

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Eletrônica Analógica I



Introdução ao Diodo de Junção e Análise de Circuitos com Diodos

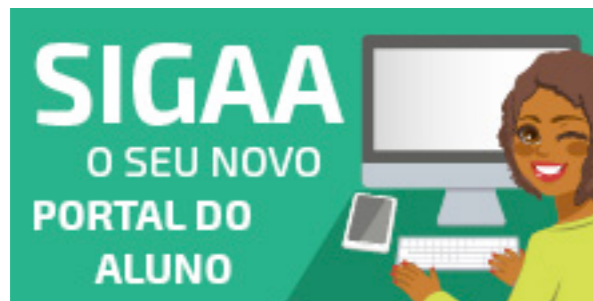
Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, agosto de 2025.

Eletrônica Analógica I

O material do curso está disponível em:

1. SIGAA para os alunos matriculados na disciplina;
2. Página do professor;
3. Canal no youtube do professor.



<https://sigaa.ifsc.edu.br>

ProfessorPetry
Conhecimento para uma vida plena

PRINCIPAL PROJETO PUBLICAÇÕES CONTATO



Bem vindo ao Website pessoal de Clovis Antonio Petry

O objetivo desta página é a divulgação de informações sobre eletrônica, em especial eletrônica de potência. Todos os materiais disponibilizados podem ser livremente utilizados, desde que citados os autores. As disciplinas do semestre corrente podem ser acessadas clicando na imagem da esquerda abaixo. Material didático pode ser encontrado clicando na imagem da direita abaixo.



Eventos

Outubro, 2020
SNCT 2020
Semana Nacional de Ciência e Tecnologia 2020, Florianópolis, SC.
[Acesse...](#)

Setembro, 2020
COBENGE 2020
XLVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE) e III Simpósio Internacional de Educação em Engenharia da ABENGE, Bento Gonçalves, RS. [Acesse...](#)

www.ProfessorPetry.com.br



<https://www.youtube.com>

Agenda

Esta aula está organizada em:

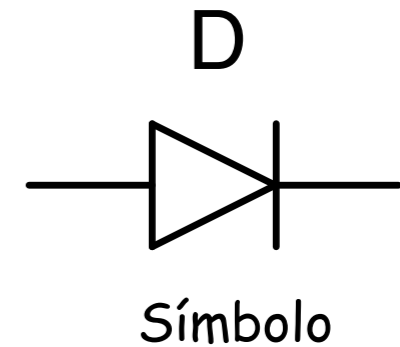
1. Introdução;
2. Diodo ideal;
3. Materiais semicondutores;
4. Níveis de energia;
5. Materiais extrínsecos dos tipos N e P;
6. Diodo semicondutor;
7. Curva $I_D \times V_D$;
8. Teste de diodos com multímetro.



Diode semiconductor

Diode semiconductor:

- Um dos primeiros semicondutores desenvolvido;
- Amplamente utilizado em circuitos eletrônicos;
- Permite a passagem da corrente elétrica em apenas um sentido;
- Podem ser aplicados com diferentes finalidades (retificação, proteção, bloqueio, detecção, etc.);
- Disponíveis para diferentes correntes e tensões de operação.



Aspectos físicos

Diodo semicondutor

Diodo semicondutor (história):

- Em 1904 John Ambrose Fleming inventou a válvula para retificação ;
- O termo diodo foi usado em 1919 por William Henry Eccles;
- Na década de 1940 foi desenvolvido o diodo de ponto de contato, possibilitando a construção de diodos semicondutores;
- Já os diodos com materiais semicondutores e junção pn (germânio e silício) foram desenvolvidos a partir de 1950.



Diodo de Fleming e diodo de germânio

Diodo semicondutor

Diodo semicondutor (aplicações):



Fontes de alimentação



Equipamentos de rádio-frequência



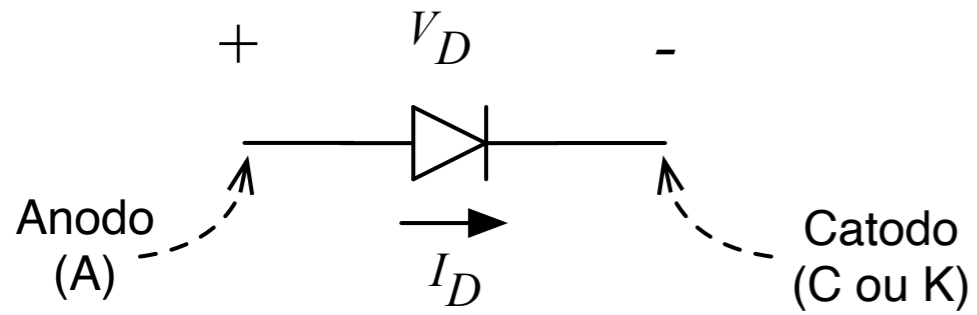
Acionamento de motores



Conversores cc-cc

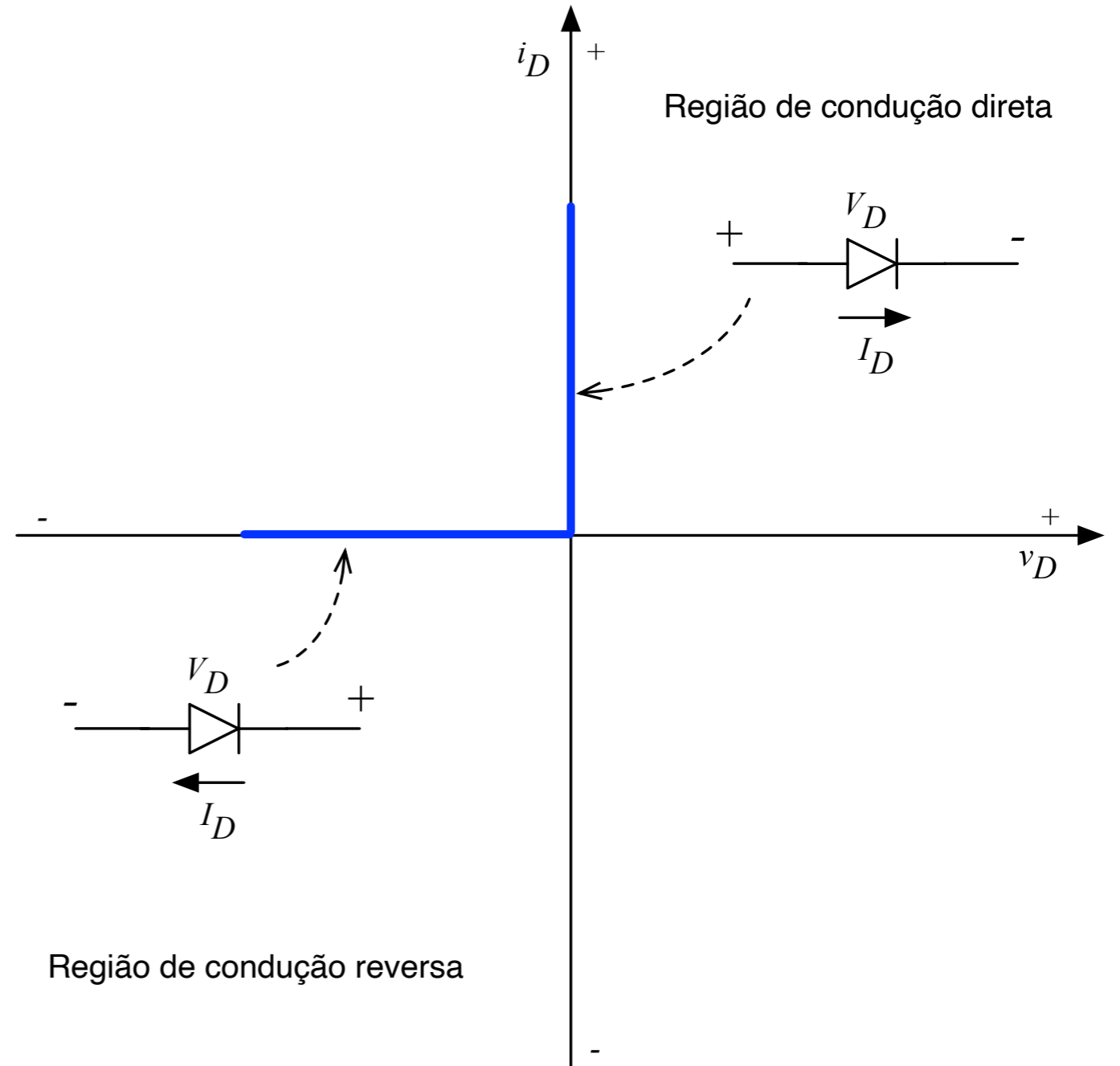
Diodo ideal

Terminais do diodo



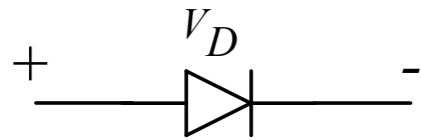
Exemplo de diodo real

Curva $I_D \times V_D$



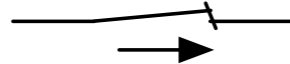
Diodo Ideal

Diodo conduzindo



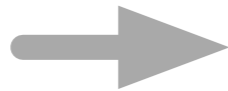
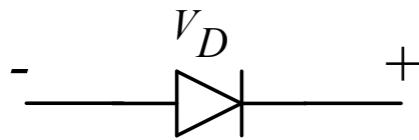
Chave fechada
(curto-circuito)

$$V_D = 0$$



I_D (limitada pelo circuito)

Diodo bloqueado

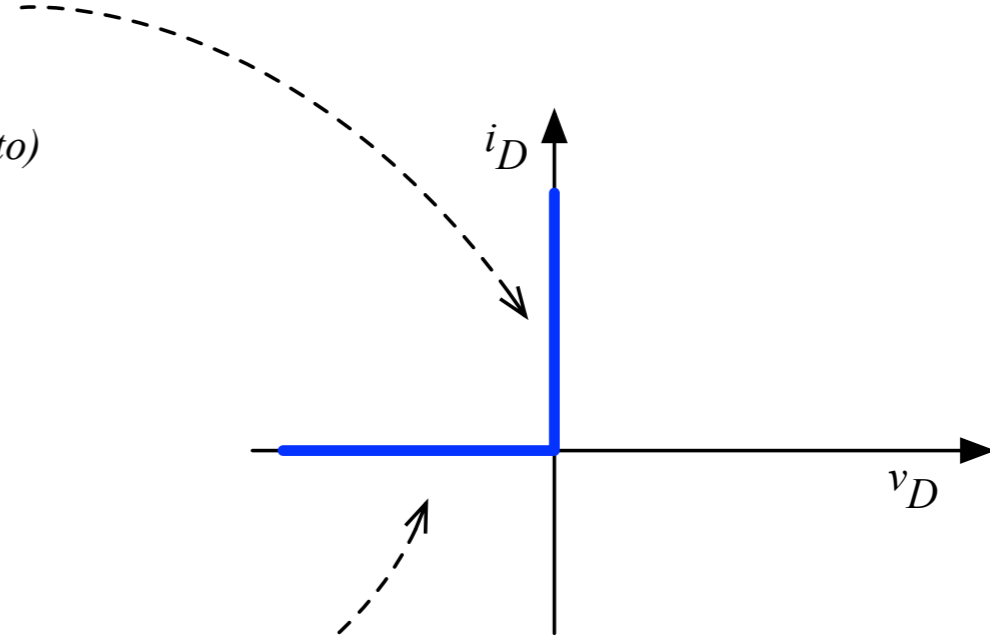


Chave aberta
(circuito aberto)

V_D (limitada pelo circuito)

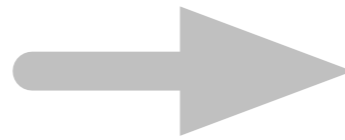
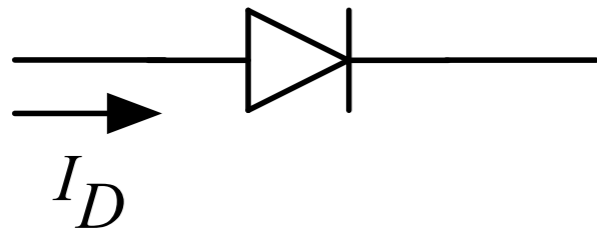


$$I_D = 0$$

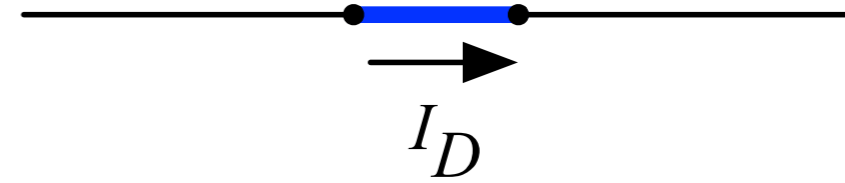


Diodo Ideal

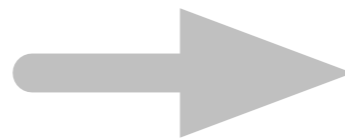
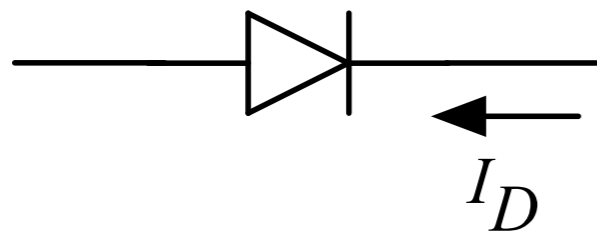
Diodo conduzindo



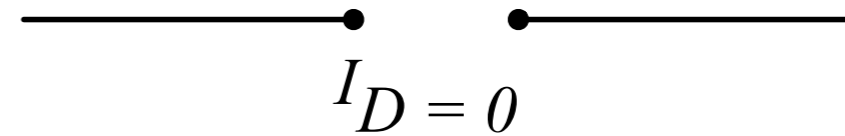
Chave fechada
(curto-circuito)



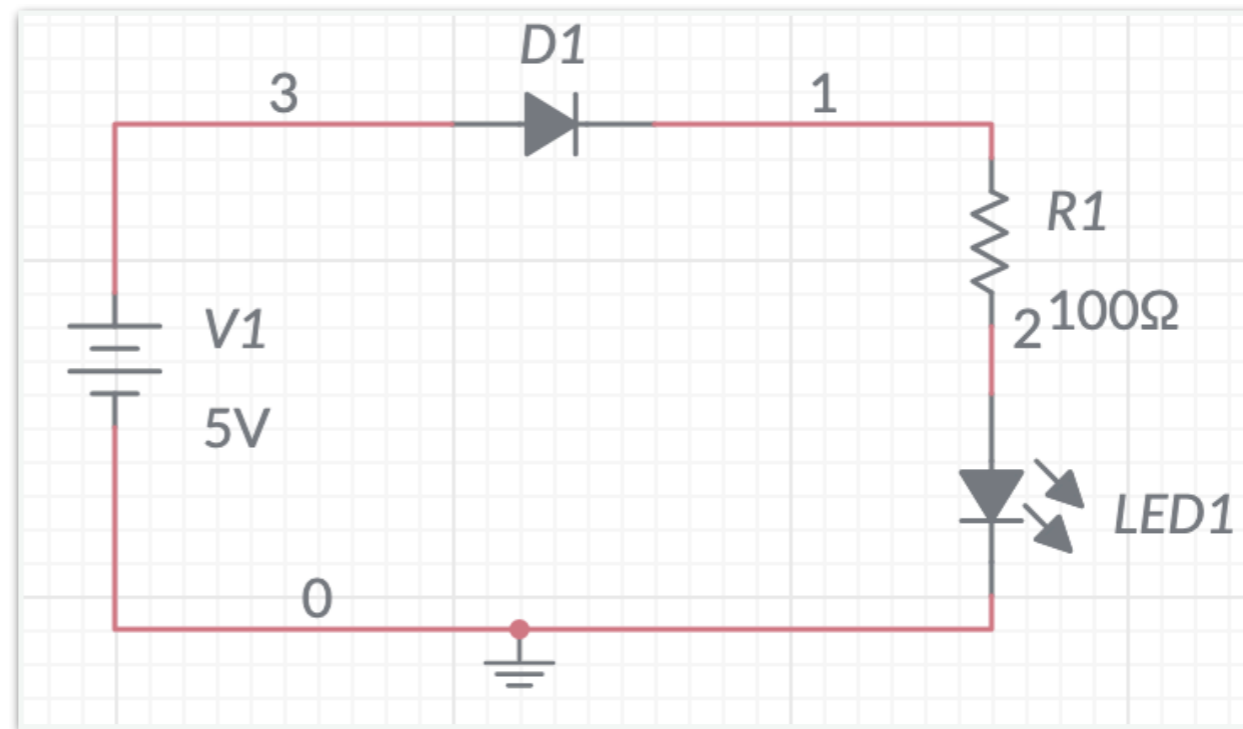
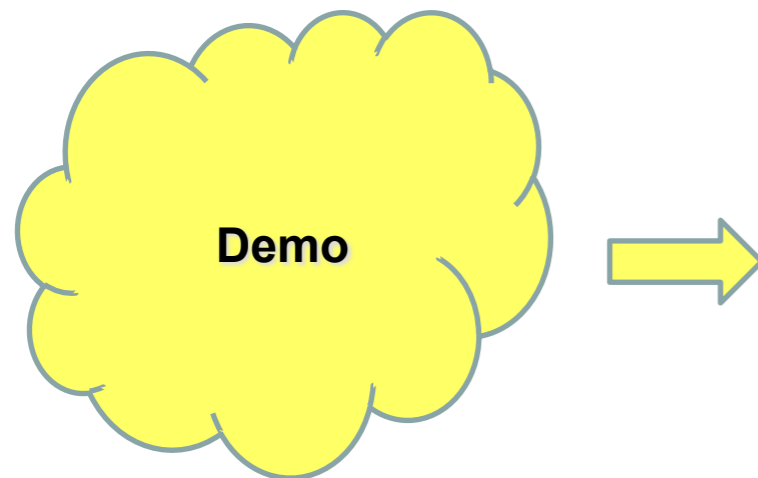
Diodo bloqueado



Chave aberta
(circuito aberto)



Diodo Ideal



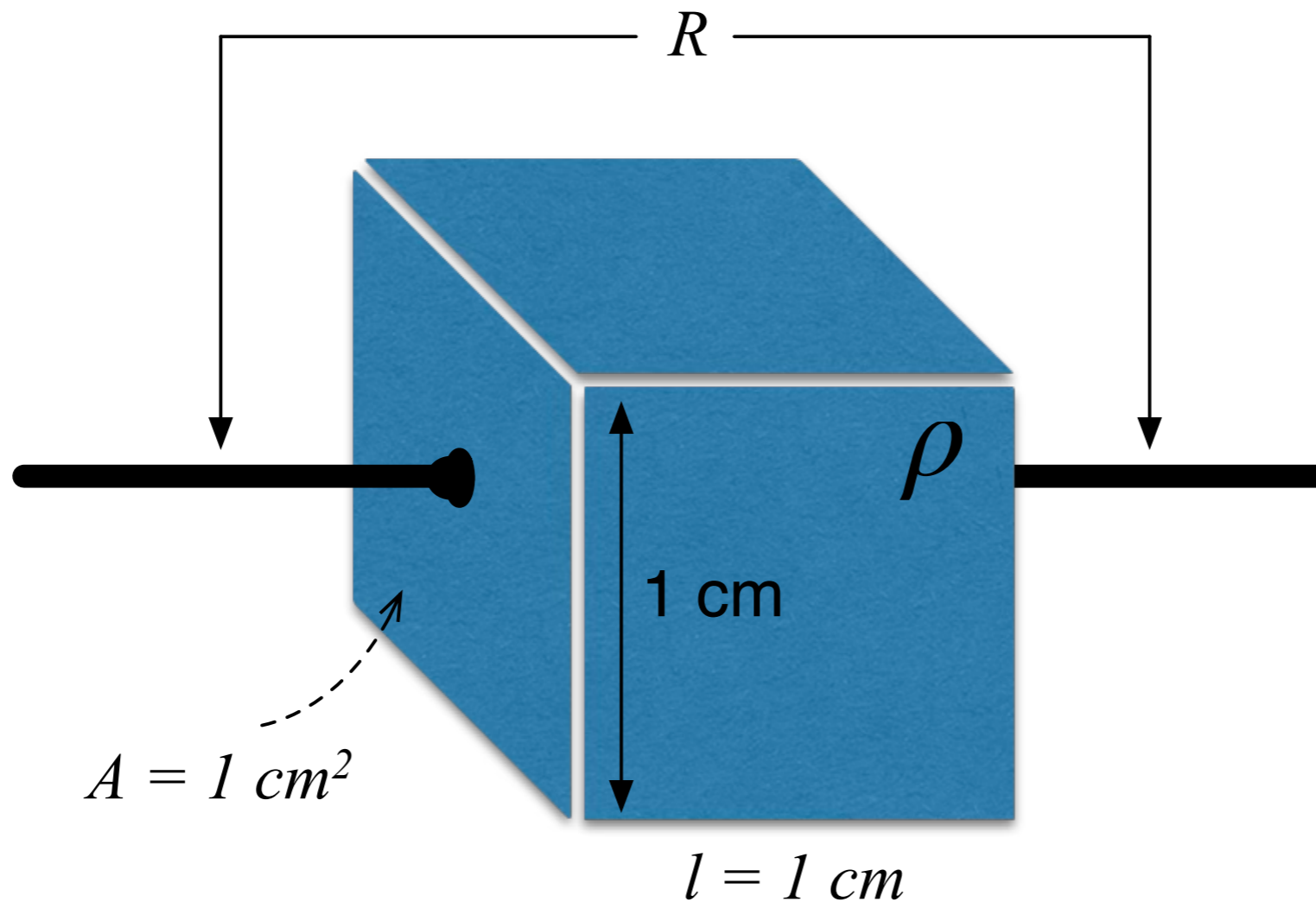
Demo:

- Diodo conduzindo;
- Diodo bloqueado.

Materiais semicondutores

Resistividade de um material:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} = \frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}} = \Omega \cdot \text{cm}$$



Materiais semicondutores

Valores típicos de resistividade:

Condutor

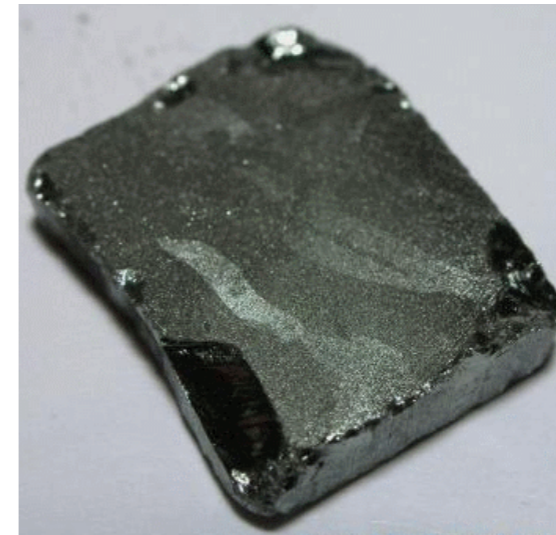
$$\rho \cong 10^{-6} \Omega cm \text{ (cobre)}$$



Semicondutor

$$\rho \cong 50 \Omega cm \text{ (germânio)}$$

$$\rho \cong 50 \cdot 10^3 \Omega cm \text{ (silício)}$$



Isolante

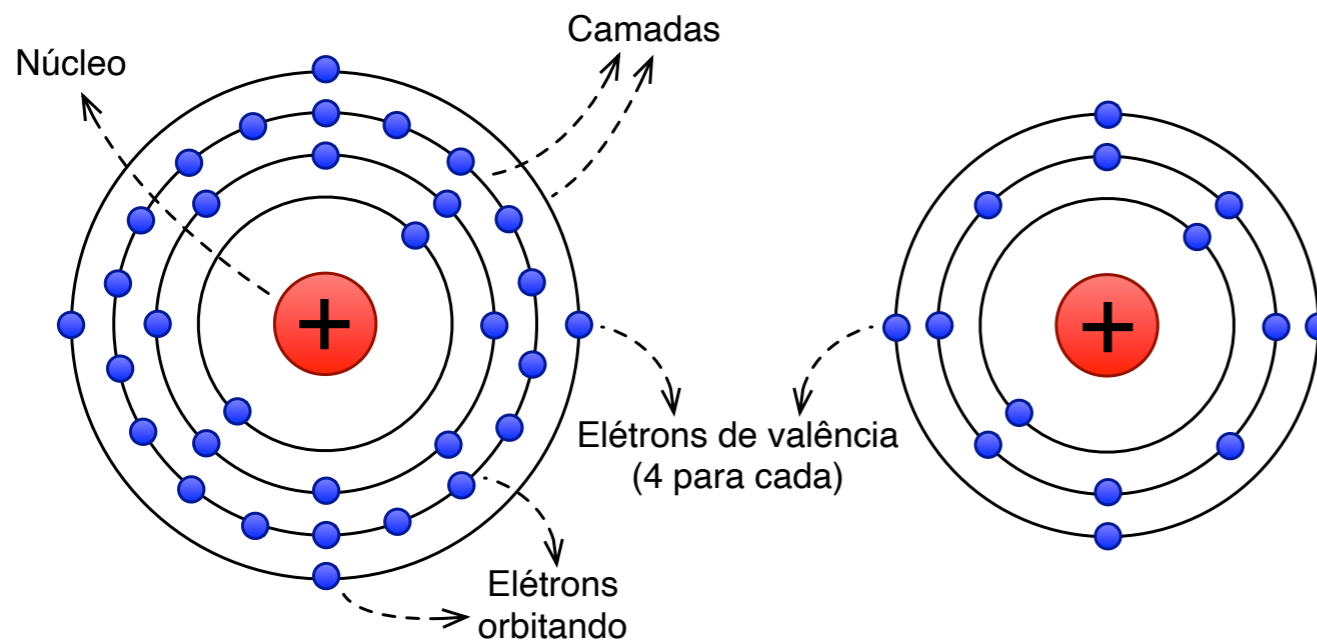
$$\rho \cong 10^{12} \Omega cm \text{ (mica)}$$



Materiais semicondutores

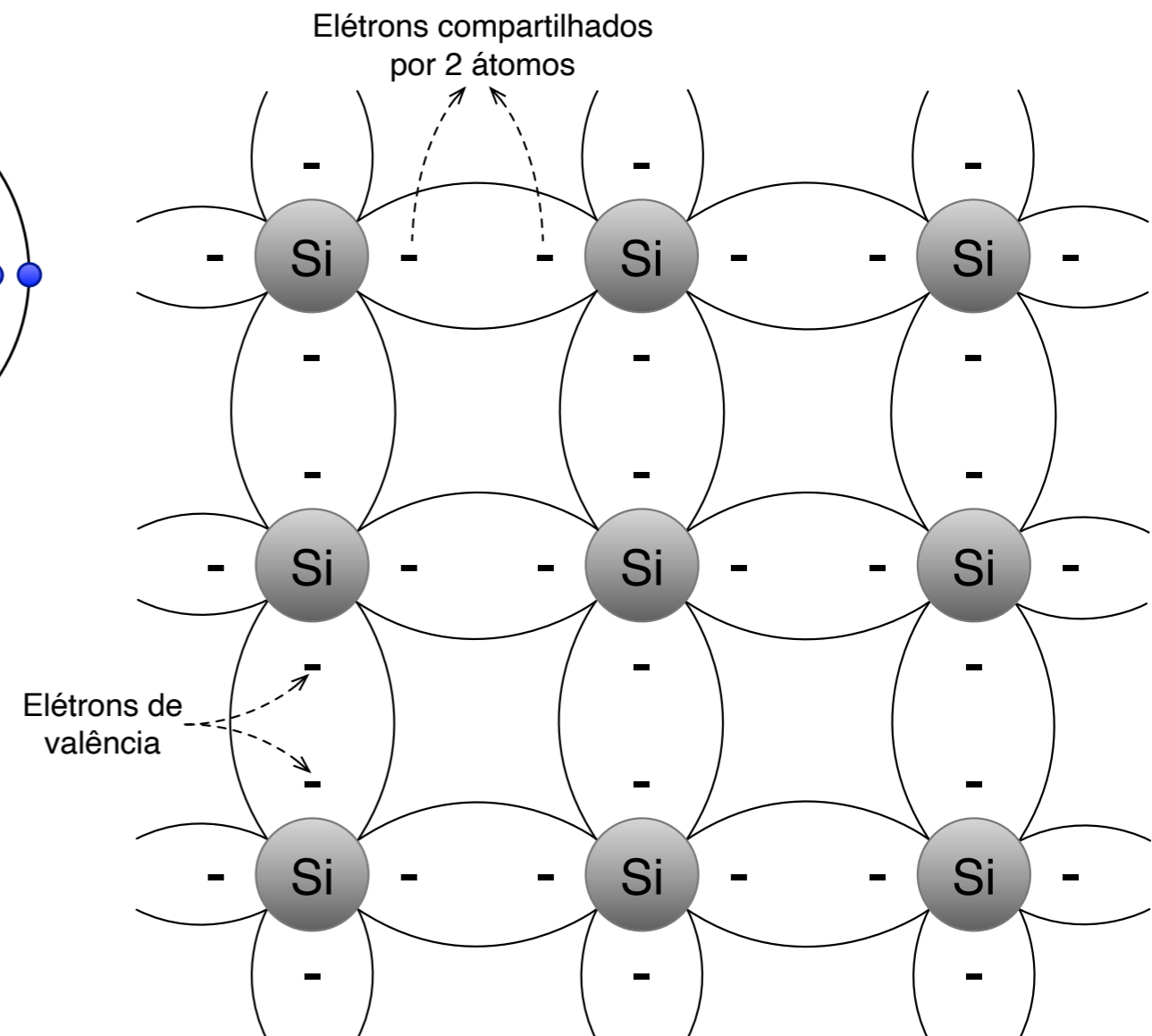
Materiais intrínsecos:

- São semicondutores cuidadosamente refinados para se obter a redução de impurezas a um nível muito baixo - são basicamente tão puros quanto permite a tecnologia moderna.



Estrutura atômica do germânio e do silício

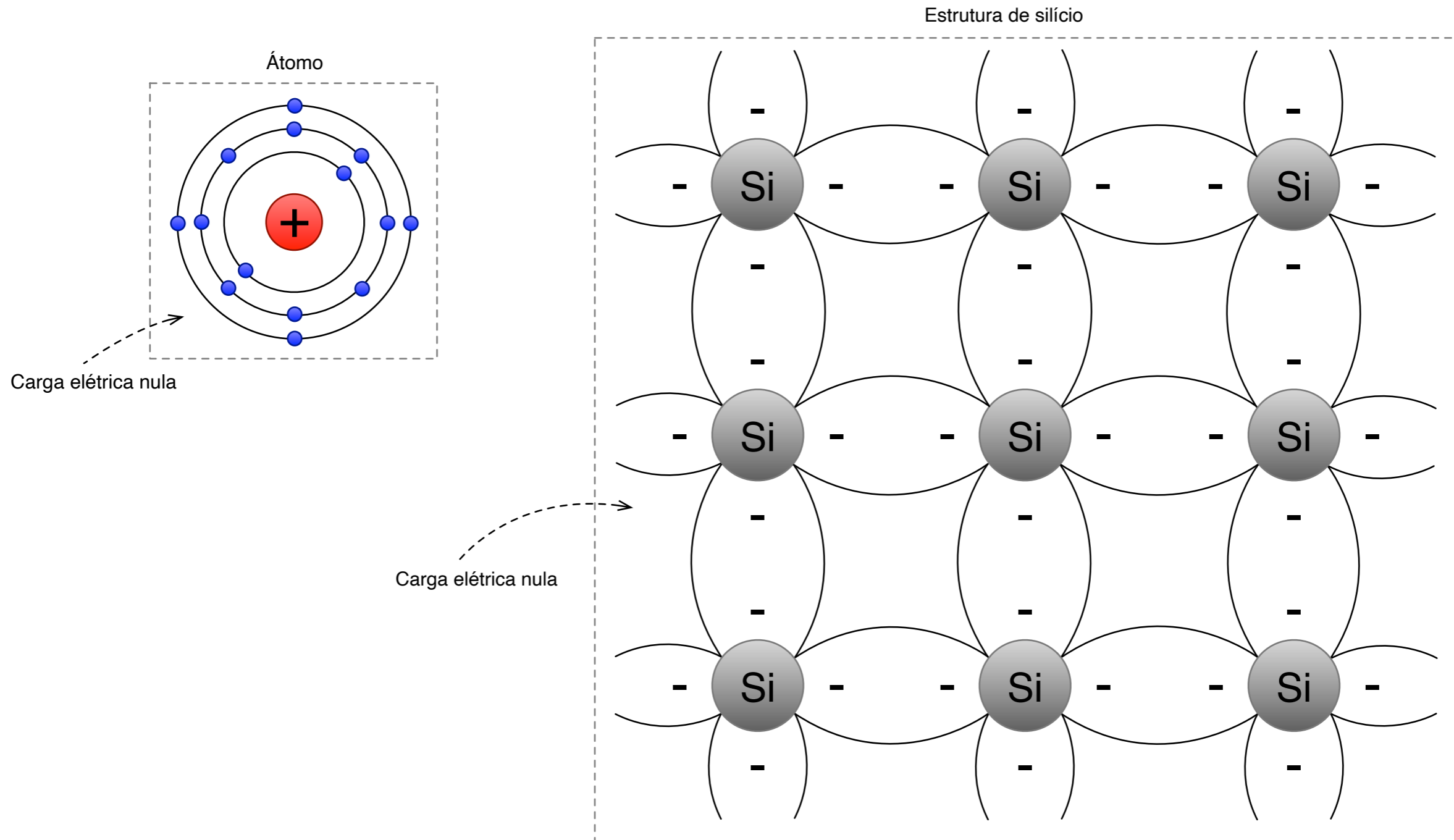
Ligação covalente do átomo de silício



Materiais semicondutores

Carga elétrica dos materiais:

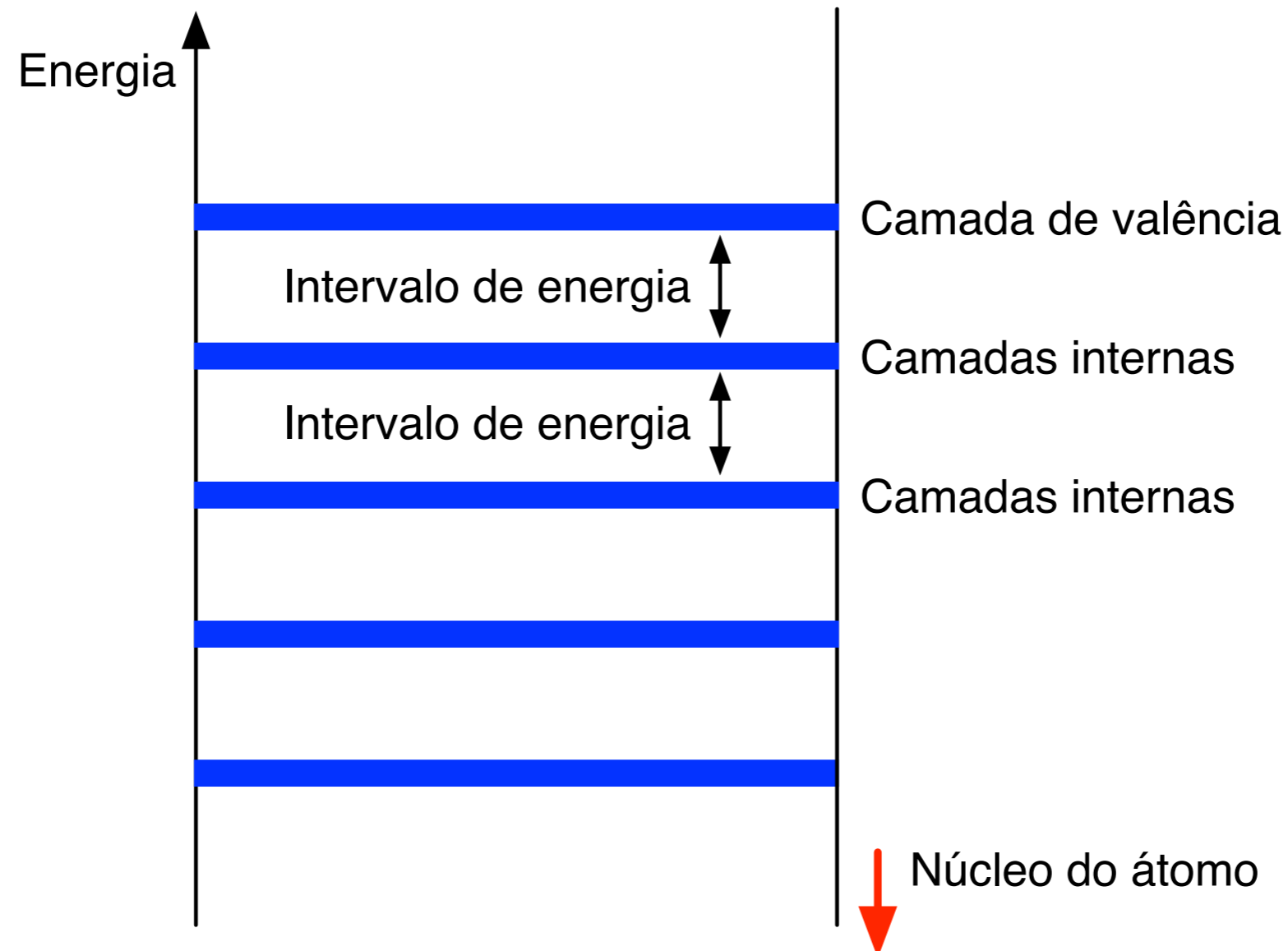
- Os átomos, moléculas e materiais em equilíbrio possuem carga elétrica equivalente nula;
- No interior dos materiais ocorre circulação de elétrons que receberam energia térmica, por exemplo, mas essa circulação é aleatória, resultando em corrente média nula.



Níveis de energia

Níveis de energia:

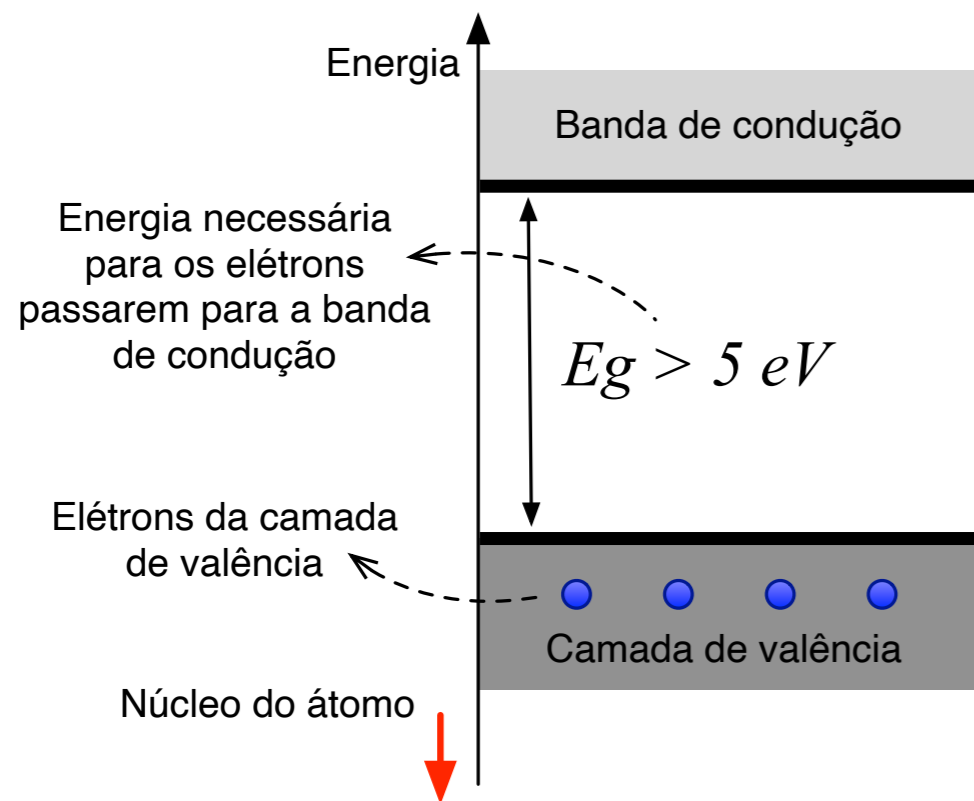
- Quanto mais longe o elétron estiver do núcleo, maior será o estado de energia, e qualquer elétron que tiver deixado seu átomo de origem apresentará um estado de energia maior do que qualquer outro na estrutura atômica.



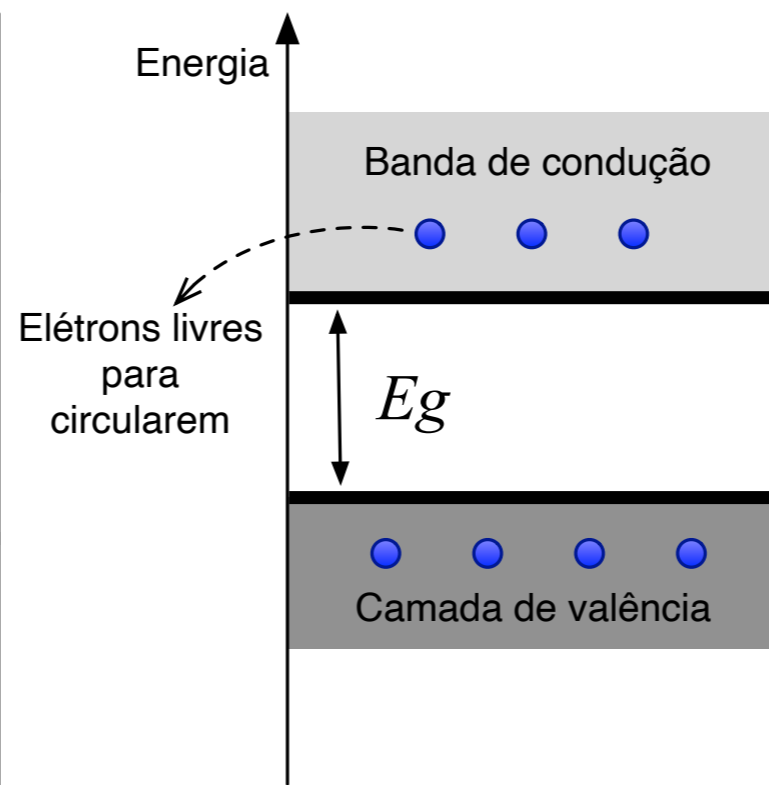
Níveis de energia

Energia necessária para entrar em condução:

Isolantes



Semicondutores

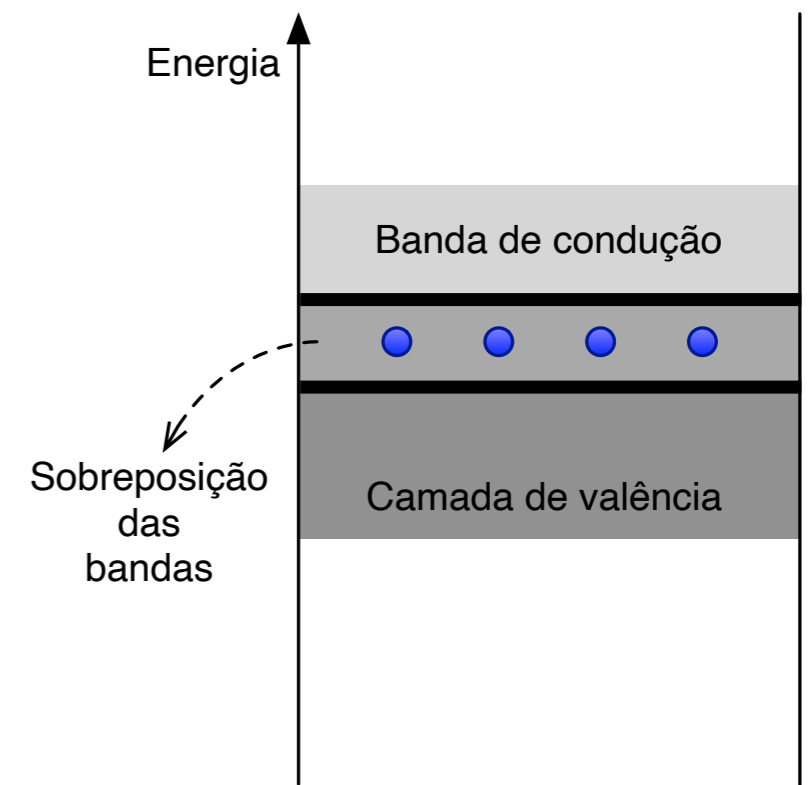


$$E_g = 1,1 \text{ eV (Si)}$$

$$E_g = 0,67 \text{ eV (Ge)}$$

$$E_g = 1,41 \text{ eV (GaAs)}$$

Condutores



Materiais semicondutores:

- Si = silício;
- Ge = Germânio;
- GaAs = Arsenieto de Gálio.

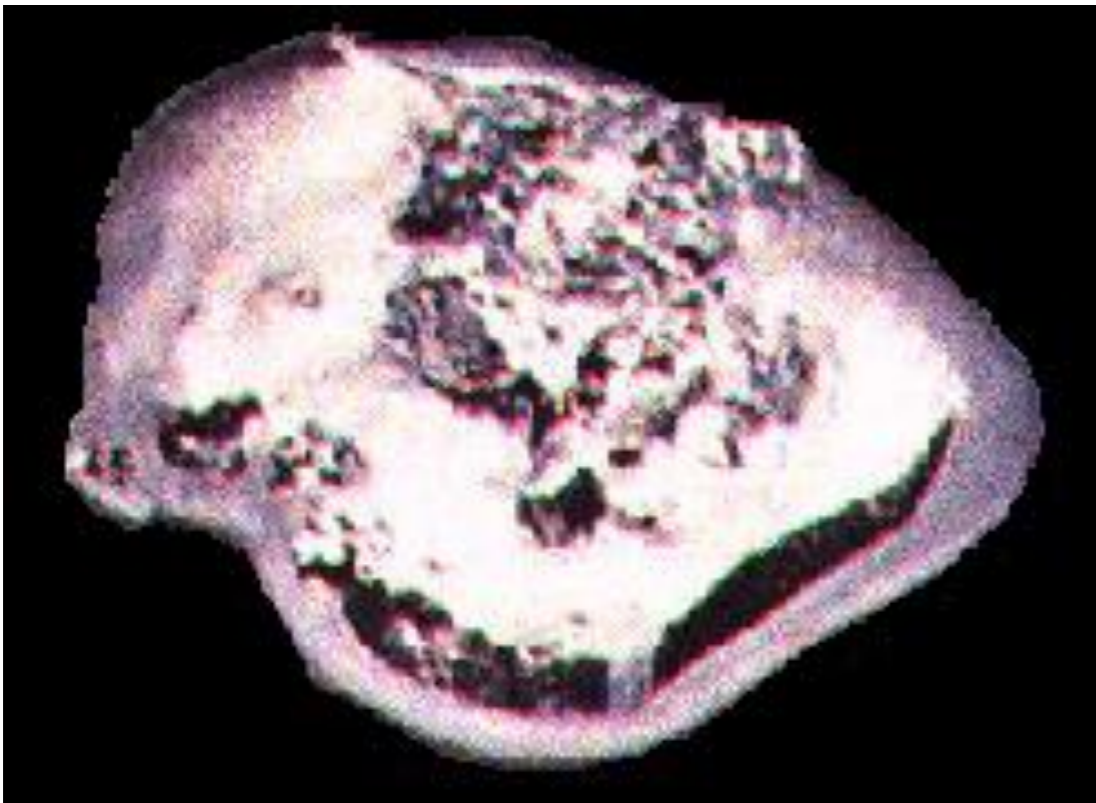
Elétron-volt (eV):

- Usado para quantificar energia de partículas;
- $1 \text{ eV} = 1,602 \ 176 \ 634 \times 10^{-19} \text{ joules (J)}$.

Materiais extrínsecos N e P

Material extrínseco:

- Um material semicondutor submetido ao processo de dopagem é chamado de material extrínseco.



Antimônio (5 elétrons na camada de valência)

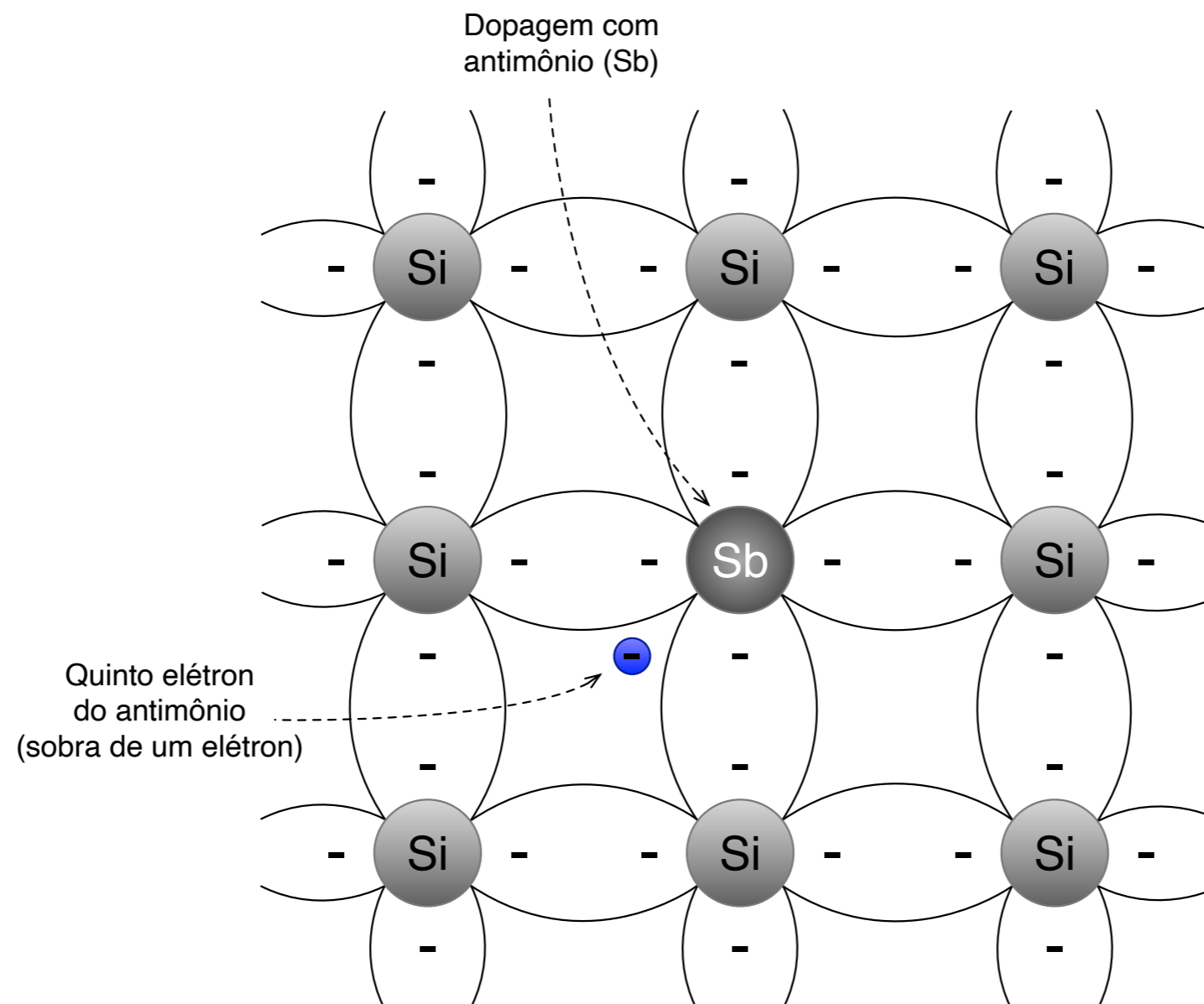


Gálio (3 elétrons na camada de valência)

Materiais extrínsecos N e P

Material do tipo N:

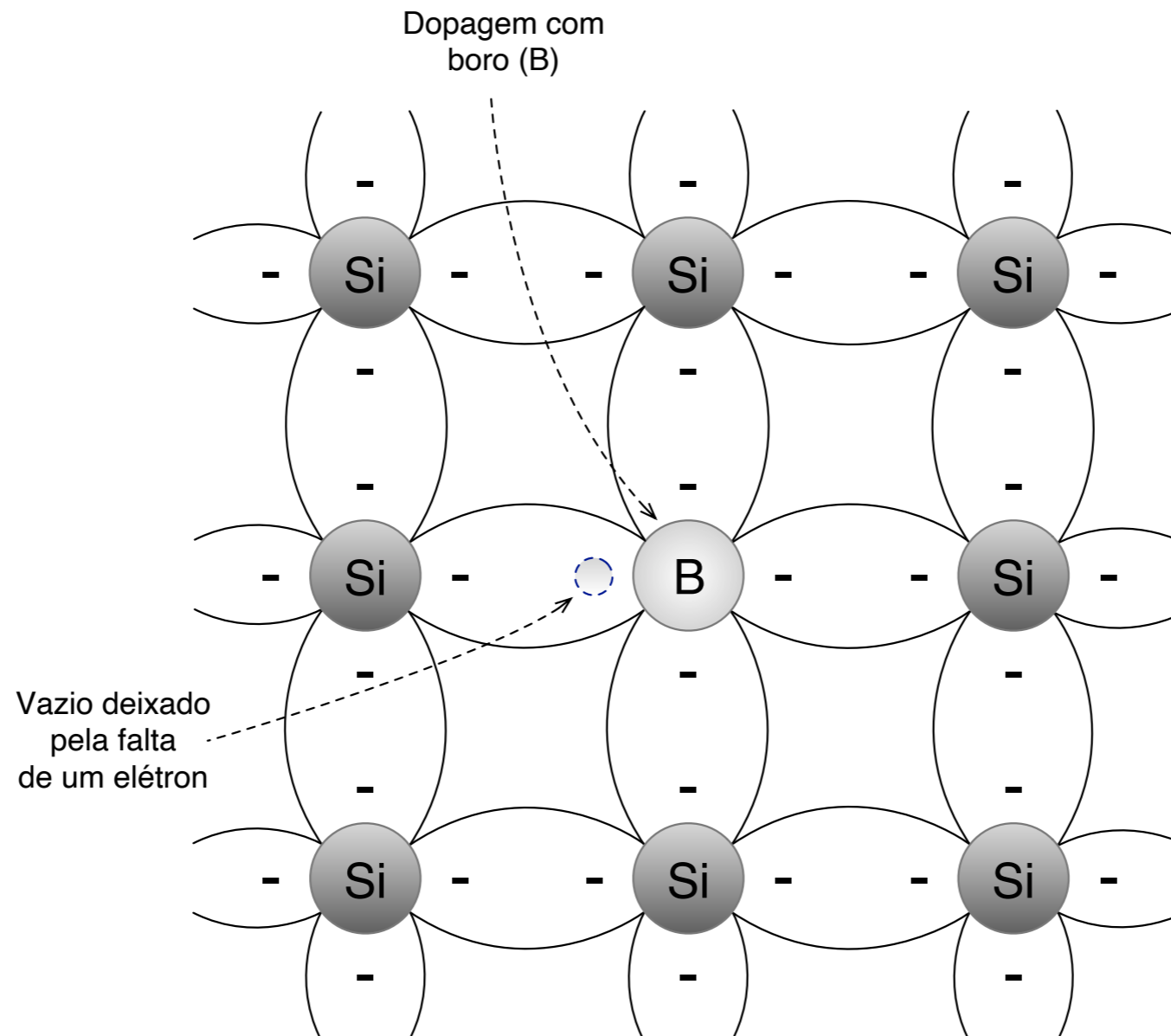
- É um material semiconductor dopado com impurezas com cinco elétrons na camada de valência.
- Exemplos de materiais pentavalentes: fósforo (P), arsênio (As) ou antimônio (Sb).



Materiais extrínsecos N e P

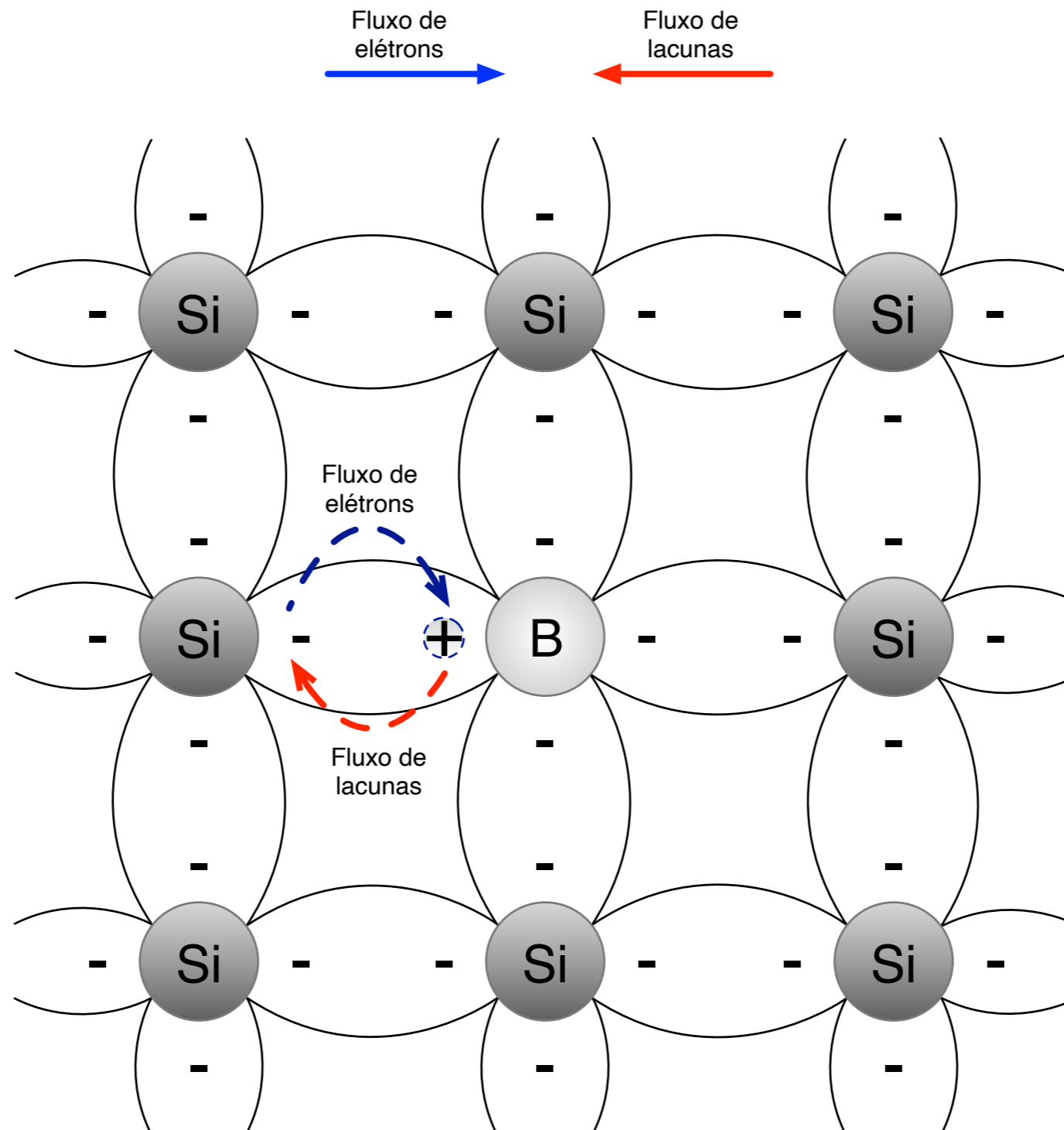
Material do tipo P:

- É um material semiconductor dopado com impurezas com três elétrons na camada de valência.
- Exemplos de materiais trivalentes: boro (B), gálio (Ga) ou índio (In).



Materiais extrínsecos N e P

Fluxo de elétrons versus fluxo de lacunas:

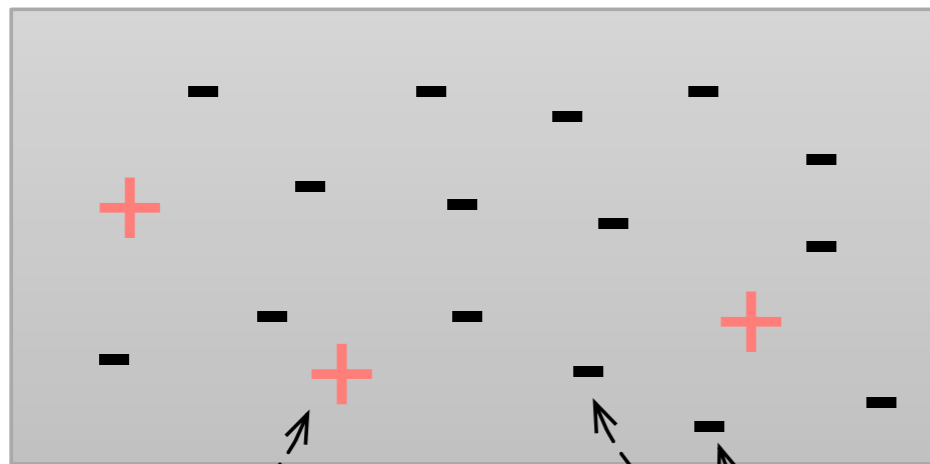


Materiais extrínsecos N e P

Portadores majoritários e minoritários:

- Em um material do tipo N, o elétron é chamado de portador majoritário, e a lacuna é chamada de portador minoritário;
- Em um material do tipo P, a lacuna é o portador majoritário, e o elétron é o portador minoritário.

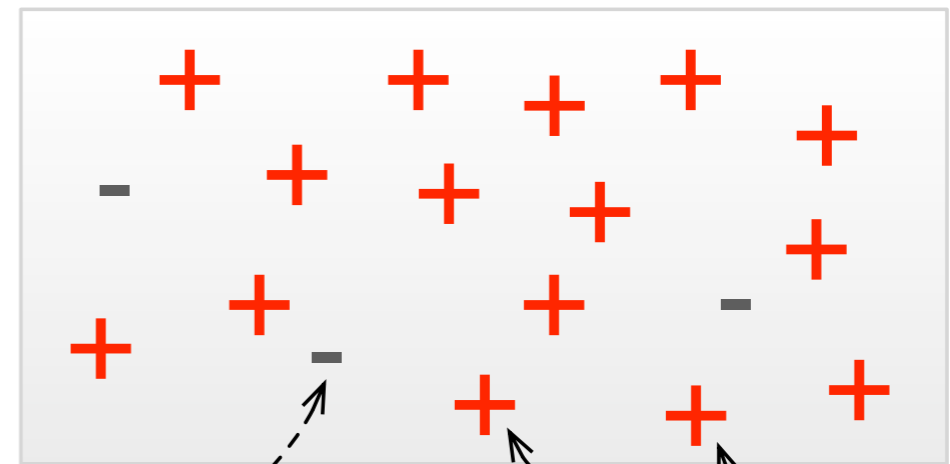
Tipo n



Portador minoritário

Portadores majoritários

Tipo p



Portador minoritário

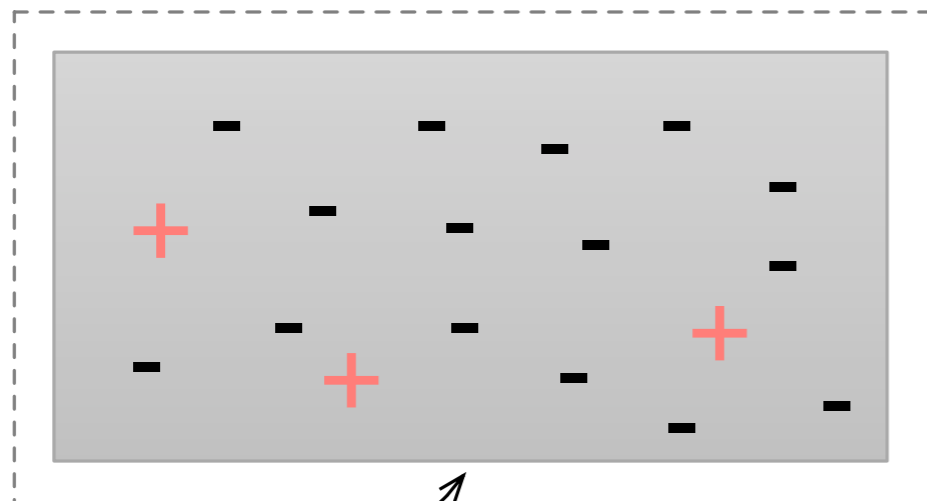
Portadores majoritários

Materiais extrínsecos N e P

Carga elétrica dos materiais:

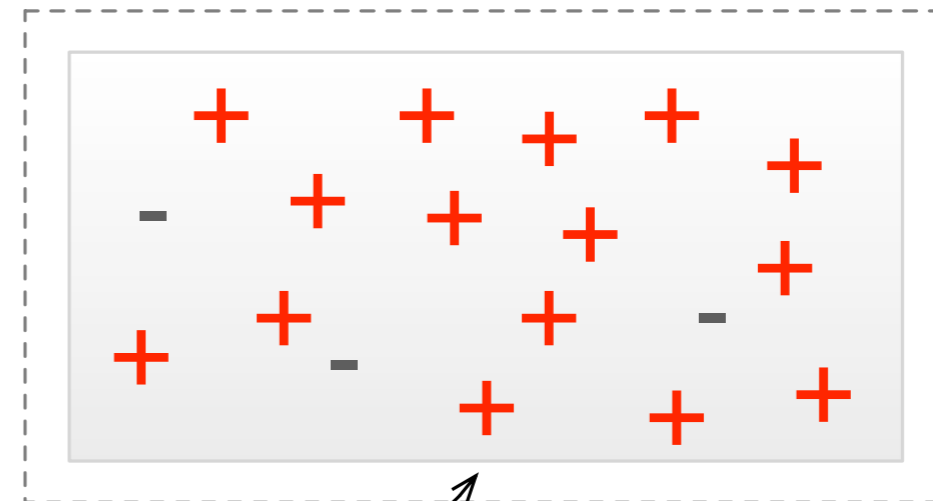
- Após a inserção de impurezas no material semicondutor, sua carga elétrica resultante permanece nula;
- No interior do material ocorre a circulação de elétrons e lacunas, em virtude do fornecimento de energia ao mesmo pelo ambiente (térmica, calorífica, elétrica, luminosa, etc.).

Tipo n



Carga elétrica nula

Tipo p



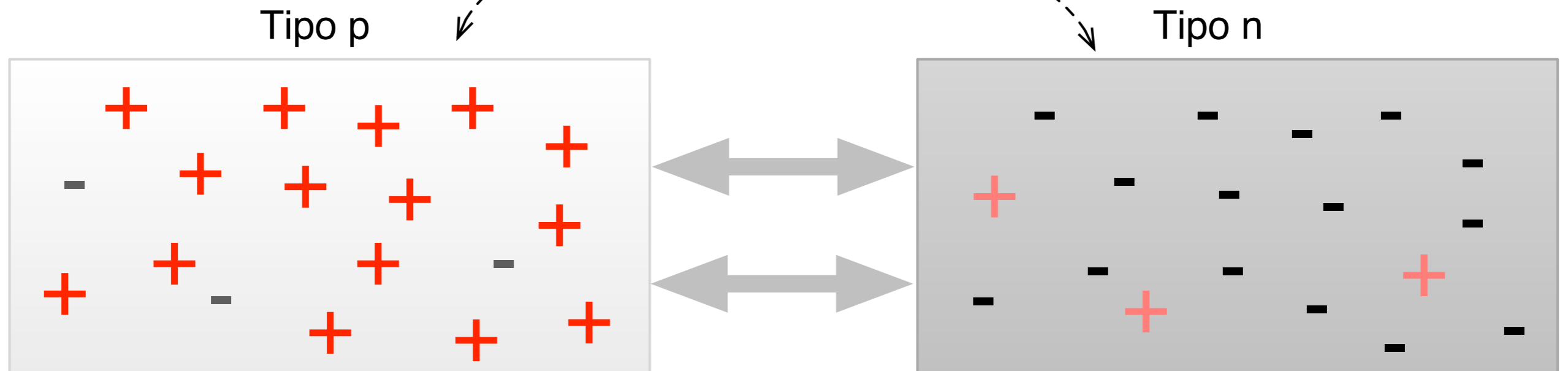
Carga elétrica nula

Diodo Semicondutor

Junção P-N:

- A junção P-N é originada quando um material tipo n é colocado em contato com um material do tipo p.

Materiais tipo n e tipo p
são colocados em contato

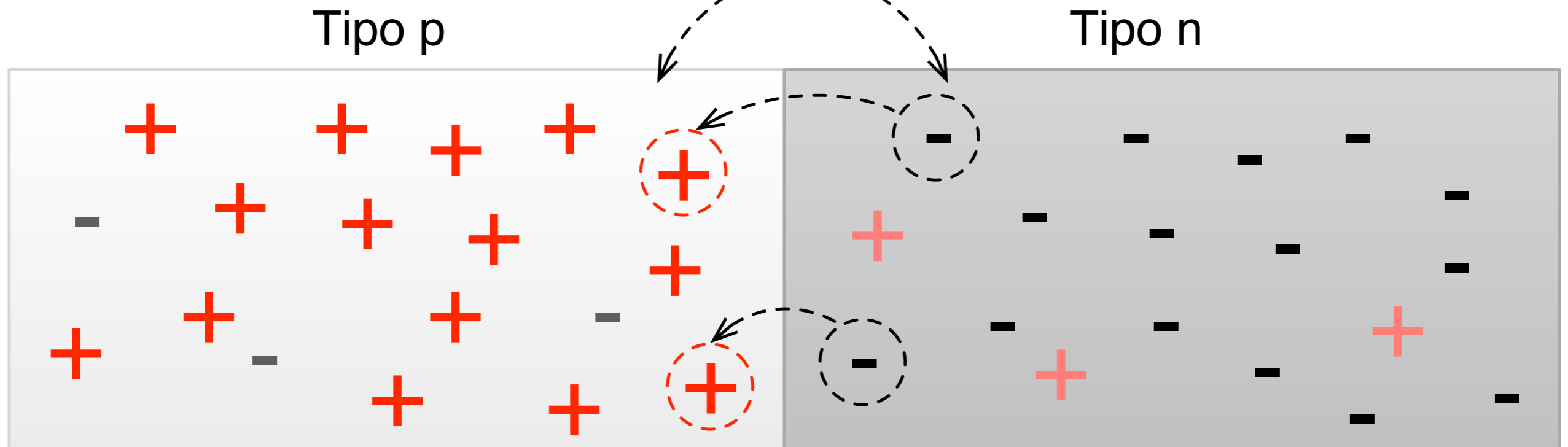


Diodo Semicondutor

Junção P-N:

- Ao ocorrer o contato do material do tipo n com o material do tipo p, os elétrons do material do tipo n fluem através da junção se combinando com as lacunas do material do tipo p;
- O deslocamento de elétrons e de lacunas desequilibra a carga elétrica dos átomos, resultando em íons positivos no material do tipo n e íons negativos no material do tipo p.

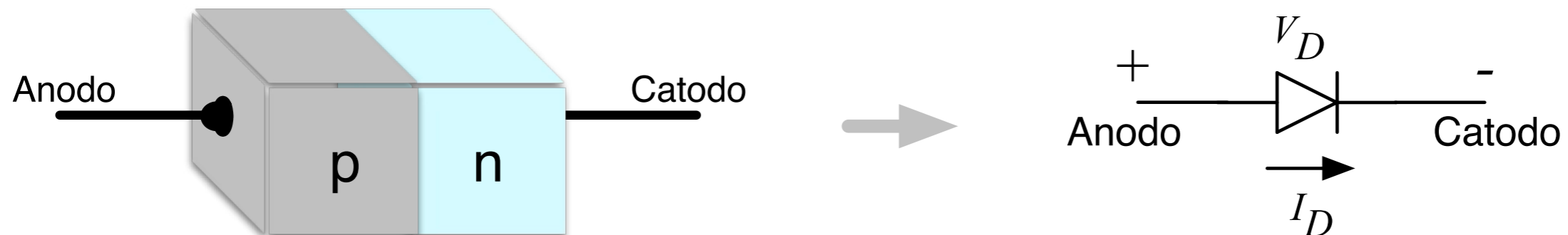
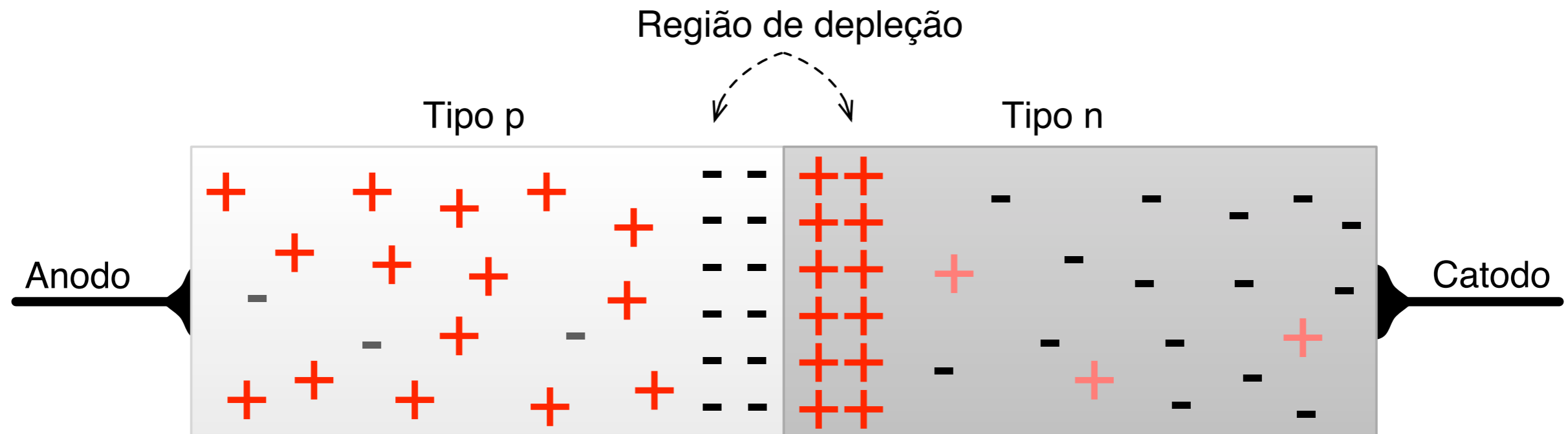
Elétrons se
combinam com lacunas



Diode Semicondutor

Junção P-N:

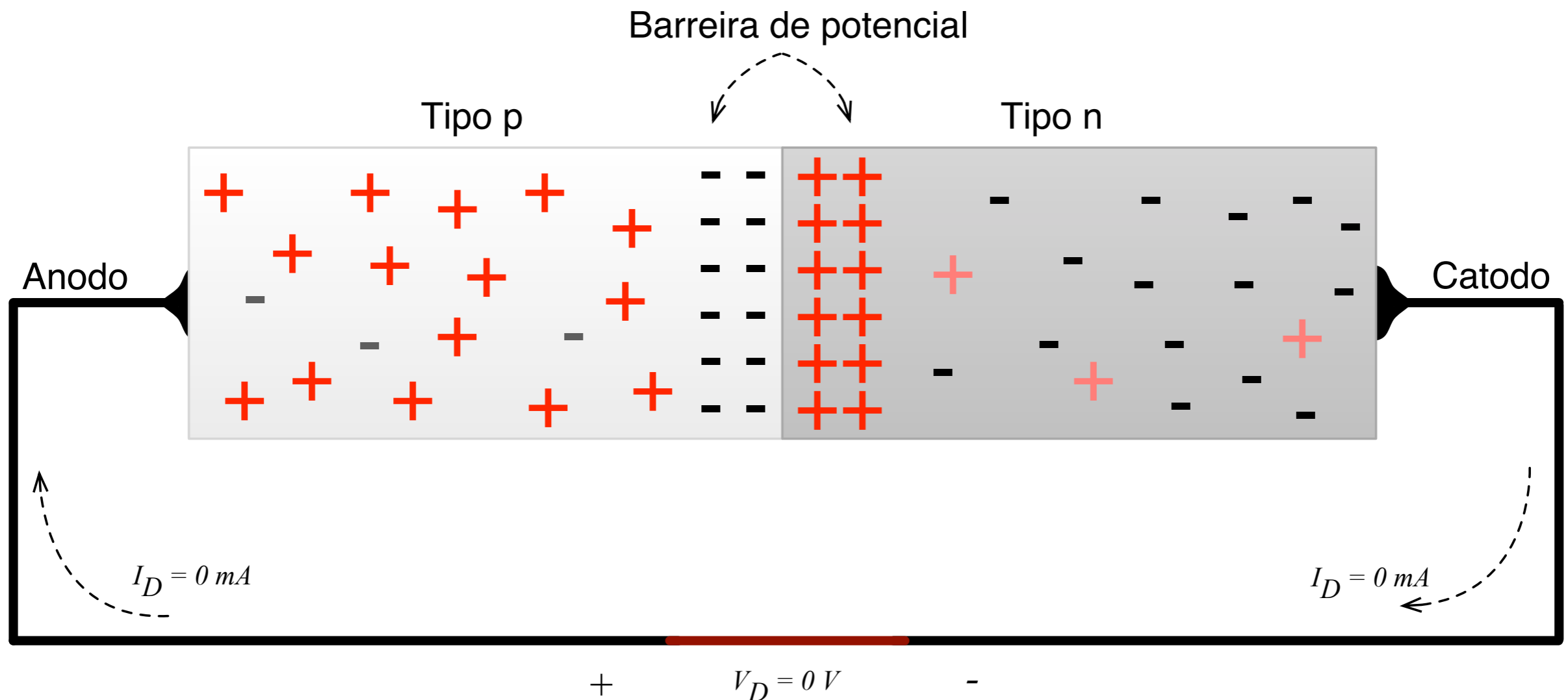
- A região ou camada de depleção é chamada de barreira de potencial;
- No germânio a diferença de potencial resultante na região de depleção é da ordem de 0,3 V, enquanto no silício é da ordem de 0,7 V.



Diodo Semicondutor

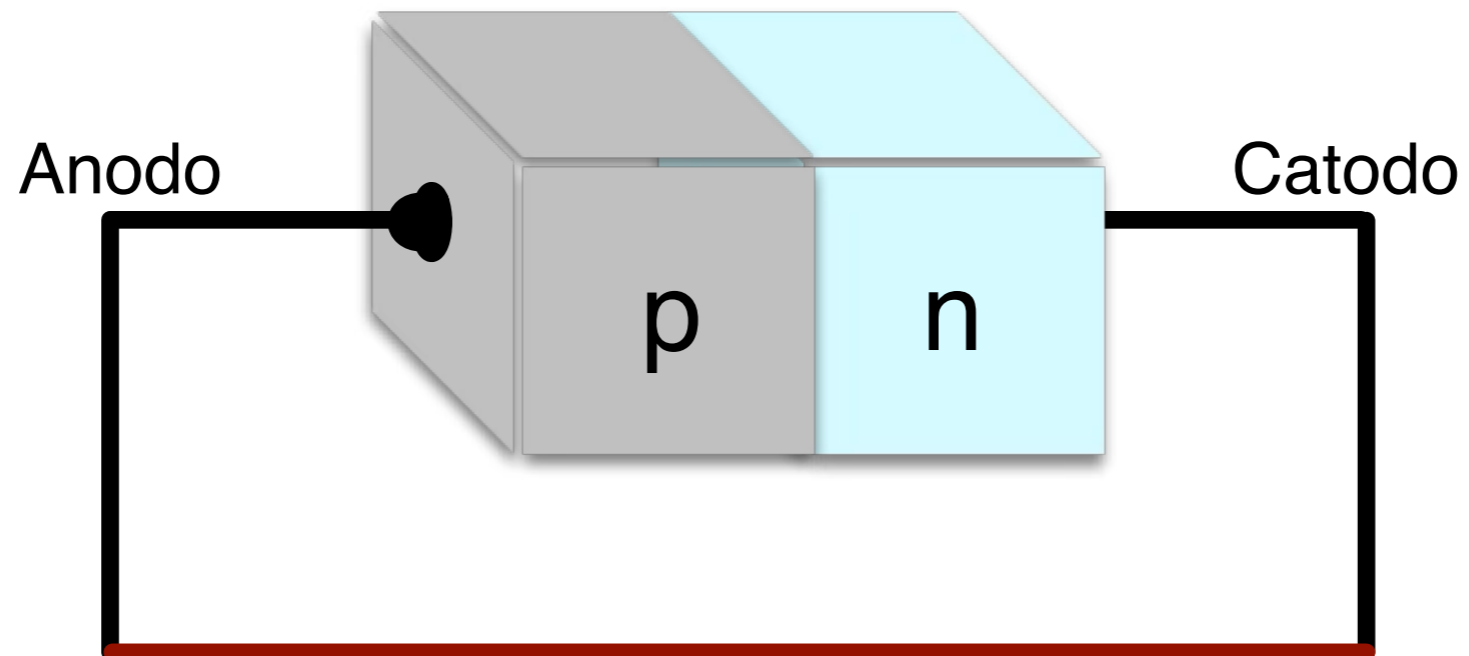
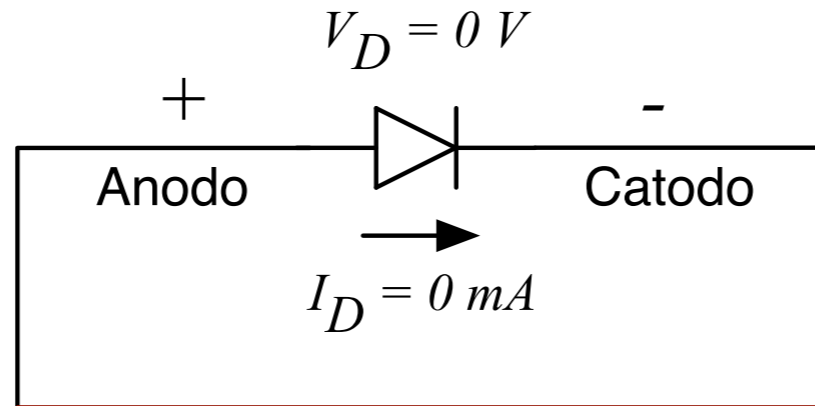
Sem polarização ($V_D = 0\text{ V}$), curto-circuito:

- Ao curto-circuitar os terminais de um diodo, sua tensão resultante será nula ($V_D = 0\text{ V}$);
- A corrente resultante no diodo também será nula ($I_D = 0\text{ A}$);
- Elétrons e lacunas poderão circular pela conexão externa, mas não se tem circulação de cargas através da junção P-N.



Diodo Semicondutor

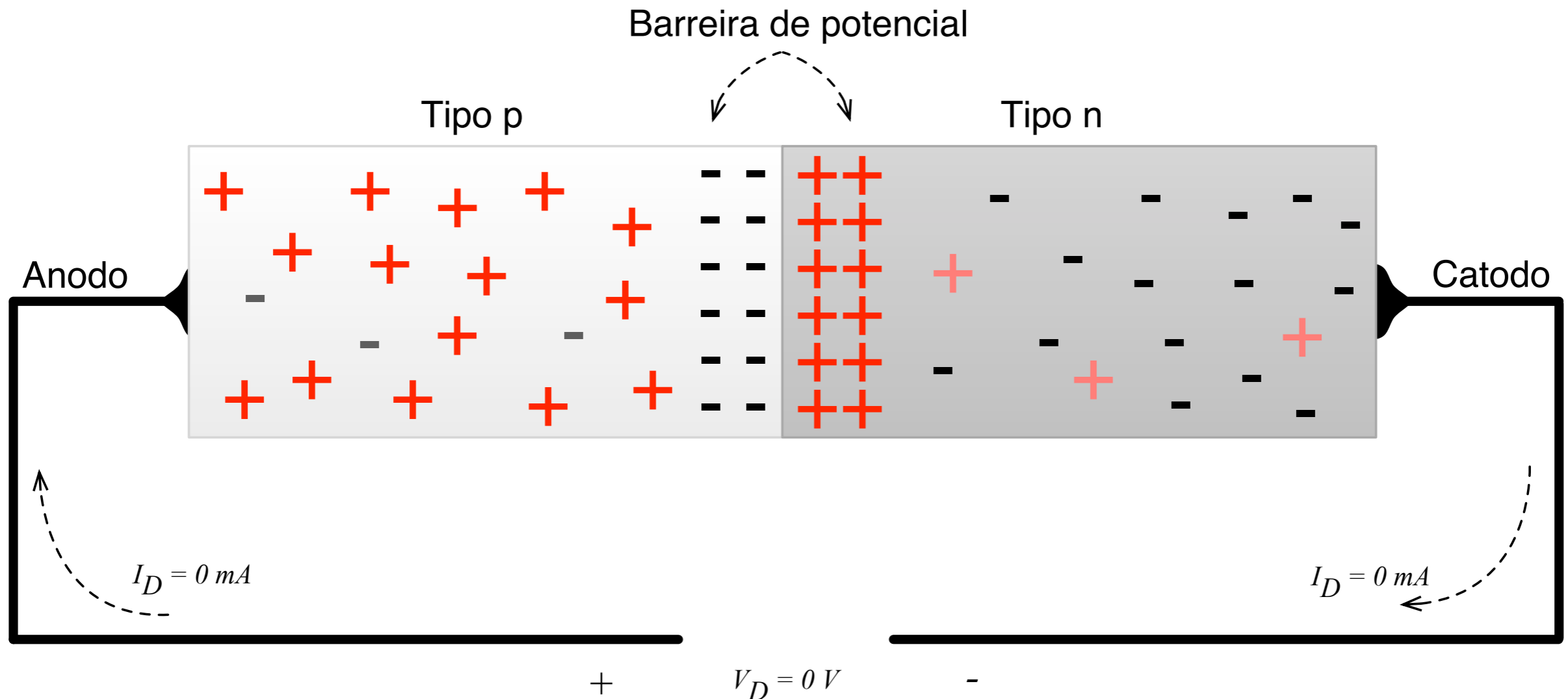
Sem polarização ($V_D = 0\text{ V}$), curto-circuito:



Diode Semicondutor

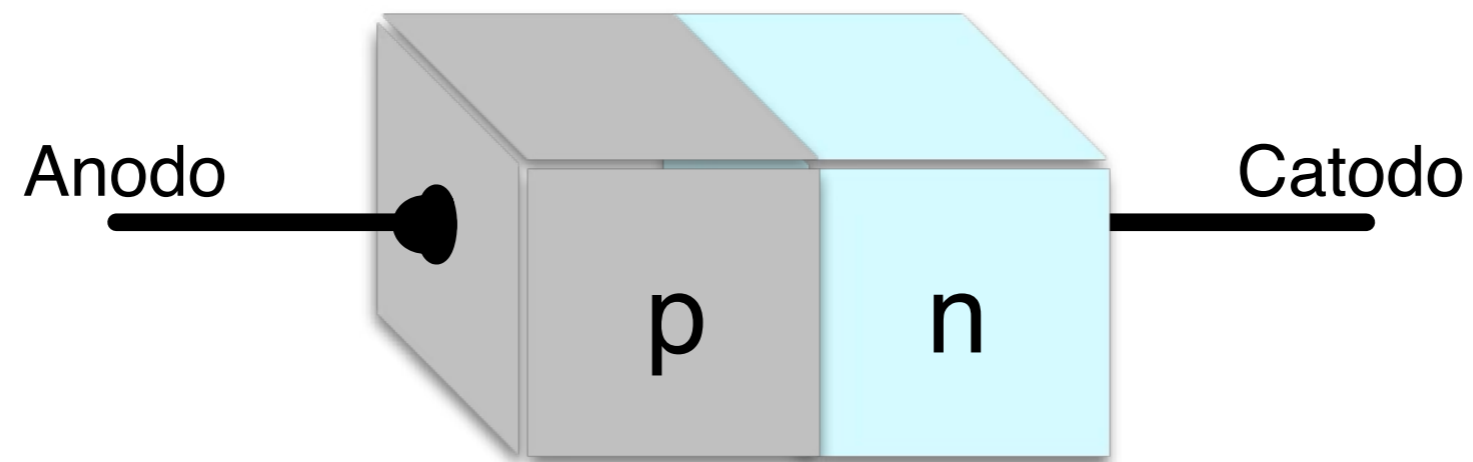
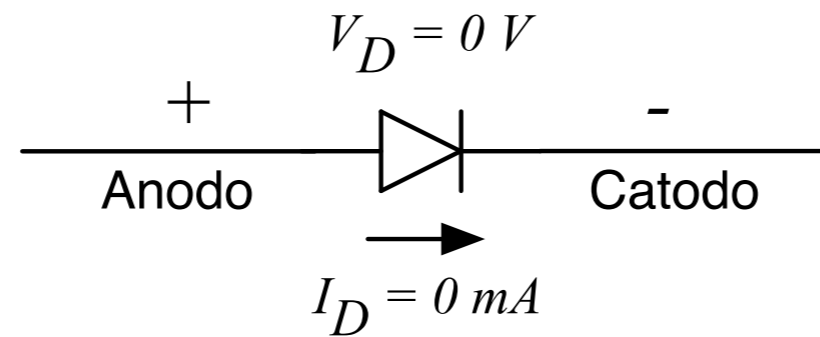
Sem polarização ($V_D = 0\text{ V}$), circuito aberto:

- O diodo semicondutor em circuito aberto tem tensão resultante nula ($V_D = 0\text{ V}$);
- A corrente no diodo, visto o circuito estar aberto, também será nula ($I_D = 0\text{ A}$).



Diodo Semicondutor

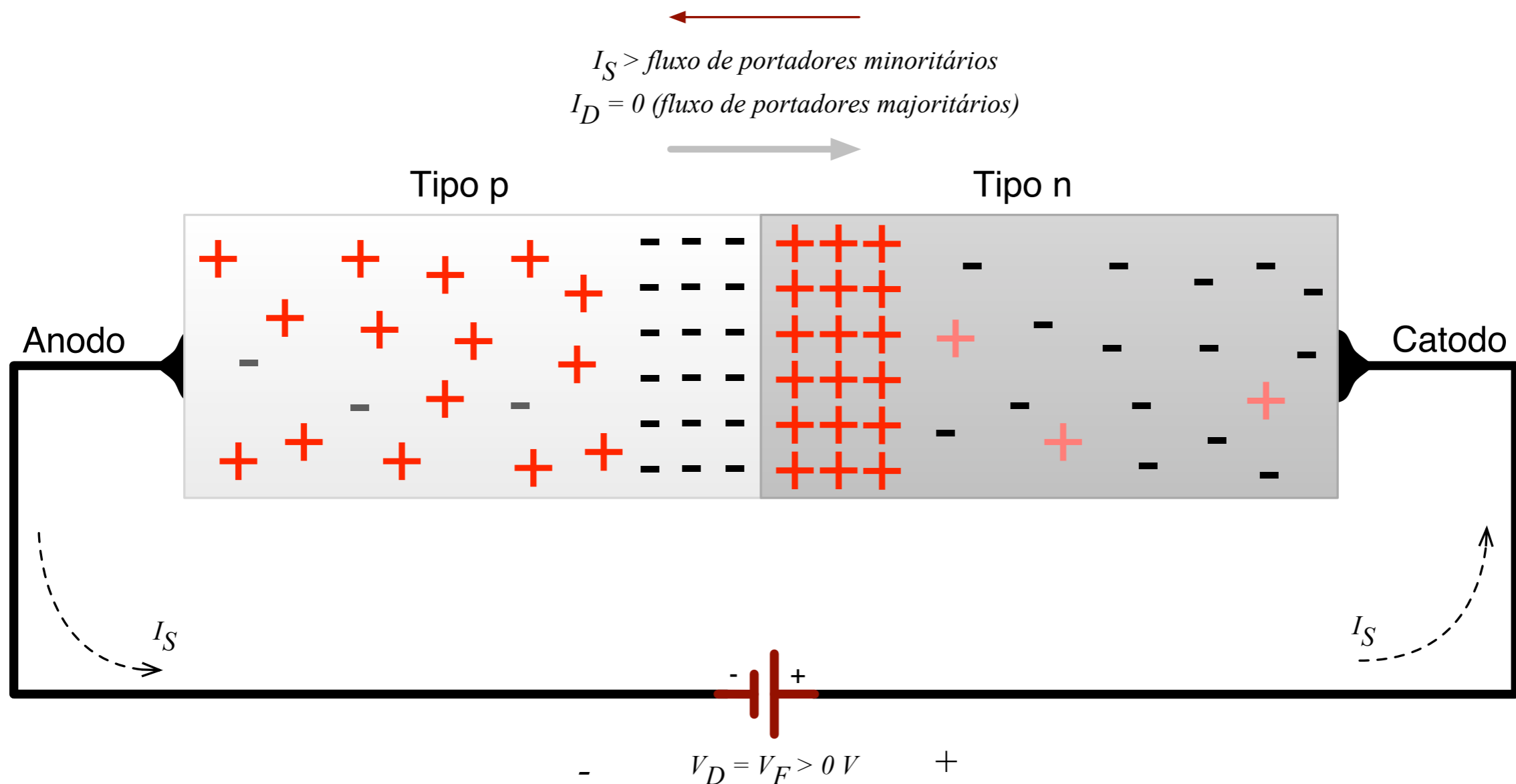
Sem polarização ($V_D = 0\text{ V}$), circuito aberto:



Diodo Semicondutor

Polarização reversa ($V_D < 0 V$):

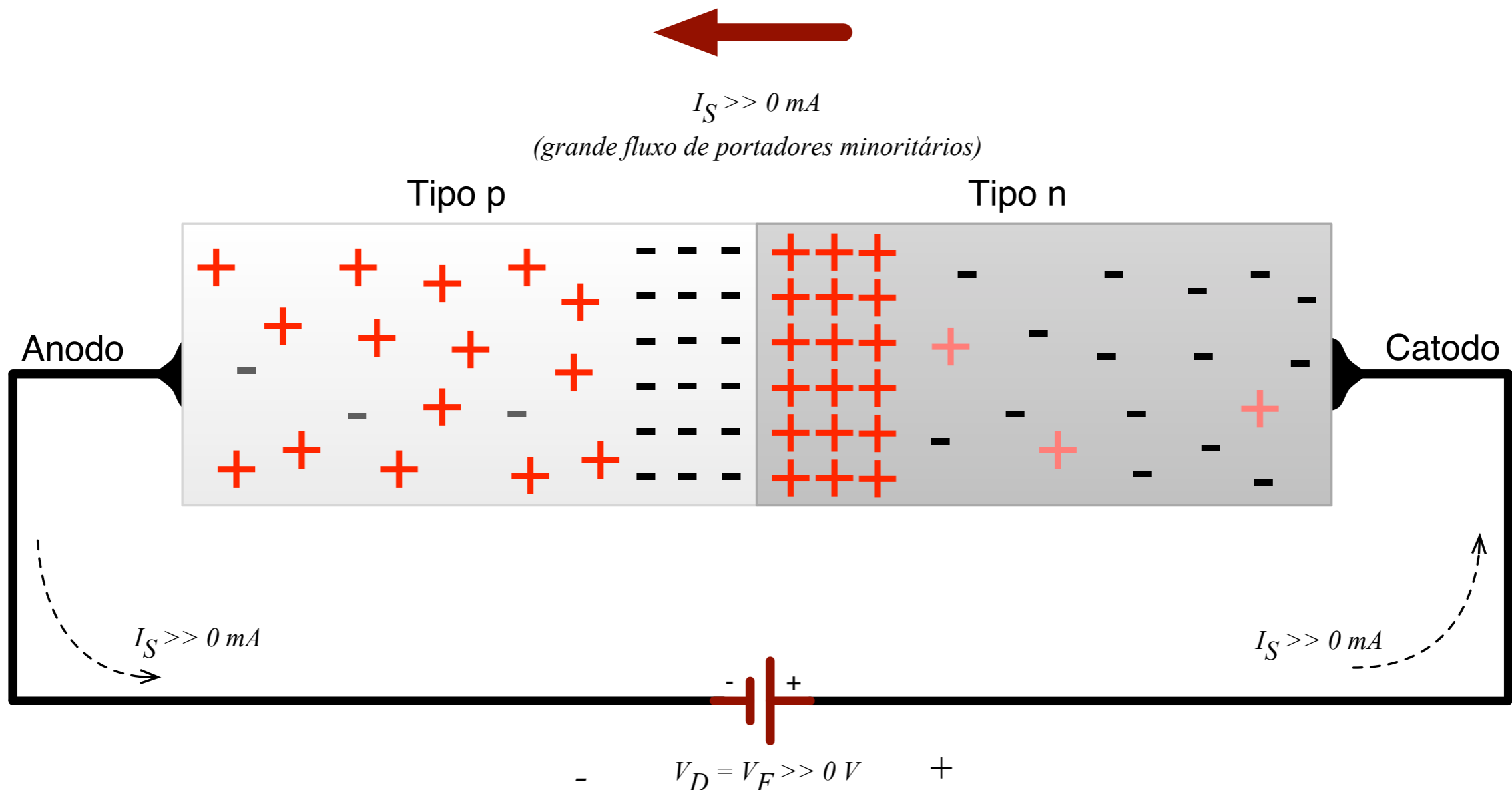
- Na polarização reversa, a tensão no diodo será igual à da fonte de alimentação ($V_D = V_F$);
- A corrente no diodo será a corrente reversa, devida aos portadores minoritários ($I_D = I_S$);
- Elétrons do polo negativo da fonte de alimentação fluem para se combinarem com as lacunas do material tipo p, enquanto os elétrons do material tipo n fluem até o polo positivo da fonte; resultando no aumento da região de depleção.



Diodo Semicondutor

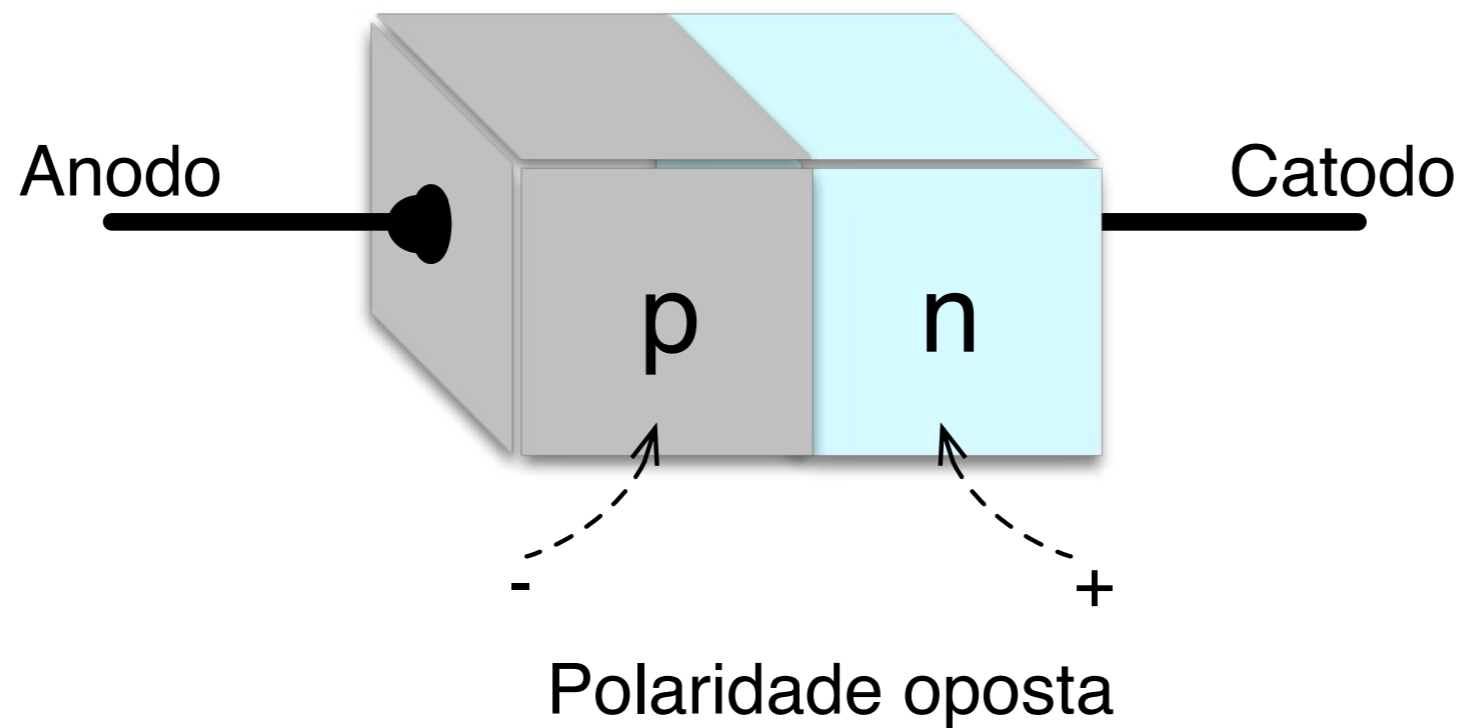
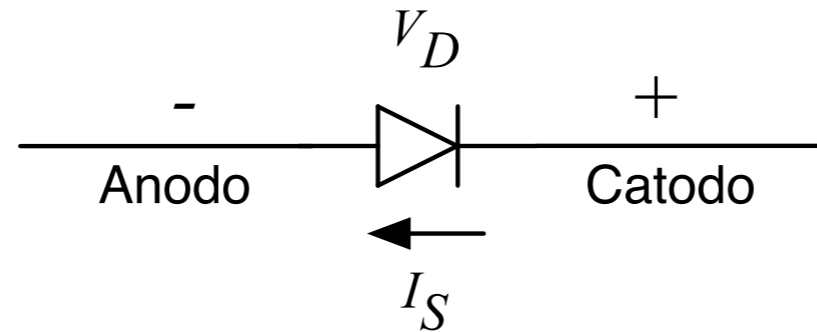
Polarização reversa ($V_D \ll 0 V$), ruptura:

- Na polarização reversa, se a tensão aplicada sobre o diodo for excessivamente alta, pode ocorrer a ruptura do mesmo, implicando em grande fluxo de cargas elétricas pelo diodo;
- A ruptura ocorre quando o campo elétrico externo supera a resistância interna do diodo, fazendo com que os portadores de carga acelerem e se choquem com os demais, liberando energia e provocando novas acelerações de outros portadores, criando um efeito em cascata.



Diodo Semicondutor

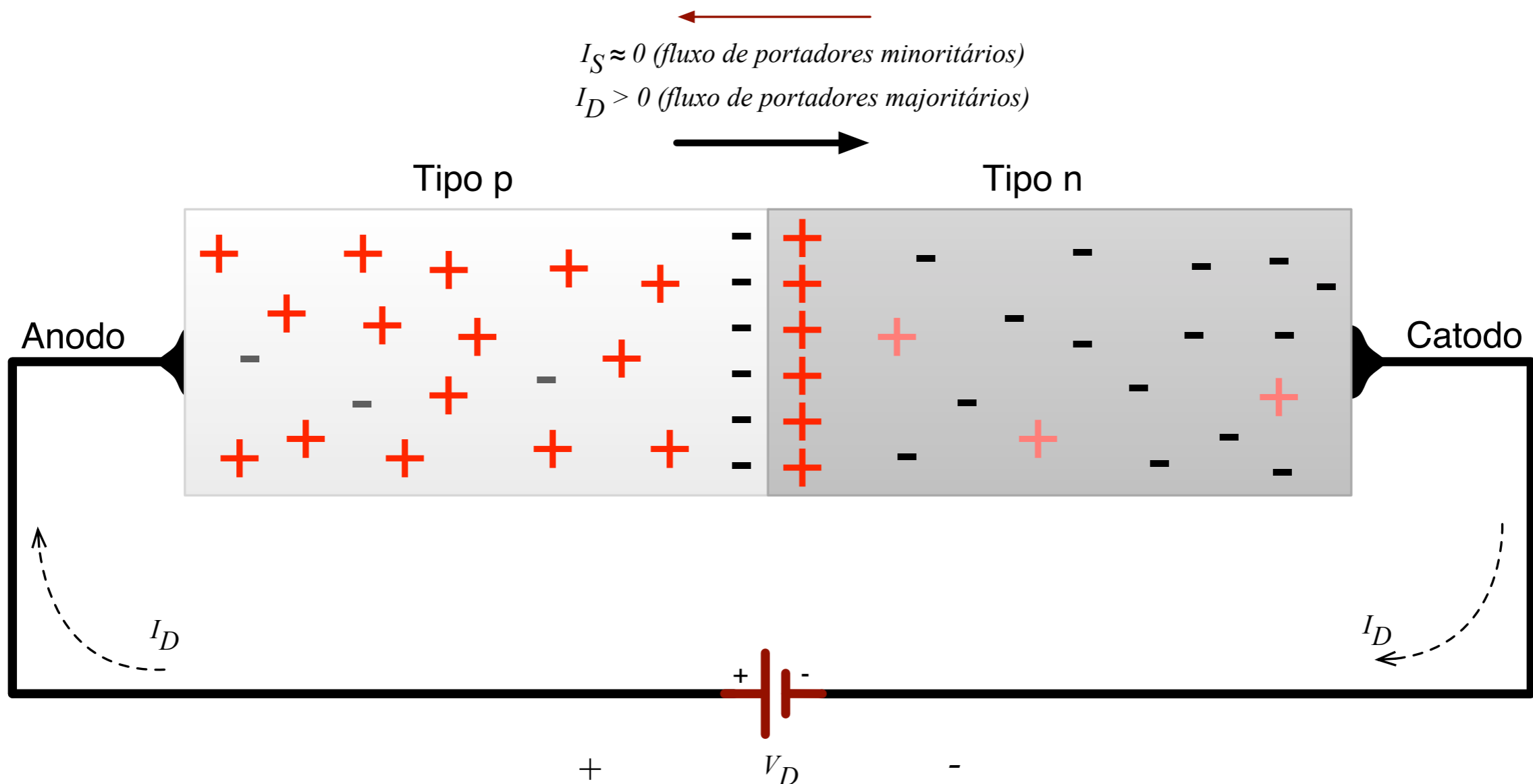
Polarização reversa ($V_D < 0$ V):



Diodo Semicondutor

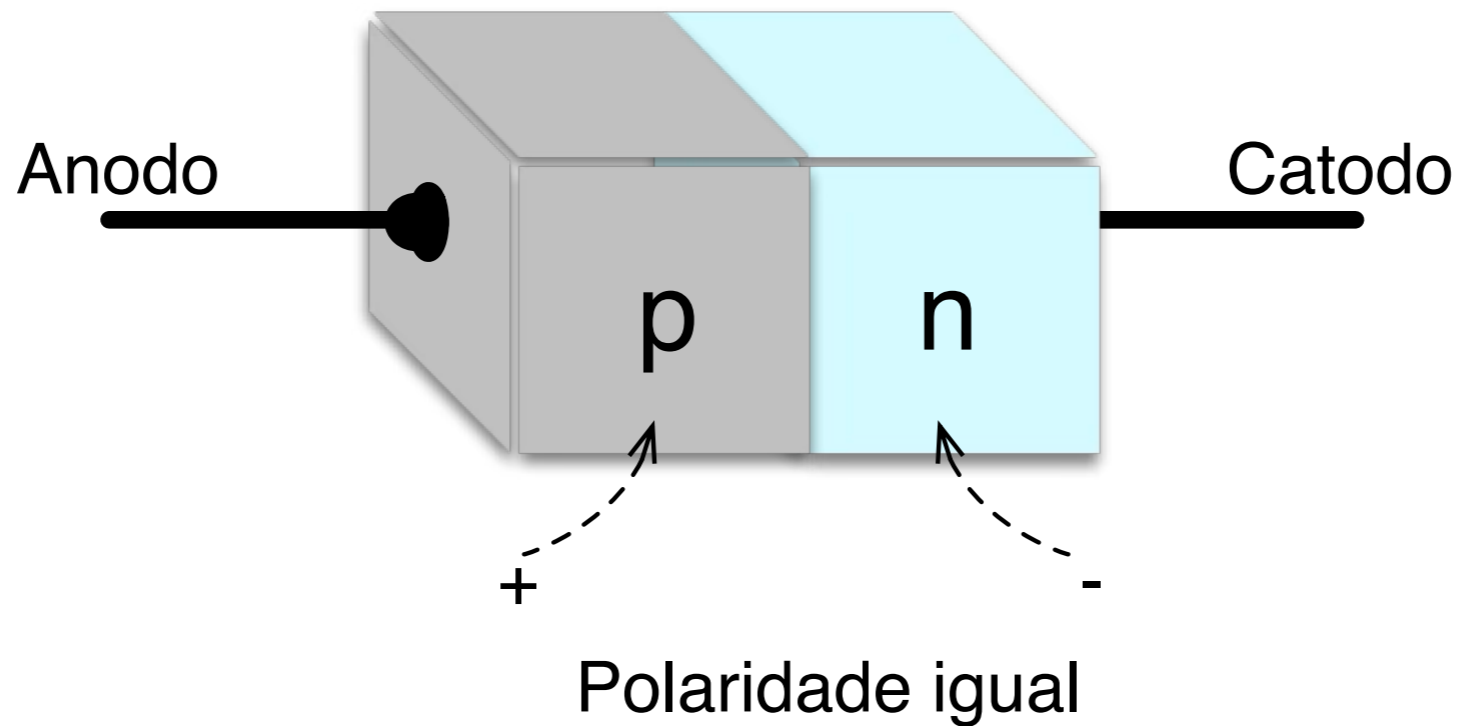
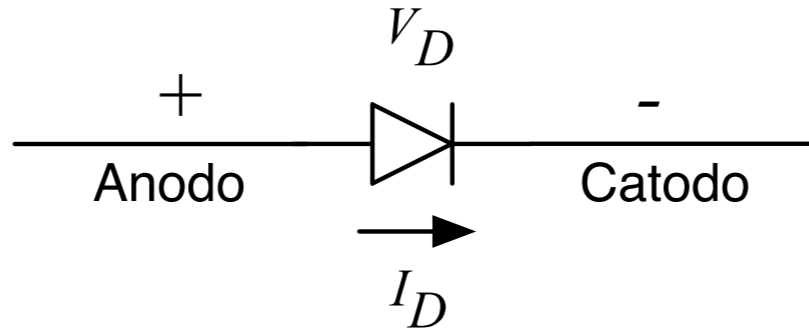
Polarização direta ($V_D > 0$ V):

- A tensão sobre o diodo será igual ao valor da barreira de potencial ($V_D > 0$ V);
- A corrente no diodo será a corrente direta, devida aos portadores majoritários ($I_D > 0$ A);
- Elétrons do polo negativo da fonte de alimentação repelem os elétrons do material tipo n, forçando que os mesmos atravessem a barreira de potencial, circulando pelo material do tipo p e entrando no polo positivo da fonte de alimentação; resultando em diminuição da região de depleção.



Diodo Semicondutor

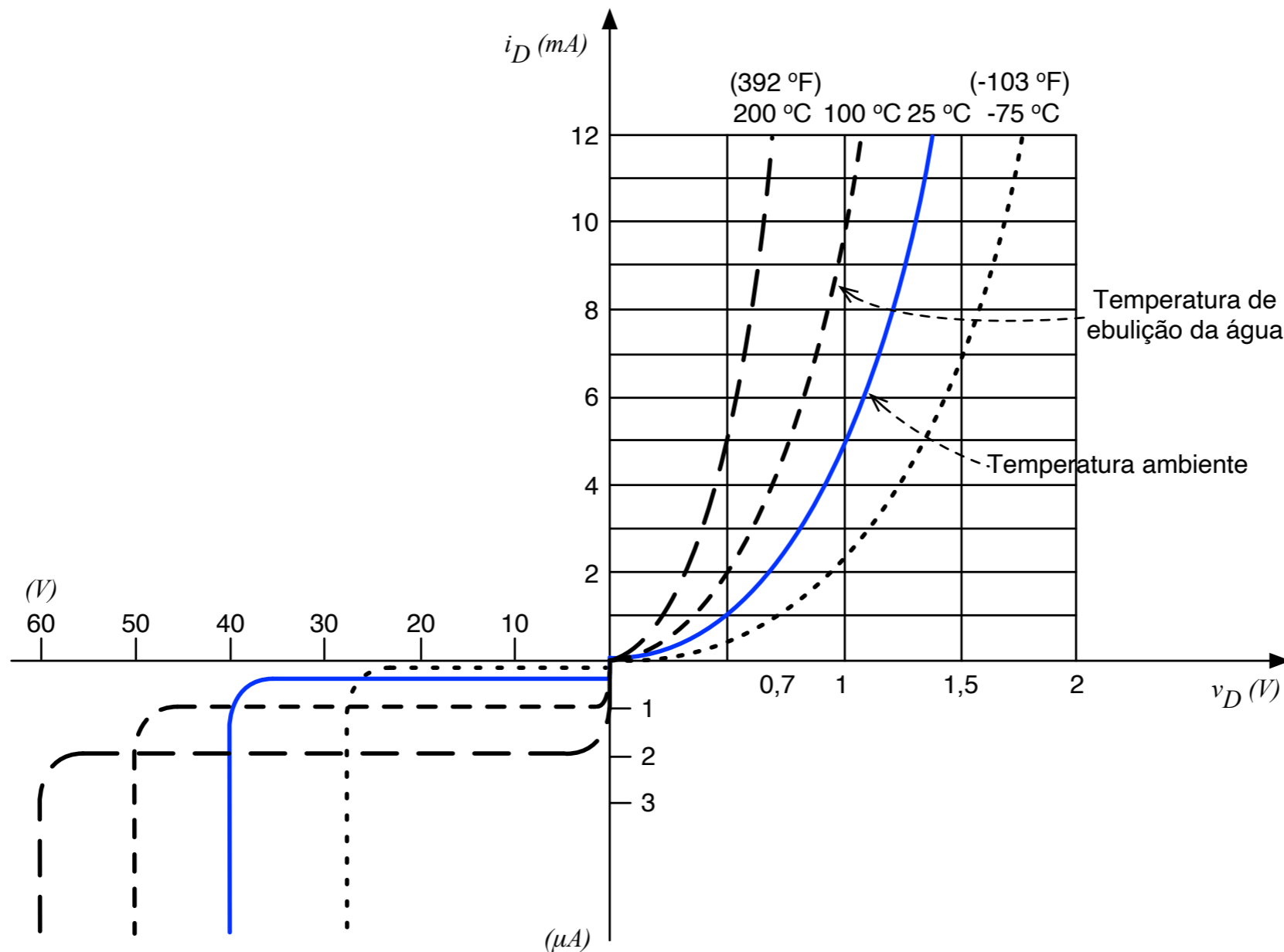
Polarização direta ($V_D > 0$ V):



Junção PN - Efeito da temperatura

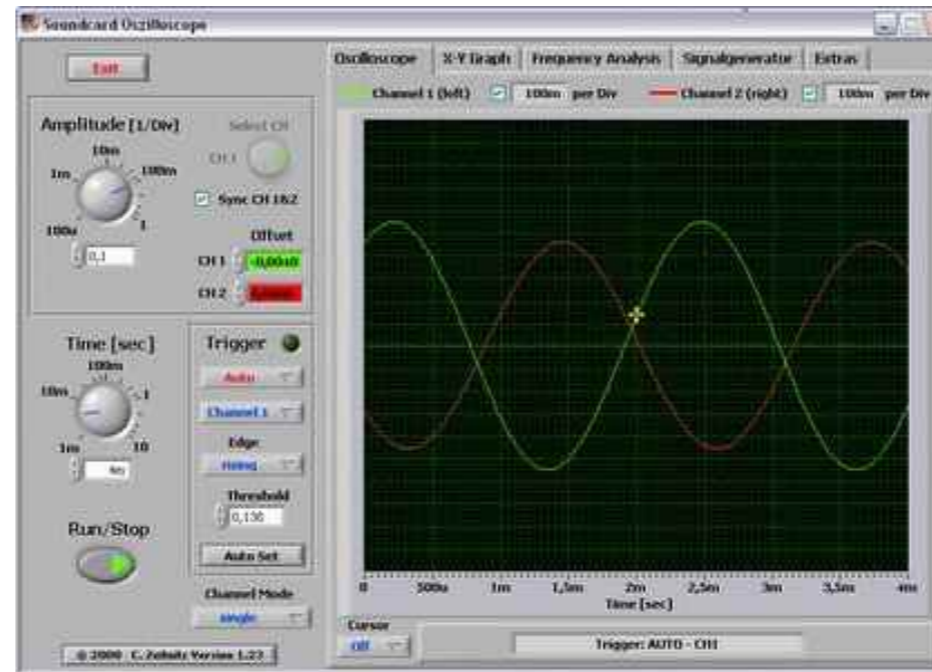
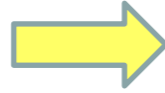
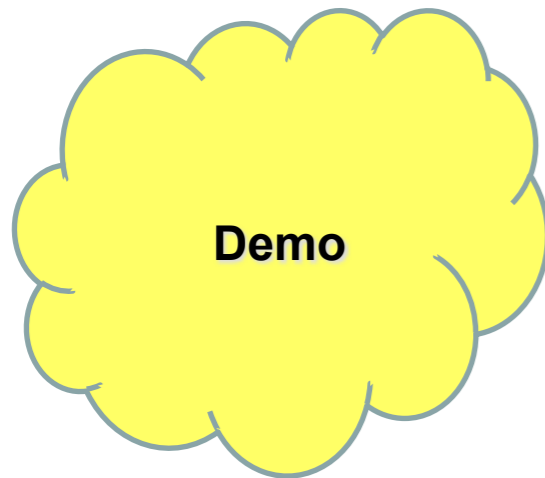
Efeito da temperatura na junção PN:

- A corrente de saturação reversa I_S terá sua amplitude praticamente dobrada para um aumento de $10\text{ }^\circ\text{C}$ na temperatura.



Exemplo 2.6 do Malvino.

Junção PN - Efeito da temperatura



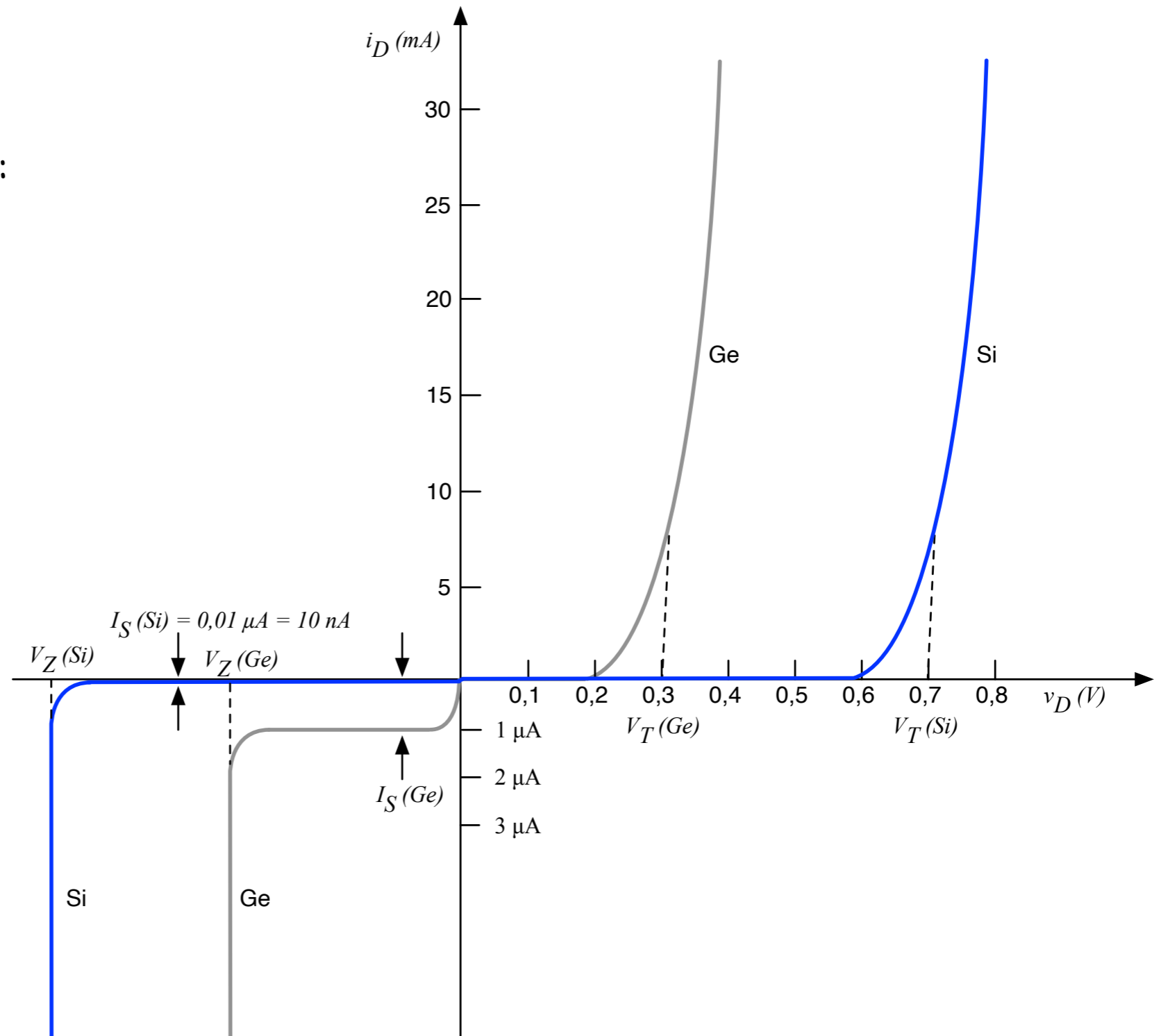
Demo:

- Alteração da curva com a temperatura.

Junção PN - Silício versus Germânio

Principais alterações entre silício e germânio:

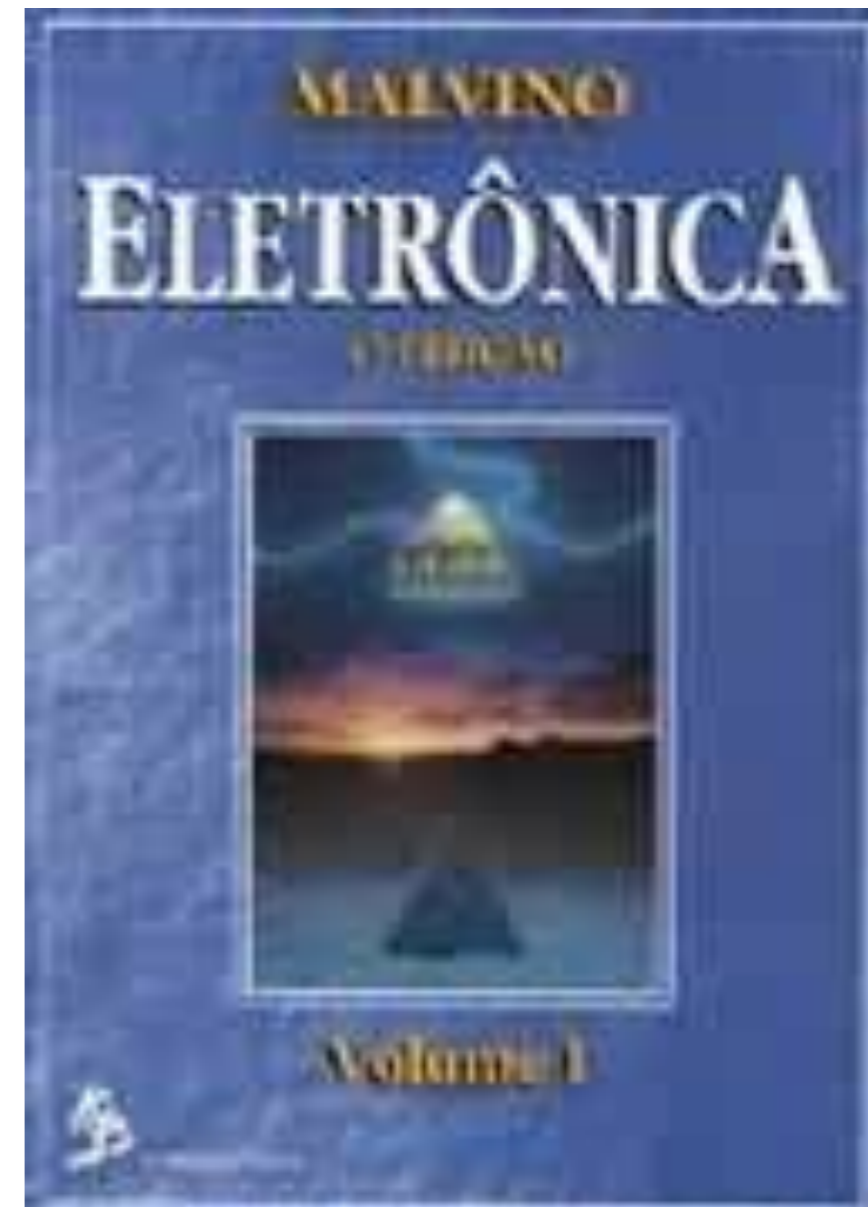
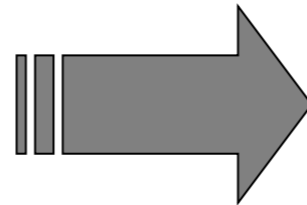
- Tensão reversa:
 - Silício: 1000 V;
 - Germânio: 400 V.
- Temperatura de operação:
 - Silício: 200 °C;
 - Germânio: 100 °C.
- Queda de tensão direta:
 - Silício: 0,7 V;
 - Germânio: 0,3 V.



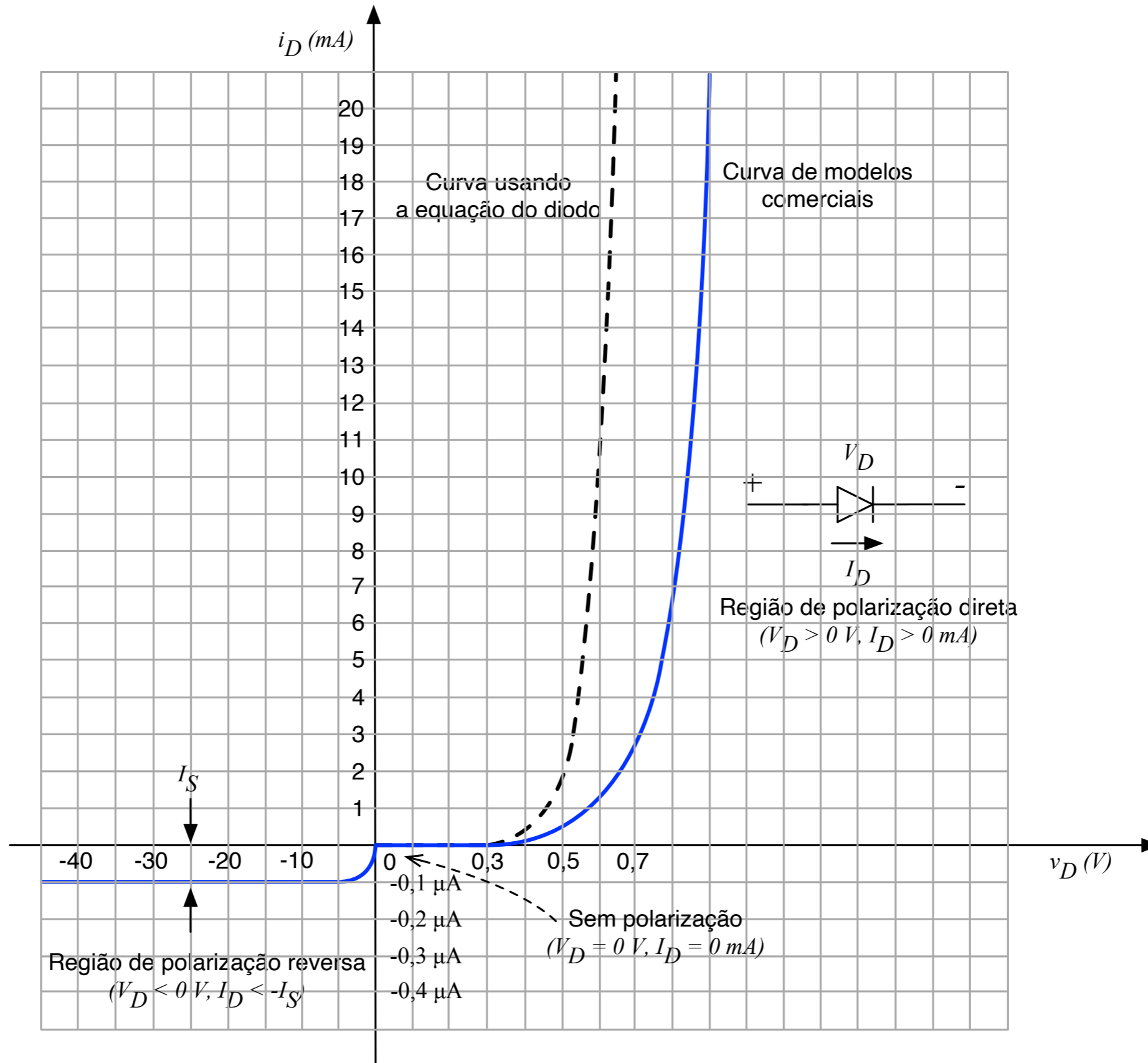
Exercícios

Malvino:

- Lista do capítulo 2.



Diodo - Curva $I_D \times V_D$

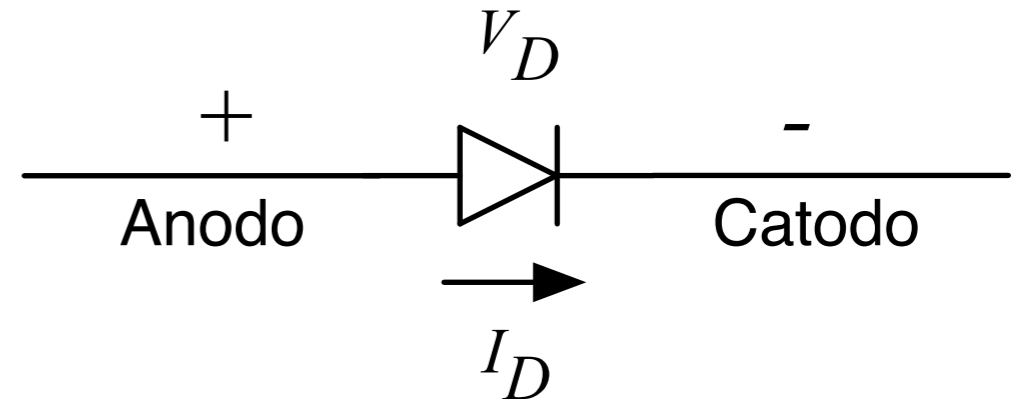


Diodo - Curva $I_D \times V_D$

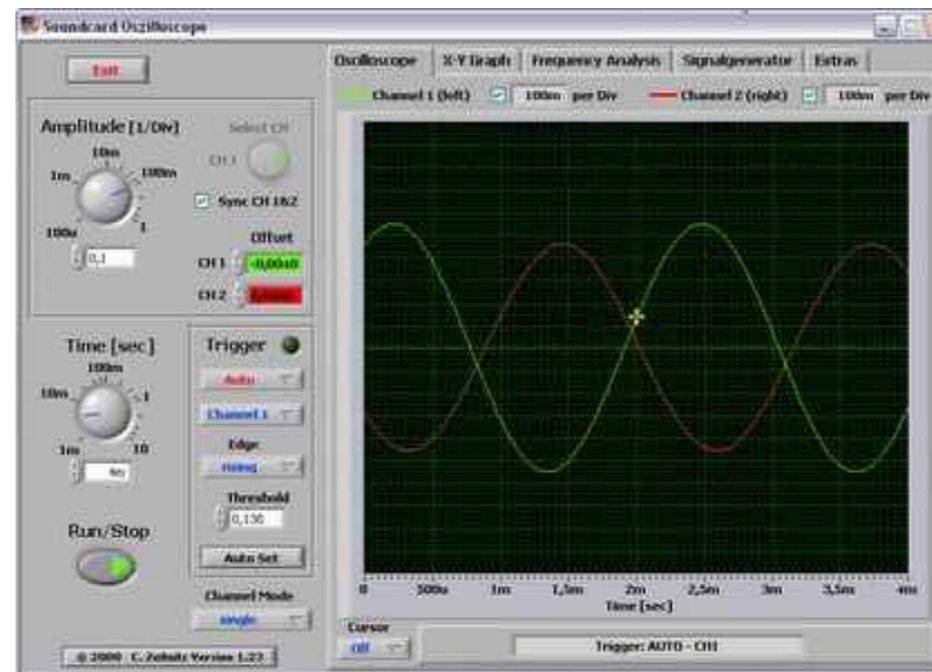
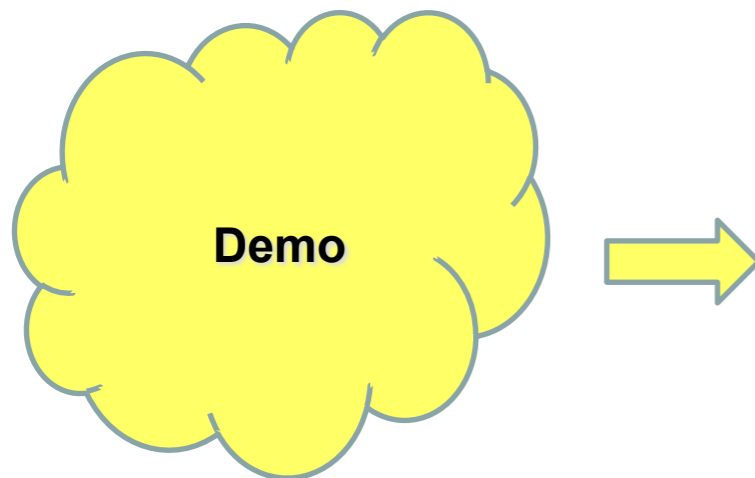
Equação característica do diodo ($I_D \times V_D$):

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{K \cdot V_D}{T_K}} - 1 \right)$$

- I_D = corrente direta;
- V_D = tensão de polarização;
- I_S = corrente de saturação reversa;
- $K = 11.600/n$ com $n = 1$ para o Ge e $n = 2$ para o Si;
- $T_K = T_C + 273^\circ$.



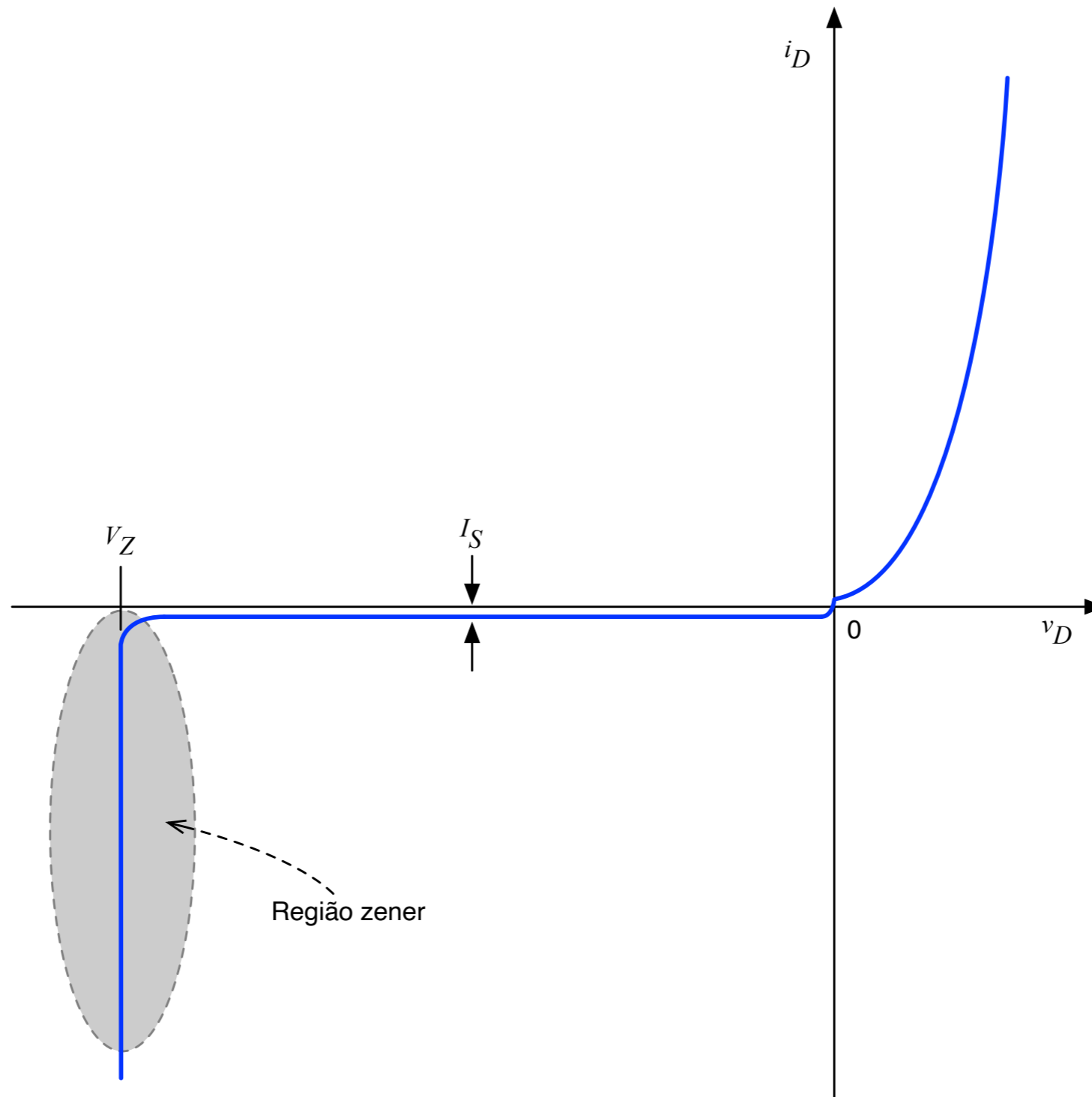
Diodo - Curva $I_D \times V_D$



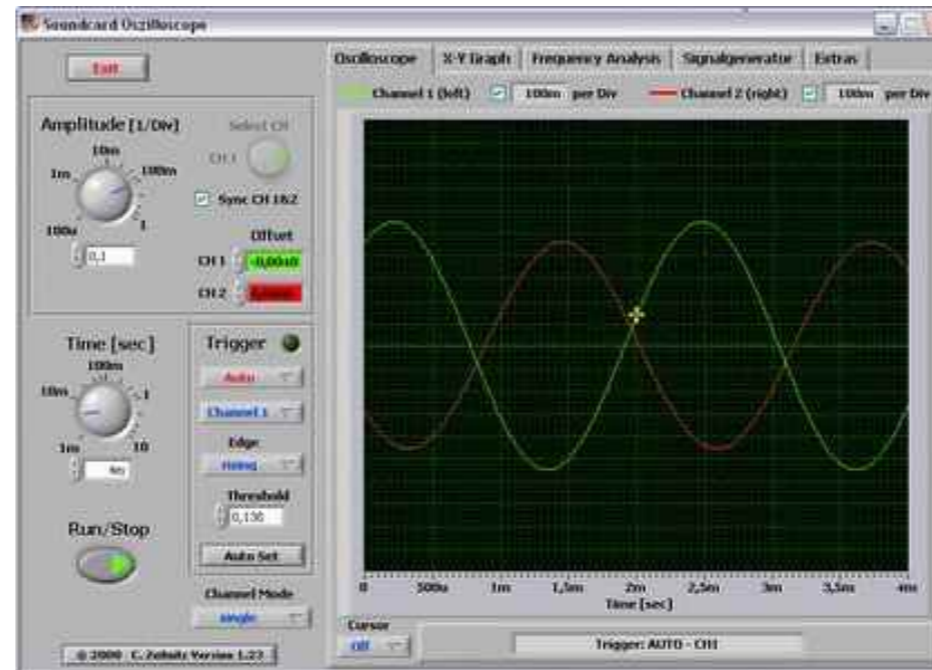
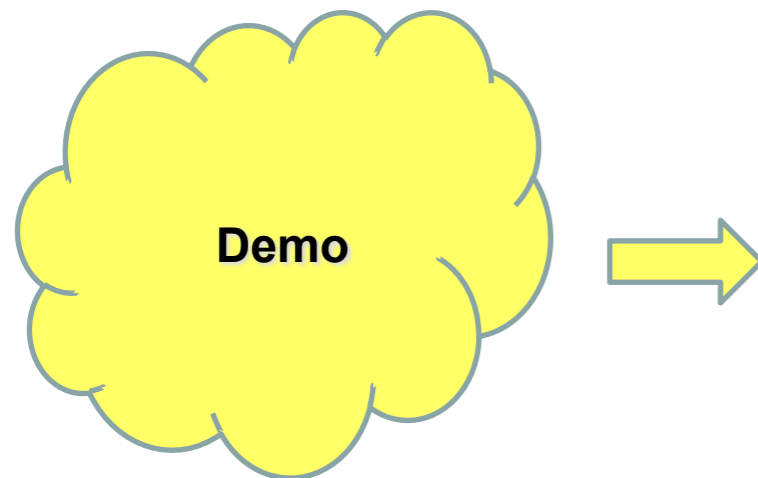
Demo:

- Curva $I_D \times V_D$ de diodos.

Diodo - Região zener



Diodo - Região zener



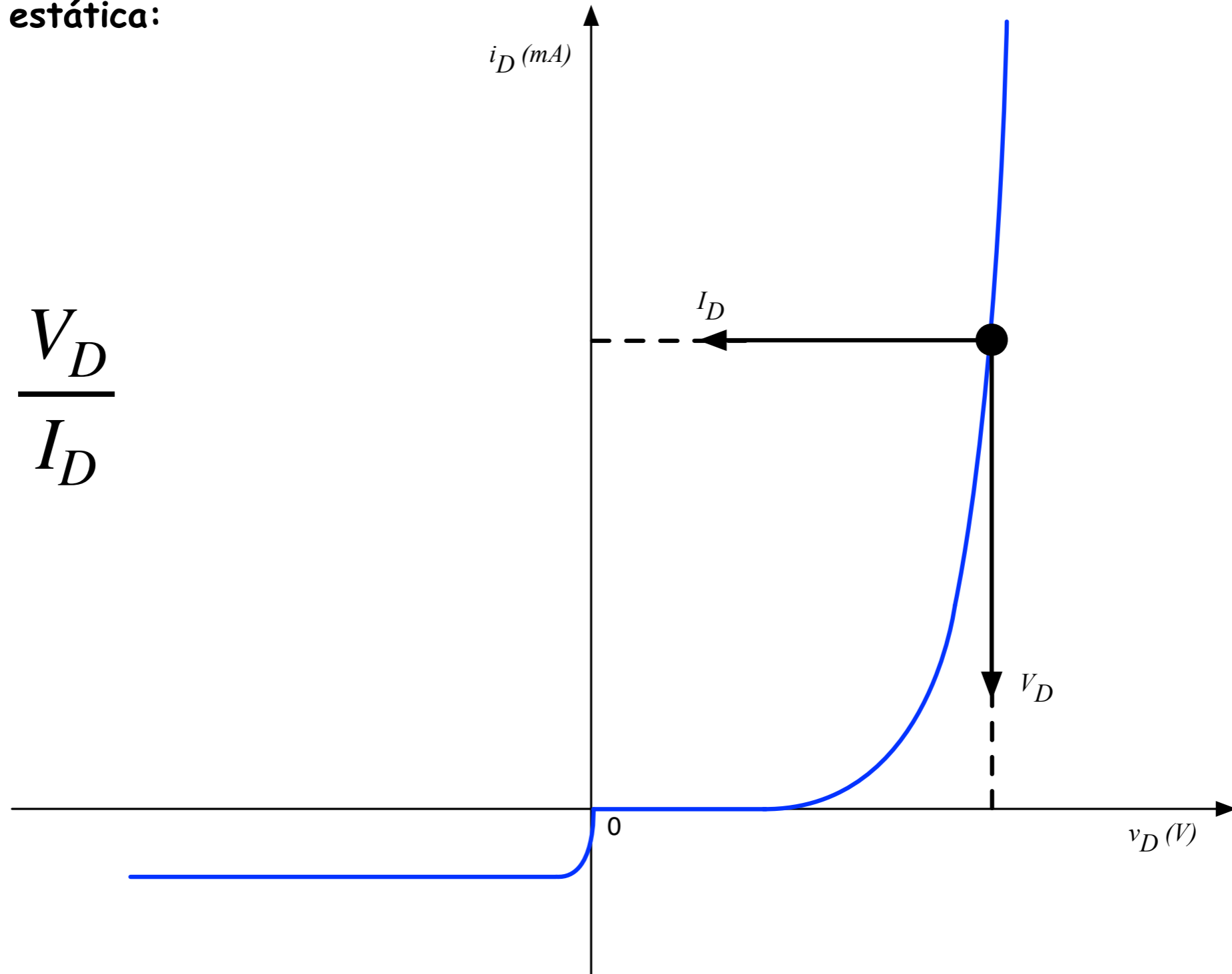
Demo:

- Curva $I_D \times V_D$ do zener.

Resistências do diodo

Resistência CC ou estática:

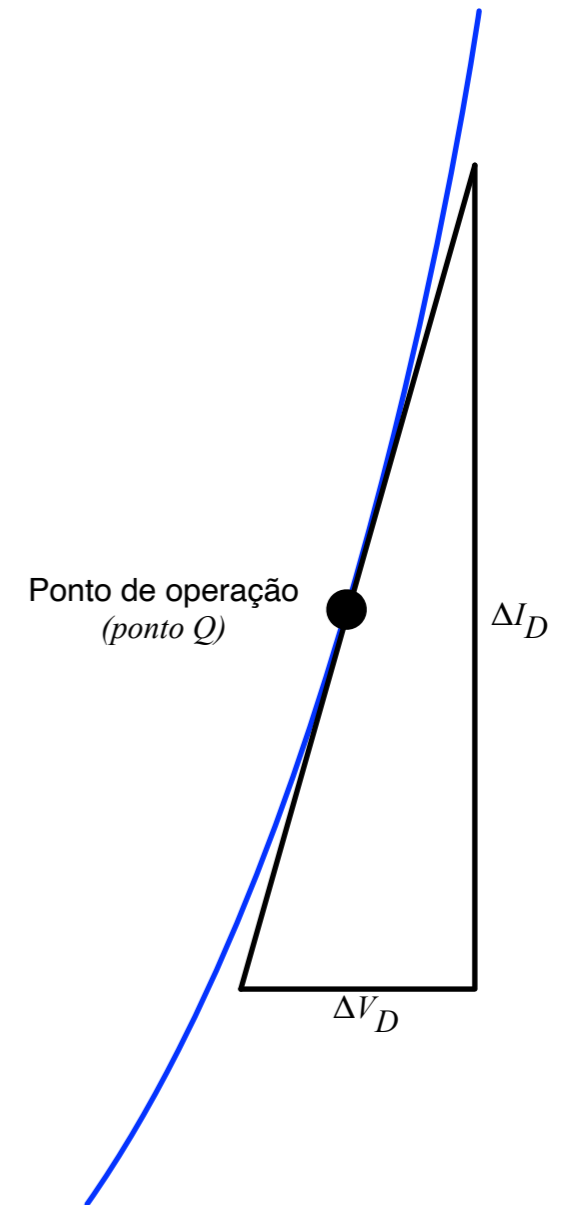
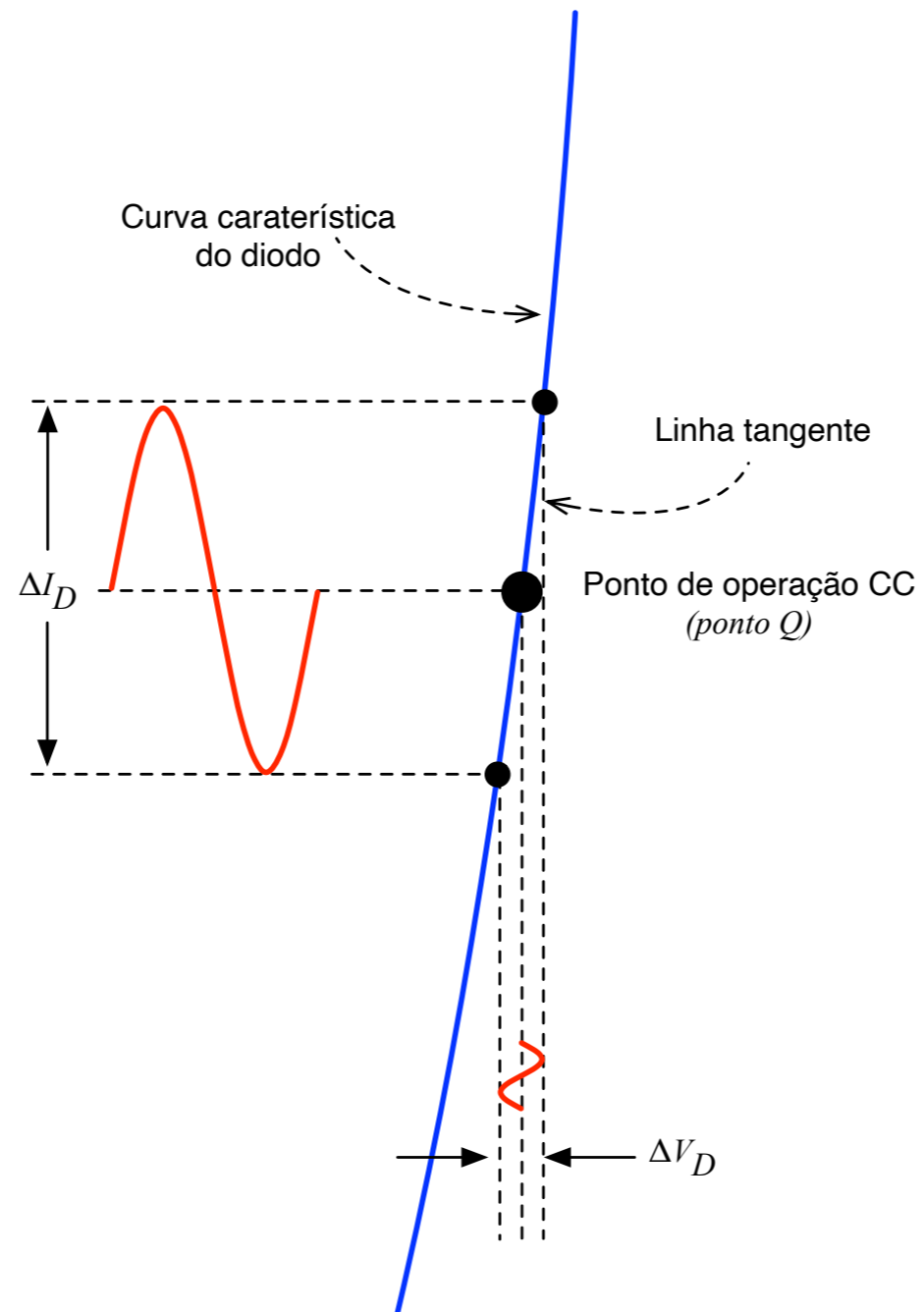
$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$



Resistências do diodo

Resistência CA ou dinâmica:

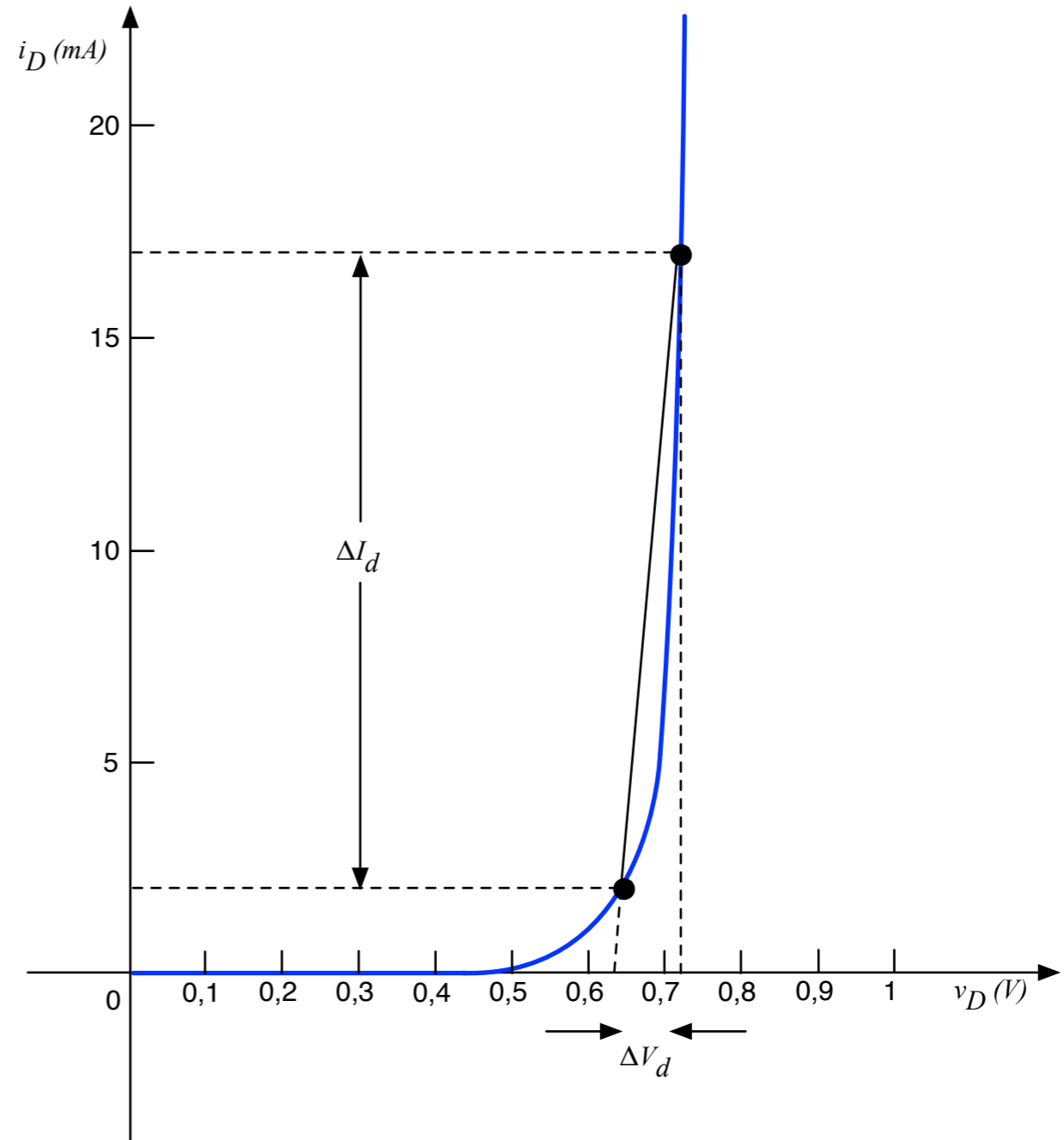
$$r_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$



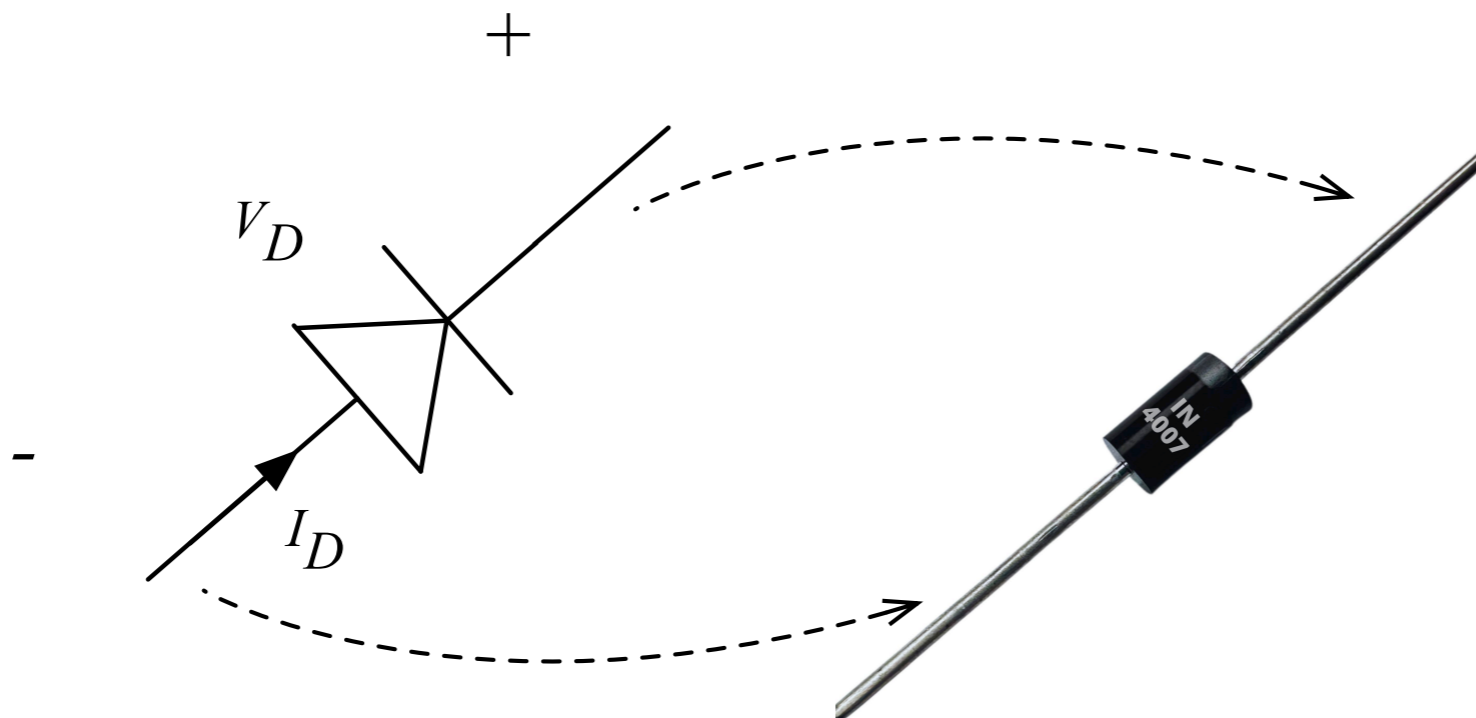
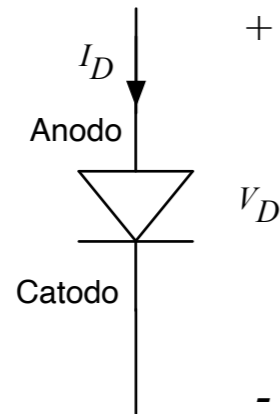
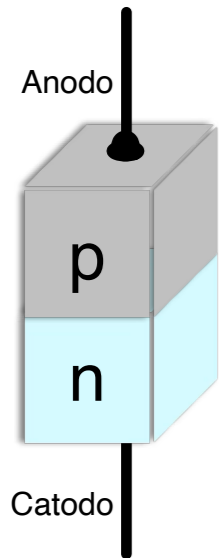
Resistências do diodo

Resistência CA média ou resistência de corpo:

$$r_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}$$



Identificação dos terminais de um diodo



Testando diodos com o multímetro



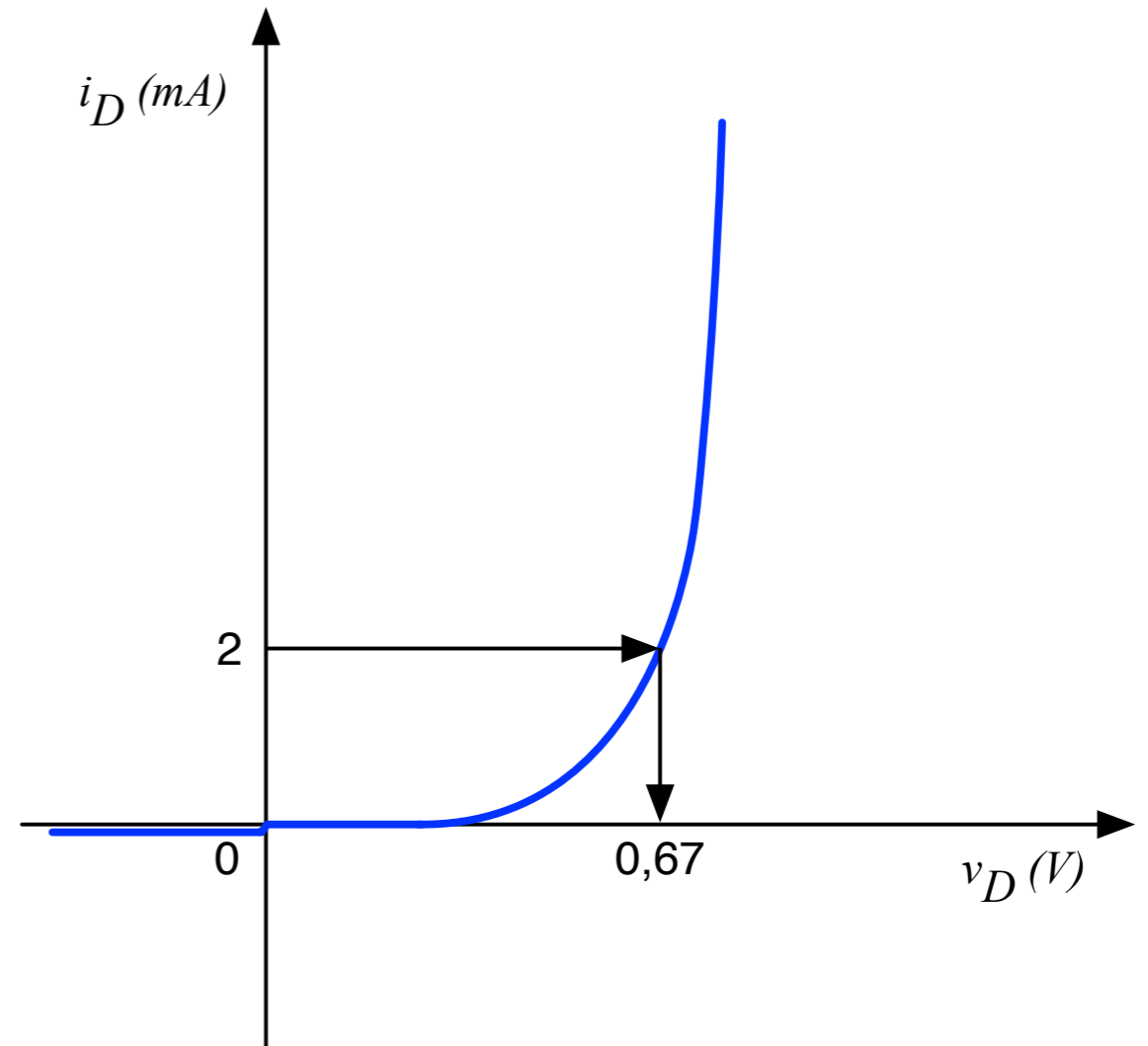
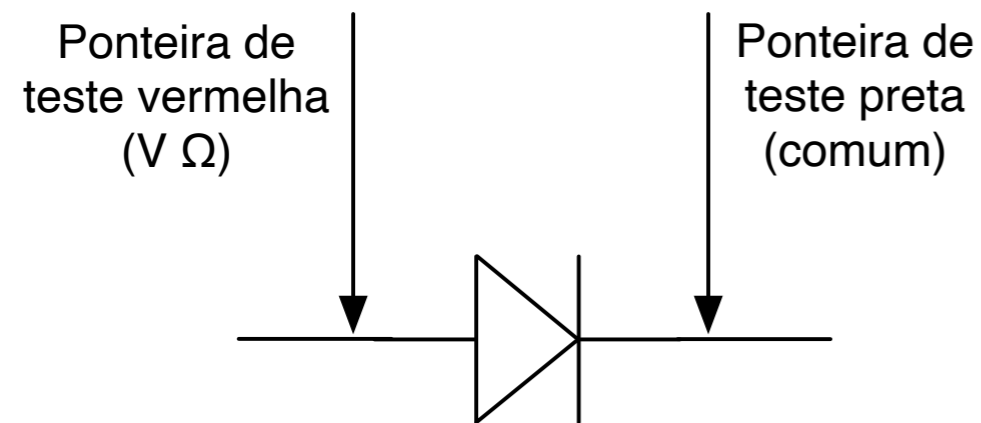
Escala para teste de diodos



Escala para teste de diodos

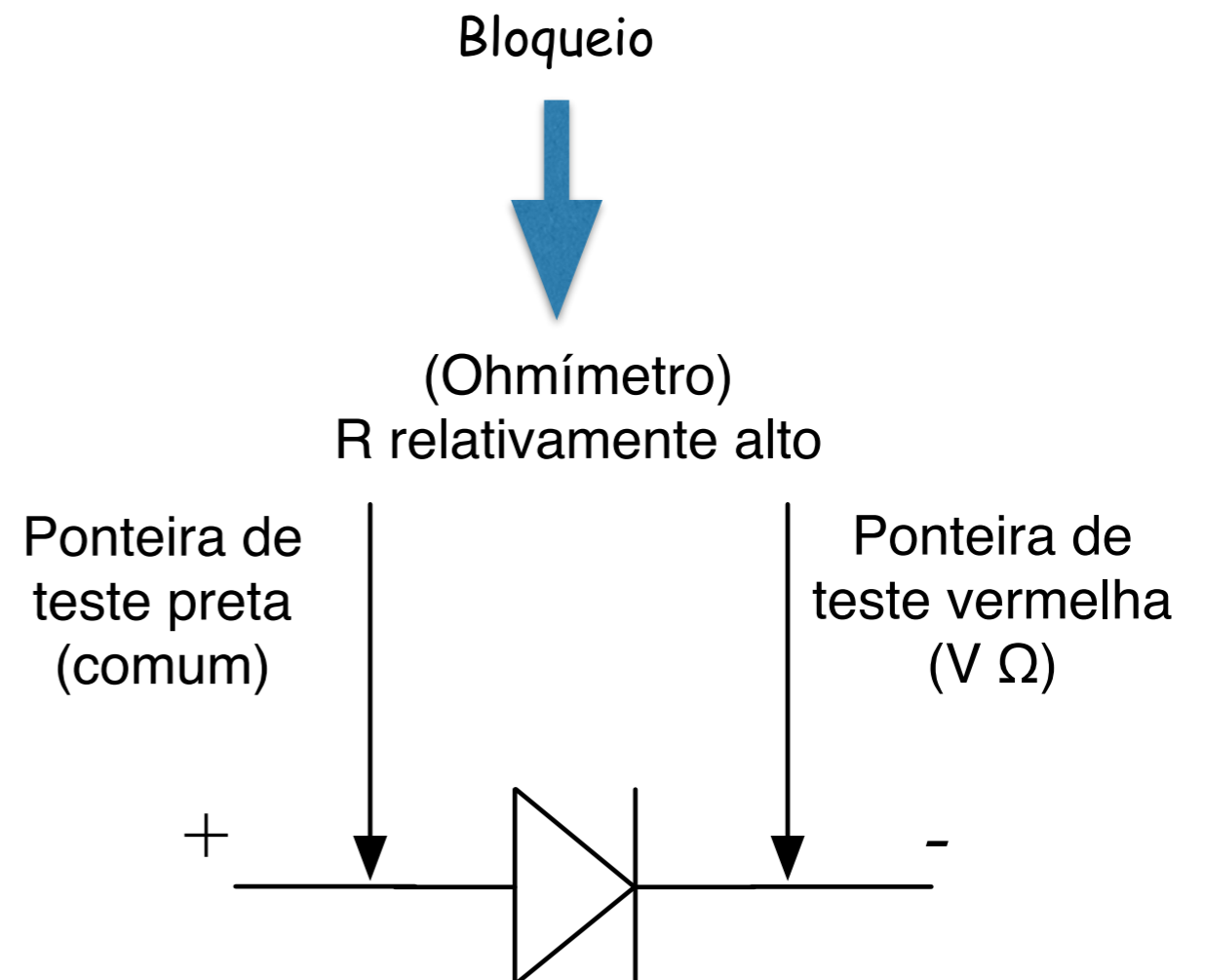
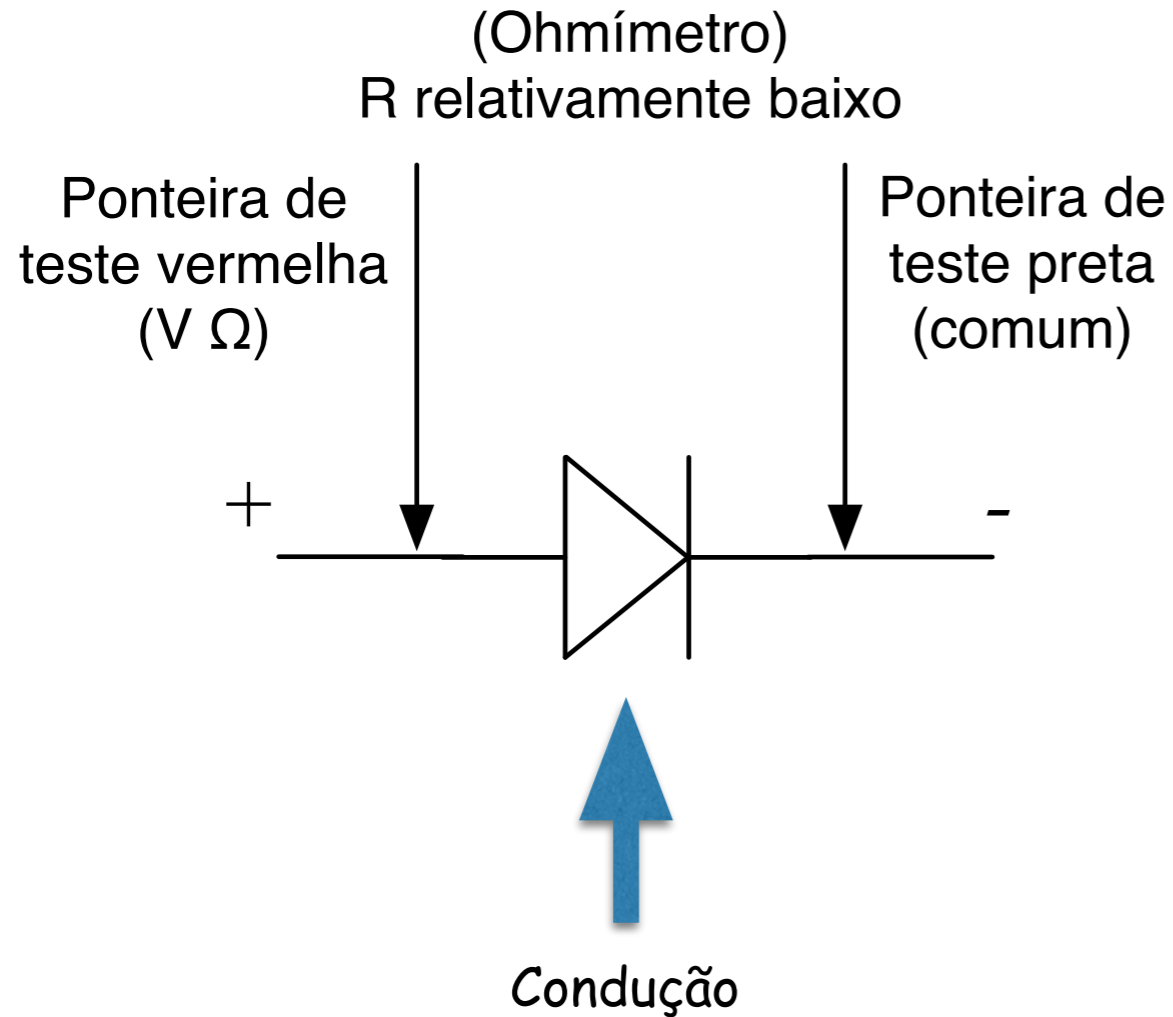
Testando diodos com o multímetro

Polarização direta:

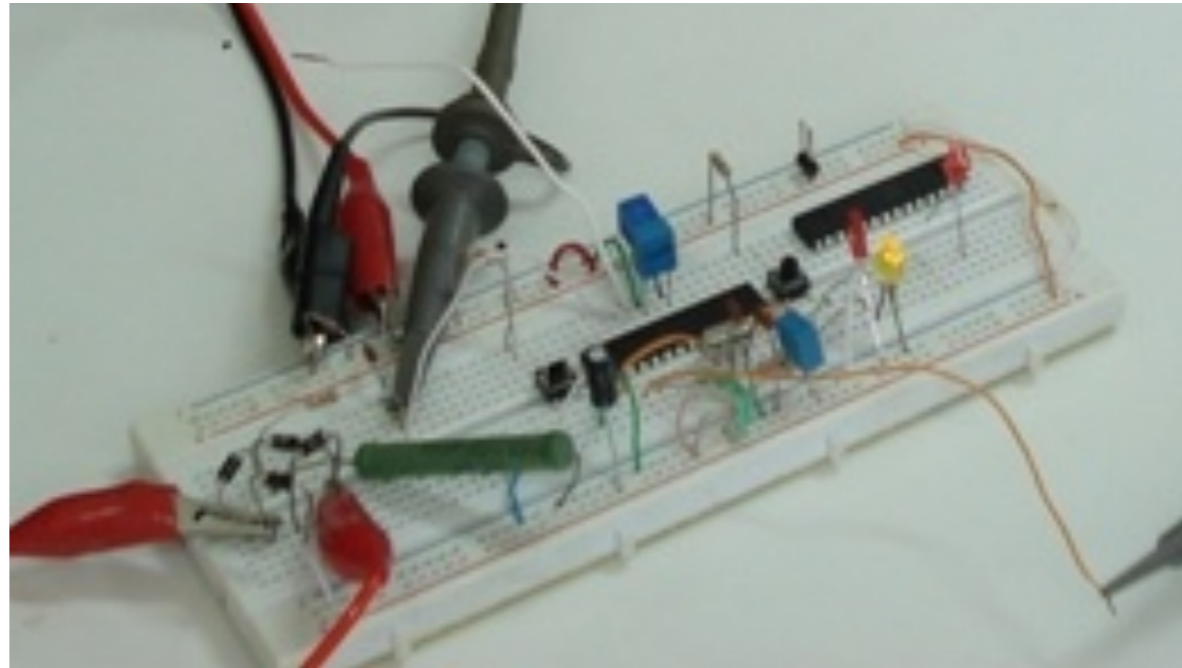
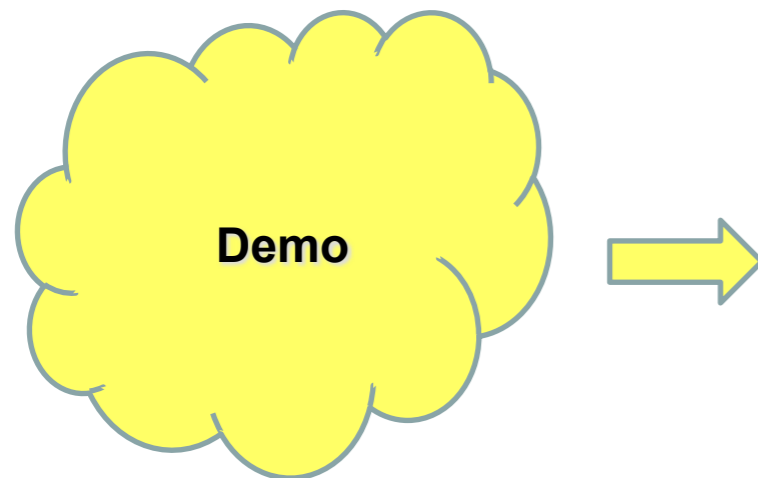


Testando diodos com o multímetro

Testes com ohmímetro:



Testando diodos com o multímetro



Demo:
• Testes de diodos.

Próxima Aula

Análise de circuitos com diodos

