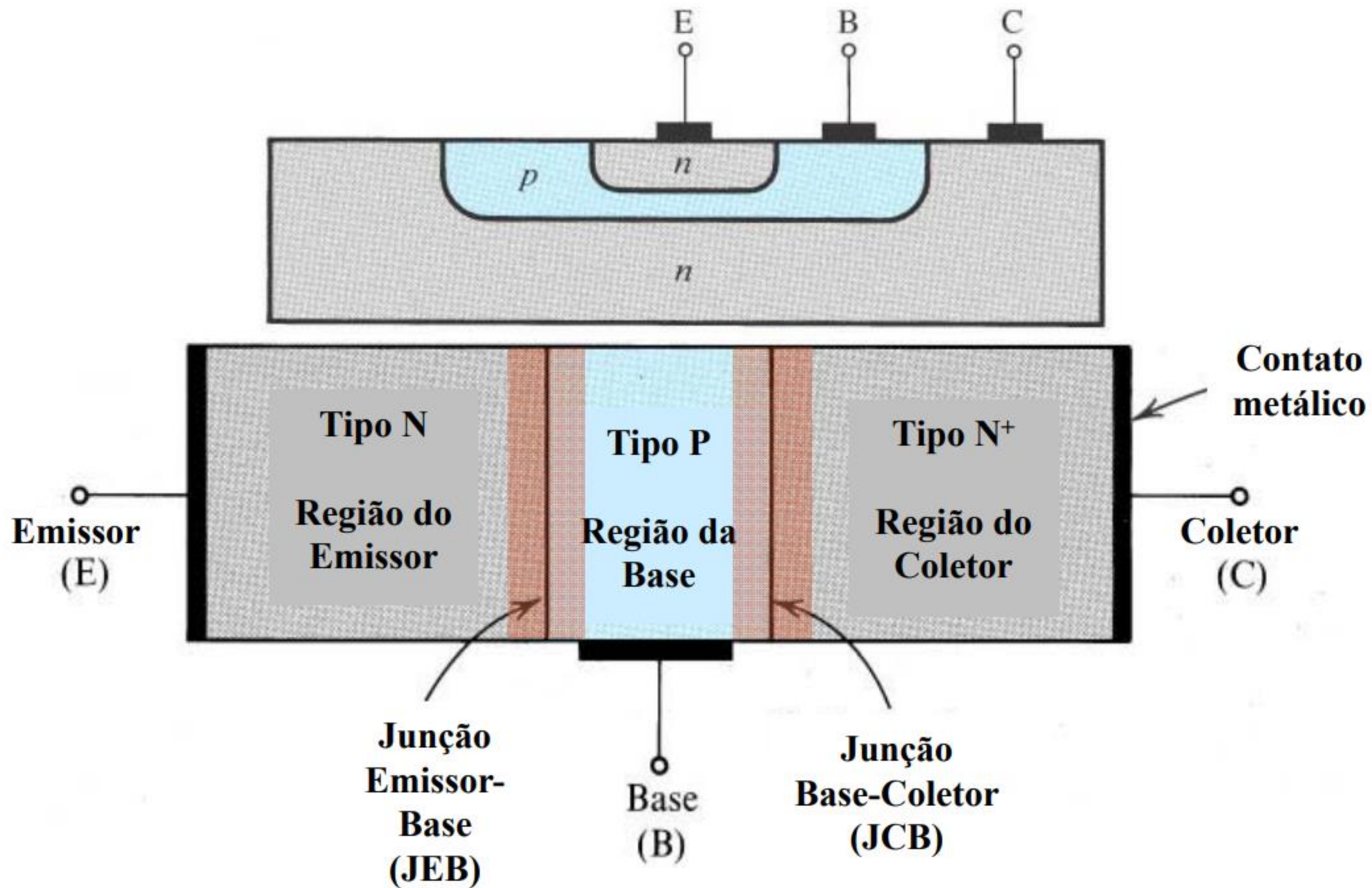
- Bipolar Junction Transistor (BJT)
- a corrente entre dois terminais é controlada pela tensão no terceiro terminal
- Formado por três regiões semicondutoras:
  - **E**missor, **B**ase e **C**oletor
  - Tipos PNP e NPN
- formando duas junções
  - Junção Emissor-Base (**JEB**) e Junção Coletor-Base (**JCB**)
- Trataremos primeiro do tipo **NPN**

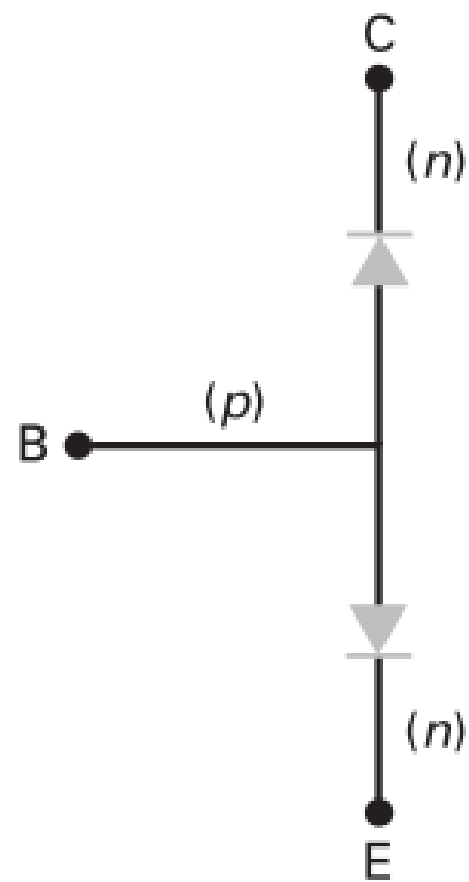
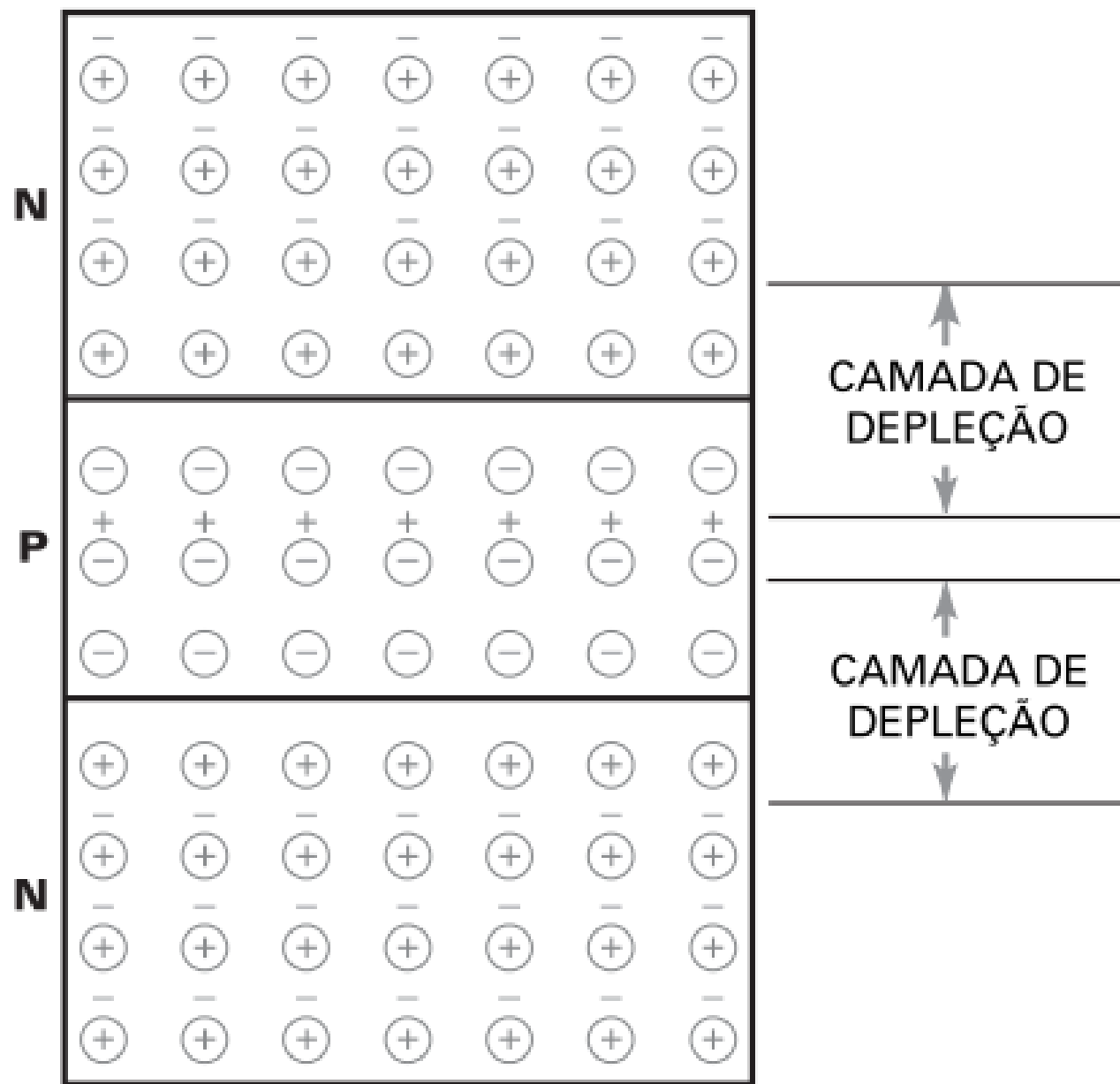


Símbolo











# Modos de operação

- Dependendo da polarização das junções, o transistor pode operar em três modos (regiões) diferentes:
- Modo/Região Ativa
- Modo/Região de corte
- Modo/Região de Saturação

Modo	JEB	JCB
Corte	Reversa	Reversa
Ativo	Direta	Reversa
Saturação	Direta	Direta

# Região Ativa

- A região ativa é utilizada para funções de amplificação
- A corrente entre o Coletor e o Emissor é controlada pela corrente(tensão)\* na Base

\*Vamos ver esse comportamento nos modelos; pela física dos semicondutores o controle se dá por tensão, mas podemos aproximar o modelo para controle por corrente

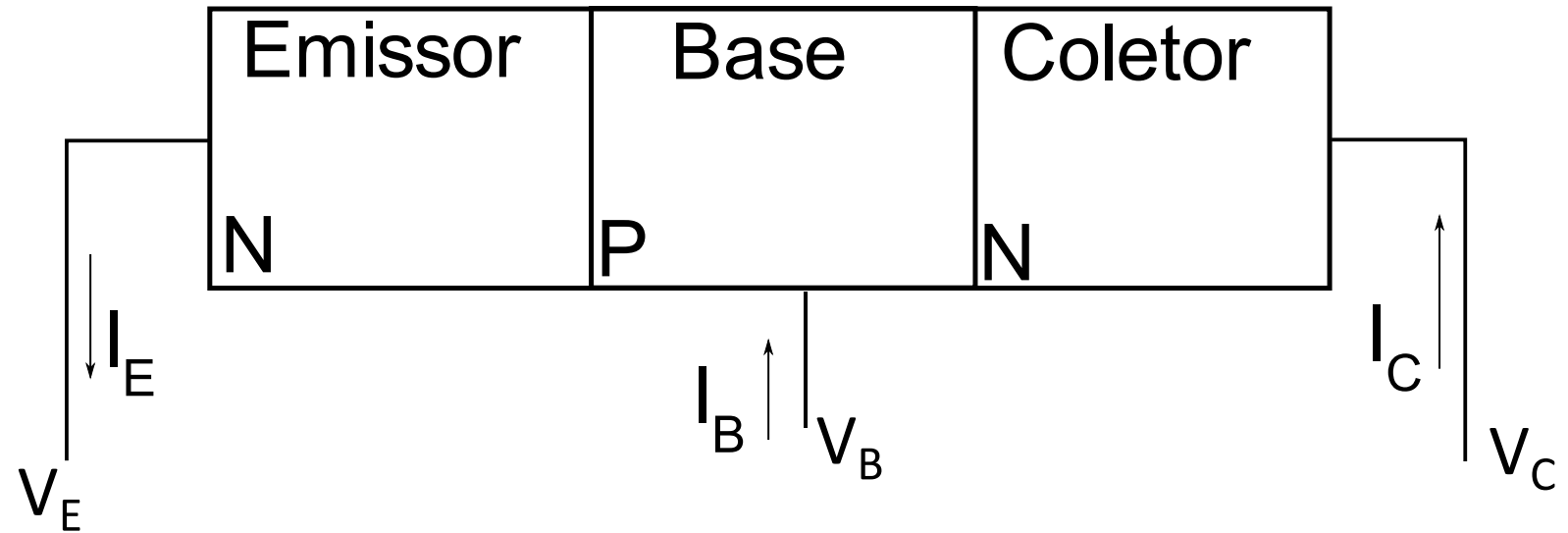
# Região Ativa

- A região ativa é utilizada para funções de amplificação
- A corrente entre o Coletor e o Emissor é controlada pela corrente(tensão)\* na Base
- Nesta região, a junção Emissor-Base é polarizada diretamente e a junção Coletor-Base reversa
- Os elétrons injetados pelo Emissor são 'coletados' pelo Coletor

\*Vamos ver esse comportamento nos modelos; pela física dos semicondutores o controle se dá por tensão, mas podemos aproximar o modelo para controle por corrente

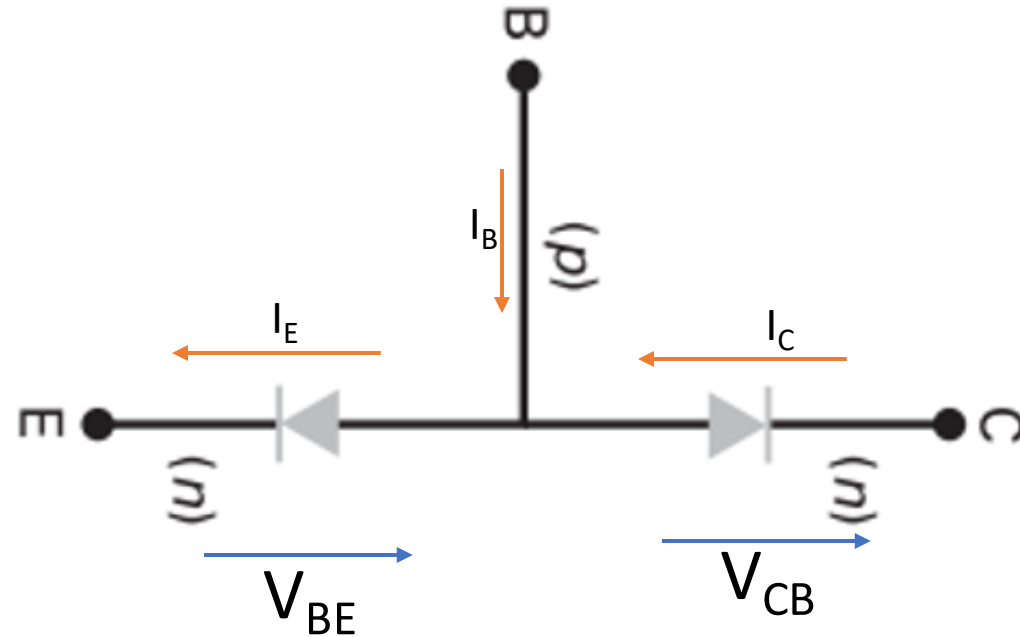
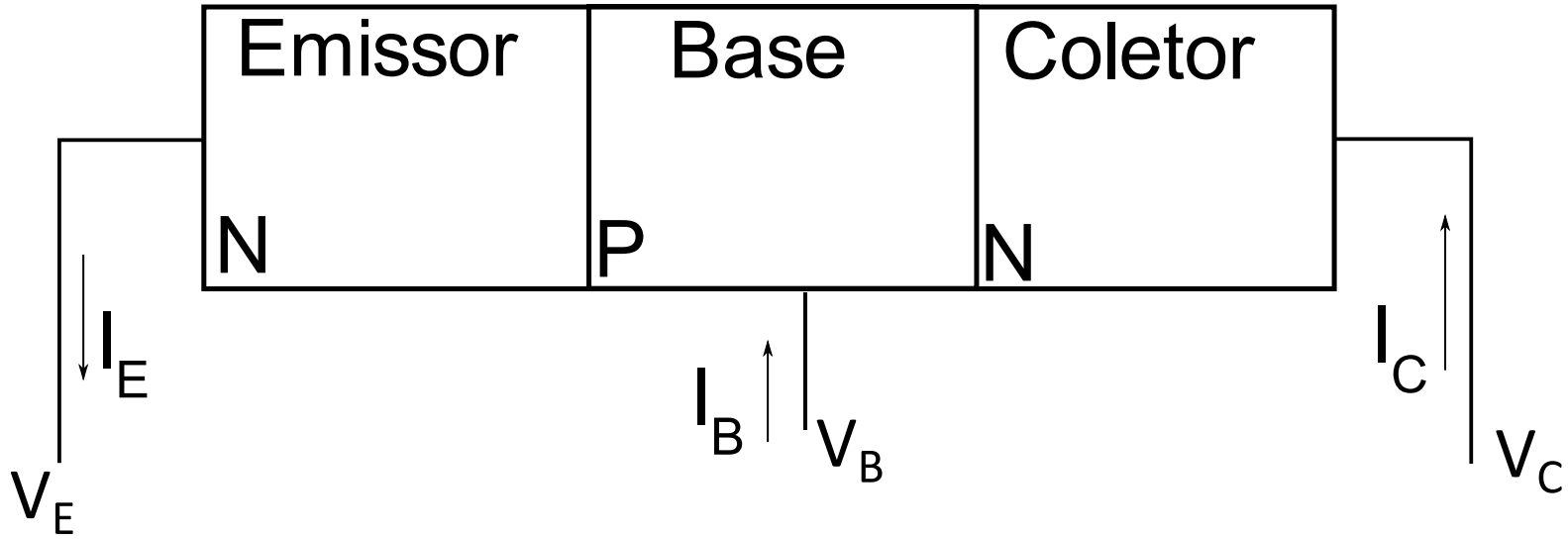
# Região Ativa

- $V_B > V_E$
- $V_C > V_B$



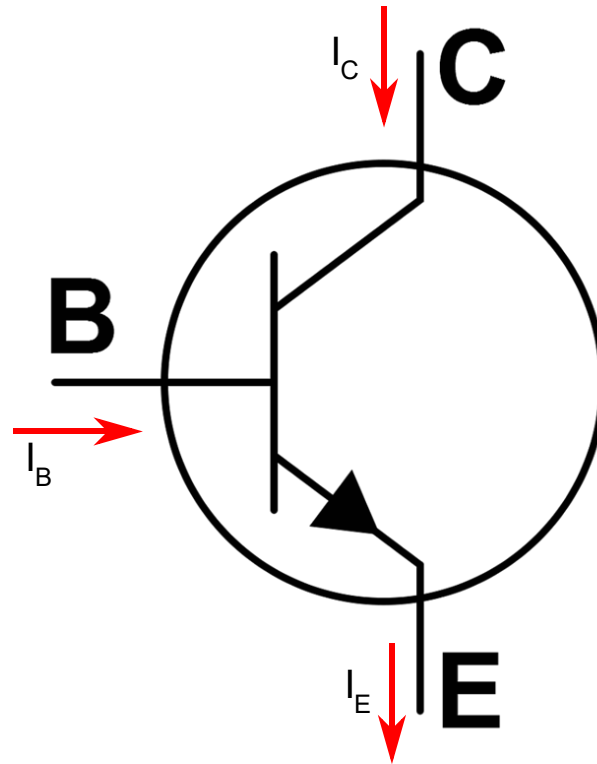
# Região Ativa

- $V_B > V_E$
- $V_C > V_B$
- $I_E = I_B + I_C$



# Região Ativa

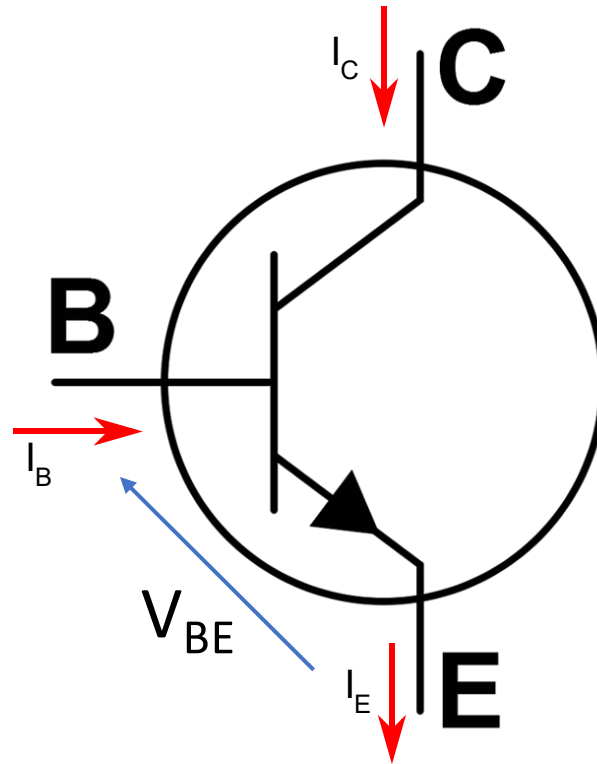
- $V_B > V_E$
- $V_C > V_B$
- $I_E = I_B + I_C$
- $I_C = \beta I_B$
- $I_C = \alpha I_E$
- $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$





# Região Ativa

- $V_B > V_E$
- $V_C > V_B$
- $I_E = I_B + I_C$
- $I_C = \beta I_B$
- $I_C = \alpha I_E$
- $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$



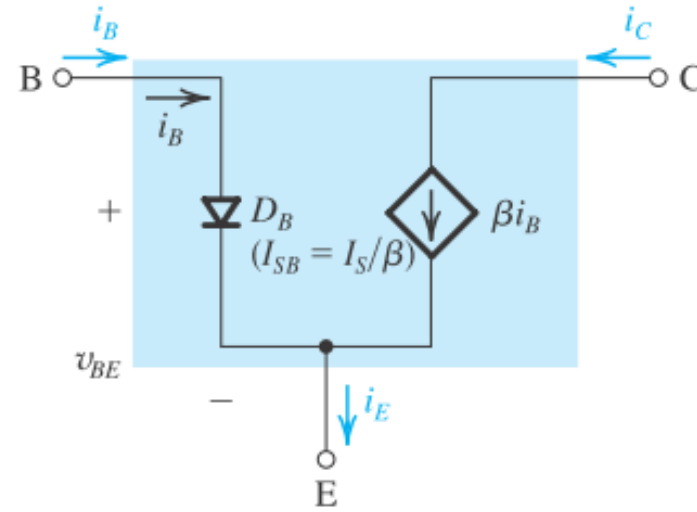
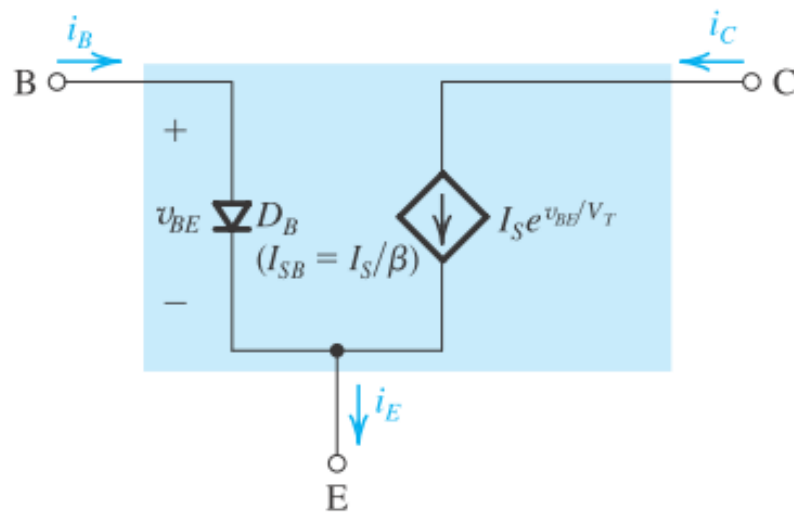
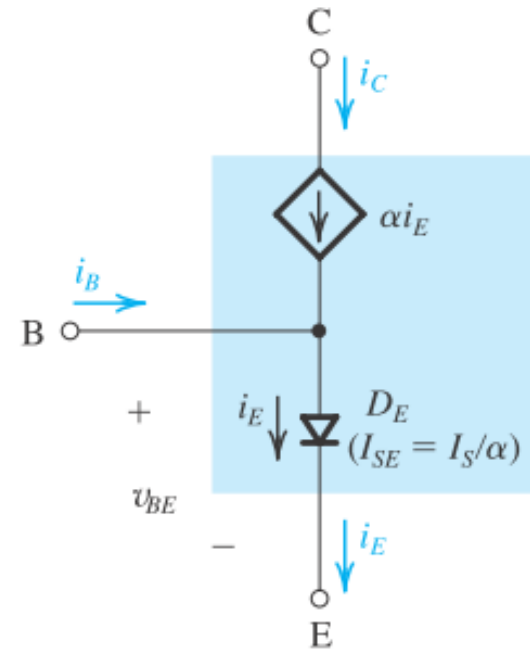
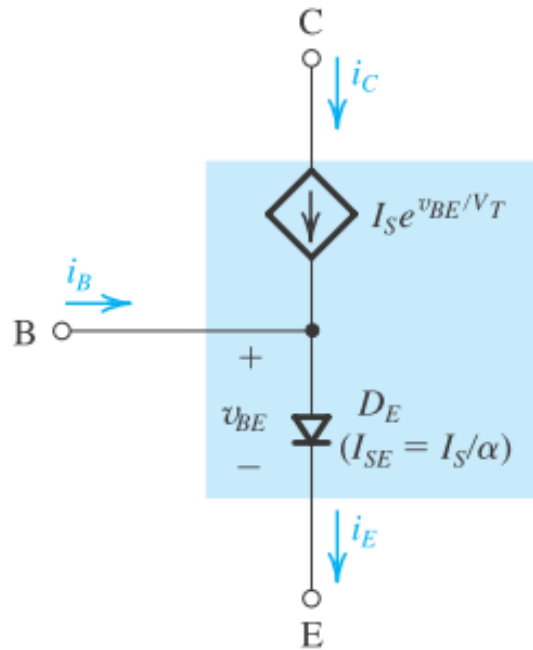
Modelo exponencial

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

# Modelo Exponencial

- $I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$
- $I_C$  é um diodo cuja corrente é controlada pela tensão B-E
- $I_B = I_C / \beta$
- $I_B$ , corrente na base, é uma pequena parcela do valor de  $I_C$
- $\beta$  tem valores altos, 50 ~ 500
- $I_E$  é a soma das outras duas correntes (lei dos nós)

# Modelos equivalentes da região ativa



# Exemplo

- Um transistor com  $I_s=1\text{E-}15$  e  $\beta=100$  tem seu terminal de Emissor ligado ao terra, uma fonte de  $10\mu\text{A}$  alimenta a base continuamente, um resistor de  $3\text{k}\Omega$  liga o terminal de Coletor a uma fonte de  $5\text{V}$ .
- Assumindo que o transistor está operando na região ativa, calcule a tensão na base e a tensão no coletor.
- A partir destes valores verifique se as condições para região ativa são atendidas
- Qual valor de resistência poderia ser ligado entre a fonte e o terminal de base para substituir a fonte de corrente?

# Exemplo

- Como  $I_B = I_C / \beta$
- $I_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{V_{BE}/V_T}$
- E assim calculamos  $V_{BE}$  pela equação exponencial do diodo
- $V_{BE} = 690\text{mV}$

# Exemplo

- Como  $I_B = I_C / \beta$
- $I_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{V_{BE}/V_T}$
- E assim calculamos  $V_{BE}$  pela equação exponencial do diodo
- $V_{BE} = 690\text{mV}$
- Pela relação  $I_B = I_C / \beta$ , com  $I_B = 10\mu\text{A}$
- $I_C = 1\text{mA}$



# Exemplo

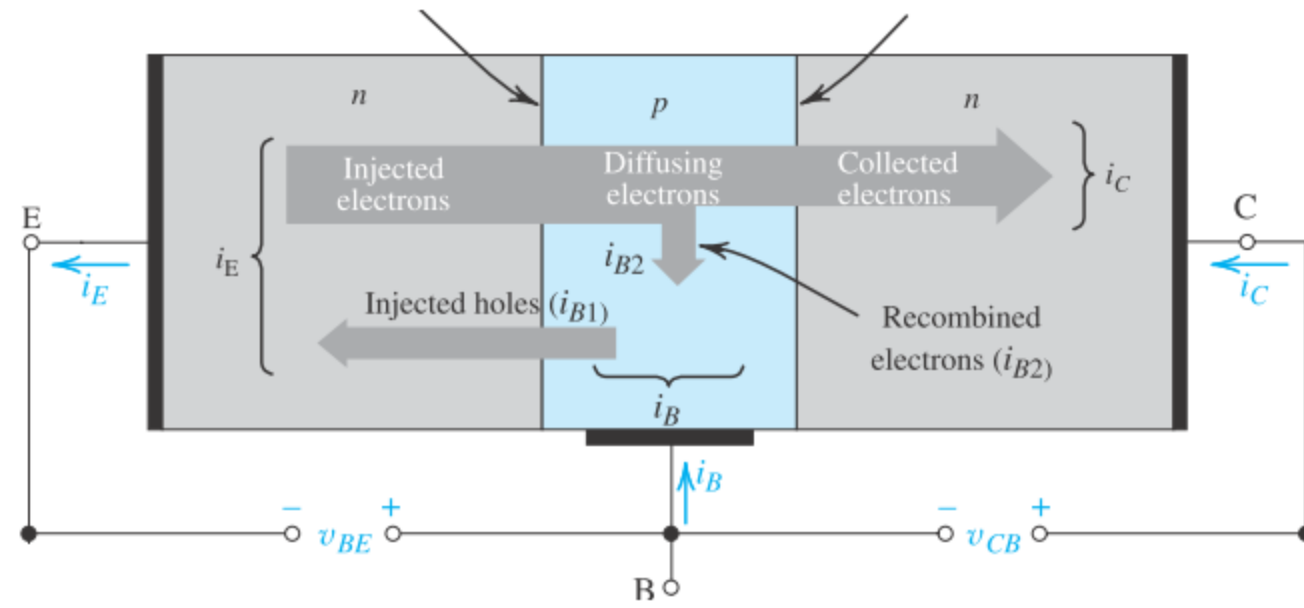
- Como  $I_B = I_C / \beta$
- $I_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{V_{BE}/V_T}$
- E assim calculamos  $V_{BE}$  pela equação exponencial do diodo
- $V_{BE} = 690\text{mV}$
  
- Pela relação  $I_B = I_C / \beta$ , com  $I_B = 10\mu\text{A}$
- $I_C = 1\text{mA}$
  
- Pela análise do circuito, com 1mA na resistência,  $V_C = 5\text{V} - (3\text{k} * 1\text{m}) = 2\text{V}$

# Exemplo

- $V_{BE} = 0,69V \rightarrow$  JEB polarizada diretamente
  - $V_C = 2V (> V_B) \rightarrow$  JCB polarizada reversamente
  - Portanto as condições para região ativa são satisfeitas
- 
- A fonte de corrente pode ser substituída por uma resistência que resulte em 10uA quando aplicada a uma diferença de potencial de 5 para 0,69V
  - $R_B = (5 - 0,69) / 10u \rightarrow R_B = 431k\Omega$

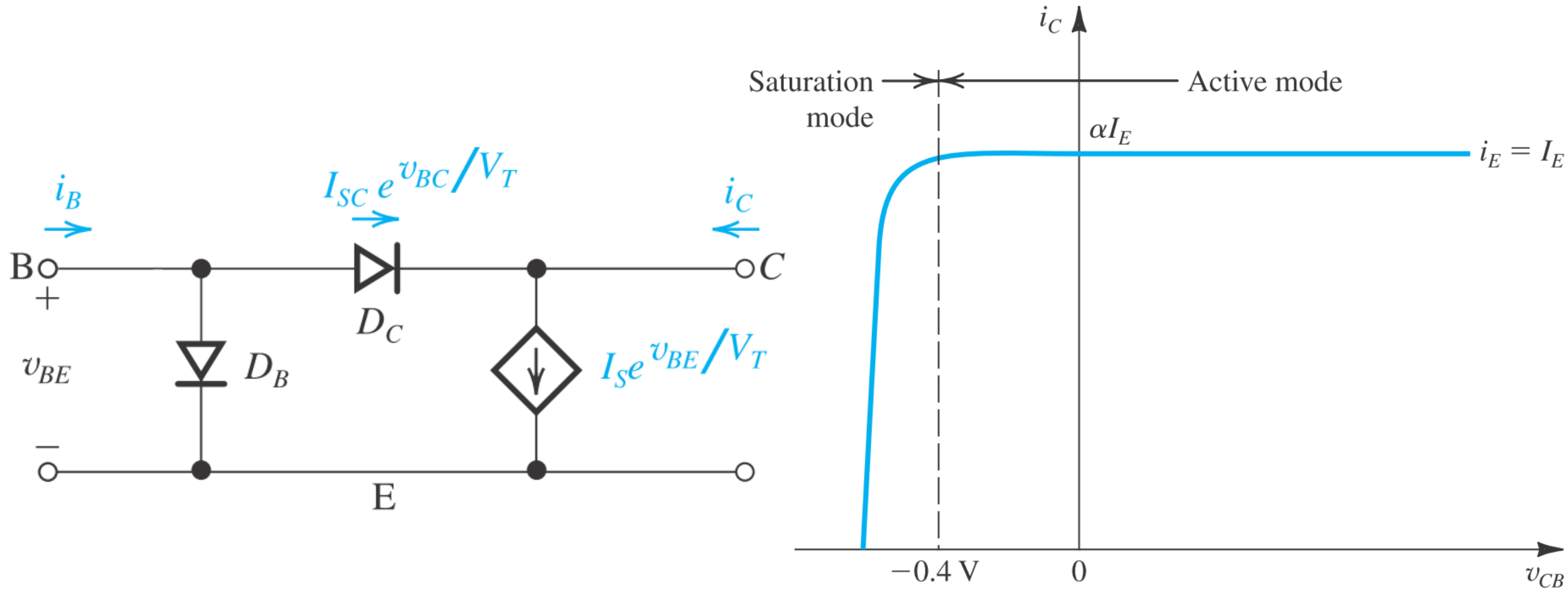
# TBJ no modo de saturação

- O TBJ atuando com a junção Coletor-Base polarizada diretamente
- Nesta configuração a corrente no coletor deixa de ser controlada pela base e passa a depender do circuito externo
- Consideramos que começa efetivamente em  $v_{CB}$  menor que  $-0,4V$

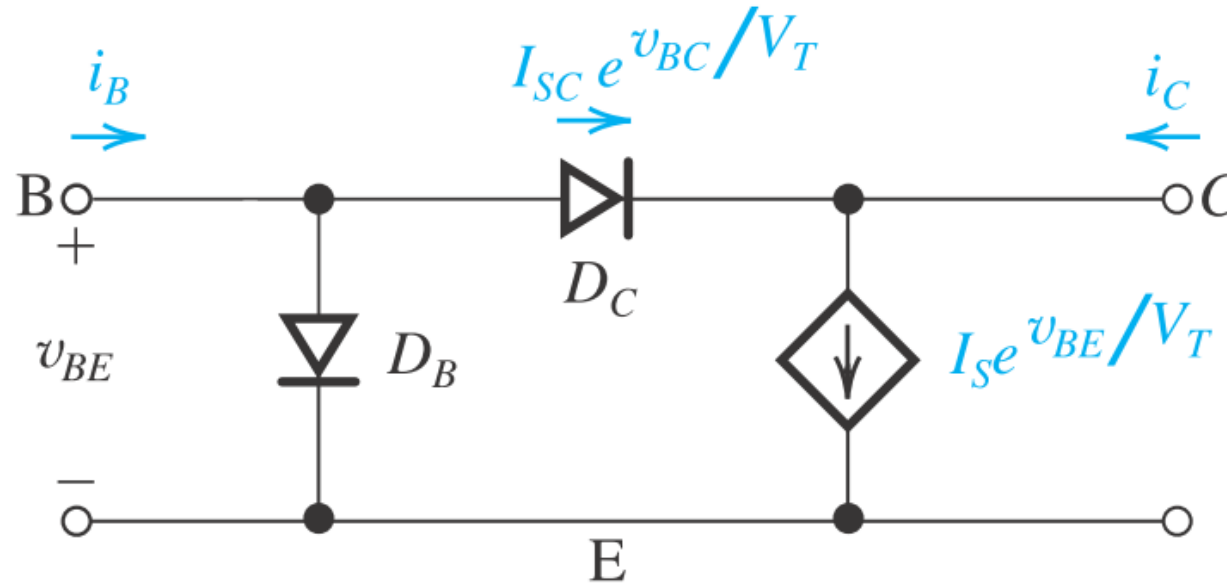


O diodo da junção Coletor-Base conduz, mudando a relação de corrente:

- Adicionando o diodo ao modelo:



- Com  $v_{BC}$  maior que 0,4V, o diodo base-coletor conduz, mudando a relação entre a corrente de base e a corrente de coletor



- Assim a relação  $I_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$  não é mais válida, pois há mais um caminho de corrente chegando ao coletor

## $\beta_{\text{forçado}}$

- Operando na saturação a relação  $\beta$  entre a corrente de base e de coletor não é mais válida
- Podemos calcular um novo valor para  $\beta$  na condição de operação do circuito, chamado de  $\beta_{\text{forçado}}$

$$\beta_{\text{forçado}} = i_C / i_B$$



# $V_{CE}$ de saturação

- Na condição de saturação, a tensão no **Coletor** é menor que na **Base** em pelo menos 0,4V
- Para manter o sentido positivo de corrente, a tensão no **Coletor** deve ser maior que do **Emissor**
- Assim, a tensão entre **Coletor** e **Emissor**,  $V_{CEsat} \approx 0,1 \text{ a } 0,3V$

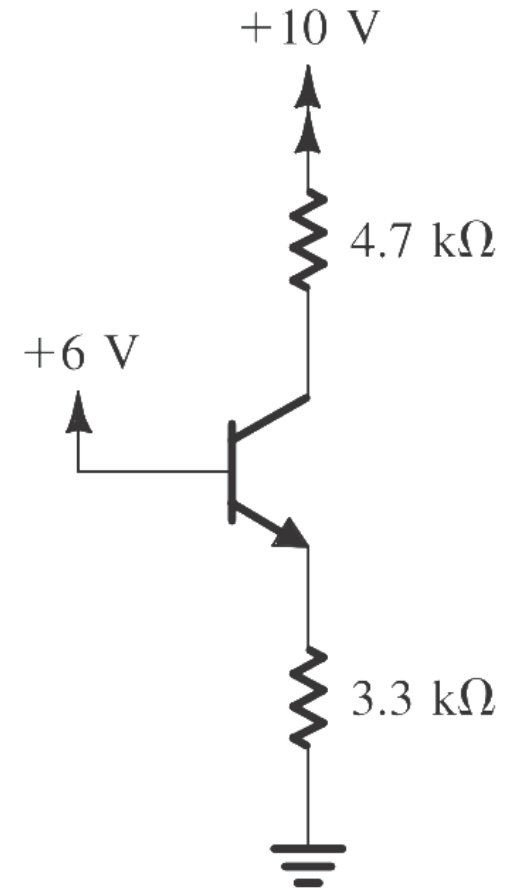
# Saturação

- Dizemos que o circuito está no limiar de saturação quando

$$V_{CEsat} = 0,3V$$

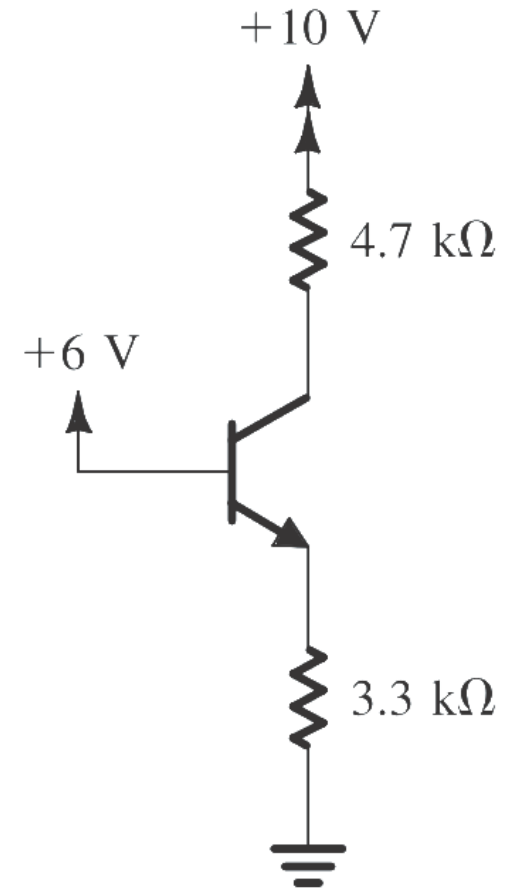
# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$



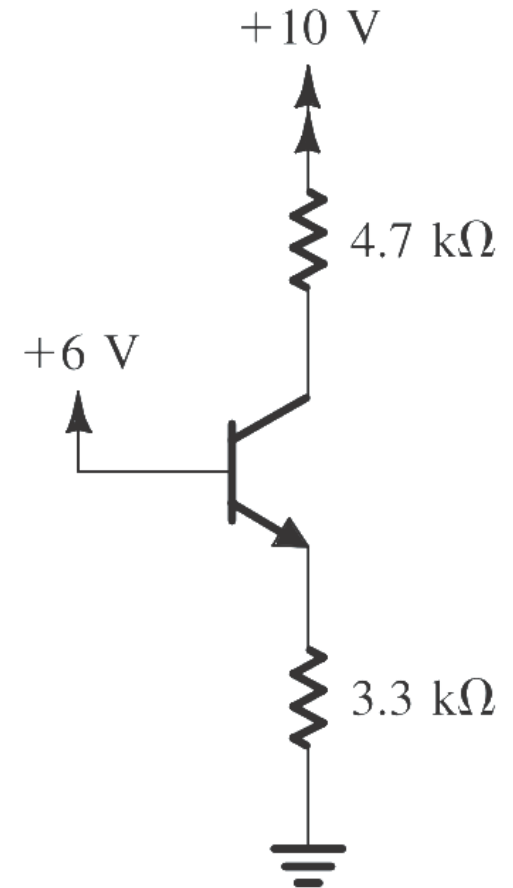
# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$
- Início: assumir que o transistor não está em corte, portanto  $v_{BE}=0,7V$



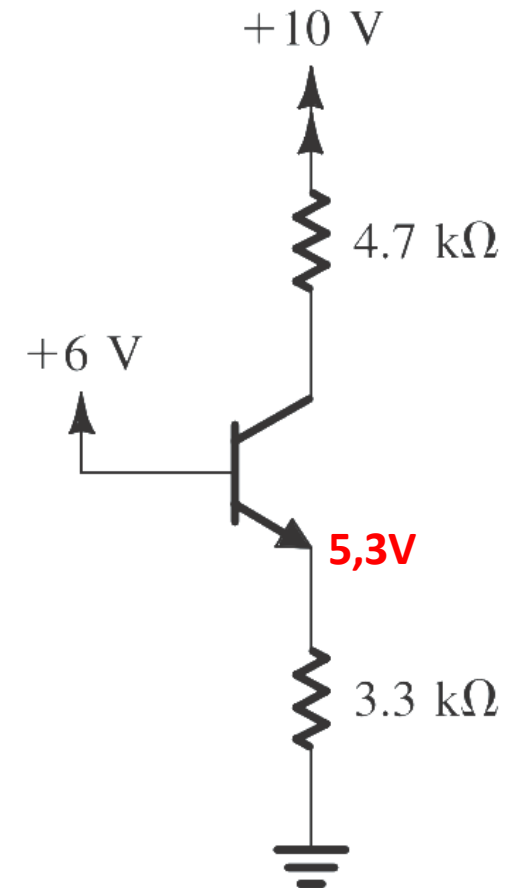
# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$
- Com  $v_{BE}=0,7V$  e  $V_B=6V$ , a tensão no emissor é  $6V - 0,7V = 5,3V$



# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$
- Com  $v_{BE}=0,7V$  e  $V_B=6V$ , a tensão no emissor é  
 $6V - 0,7V = 5,3V$
- Com  $V_E=5,3V$ , calculamos a corrente no resistor de  $3,3k\Omega$
- $I_R=5,3/3,3k = 1,6mA$





# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$

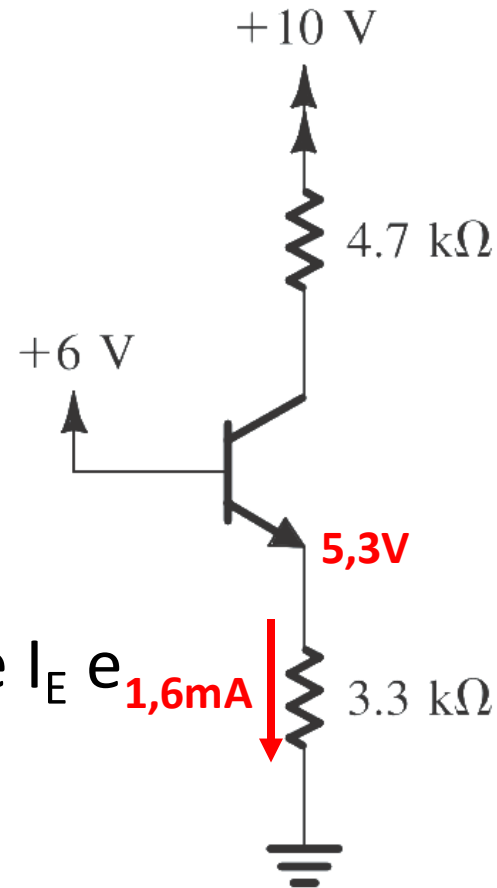
- Com  $v_{BE}=0,7V$  e  $V_B=6V$ , a tensão no emissor é

$$6V - 0,7V = 5,3V$$

- Com  $V_E=5,3V$ , calculamos a corrente no resistor de  $3,3k\Omega$

$$I_R = 5,3 / 3,3k = 1,6mA$$

- Considerando região ativa com  $\beta$  alto,  $I_C$  é muito próxima de  $I_E$  e podemos calcular  $V_C$



# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$

- Com  $v_{BE}=0,7V$  e  $V_B=6V$ , a tensão no emissor é

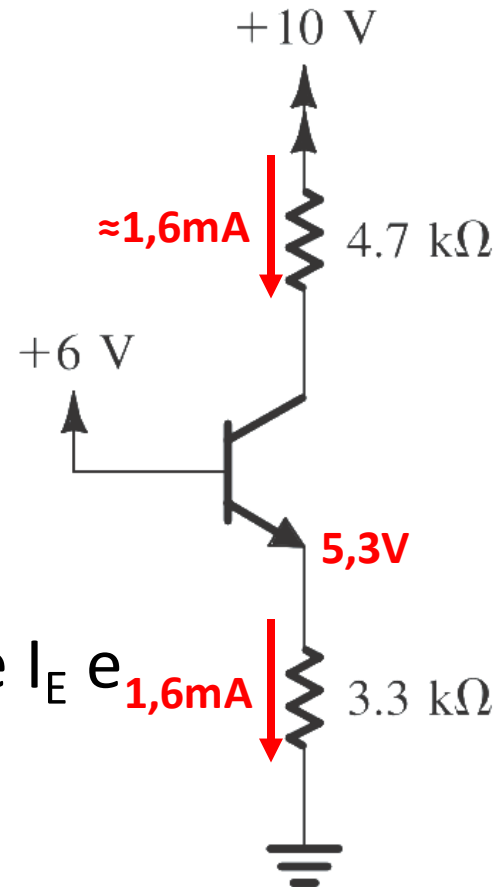
$$6V - 0,7V = 5,3V$$

- Com  $V_E=5,3V$ , calculamos a corrente no resistor de  $3,3k\Omega$

$$I_R = 5,3 / 3,3k = 1,6mA$$

- Considerando região ativa com  $\beta$  alto,  $I_C$  é muito próxima de  $I_E$  e podemos calcular  $V_C$

- $V_C = 10V - 4,7k * 1,6mA = 2,48V$



# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$

- Com  $v_{BE}=0,7V$  e  $V_B=6V$ , a tensão no emissor é

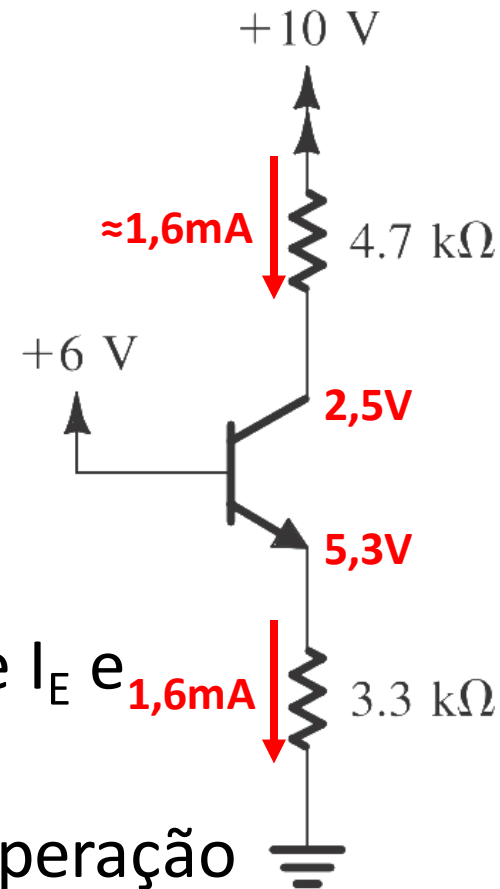
$$6V - 0,7V = 5,3V$$

- Com  $V_E=5,3V$ , calculamos a corrente no resistor de  $3,3k\Omega$

$$I_R = 5,3V / 3,3k = 1,6mA$$

- Considerando região ativa com  $\beta$  alto,  $I_C$  é muito próxima de  $I_E$  e podemos calcular  $V_C$

- $V_C = 10V - 4,7k * 1,6mA = 2,48V \rightarrow$  Analisamos a região de operação



# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$

- Com  $v_{BE}=0,7V$  e  $V_B=6V$ , a tensão no emissor é

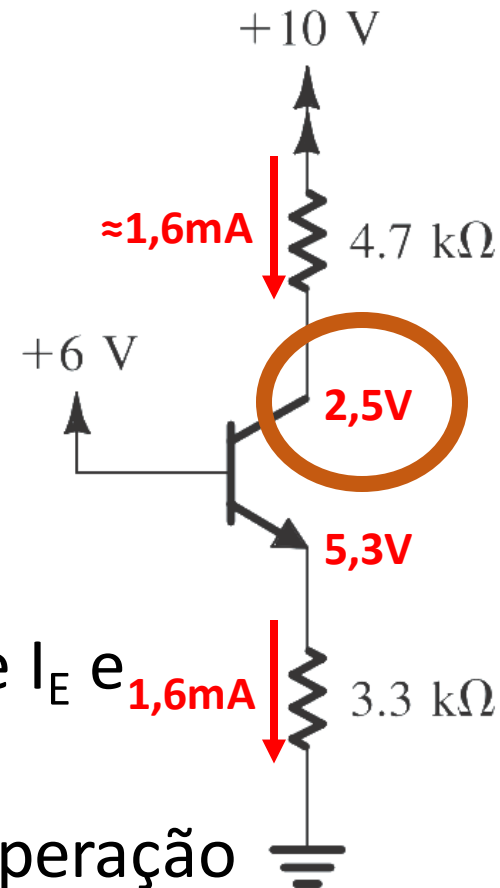
$$6V - 0,7V = 5,3V$$

- Com  $V_E=5,3V$ , calculamos a corrente no resistor de  $3,3k\Omega$

$$I_R = 5,3V / 3,3k = 1,6mA$$

- Considerando região ativa com  $\beta$  alto,  $I_C$  é muito próxima de  $I_E$  e podemos calcular  $V_C$

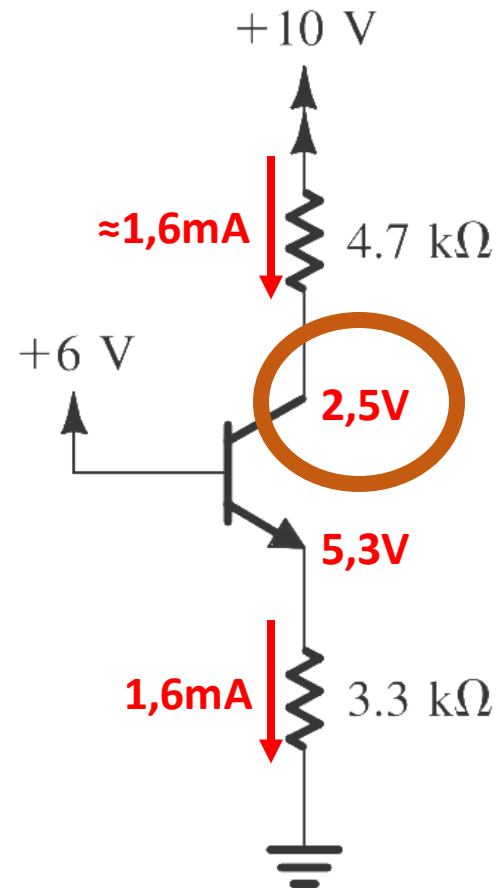
- $V_C = 10V - 4,7k * 1,6mA = 2,48V \rightarrow$  Analisamos a região de operação



# Exemplo

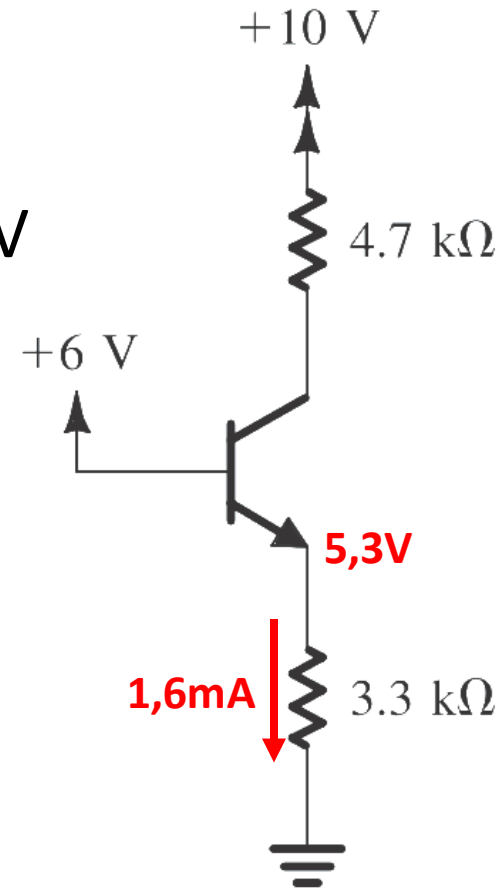
- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$
- O valor de 2,5V no coletor implicaria em JCB polarizada diretamente, mas isso contradiz a suposição de região ativa portanto a suposição deve estar errada e o circuito na região de saturação.

Assim, devemos refazer.



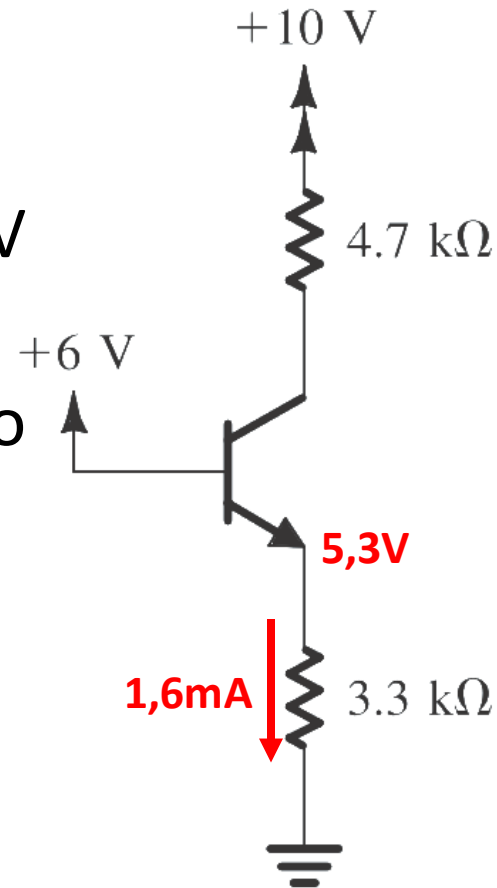
# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$
- Como o transistor não está em corte, continuamos com 5,3V e 1,6mA terminal do emissor



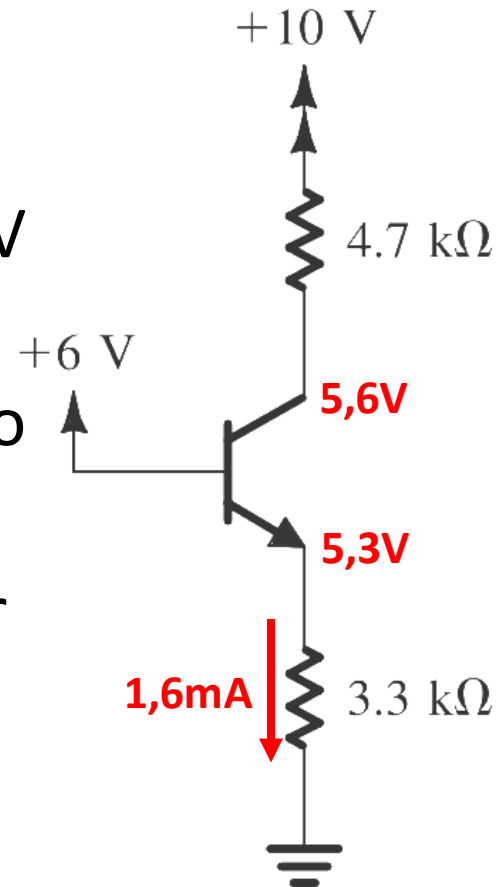
# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$
- Como o transistor não está em corte, continuamos com 5,3V e 1,6mA terminal do emissor
- Supondo saturação, vamos considerar  $V_{CEsat}=0,3V$  e portanto a tensão no coletor é  $V_C=V_E+V_{CE}=5,6V$



# Exemplo

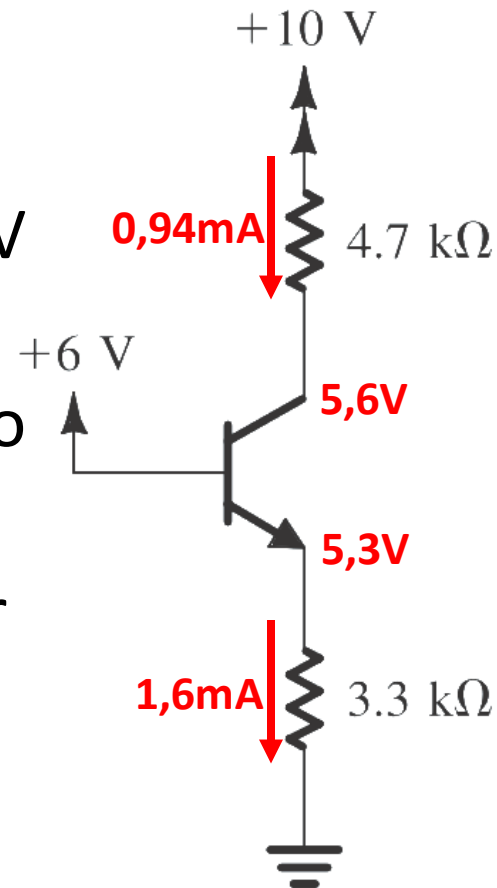
- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$
- Como o transistor não está em corte, continuamos com 5,3V e 1,6mA terminal do emissor
- Supondo saturação, vamos considerar  $V_{CEsat}=0,3V$  e portanto a tensão no coletor é  $V_C=V_E+V_{CE}=5,6V$
- Agora calculamos a corrente no coletor por meio do resistor de 4,7k $\Omega$ :  $V_C=(10V-5,6V)/4,7k\Omega= 0,94mA$





# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$
- Como o transistor não está em corte, continuamos com 5,3V e 1,6mA terminal do emissor
- Supondo saturação, vamos considerar  $V_{CEsat}=0,3V$  e portanto a tensão no coletor é  $V_C=V_E+V_{CE}=5,6V$
- Agora calculamos a corrente no coletor por meio do resistor de 4,7k $\Omega$ :  $V_C=(10V-5,6V)/4,7k\Omega= 0,94mA$



# Exemplo

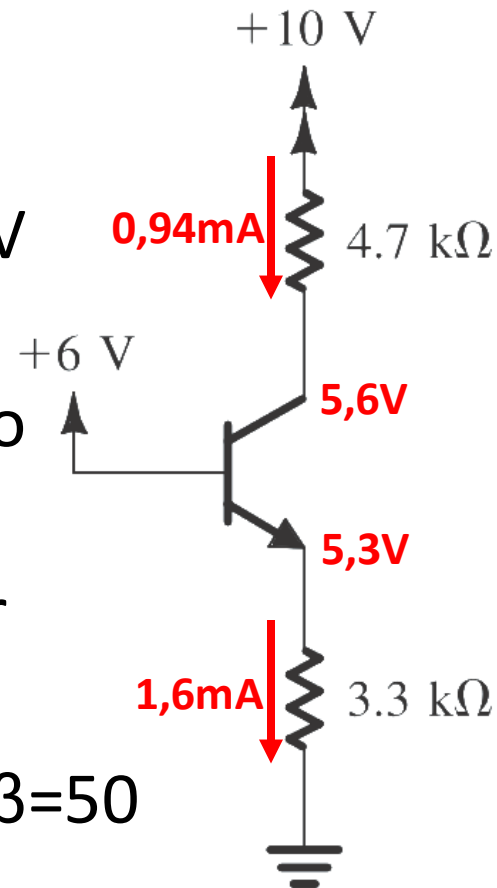
- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$

- Como o transistor não está em corte, continuamos com 5,3V e 1,6mA terminal do emissor

- Supondo saturação, vamos considerar  $V_{CEsat}=0,3V$  e portanto a tensão no coletor é  $V_C=V_E+V_{CE}=5,6V$

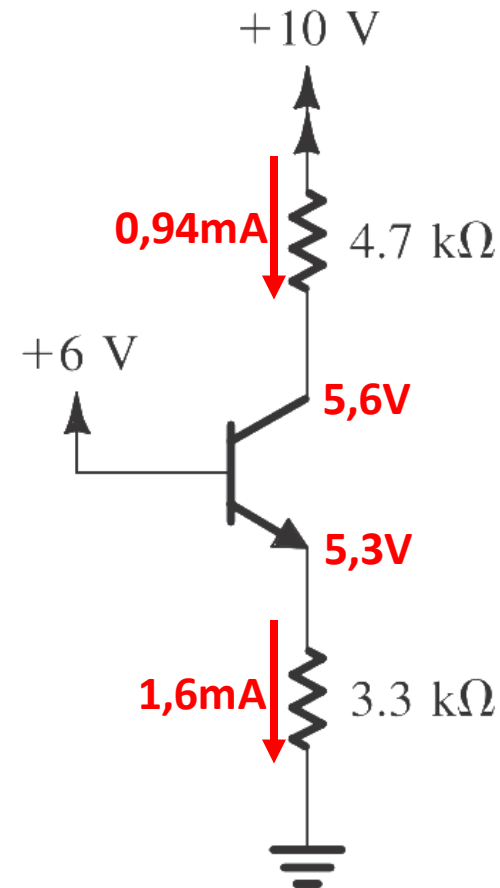
- Agora calculamos a corrente no coletor por meio do resistor de 4,7k $\Omega$ :  $V_C=(10V-5,6V)/4,7k\Omega= 0,94mA$

- Nota-se que a relação entre  $I_C$  e  $I_E$  não é mais definida pelo  $\beta=50$  portanto convém calcular o valor do  $\beta_{forçado}$



# Exemplo

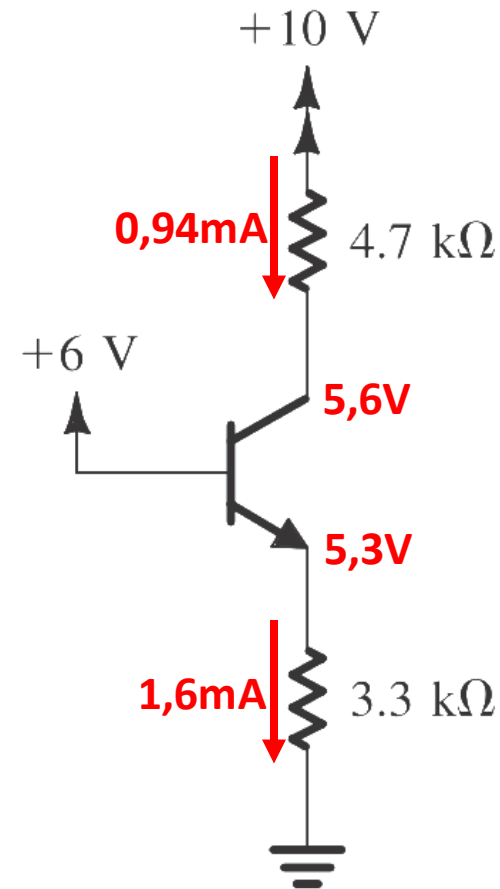
- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$
- Pela lei dos nós,  $I_E=I_B+I_C$ , assim  $I_B = 0,66\text{mA}$
- $\beta_{\text{forçado}}=I_C/I_B = 1,42$
- Nota-se que o  $\beta_{\text{forçado}}$  é muito menor que o  $\beta$  nominal do transistor



# Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, no qual o transistor apresenta  $\beta=50$

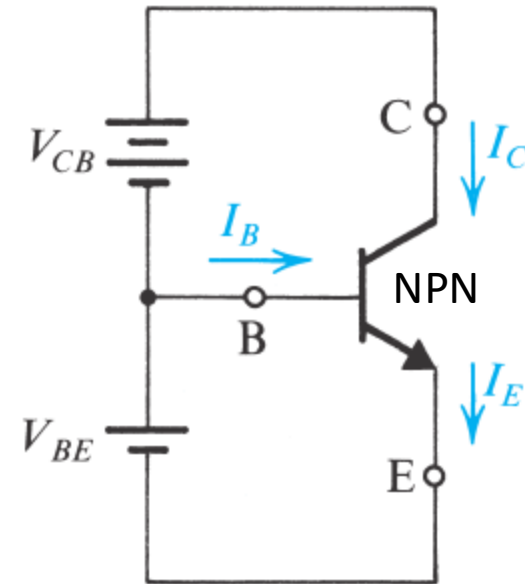
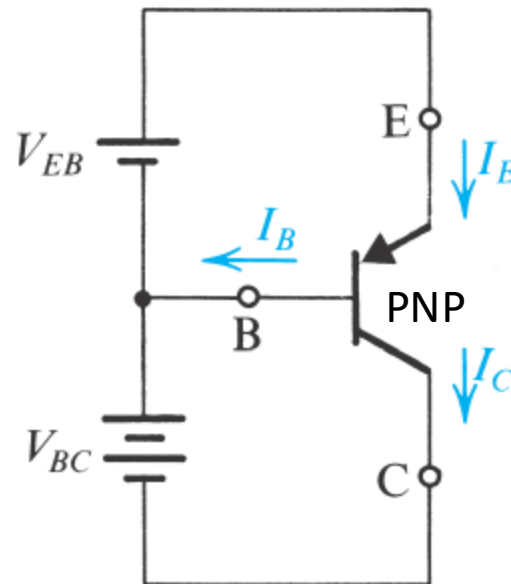
- $I_E = 1,6\text{mA}$
- $I_C = 0,94\text{mA}$
- $I_B = 0,66\text{mA}$
- $\beta_{\text{forçado}} = I_C/I_B = 1,42$
- $V_B = 6\text{V}$
- $V_C = 5,6\text{V}$
- $V_E = 5,3\text{V}$
- Para casa: refazer usando  $V_B = 4\text{V}$



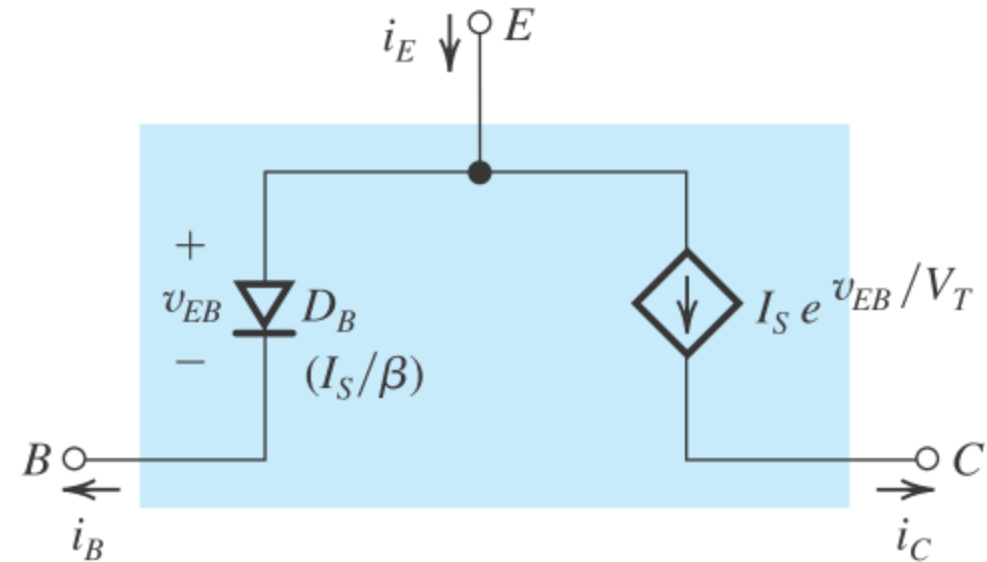
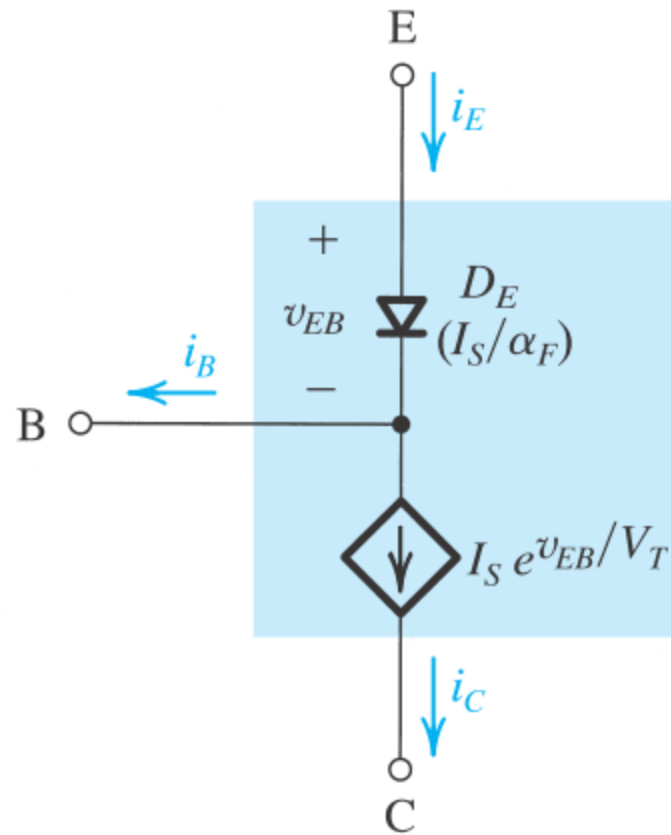
# Transistor PNP

- A operação do transistor PNP é idêntica ao NPN.
- A corrente se dá majoritariamente pelas lacunas e não pelos elétrons-livres.
- O sentido das correntes fica invertido e a tensão de interesse é a  $V_{EB}$
- As equações continuam válidas, apenas substituindo  $v_{BE}$  por  $v_{EB}$
- A operação em saturação é análoga à do NPN

Note no símbolo do transistor que a 'seta' sempre indica o Emissor, mas no PNP ela aponta para dentro

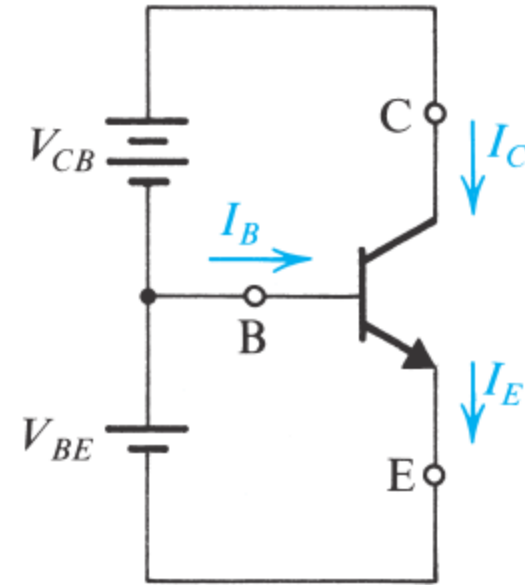
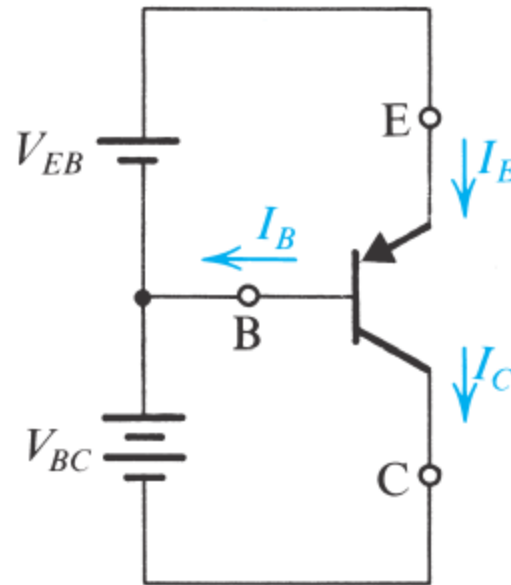


# Transistor PNP



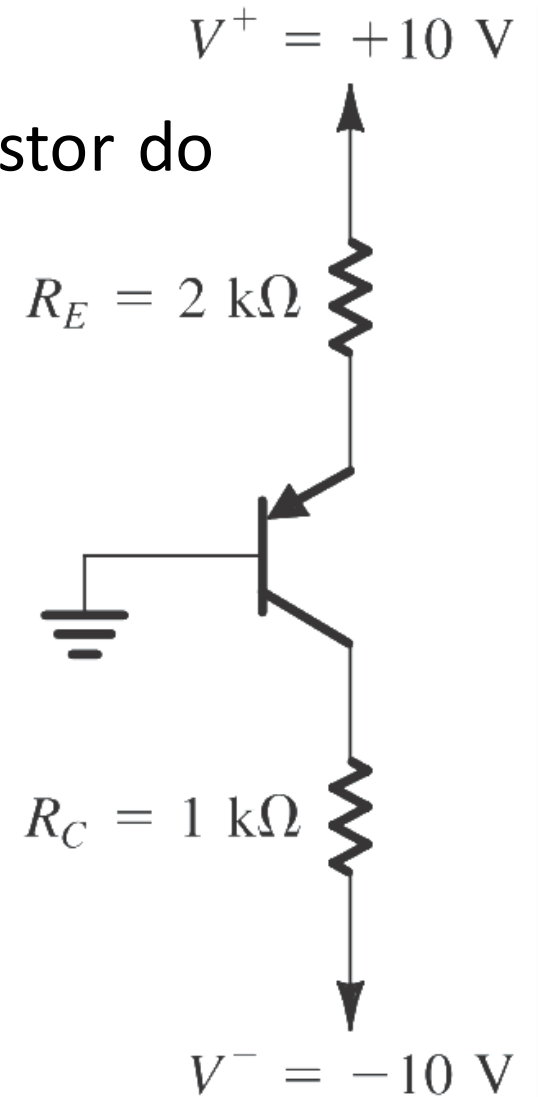
# Transistor PNP

- O transistor PNP aparece no circuito com o emissor e coletor em sentidos opostos ao do NPN, de forma que a corrente sempre flua de cima para baixo
- Note que as correntes sempre são positivas,  $i_E$ ,  $i_B$  e  $i_C$ , independente do tipo de transistor



# Exercício

- Determine as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, com  $\beta=100$ .

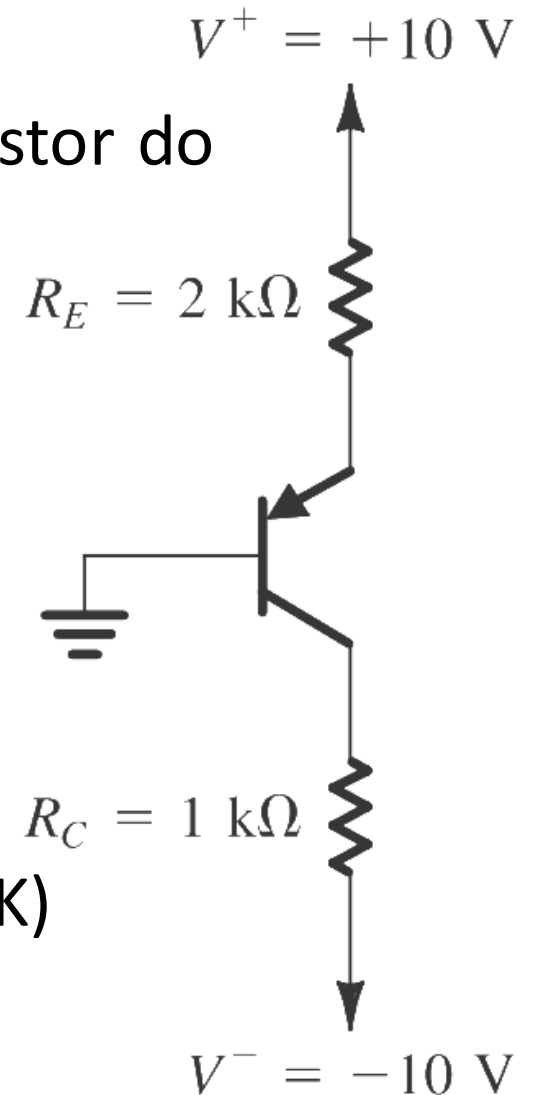




# Exercício

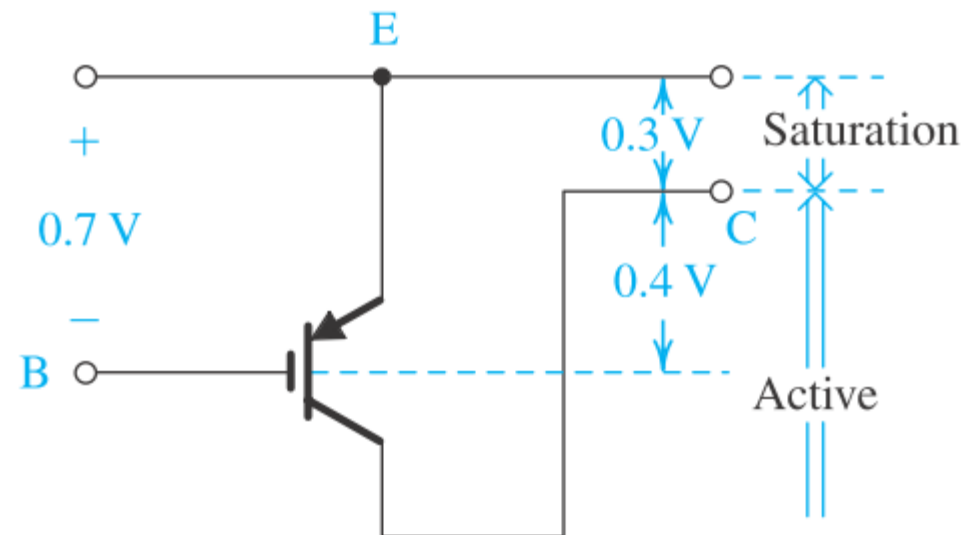
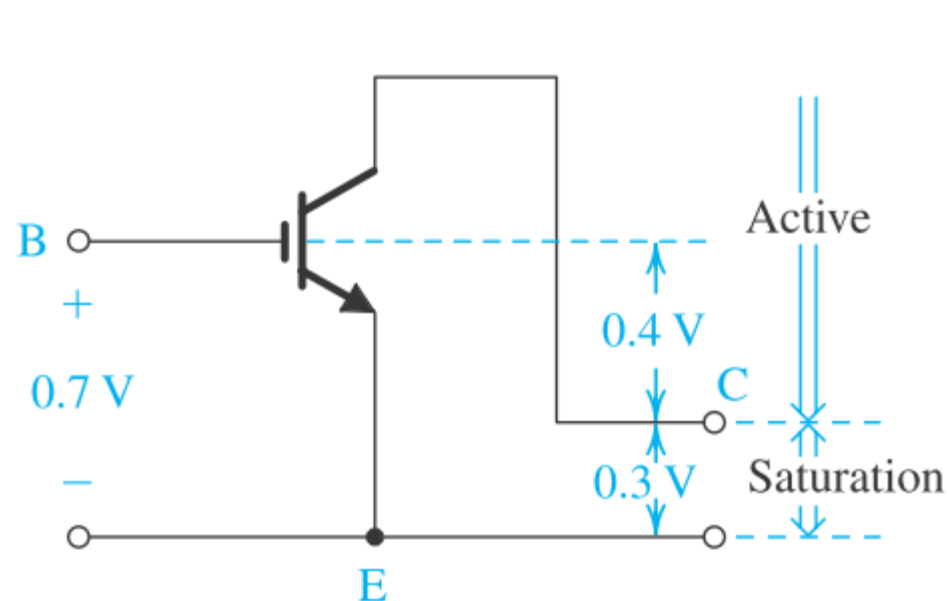
- Determine as tensões e correntes nos terminais do transistor do circuito, com  $\beta=100$ .

- $V_B = 0V$
- $V_E = V_B + V_{EB} = 0,7V$
- $I_E = (10 - 0,7)/2k = 4,65mA$
- (supondo Reg. Ativa):  $I_C = \alpha I_E = (100/101) * 4,65m = 4,6mA$
- $V_C = -10_V + R_C * I_C = -5,4V$  (JCB pol. Reversa  $\rightarrow$  Reg. ativa OK)
- $I_B = I_C / \beta = 46\mu A$



# Características tensão-corrente no BJT

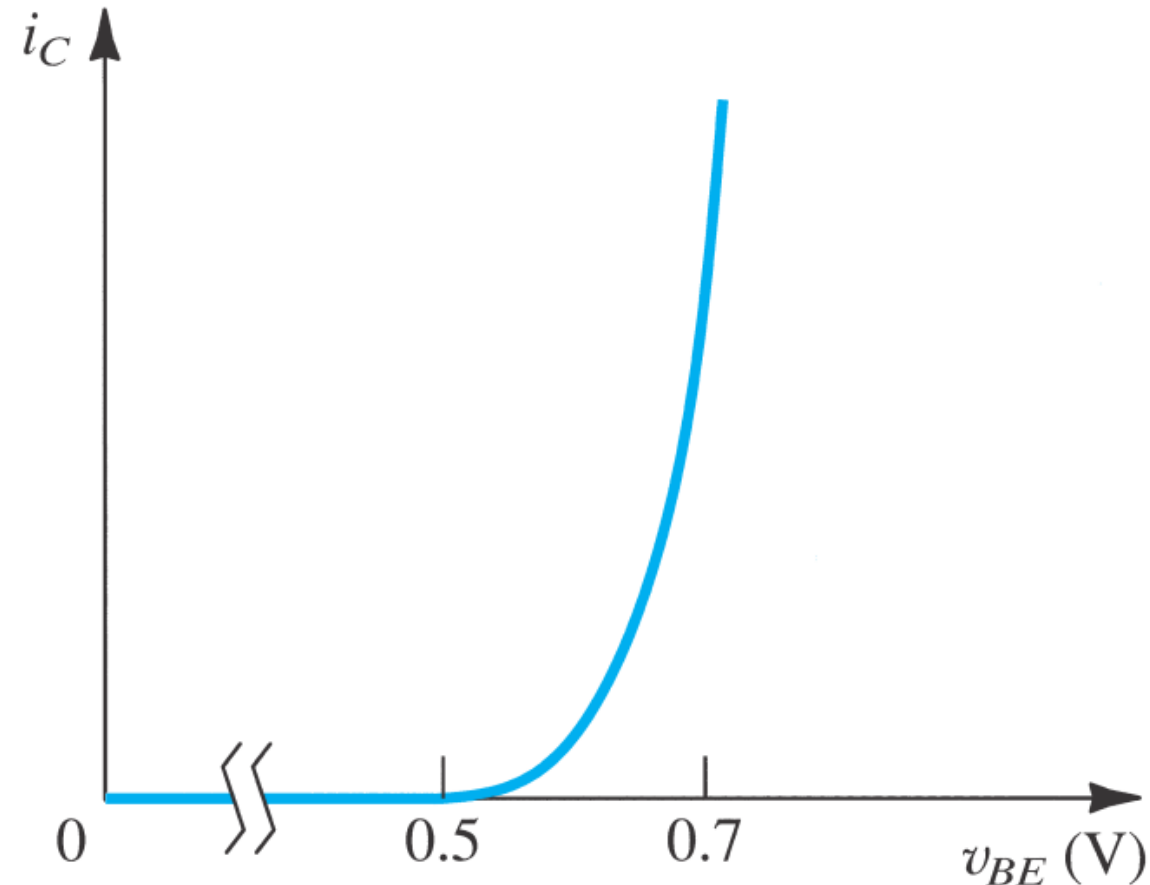
- Uma forma prática de observar as regiões ativa e de saturação:



# Características tensão-corrente no BJT

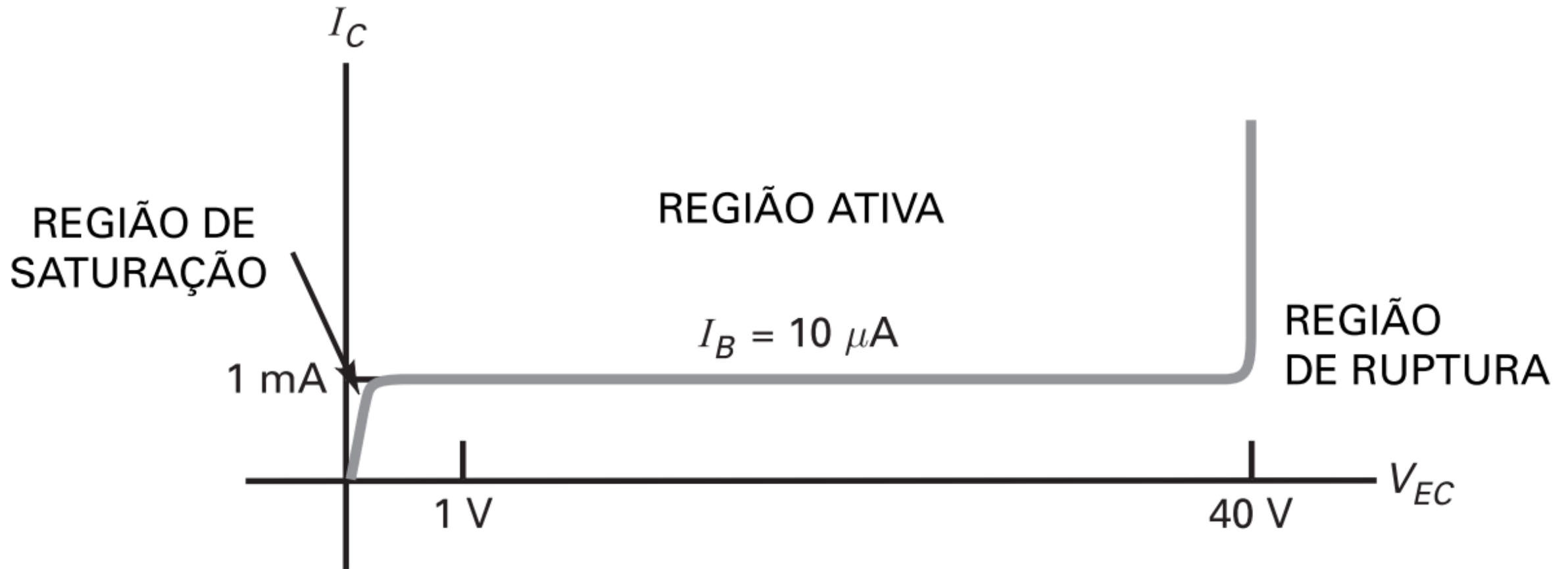
- Lembrando do comportamento exponencial da corrente em relação à tensão:

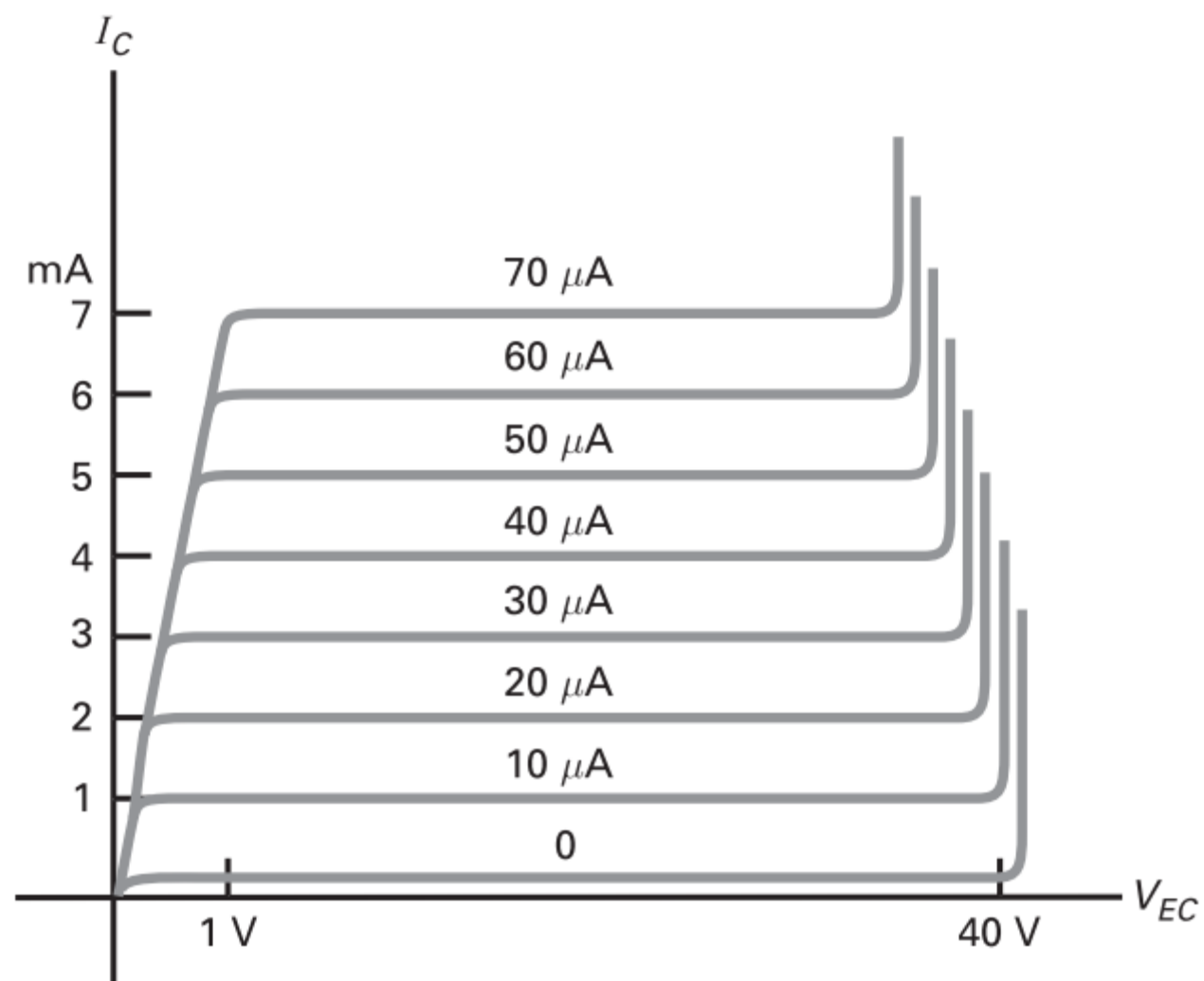
$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$



# Características tensão-corrente no BJT

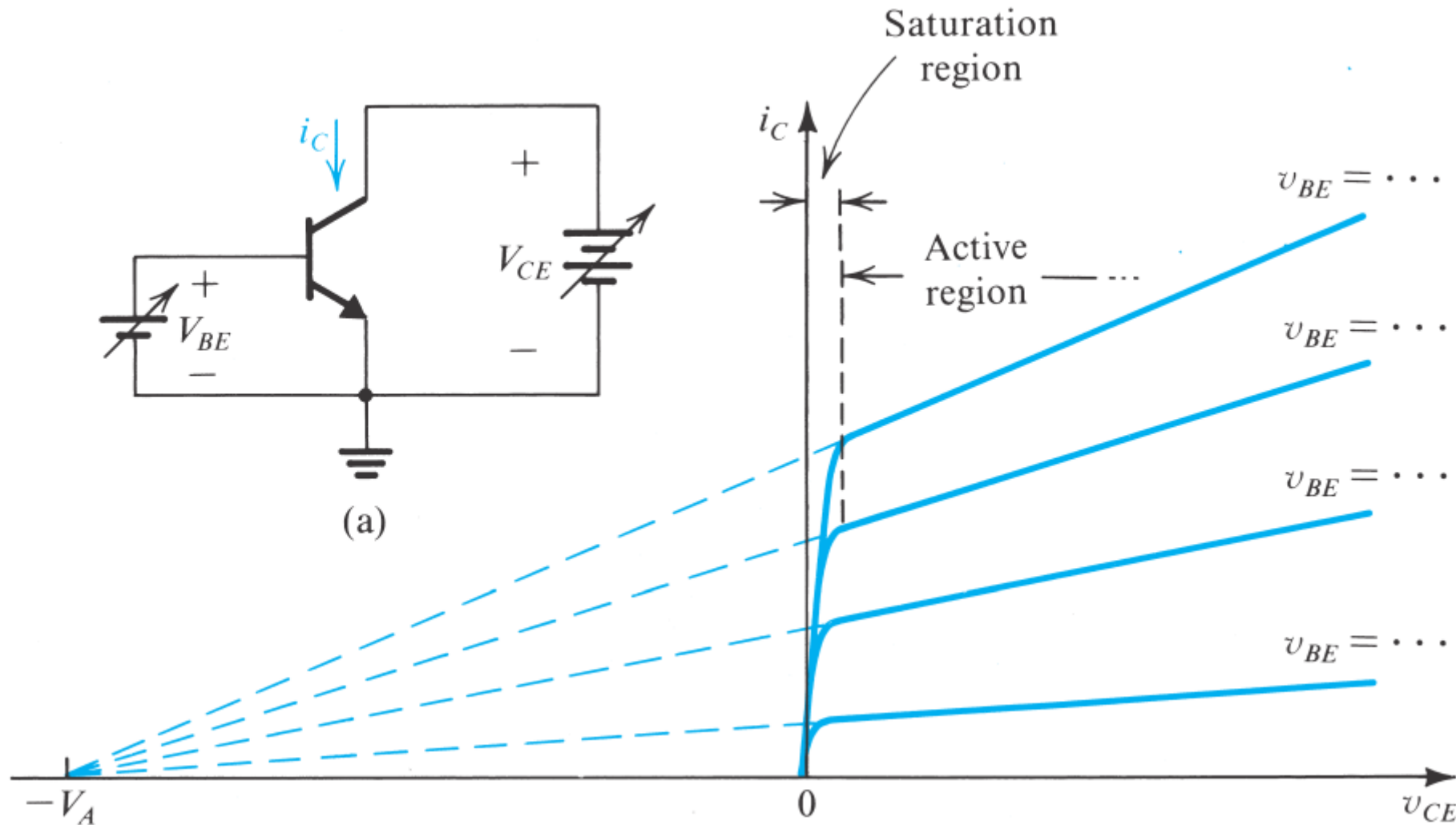
- Comportamento ideal da corrente no coletor:





# Efeito Early

- Idealmente a corrente no coletor seria independente da tensão entre o coletor e o emissor, porém isso não ocorre no caso real:

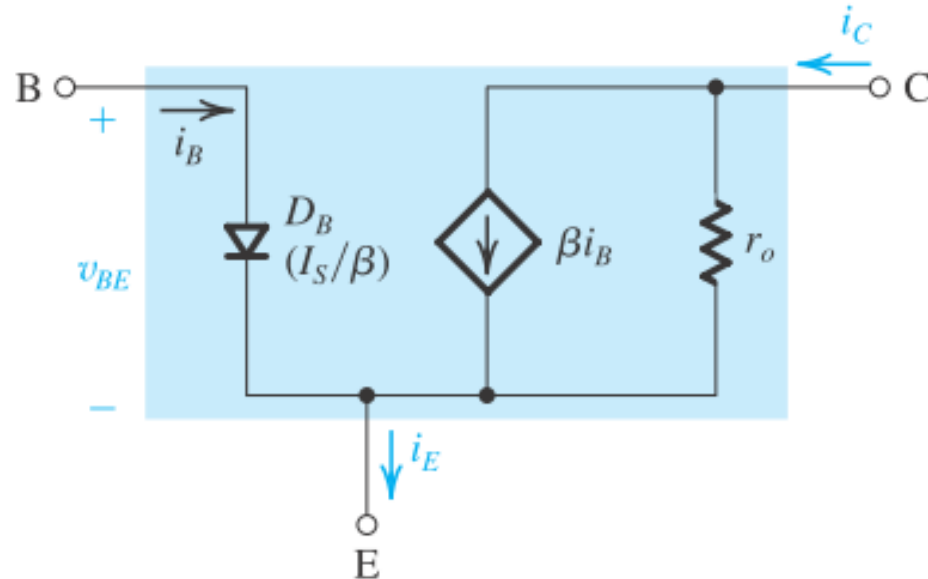


# Efeito Early

- O efeito ocorre porque com o aumento da tensão Coletor-Emissor, há aumento na região de depleção da junção Coletor-Base, o que reduz a largura efetiva da base ( $W$ ).
- Com a diminuição do comprimento  $W$ , a corrente  $I_S$  aumenta e assim a corrente do coletor aumenta
- A projeção das retas se encontram em um único ponto  $-V_A$ , também chamado de tensão Early
- O efeito Early também é conhecido como **fenômeno de modulação de largura de base**

# Efeito Early

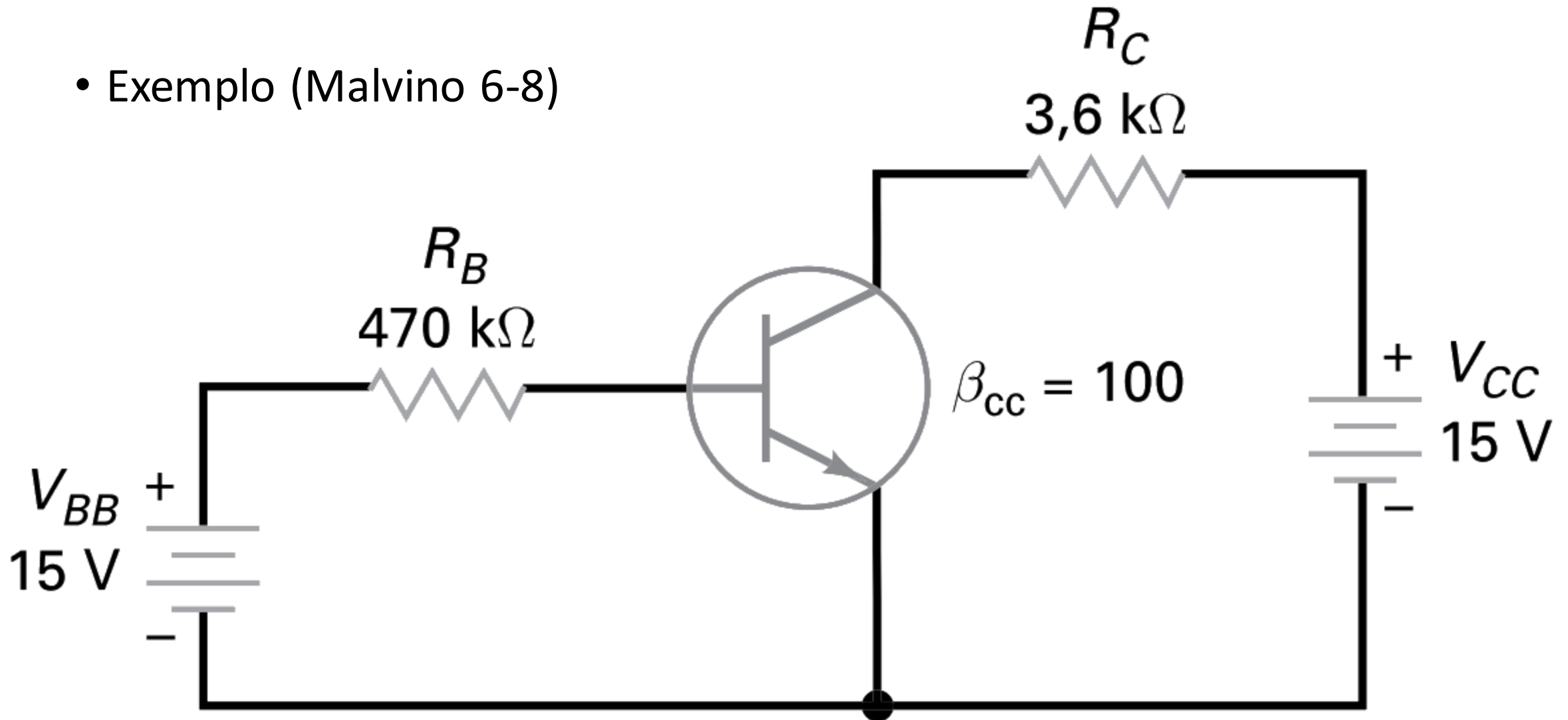
- O efeito surge pouco efeito em análise de circuitos CC, porém será muito importante na análise do transistor sobre sinais
- O efeito pode ser incorporado ao modelo como um resistor ligando o terminal de Coletor ao terminal de Emissor, com resistência  $r_o = V_A / I_C'$  onde  $I_C' = I_S e^{V_{BE}/V_T}$





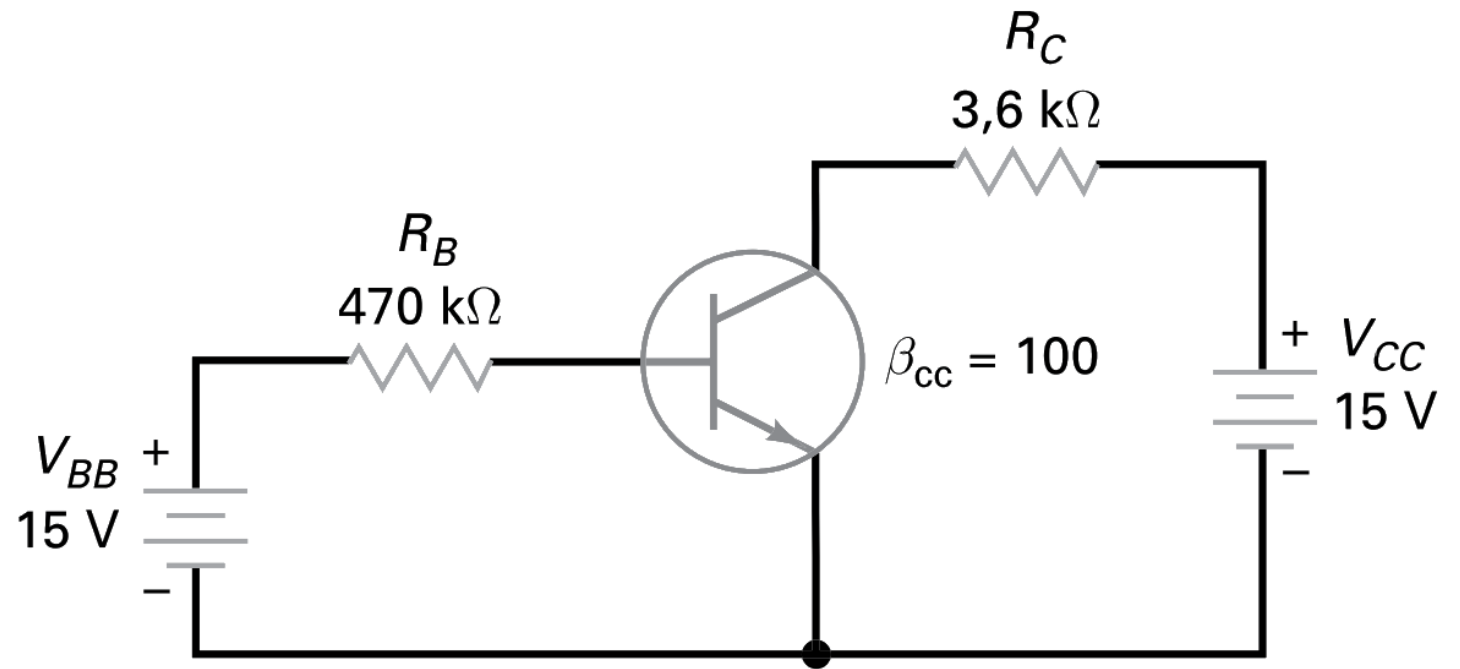
# Circuitos aplicando BJT

- Exemplo (Malvino 6-8)



# Exemplo

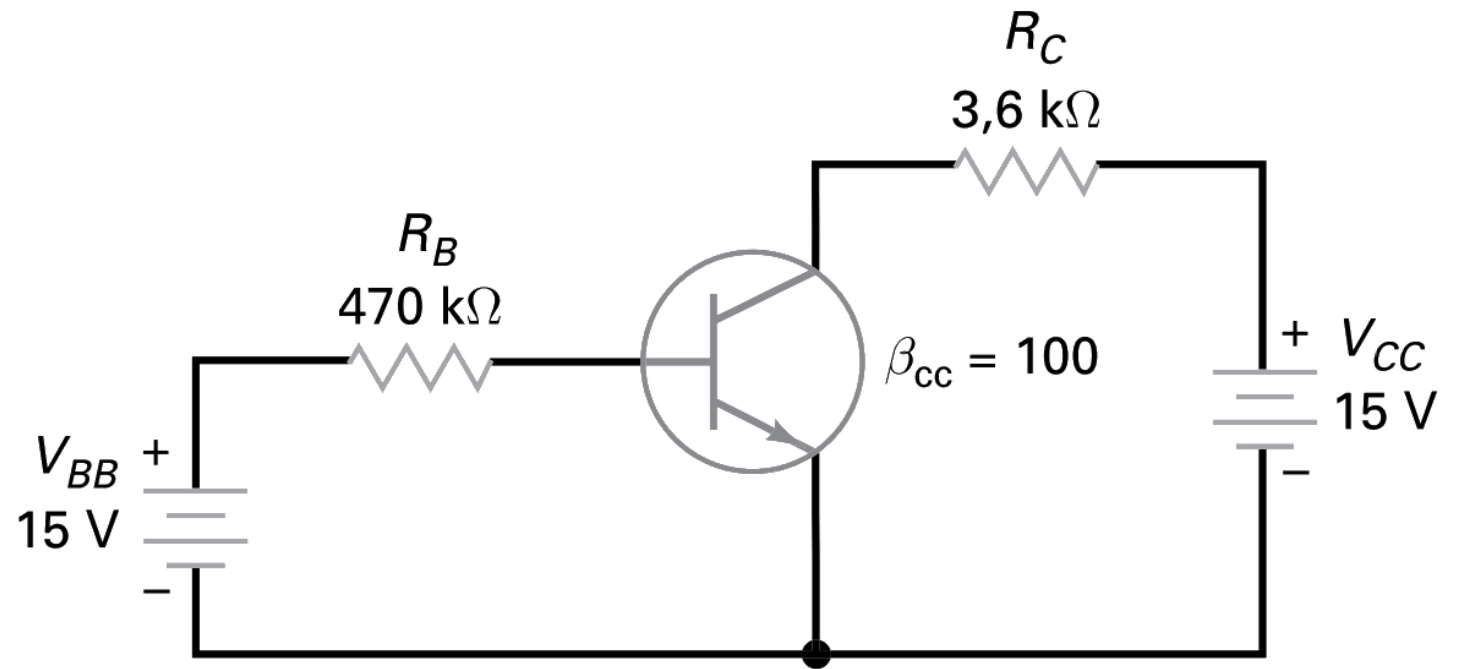
Por onde começar?



# Exemplo

Por onde começar?

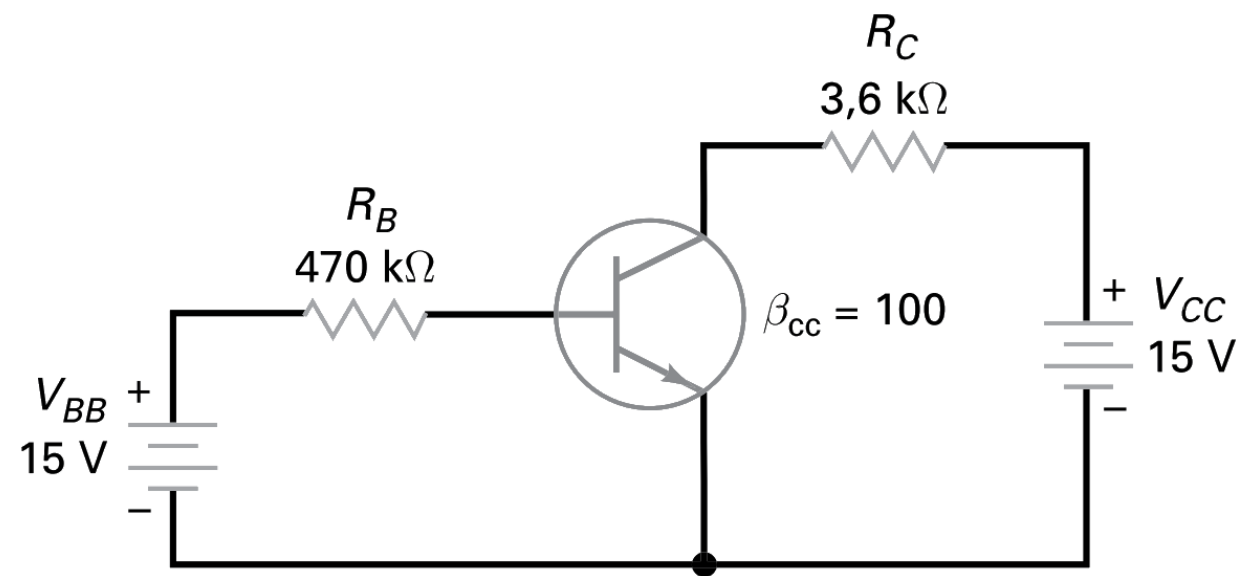
- Analisar circuito de base



# Exemplo

Por onde começar?

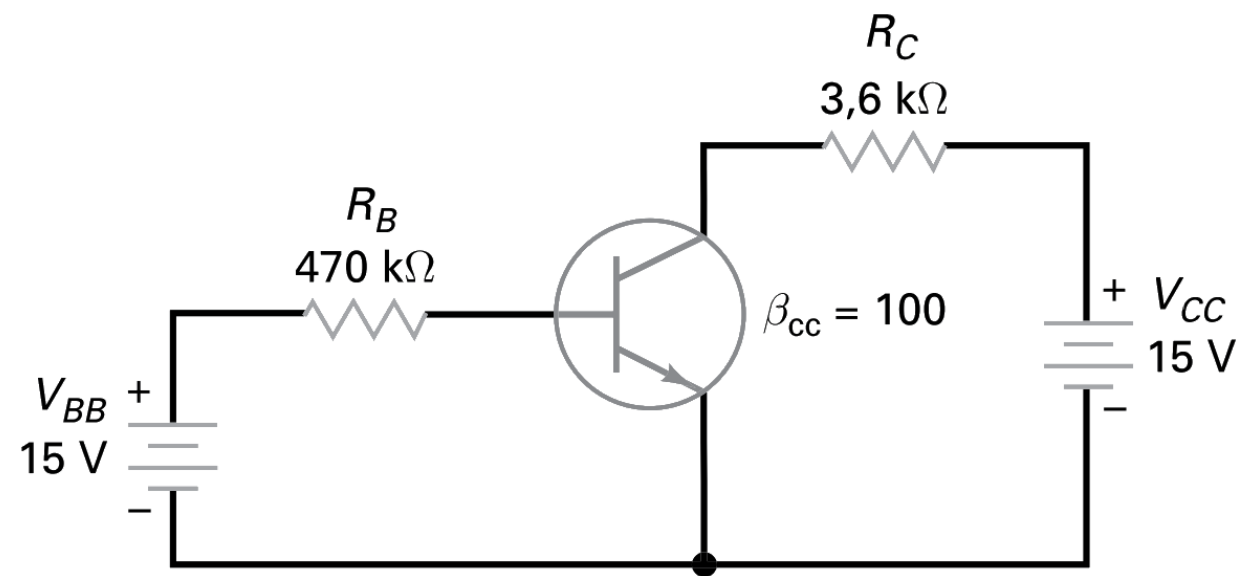
- Analisar circuito de base
  - Considerando a JEB como um diodo, temos um circuito com uma fonte de 15V, uma resistência de 470k e um diodo com queda 'constante' de 0,7V



# Exemplo

Por onde começar?

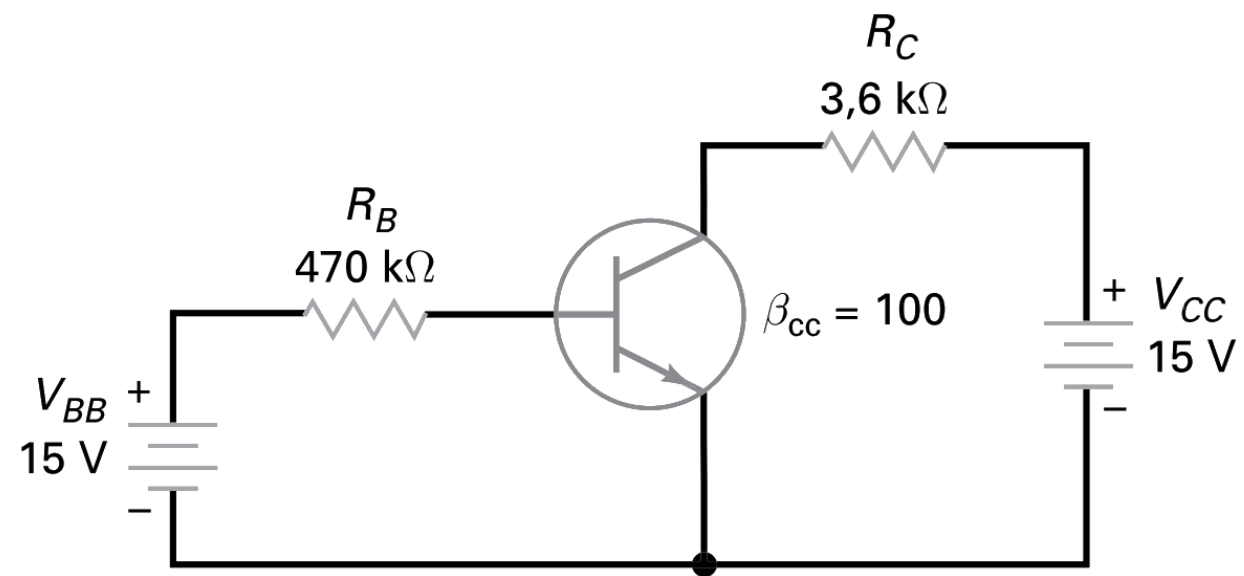
- Analisar circuito de base
  - Considerando a JEB como um diodo, temos um circuito com uma fonte de 15V, uma resistência de 470k e um diodo com queda 'constante' de 0,7V
  - Portanto a corrente de base pode ser calculada como  $i_B = (15 - 0,7) / 470k = 30,4\mu A$



# Exemplo

Por onde começar?

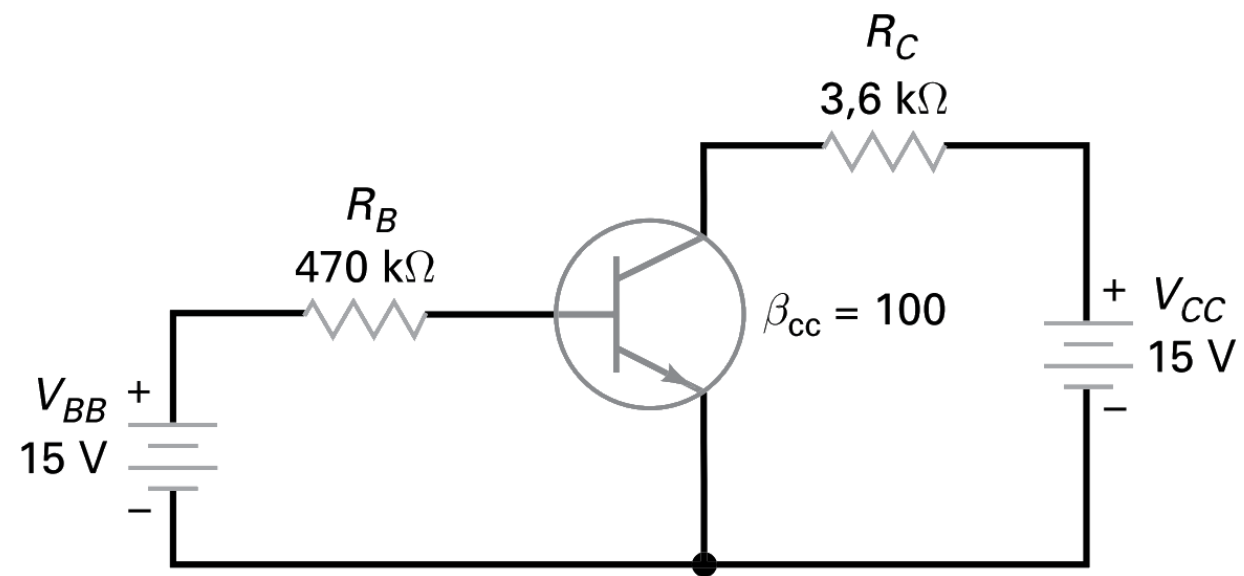
- Analisar circuito de base
  - Considerando a JEB como um diodo, temos um circuito com uma fonte de 15V, uma resistência de 470k e um diodo com queda 'constante' de 0,7V
  - Portanto a corrente de base pode ser calculada como  $i_B = (15 - 0,7) / 470k = 30,4\mu A$
- A seguir, análise do circuito do Coletor e do modo de operação



# Exemplo

Por onde começar?

- Analisar circuito de base
  - Considerando a JEB como um diodo, temos um circuito com uma fonte de 15V, uma resistência de 470k e um diodo com queda 'constante' de 0,7V
  - Portanto a corrente de base pode ser calculada como  $i_B = (15 - 0,7) / 470k = 30,4\mu A$
- A seguir, análise do circuito do Coletor e do modo de operação
  - $i_C = \beta i_B \rightarrow i_C = 3,04mA$  ← Supondo Reg. Ativa
  - $V_C = 15 - 3,6k * 3,04m = 4,05V$



# Exemplo

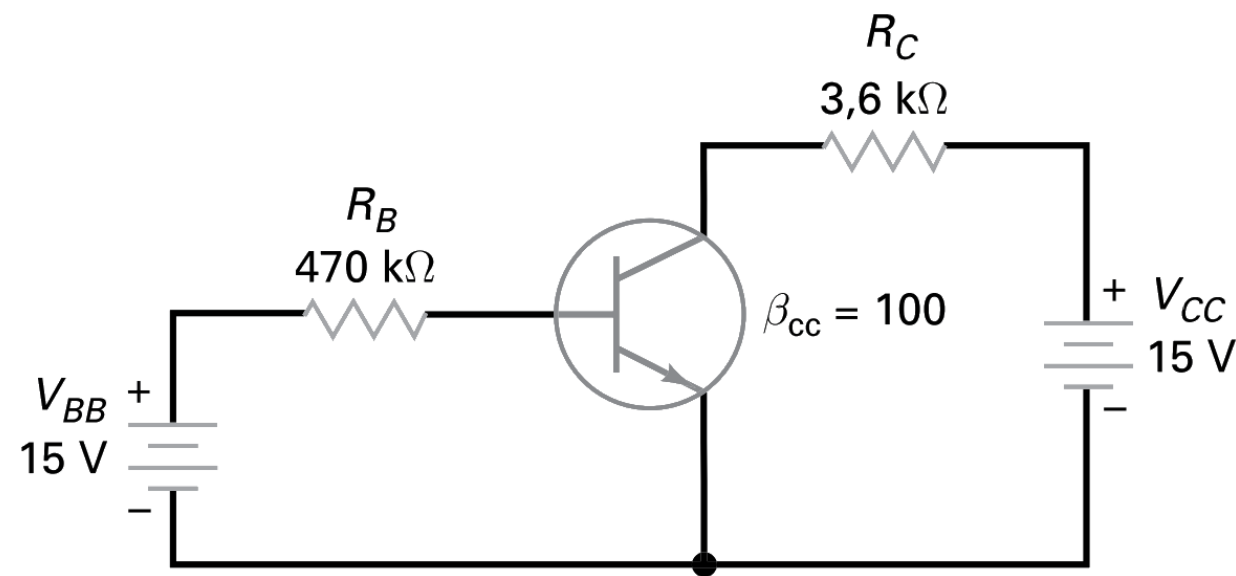
Por onde começar?

- Analisar circuito de base

- Considerando a JEB como um diodo, temos um circuito com uma fonte de 15V, uma resistência de 470k e um diodo com queda 'constante' de 0,7V
- Portanto a corrente de base pode ser calculada como  $i_B = (15 - 0,7) / 470k = 30,4\mu A$

- A seguir, análise do circuito do Coletor e do modo de operação

- $i_C = \beta i_B \rightarrow i_C = 3,04mA$  ← Supondo Reg. Ativa
  - $V_C = 15 - 3,6k * 3,04m = 4,05V$
  - $V_{BE} = 0,7 \rightarrow$  Pol. Direta
  - $V_{BC} = -3,35V \rightarrow$  Pol. Reversa
- OK!  
Confirma Reg. Ativa

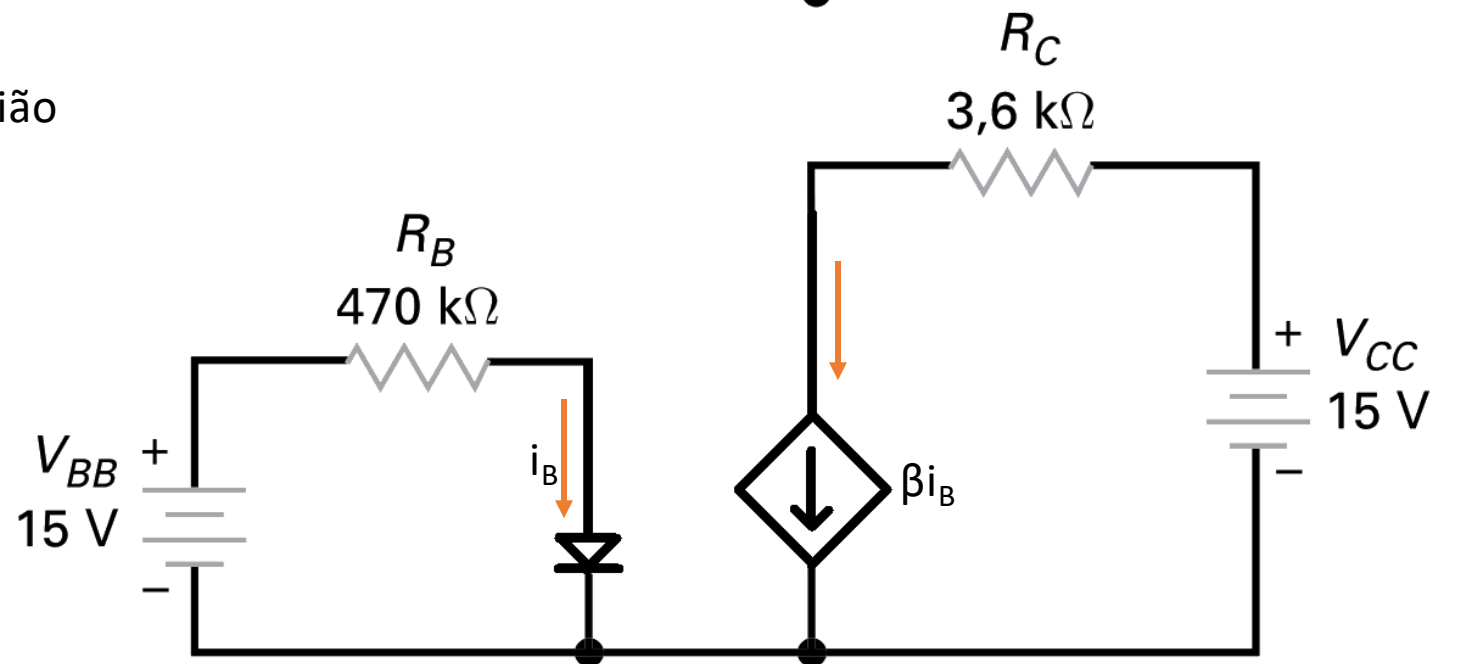
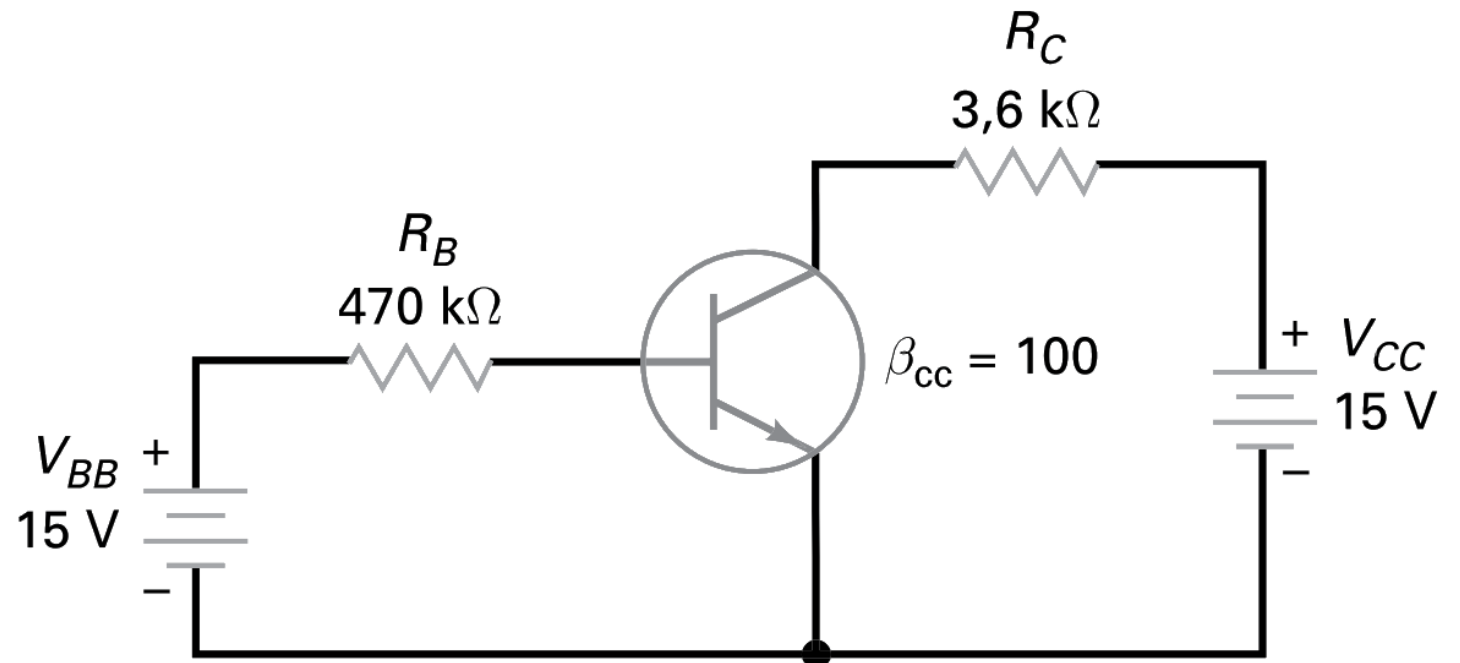




# Exemplo

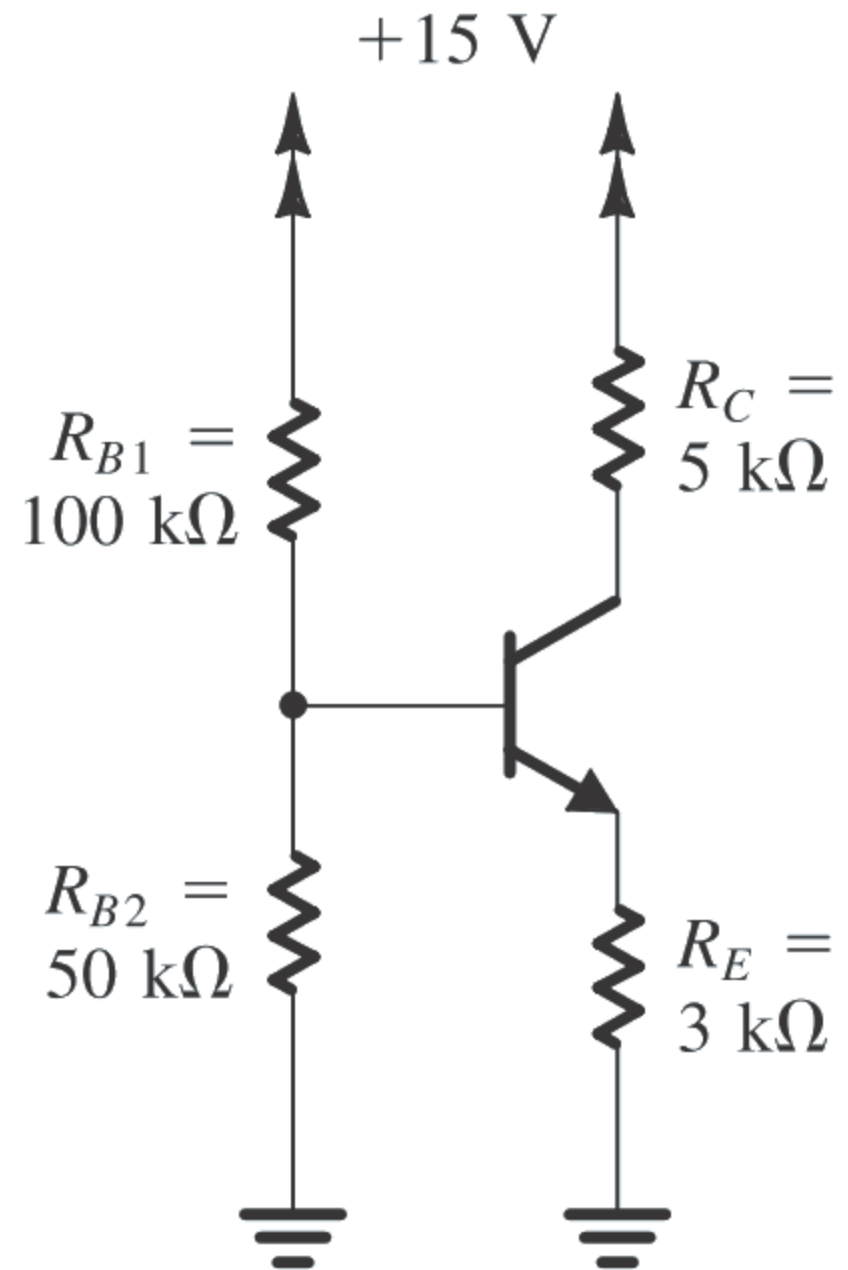
Utilizando o Modelo  $\pi$

Supondo região  
Ativa



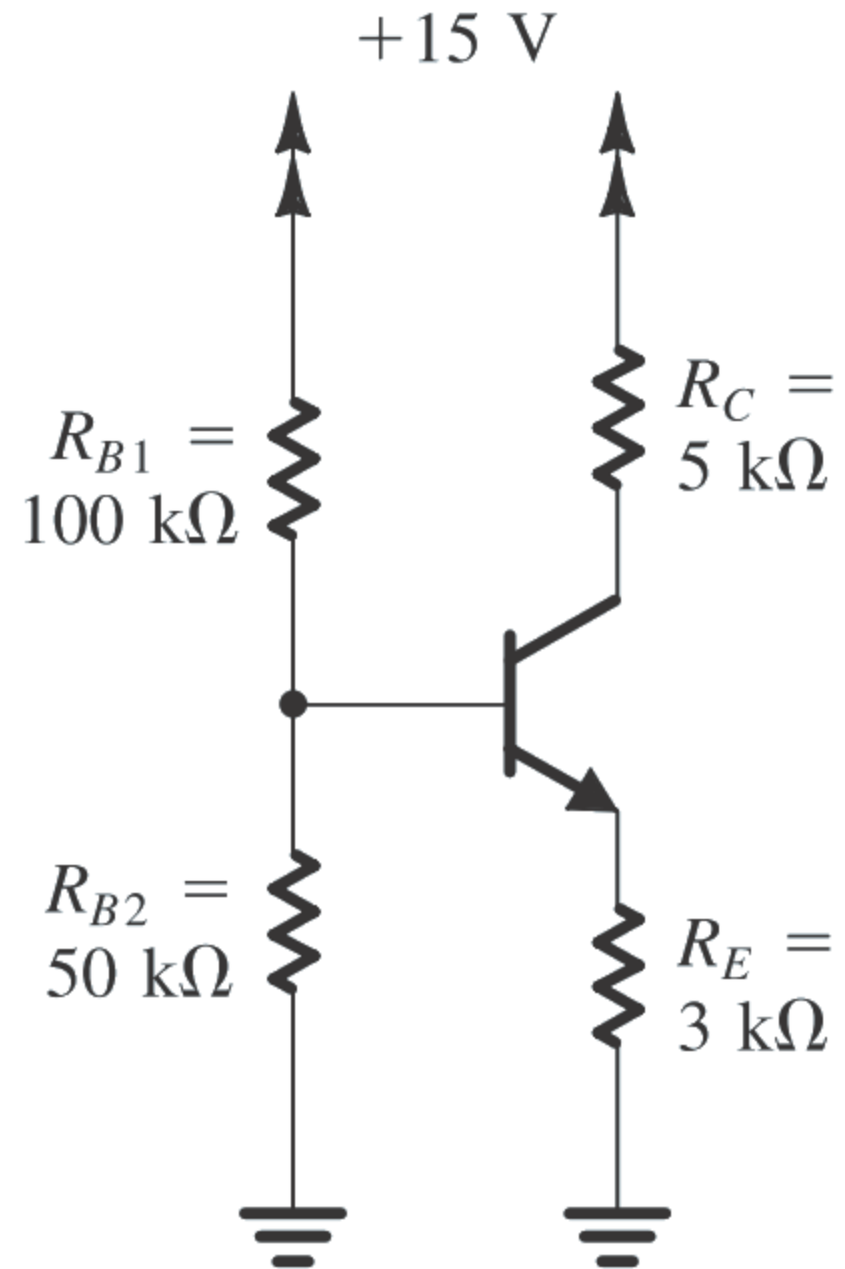
# Exemplo

- Com  $\beta=100$ , calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor



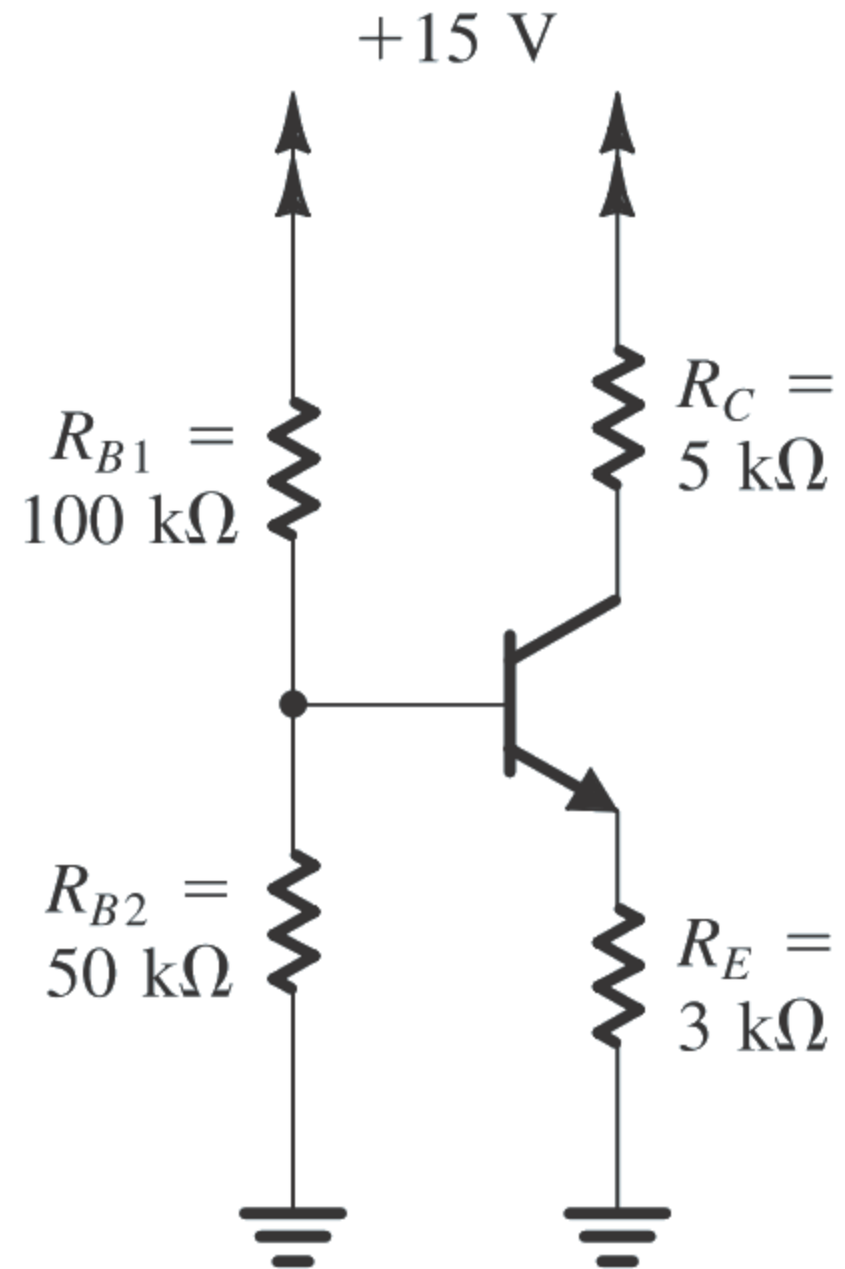
# Exemplo

- Com  $\beta=100$ , calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor
  - Neste caso, o circuito na base **parece** um divisor resistivo, porém como há uma parcela da corrente que é desviada para a base, não se trata apenas de um divisor resistivo!



# Exemplo

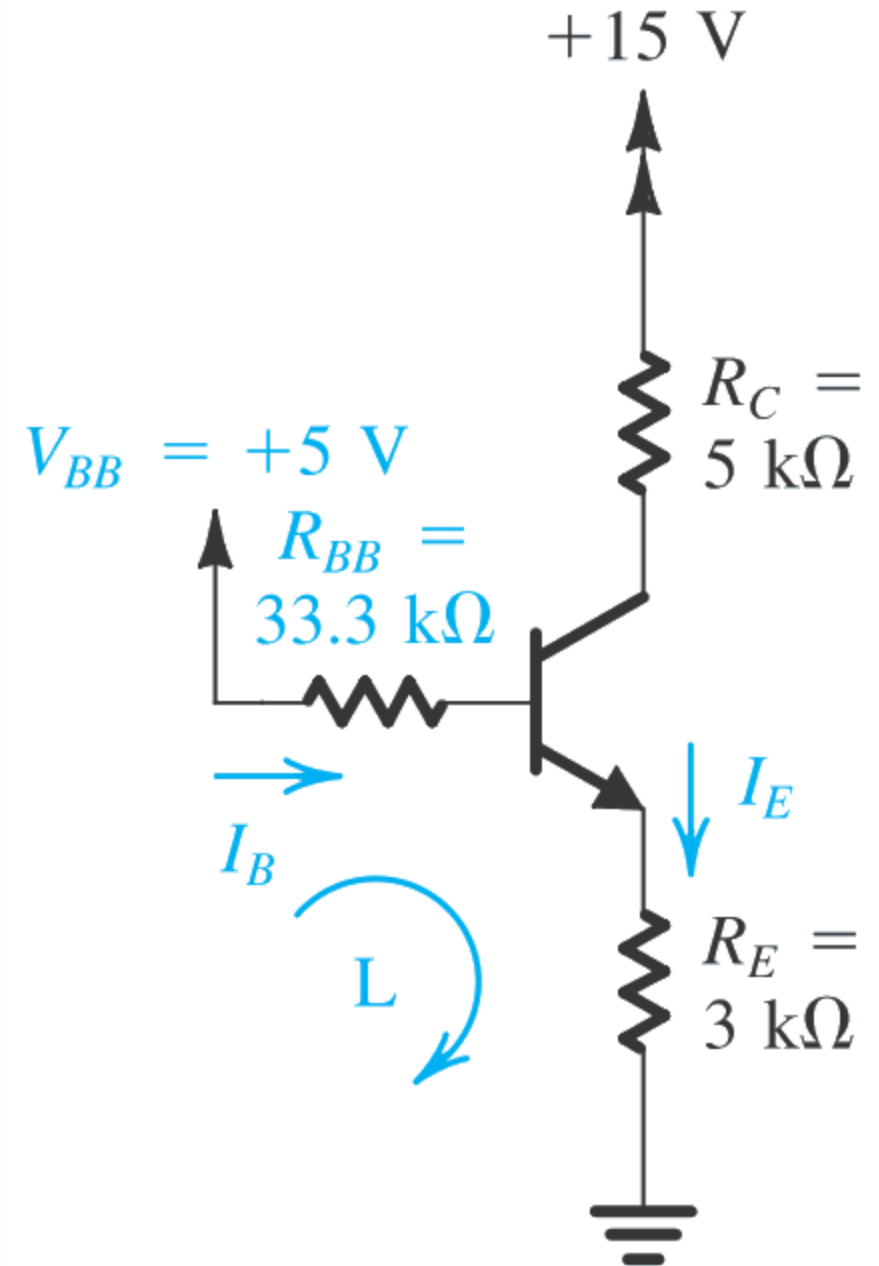
- Com  $\beta=100$ , calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor
  - Neste caso, o circuito na base **parece** um divisor resistivo, porém como há uma parcela da corrente que é desviada para a base, não se trata apenas de um divisor resistivo!
- Uma forma de resolver é aplicando o equivalente de Thévenin



# Exemplo

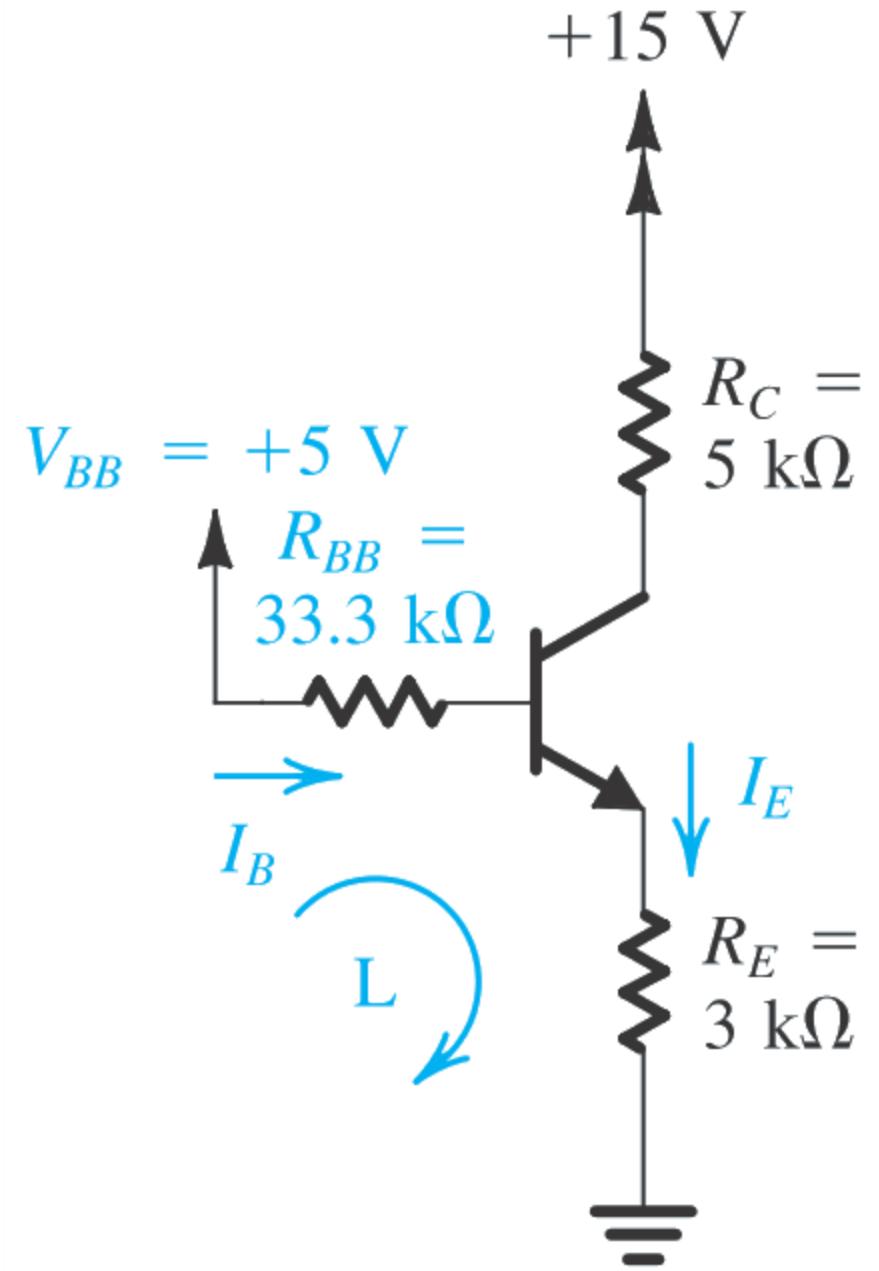
- Com  $\beta=100$ , calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor
  - Neste caso, o circuito na base **parece** um divisor resistivo, porém como há uma parcela da corrente que é desviada para a base, não se trata apenas de um divisor resistivo!
  - Uma forma de resolver é aplicando o equivalente de Thévenin
  - $V_{BB} = 15 * \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$

$$R_{BB} = R_{B2} // R_{B2}$$



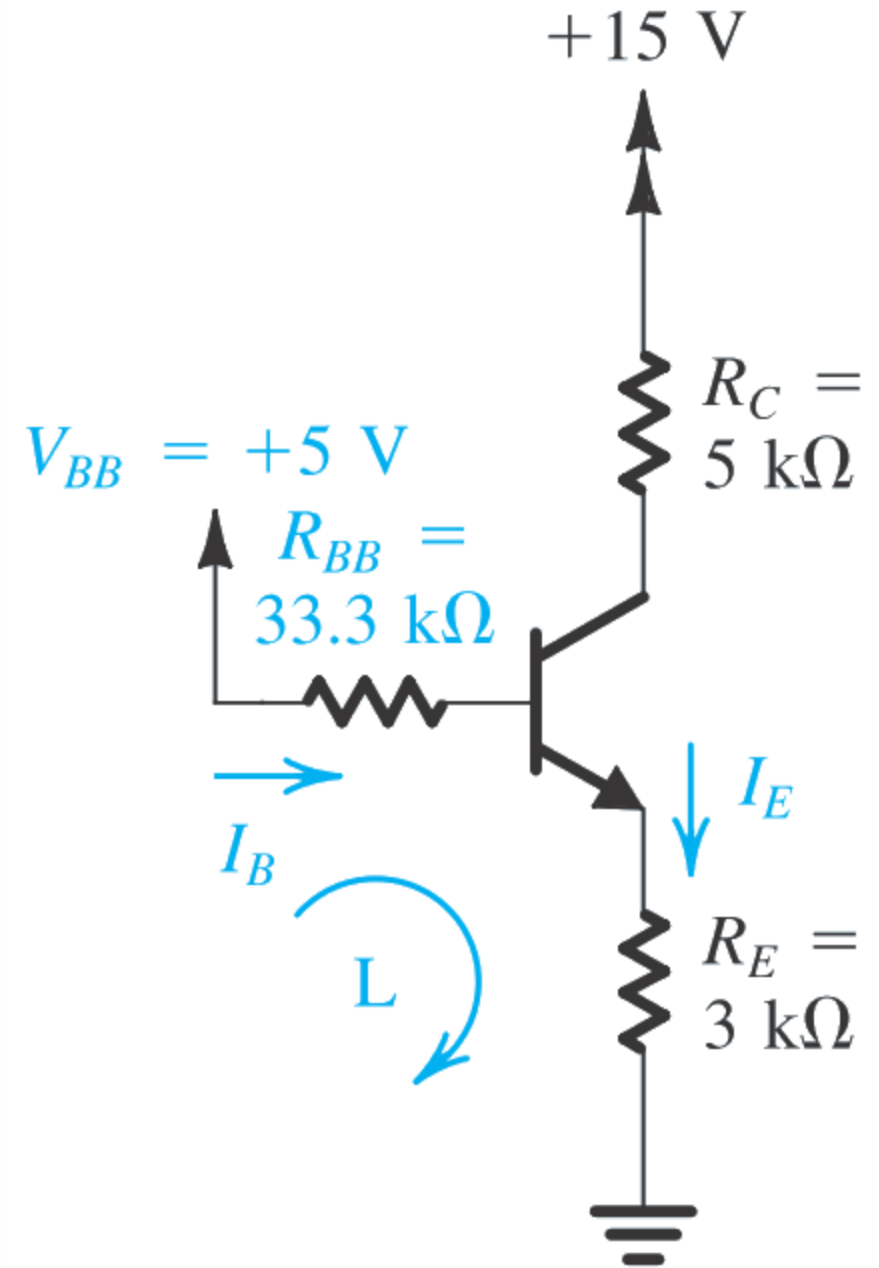
# Exemplo

- Com o circuito equivalente, podemos traçar o circuito base-emissor



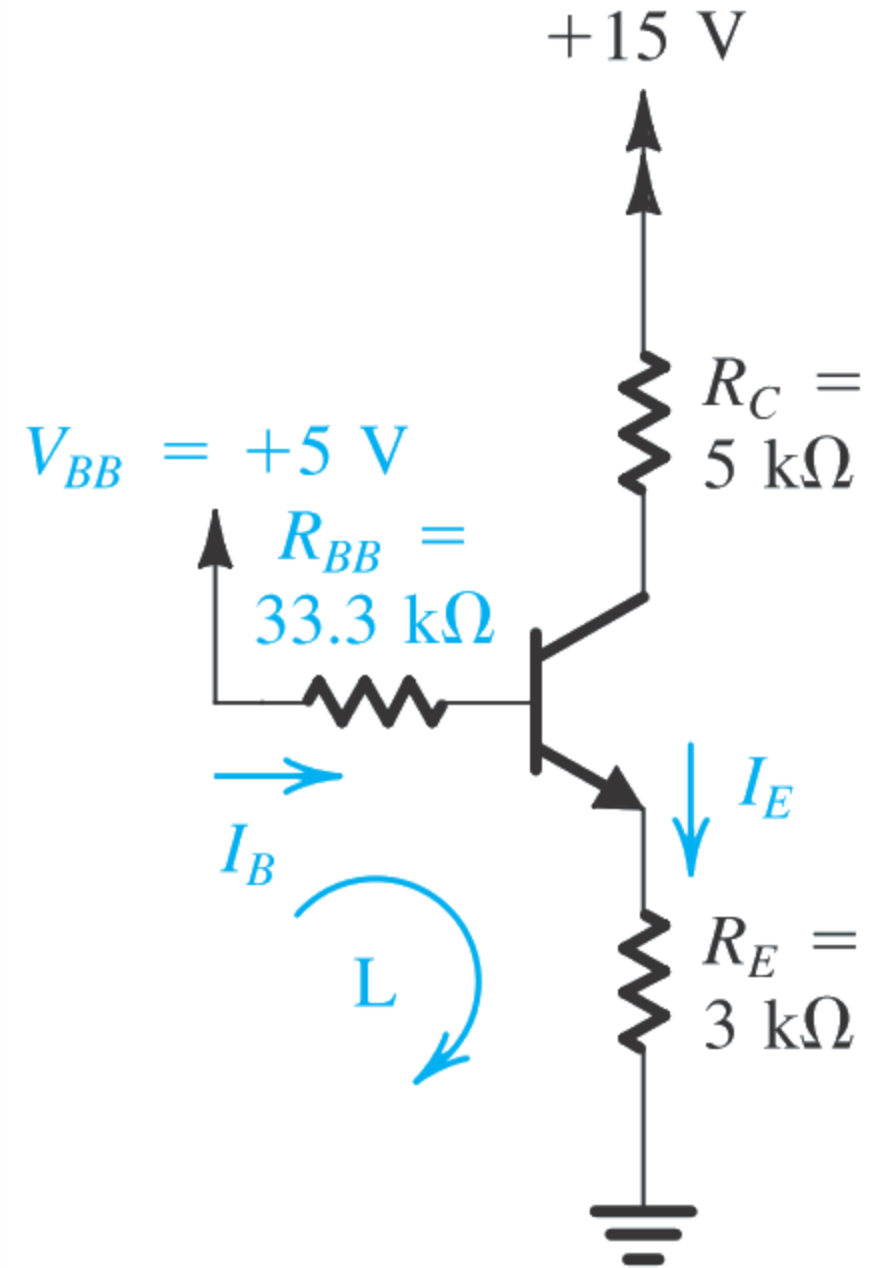
# Exemplo

- Com o circuito equivalente, podemos traçar o circuito base-emissor
- Repare que supondo região ativa, a corrente de Emissor é uma função da corrente de base, o circuito parece complicado mas podemos equacionar passo a passo



# Exemplo

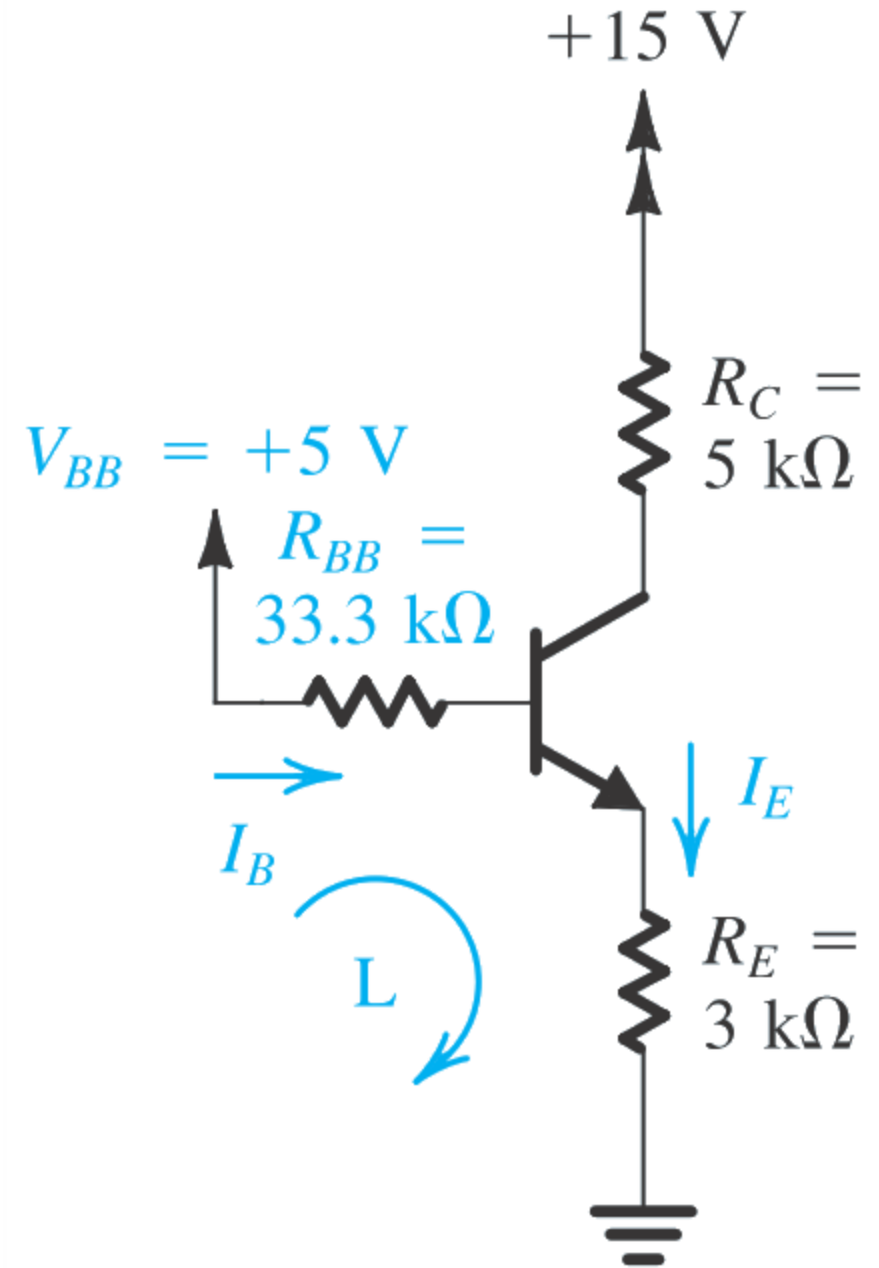
- Com o circuito equivalente, podemos traçar o circuito base-emissor
- Repare que supondo região ativa, a corrente de Emissor é uma função da corrente de base, o circuito parece complicado mas podemos equacionar passo a passo
- Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E * I_E$





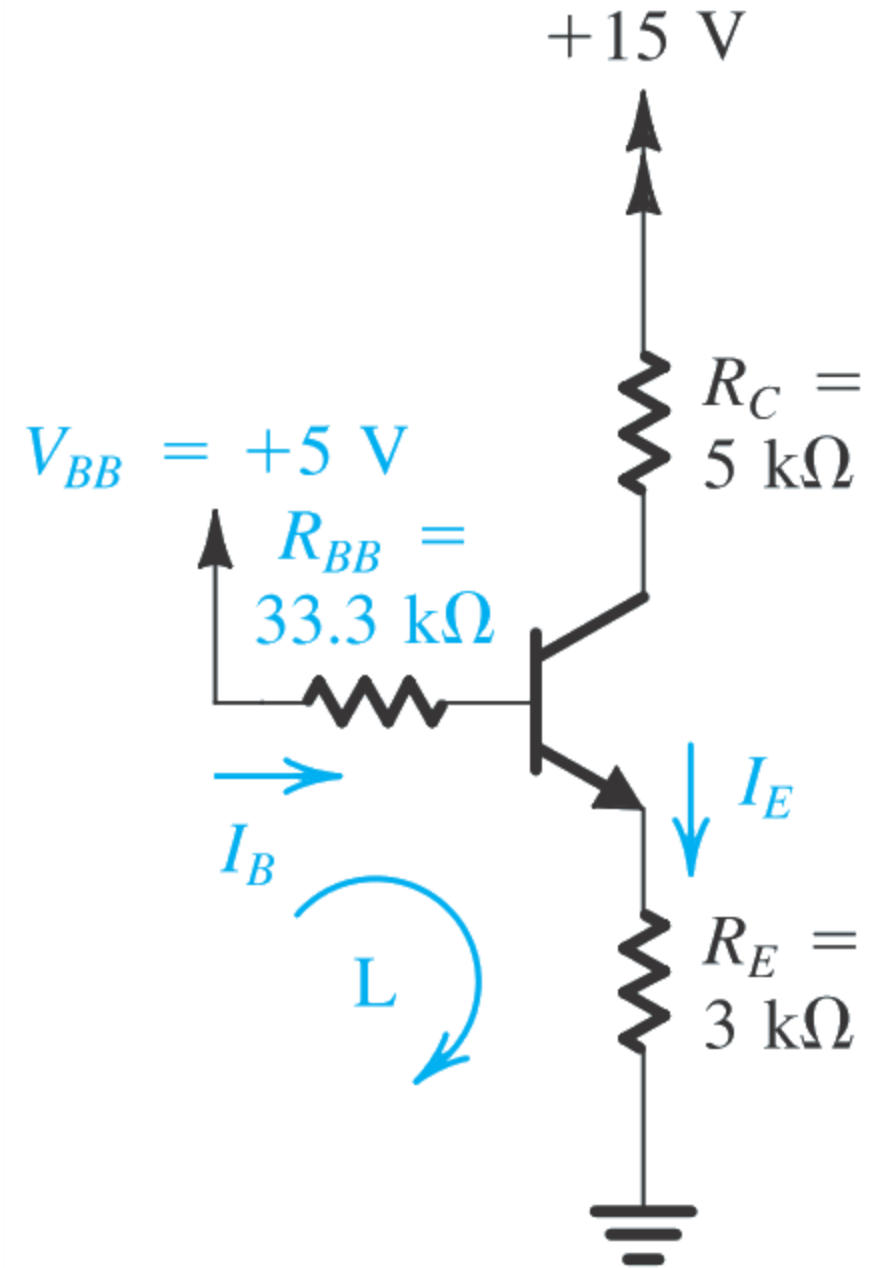
# Exemplo

- Com o circuito equivalente, podemos traçar o circuito base-emissor
- Repare que supondo região ativa, a corrente de Emissor é uma função da corrente de base, o circuito parece complicado mas podemos equacionar passo a passo
- Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E \cdot i_E$
- Corrente no Emissor  $\rightarrow i_E = (\beta + 1)i_B$



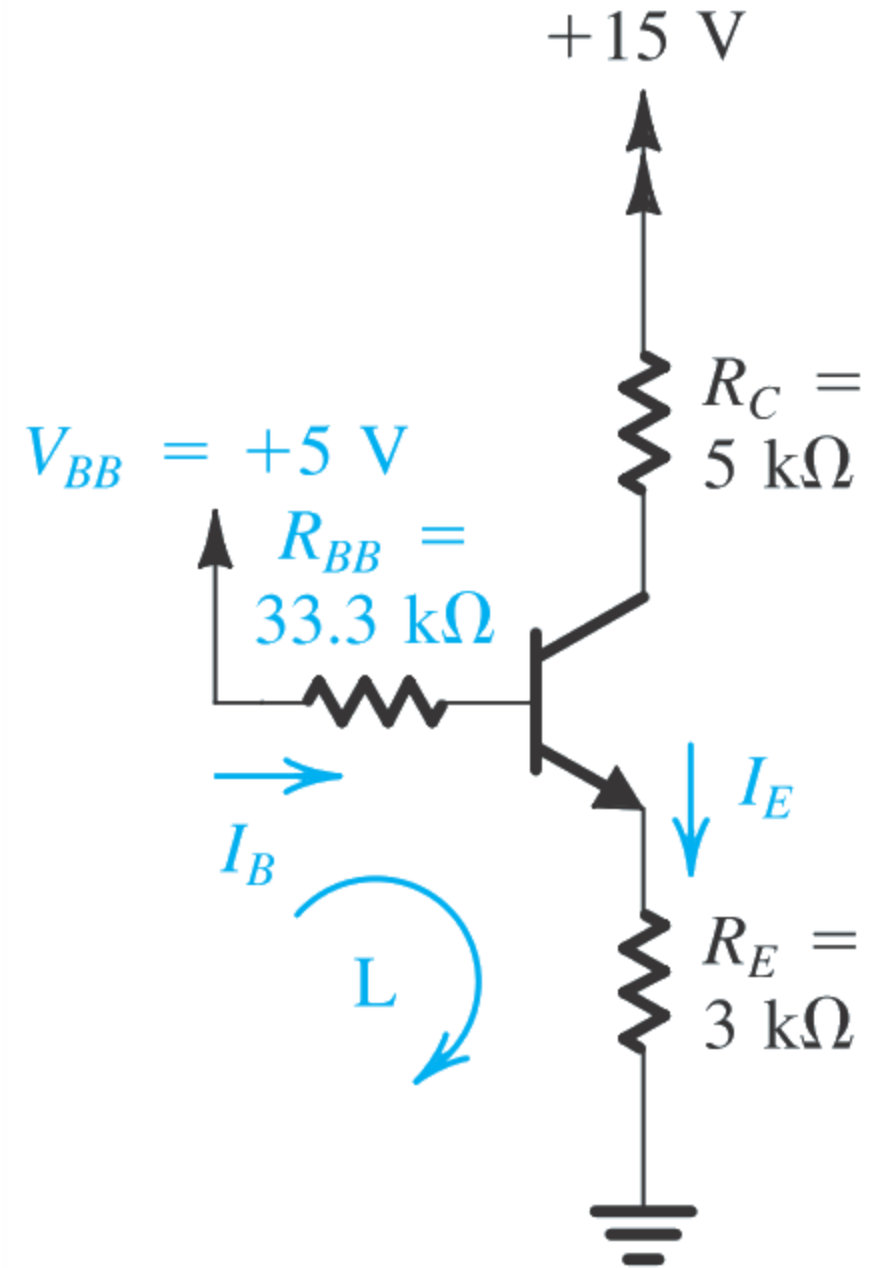
# Exemplo

- Com o circuito equivalente, podemos traçar o circuito base-emissor
- Repare que supondo região ativa, a corrente de Emissor é uma função da corrente de base, o circuito parece complicado mas podemos equacionar passo a passo
- Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E \cdot i_E$
- Corrente no Emissor  $\rightarrow i_E = (\beta + 1)i_B$
- Tensão na base  $\rightarrow V_B = V_E + V_{BE}$



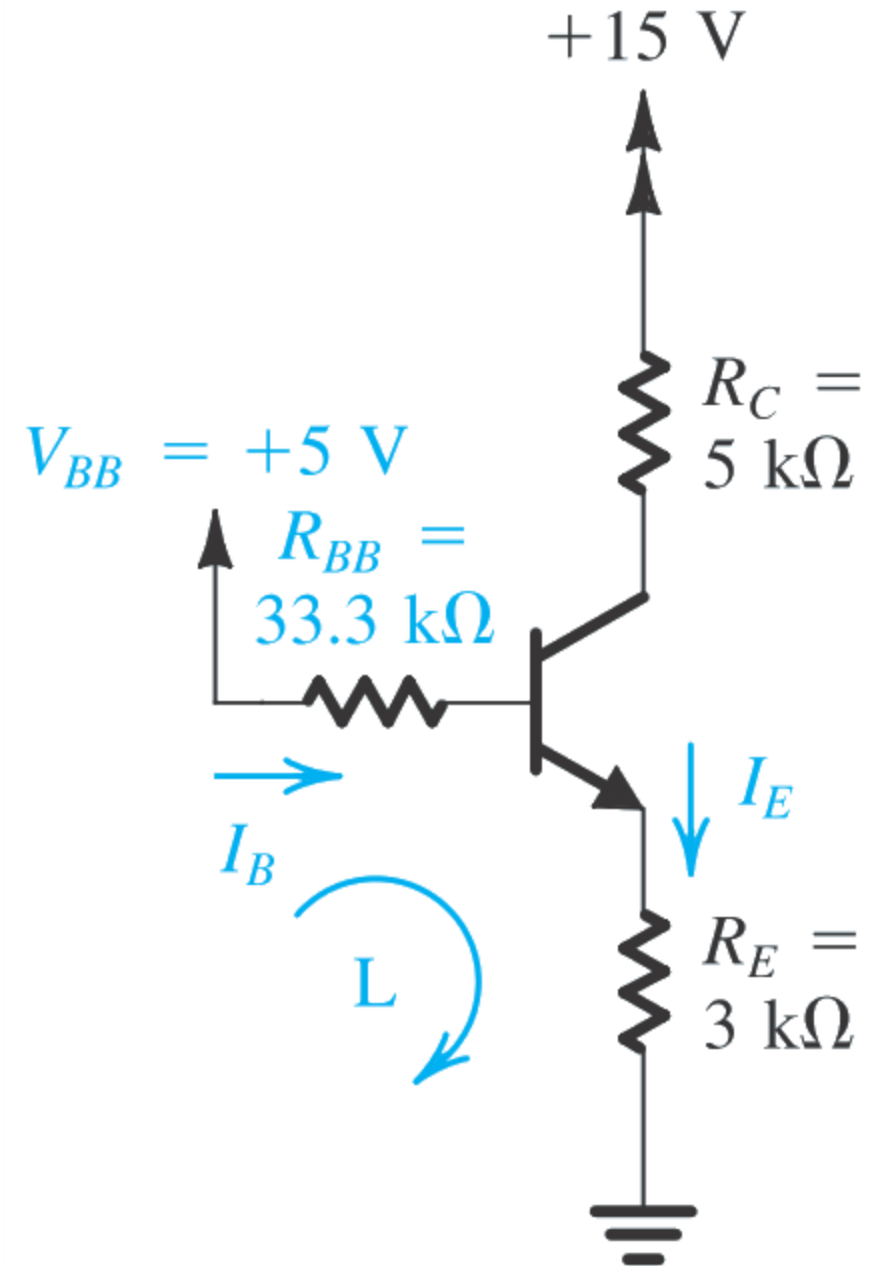
# Exemplo

- Com o circuito equivalente, podemos traçar o circuito base-emissor
- Repare que supondo região ativa, a corrente de Emissor é uma função da corrente de base, o circuito parece complicado mas podemos equacionar passo a passo
- Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E \cdot i_E$
- Corrente no Emissor  $\rightarrow i_E = (\beta + 1)i_B$
- Tensão na base  $\rightarrow V_B = V_E + V_{BE}$
- Assim conseguimos calcular essa corrente de base  $\rightarrow i_B = (5V - V_B) / R_{BB}$



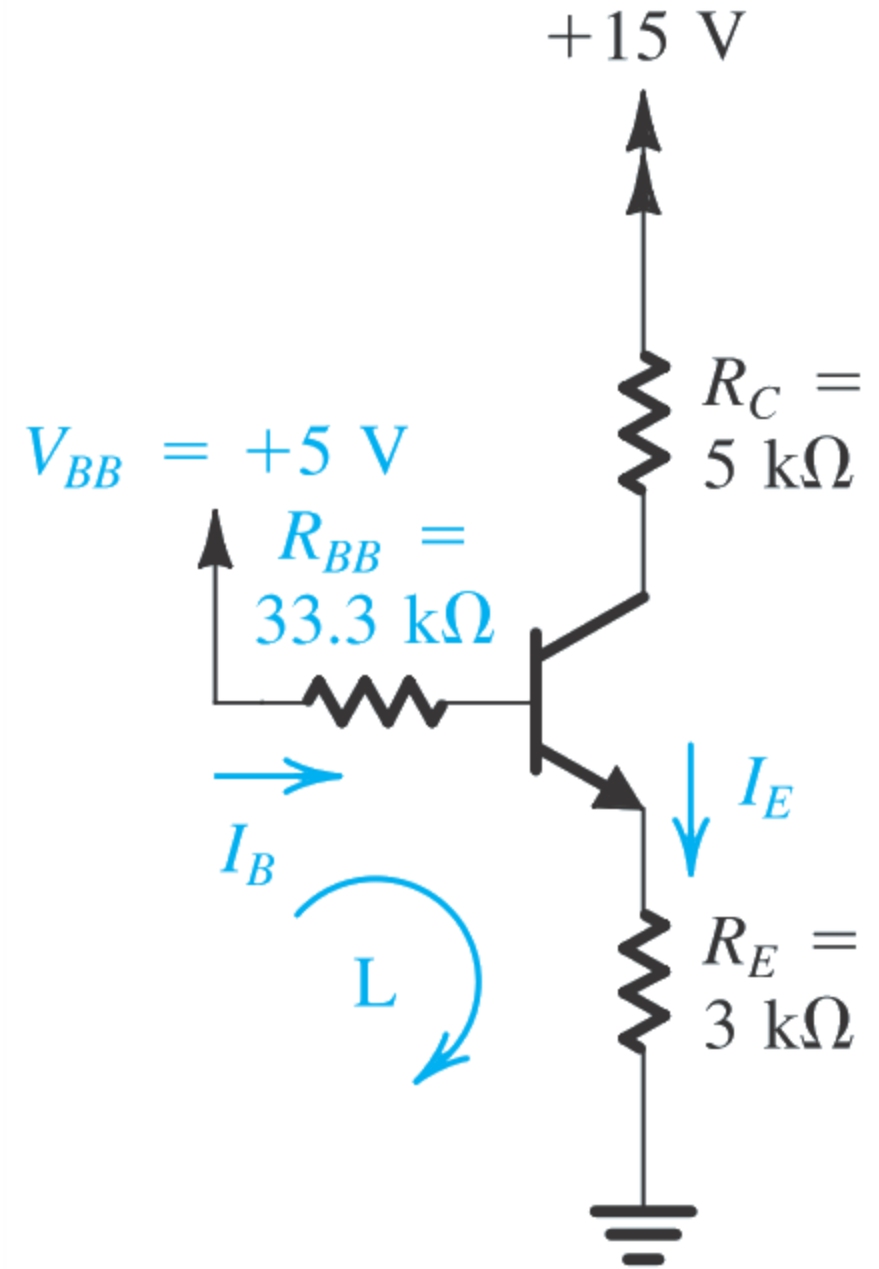
# Exemplo

- Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E \cdot i_E$
- Corrente no Emissor  $\rightarrow i_E = (\beta + 1)i_B$
- Tensão na base  $\rightarrow V_B = V_E + V_{BE}$
- Assim conseguimos calcular essa corrente de base  $\rightarrow i_B = (5V - V_B) / R_{BB}$
- $i_B = (5V - (V_E + V_{BE})) / R_{BB}$
- $i_B = (5V - (R_E \cdot i_E + V_{BE})) / R_{BB}$
- $i_B = (5V - (R_E \cdot (\beta + 1)i_B + V_{BE})) / R_{BB}$
- $i_B = 12,8\mu A$



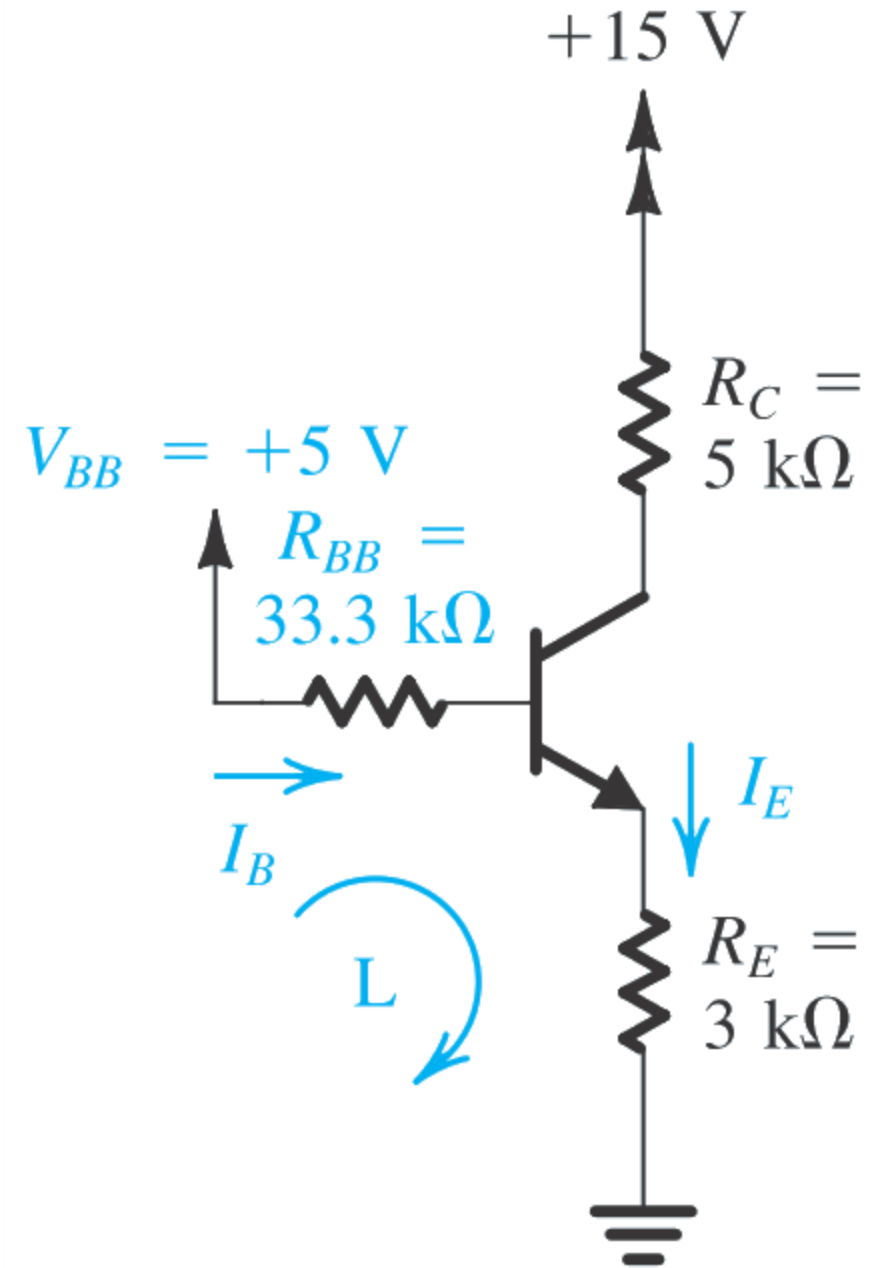
# Exemplo

- Assim conseguimos calcular essa corrente de base  $\rightarrow i_B = 12,8\mu\text{A}$
- Corrente no Emissor  $\rightarrow i_E = (\beta+1)i_B = 1,29\text{mA}$
- Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E * i_E = 3,87\text{V}$
- Tensão na base  $\rightarrow V_B = V_E + V_{BE} = 4,57\text{V}$



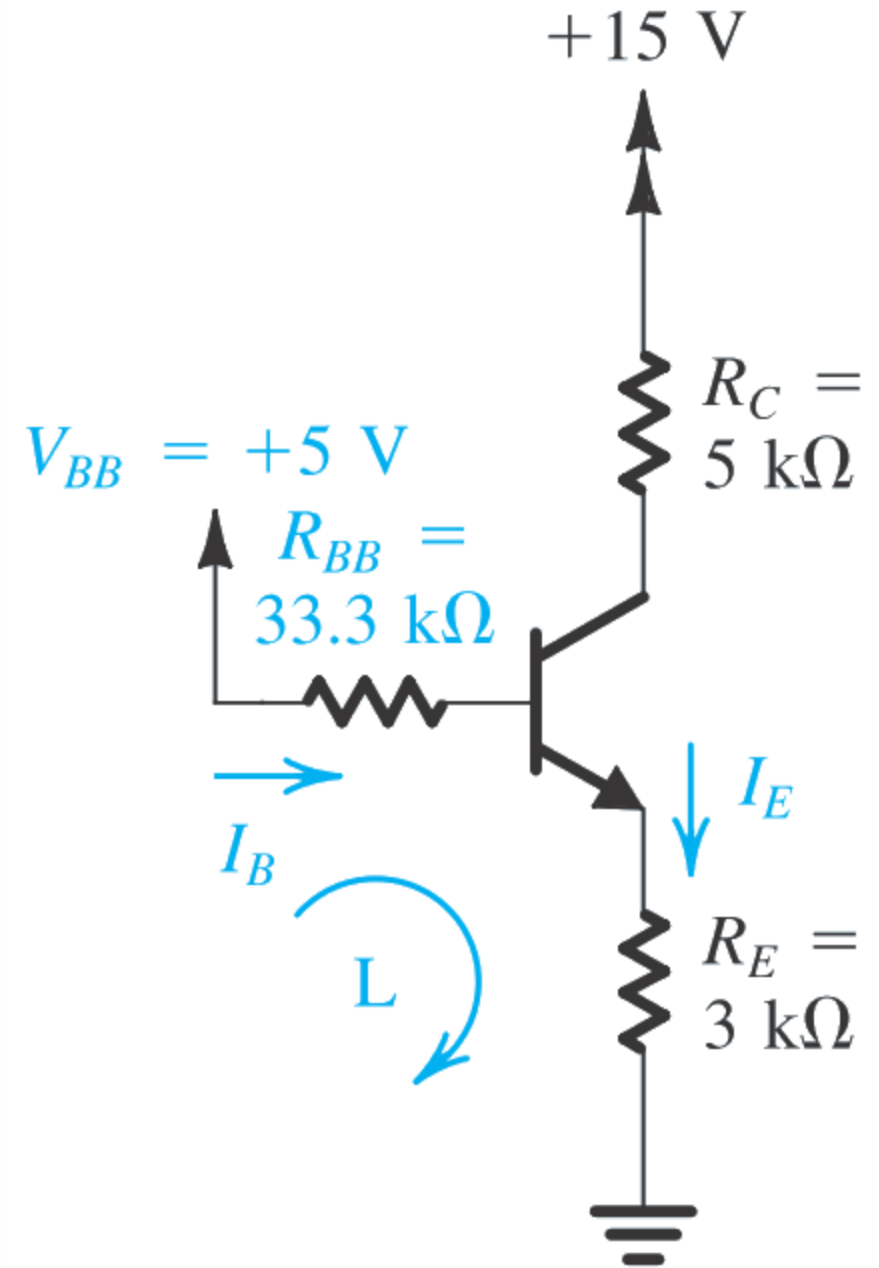
# Exemplo

- Assim conseguimos calcular essa corrente de base  $\rightarrow i_B = 12,8\mu\text{A}$
- Corrente no Emissor  $\rightarrow i_E = (\beta+1)i_B = 1,29\text{mA}$
- Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E * i_E = 3,87\text{V}$
- Tensão na base  $\rightarrow V_B = V_E + V_{BE} = 4,57\text{V}$
- Na sequencia, corrente e tensão no coletor:
- $i_C = \beta i_B = 1,28\text{mA}$
- $V_C = 15 - R_C * i_C = 8,6\text{V}$



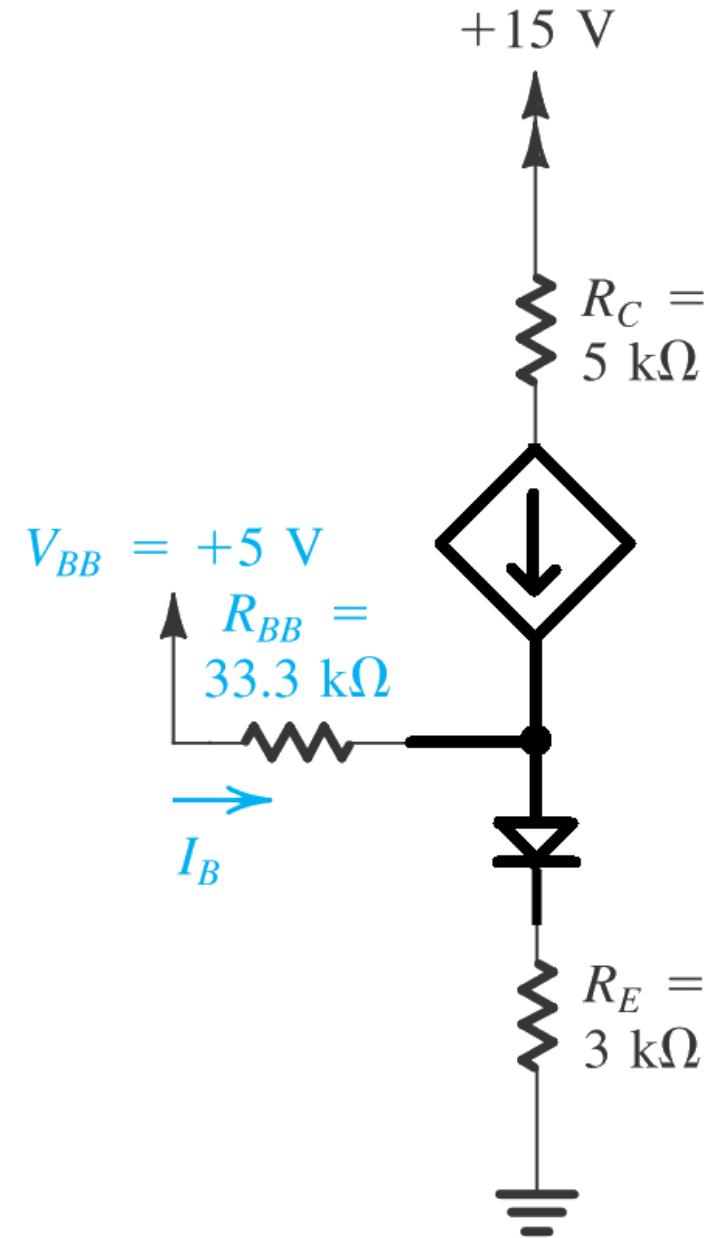
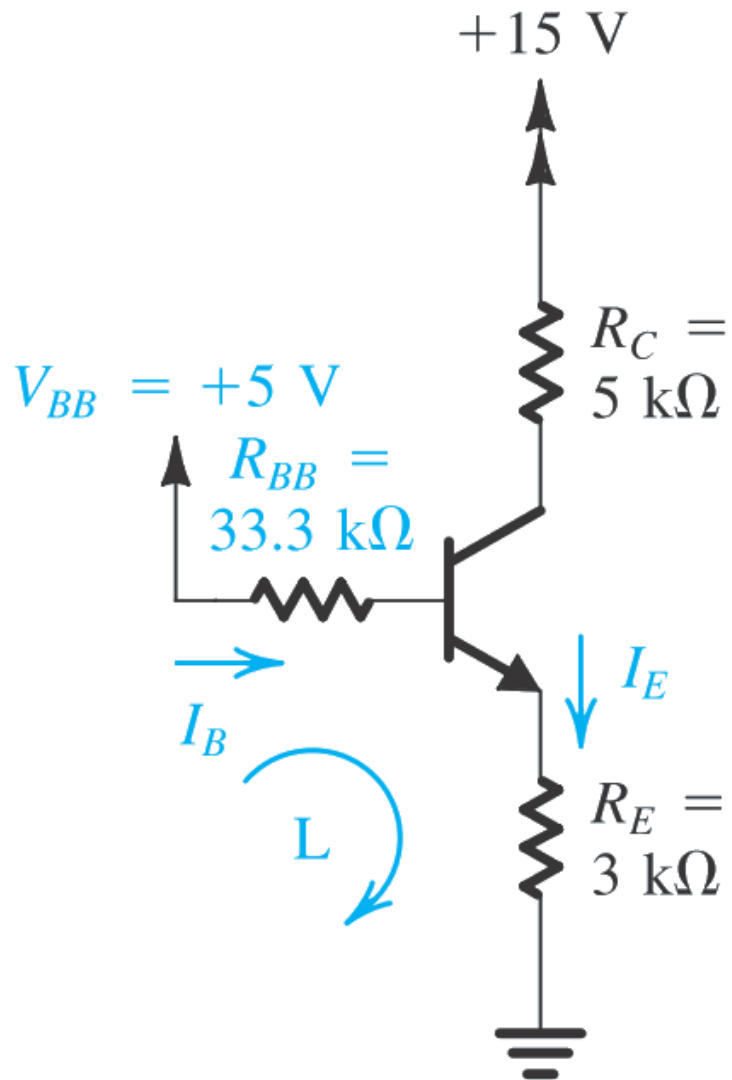
# Exemplo

- Assim conseguimos calcular essa corrente de base  $\rightarrow i_B = 12,8\mu\text{A}$
- Corrente no Emissor  $\rightarrow i_E = (\beta+1)i_B = 1,29\text{mA}$
- Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E * i_E = 3,87\text{V}$
- Tensão na base  $\rightarrow V_B = V_E + V_{BE} = 4,57\text{V}$
- $i_C = \beta i_B = 1,28\text{mA}$
- $V_C = 15 - R_C * i_C = 8,6\text{V}$
- Então verificamos a região de operação:
- $JEB = 0,7\text{V}$  (direto)  $JCB = -4\text{V}$  (Reverso)



# Exemplo

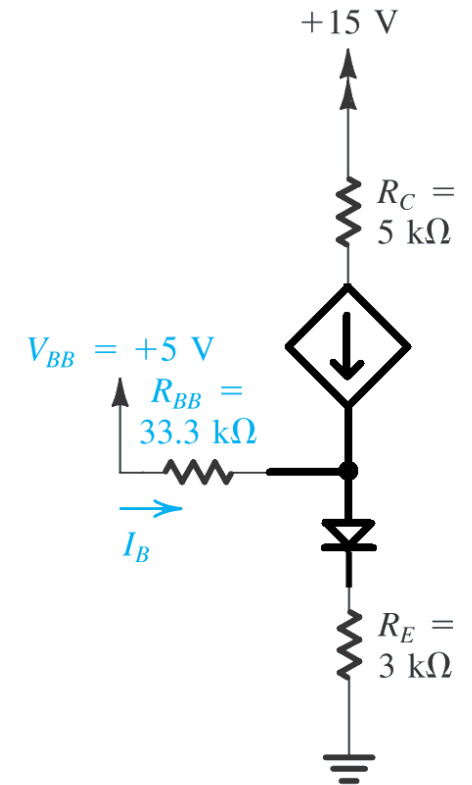
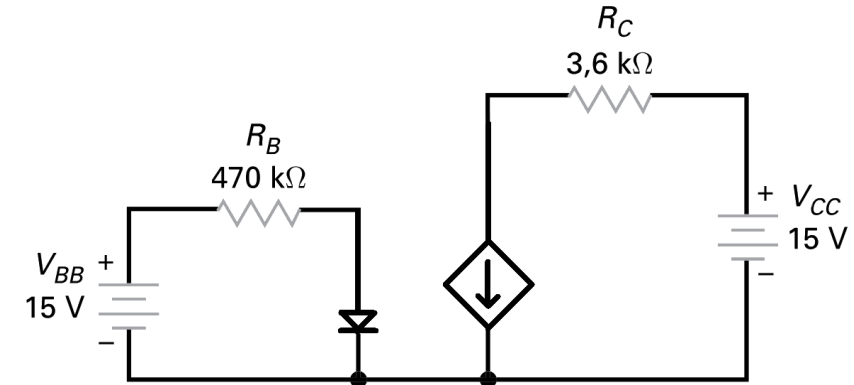
- Aplicando o modelo T





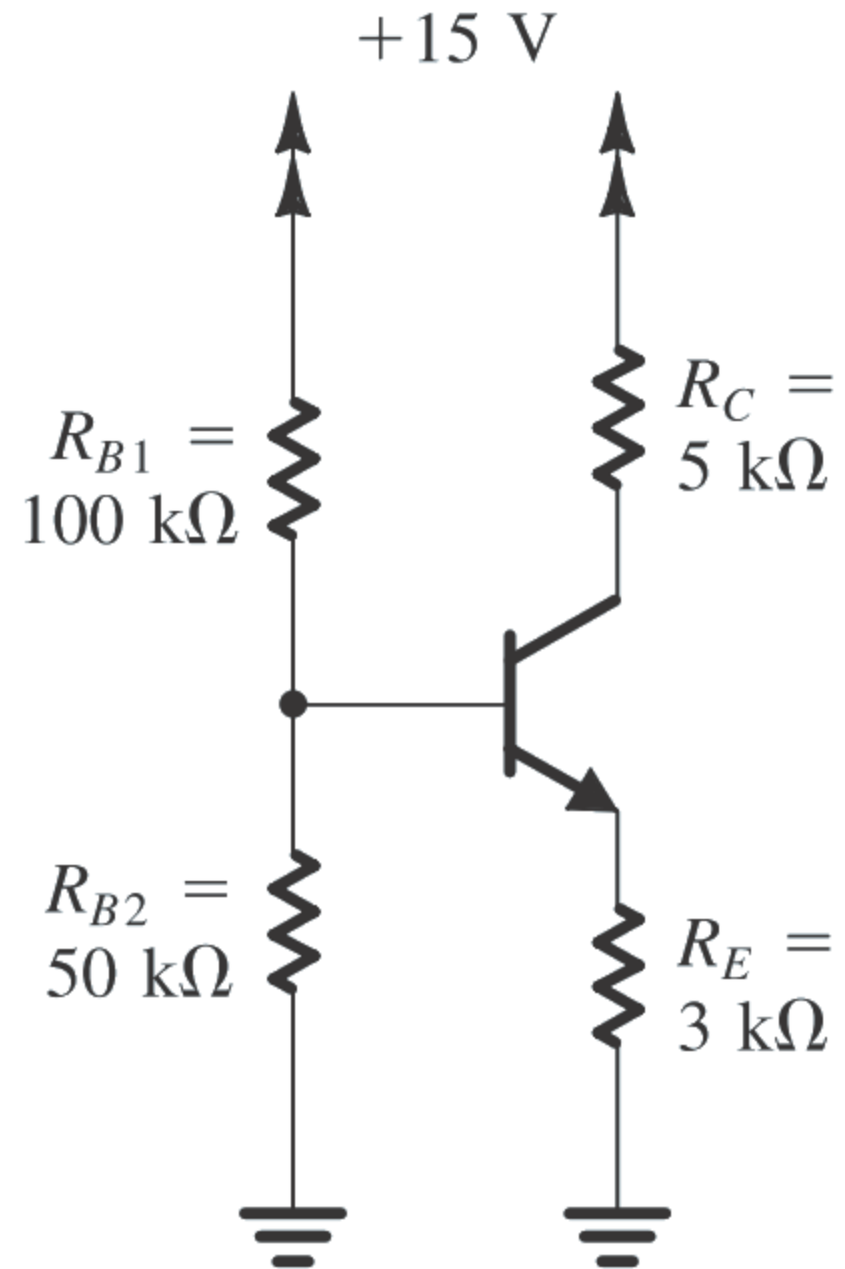
# Aplicação dos modelos

- De maneira geral:
- o modelo pi é mais recomendado quando o terminal de emissor é ligado diretamente ao ponto comum (GND)
- Caso existam componentes do circuito ligados ao terminal de emissor o modelo T será mais fácil para a análise



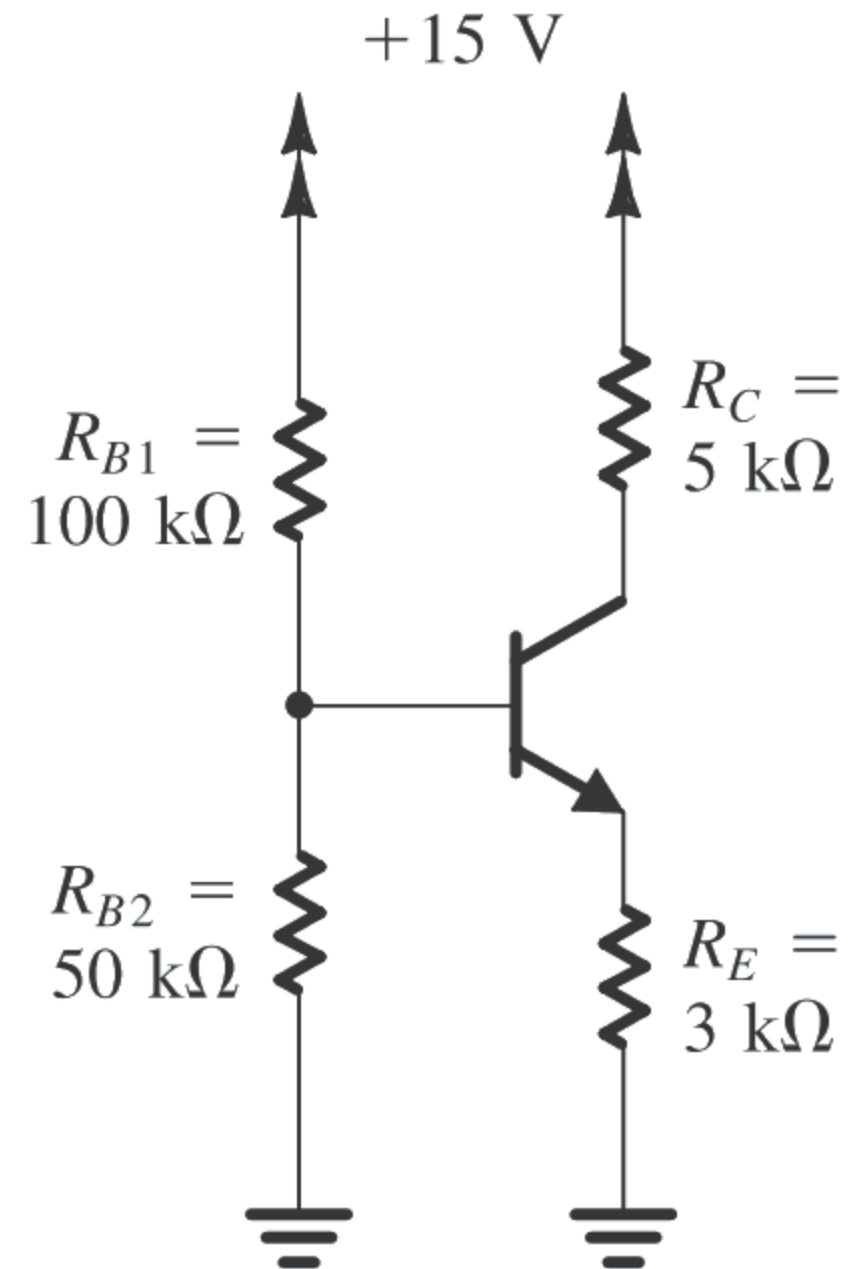
# Exercício

- Com  $\beta=50$ , calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor, calcule a variação em  $i_C$  em relação ao caso com  $\beta=100$  ( $i_C=1,28\text{mA}$ )
- Relembrando:
  - Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E \cdot i_E$
  - Corrente no Emissor  $\rightarrow i_E = (\beta+1)i_B$
  - Tensão na base  $\rightarrow V_B = V_E + V_{BE}$
  - Assim conseguimos calcular essa corrente de base  $\rightarrow i_B = (5V - V_B)/R_{BB}$



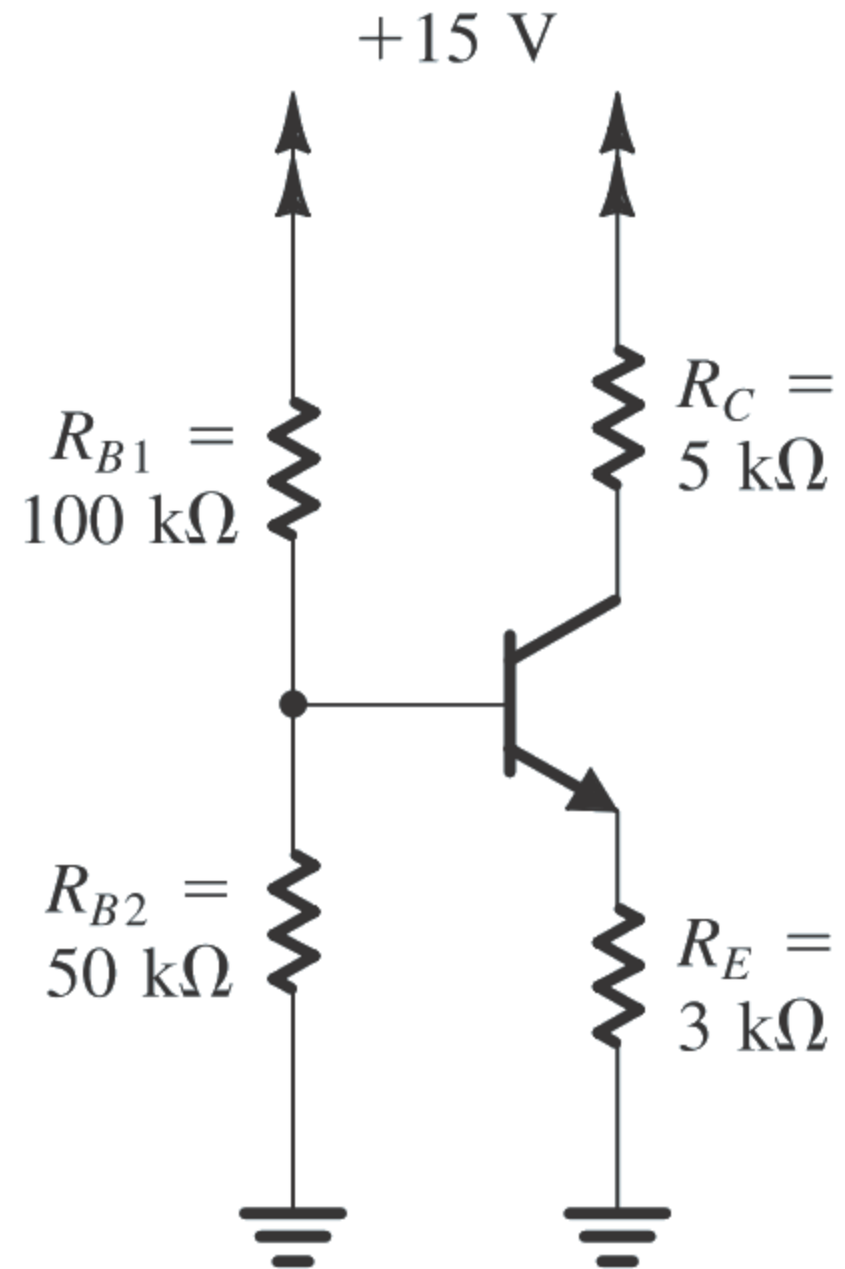
# Exercício

- Com  $\beta=50$ , calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor, calcule a variação em  $i_C$  em relação ao caso com  $\beta=100$  ( $i_C=1,28\text{mA}$ )
- Relembrando:
  - Tensão no Emissor  $\rightarrow V_E = R_E \cdot i_E$
  - Corrente no Emissor  $\rightarrow i_E = (\beta+1)i_B$
  - Tensão na base  $\rightarrow V_B = V_E + V_{BE}$
  - Assim conseguimos calcular essa corrente de base  $\rightarrow i_B = (5V - V_B)/R_{BB}$
- $i_C = 1,15\text{mA}$ , variação de 10%



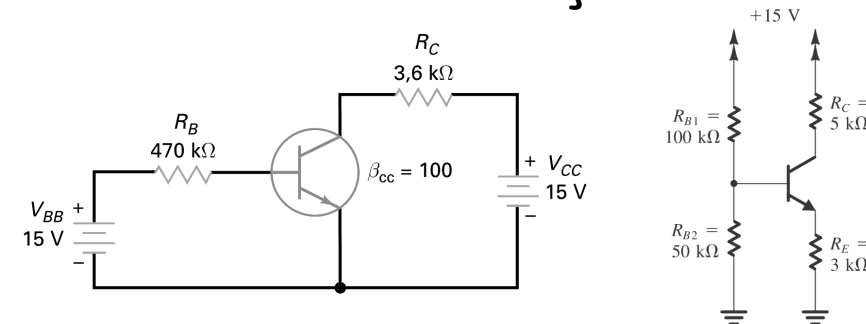
# Exercício

- $i_C = 1,15\text{mA}$ , variação de 10%
- Este exercício nos mostra um problema em circuitos com BJT, como o  $\beta$  varia muito entre transistores, a saída varia muito caso seja necessário substituir o componente no circuito, portanto os circuitos devem ser projetados para não serem muito afetados pelas variações de  $\beta$ .



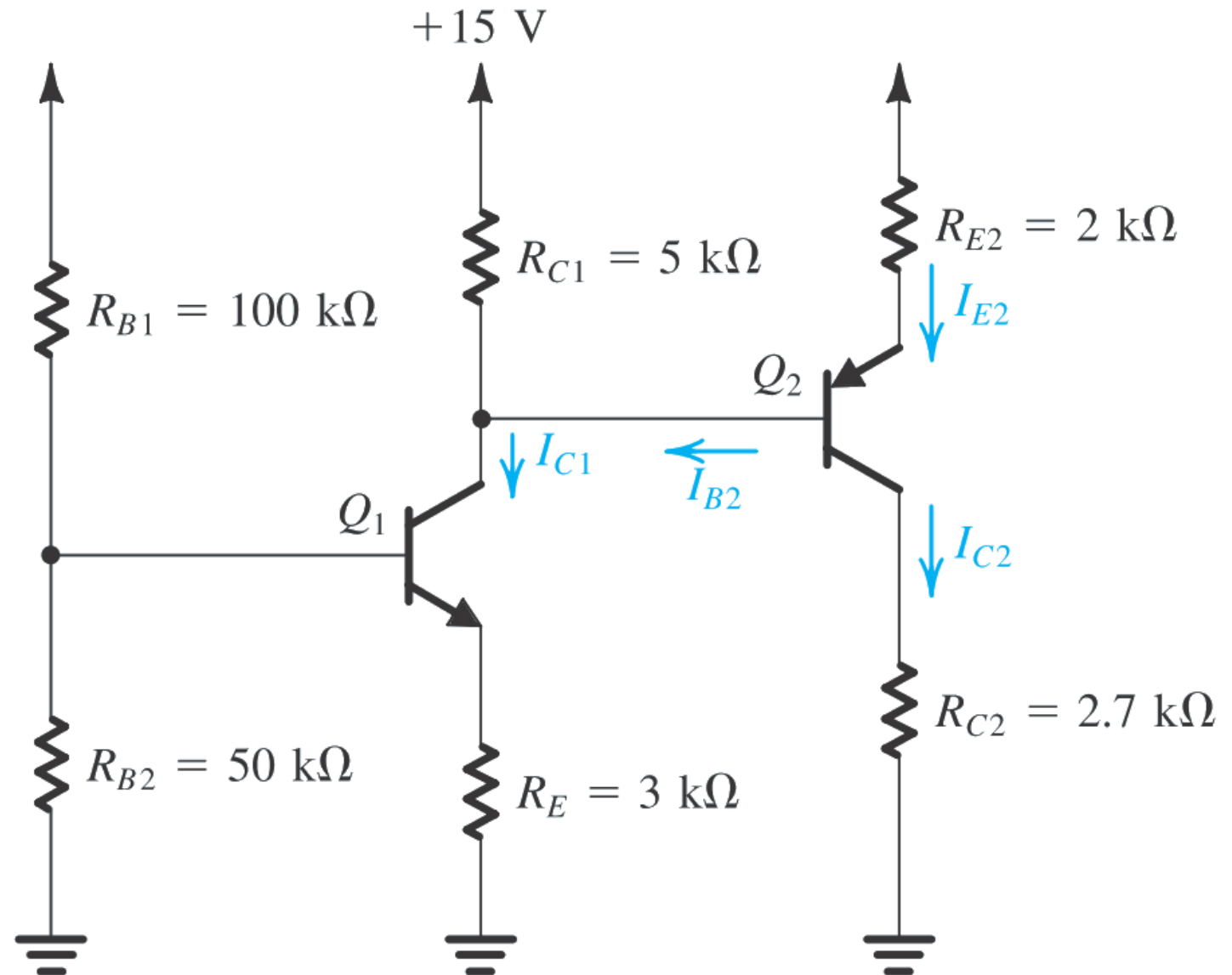
# Circuitos de polarização

- São os circuitos que configuram o ponto de operação do transistor, de forma a amenizar os efeitos das diferenças entre transistores em circuitos amplificadores
- Objetivo: Estabelecer uma corrente CC constante no coletor do TBJ, calculável, previsível e insensível a variações em  $\beta$ 
  - Permitir a máxima excursão de sinal de saída (Eletrônica B)
- **Exercício:** calcule a variação da corrente de coletor no primeiro exemplo desta aula para variações de  $\pm 20\%$  em  $\beta$ , compare a esta mesma variação no circuito do segundo exemplo
- Veremos este assunto a fundo em Eletrônica B



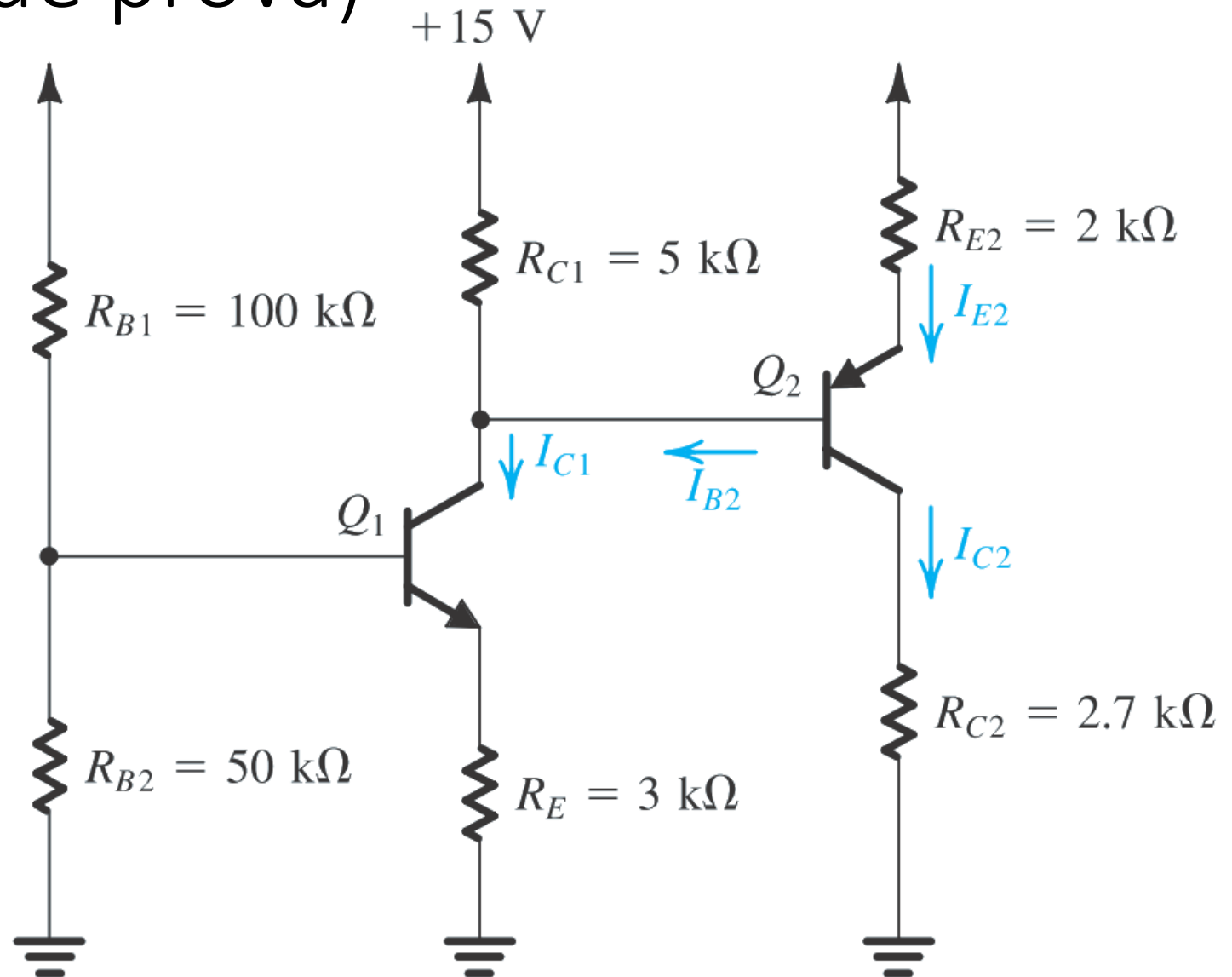
# Exercício clássico de prova

- $\beta=100$  para  $Q_1$  e  $Q_2$
- Calcule tensão e corrente no coletor de  $Q_2$



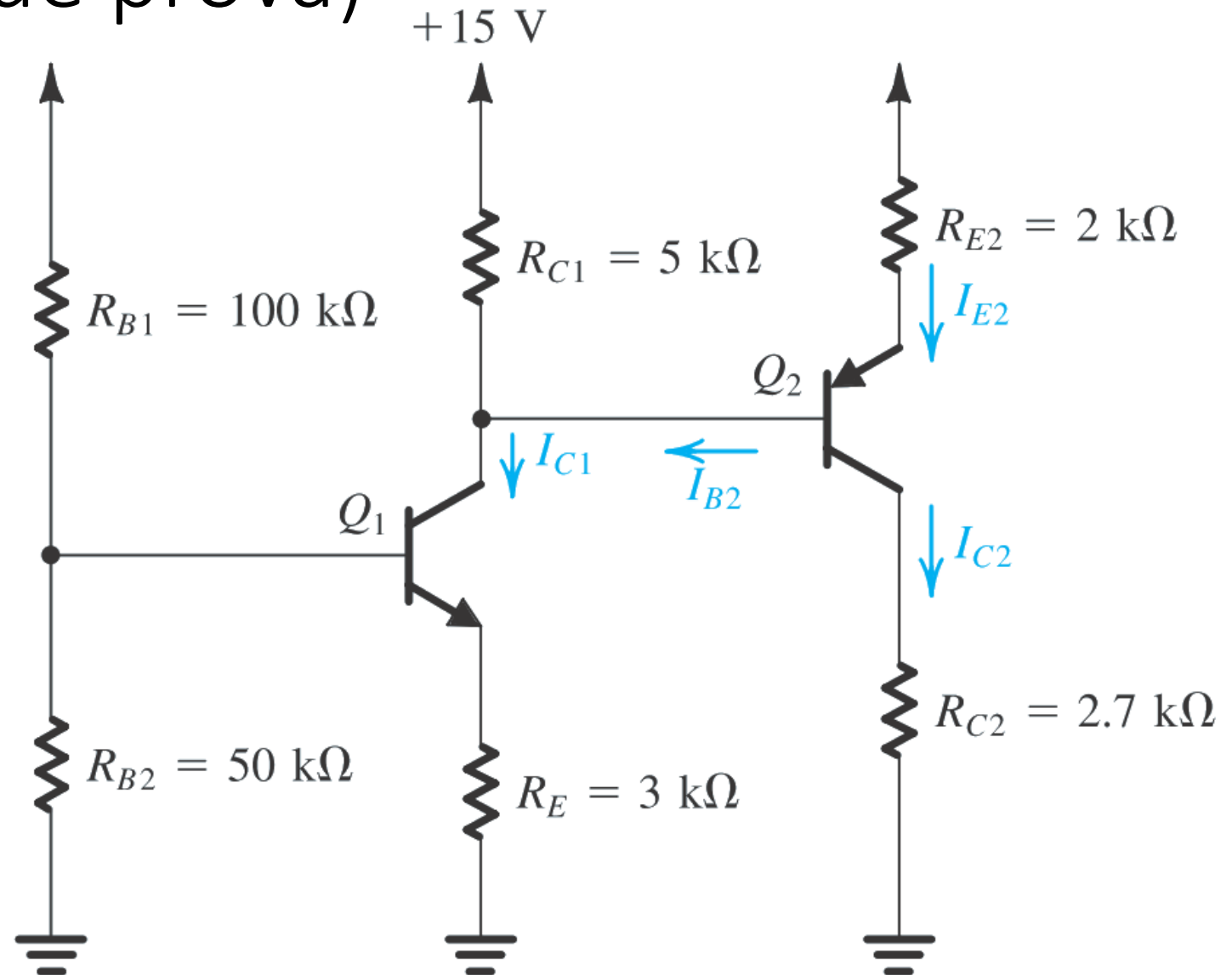
# Exercício (clássico de prova)

- $\beta=100$  para  $Q_1$  e  $Q_2$
- Calcule tensão e corrente no coletor de  $Q_2$
- Repare que o circuito de  $Q_1$  já resolvemos, basta avaliar o que muda com mais  $Q_2$  no circuito



# Exercício (clássico de prova)

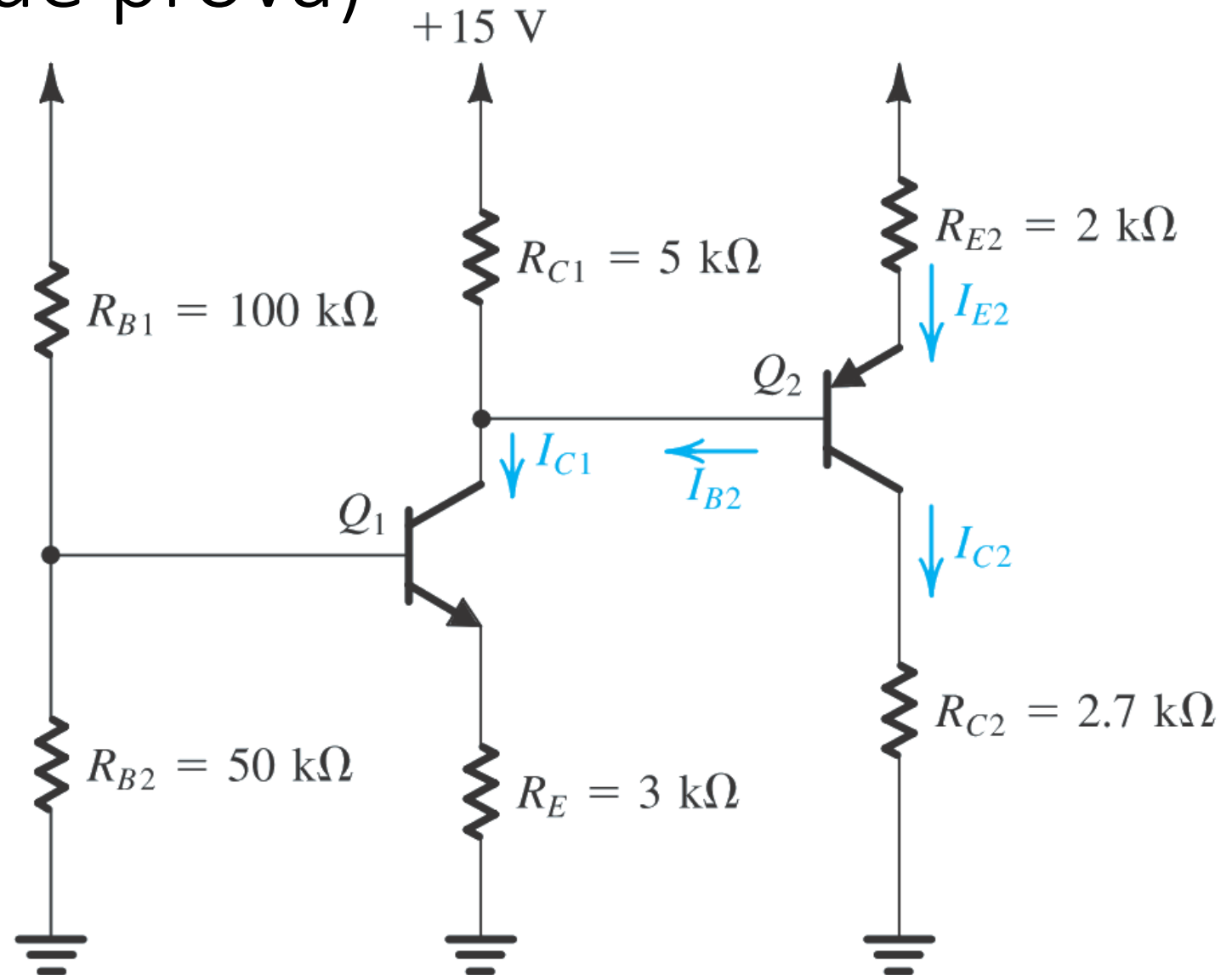
- $\beta=100$  para  $Q_1$  e  $Q_2$
- Calcule tensão e corrente no coletor de  $Q_2$
- Repare que o circuito de  $Q_1$  já resolvemos, basta avaliar o que muda com mais  $Q_2$  no circuito
- Cálculo aproximado: fixar  $V_{C1}$  e calcular  $Q_2$  depois recalcular





# Exercício (clássico de prova)

- Solução:
- $V_{C1} = 8,74V$
- $V_{E2} = 9,44V$
- $I_{E2} = 2,78mA$
- $I_{C2} = 2,75mA$
- $V_{C2} = 7,43V$
- $I_{B2} = 27,5\mu A$

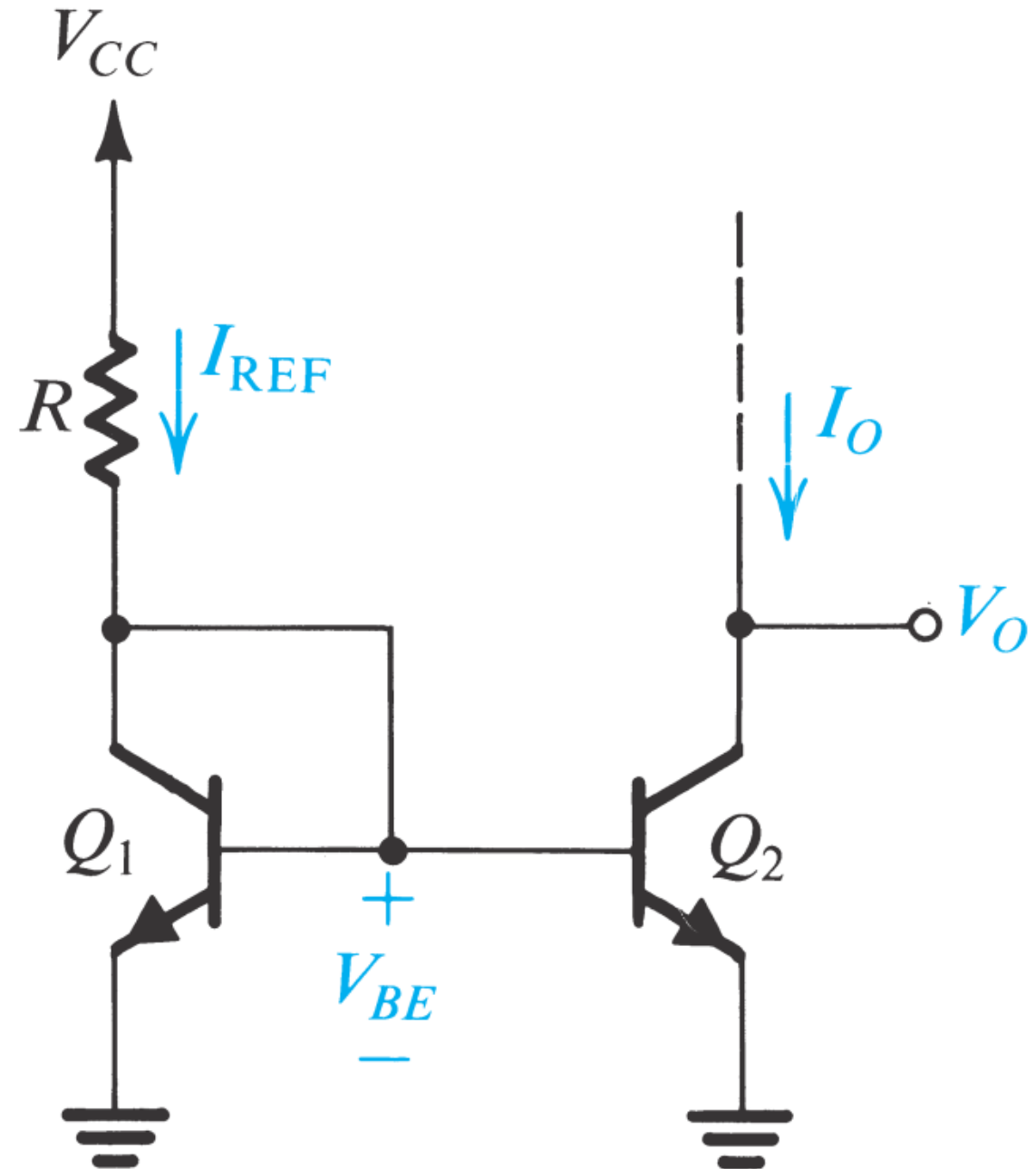


# Espelho de corrente BJT

- Os transistores podem ser utilizados para construir fontes de corrente controladas
- Idealmente os transistores devem ser idênticos e operar na mesma temperatura
- Na prática é difícil encontrar um par de transistores exatamente iguais então esta técnica normalmente é usada apenas em circuitos integrados

# Espelho de corrente

- Com  $Q_1=Q_2$  e desconsiderando o efeito Early:
- $I_O == I_{REF}$
- Isto acontece porque o circuito força o mesmo  $V_{BE}$  nos dois transistores
- Os dois terão a mesma corrente no coletor desde se mantenham na região ativa
- O curto-circuito entre coletor e base força  $Q_1$  a se manter na região ativa

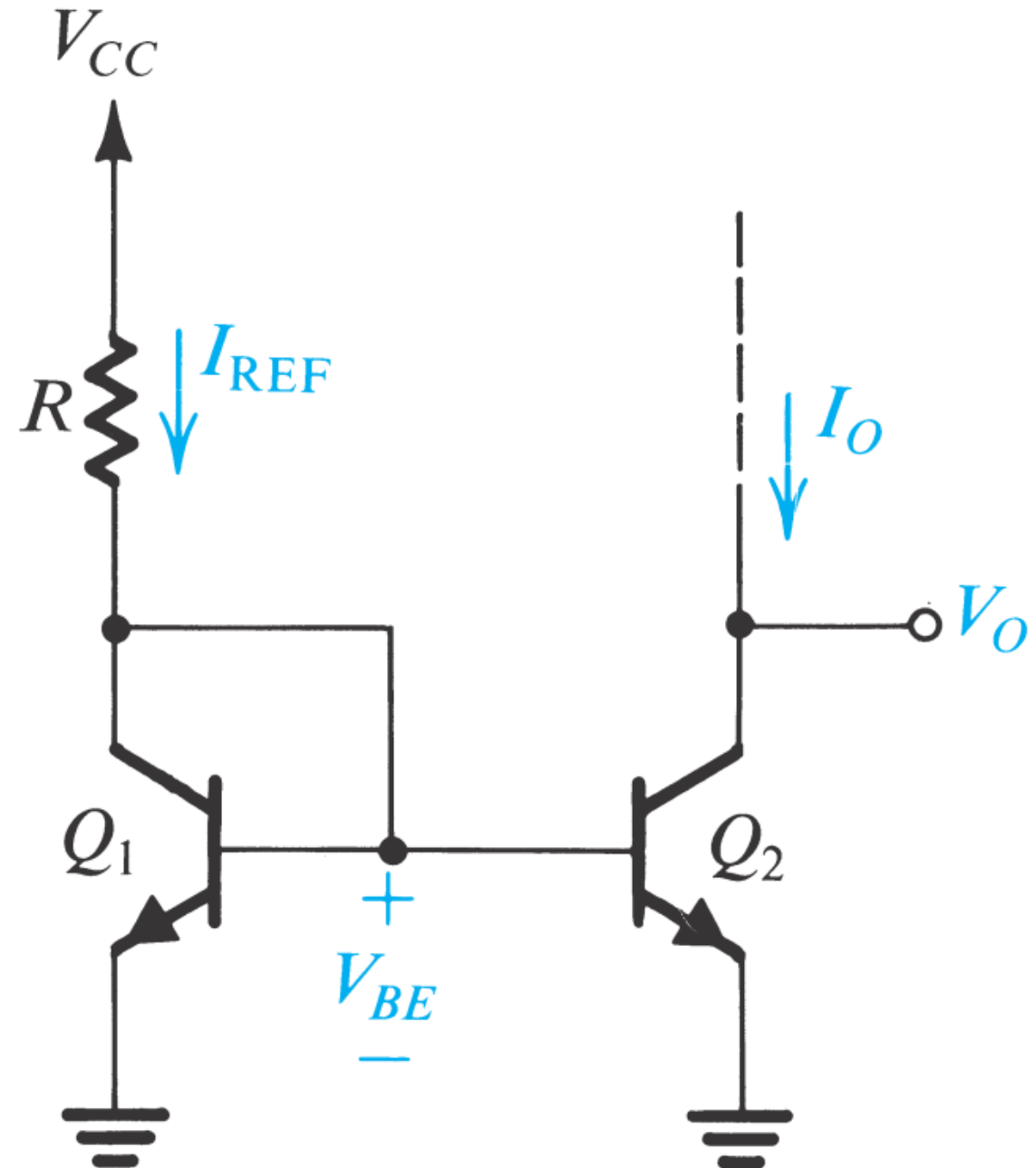


# Exercício para casa

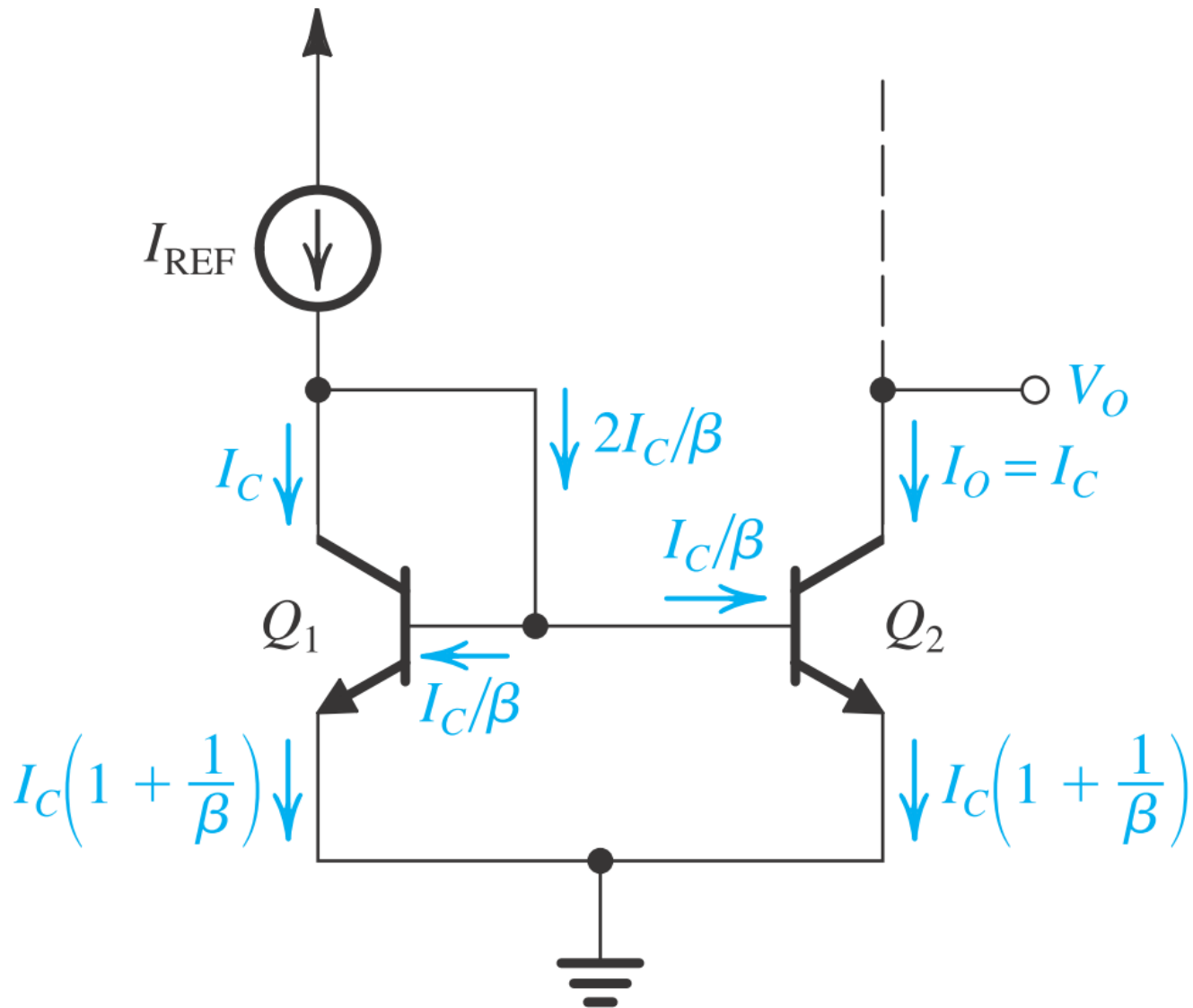
- Projete o circuito espelho de corrente para obter  $I_O = 0,5\text{mA}$ .  
(obtenha o valor de R)
- $V_{CC} = 5\text{V}$
- $I_S = 10^{-15}\text{A}$
- $\beta = 100$

# Espelho de corrente

- Com  $Q_1=Q_2$  e desconsiderando o efeito Early:
- $I_O == I_{REF}$
- Isto acontece porque o circuito força o mesmo  $V_{BE}$  nos dois transistores
- Os dois terão a mesma corrente no coletor desde se mantenham na região ativa
- O curto-circuito entre coletor e base força  $Q_1$  a se manter na região ativa



# Espelho de corrente



$$\frac{I_O}{I_{\text{REF}}} = \frac{I_C}{I_C \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right)} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

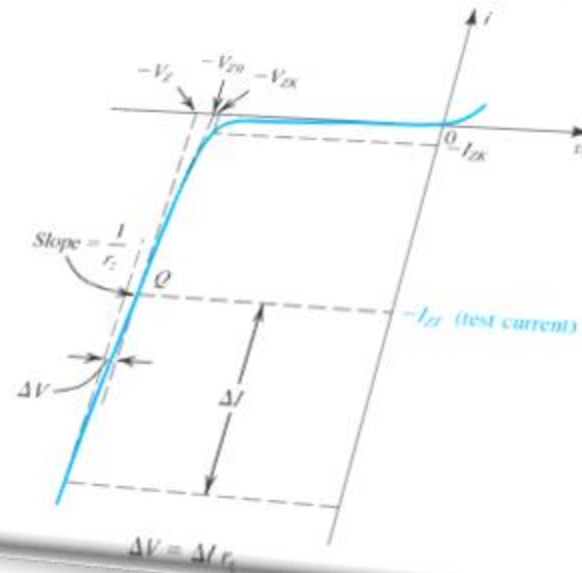
# Fonte linear com TBJ

- Uma das aplicações mais comuns de BJT
- Aplicado para elaborar fontes de tensão CC reguladas capazes de alimentar cargas de potência elevada
- Princípio por trás de CIs famosos como o LM317, 7805 e 7812
- Em sua forma mais simples, se utiliza da queda constante da base do TBJ e da relativa independência da corrente com a tensão Coletor-Emissor para fornecer tensão quase constante na saída no modo ativo

# Relembrando o circuito com diodo Zener

## Diodo Zener

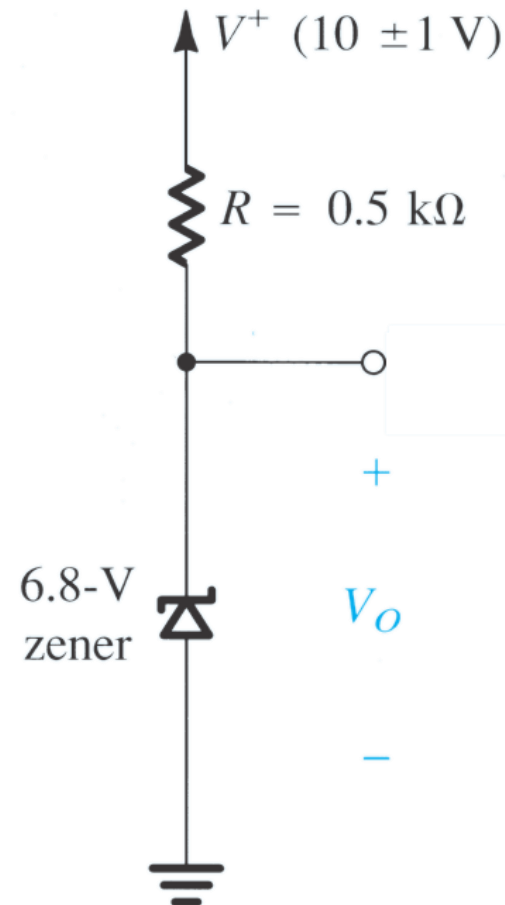
- Um tipo especial de diodo que é utilizado para fornecer referências de tensão com valores variados
- Este tipo de diodo opera na região de ruptura reversa



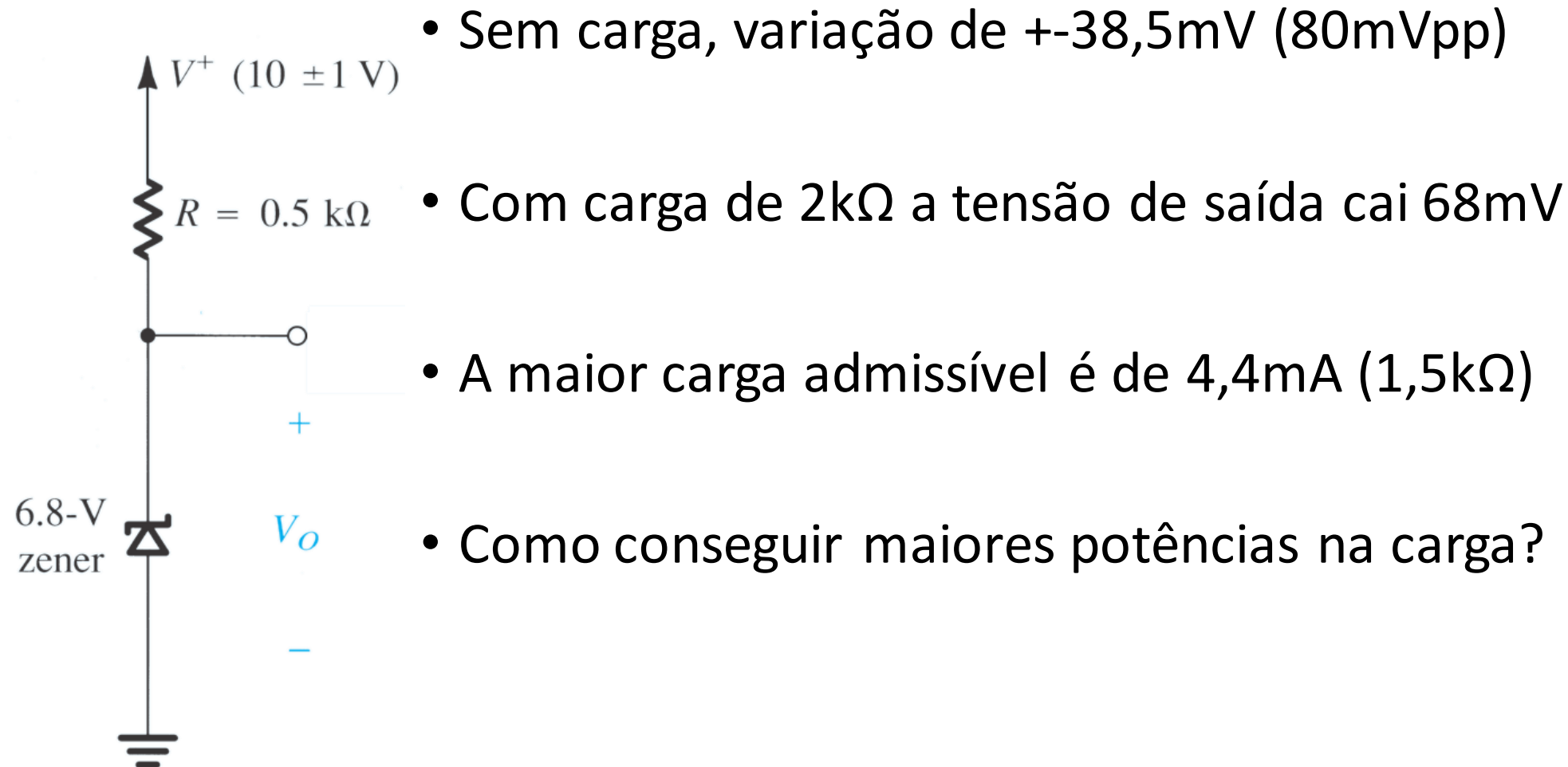


# Relembrando o circuito com diodo Zener

- Considere o Zener com  $V_Z=6,8\text{V}$  em  $I_Z=5\text{mA}$ ,  $r_Z=20\Omega$  e  $I_{ZK}=0,2\text{mA}$
- A fonte apresenta variação de 9 a 11V
- 1 Calcule a variação de tensão na saída ( $V_O$ )
- 2 Calcule qual seria a tensão exata de saída caso a fonte não apresentasse variação
- 3 Encontre a tensão de saída aplicando uma carga de 2k
- 4 Encontre qual a maior magnitude de corrente que pode ser drenada pelo terminal antes de perder o efeito zener no diodo

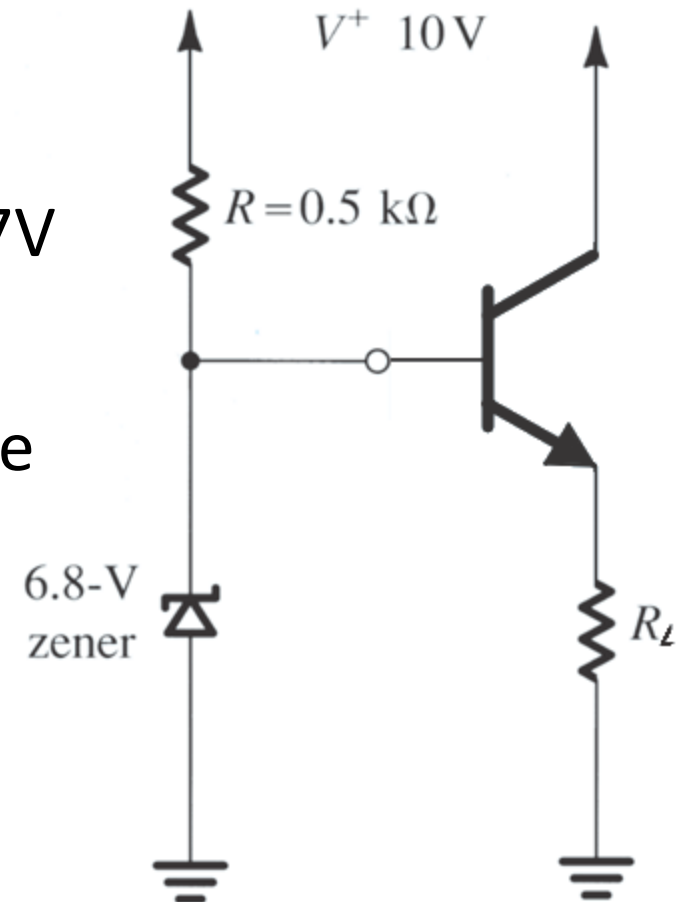


# Relembrando o circuito com diodo Zener



# Utilizando um TBJ

- A corrente de base do TBJ é muito pequena
- A queda de tensão Base-Emissor é constante de 0,7V
- A variação de tensão no Emissor será igual à da base
- O limite de corrente no Emissor é o limite físico de potência do transistor ( $V_{CE} * I_C$ )

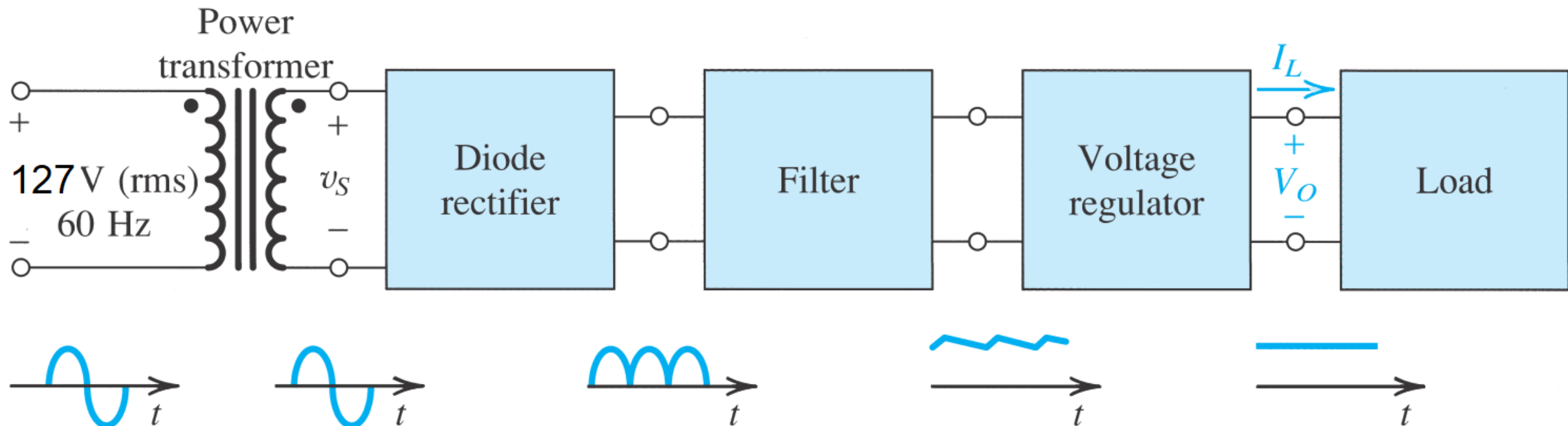


# Projeto de uma fonte linear

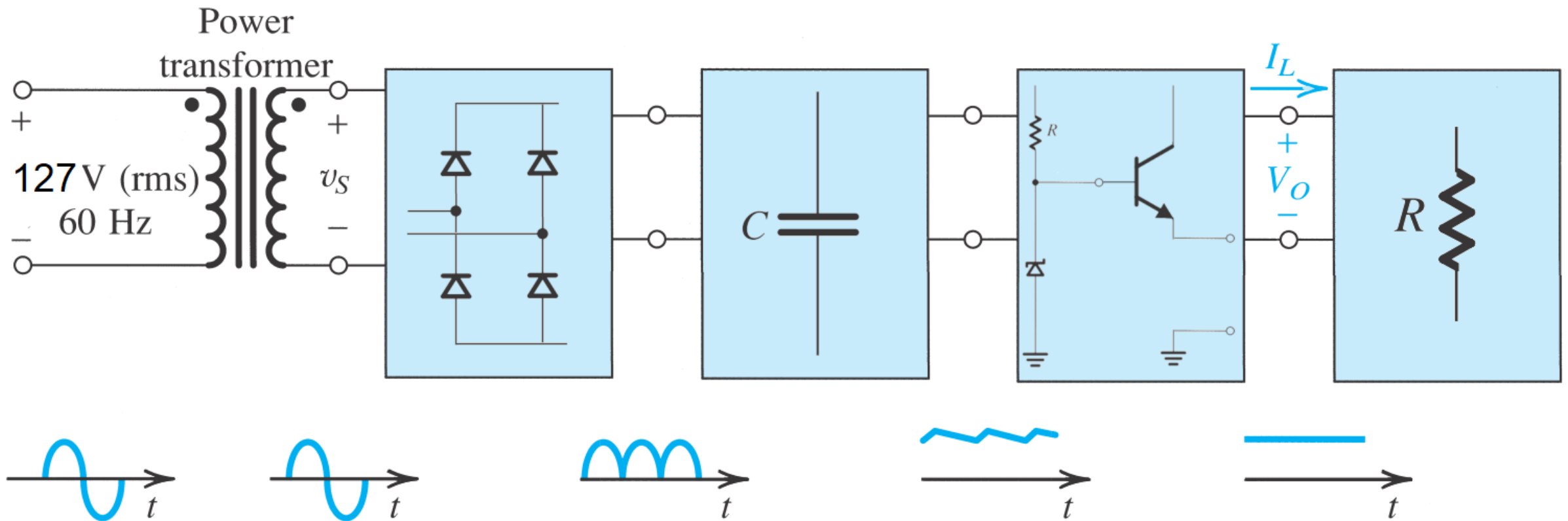
- Considerando o projeto completo desde a entrada em 127V 60Hz, projete uma fonte linear para obter 12V de saída e capacidade de 2A, com variação de no máximo 1% na tensão.

# Projeto de uma fonte linear

- Considerando o projeto completo desde a entrada em 127V 60Hz, projete uma fonte linear para obter 12V de saída e capacidade de 2A, com variação de no máximo 1% na tensão.



# Projeto de uma fonte linear



# Elementos do projeto

- Sabemos que a tensão de saída desejada é de 12V, com capacidade para 2A
- Portanto, a tensão no Emissor será  $\sim 12V$
- A tensão no Coletor deve ser, no mínimo, 0,3V maior que a do Emissor
- Esses 12V no Emissor tiveram uma queda de 0,7 na Base
- Portanto a tensão de Base é 12,7V

- Os 12,7V na Base são regulados por um circuito com diodo Zener
- A corrente total de saída é drenada do filtro capacitivo, portanto o filtro capacitivo fornece a variação de tensão antes do regulador
- Com a variação de tensão no filtro, calculamos a variação de tensão do regulador e por consequência da tensão de saída
- Cabe o bom senso do projetista ao relacionar custo/benefício nos componentes



- Capacitores melhoram a regulação, mas encarecem o projeto
- Tensões altas após o retificador implicam em alta potência queimada no transistor
- Tensões baixas após o retificador dificultam a regulação no Zener pois a corrente varia muito
- Um bom projeto equilibra estas características

# Exercício – projeto prático

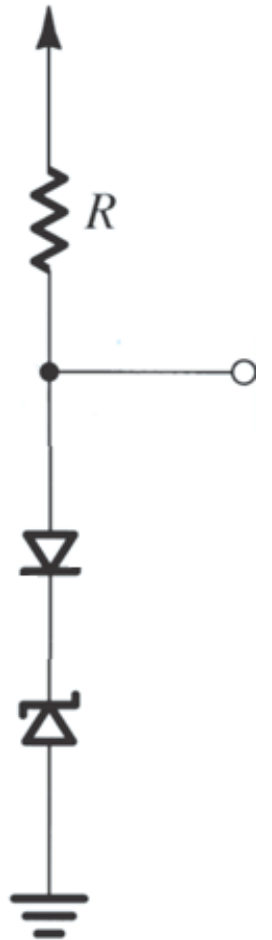
- Projete uma fonte linear para obter tensão constante de 12V na saída com capacidade para 2A, utilizando:
- Transformador com saída de 12VRMS
- Diodo retificador com 0,8V em 1A (1N5404)
- Diodo de sinal com 0,7V em (1N4148)
- Diodo Zener de 12V em 1mA (BZX79C12V  $\rightarrow R_z=25\Omega$ )
- Capacitores de 2200uF
- Transistor BJT do tipo NPN (TIP122)

# Exercício – Solução aproximada

- Saída de 12VRMS tem pico de  $\sim 17V$
- Aproximando a queda dos diodos como 0,7V temos pico de 15,6 após o retificador (onda completa em ponte)
- Considerando a corrente de 2A na carga, a variação de tensão no filtro será de:
  - $1 \times 2200\mu F \rightarrow 7,5V$  (impraticável)
  - $2 \times 2200\mu F \rightarrow 3,8V$  (impraticável)
  - $3 \times 2200\mu F \rightarrow 2,5V$  (mínimo de 13,1V, começa a ser interessante)
  - $4 \times 2200\mu F \rightarrow 1,9V$  (mínimo de 13,7V, pouca melhora)
- Por hora vamos usar a solução com 3 Capacitores

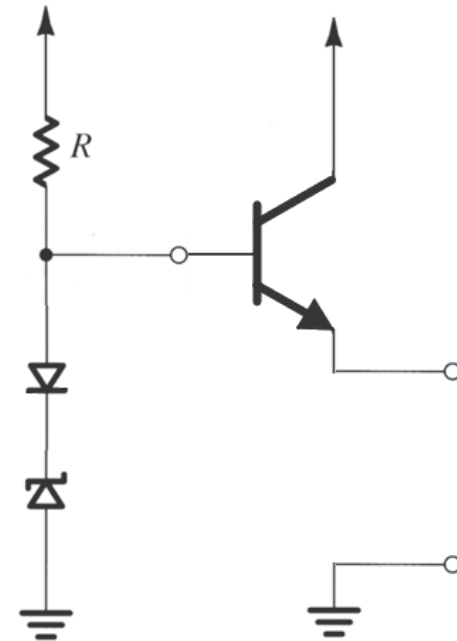
# Exercício – Solução aproximada

- Para obter 12,7V com o regulador zener, precisamos associar um diodo Zener de 12V com um diodo comum:
- Assim projetamos o circuito e calculamos a variação esperada na saída
- Menor tensão de 13,1V  $\rightarrow R = 400\Omega$  para obter 1mA
- Porém no pico de tensão, 15,6V,  $i_z = 7,25\text{mA}$  com  $r_z = 25\Omega$ , novo  $V_z \approx 12,2\text{V}$ ,  $V_{\text{BASE}} \approx 12,9\text{V}$  variação de  $\approx 1,6\%$  na saída



# Exercício – Solução aproximada

- Essa tensão regulada de 12,7 a 12,9V é conectada à base do transistor
- Com a queda constante de 0,7V na base, temos tensão de Emissor de 12 a 12,2V
- No pior caso teremos 15,6V no coletor e 12,2V no Emissor com 2A, dissipando uma potência de 6,8W no transistor.
- Vai funcionar no mundo real?

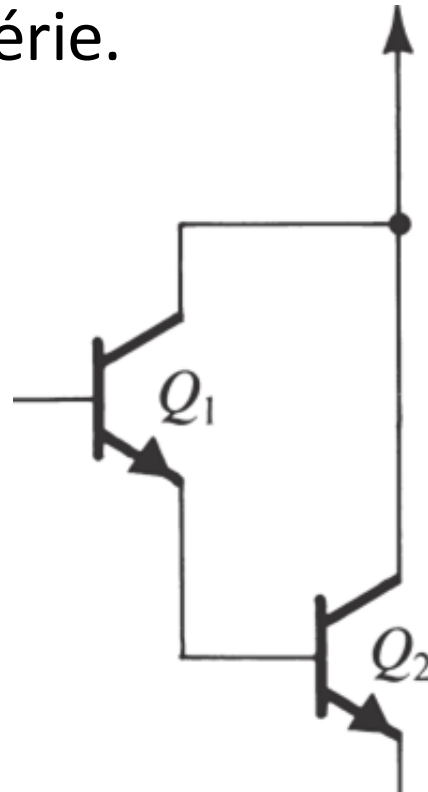


# Exercício – Solução aproximada

- Essa tensão regulada de 12,7 a 12,9V é conectada à base do transistor
- Com a queda constante de 0,7V na base, temos tensão de Emissor de 12 a 12,2V
- No pior caso teremos 15,6V no coletor e 12,2V no Emissor com 2A, dissipando uma potência de 6,8W no transistor.
- Vai funcionar no mundo real?
- Provavelmente não, pois falta considerar a corrente de base.
- Considerando um beta muito alto (1000) teríamos 2mA de corrente de base e o zener sairia da região de ruptura reversa.

# Uma solução possível – Conf. Darlington

- Utilizando dois transistores em cascata, de forma que o primeiro fornece corrente para a base do segundo, temos uma composição com um  $\beta$  aparente muito maior, porém com mais queda de tensão final por ter dois  $V_{BE}$  em série.



Para casa:

demonstrar o  $\beta$  total desta configuração, dado que  $\beta_1=200$  e  $\beta_2=50$ .