

Agenda

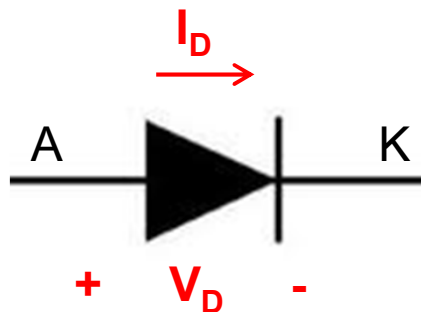
- Diodo – Introdução
 - Materiais semicondutores, estrutura atômica, bandas de energia
 - Dopagem – Materiais extrínsecos
 - Junção PN
- Polarização de diodos
- Curva característica
- Modelo ideal e modelos aproximados
- Análise de circuitos básicos
- Tipos de diodo
- Exercícios

Introdução

Diodo → dispositivo semicondutor de dois terminais com resposta V-I (tensão/corrente) **não linear** (dependente da polaridade!)

Diodo ideal:

- Símbolo:



A = Ânodo (ou anodo)

K = cátodo

(a) O Diodo conduz: $I_D > 0$ se $V_D > 0$

→ $V_A > V_K$ (a tensão no Anodo é maior que a tensão no cátodo)

(b) O Diodo não conduz: $I_D = 0$ se $V_D \leq 0$

→ $V_A \leq V_K$ (a tensão no Anodo é menor ou igual que a tensão no cátodo)

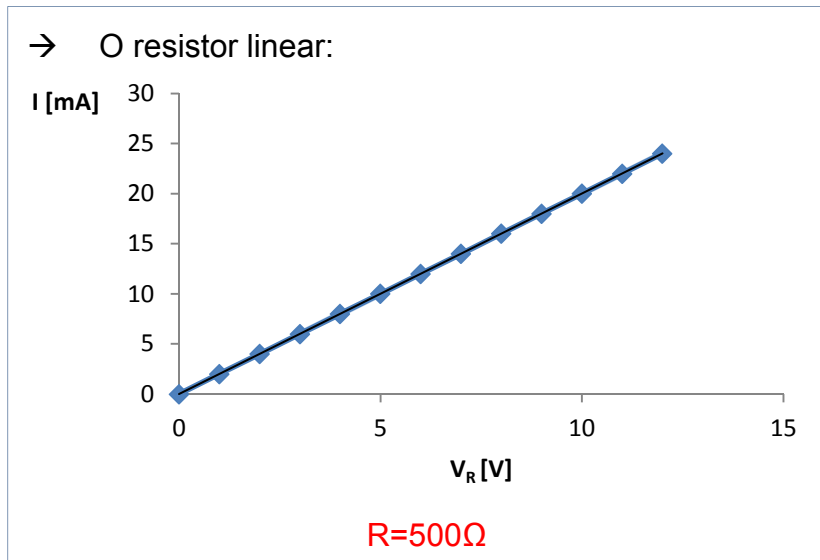
O diodo ideal:

- pode ser considerado como uma chave que pode conduzir corrente **somente** em um sentido (definido pela seta do símbolo).

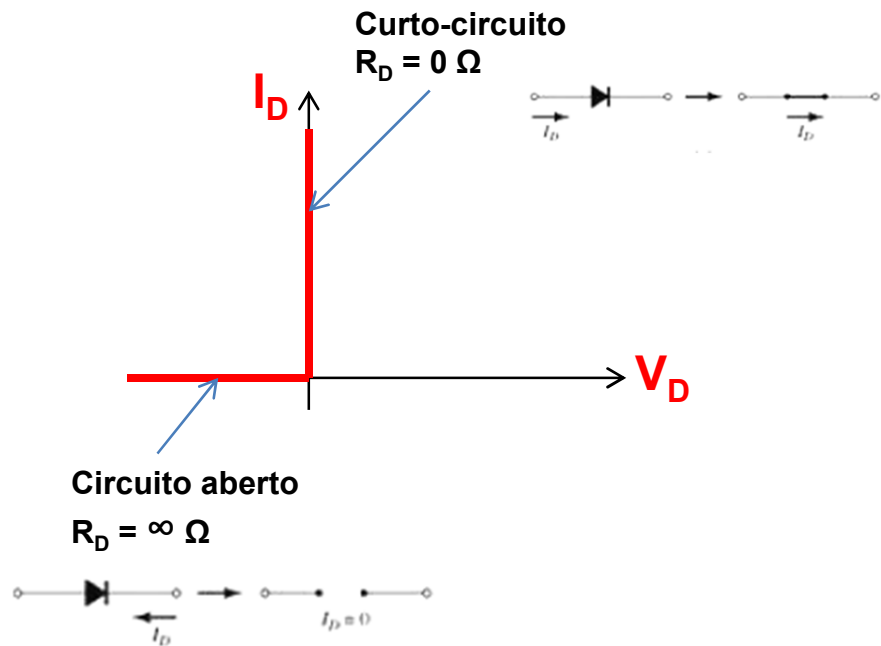
→ **Fornece uma visão global sobre o comportamento do diodo, mas não representa características importantes do dispositivo!**

Introdução

- Diodo ideal – resposta



Curva característica do diodo ideal

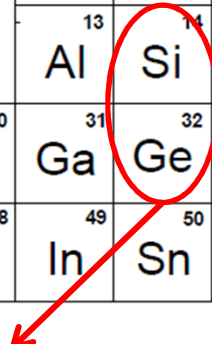


Resposta não linear!

Materiais semicondutores

- Semicondutores:** possuem um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e um condutor

	IIIA	IVA	VA	VIA	
	5	6	7	8	
	B	C	N	O	
	13	14	15	16	
	Al	Si	P	S	
IIB	30	31	32	33	34
	Zn	Ga	Ge	As	Se
	48	49	50	51	52
	Cd	In	Sn	Sb	Te



Semicondutores mais utilizados:

Si = Silício → **mais produzido**

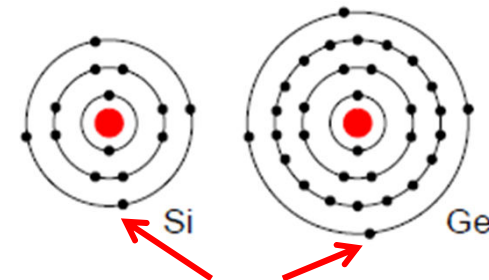
Ge = Germânio

* Outros semicondutores:

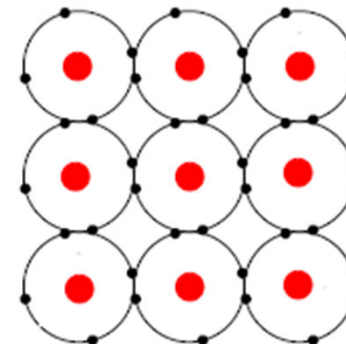
Carbono (C)

GaAs, InP, InGaAs, InGaAsP, ZnSe, CdTe

Estrutura atômica do Si e Ge:



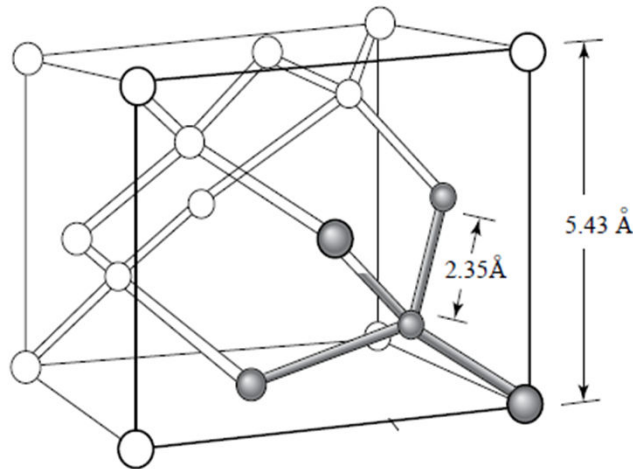
Elétrons de valência
(camada de valência)



Representação
2D

Ligação covalente
(Compartilhamento de elétrons)

- **Estrutura cristalina do Silício**

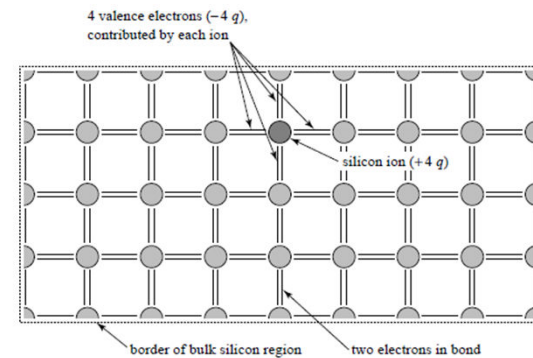


Representação
3D

→ **Material semicondutor Intrínseco:** semicondutor que foi refinado para reduzir as impurezas a um nível muito baixo.

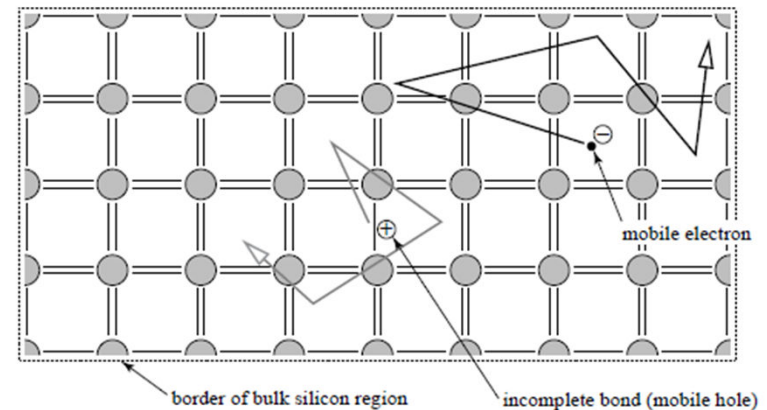
→ **condutor fraco.**

Temperatura = 0K



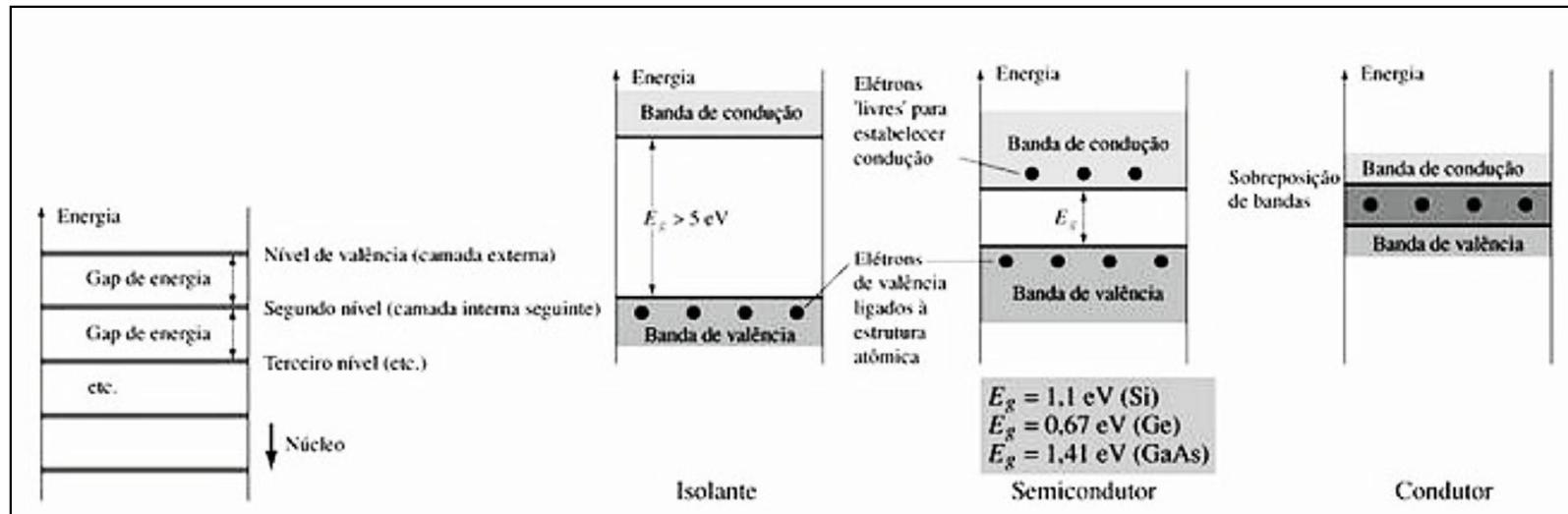
- Todas as ligações estão satisfeitas
- Não há elétrons livres

Temperatura ambiente



- Algumas ligações estão “quebradas”
- Há elétrons livres
- Há lacunas

- **Níveis de energia**



- **Gaps:** intervalos entre níveis de energia
- O aumento da Temperatura pode liberar um elétron da estrutura cristalina. Este elétron é livre para condução na estrutura cristalina.

** Obs.: Em materiais semicondutores, o aumento da temperatura do material confere maior energia aos elétrons da banda de valência, fazendo com que a quantidade de elétrons que atingem a banda de condução aumente. Com isso, pode-se dizer que a condutividade de materiais semicondutores aumenta com a temperatura, ao contrario dos materiais condutores, os quais perdem condutividade com o aumento da temperatura. Dizemos que os materiais semicondutores possuem coeficiente de temperatura negativo, enquanto os condutores possuem coeficiente de temperatura positivo.*

→ O aumento da Temperatura pode liberar um elétron da estrutura cristalina.

Este elétron é livre para condução na estrutura cristalina.

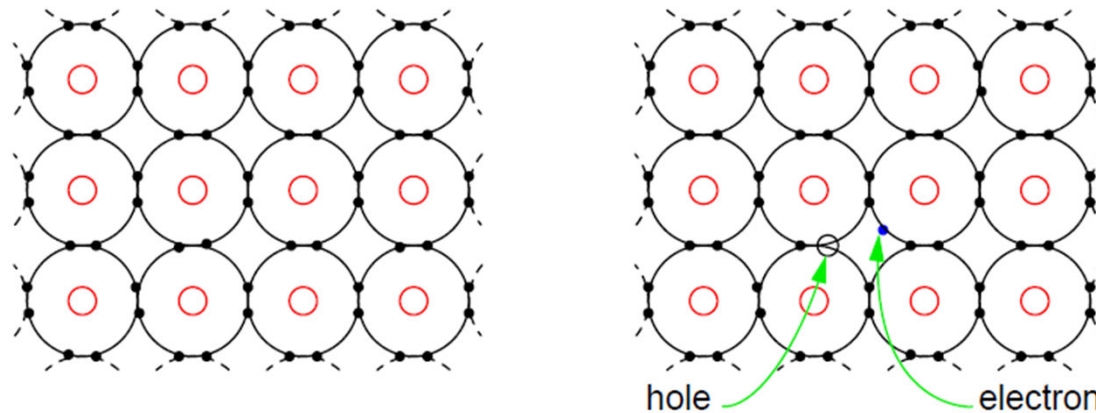
O **elétron livre** deixa um local livre com carga positiva chamado de **lacuna (hole)**.

Os elétrons livres e as lacunas não permanecem fixos na estrutura.

Os elétrons livres e lacunas contribuem para a condução sobre a estrutura cristalina.

A energia térmica pode gerar um par elétron livre – lacuna, resultando em uma condução fraca.

Um elétron é livre até encontrar uma lacuna → **Recombinação**.



→ **Semicondutores puros não são úteis.** Assim, semicondutores devem ser refinados e sofrer a adição de “impurezas” (**dopagem**) → **melhora a condução!**

- **Dopagem:** adição de átomos (impurezas) para modificar as propriedades elétricas de um semicondutor. → **aumenta a condutividade!**

→ **Material extrínseco:** semicondutor submetido ao processo de dopagem.

→ **Material do Tipo n:** semicondutor dopado com impurezas pentavalentes (5 elétrons de valência, **átomos doadores**) para criar elétrons livres.

→ **Material do Tipo p:** semicondutor dopado com impurezas trivalentes (três elétrons de valência, **átomos aceitadores**) para criar lacunas.

Elemental semiconductors
C(diamond), Si, Ge

	13	IIIA	14	IVA	15	VA	
B P-type dopant for C	B 5 Boron 10.81 2p ¹		C 6 Carbon 12.011 2p ²		N 7 Nitrogen 14.0067 2p ³		N, P N-type dopant for C
B, Al, Ga, In P-type dopant for Si	Al 13 Aluminum 26.9815 3p ¹		Si 14 Silicon 28.0855 3p ²		P 15 Phosphorus 30.9738 3p ³		
Al, Ga, In P-type dopant for Ge	Ga 31 Gallium 69.723 4p ¹		Ge 32 Germanium 72.61 4p ²		As 33 Arsenic 74.92159 4p ³		P, As, Sb N-type dopant for Si, Ge
	In 49 Indium 114.82 5p ¹				Sb 51 Antimony 121.75 5p ³		

→ **Portadores majoritários e minoritários em materiais extrínsecos**

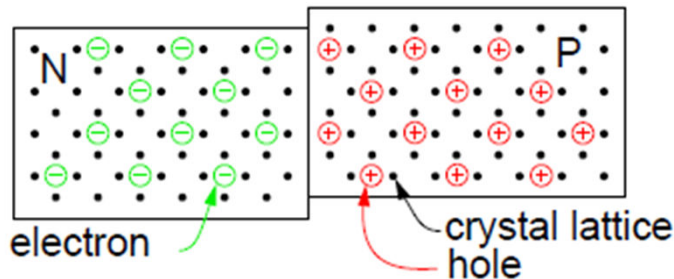
→ **Material do Tipo n:** elétron é o portador majoritário e a lacuna é o portador minoritário;

→ **Material do Tipo p:** a lacuna é o portador majoritário e o elétron é o portador minoritário.

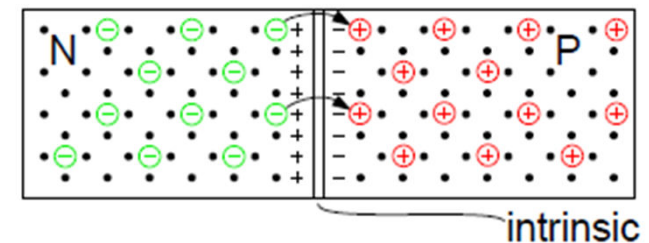
→ **Os materiais dos Tipos n e p representam os blocos básicos de construção de dispositivos semicondutores!**

→ **Junção P-N:** formada em semicondutores com ambos materiais tipo P e N

- A separação das cargas na junção P-N constitui uma barreira de potencial (**região de depleção**); → formada no processo de fabricação;
- **A barreira de potencial pode ser ultrapassada através da aplicação de uma fonte externa de tensão.**



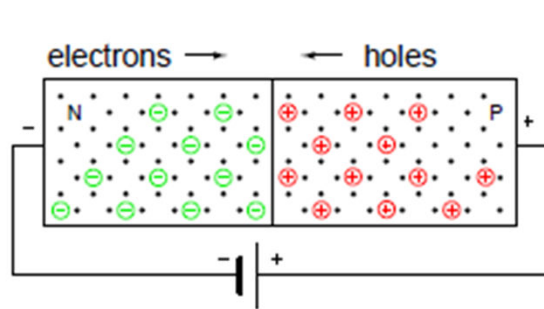
Blocos de materiais tipo N e P em contato → sem efeito.



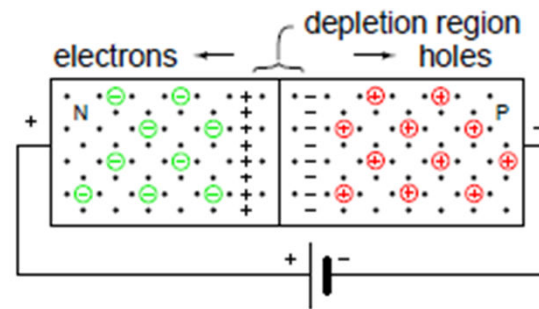
Semicondutor dopado com impurezas N e P desenvolve uma **barreira de Potencial !**

Polarização:

- **Polarização direta:** aplicação de uma tensão positiva entre o anodo e catodo;
Tensão suficiente para atravessar a barreira de potencial → corrente elétrica
- **Polarização reversa:** aplicação de uma tensão negativa entre o anodo e catodo;
→ Não há condução de corrente elétrica

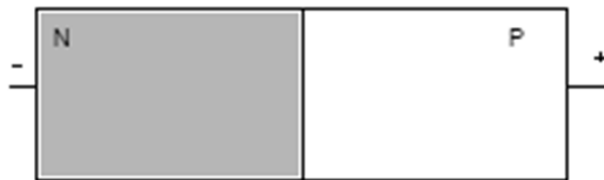


Polarização direta



Polarização reversa

→ O diodo (de junção PN): *dispositivo unidirecional*



Cátodo
(tipo N)

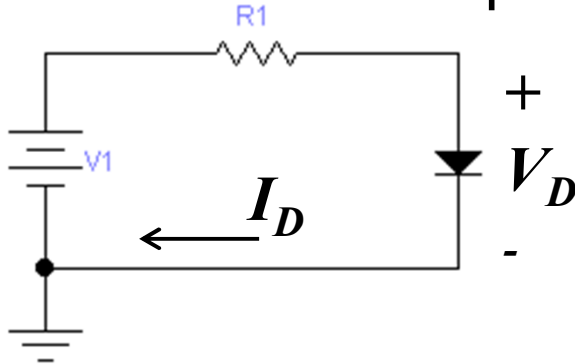


Anodo
(tipo P)

Polarização de diodos

- **Polarização direta:**

- Circuito básico de polarização direta:



→ **O diodo conduz a corrente elétrica.**

Considerações para polarização direta:

- A tensão no ânodo (V_A) deve ser maior que a tensão no cátodo (V_K). Isto é, $V_A > V_K$

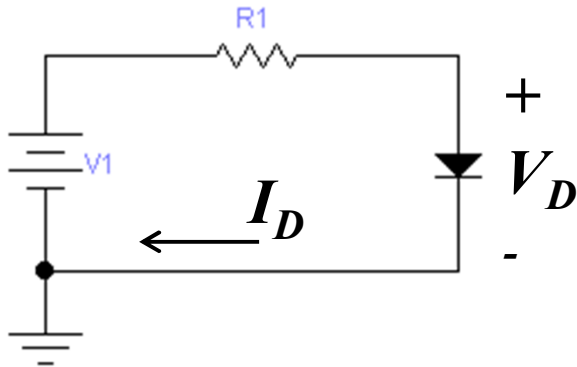
- **A queda de tensão no diodo ($V_D = V_A - V_K$) deve ser maior do que a tensão limiar do diodo (V_T).**

Depende do material!

Polarização de diodos

- **Polarização direta:**

- Circuito básico de polarização direta:



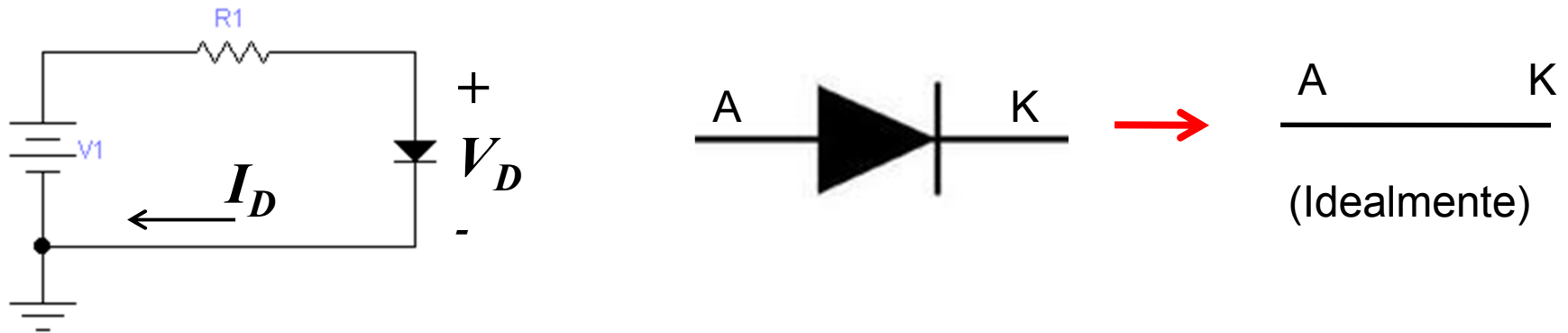
-A **tensão limiar** (*threshold*) do diodo (V_T) depende do material semicondutor. Os materiais mais utilizados são:

- **Silício** (Si): $V_T \approx 0,7 \text{ V}$
- Germânio (Ge): $V_T \approx 0,3 \text{ V}$

Polarização de diodos

- **Polarização direta:**

Circuito básico de polarização direta:



- **Idealmente**, o diodo se comporta como uma chave fechada (**curto**) quando está polarizado diretamente ($V_D = 0V$).

Entretanto, a queda de tensão no diodo real é igual à tensão limiar.

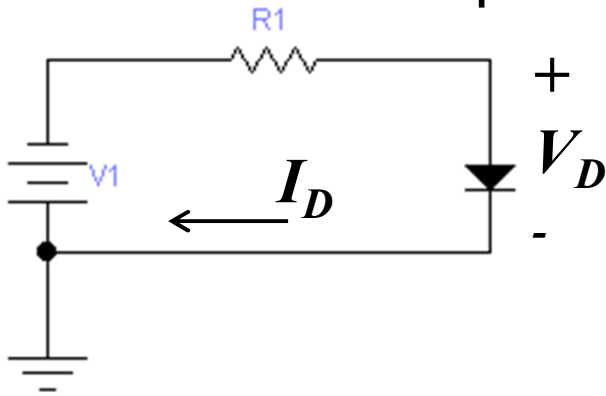
Ex.: para o diodo de **silício**, a queda de tensão no diodo é de aproximadamente 0,7V

$$V_D = V_T \approx 0,7 \text{ V}$$

Polarização de diodos

- **Polarização reversa:**

Circuito básico de polarização reversa:



→ **O diodo não conduz a corrente elétrica.**

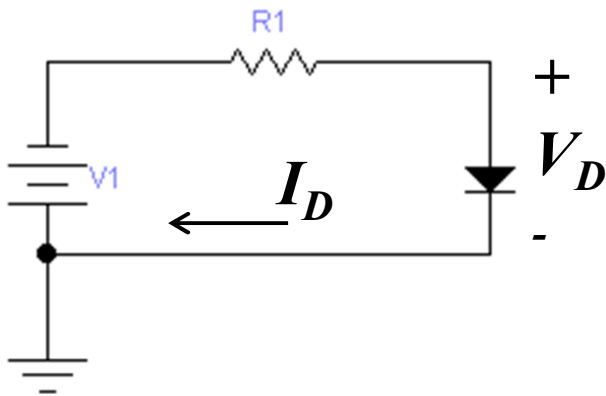
Considerações para polarização reversa:

- A tensão no ânodo (V_A) deve ser menor que a tensão no cátodo (V_K). Isto é, $V_A < V_K$
- A queda de tensão no diodo ($V_D = V_A - V_K$) deve ser menor do que a tensão limiar do diodo ($V_D < V_T$).

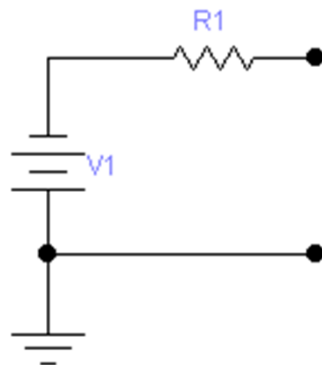
Polarização de diodos

- **Polarização reversa**

Circuito básico de polarização reversa:



- O diodo se comporta como uma chave aberta (circuito aberto) quando está polarizado reversamente.



Curva característica de diodos

• Relação $V_D \times I_D$

$$I_D = I_S(e^{V_D/V_T} - 1)$$

Onde,

I_S e V_T são constantes características do diodo.

I_S é a corrente reversa de saturação (independente da tensão do diodo V_D)

Para diodos de Silício:

$$I_S = 10\text{pA} \quad V_T = kT/q$$

k = constante de Boltzman

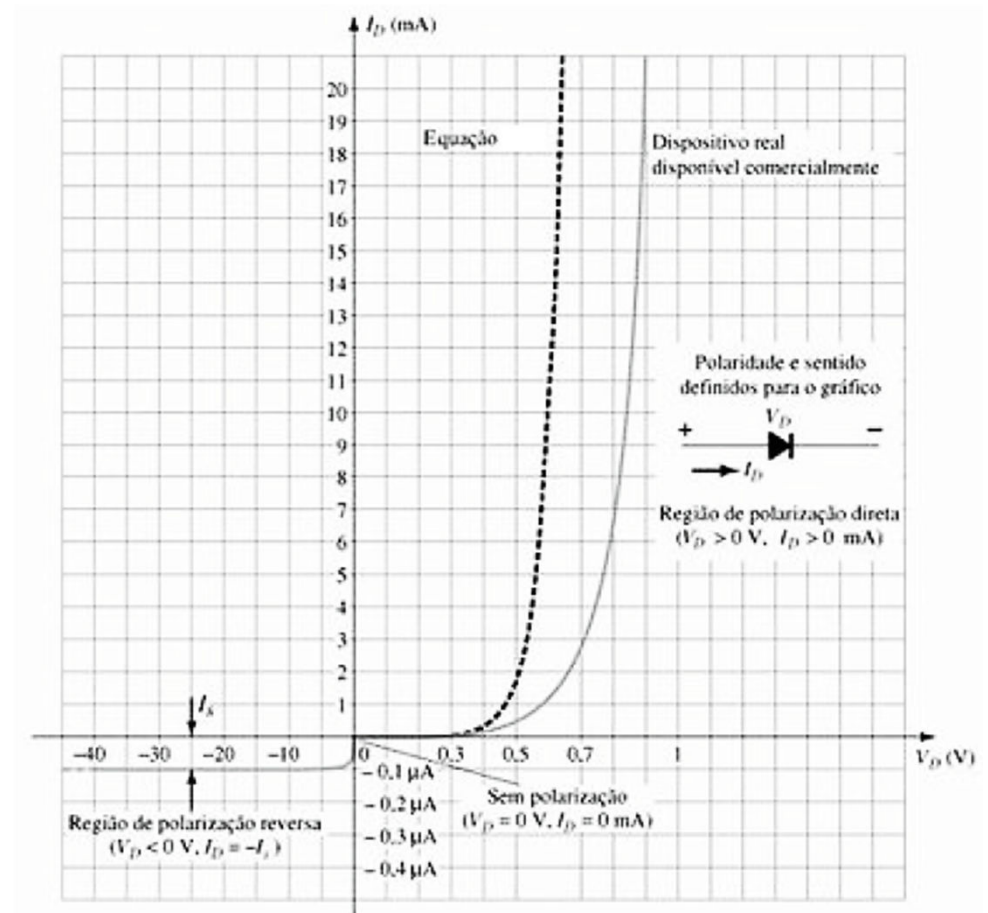
T = temperatura

q = carga elétrica

A temperatura ambiente:

$$V_T = 26\text{mV}$$

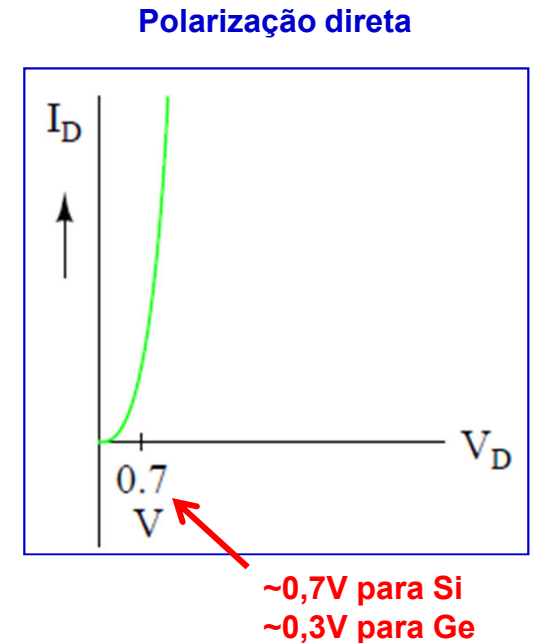
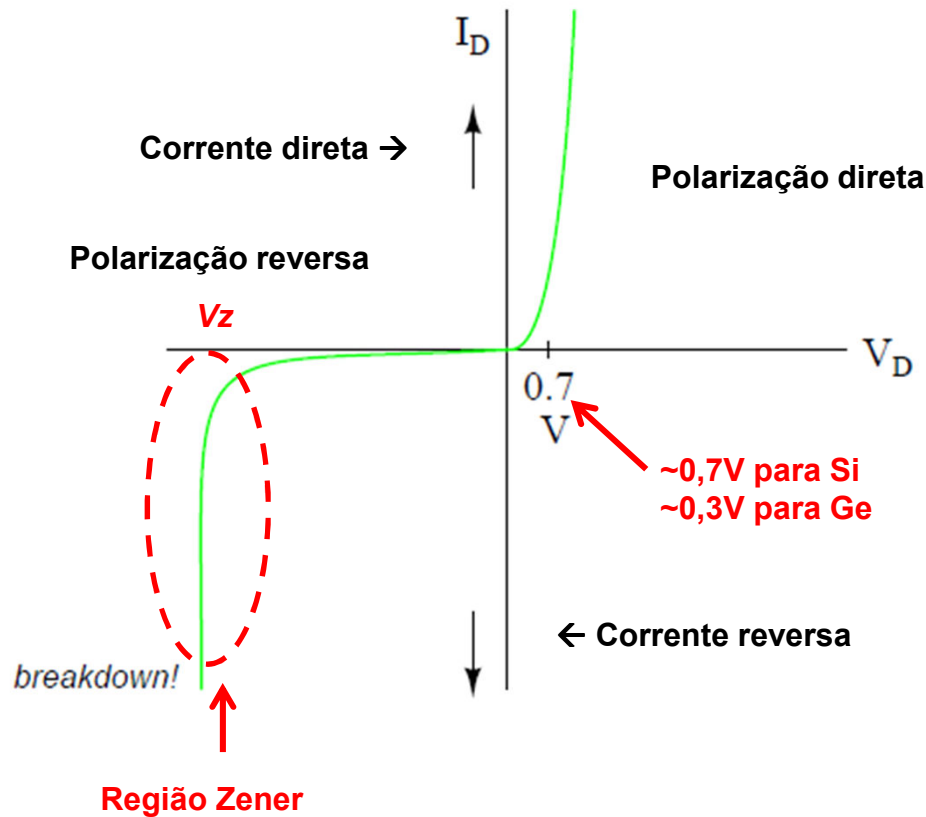
→ Os Modelos aproximados eliminam a necessidade de utilizar esta equação!



*Diferença entre as curvas: resistência interna e a resistência dos contatos

Curva característica de diodos

- Curva característica completa:



→ Deve ser evitada;

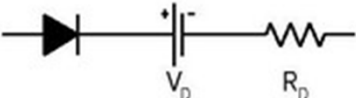
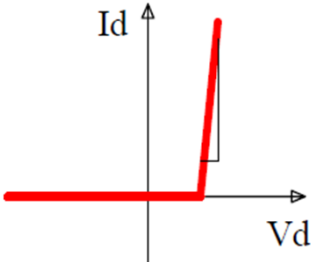
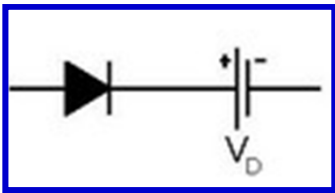
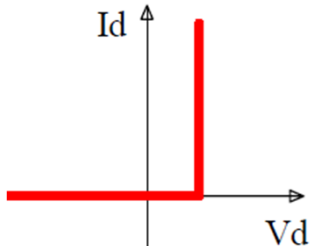
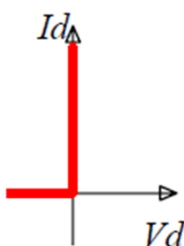
* Os Diodos Zener empregam apenas a Região Zener → próximas aulas!

→ O Potencial máximo de polarização reversa que pode ser aplicado antes que o diodo entre na região Zener é chamado de Tensão de Pico Inversa

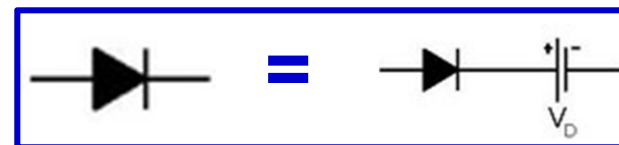
(**PIV – Peak Inverse Voltage**) ou tensão de pico reversa

(**PRV – Peak Reverse Voltage**) → disponível no DATASHEET do componente (fornecido pelo fabricante)

Modelos de diodos (Circuitos equivalentes)

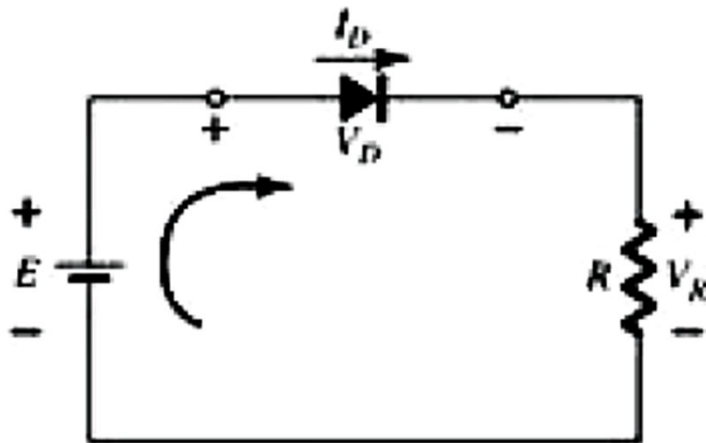
Modelo	Condições	Circuito equivalente	Curva característica (polarização direta)
Modelo linear por partes	--		
Modelo Simplificado	$R_{\text{circuito}} \gg r_{\text{av}}$ Onde, r_{av} = resistência interna CA média		
Modelo Ideal	$R_{\text{circuito}} \gg r_{\text{av}}$ $E_{\text{circuito}} \gg V_T$ Onde, V_T = tensão de limiar		

→ Modelo utilizado nas aulas: **Modelo simplificado**



Análise de circuitos básicos

- **Exemplo 1: Polarização direta**



→ **Diodo de Silício**

1º) Aplicar a 2ª Lei de Kirchhoff

(Lei das tensões de malha);

→ Considerar o modelo aproximado simplificado;

→ $V_D = V_T = 0,7V$ para Si

($V_D = V_T = 0,3V$ para Ge)

2º) Determinar a corrente I_D

3º) Determinar a tensão no resistor.

***Exemplo:**

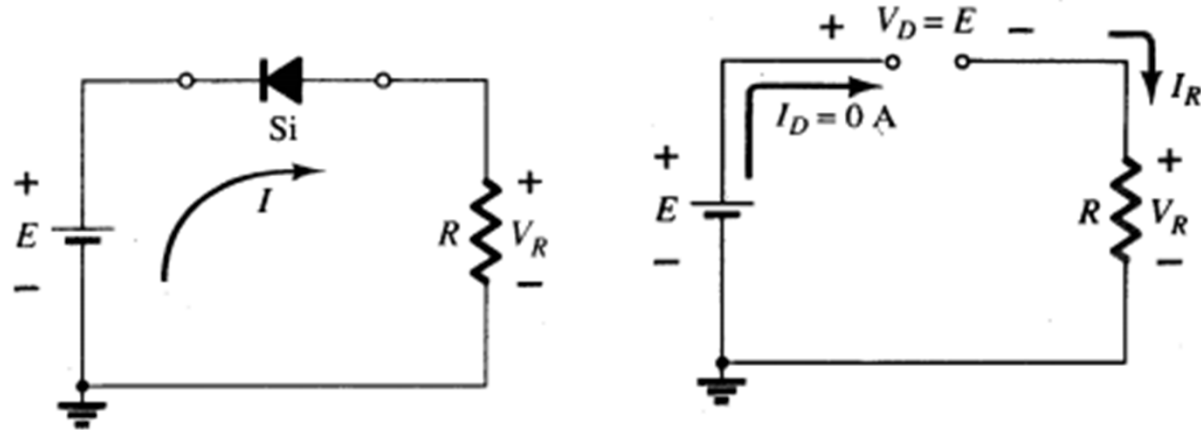
Considere os seguintes valores:

$E = 10V$

$R = 1k\Omega$

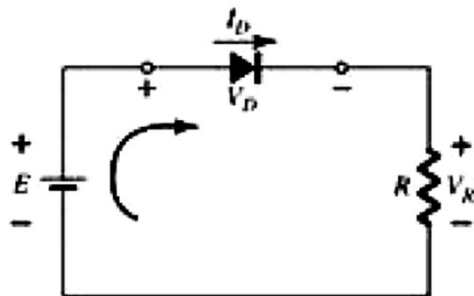
Análise de circuitos básicos

- Exemplo 2: circuito com diodo invertido (polarização reversa).



- Determine V_R e I_D

- Exemplo 3: polarização direta de um diodo de Germânio.



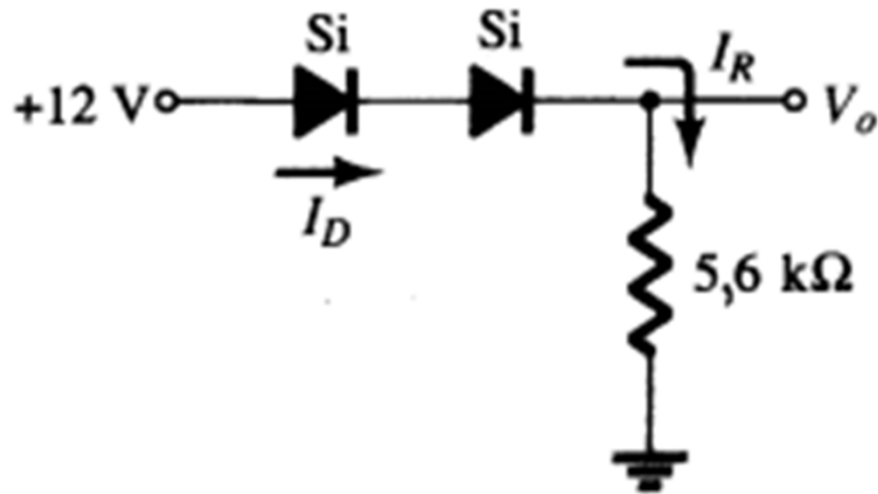
$$E = 10V$$

$$R = 1k\Omega$$

$$V_T = 0,3V \text{ (Ge)}$$

Análise de circuitos básicos

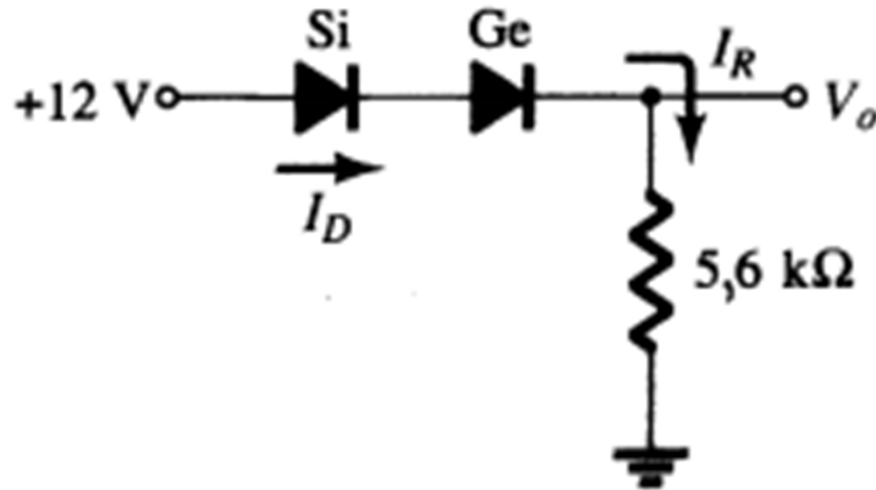
- Exemplo 4: diodos de Silício em série:



Determine V_o e I_R

Análise de circuitos básicos

- Exemplo 5: diodos de Silício e Germânio em série:



Determine V_o e I_R

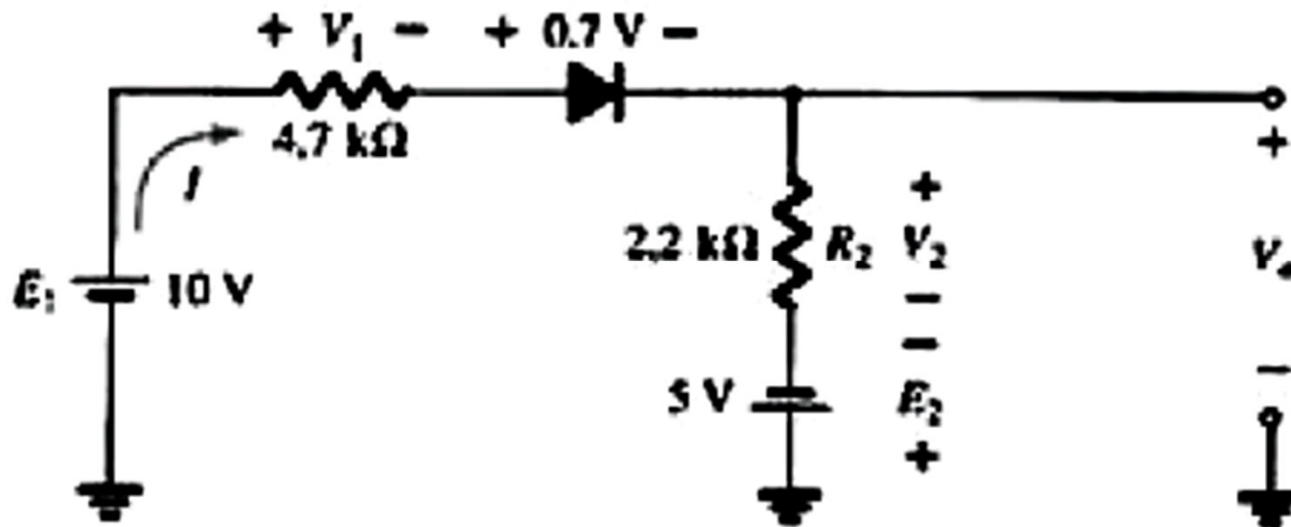
Respostas:

$$I_R = 1,96 \text{ mA}$$

$$V_o = 11 \text{ V}$$

Análise de circuitos básicos

- Exemplo 6:



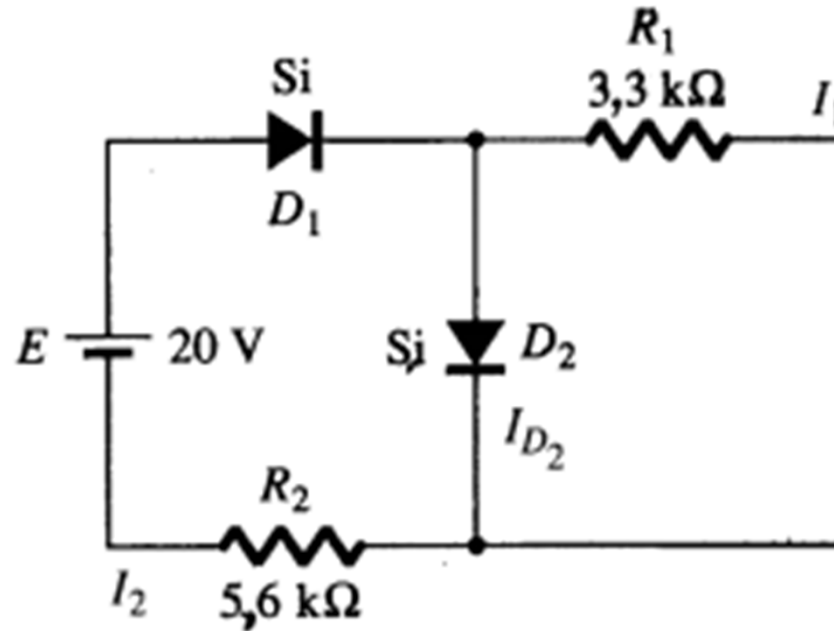
- Determine V_o

Respostas:

$$V_o = -0,44\text{V}$$

Análise de circuitos básicos

- **Exemplo 7:** para o circuito apresentado abaixo, determine:
 I_1 , I_2 , I_{D2}



Respostas:

$$I_1 = 0,212 \text{ mA}$$

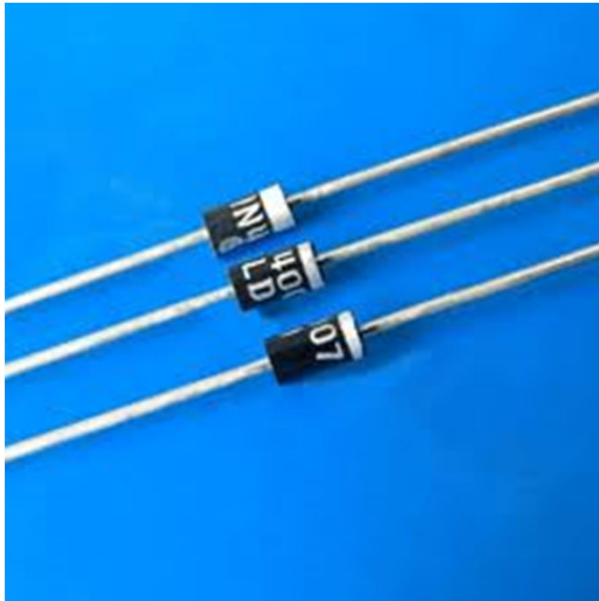
$$I_2 = 3,32 \text{ mA}$$

$$I_{D2} = 3,108 \text{ mA}$$

Tipos de diodos

- **Diodo retificador (comum):**

P.ex.: 1N4001



De potência



SMD

Tipos de diodos

- **Ponte retificadora:**

→ Utilizado na parte de retificação em uma fonte de alimentação contínua (veremos nas próximas aulas!)

Exemplos:

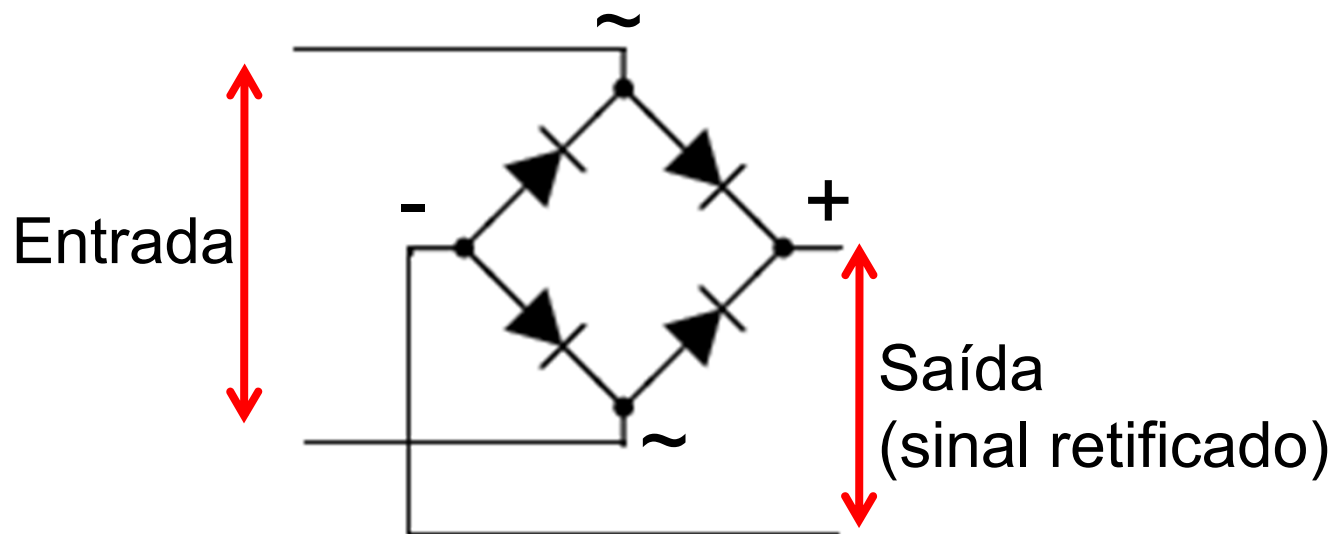


Tipos de diodos

- **Ponte retificadora:**

→ Utilizado para a parte de retificação em uma fonte de alimentação contínua (veremos nas próximas aulas!)

Circuito interno e simbologia:



Tipos de diodos

- **Diodo de alta velocidade:**

Por exemplo, 1N4148

→ O 1N4148 possui um tempo de chaveamento igual a 4ns (máx)



SMD

- **Diodos Schottky: chaveamento rápido.**

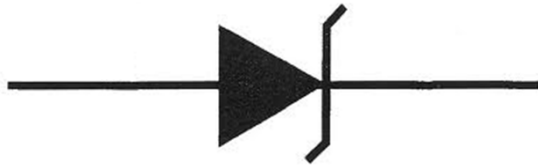


Tipos de diodos

- **Diodo Zener:**

→ Utilizado como regulador de tensão

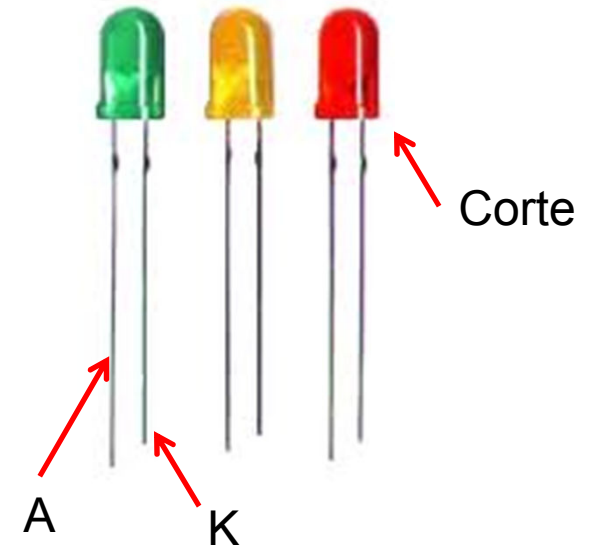
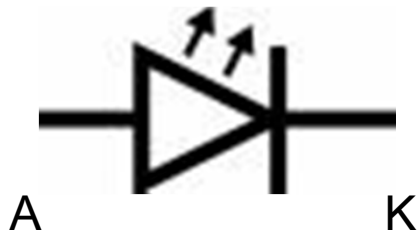
Símbolo:



Tipos de diodos

- **Diodo LED (*Light-emitting diode*):**

Símbolo:



- **Observação:**

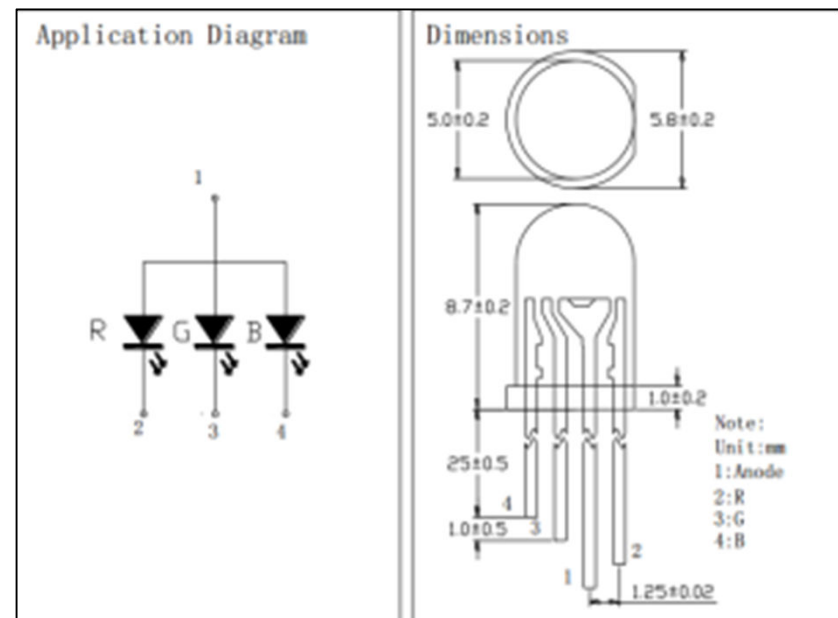
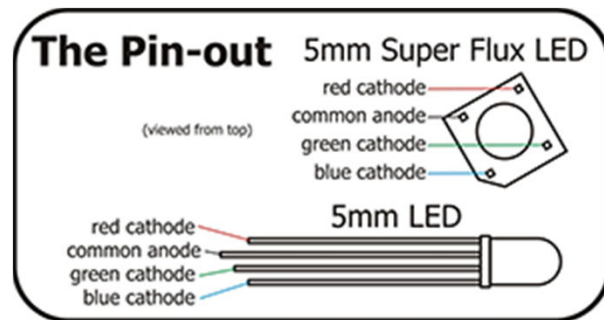
O LED não pode ser conectado diretamente à fonte de alimentação!

Sempre conecte um resistor em série (limitador de corrente).

P.ex.: 470Ω, 560 Ω

Tipos de diodos

- Diodo LED (*Light-emitting diode*):
→ LED RGB

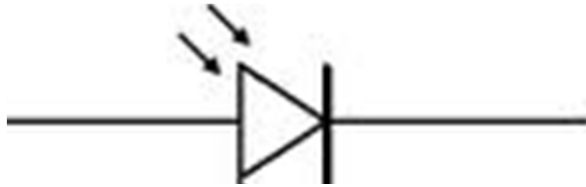


Tipo anodo comum

Tipos de diodos

- **Fotodiodo**

- Símbolo:



Aplicações: sensores de posição,
detectores de objetos, etc.



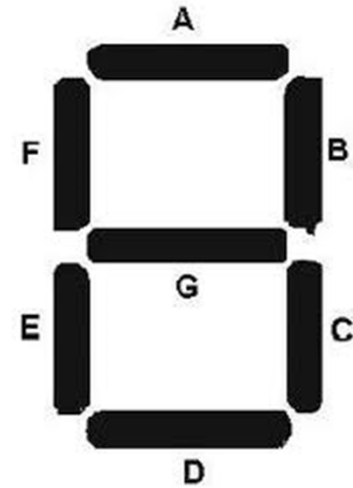
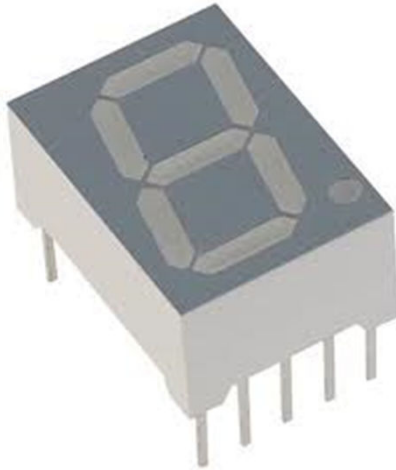
Tipos de diodos

- Chave óptica



Tipos de diodos

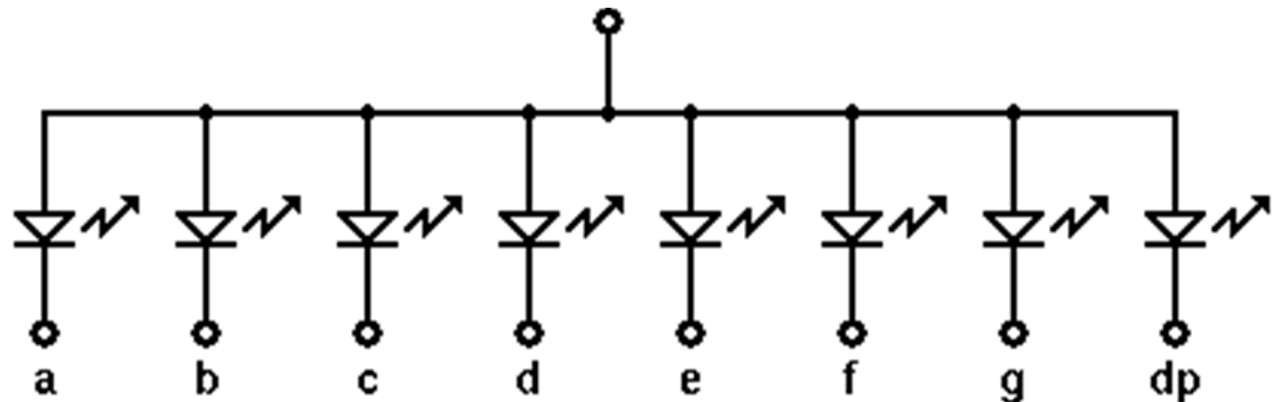
- Display de 7 segmentos
- Construído com LEDs



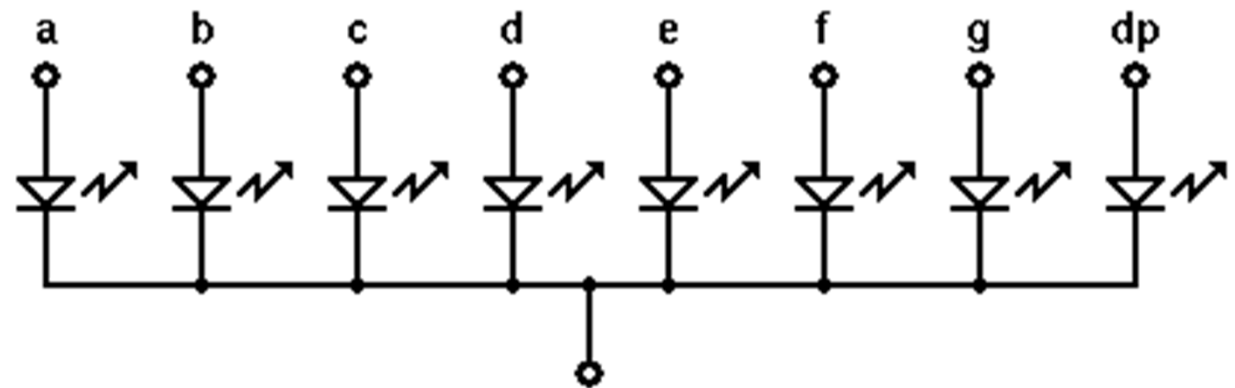
Tipos de diodos

- Display de 7 segmentos
- Tipos:

- Ânodo comum:



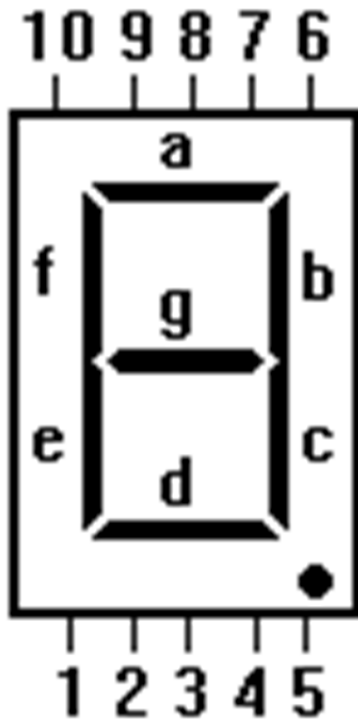
- Cátodo comum:



Tipos de diodos

- Display de 7 segmentos

Pinagem:



Pino	Significado
1	E
2	D
4	C
6	B
7	A
9	F
10	G
5	Dp (ponto)
3, 8	comum

Tipos de diodos

- Display de 7 segmentos
- Outras configurações:



Tipos de diodos

- Há outros tipos de diodo. Por exemplo,
 - Diodo Schottky
 - Diodo tunel
 - Diodo Varicap (utilizado como capacitor em filtros, sintonizadores, etc.)
 - Diodo de avalanche
 - Laser
 - etc...

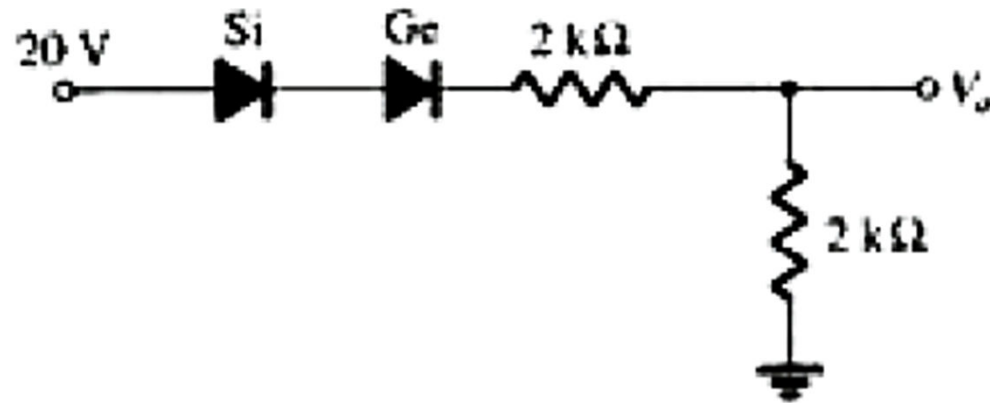
Tipos de diodos

- Tipos e símbolos:

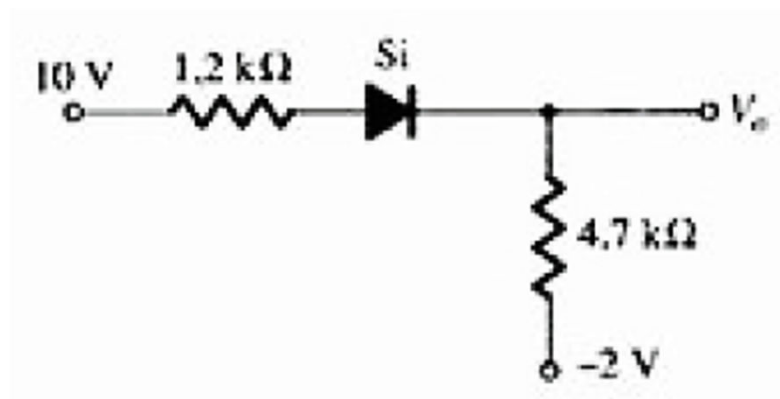
Diode Name	Diode Symbol	Used for:	Special Characteristics
Rectifier Diode, Fast Switching Rectifier		Converting AC to DC; Linear and switching power supplies	Can be had in very high current capacities, too slow for hf signal use.
Signal Diode		HF rectification, detection	Small t_r = few ns
Zener Diode		Voltage reference, regulation	Used in reverse breakdown
Light-emitting Diode [LED]		Indication, 7-segment displays	V_F 's vary with color
Photodiode		Light detection, mech.-electrical conversion; solar cell	Reverse current is increased by light; in FWD direction=solar cell
Optocoupler		Electrical isolation	LED and photodiode in an opaque package
Schottky Diode		VHF rectification, detecting small signals	No stored charges, >300 MHz, 0.25V V_F [metal jn]
Varactor Diode		Tuning radio and TV receivers	Fairly linear C with V_R
Varistor		AC line spike protection	2 back-back zeners
Current Regulator		Constant current source	
Step-recovery Diode		"snap" diode generates harmonics, f multipliers	Exploits reverse-current phenomenon
Back Diode		Very small signal rectification	V_R smaller than V_F
Tunnel Diode		High frequency oscillators	Part of forward char. has negative resistance
Laser Diode		Reading, writing CD, DVD etc.	
PIN Diode		RF switching diode	

Exercícios

- Exercício 1: determine V_o



- Exercício 2: determine V_o



Exercícios

- Exercício 3: determine V_o e I_D

