## Insper

# Camada Física da Computação

Aula 9 - Transistores

(2017) Rafael Corsi e Eduardo Marossi

(2016) Fábio Ayres <a href="mailto:special@insper.edu.br">fabio Ayres</a> <a href="mailto:special@insper.edu.br">fabio a@insper.edu.br</a>>

## Objetivos

 Explicar o funcionamento do transistor bipolar de junção.

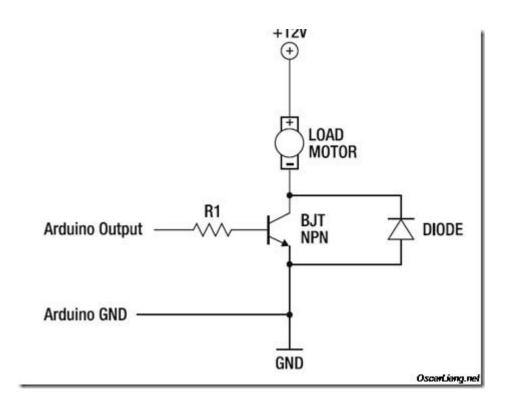
Entender o circuito-modelo do transistor

 Analisar o comportamento do transistor em um circuito amplificador básico.

#### Usos

- Amplificação de sinais
- Como chave (ON/OFF)
- Como elementos para circuitos lógicos (ultrapassado)

## Exemplo: acionamento de motor



## No início era a válvula...



By Stefan Riepl (Quark48) - Self-photographed, CC BY-SA 2.0 de, <a href="https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14682022">https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14682022</a>



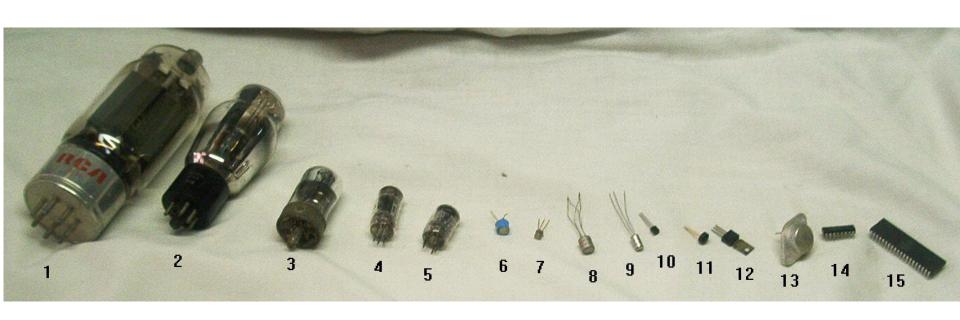
Harwell Dekatron vacuum-tube (valve) computer, 1951-57 - National Museum of Computing, Bletchley Park, England





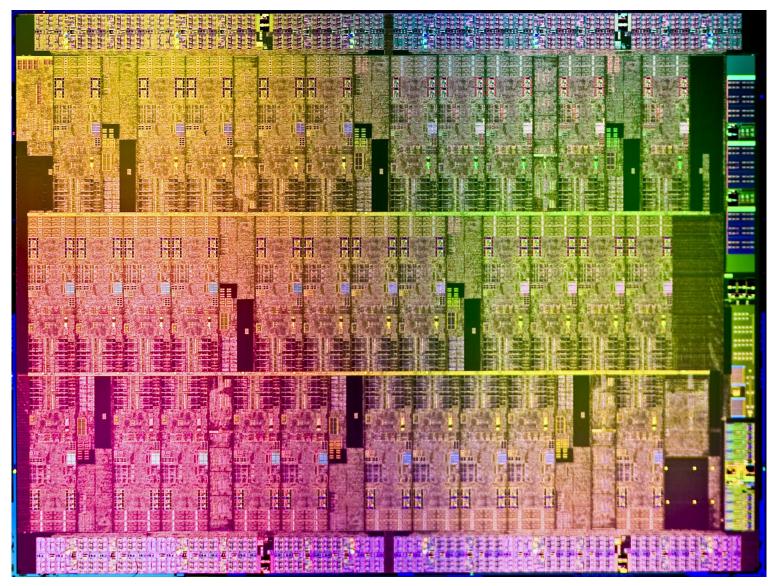
## Evolução!

http://mmncny.org/exhibits/296-2/





## Evolução !!!





#### Controle de corrente

 Ideia principal: controlar a corrente elétrica usando outra corrente ou tensão elétrica!

- A mesma ideia se aplica a diodos semicondutores e transistores
  - Usar um sinal fraquinho para controlar um sinal forte!

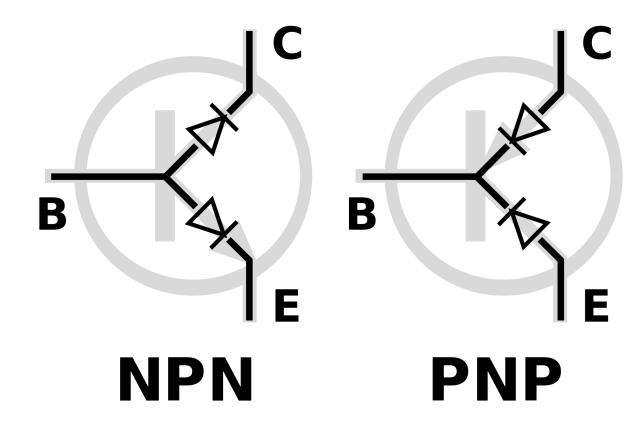
# Transistor de junção bipolar (Bipolar junction transistor – BJT)



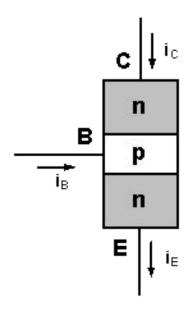
John Bardeen, William Shockley and Walter Brattain at Bell Labs, 1948.

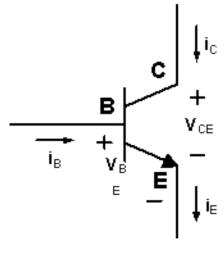
#### **Transistores BJT**

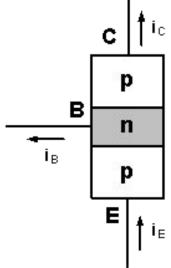
Dois "diodos" no mesmo silício polarizados reversamente!

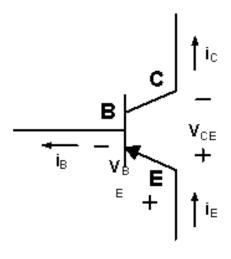


## **BJT**







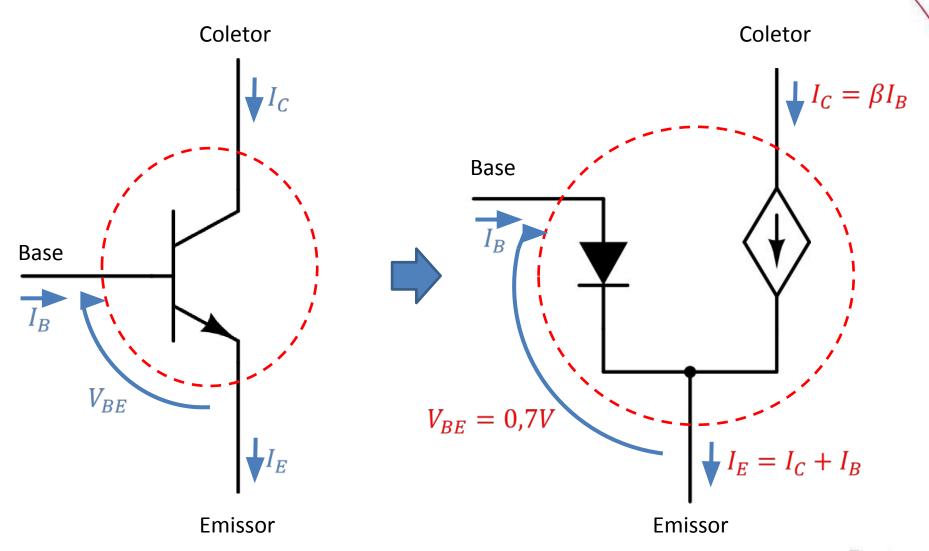


#### Modelo do transistor

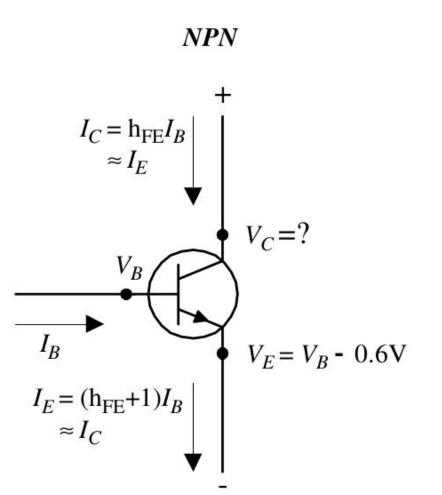
 Vamos resumir o comportamento do transistor em um circuito-modelo simples.
 Temos que considerar:

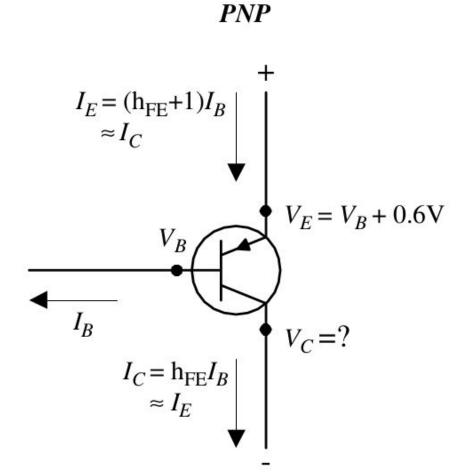
- A junção base-emissor comporta-se como um diodo
- A soma das correntes é zero
- A corrente do coletor é β vezes a corrente da base

### Modelo do transistor

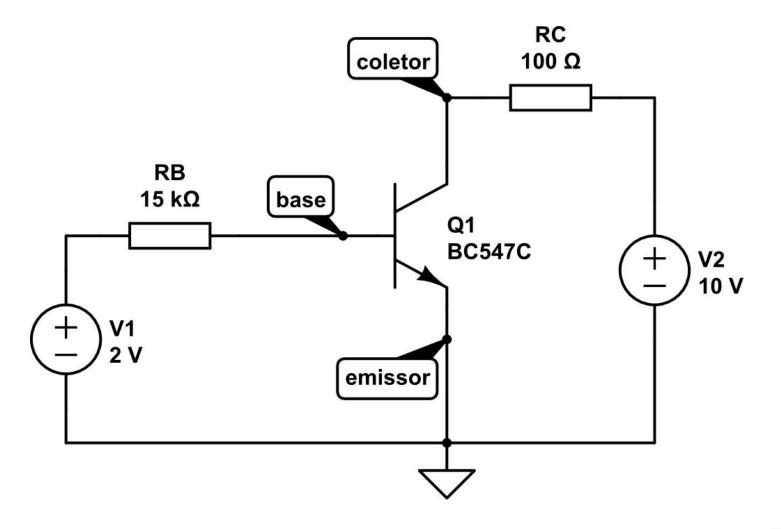


#### NPN e PNP





# Polarização do transistor: meu primeiro amplificador!



## Datasheet

#### **ON CHARACTERISTICS**

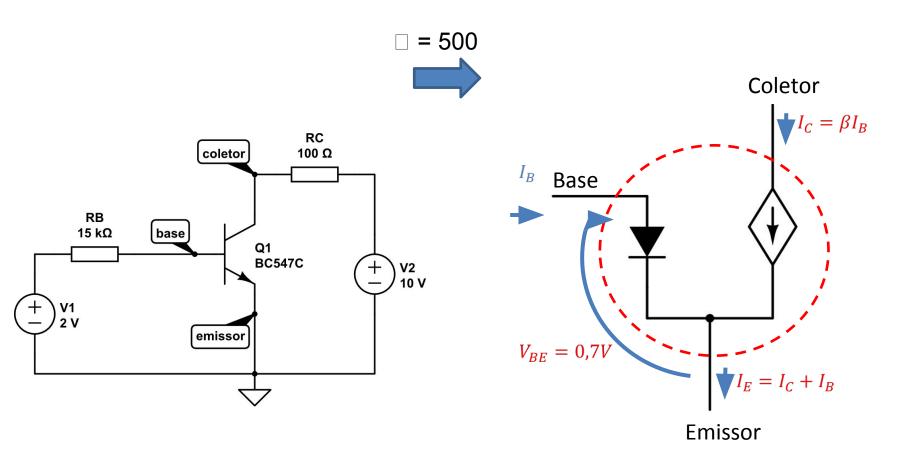
h <sub>FE</sub>	DC Current Gain	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_{C} = 2.0 \text{ mA}$	547	110	800	
			547A	110	220	
			547B	200	450	
			547C	420	800	
V <sub>CE(sat)</sub>	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_{\rm C} = 10 \text{ mA}, I_{\rm B} = 0.5 \text{ mA}$			0.25	V
		$I_C = 100 \text{ mA}, I_B = 5.0 \text{ mA}$			0.60	V
V <sub>BE(on)</sub>	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_{C} = 2.0 \text{ mA}$		0.58	0.70	V
		$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_{C} = 10 \text{ mA}$			0.77	V



#### Exercício

- 1. Calcule a corrente na base e no coletor. Assuma que este transistor tem  $\beta = 520$ , e que  $V_{RF} = 0.7V$ .
- 2. Calcule a tensão no coletor.
- 3. Faça uma simulação DC sweep variando a tensão V1 entre 0 e 5V, em passos de 0,1V. Explique o gráfico observado.
- 4. Derive uma expressão para a tensão de saída em função da tensão de entrada, na zona linear de operação do amplificador.
- 5. Compare o ganho obtido analiticamente com a inclinação da curva experimental.

## Resolver o circuito a partir do modelo





## Handout

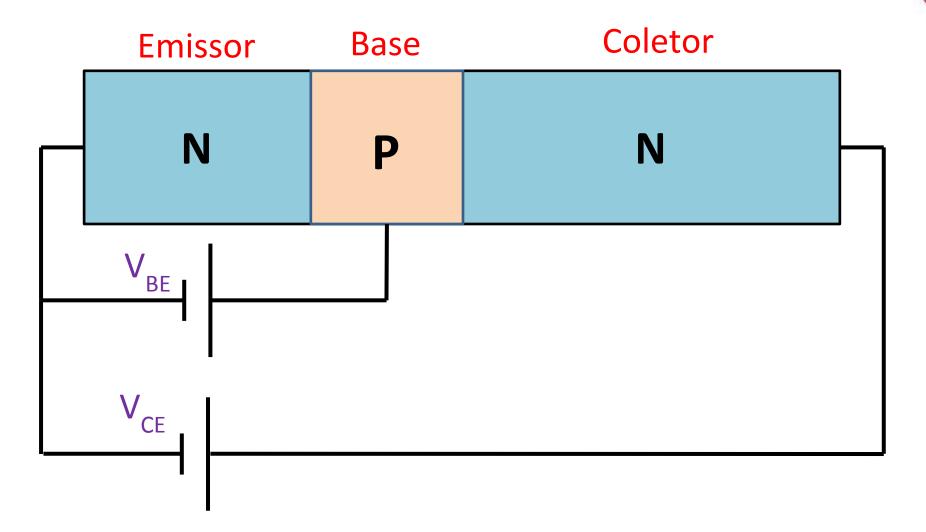
Handout 1 - 15 minutos



#### Como funciona?



## Como funciona?



## Construção do transistor

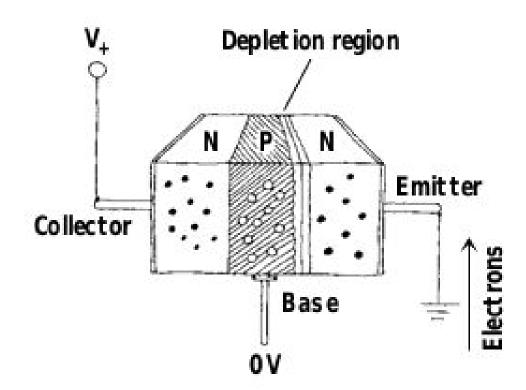
• Emissor: altamente dopado

· Coletor: dopagem média, maior extensão

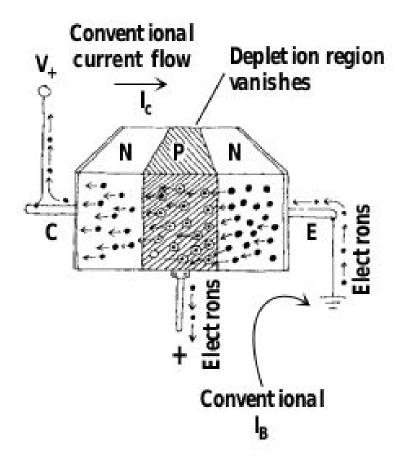
Base: fininha, dopagem baixa



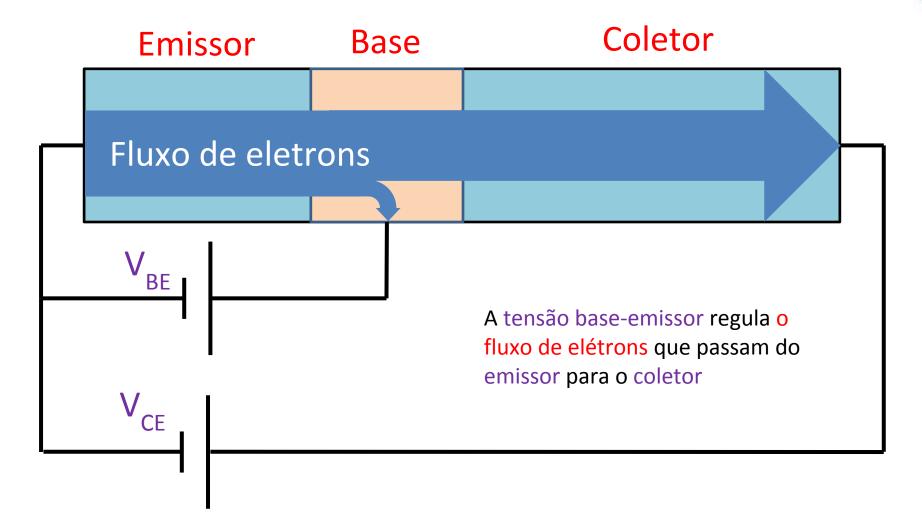
### Transistor off



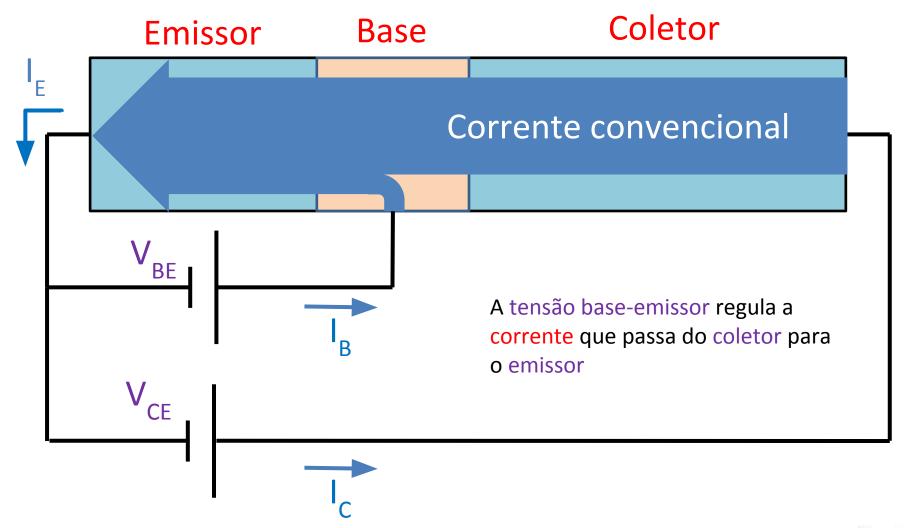
#### Transistor on



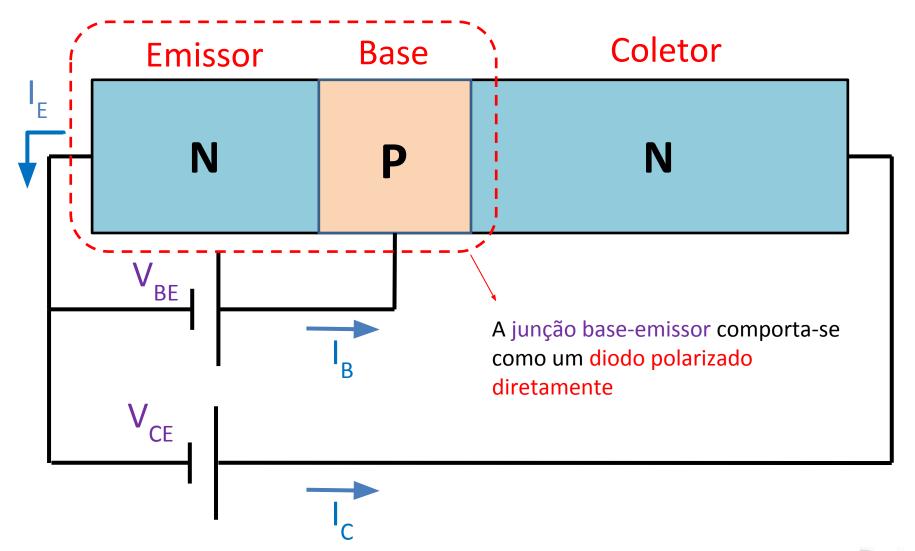
#### Como funciona?



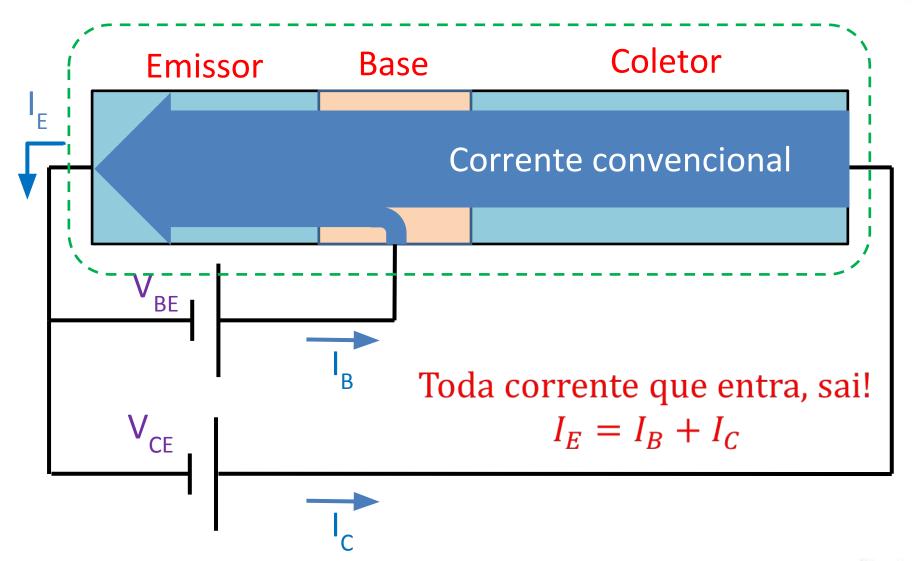
#### Como funciona?



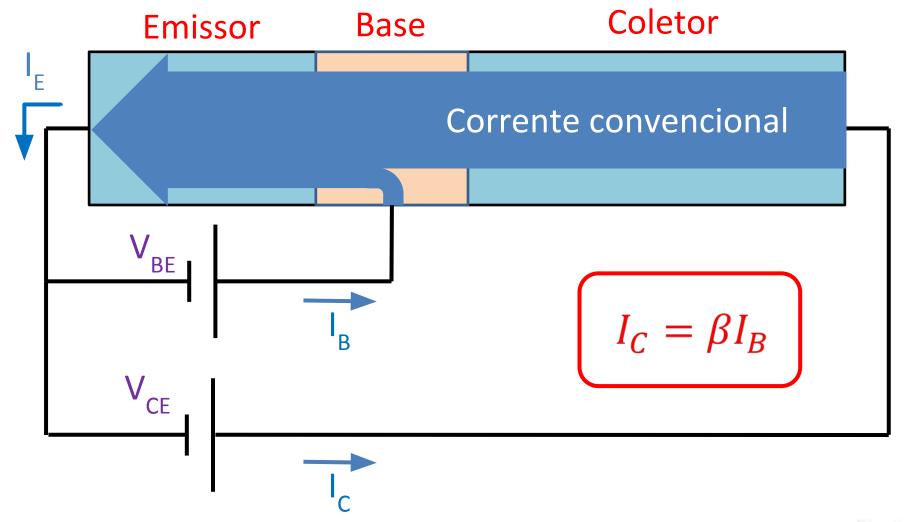
## Junção base-emissor



#### Lei de Kirchhoff das correntes!



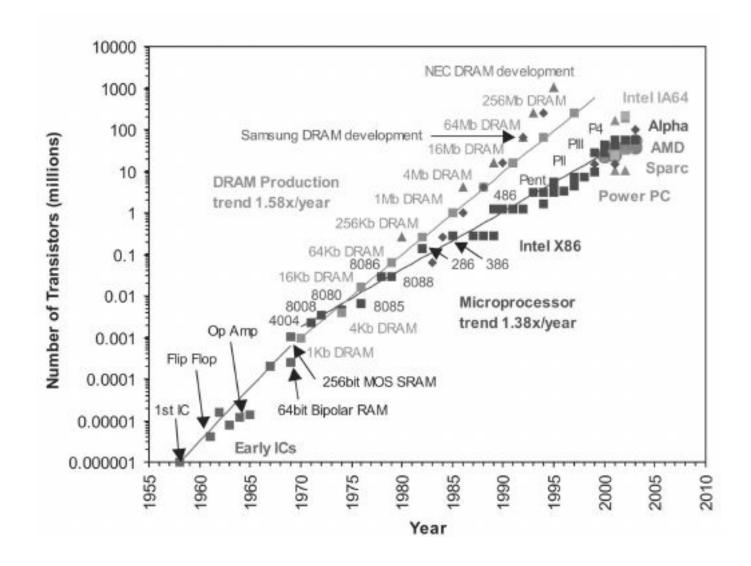
## Amplificação de corrente: a razão-de-ser do transistor!



Insper

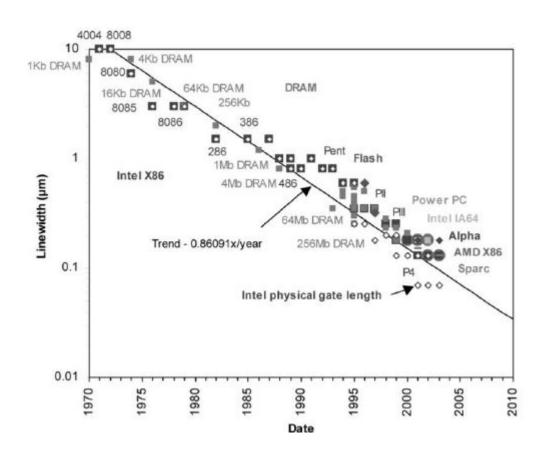
## MOSFET, CMOS

# Evolução da quantidade de transitores em um chip



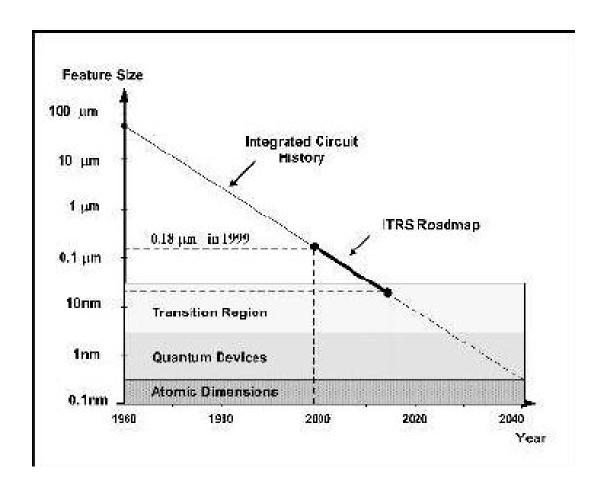


# Tamanho dos transistores no tempo





# Tamanho dos transistores no tempo





#### **BJT**

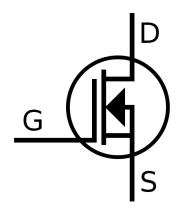
#### O transistor BJT apresenta defeitos:

- opera por corrente -> consumo de energia maior
- difícil de escalar (processo de fabricação)
- grande variação de ganho entre transistores



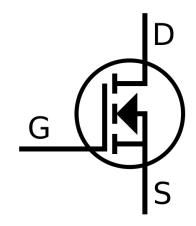
#### **MOSFET**

 Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor



Fonte: Wikipedia

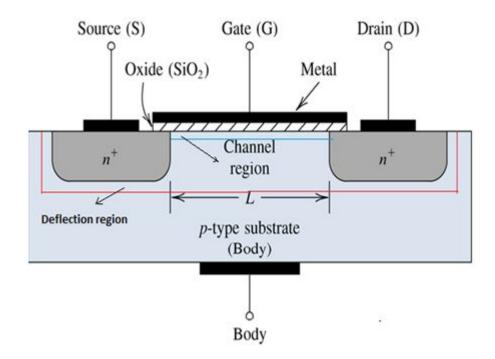
Depleção (depletion)

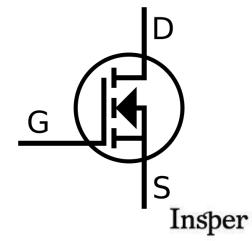


Fonte: Wikipedia

Intensificação (enhancement)

## **MOSFET**



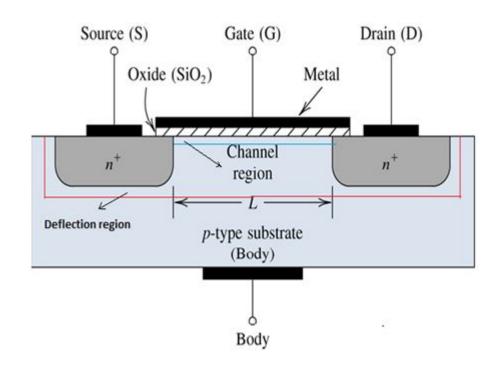


## Handout

Handout 2 - 10 minutos

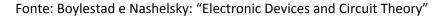


## MOSFET intensificação

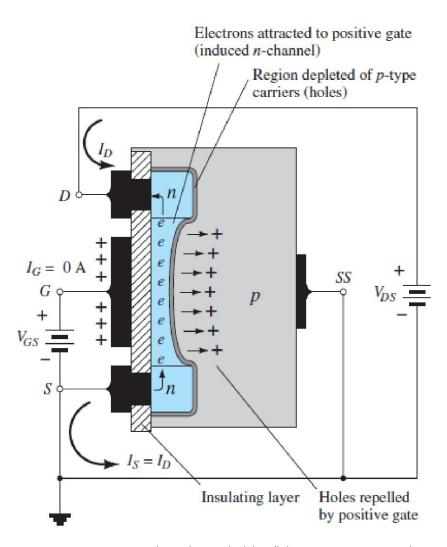


Valem as mesmas observações do MOSFET depleção, exceto que:

- Note a ausência de canal: o canal será induzido por V<sub>GS</sub>!
- Equações são diferentes do JFET.
   Feito para trabalhar com V<sub>GS</sub> > 0V



# Como funciona? (MOSFET intensificação)



Caso inicial:  $V_{DS} = 0V$ 

- A tensão V<sub>GS</sub> atrai elétrons para a proximidade da placa isolante
- Estes elétrons formam um canal
- Este MOSFET é do tipo canal-n (n-channel)
- Quando V<sub>GS</sub> aumentar o canal permitirá a condução de corrente entre o dreno e a fonte

## Resolução

Resolver circuitos com MOSFET não é uma tarefa trivial :

- 1. O MOSFET possui três regiões de operação:
  - Corte (não conduz corrente)
  - Linear (conduz corrente relativo a tensão V<sub>GS</sub>)
  - Saturação (máxima corrente)

## Resolução

#### Corte:

- canal não está formado

$$V_{GS} < V_{TH}$$

### Região linear:

- canal formado

$$V_{GS} < V_{TH} e V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$$

Saturação

- canal está no máximo

$$V_{GS} < V_{TH} e V_{DS} >= V_{GS} - V_{TH}$$

## Resolução

 Para cada modo de operação, uma equação diferente :

Linear: 
$$I_D=\mu_n C_{ox} rac{W}{L} \left((V_{GS}-V_{th})V_{DS}-rac{V_{DS}^2}{2}
ight)$$

Saturação: 
$$I_D=rac{\mu_n C_{ox}}{2}rac{W}{L}(V_{GS}-V_{th})^2\left[1+\lambda(V_{DS}-V_{DSsat})
ight].$$

## Insper

www.insper.edu.b

http://www.electronics-tutorials.ws/transist or/tran\_3.html