# **ENG1027:** Instrumentação Eletrônica

Aula de transistores

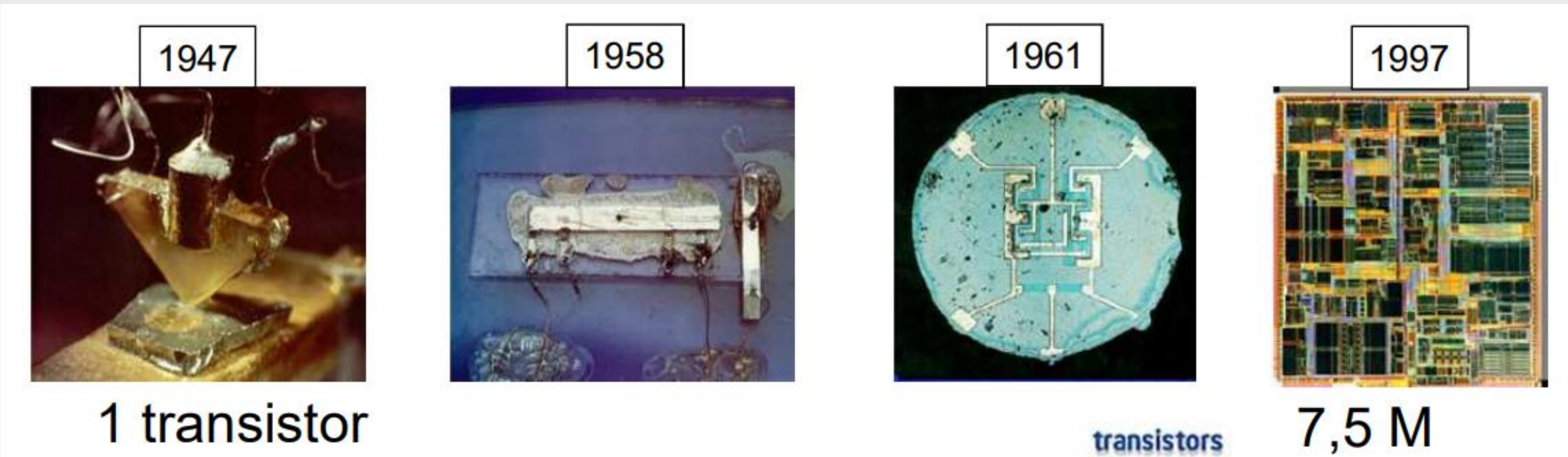
## 2.5) Para que servem?

- É a base da eletrônica moderna e dos processadores

- A invenção do transístor (1947) valeu o Prêmio Nobel, aos seus inventores.

- único Nobel atribuído a um dispositivo de engenharia.

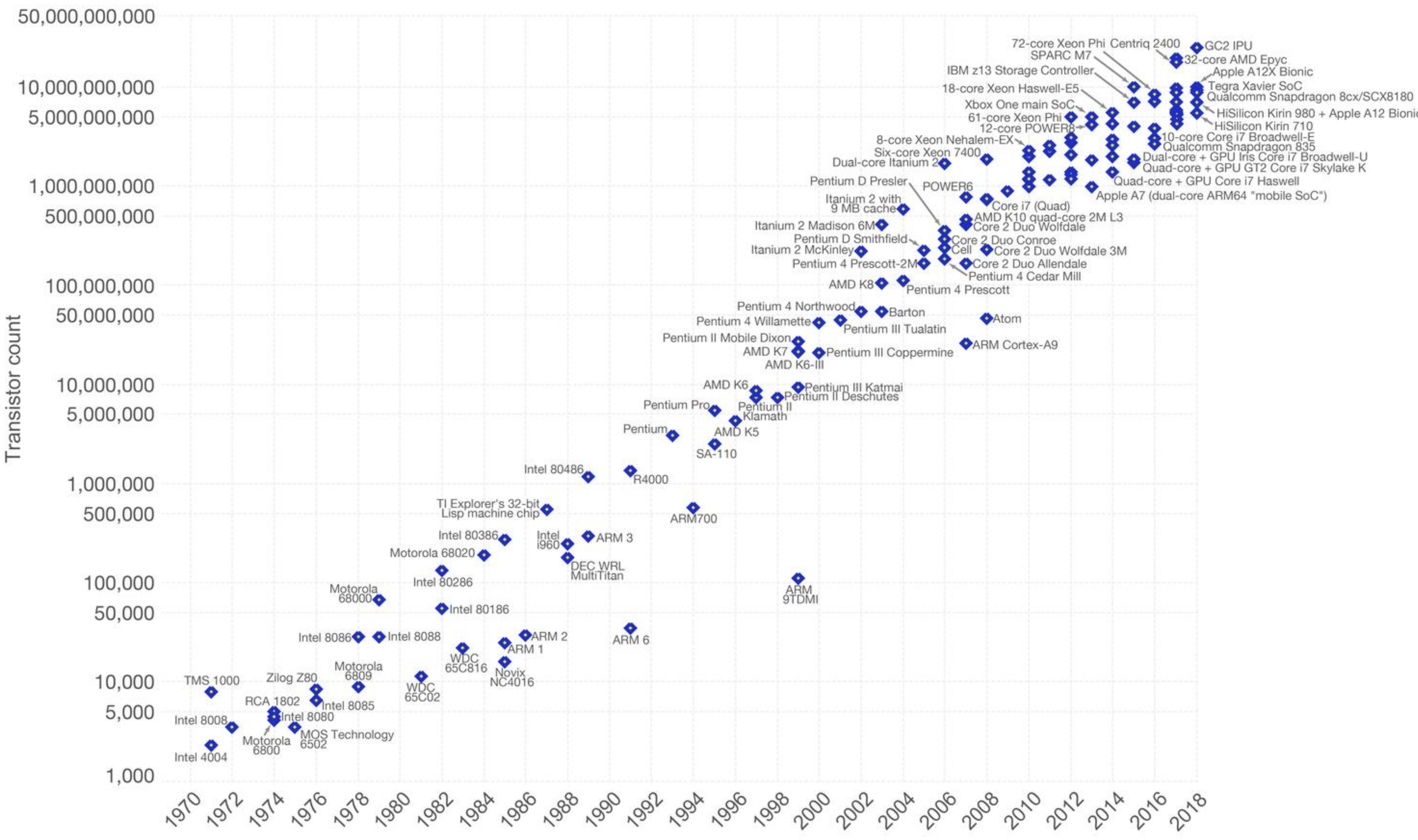
# 2.5) Evolução



# Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2018)

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are linked to Moore's law.

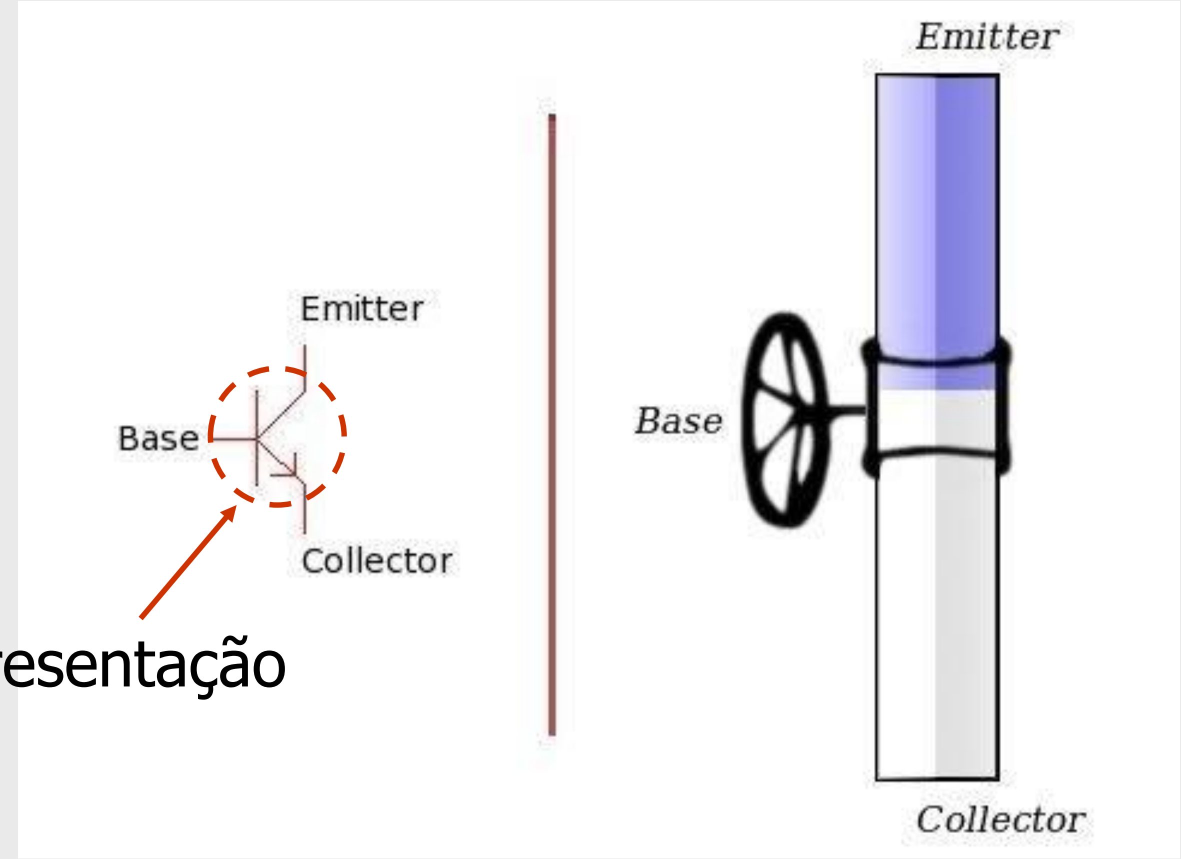
Our World in Data




Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)
The data visualization is available at OurWorldinData.org. There you find more visualizations and research on this topic.

# 2.5) Transistores - Introdução

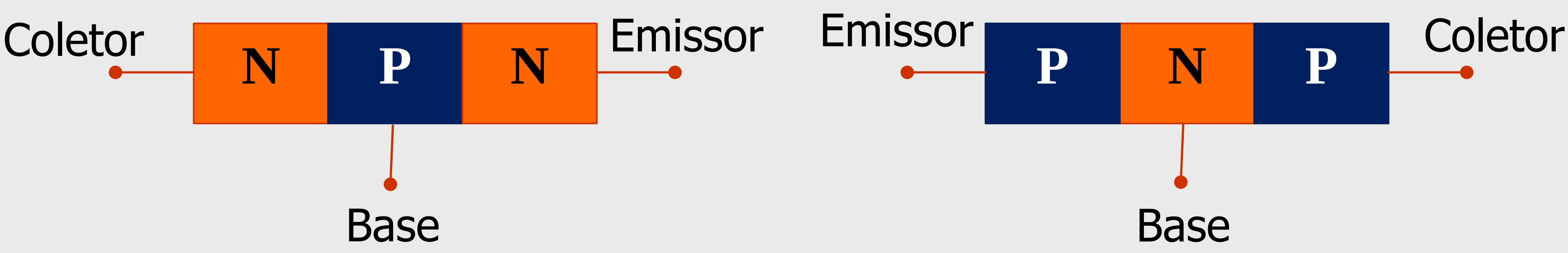
- Analogia




Representação

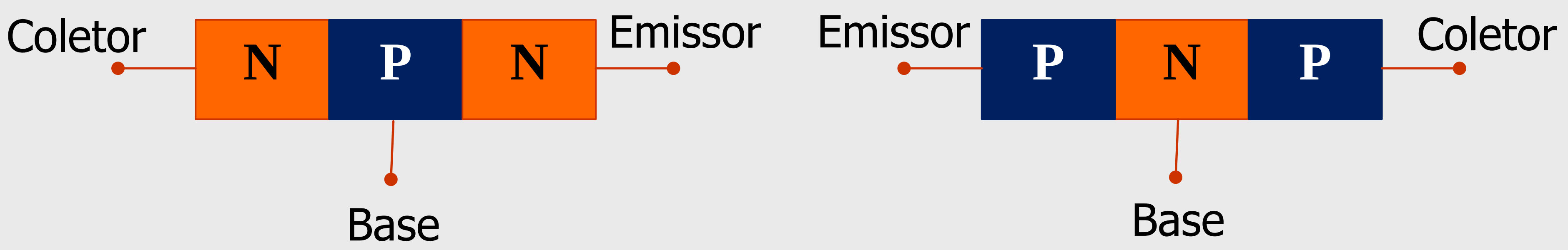
## 2.5) Transistores - Introdução

- **Função:**
  - Permite controlar a resistência a passagem de corrente pelo semicondutor.
- **Como funciona?**
  - Possui 3 regiões semicondutoras



# 2.5) Transistores - Introdução

- Como funciona?
  - Um diodo consiste em duas junções semicondutoras (N-P ou P-N). Dependendo da polarização a corrente pode ou não fluir.
  - No caso do transistor, é necessário aplicar um fluxo de elétrons na base para permitir a passagem de corrente



## 2.5) Para que servem?

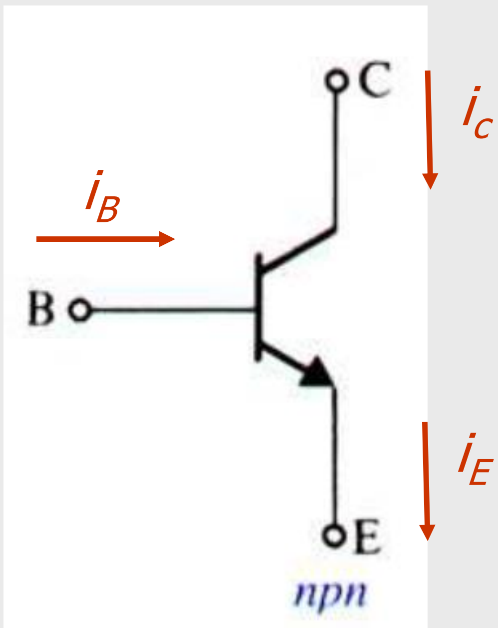
- Aplicações
  - Chaveamento controlado de circuitos
  - Amplificação de sinais
  - Acionamento de cargas
  - Osciladores
  - Processadores, etc...

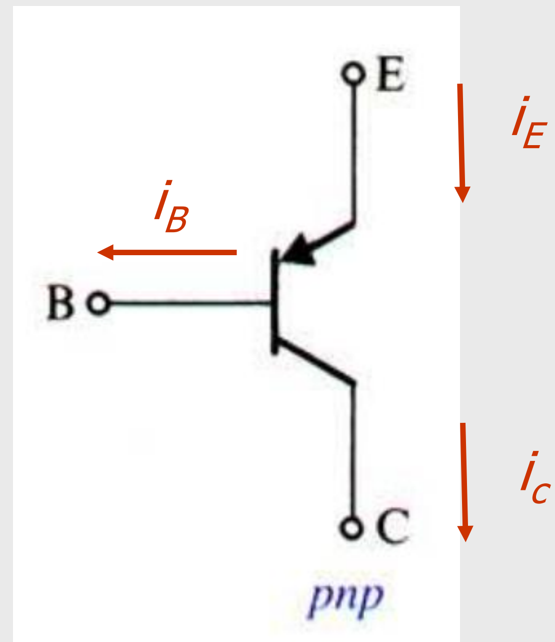
## 2.5) Tipos

- Unipolares
  - FET (Field Effect Transistor) e variantes.
  - Corrente controlada por campo elétrico (tensão na base)
- Bipolares
  - BJT (Bipolar Junction Transistor) e variantes. (1947)
  - A corrente controlada por corrente fluindo pela base

# 2.5) Representação

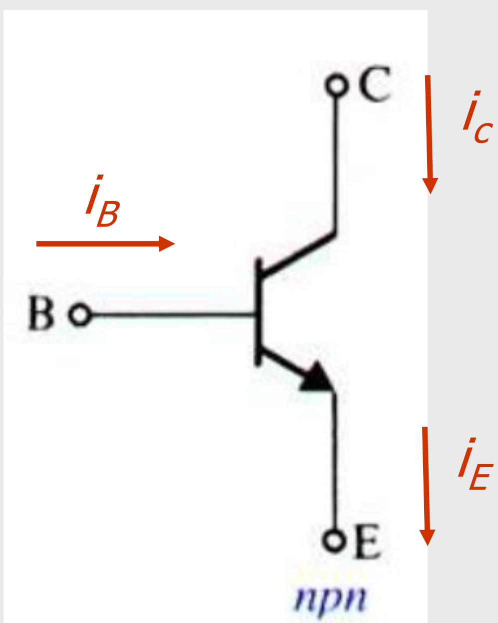
- Bipolares



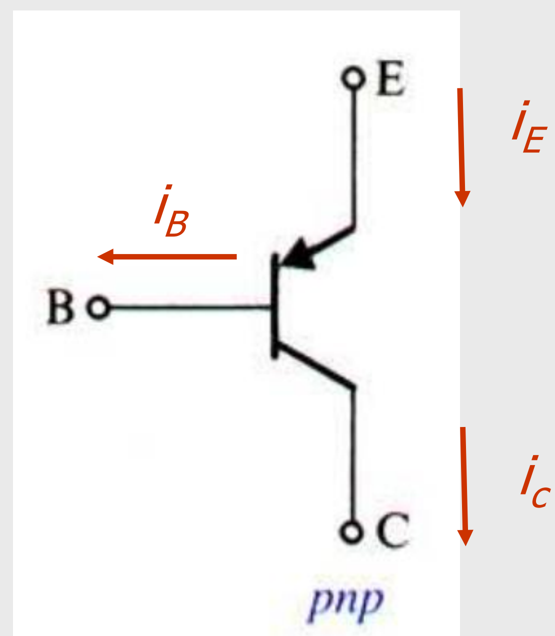



# 2.5) Funcionamento

- 1ª Lei de Kirchoff




$$i_B + i_C = i_E$$



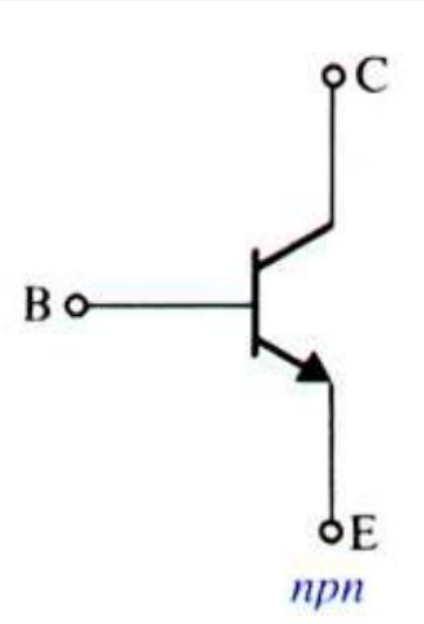

$$i_E = i_B + i_C$$

## 2.5) Funcionamento

- Parâmetros do transistor BJT
  - $\beta = i_C / i_B$ (ganho de corrente)
    - Tipicamente $40<\beta<200$ (ordem de grandeza)
    - Logo, $i_B << i_C$
  - $\alpha = i_C / i_E$
    - Como $i_B + i_C = i_E$, $\alpha$ é próximo de 1
    - Tipicamente $0.98<\alpha< 0.998$
  - Relação entre parâmetros
    - $\alpha = \beta/(\beta +1)$
    - $\beta = \alpha /(1- \alpha)$

# 2.5) Funcionamento

## Exemplo



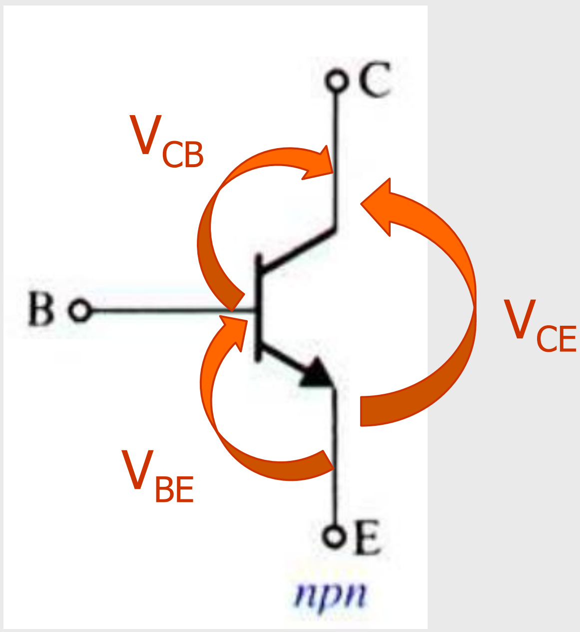

- Dados:
  - $\beta=100$
  - $i_B=100\mu A$
- Qual $i_C$ e $i_E$?

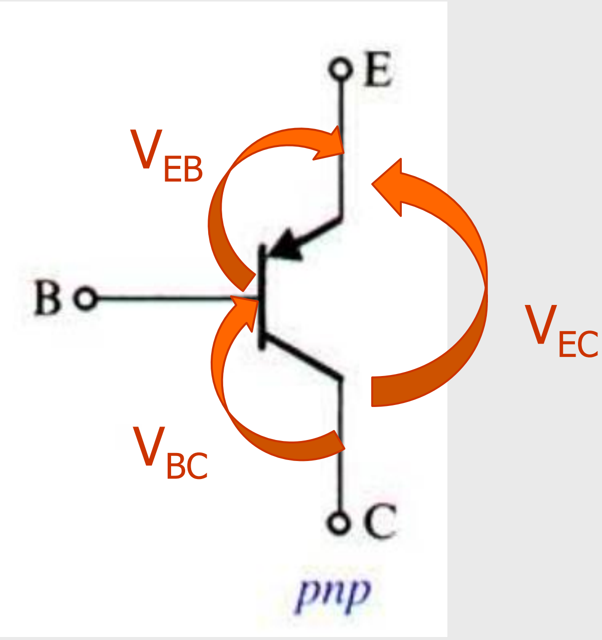
$i_C = \beta i_B = 10mA$

$i_E = i_B + i_C = 10{,}1mA$

## 2.5) Funcionamento

- Tensões no transistor (2ª Lei de Kirchoff)



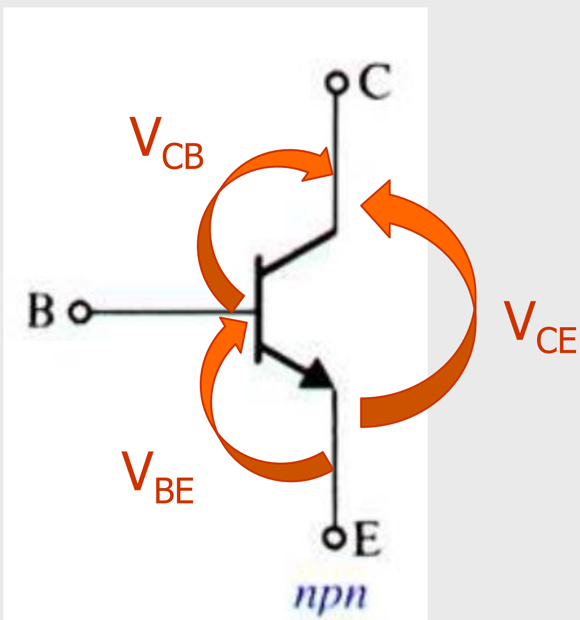




$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

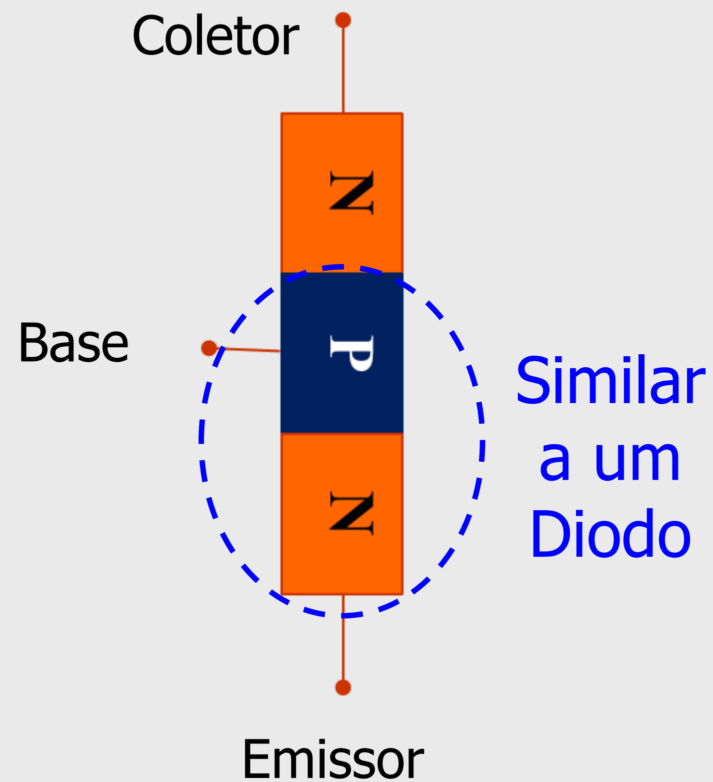
$$V_{EC} = V_{EB} + V_{BC}$$

# 2.5) Funcionamento

## ⌘Tensões no transistor

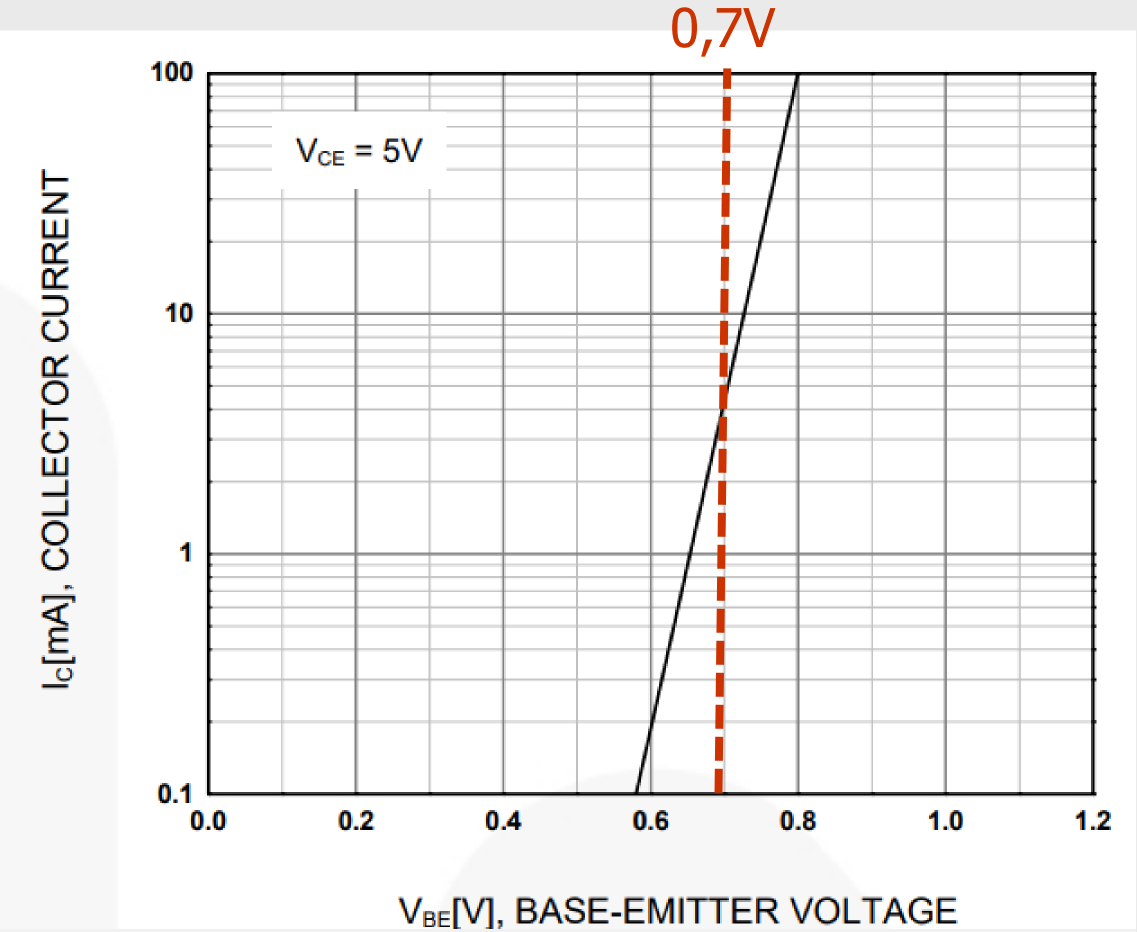



$$V_{CB} = ?$$
$$V_{BE} = ?$$



# 2.5) Funcionamento

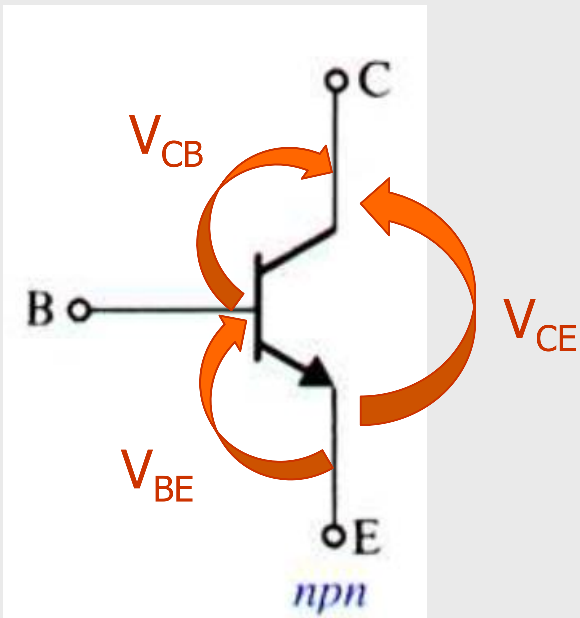
- Tensões no transistor



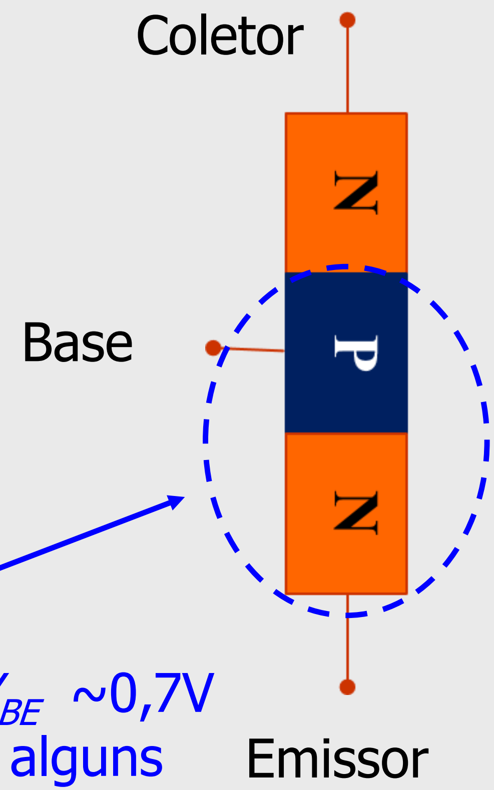

Curva do transistor BC 548

# 2.5) Funcionamento

## Tensões no transistor




$$V_{CB} = ?$$
$$V_{BE} = ?$$

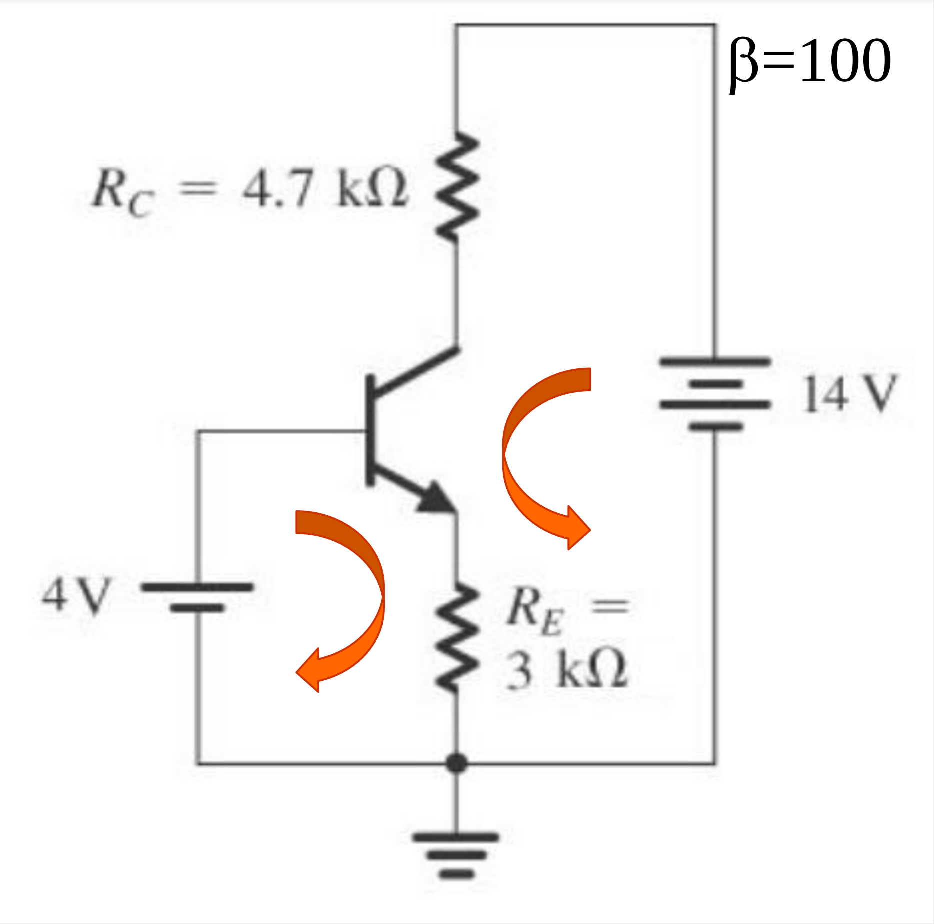



Similar a um Diodo

Logo, $V_{BE}$ ~0,7V (para alguns transistores)

# 2.5) Funcionamento

- Exemplo
  - Calcular:
    - Correntes
    - Tensões



## 2.5) Funcionamento

- Exemplo
  - Resolvendo (a)

$4 - V_{BE} - i_E R_E = 0$

$i_E * 3k = 4 - 0{,}7$

$i_E = 1{,}43mA$

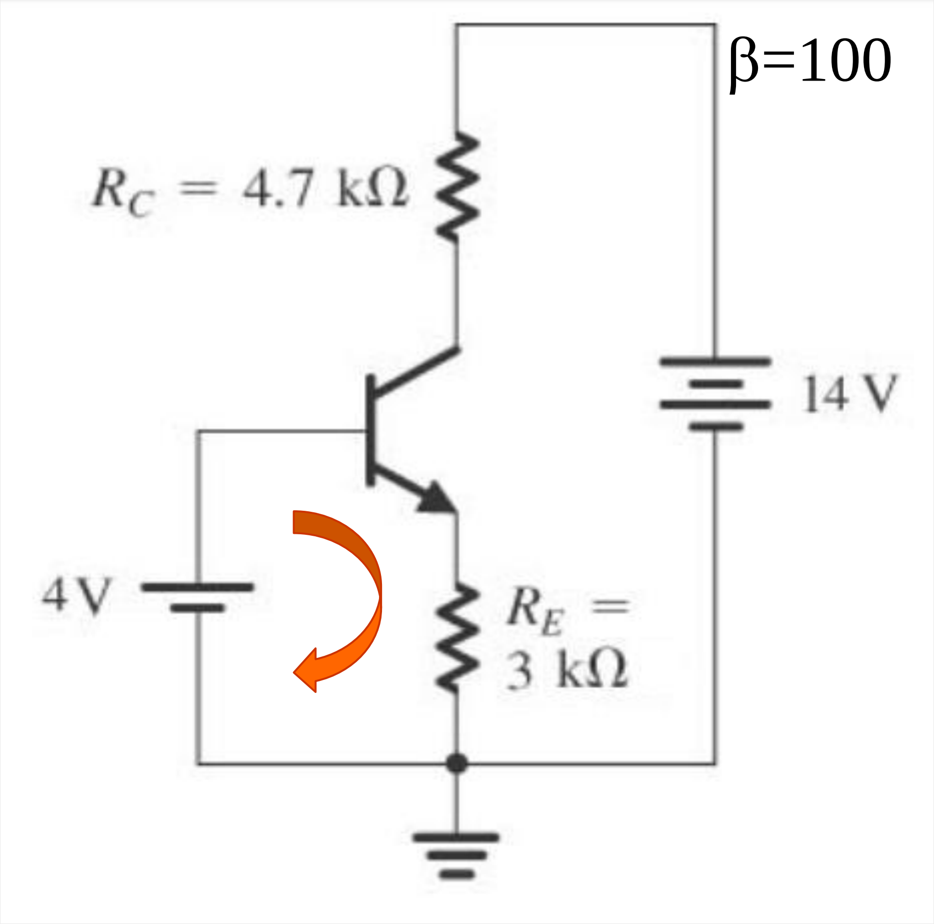
como,

$i_C = \alpha i_E$ , onde

$\alpha = \beta/(\beta+1) = 0{,}99$

$i_C = 0{,}99 * 1{,}43 = 1{,}42mA$

$i_B = i_C / \beta = 14{,}2\mu A$



# 2.5) Funcionamento

- Exemplo
  - Resolvendo (b)

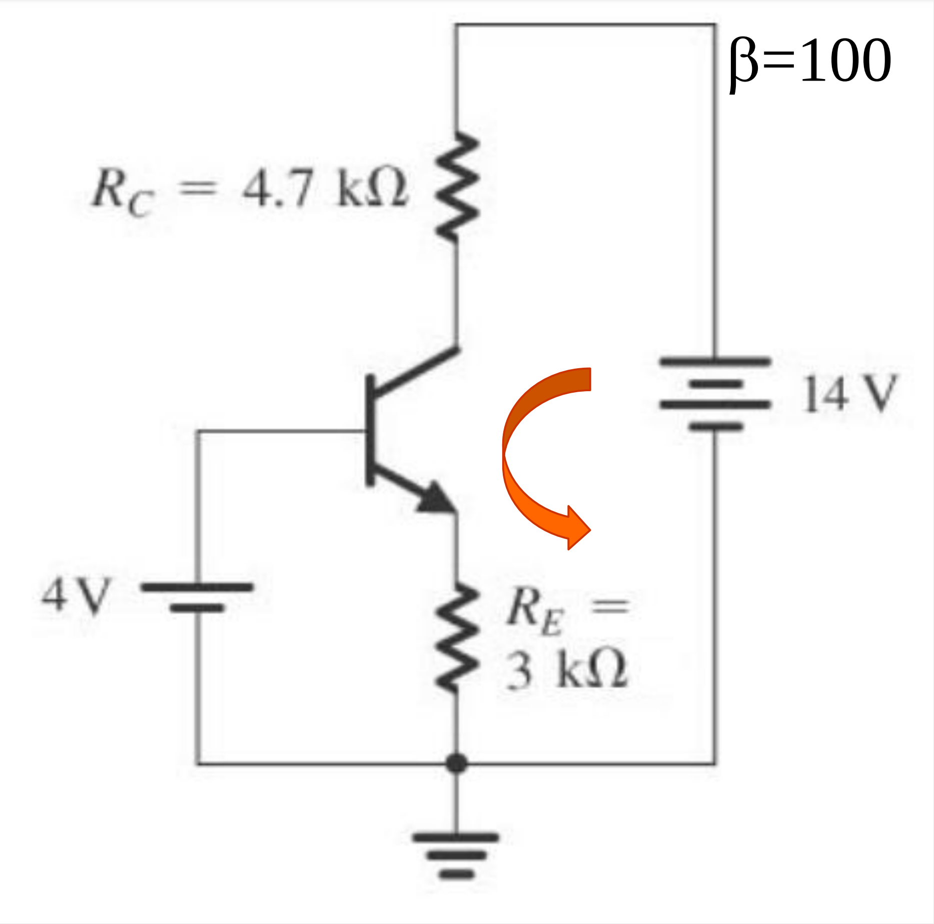
$14 = i_C R_C + V_{CE} + i_E R_E$

$V_{CE} = 14 - 1{,}42 * 4.7 - 1{,}43 * 3$

$V_{CE} = 3{,}02V$

$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$

$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 2{,}32V$



## 2.5) Potência

- Potência dissipada
  - Parâmetro muito importante
  - Todo transistor possui uma potência máxima
  - Se o máximo for ultrapassado o transistor pode queimar
  - A potencia dissipada é dada por (P=V.i):

$P = V_{CE} \cdot i_E$ como $i_E \approx i_C$ , é comum encontrar

$P = V_{CE} \cdot i_C$

# 2.5) Potência

- Potência vs. Ganho

↑ Alta — ↓ Baixo

↓ Baixa — ↑ Alto

- Consequência: frequentemente são necessários mais de um estágio de amplificação

# 2.5) Funcionamento

- Exemplo
  - Resolvendo (a)

$5 - i_B * 3k - V_{BE} - i_E * 3k = 0$

$i_E = i_B (1 + \beta)$ ; $V_{BE} = 0{,}7V$

$5 - i_B * 3k - 0{,}7 - 101 * i_B * 3k = 0$

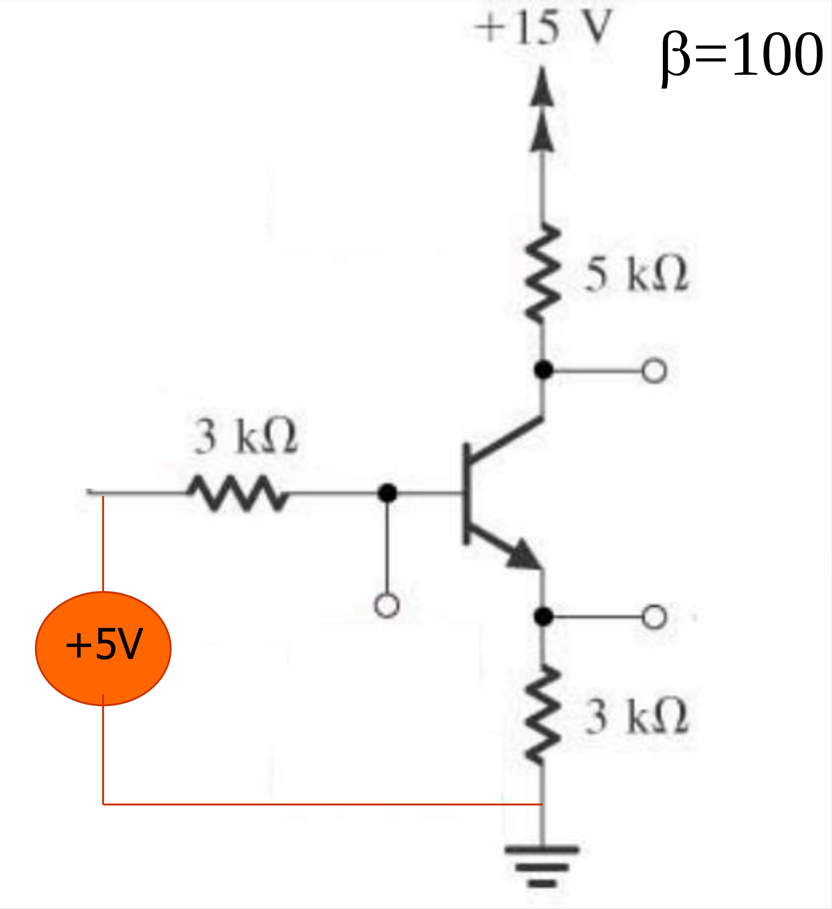
$i_B = 4{,}7/(3000 x 102)$

$i_B = 15 \mu A$

$i_E = 1{,}55 mA$

$\alpha = \beta/(\beta+1) = 0{,}99$

$i_C = 0{,}99 * 1{,}55 = 1{,}53 mA$



# 2.5) Funcionamento

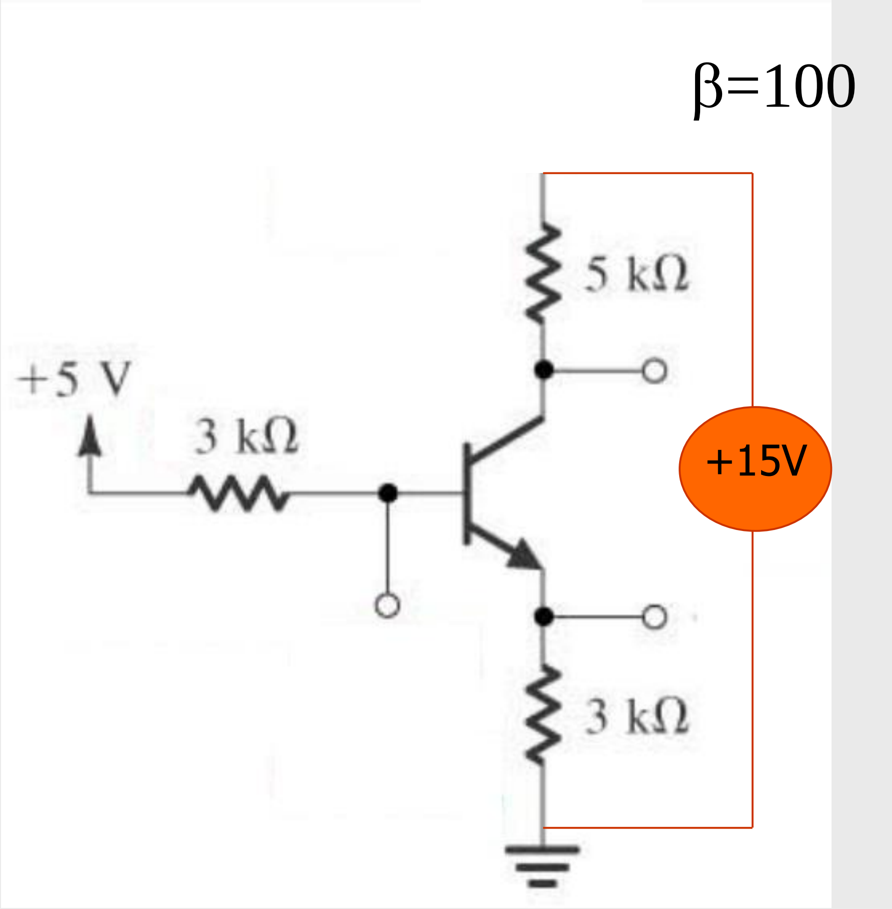
- Exemplo
  - Resolvendo (b)

$15 - i_C * 5k - V_{CE} - i_E * 3k = 0$

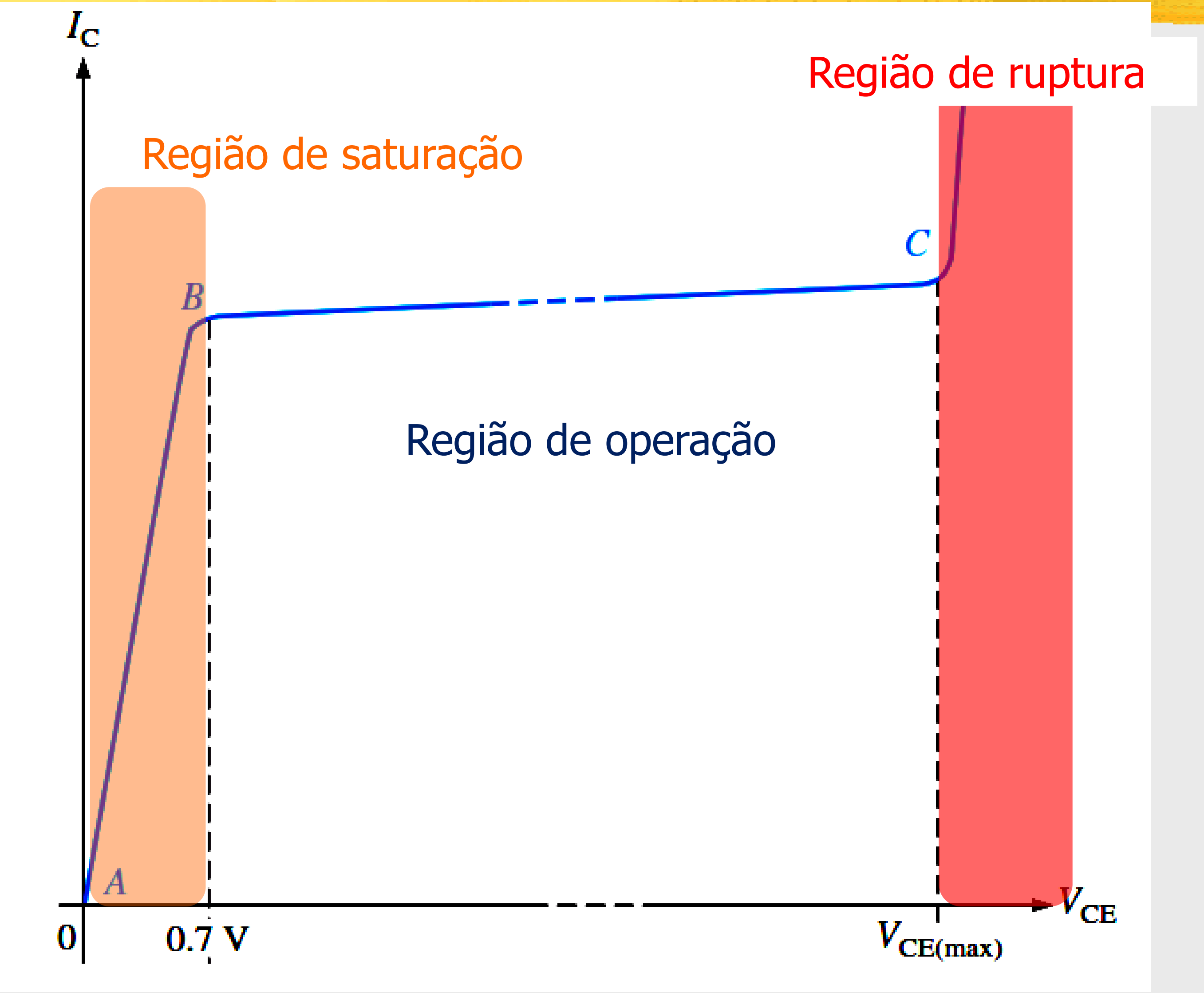
$V_{CE} = 2,7V$

$P = V_{CE} \cdot i_E$

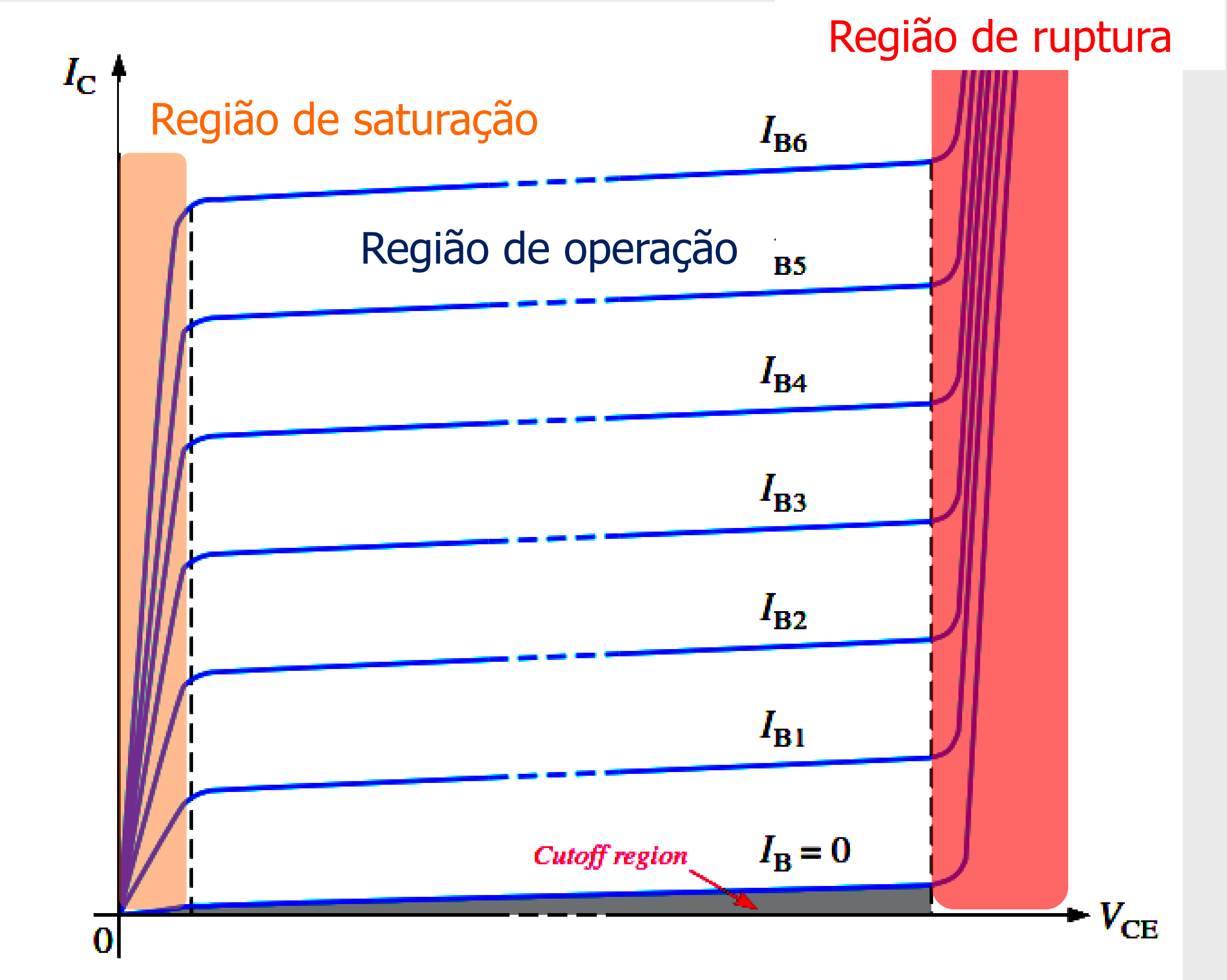
$P = 2,7V * 1,55mA = 4,2mW$



# 2.5) Curvas de operação



# 2.5) Curvas de operação



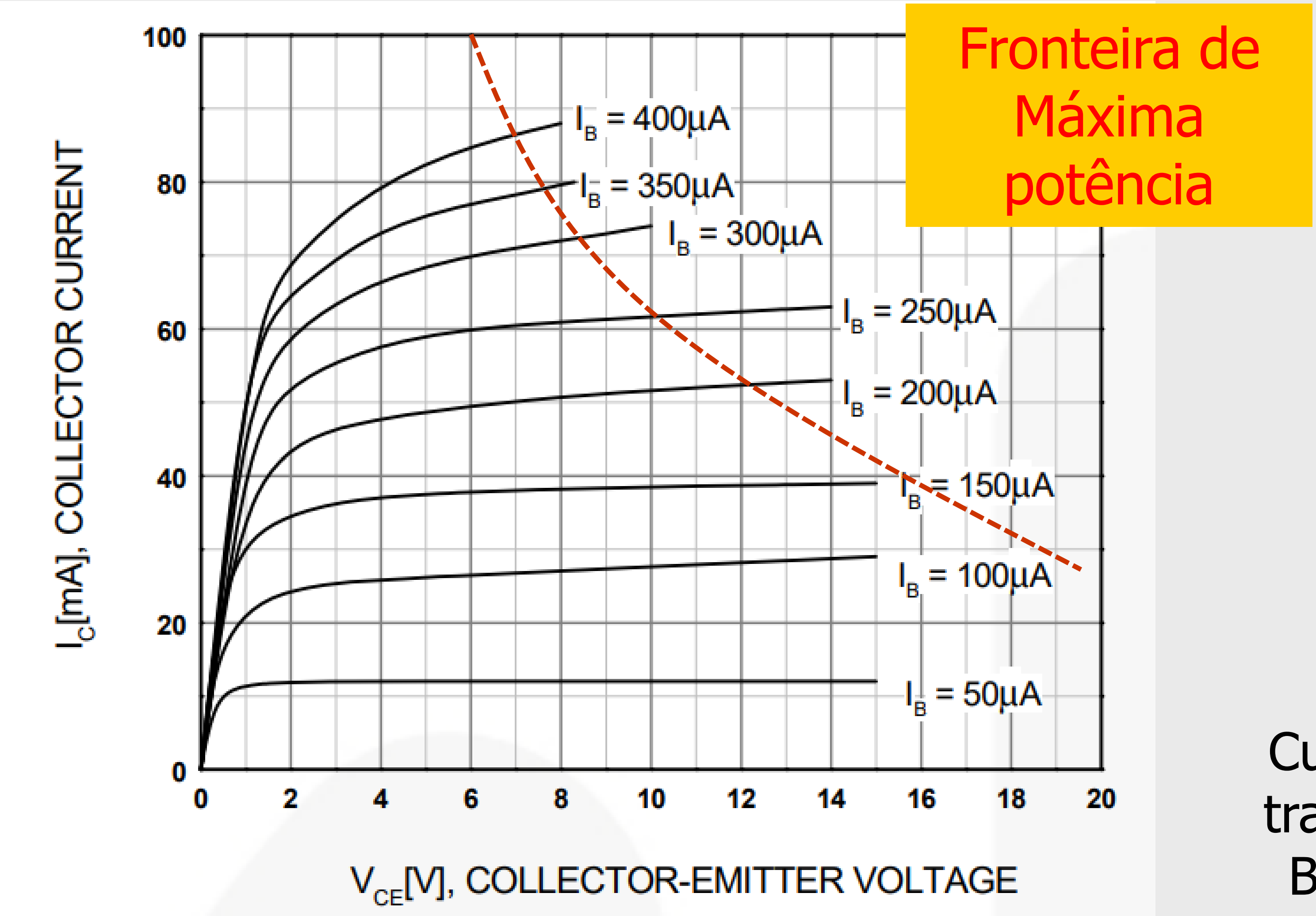
# 2.5) Curva de operação

- Regiões:
  - Saturação: aumento da corrente $i_B$ não resulta em aumento de $i_C$
  - Região de operação: $i_B$ e $i_C$ seguem a relação dada por $\beta$
  - Região de ruptura: aumento rápido de $i_B$ para pequenos aumentos de $V_{CE}$

## 2.5) Curva de carga

- Define os pontos de operação do transistor em um dado circuito
  - Dada pelas condições limite de operação:
    - Saturação para uma tensão $V_{CE}$ nula
    - Corte para corrente nula no coletor ($i_C=0$)
  - O ponto de operação (quiescente) em uma condição específica é um dos pontos descritos pela reta de carga

# 2.5) Curva de carga



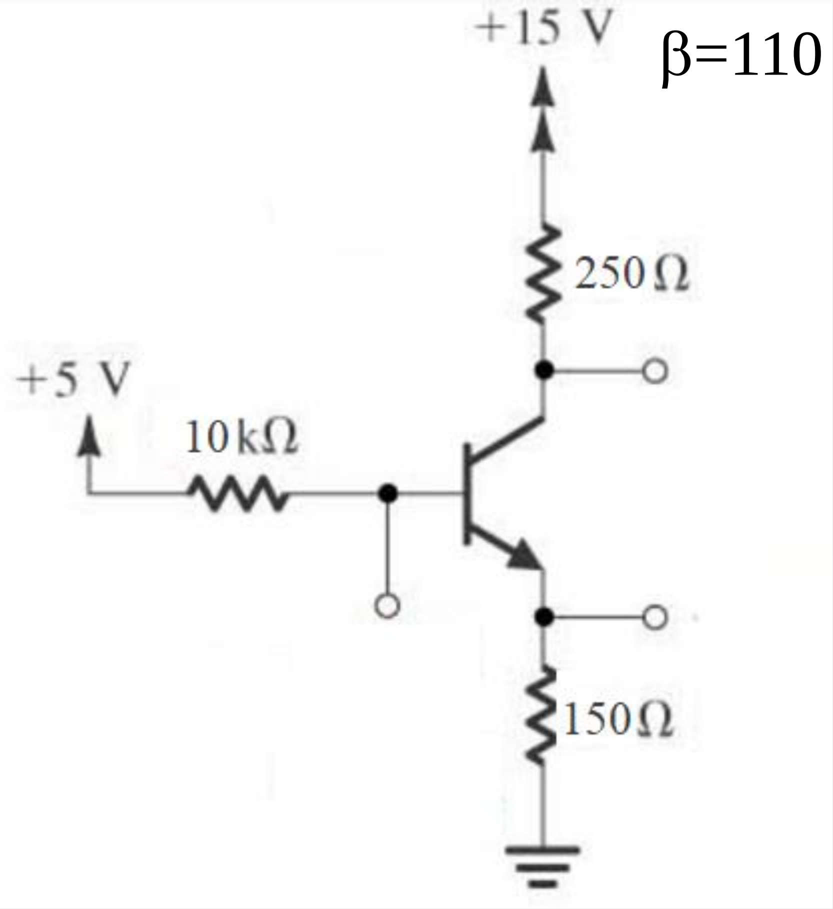

Curva do transistor BC 548

## 2.5) Funcionamento

- Exemplo bc 548
  - $i_C=0$
  - Se não há corrente,

O transitor está aberto

Logo, $V_{CE} = V_{CC}$
que no caso é +15V



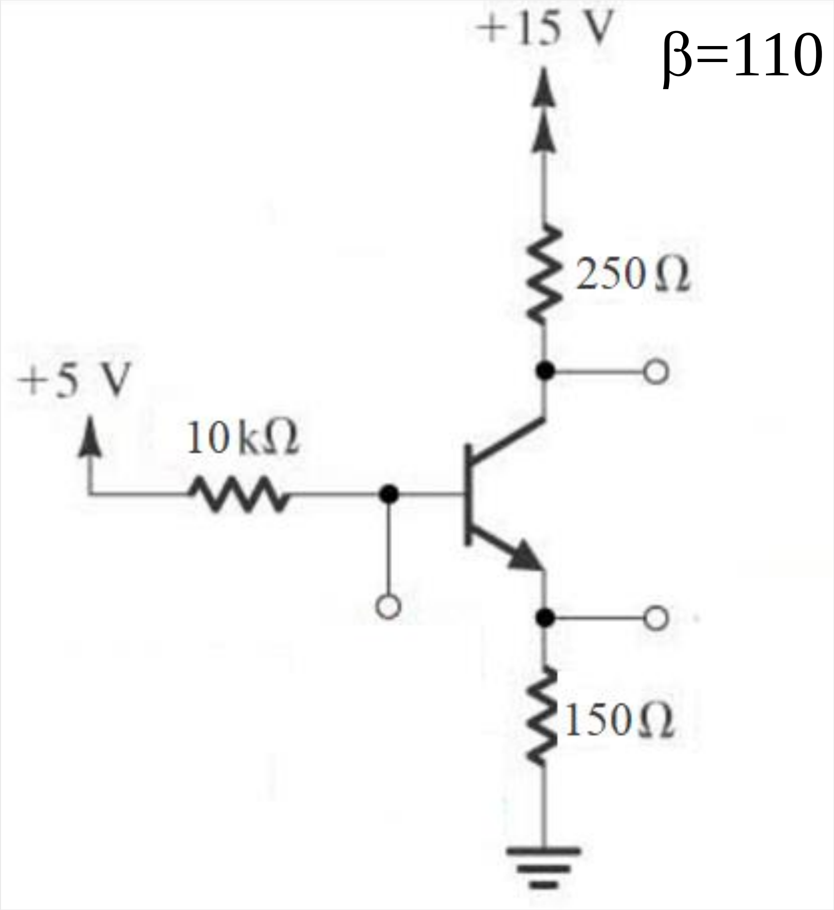
# 2.5) Funcionamento

- Exemplo bc 548
  - $V_{CE}=0$
  - Se a corrente é máxima

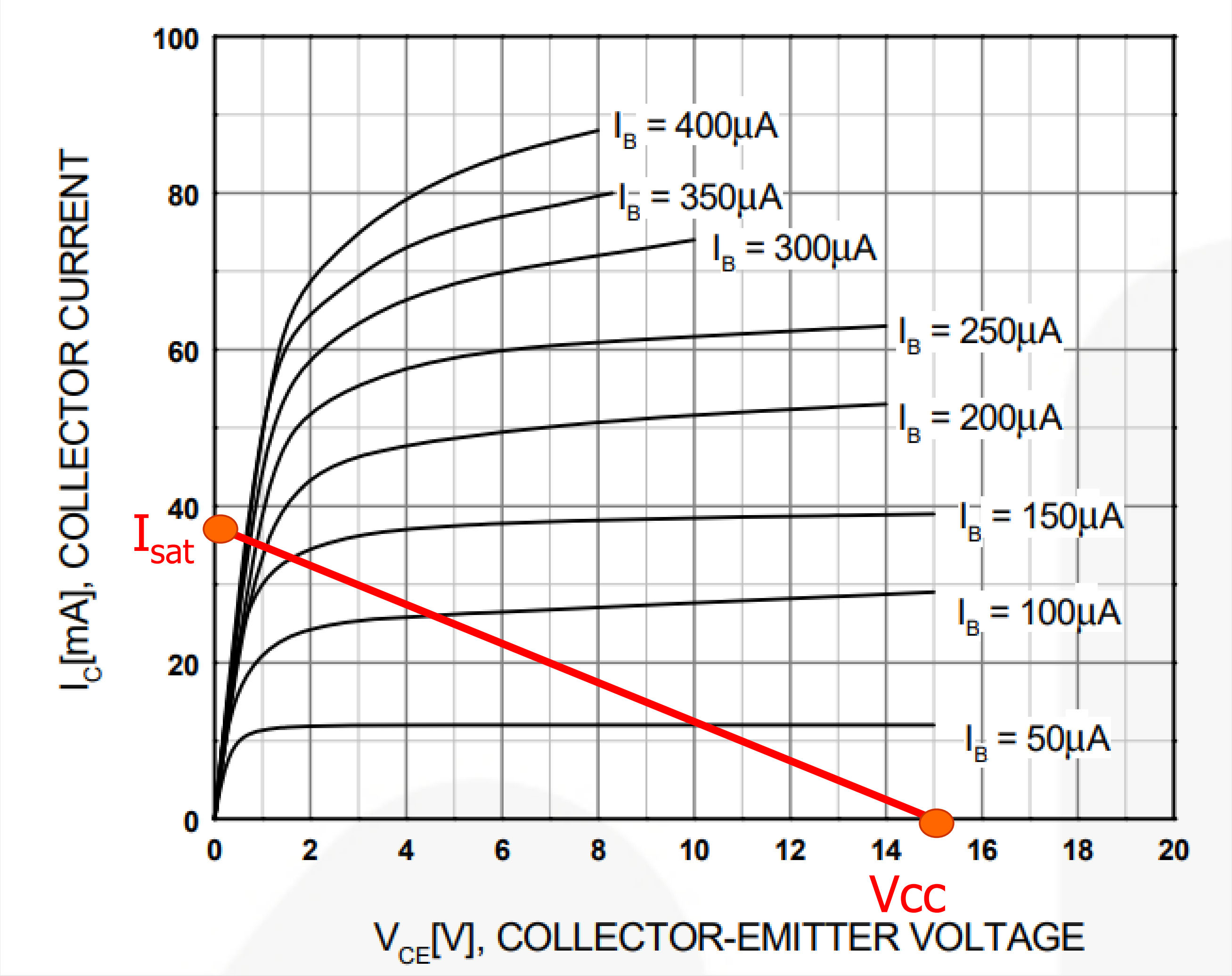
Logo, $i_C = V_{CC}/R_{EQ}$

$i_C = +15V/(150+250)$

$i_C = 37,5mA$



# 2.5) Curva de carga




$i_C=0$

$V_{CE}=0$

Curva do transistor BC 548

# 2.5) Ponto de operação (Q)

- Exemplo bc 548
  - Resolvendo (a)

$5 - i_B * 1k - V_{BE} - i_E * 150 = 0$

$i_E = i_B (1 + \beta)$ ; $V_{BE} = 0{,}7V$

$5 - i_B * 10k - 0{,}7 - 111 * i_B * 150 = 0$

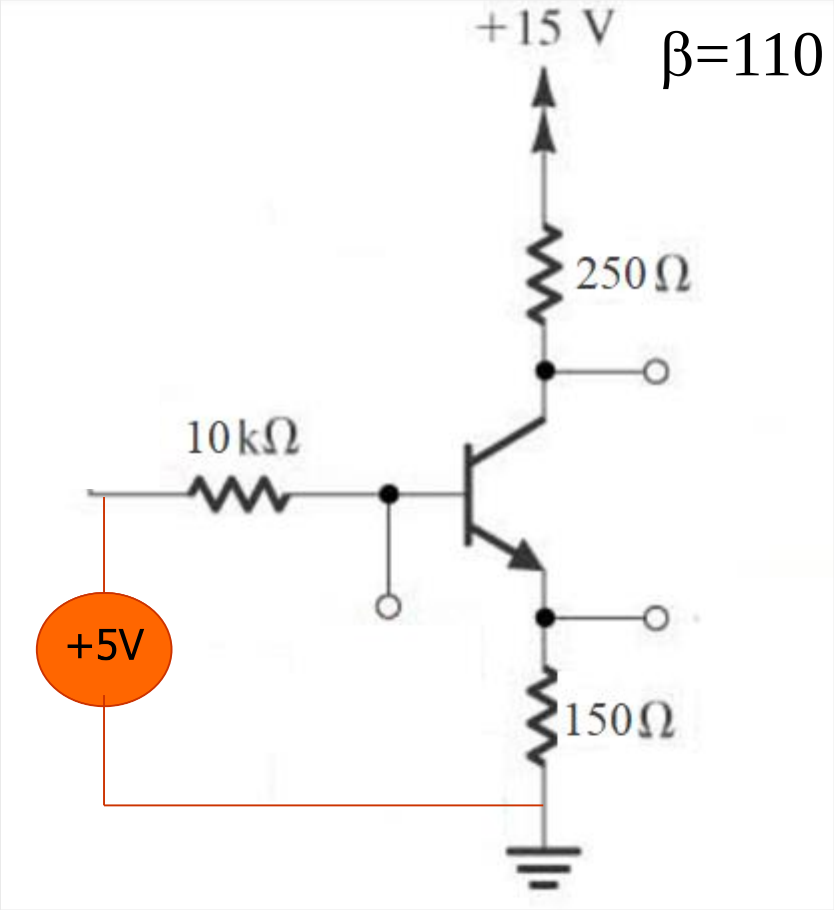
$i_B = 4{,}7/(10000 + 111 * 150)$

$i_B = 17{,}6 \mu A$

$i_E = 19{,}4 mA$

$\alpha = \beta/(\beta+1) = 0{,}991$

$i_C = 0{,}991 * 19{,}4 = 19{,}2 mA$



# 2.5) Ponto de operação (Q)

- Exemplo bc 548
  - Resolvendo (b)

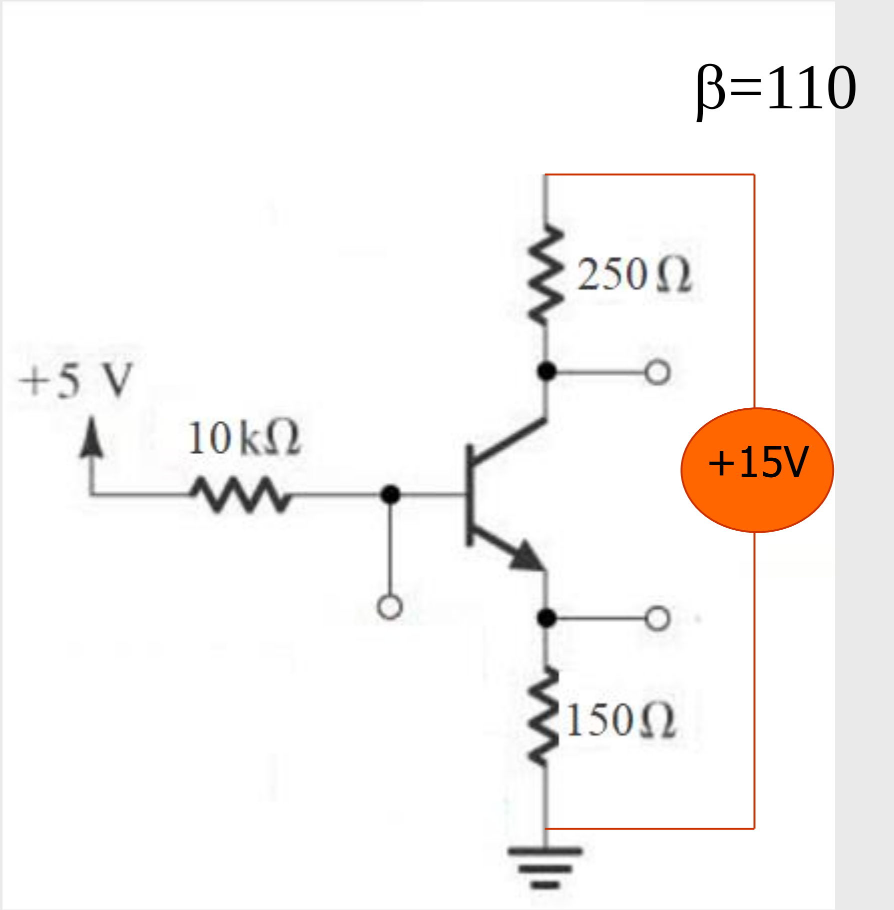
$15 - i_C * 250 - V_{CE} - i_E * 150 = 0$

$V_{CE} = 7{,}24V$

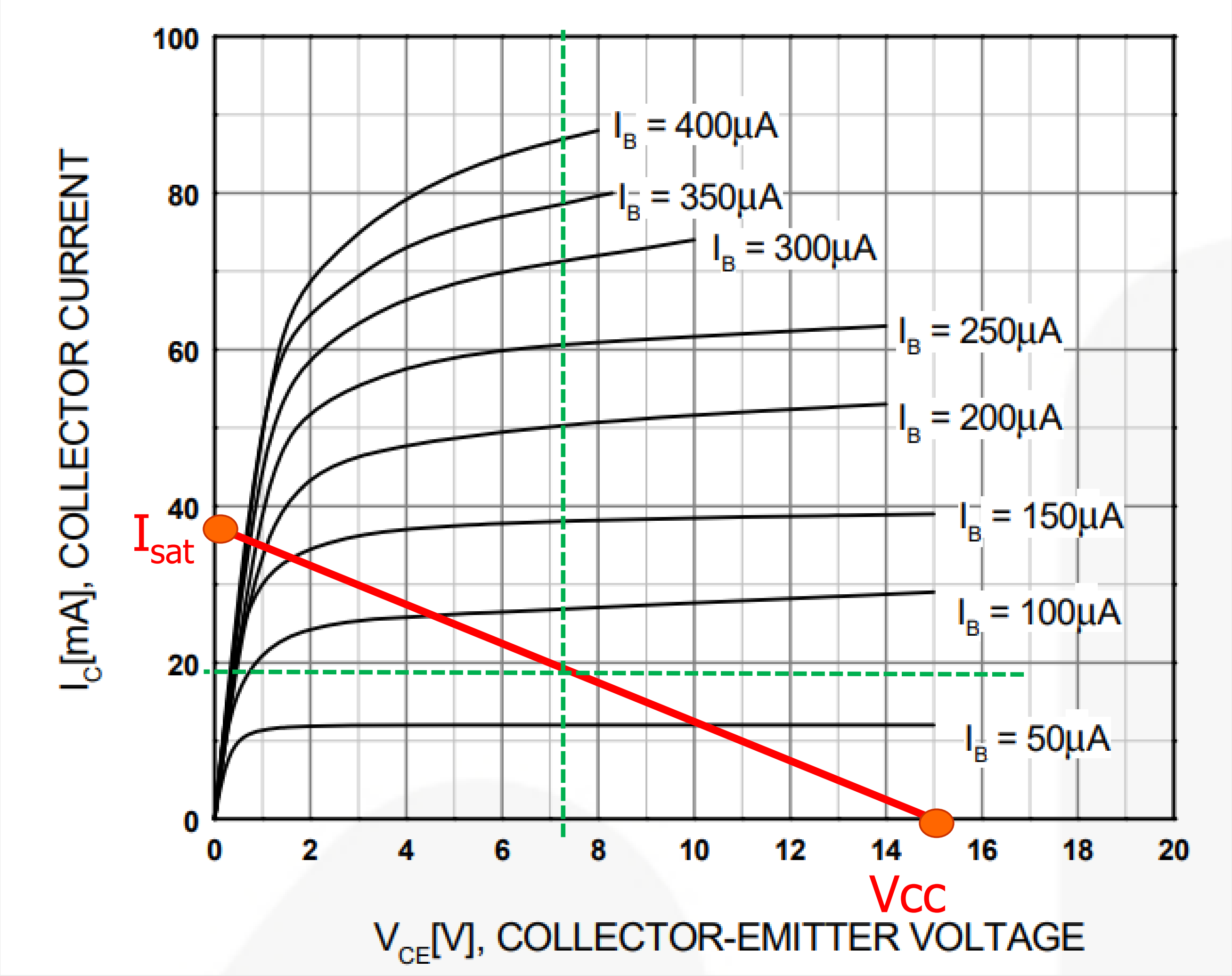
$P = V_{CE} \cdot i_E$

$P = 7{,}24V * 19{,}4mA$

$= 140mW$



# 2.5) Curva de carga




Ponto de operação é um dos pontos da curva de carga!

Válido para condições na região de operação

Curva do transistor BC 548

# 2.5) Folha de dados

## Electrical Characteristics

TA = 25°C unless otherwise noted

| Symbol | Parameter | Test Conditions | Min | Max | Units |
|---|---|---|---|---|---|
| **OFF CHARACTERISTICS** | | | | | |
| $V_{(BR)CEO}$ | Collector-Emitter Breakdown Voltage | $I_C$ = 10 mA, $I_B$ = 0 | 30 | | V |
| $V_{(BR)CBO}$ | Collector-Base Breakdown Voltage | $I_C$ = 10 μA, $I_E$ = 0 | 30 | | V |
| $V_{(BR)CES}$ | Collector-Base Breakdown Voltage | $I_C$ = 10 μA, $I_E$ = 0 | 30 | | V |
| $V_{(BR)EBO}$ | Emitter-Base Breakdown Voltage | $I_E$ = 10 μA, $I_C$ = 0 | 5.0 | | V |
| $I_{CBO}$ | Collector Cutoff Current | $V_{CB}$ = 30 V, $I_E$ = 0<br>$V_{CB}$ = 30 V, $I_E$ = 0, $T_A$ = +150 °C | | 15<br>5.0 | nA<br>μA |
| **ON CHARACTERISTICS** | | | | | |
| $h_{FE}$ | DC Current Gain | $V_{CE}$ = 5.0 V, $I_C$ = 2.0 mA **548**<br>**548A**<br>**548B**<br>**548C** | 110<br>110<br>200<br>420 | 800<br>220<br>450<br>800 | |
| $V_{CE(sat)}$ | Collector-Emitter Saturation Voltage | $I_C$ = 10 mA, $I_B$ = 0.5 mA<br>$I_C$ = 100 mA, $I_B$ = 5.0 mA | | 0.25<br>0.60 | V<br>V |
| $V_{BE(on)}$ | Base-Emitter On Voltage | $V_{CE}$ = 5.0 V, $I_C$ = 2.0 mA<br>$V_{CE}$ = 5.0 V, $I_C$ = 10 mA | 0.58 | 0.70<br>0.77 | V<br>V |
| **SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS** | | | | | |
| $h_{fe}$ | Small-Signal Current Gain | $I_C$ = 2.0 mA, $V_{CE}$ = 5.0 V,<br>f = 1.0 kHz | 125 | 900 | |
| NF | Noise Figure | $V_{CE}$ = 5.0 V, $I_C$ = 200 μA,<br>$R_S$ = 2.0 kΩ, f = 1.0 kHz,<br>$B_W$ = 200 Hz | | 10 | dB |

# 2.5) Folha de dados

## Electrical Characteristics

TA = 25°C unless otherwise noted

| Symbol | Parameter | Test Conditions | Min | Max | Units |
|---|---|---|---|---|---|
| **OFF CHARACTERISTICS** | | | | | |
| $V_{(BR)CEO}$ | Collector-Emitter Breakdown Voltage | $I_C$ = 10 mA, $I_B$ = 0 | 30 | | V |
| $V_{(BR)CBO}$ | Collector-Base Breakdown Voltage | $I_C$ = 10 μA, $I_E$ = 0 | 30 | | V |
| $V_{(BR)CES}$ | Collector-Base Breakdown Voltage | $I_C$ = 10 μA, $I_E$ = 0 | 30 | | V |
| $V_{(BR)EBO}$ | Emitter-Base Breakdown Voltage | $I_E$ = 10 μA, $I_C$ = 0 | 5.0 | | V |
| $I_{CBO}$ | Collector Cutoff Current | $V_{CB}$ = 30 V, $I_E$ = 0<br>$V_{CB}$ = 30 V, $I_E$ = 0, $T_A$ = +150 °C | | 15<br>5.0 | nA<br>μA |
| **ON CHARACTERISTICS** | | | | | |
| $h_{FE}$ | DC Current Gain | $V_{CE}$ = 5.0 V, $I_C$ = 2.0 mA **548**<br>**548A**<br>**548B**<br>**548C** | 110<br>110<br>200<br>420 | 800<br>220<br>450<br>800 | |
| $V_{CE(sat)}$ | Collector-Emitter Saturation Voltage | $I_C$ = 10 mA, $I_B$ = 0.5 mA<br>$I_C$ = 100 mA, $I_B$ = 5.0 mA | | 0.25<br>0.60 | V<br>V |
| $V_{BE(on)}$ | Base-Emitter On Voltage | $V_{CE}$ = 5.0 V, $I_C$ = 2.0 mA<br>$V_{CE}$ = 5.0 V, $I_C$ = 10 mA | 0.58 | 0.70<br>0.77 | V<br>V |
| **SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS** | | | | | |
| $h_{fe}$ | Small-Signal Current Gain | $I_C$ = 2.0 mA, $V_{CE}$ = 5.0 V, f = 1.0 kHz | 125 | 900 | |
| NF | Noise Figure | $V_{CE}$ = 5.0 V, $I_C$ = 200 μA, $R_S$ = 2.0 kΩ, f = 1.0 kHz, $B_W$ = 200 Hz | | 10 | dB |

/ BC548A / BC548B / BC548C

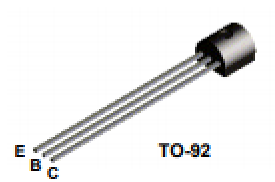
# 2.5) Folha de dados

BC548

BC548A

BC548B

BC548C




A / BC548B / BC548C

## NPN General Purpose Amplifier

This device is designed for use as general purpose amplifiers and switches requiring collector currents to 300 mA. Sourced from Process 10. See PN100A for characteristics.

### Absolute Maximum Ratings*

TA = 25°C unless otherwise noted

| Symbol | Parameter | Value | Units |
|---|---|---|---|
| $V_{CEO}$ | Collector-Emitter Voltage | 30 | V |
| $V_{CES}$ | Collector-Base Voltage | 30 | V |
| $V_{EBO}$ | Emitter-Base Voltage | 5.0 | V |
| $I_C$ | Collector Current - Continuous | 500 | mA |
| $T_J$, $T_{stg}$ | Operating and Storage Junction Temperature Range | -55 to +150 | °C |

*These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

**NOTES:**
1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 150 degrees C.
2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

### Thermal Characteristics

TA = 25°C unless otherwise noted

| Symbol | Characteristic | Max | Units |
|---|---|---|---|
| | | BC548 / A / B / C | |
| $P_D$ | Total Device Dissipation<br>Derate above 25°C | 625<br>5.0 | mW<br>mW/°C |