

# ELETRICIDADE E ELETRÔNICA ANALÓGICA

TÉCNICO EM MECATRÔNICA

ENG<sup>o</sup> MARIO TENANI  
[ntenani@bol.com.br](mailto:ntenani@bol.com.br)



# EMENTA – 4hs

## **AULA 8 Turma: B (31/03/2010) e A(01/04/2010)**

- Introdução
  - Sua Majestade... A válvula!
  - Novo Rei... O Semicondutor!
- Semicondutores
  - Bandas de Energia;
  - Materiais;
  - Condução Elétrica;
  - Semicondutores tipo N e P;
- Diodos Semicondutor
  - Junção PN;
  - Simbologia;
  - Polarização da Junção PN;
  - Curva Característica;
  - Conceito de Reta de Carga;

# EMENTA – 4hs

## **AULA 9 Turma: B (5/04/2010) e A (06/04/2010)**

- Circuitos com Retificadores (Diodo Semicondutor)
  - Transformador
  - Retificador de Meia Onda
  - Retificador de Onda Completa com Derivação Central
  - Retificação de Onda Completa em Ponte
  - Filtro Capacitivo
  - LED
- Transistores
  - A Revolução
  - O Transistor Bipolar
  - Funcionamento dos Transistores NPN e PNP
  - Efeito de Amplificação
  - Configurações Básicas

# EMENTA – 4hs

**AULA 10 Turma: B (07/04/2010) e A (08/04/2010)**

- Transistores
  - Polarização em EC
  - Influência da Temperatura
  - Transistor como chave

# EMENTA – 4hs

## **AULA 11 Turma: B (09/04/2010) e A (12/04/2010)**

- Avaliação Teórica s/ Consulta
- Conteúdo: Aulas de 8 a 10
- Finalização da Unidade Curricular!

**BONS ESTUDOS!**

# EMENTA – 4hs

**AULA 12 Turma: B (13/04/2010) e A (14/04/2010)**

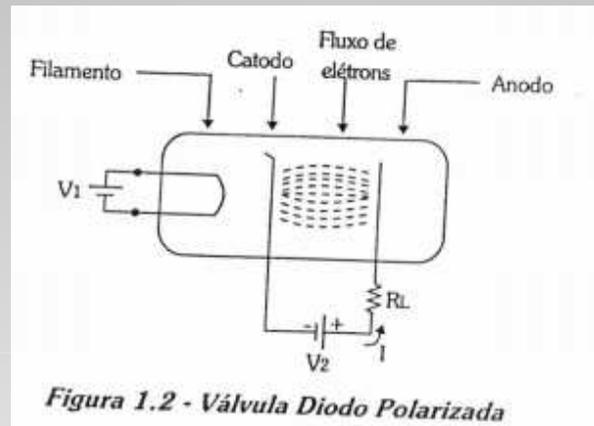
- Exame Final

# Sua majestade... A Válvula !



Criada em 1904 por John Ambrose Fleming

# Sua majestade... A Válvula !



- I. Vlv Diodo: Permitiu conduzir a  $i$  em único sentido.
- II. Vlv Triodo: Permitiu controlar o fluxo de eletrons, possibilitando a amplificação de sinais.

# Novo Rei... O Semicondutor !

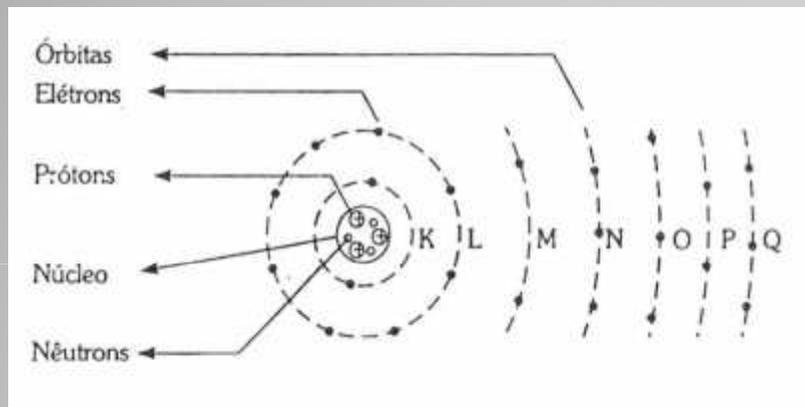
Com a utilização de materiais semicondutores, surge na década de 40 o **diodo semicondutor** e logo em seguida o **transistor**.

Semicondutores: Silício(Si) e Germânio(Ge)

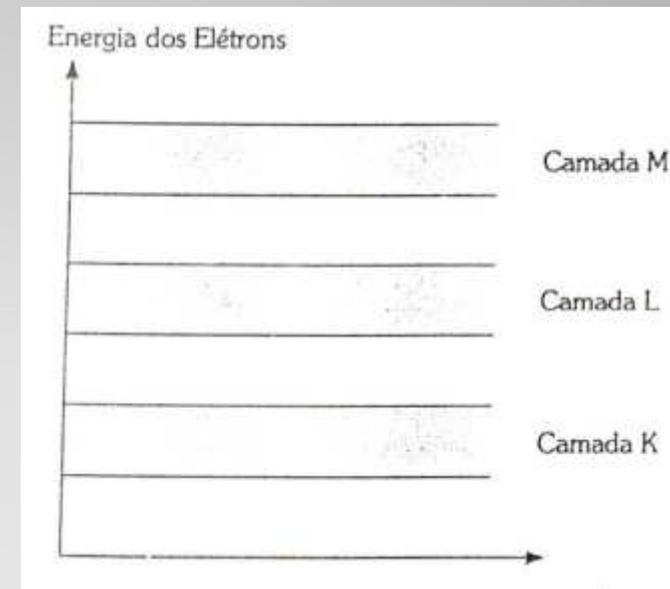
Silício: é mais utilizado devido sua abundancia na natureza, pode ser obtido através do quartzo que é encontrado na areia da praia e na terra.

# Semicondutor

## Bandas de Energia



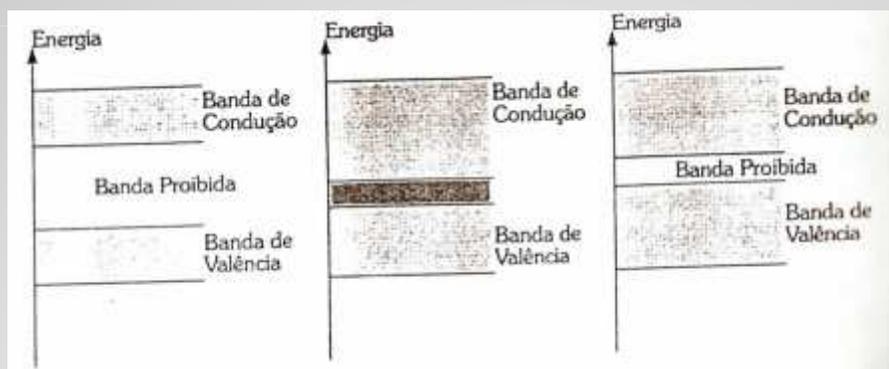
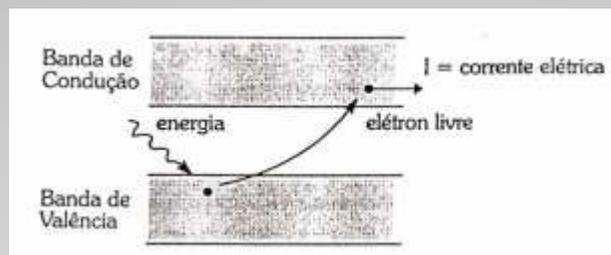
Modelo Atômico de Bohr



Níveis de Energia de um Átomo

# Semicondutor

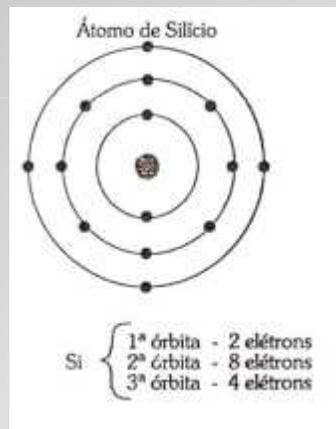
## Bandas de Energia



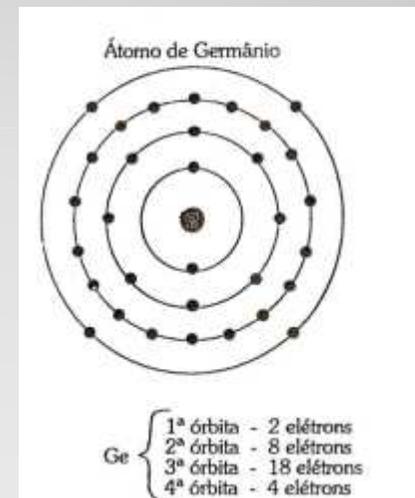
Isolantes, Condutores e Semicondutores

# Semicondutor Materiais

Silício (Si)



Germânio(Ge)

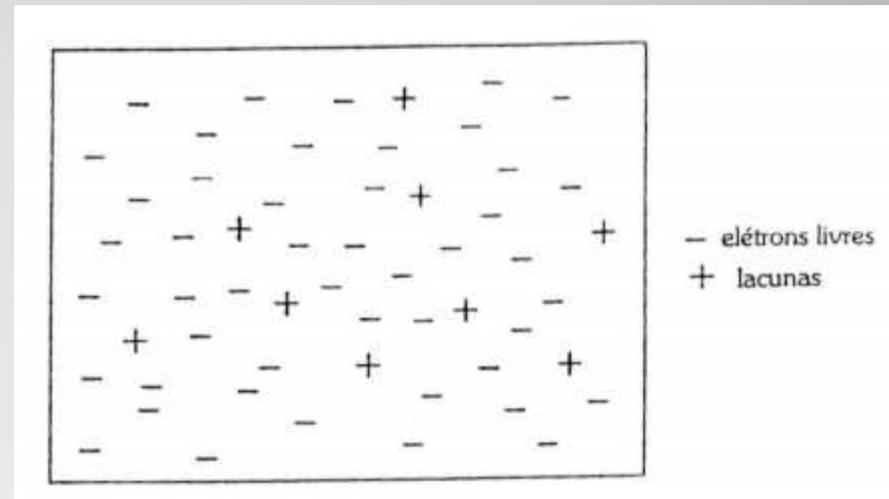
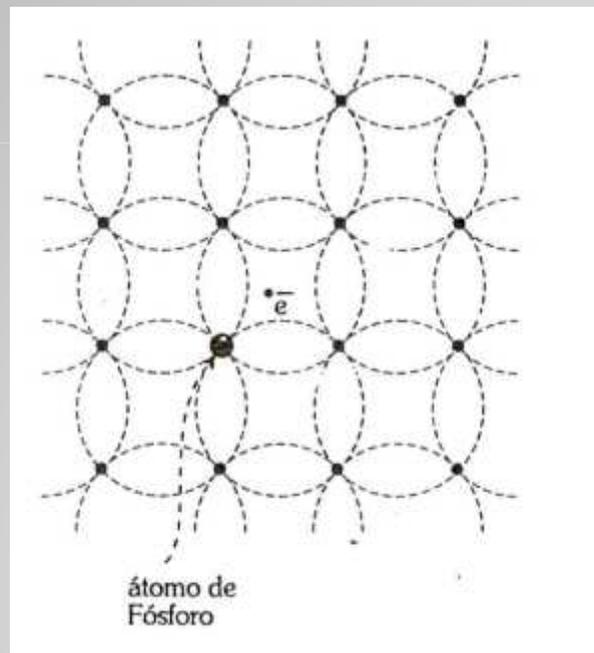


Tetravalentes

# Semicondutor

## Dopagem: Tipo N

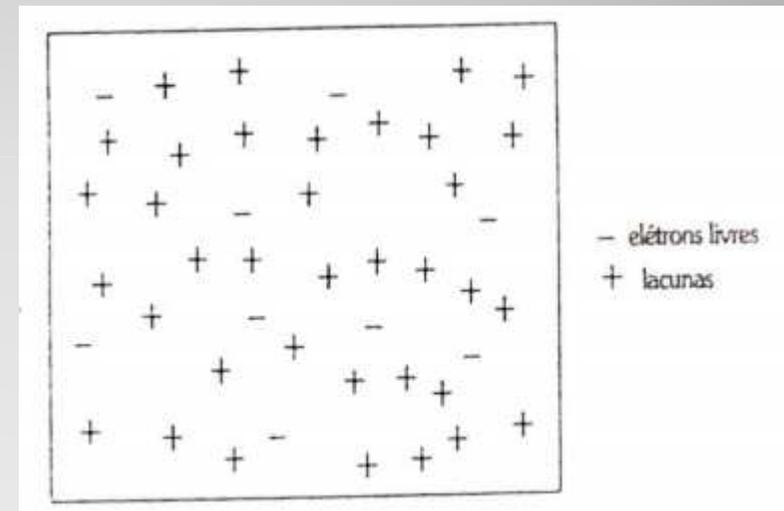
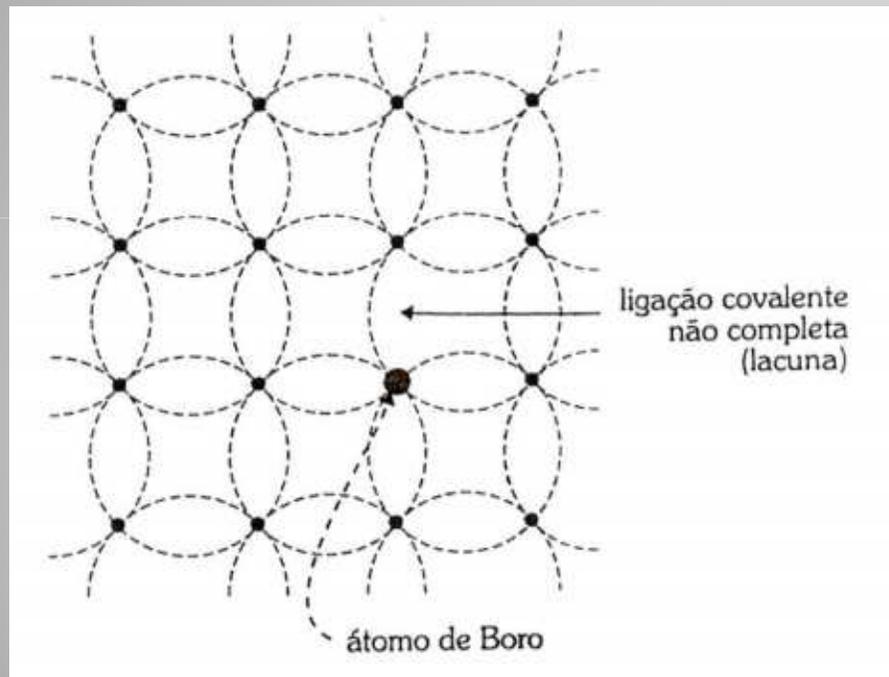
Material Pentavalente: Arsênio (As), Antimônio (Sb) e o Fósforo (P)



# Semicondutor

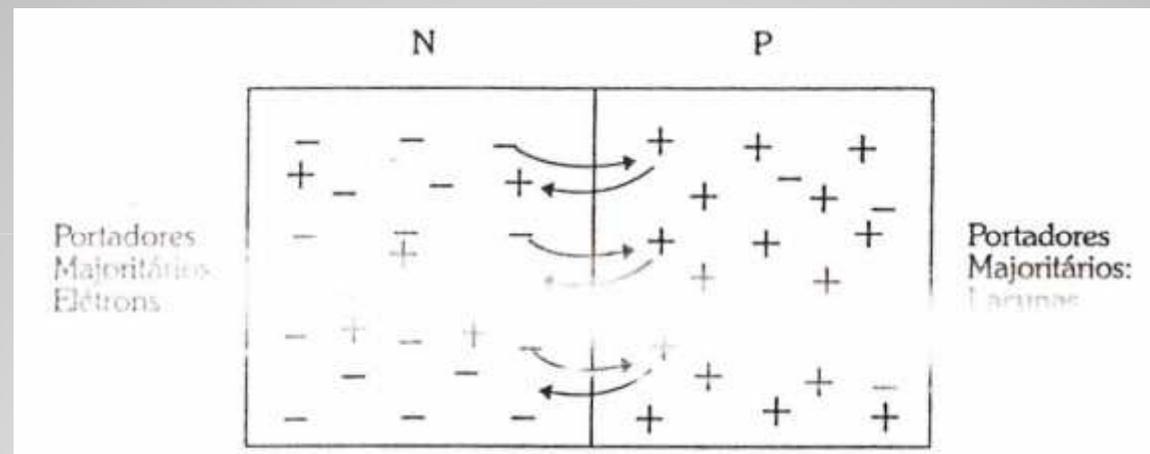
## Dopagem: Tipo P

Material Trivalente: Alumínio (Al), Boro (B) e o Gálio (Ga)



# Diodo Semicondutor

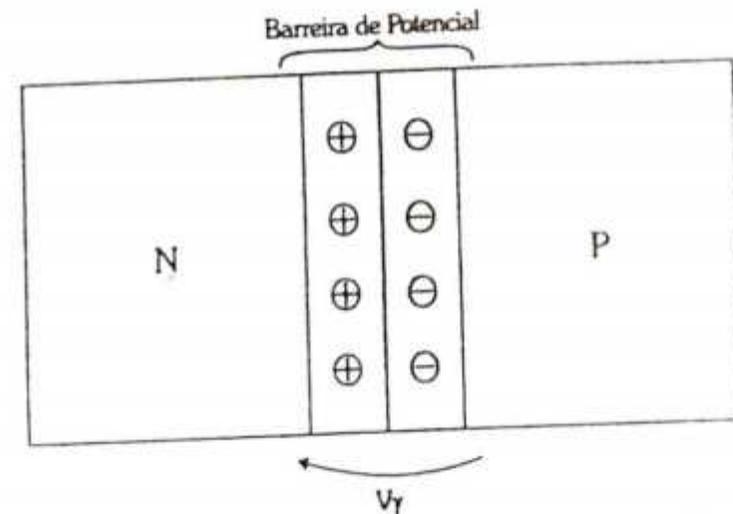
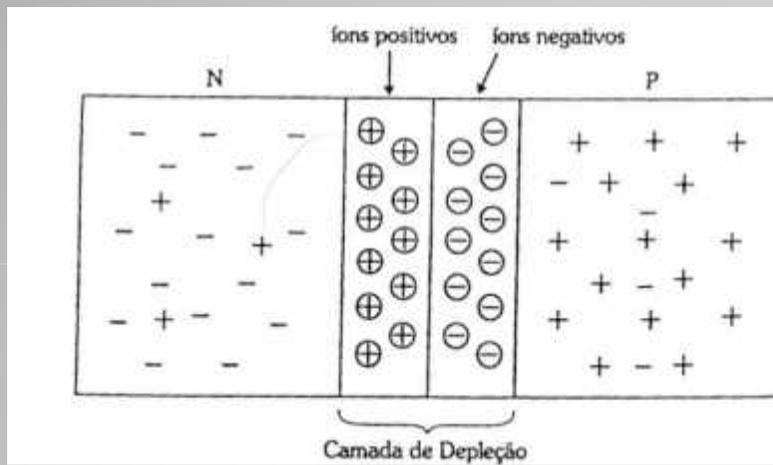
## Junção PN



Diferença de Potencial:  
Silício=0,7V e Germânio=0,3V (25°C)

# Diodo Semicondutor

## Junção PN



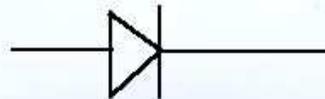
Diferença de Potencial:  
Silício=0,7V e Germânio=0,3V (25°C)

# Diodo Semicondutor

## Simbologia

Diode:

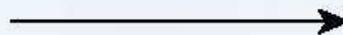
Diagram  
equivivalent:



Real life  
image:



Current flow:

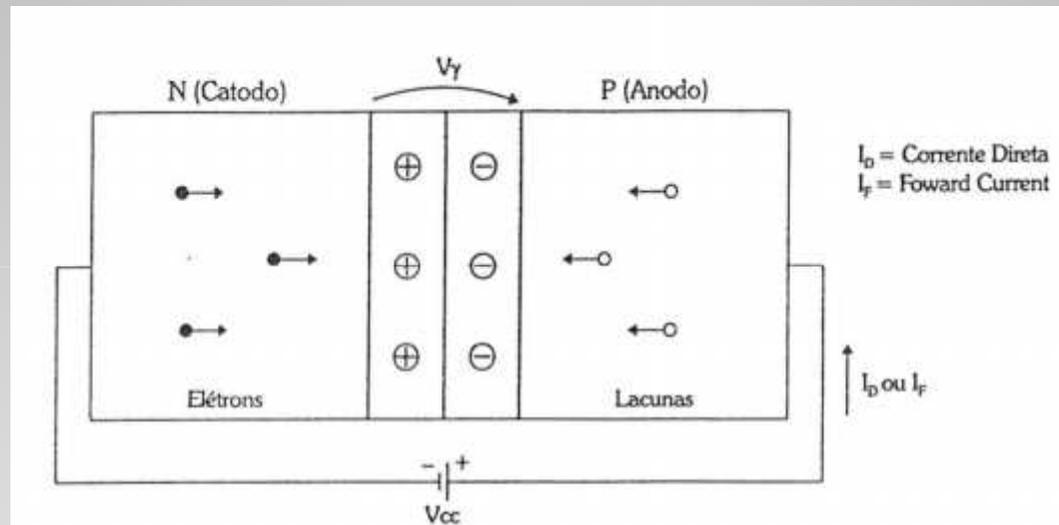


<http://faq.auto.light.tripod.com/>  
by Herman

# Diodo Semicondutor

## Polarização da Junção PN

Direta:

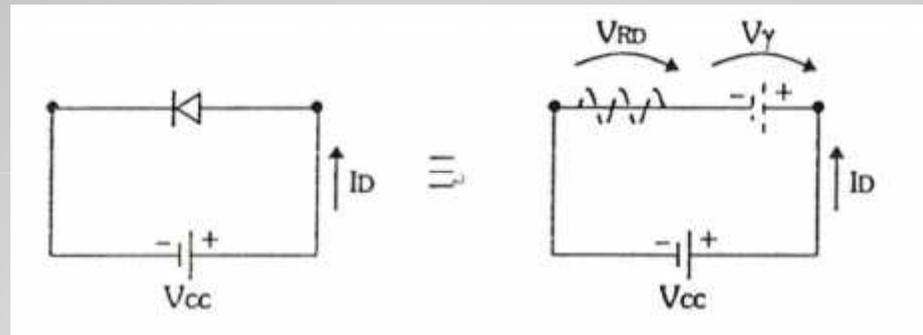


Diferença de Potencial:  
Silício=0,7V e Germânio=0,3V (25°C)

# Diodo Semicondutor

## Polarização da Junção PN

Direta:

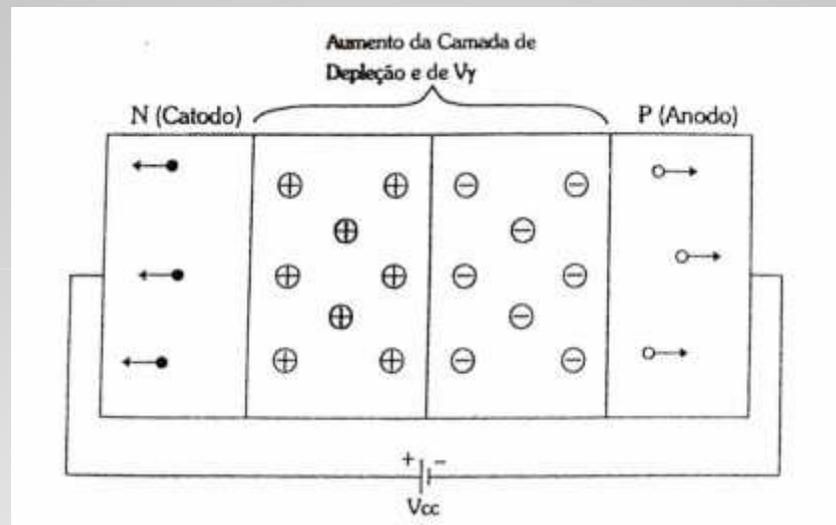


Diferença de Potencial:  
Silício=0,7V e Germânio=0,3V (25°C)

# Diodo Semicondutor

## Polarização da Junção PN

Reversa:

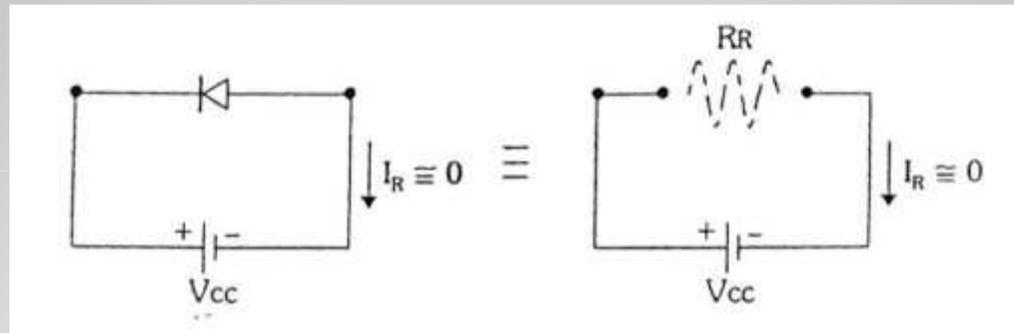


Diferença de Potencial:  
Quanto maior a tensão da fonte maior a barreira de potencial.

# Diodo Semicondutor

## Polarização da Junção PN

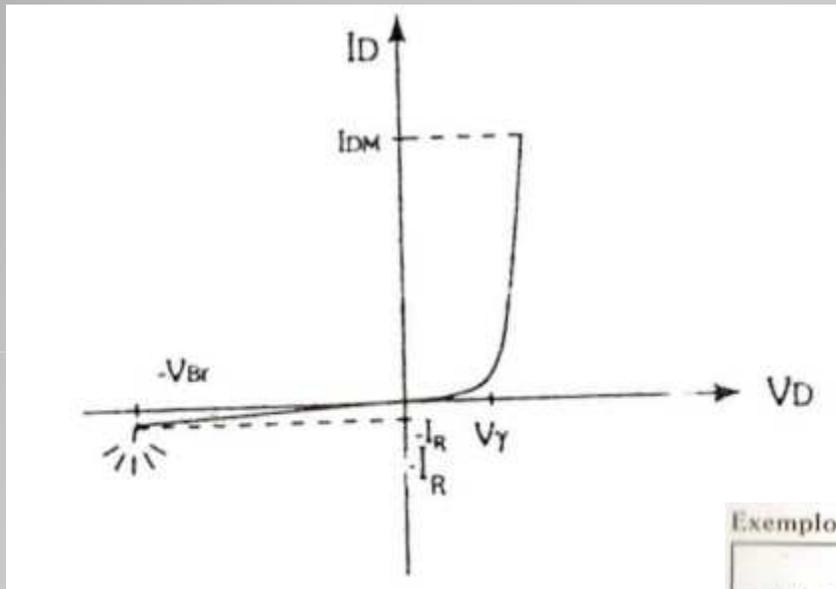
Reversa:



Diferença de Potencial:  
Silício=0,7V e Germânio=0,3V (25°C)

# Diodo Semicondutor

## Curva Característica



$V_{br}$  = Tensão de Ruptura.  
 $V_{\gamma}$  = Barreira de potencial.  
 $I_{DM}$  = Corrente Direta Máxima.  
 $I_r$  = Corrente de fuga.

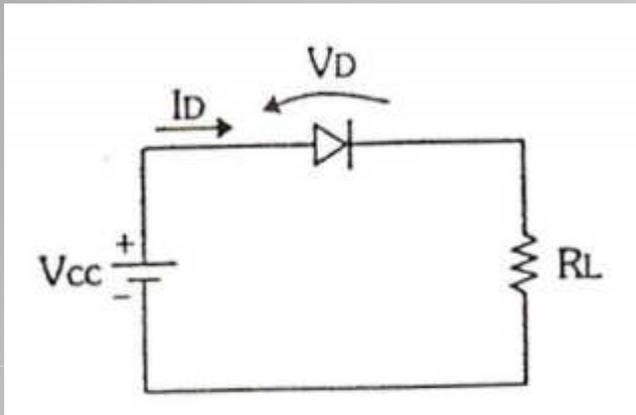
Exemplo:

O diodo de código 1N4001 tem as seguintes especificações dadas pelo fabricante:

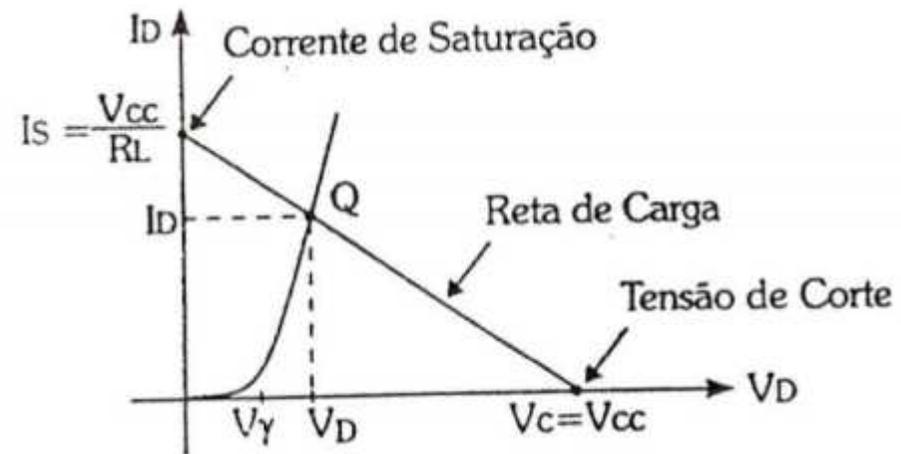
Corrente Direta Máxima	$I_{DM}$	1A
Corrente de Fuga	$I_r$	10 $\mu$ A
Tensão de Ruptura	$V_{Br}$	50V
Potência Máxima	$P_{DM}$	1W

# Diodo Semicondutor

## Reta de Carga

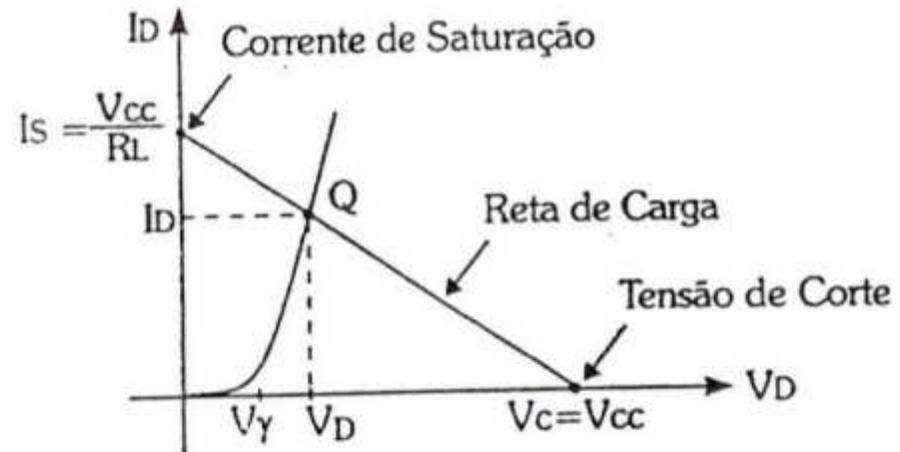
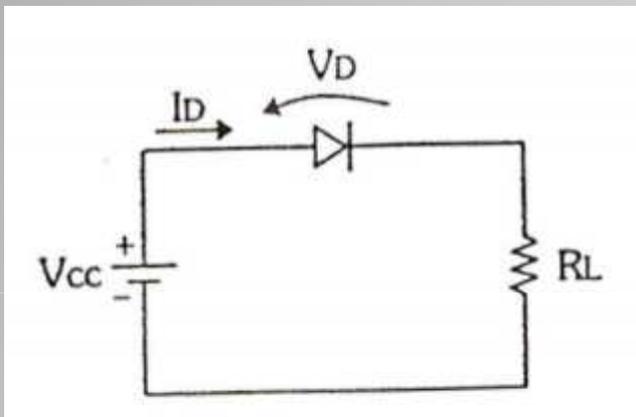


**Ponto de trabalho** ou **ponto quiescente(Q)** são os valores  $V_D$  e  $I_D$  que o diodo está submetido no circuito.



# Diodo Semicondutor

## Reta de Carga: i

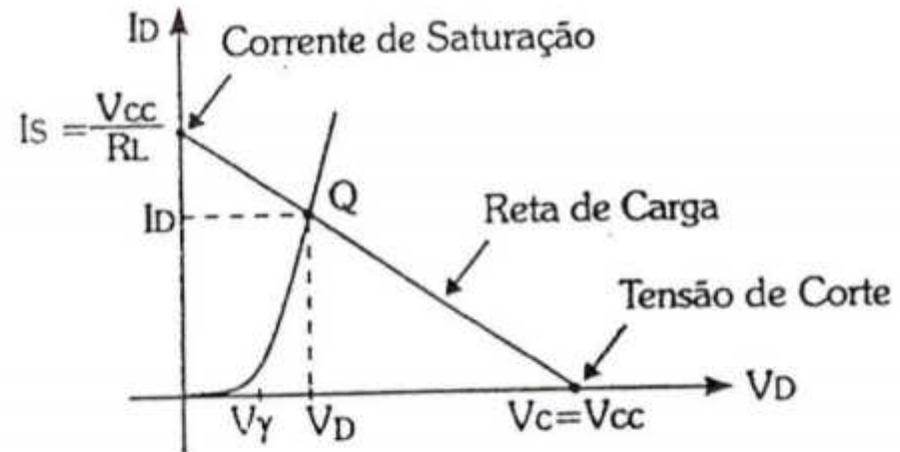
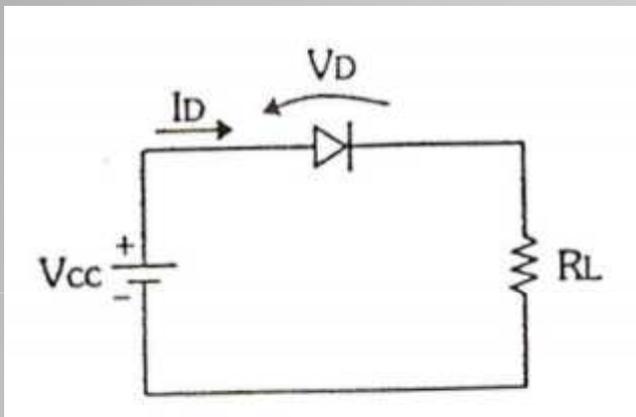


1) Determina-se a **tensão de corte  $V_c$**  (tensão no diodo quando ele está aberto);

$$V_c = V_{cc}$$

# Diodo Semicondutor

## Reta de Carga: ii

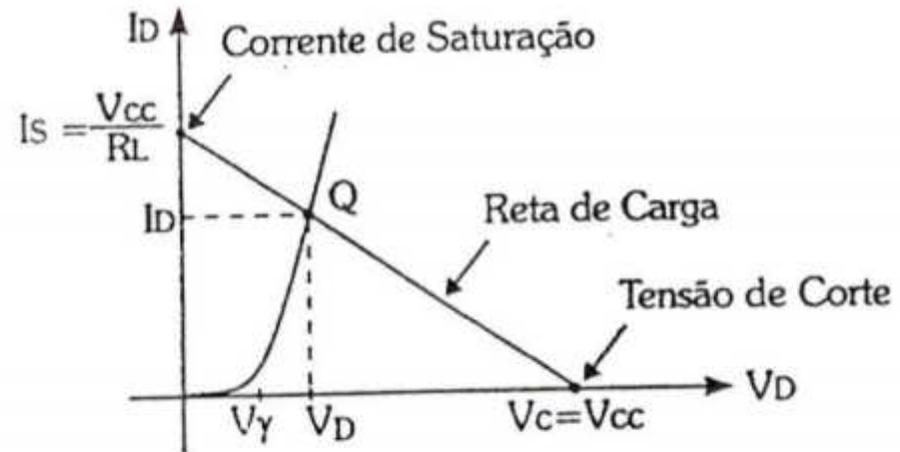
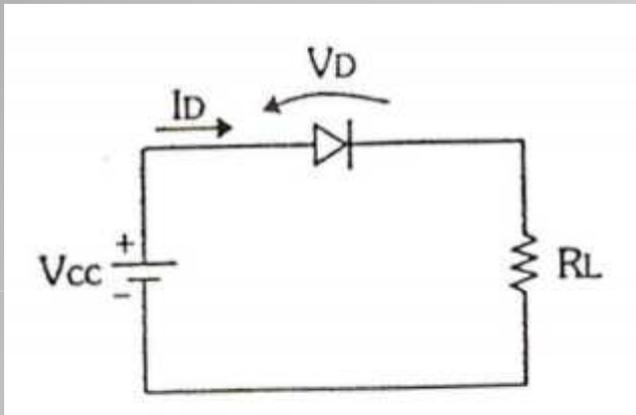


2) Determina-se a **corrente de saturação  $I_S$**  (corrente no diodo quando ele está em curto);

$$I_S = \frac{V_{cc}}{R_L}$$

# Diodo Semicondutor

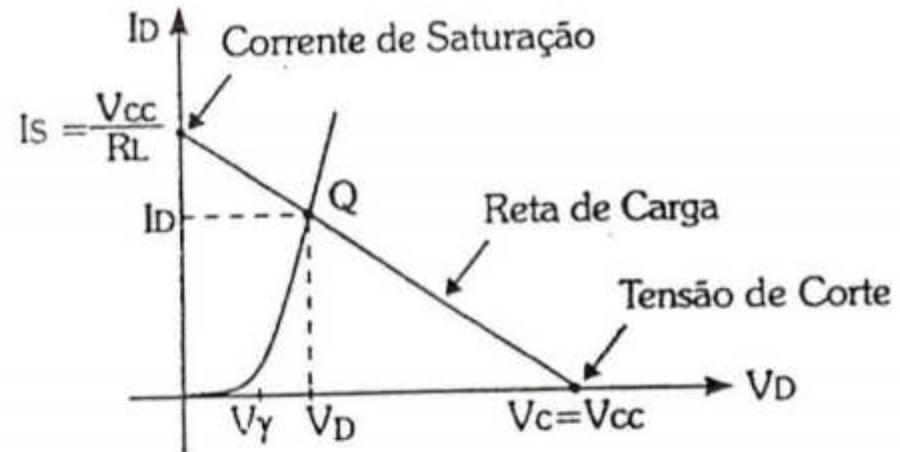
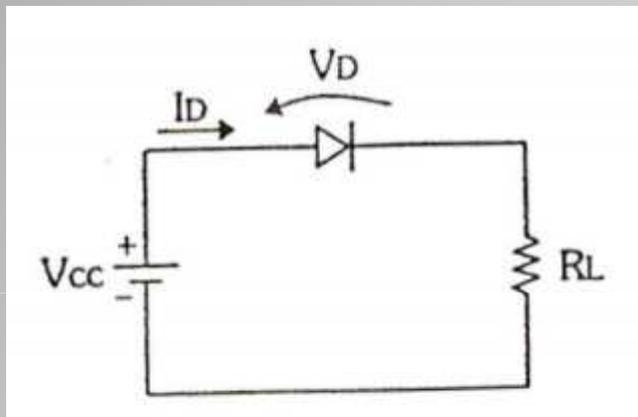
## Reta de Carga: iii



3) Traça-se a reta de carga sobre a curva característica do diodo;

# Diodo Semicondutor

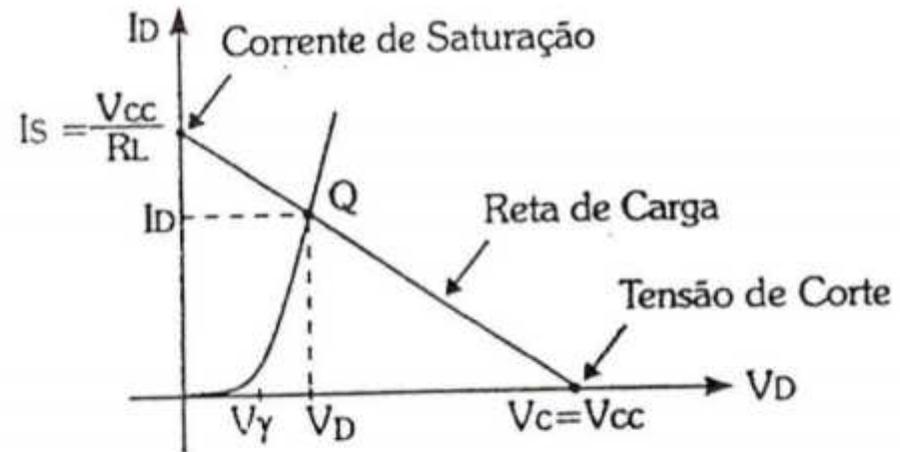
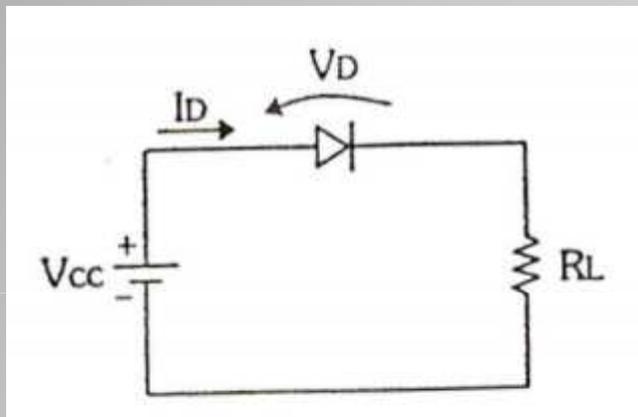
## Reta de Carga: $i_v$



4) O ponto quiescente ( $V_D$  e  $I_D$ ) corresponde exatamente às coordenadas do ponto  $Q$  onde a reta de carga intercepta a curva característica do diodo.

# Diodo Semicondutor

## Reta de Carga: v

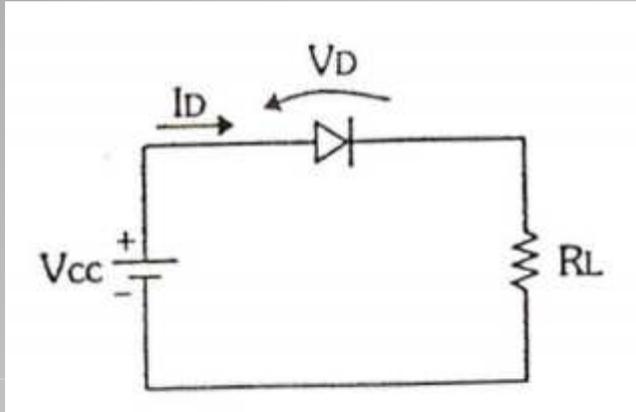


5) Pode-se, também, calcular a potência de dissipação do diodo pela equação:

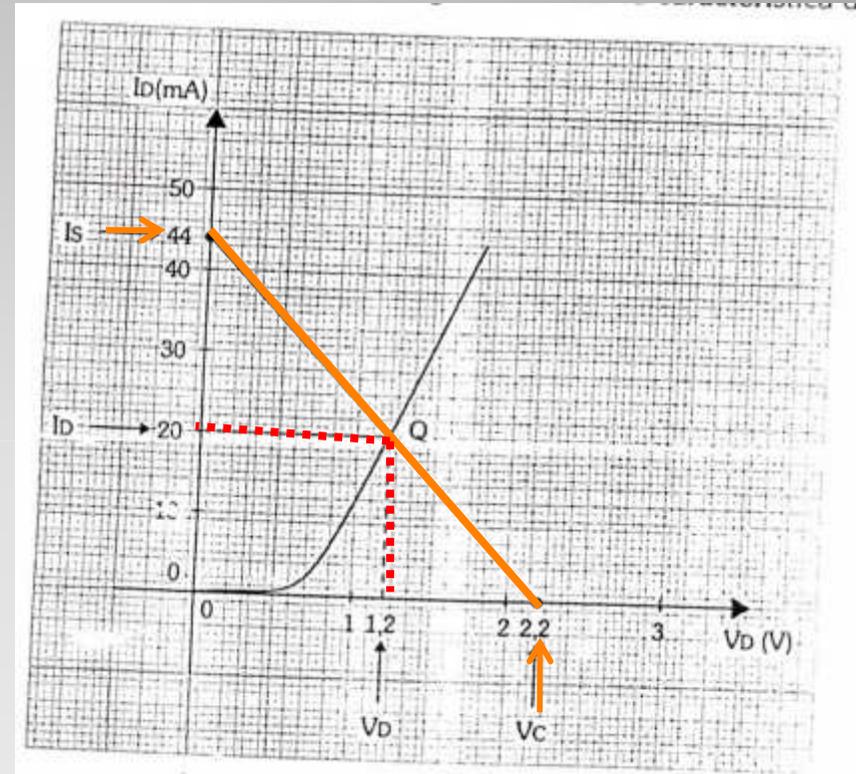
$$P_D = V_D \cdot I_D$$

# Diodo Semicondutor

## Reta de Carga: v



Dados:  $R_L=50\Omega$  e  $V_{cc}=2,2V$   
Como a tensão de corte  
 $V_c=V_{cc}=2,2V$  e a corrente de  
saturação  
 $I_s=V_{cc}/R_L=2,2/50=44mA$   
Portanto,  $V_D=1,2$  e  $I_D=20mA$   
Logo,  $P_D=V_D*I_D=1,2*20E-$   
 $3=24mW$



# Diodo Semicondutor

## Reta de Carga: v

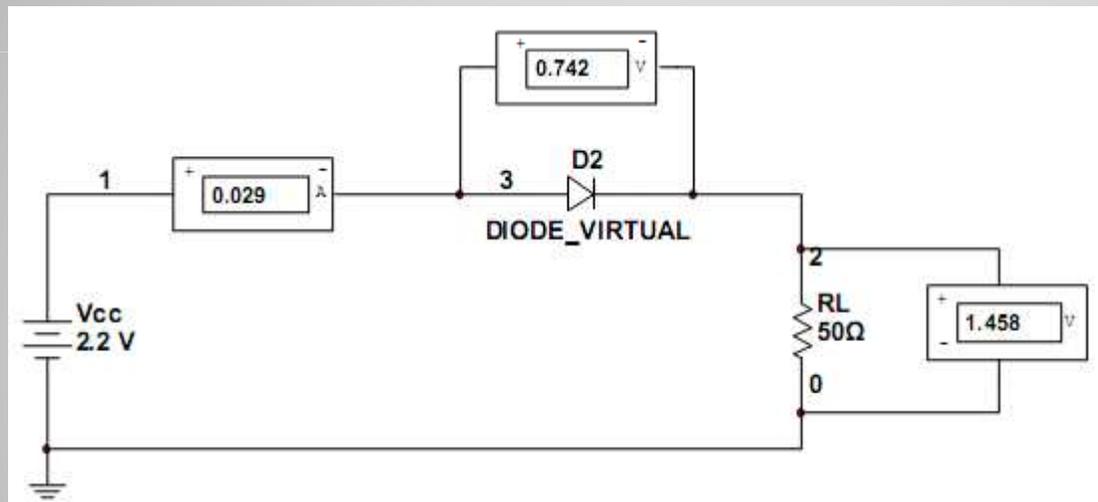
Dados:  $R_L=50\Omega$  e  $V_{cc}=2,2V$

Como a tensão de corte  $V_c=V_{cc}=2,2V$  e a corrente de saturação

$I_s=V_{cc}/R_L=2,2/50=44mA$

Portanto,  $V_D=1,2$  e  $I_D=20mA$

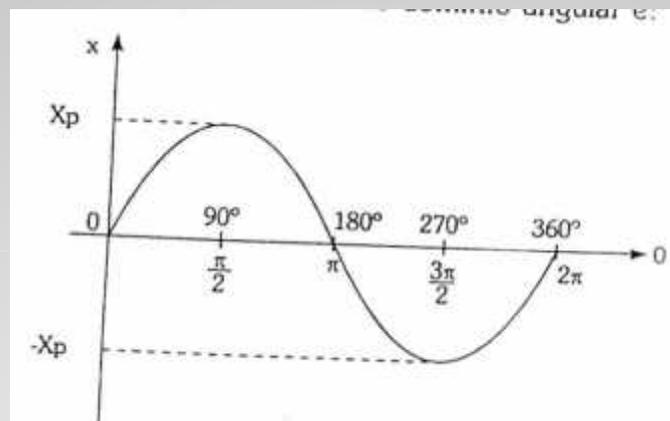
Logo,  $P_D=V_D*I_D=1,2*20E-3=$  **24mW**



Como tem uma queda de tensão no diodo(0,7(Si))

# Diodo Semicondutor

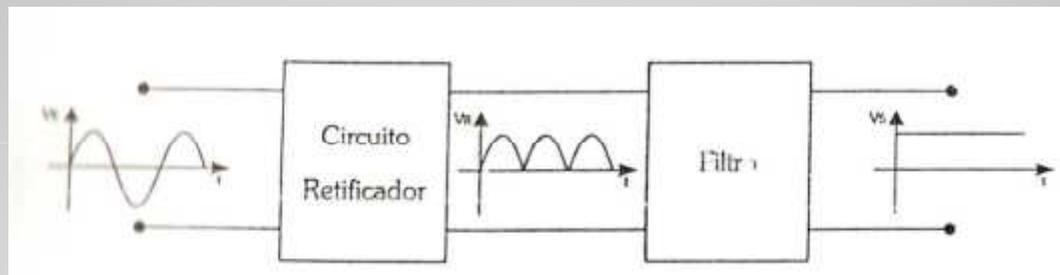
## Retificação



Corrente Alternada

# Diodo Semicondutor

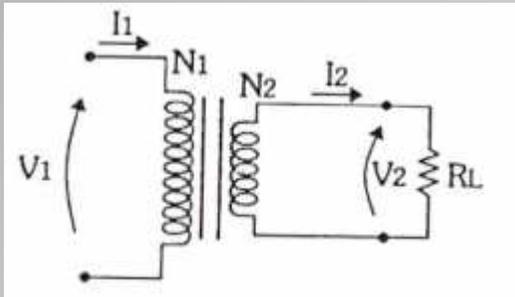
## Retificação



- I. Reduzir a tensão
- II. Retifica-la

# Diodo Semicondutor

## Transformador Abaixador de Tensão



$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

e

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Abaixador de Tensão

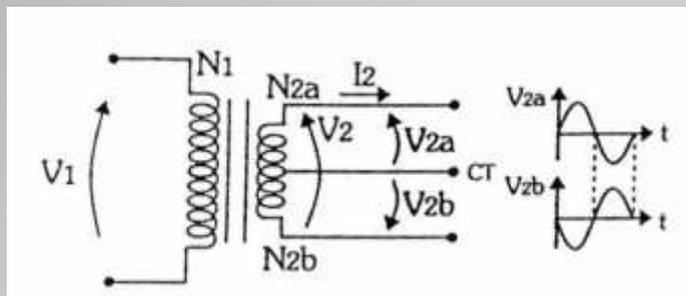
Num transformador ideal a redução ocorre sem perda de potência.

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

Perdas Efeito Joule e por corrente Foucault.

# Diodo Semicondutor

## Transformador com Derivação Central no Secundário (Center Tap)



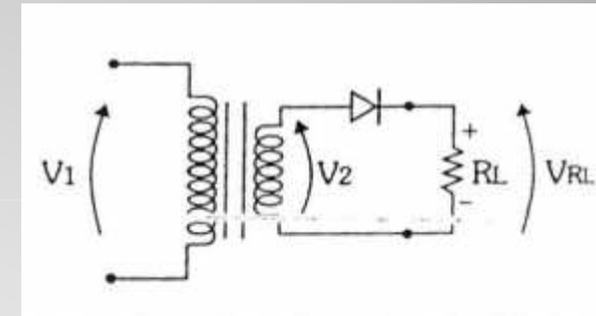
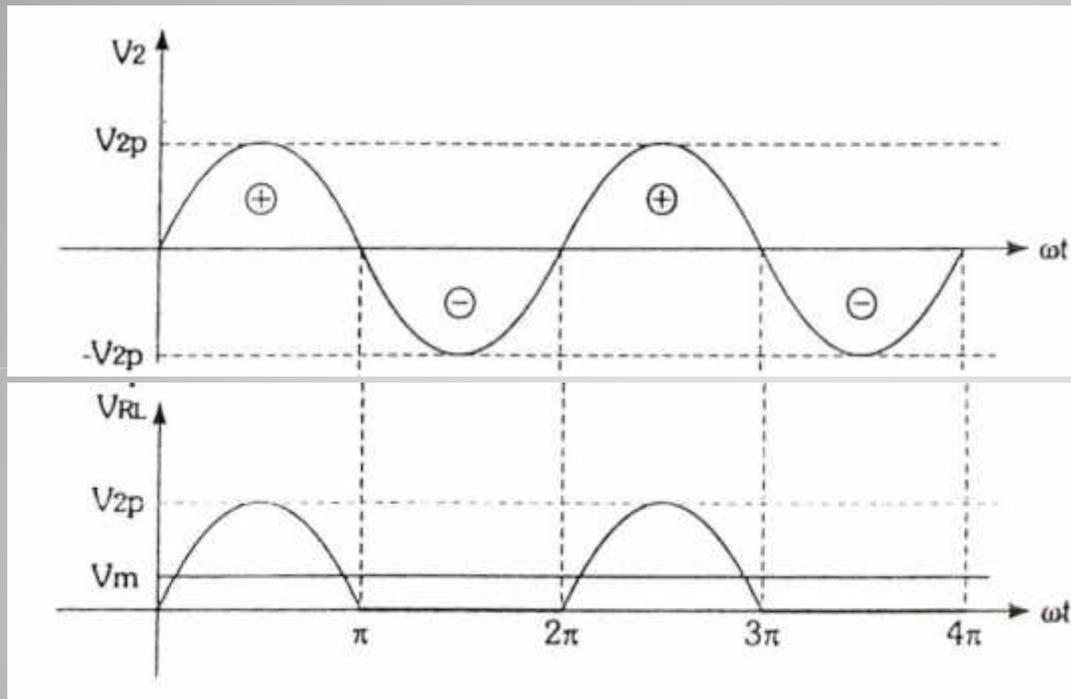
Tensões defasadas  $180^\circ$

Onde:

$$V_{2a} = V_{2b} = \frac{V_2}{2}$$

# Diodo Semicondutor

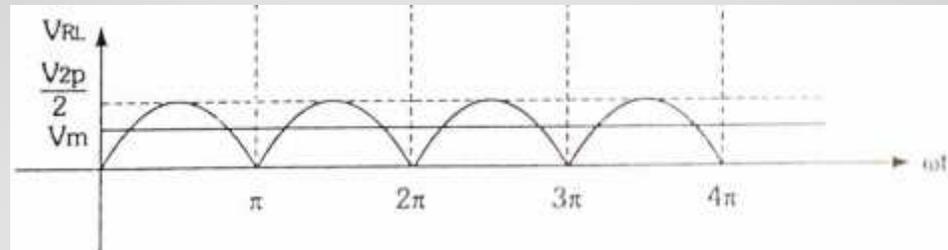
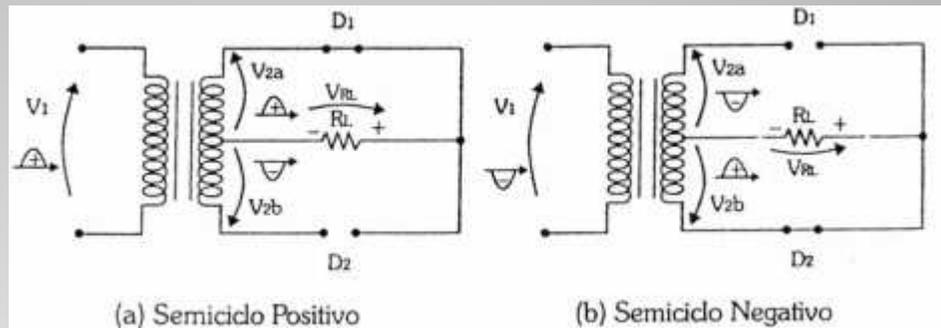
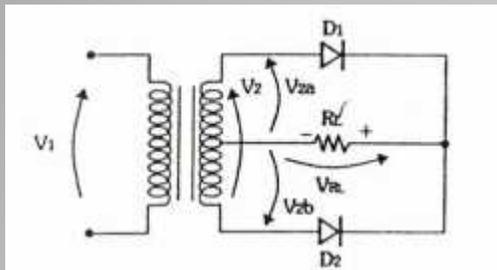
## Retificador de Meia Onda



Semiciclo positivo: diodo conduz;  
Semiciclo negativo: diodo corta.

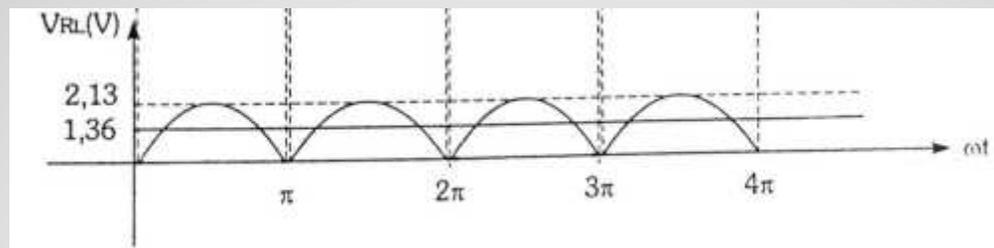
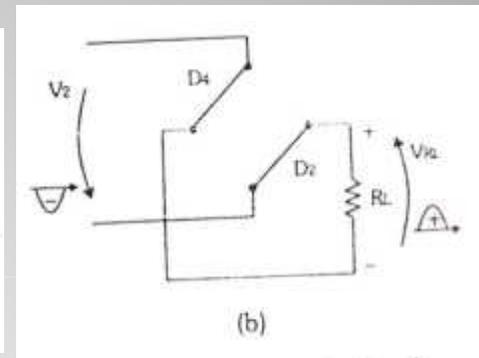
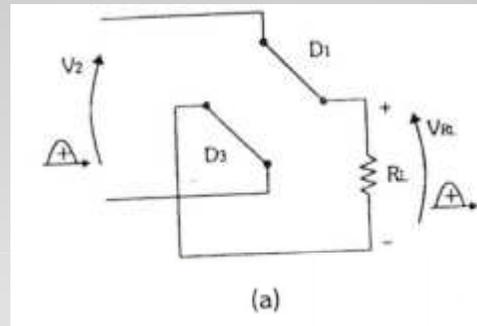
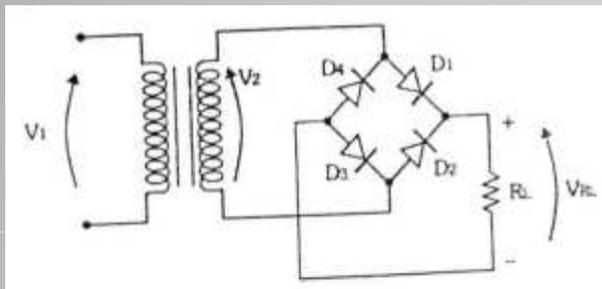
# Diodo Semicondutor

## Retificador de Onda Completa com Derivação



# Diodo Semicondutor

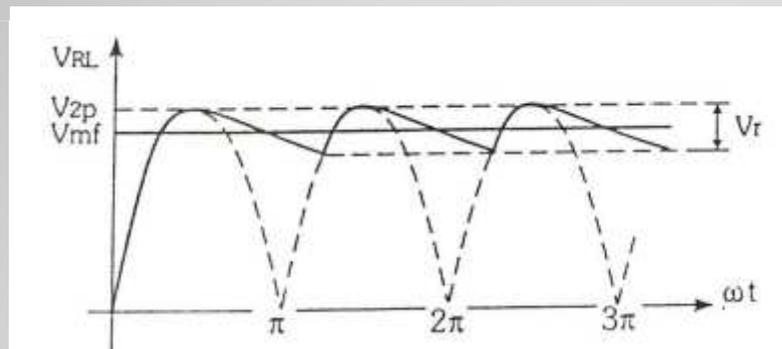
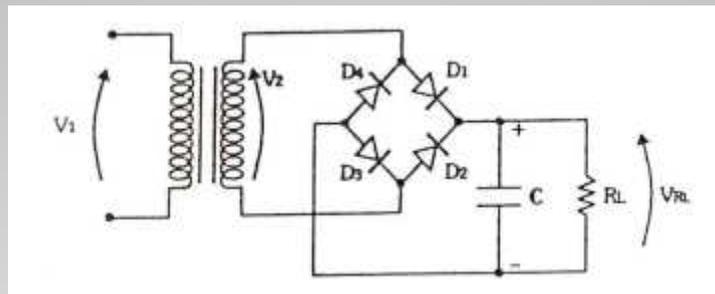
## Retificador de Onda Completa em Ponte



Utilizado devido a fornecer o dobro de tensão com o mesmo transformador.

# Diodo Semicondutor

## Filtro Capacitivo



$$V_r = \frac{V_{mf}}{f \cdot R_L \cdot C}$$

Utilizado devido a fornecer o dobro de tensão com o mesmo transformador.

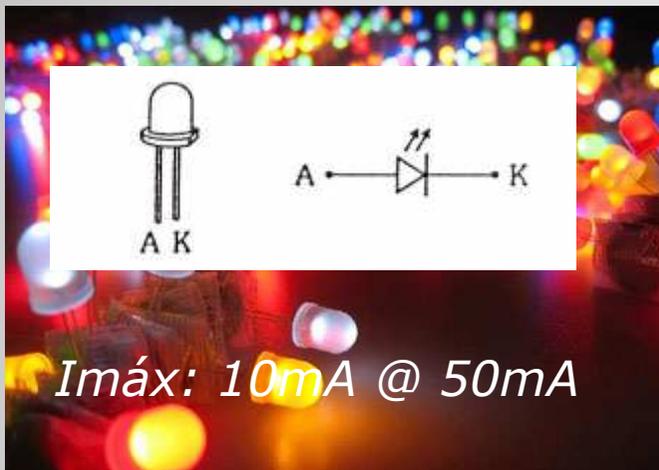
# Diodo Semicondutor: LED

Em Diodos de Si e Ge: libera energia em forma de calor.

Em compostos de arseneto de gálio (GaAs) existe a liberação de energia em forma de luz.

LED – Light Emitting Diode

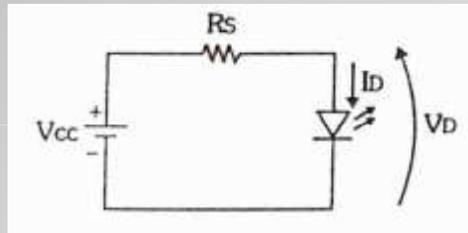
Tipo de LUZ: Visível, infravermelho e ultravioleta.



# Diodo Semicondutor LED

Exemplo:

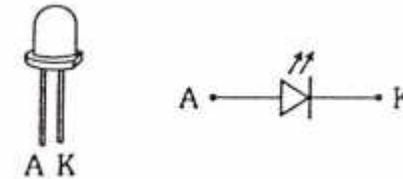
Determinar  $R_S$  para que o LED do circuito abaixo fique polarizado no seu ponto quiescente ( $V_D = 2V$  e  $I_D = 15\text{ mA}$ ), sendo  $V_{CC} = 10V$ .



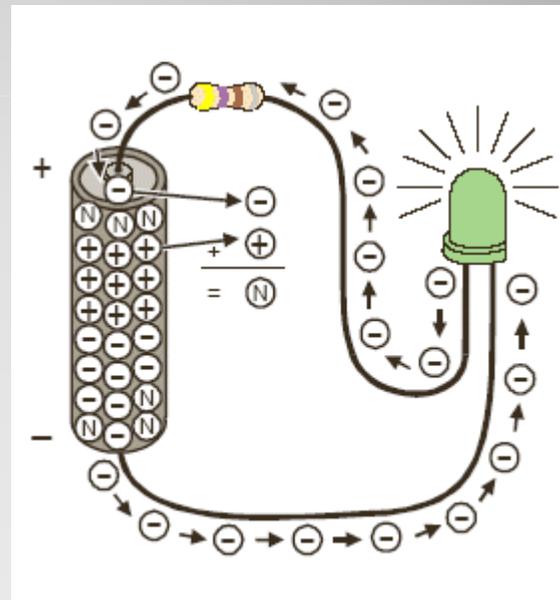
A equação do circuito é:

$$V_{CC} = R_S \cdot I_D + V_D \Rightarrow 10 = R_S \times 15 \times 10^{-3} + 2 \Rightarrow R_S = 533\Omega$$

Assim, pode-se utilizar um resistor comercial de  $560\Omega$ .

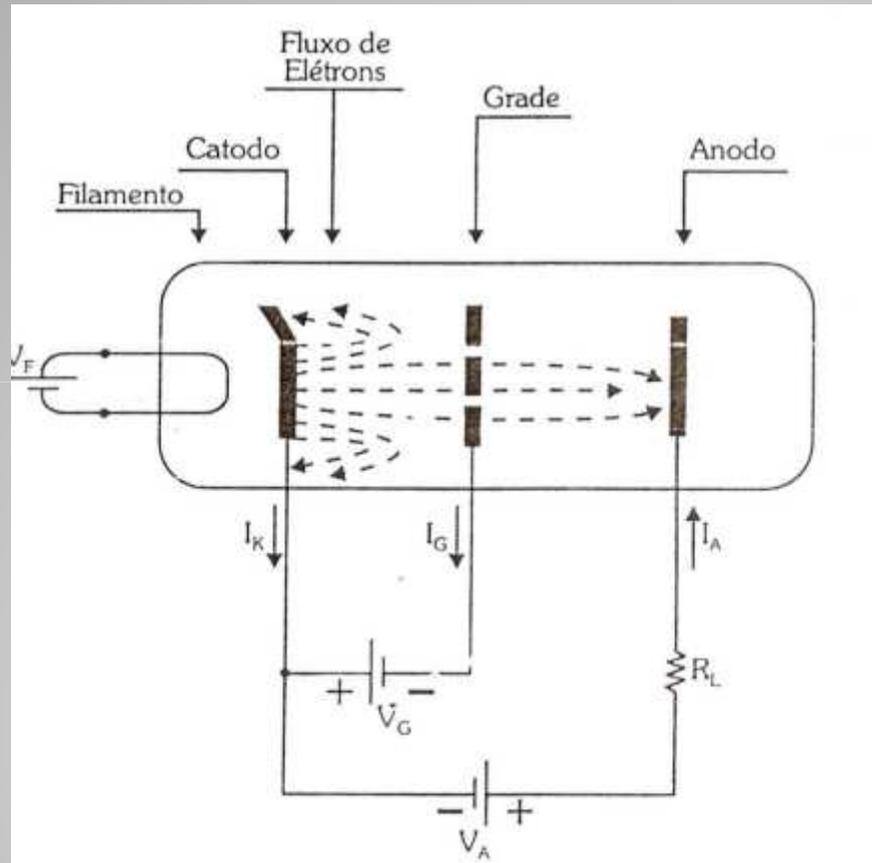


*Imáx: 10mA @ 50mA*  
Tensões entre 1,5V e 2,5V



# Transistores Bipolares

A Revolução – 23 de Dezembro de 1947



Válvula Triodo: foi inserido um terceiro elemento na válvula diodo chamado GRADE que faz o controle da corrente na carga  $R_L$ .

# Transistores Bipolares

A Revolução – 23 de Dezembro de 1947

Nos laboratórios da Bell Telephones, nos EUA: Walter Brattain e John Bardeen mostraram ao mundo um novo conceito em eletrônica: o **transistor bipolar** ou transistor de junção.

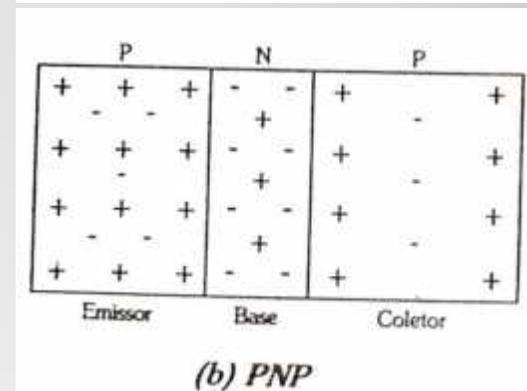
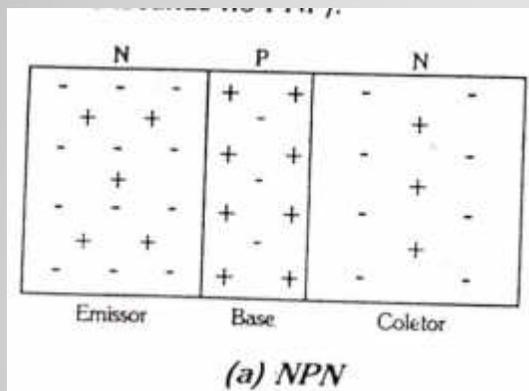
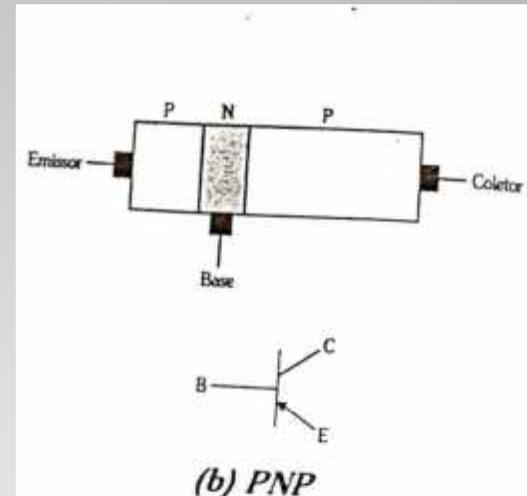
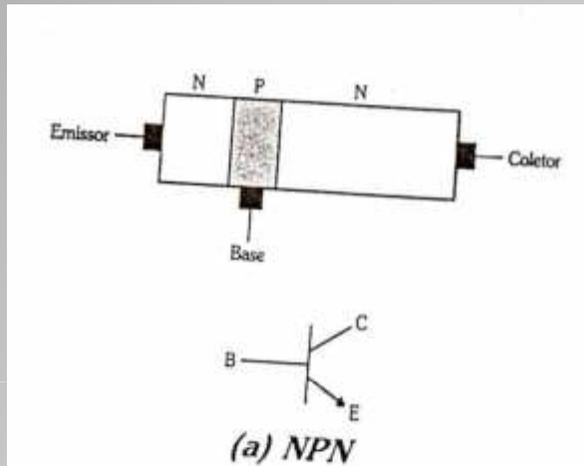
Dispositivo de estado sólido com as seguintes vantagens sobre a válvula:

- Menor tamanho;
- Muito mais leve;
- Não precisa de filamento;
- Mais resistente;
- Mais eficiente, pois dissipa menos potência;
- Não necessita de tempo de aquecimento;
- Menores tensões de alimentação.



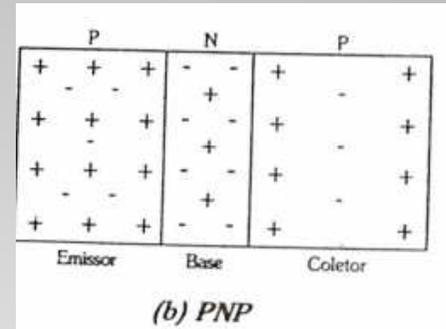
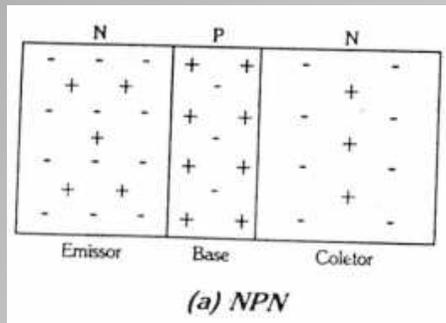
# Transistores Bipolares

O transistor: aspectos construtivos e simbologia.



# Transistores Bipolares

O transistor: aspectos construtivos e simbologia.



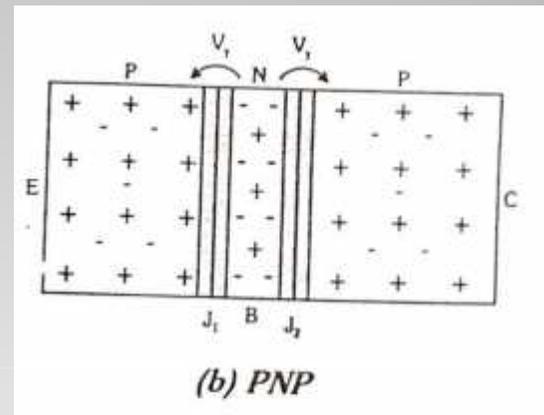
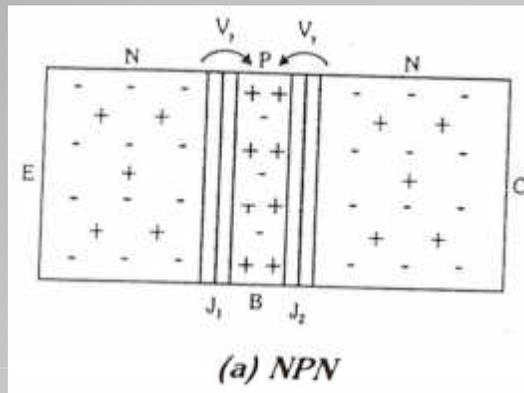
**Emissor:** fortemente dopado, tem como função emitir portadores para a base (elétrons no NPN e lacunas no PNP).

**Base:** dopagem média e é muito fina, assim a maioria dos portadores lançados do emissor conseguem atravessá-la, dirigindo-se ao coletor.

**Coletor:** levemente dopado, tem como função coletar os portadores que vêm da base, ele é muito maior que as outras camadas, pois é nele que se dissipa a maior parte da potência gerada pelos circuitos transistorizados.

# Transistores Bipolares

O transistor: aspectos construtivos e simbologia.



Como nos diodos, nas junções PN (J1 e J2) surgem barreiras de potencial cujos valores a 25°C são  $V_{\gamma}=0,7V$  (Si).

**Função:** fazer o controle da passagem de corrente entre o emissor e o coletor através da base. Isto é conseguido, polarizando-se adequadamente suas duas junções.

# Transistores Bipolares

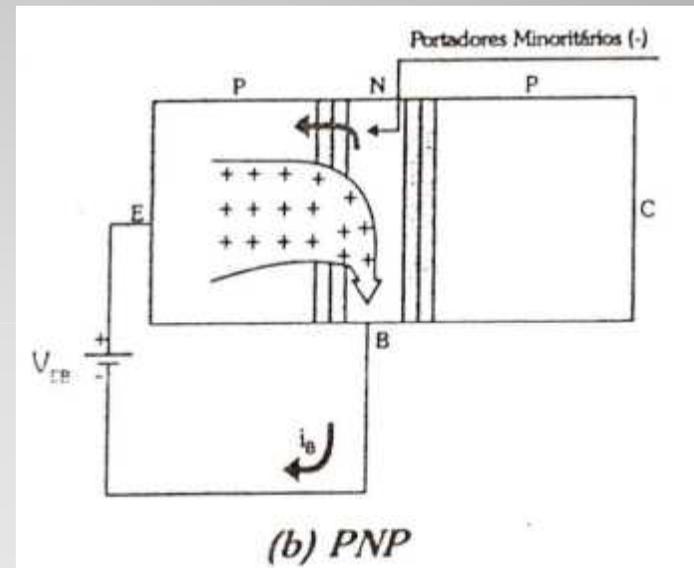
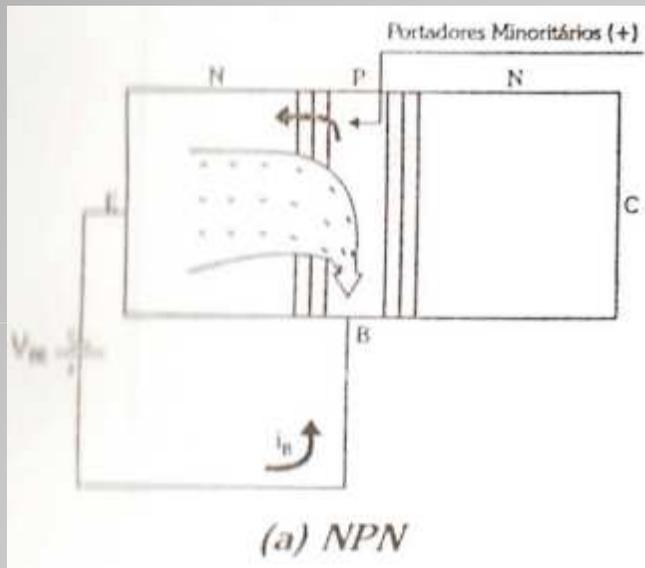
O transistor: aspectos construtivos e simbologia.

Aspecto Físico	Encapsulamento	Potência Máxima
	TO-92	1W
	TO-220	100W
	TO-3	200W

# Transistores Bipolares

## O transistor: funcionamento (NPN - PNP)

Análise fracionada: polarizando diretamente **emissor-base**



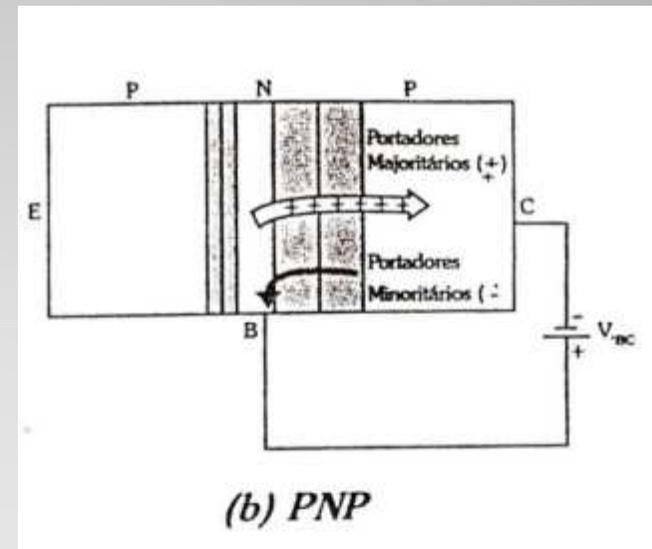
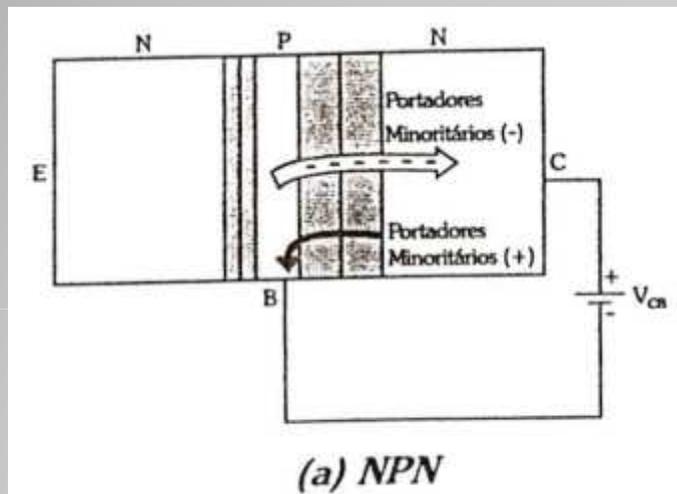
Funciona como um diodo polarizado diretamente.

Obs.: Corrente convencional tem sentido contrario ao fluxo de elétrons e mesmo sentido que o do fluxo de lacunas.

# Transistores Bipolares

## O transistor: funcionamento (NPN - PNP)

Análise fracionada: polarizando reversamente **base-coletor**



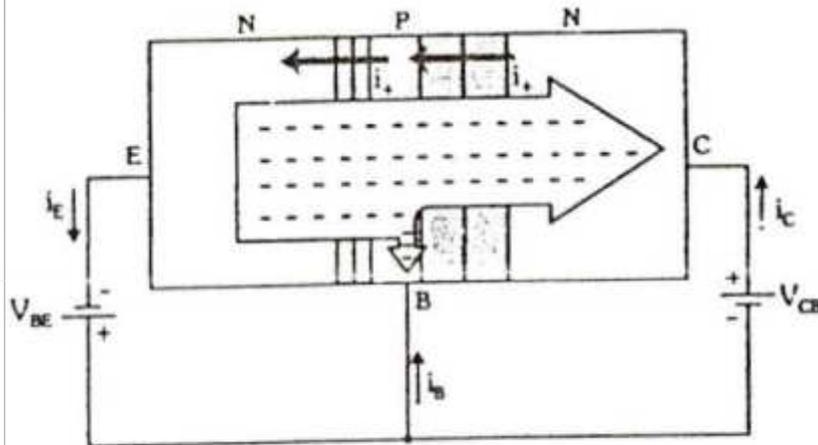
Como  $V_{cb} > V_{be}$  (NPN) e  $V_{bc} > V_{eb}$  (PNP), tem-se:

A barreira potencial aumenta, diminuindo drasticamente o fluxo dos portadores majoritários.

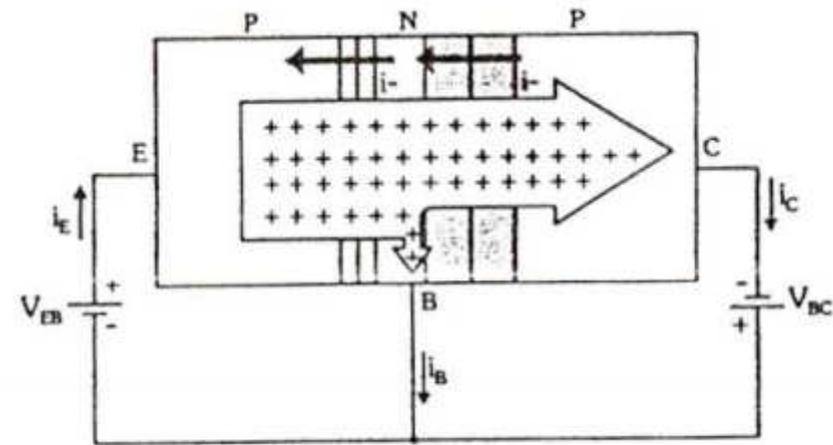
# Transistores Bipolares

## O transistor: funcionamento (NPN - PNP)

Análise fracionada: juntando as duas polarizações anteriores.



(a) NPN



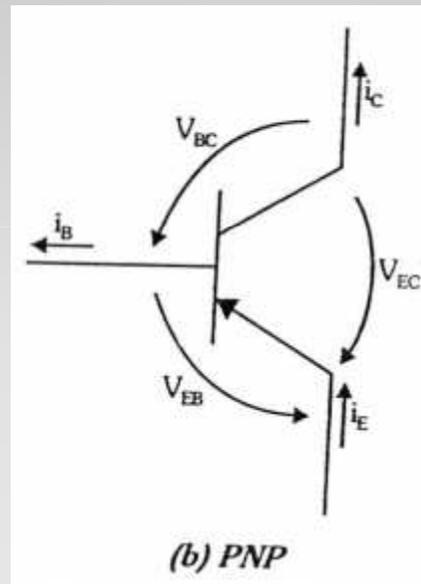
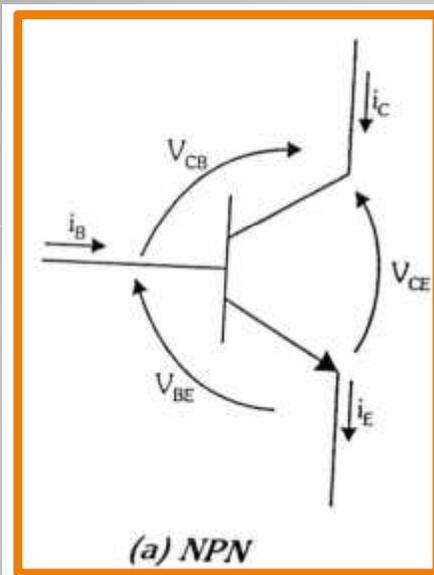
(b) PNP

Somente uma pequena parte dos portadores dirige-se para base devido ser muito pequena e pouco dopada, a maioria dos portados atravessam a junção base-coletor atraídos pela sua tensão.

# Transistores Bipolares

## O transistor: funcionamento (NPN - PNP)

### *Tensões e Correntes:*



Através das Leis de Kirchhoff, obtém-se:

$$\text{NPN ou PNP: } i_E = i_C + i_B$$

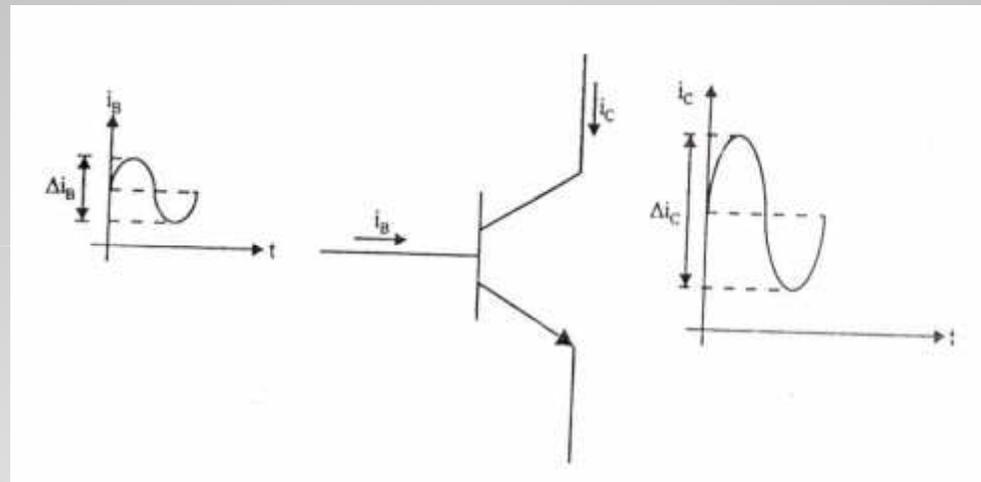
$$\text{NPN: } V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$$

$$\text{PNP: } V_{EC} = V_{EB} + V_{BC}$$

Obs.: Correntes(fuga) de portadores minoritários serão desprezadas.

# Transistores Bipolares

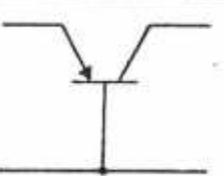
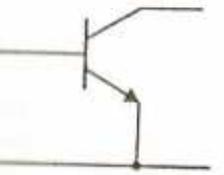
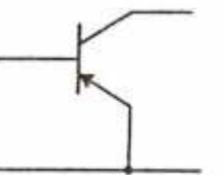
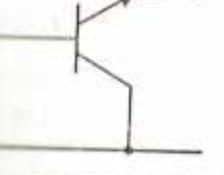
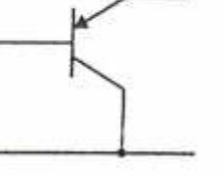
O transistor: efeito amplificação.



$$\text{Ganho de Corrente} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

# Transistores Bipolares

## O transistor: Configurações Básicas.

NPN	PNP	Configuração
		Base Comum
		Emissor Comum
		Coletor Comum

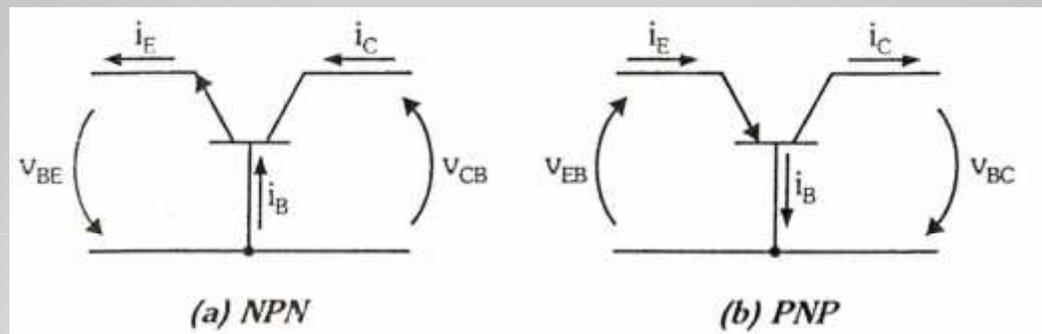
O termo **comum** significa que o terminal é comum a entrada e a saída do circuito.

Cada uma das configurações tem características específicas, portanto aplicações diferentes.

# Transistores Bipolares

## O transistor: Configurações Básicas.

Base Comum (BC):



Nesta configuração, o emissor é o terminal de entrada de corrente e o coletor é o terminal de saída de corrente do circuito, sendo que o terminal de base é comum as tensões de entrada e saída.

# Transistores Bipolares

## O transistor: Configurações Básicas.

Base Comum (BC):

Ganho:

$$\alpha = I_c / I_e$$

$I_c$  = corrente no coletor

$I_b$  = corrente na base

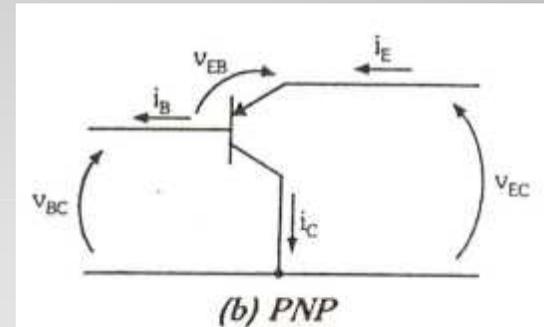
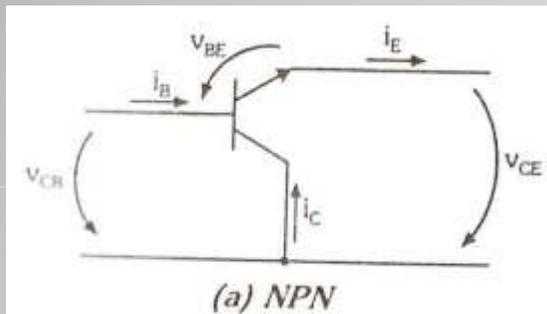
Como  $i_e = i_c + i_b$ , conclui-se que o ganho de corrente é sempre menor que 1.

Obs.: Na maioria dos transistores, esse valores estão entre 0,90 e 0,998.

# Transistores Bipolares

## O transistor: Configurações Básicas.

Emissor Comum (CC):

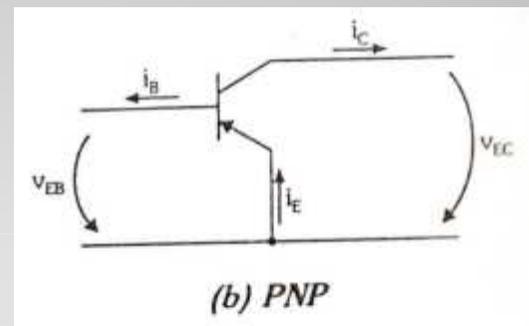
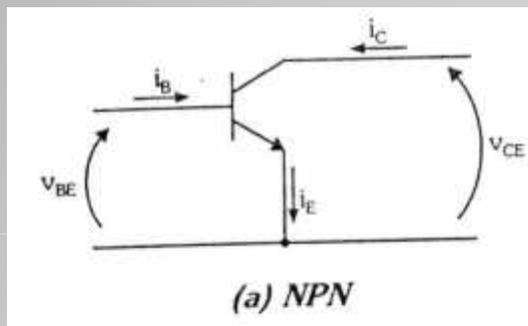


Não é necessário curvas específicas de entrada e saída. Pode-se utilizar as mesmas características da configuração EC.

# Transistores Bipolares

## O transistor: Configurações Básicas.

Emissor Comum (EC):

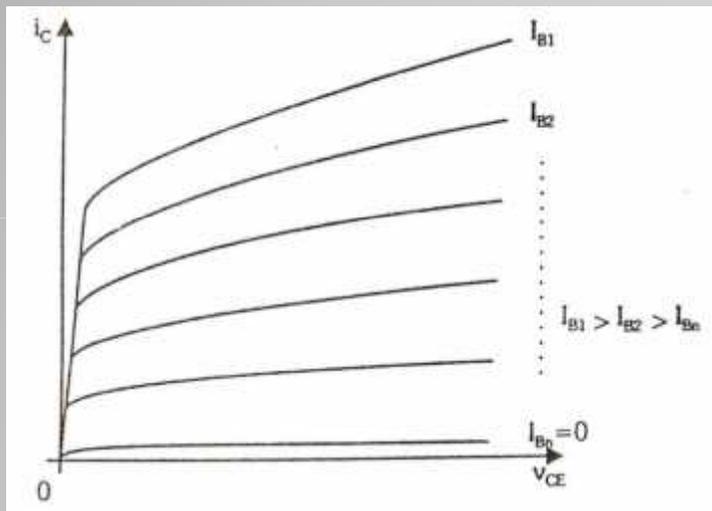


Esta configuração é a mais aplicada em circuitos transistorizados. Por isso, os diversos parâmetros dos transistores fornecidos pelos manuais técnicos têm como referência a configuração EC.

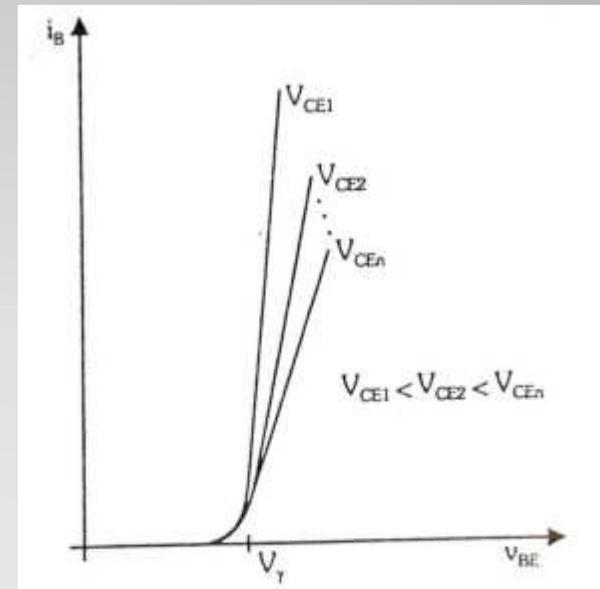
# Transistores Bipolares

## O transistor: Configurações Básicas.

Emissor Comum (EC):



Curva de Saída

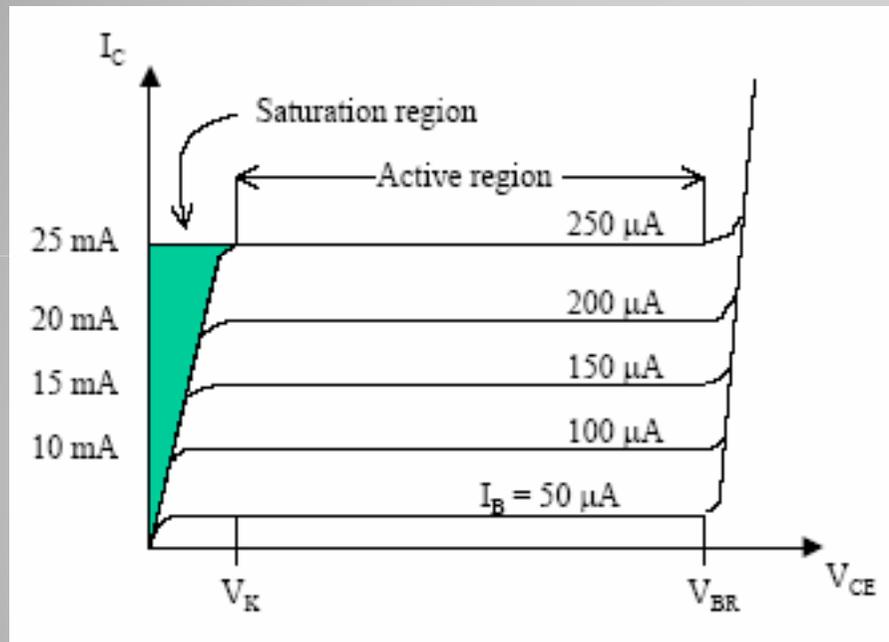


Curva de Entrada

# Transistores Bipolares

## O transistor: Configurações Básicas.

Emissor Comum (EC):



Curva de Saída

Nesta curva, distinguem-se três regiões de trabalho do transistor:

**Corte** –  $I_c \approx 0$

**Saturação** –  $V_{ce} \approx 0$

**Ativa** – Região entre o corte e a saturação ( $I_b$  é linear)

# Transistores Bipolares

## O transistor: Configurações Básicas.

Emissor Comum (EC) e Coletor Comum (CC):

Ganho:

$$\beta = I_c / I_b$$

$I_c$  = corrente no coletor

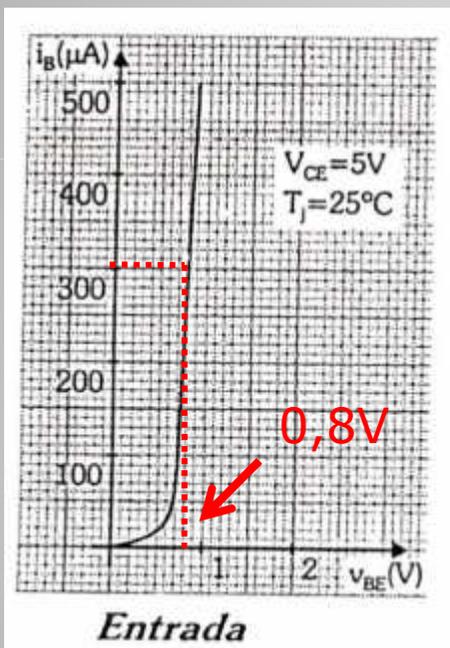
$I_b$  = corrente na base

# Transistores Bipolares

## Exemplo (1):

Dadas as curvas de um transistor NPN(BC), determinar:

- A corrente na base para  $V_{be}=0,8V$
- O ganho de corrente nas condições do item a;
- O novo ganho de corrente, caso  $I_b$  dobre de valor, mantida a tensão  $V_{ce}$ .



Resolução:

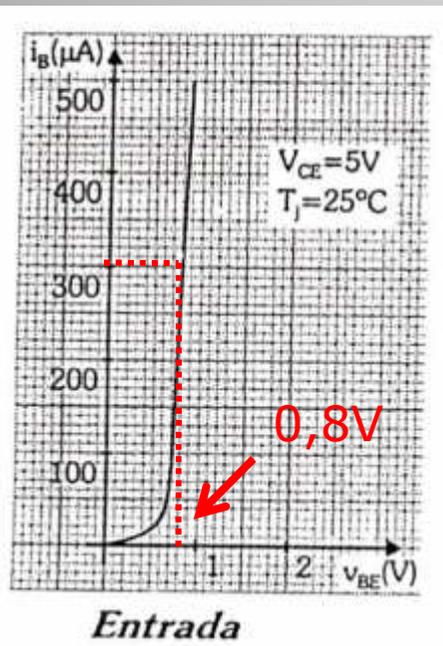
- Para  $V_{be}=0,8V$ , tem-se que  $I_b = 300\mu A$ .

# Transistores Bipolares

## Exemplo (1):

Dadas as curvas de um transistor NPN(EC), determinar:

- A corrente na base para  $V_{be}=0,8V$
- O ganho de corrente nas condições do item a;
- O novo ganho de corrente, caso  $I_b$  dobre de valor, mantida a tensão  $V_{ce}$ .



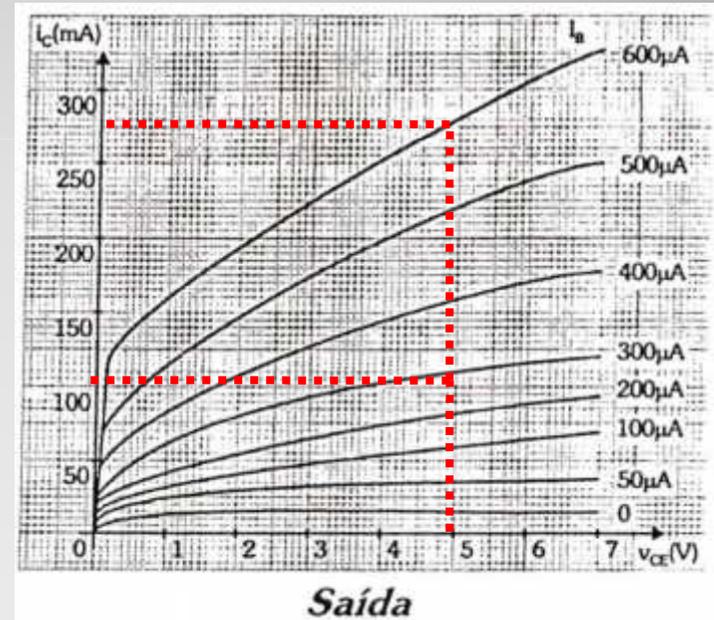
### Resolução:

**b)** Curva característica de entrada foi obtida para a tensão  $V_{ce}=5V$ , entrando com esse valor na curva de saída juntamente com a corrente de entrada  $I_b$ , tem-se que a corrente de saída  $I_c=110mA$

$$\beta = I_c / I_b = 110mA / 300\mu A = \mathbf{367}$$

**c)**  $I_b=600\mu A$ , portanto:

$$\beta = I_c / I_b = 280mA / 600\mu A = \mathbf{467}$$



# Transistores Bipolares

## O transistor: Configurações Básicas.

Limites:

- Tensão máxima de coletor -  $V_{CEmax}$
- Corrente máxima de coletor -  $I_{Cmax}$
- Potência máxima de coletor -  $P_{Cmax}$

Configuração EC e CC:

$$P_{Cmax} = V_{CEmax} \cdot I_{Cmax}$$

Configuração BC:

$$P_{Cmax} = V_{CBmax} \cdot I_{Cmax}$$

Tipo	Polaridade	$V_{CEmax}$ (V)	$I_{Cmax}$ (mA)	$\beta$
BC548	NPN	45	100	125 a 900
2N2222	NPN	30	800	100 a 300
TIP31A	NPN	60	3000	20 a 50
2N3055	NPN	80	15000	20 a 50
BC559	PNP	-30	-200	125 a 900
BFX29	PNP	-60	-600	50 a 125

# Transistores Bipolares

## O transistor: Polarização

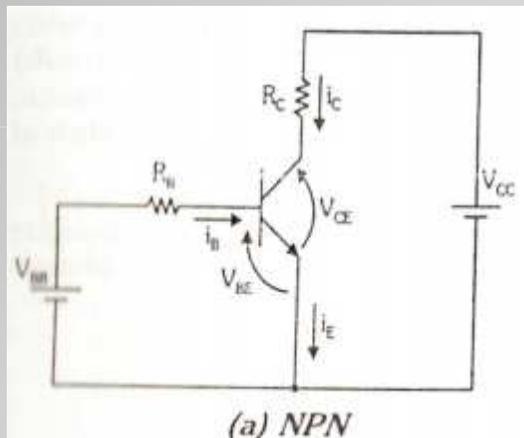
Aplicação: Principalmente como elementos de **amplificação de corrente e tensão**, ou como elementos de **controle on-off**.

**Ponto de operação estática:** escolhe-se em função da operação, ou seja, ele pode estar localizado nas regiões de corte, saturação ou ativa da curva característica de saída.

# Transistores Bipolares

## O transistor: Polarização

Circuito de Polarização em Emissor Comum (EC):



Malha de Entrada:  $R_B \cdot i_B + V_{BE} = V_{BB}$

Portanto, a equação de  $R_B$  é:

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

Malha de Saída:  $R_C \cdot i_C + V_{CE} = V_{CC}$

Portanto, a equação de  $R_C$  é:

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

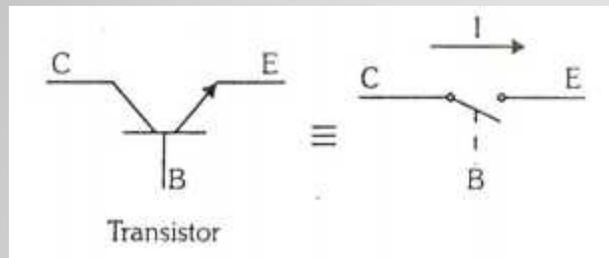
# Transistores Bipolares

## O transistor: como Chave

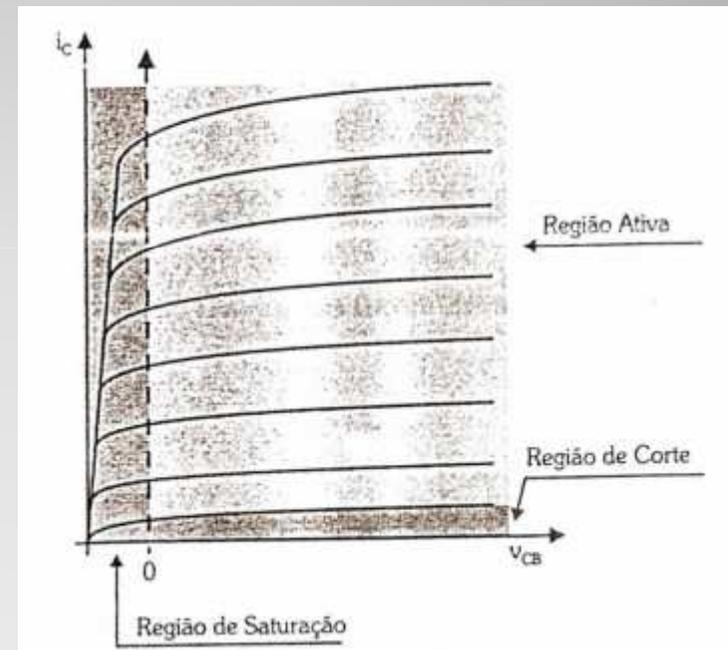
Um transistor operando como chave (controle on-off), conduzindo corrente ou não.

**Cortando-o:** chave aberta.

**Saturando-o:** chave fechada.

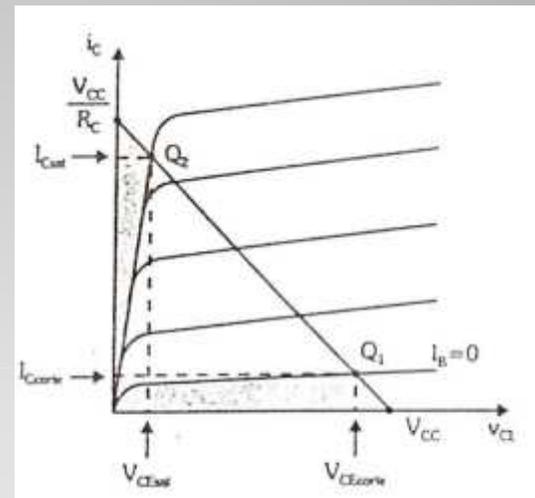
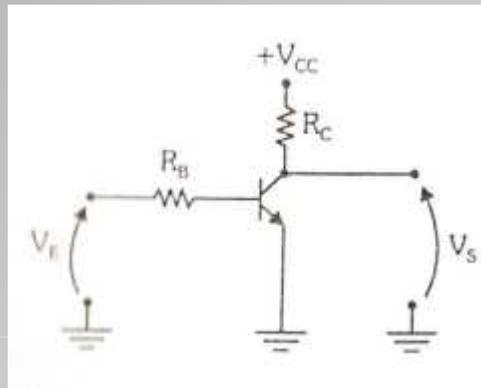


Analogia



# Transistores Bipolares

## O transistor: como Chave

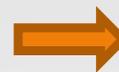


Malha de Entrada:  $V_{RB} = V_E - V_{BE}$

Malha de Saída:  $V_{RC} = V_{CC} - V_{CE}$

Assim, tem-se:

$$R_B = \frac{V_E - V_{BE}}{i_B} \quad e \quad R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{i_C}$$



$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{I_{Csat}} \quad e \quad R_B = \frac{V_E - V_{BE}}{I_{Bsat}}$$

# Transistores Bipolares

## O transistor: como Chave (BC548)

### Parâmetros do Transistor BC548:

$$V_{BEsat} = 0,7V$$

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

$$\beta_{sat} = 20$$

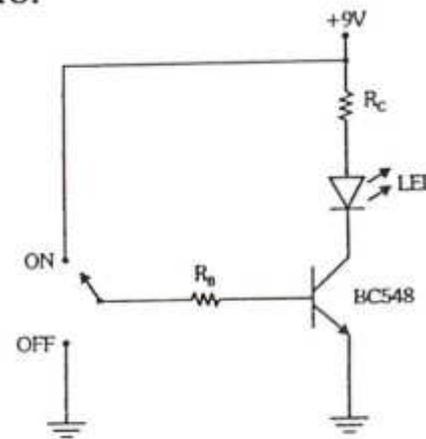
$$I_{Cmax} = 200mA$$

$$V_{CEmax} = 80V$$

### Parâmetros do LED:

$$V_D = 1,5V$$

$$I_D = 25mA$$



Os resistores de polarização do transistor devem ser calculados considerando a região de saturação, ou seja, quando a chave estiver na posição ON.

# Transistores Bipolares

## O transistor: como Chave (BC548)

Resolução:

Malha de Saida:

$$V_{RC} = V_{CC} - V_{CEsat} - V_D$$

$$I_{Csat} = I_D$$

Assim,  $R_C$  pode ser calculado de seguinte forma:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat} - V_D}{I_{Csat}} \Rightarrow R_C = \frac{9 - 0,3 - 1,5}{25 \times 10^{-3}} \Rightarrow R_C = 288 \Omega$$

Valor comercial adotado:  $R_C = 270 \Omega$

Potência de  $R_C$ :

$$P_{RC} = R_C \cdot I_{Csat}^2 = 270 \times (25 \times 10^{-3})^2 = 168,75 \text{mW. (1 / 4W)}$$

# Transistores Bipolares

## O transistor: como Chave (BC548)

Resolução:

Malha de Entrada:

$$V_{RB} = V_E - V_{BEsat}$$

Calculando  $R_B$ :

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta_{sat}} = \frac{25 \times 10^{-3}}{20} = 1,25 \text{mA}$$

$$R_B = \frac{V_E - V_{BEsat}}{I_{Bsat}} \Rightarrow R_B = \frac{9 - 0,7}{1,25 \times 10^{-3}} \Rightarrow R_B = 6640 \Omega$$

Valor comercial adotado:  $R_B = 6K8 \Omega$

Potência de  $R_B$ :

$$P_{RB} = R_B \cdot I_{Bsat}^2 = 6,8 \times 10^3 \times (1,25 \times 10^{-3})^2 = 10,625 \text{mW} \quad (1/8 \text{W})$$

Quando a chave passa para a posição OFF, a entrada é aterrada ( $V_E < V_{BE}$ ), causando o corte do transistor e, conseqüentemente, apagando o LED.



# Transistores Bipolares

## O transistor: como Chave (BC548)

Simulação: On

