

Sistemas Electrónicos



Capítulo 4: Díodos e Aplicações

Ernesto Martins
evm@ua.pt
DETI (gab. 4.2.38)
Universidade de Aveiro



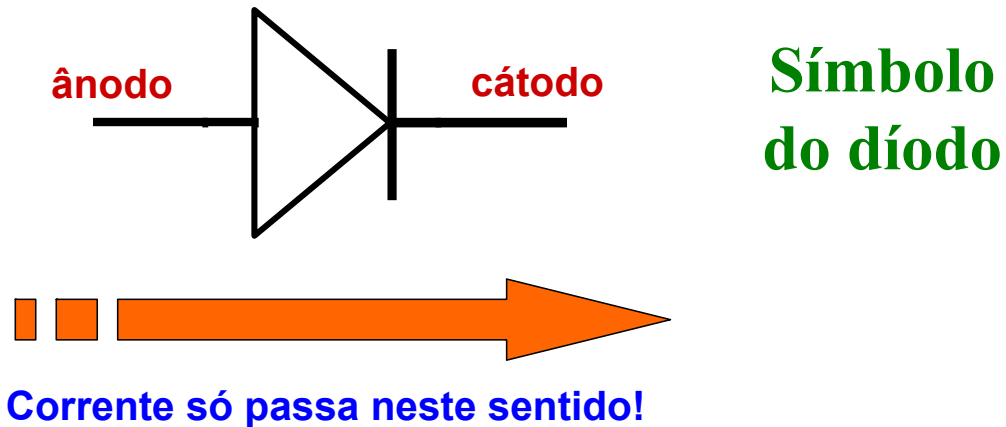
Sistemas Electrónicos – 2020/2021

Sumário

- **Introdução;**
- **Fundamentos físicos do díodo;**
- **Junção pn em equilíbrio, inversamente e directamente polarizada;**
- **Característica corrente/tensão do díodo;**
- **Parâmetros mais importantes do díodo – valores típicos;**
- **Modelos simplificados para análise de circuitos;**
- **Exemplos de aplicação;**
- **Rectificadores – meia onda; onda completa; filtragem;**
- **Díodo Zener e aplicações;**
- **Díodo LED e foto-díodo.**

Introdução

- O **díodo** é o componente electrónico (não linear) mais simples;
- Distingue-se por **conduzir apenas num sentido**: a aplicação mais comum é em circuitos de rectificação.

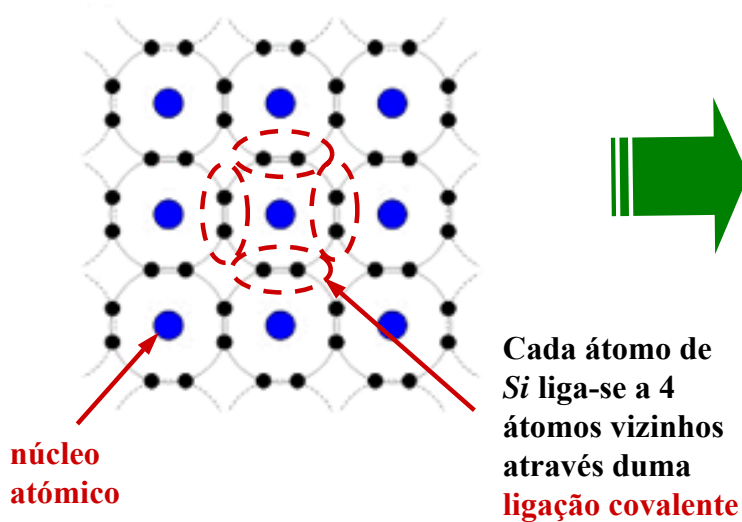


Fundamentos físicos do díodo

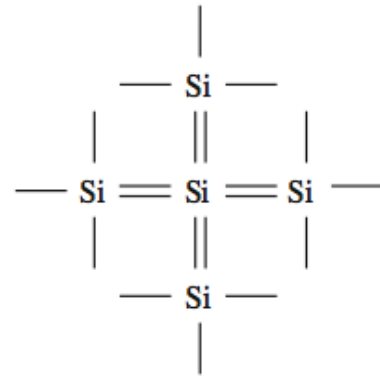
Semicondutores

- Elementos com **4** electrões de valência, e.g. **silício**;
- Valores de condutividade entre a dos isoladores e a dos condutores.

Estrutura cristalina do **silício**
intrínseco (representação 2D)

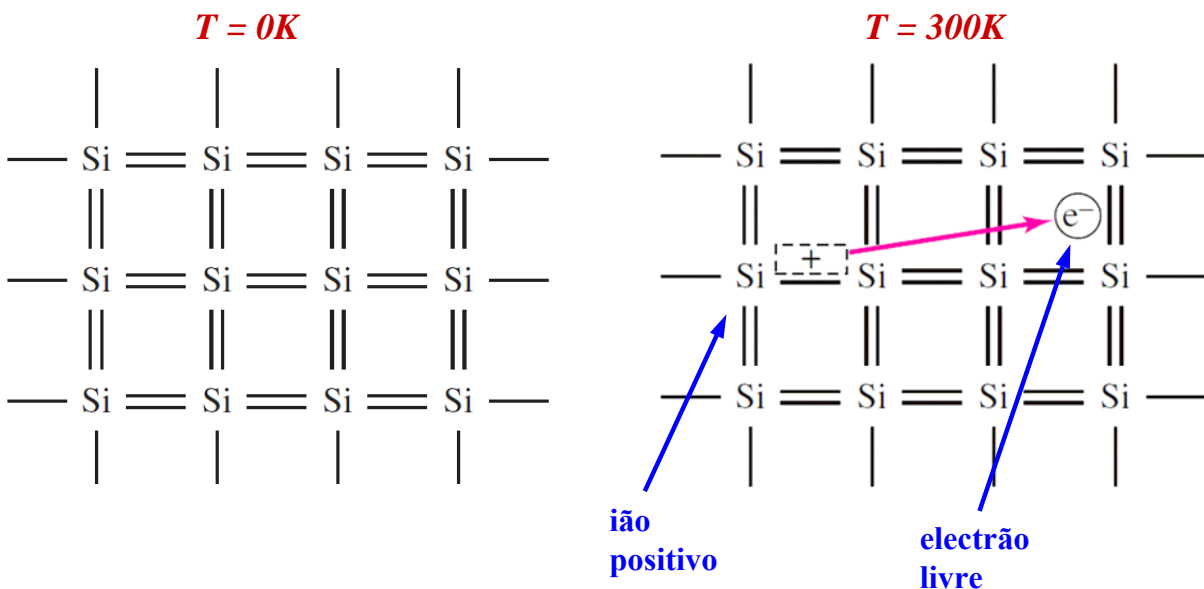


Representação simplificada



Semicondutores

- A **0 Kelvin** o Si não tem electrões livres – condutividade é zero;
- Temperatura rompe algumas ligações, gerando **electrões livres**.



Semicondutores

- Semicondutores distinguem-se dos condutores por terem **dois tipos de portadores de corrente**:

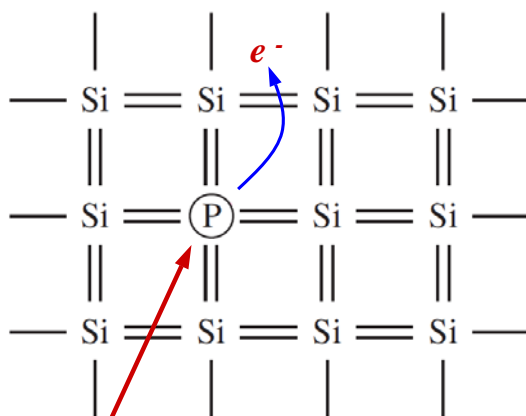
- Electrões (cargas negativas);
- Lacunas (cargas positivas).



Dopagem

- Para aumentar a condutividade, o silício é **dopado**, ou seja misturado com outros elementos.

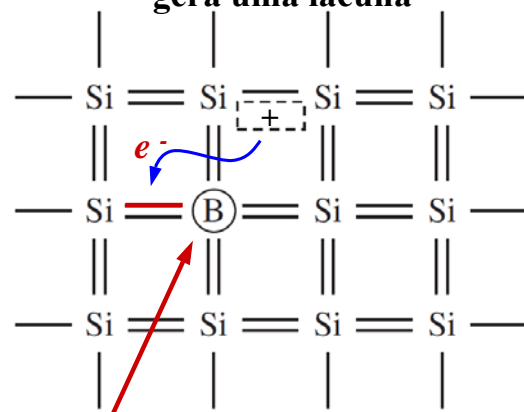
Dopagem com elemento com 5 electrões de valência (e.g fósforo - P)
gera um electrão livre



ião positivo

Silício tipo n

Dopagem com elemento com 3 electrões de valência (e.g boro - B)
gera uma lacuna

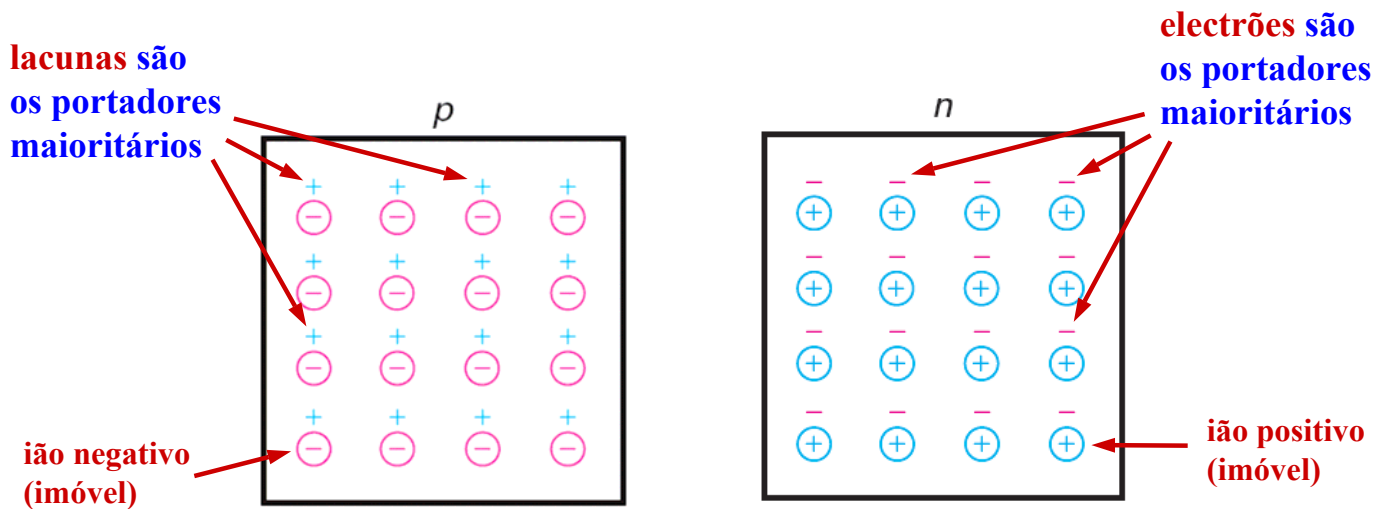


ião negativo

Silício tipo p

Semicondutores do tipos n e p

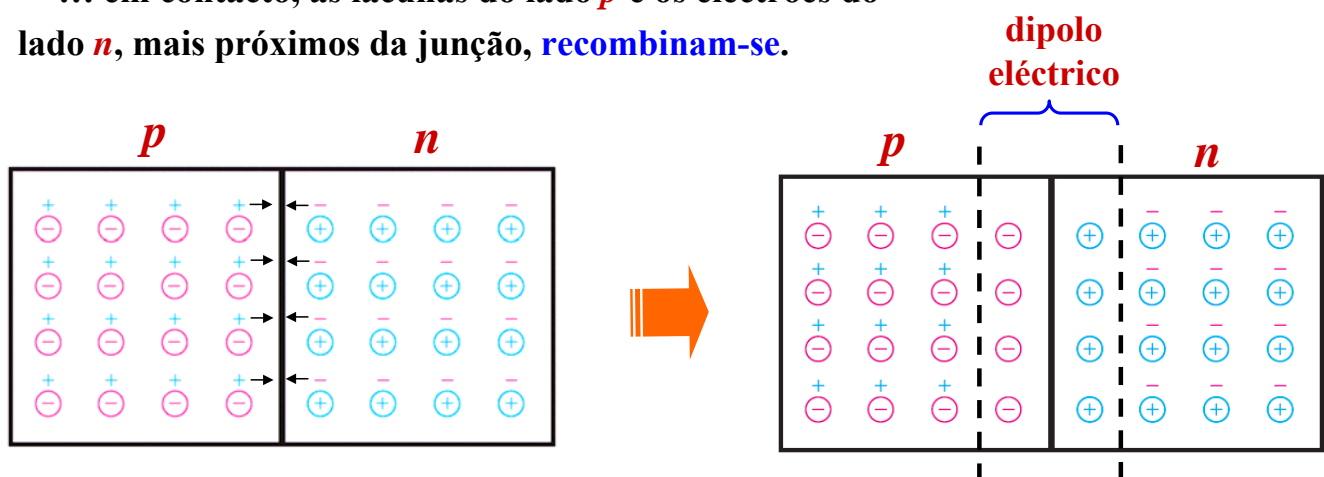
- Um semicondutor do tipo n ou p tem apenas melhor condutividade que um semicondutor intrínseco.



- A *magia* acontece quando os dois tipos de semicondutor entram em contacto, formando um *díodo de junção*...

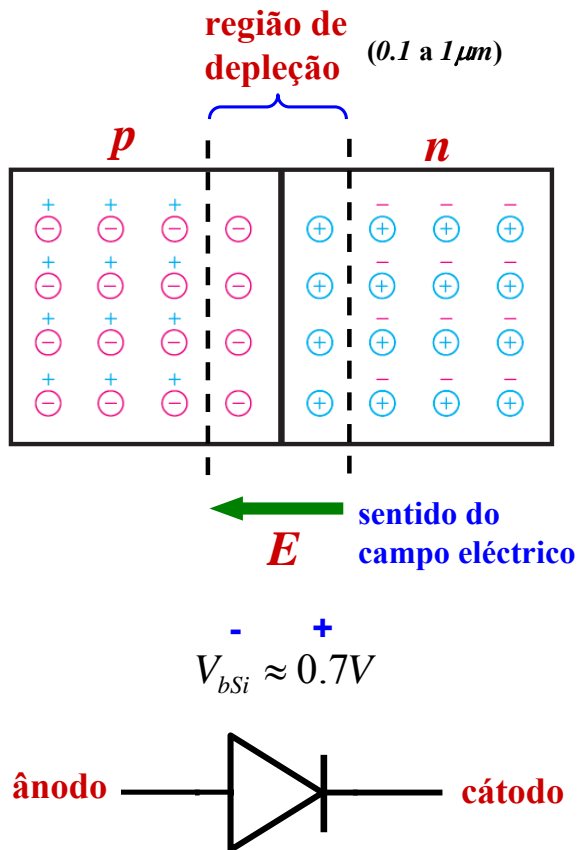
A junção pn

- ... em contacto, as lacunas do lado p e os electrões do lado n , mais próximos da junção, *recombinam-se*.



- Os íões próximos da junção deixam de estar electricamente *cobertos*, criando um *dipolo eléctrico*;
- Este dipolo opõe-se ao movimento de lacunas de $p \rightarrow n$ e electrões de $n \rightarrow p$.

A junção *pn* em equilíbrio

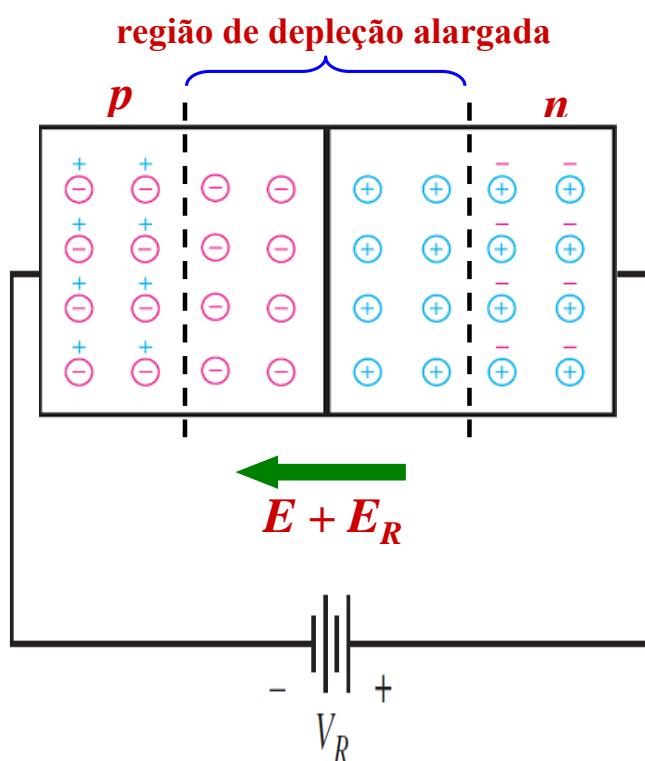


E. Martins, DETI Universidade de Aveiro

4-11

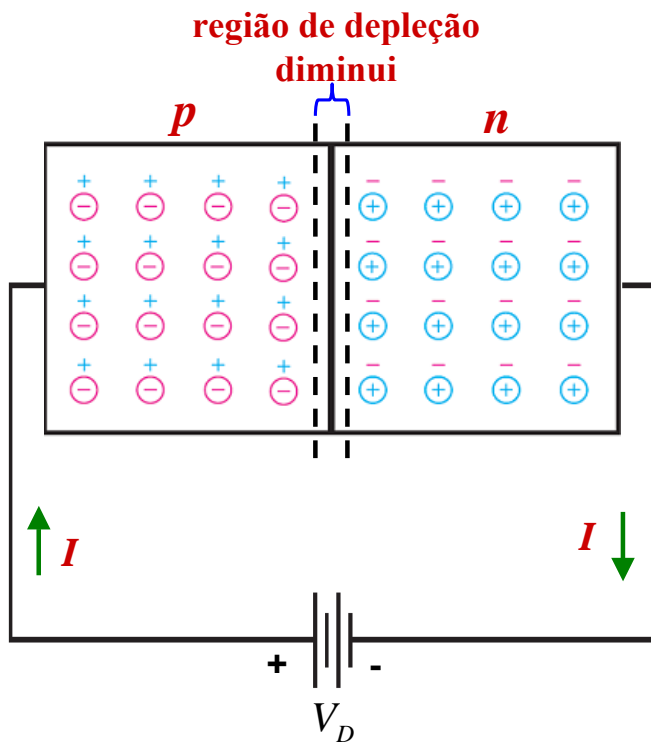
- A região do dipolo chama-se *de depleção* porque está vazia de cargas móveis;
- O dipolo estabelece um *campo eléctrico*, E que trava a difusão de electrões e lacunas através da junção;
- À diferença de potencial do dipolo chamamos *potencial de barreira*, V_b ;
- No silício o valor do potencial de barreira é tipicamente de **0.7V**.
- A junção *pn* é um *díodo*...

A junção *pn* polarizada inversamente



- O $+$ da fonte externa atrai electrões e o $-$ atrai lacunas, aumentando o numero de iões a descoberto;
- A carga total na região de depleção aumenta, ou seja a largura desta aumenta;
- A barreira de potencial aumenta (de V_b para $V_b + V_R$) e os portadores não passam;
- O díodo não conduz!

A junção *pn* polarizada directamente



- O + da fonte externa repele lacunas em direcção à junção; o - repele electrões também em direcção à junção;
- Se V_D for superior ao potencial de barreira (V_b) a região de depleção quase desaparece;
- Electrões e lacunas conseguem atravessar sem dificuldade a região de depleção;
- O díodo conduz!

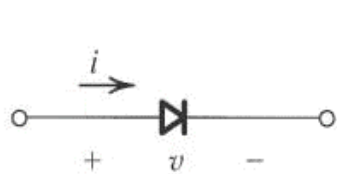
Característica corrente/tensão do díodo

Característica corrente-tensão

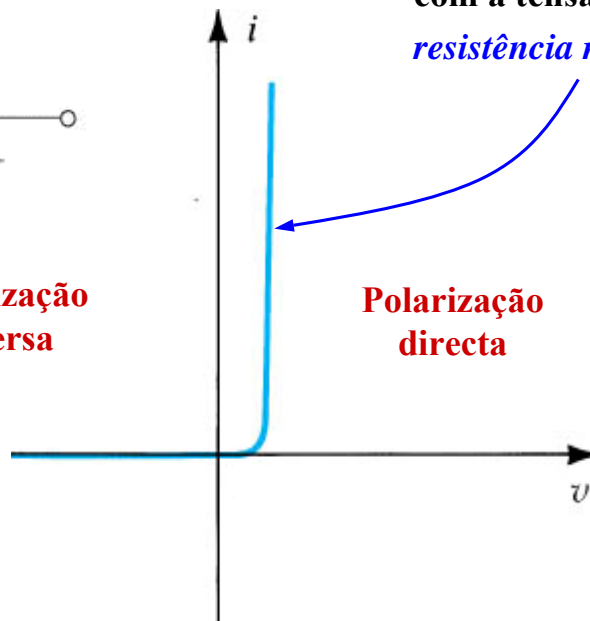
- Duas regiões de funcionamento:

- Polarização **inversa**: $v < 0$;

- Polarização **directa**: $v > 0$.



Polarização
inversa

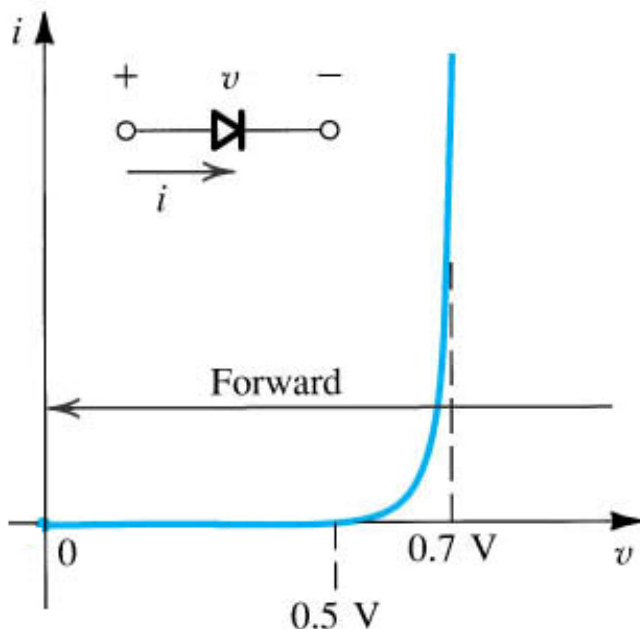


Polarização
directa

- Corrente i sobre rapidamente com a tensão $v \Rightarrow$ diodo tem *resistência muito baixa* ($< 1\Omega$).

Polarização directa

- Nesta região, a corrente cresce *exponencialmente* com a tensão sendo dada aproximadamente por



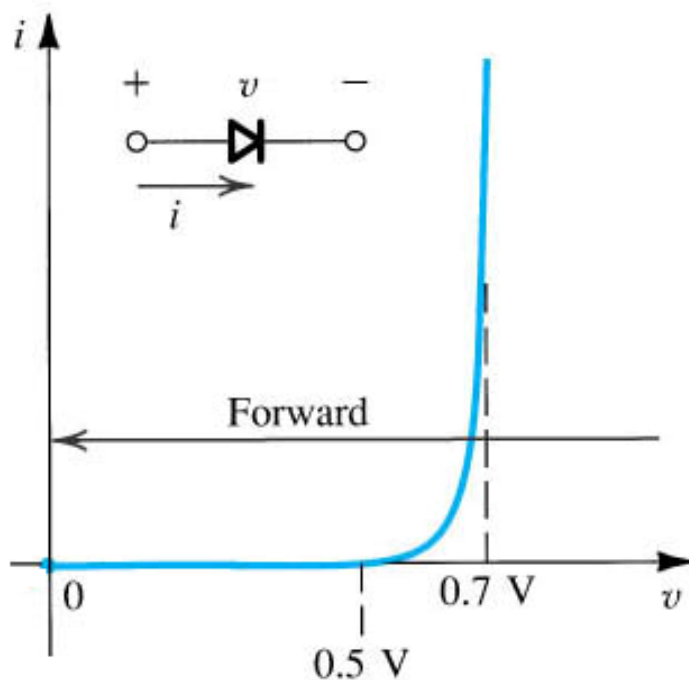
$$i = I_S \left(e^{v/nV_T} - 1 \right)$$

I_S – corrente de saturação inversa
(para díodos de sinal: $10^{-15}A$);

V_T – tensão térmica: $25mV$ a $20^\circ C$;

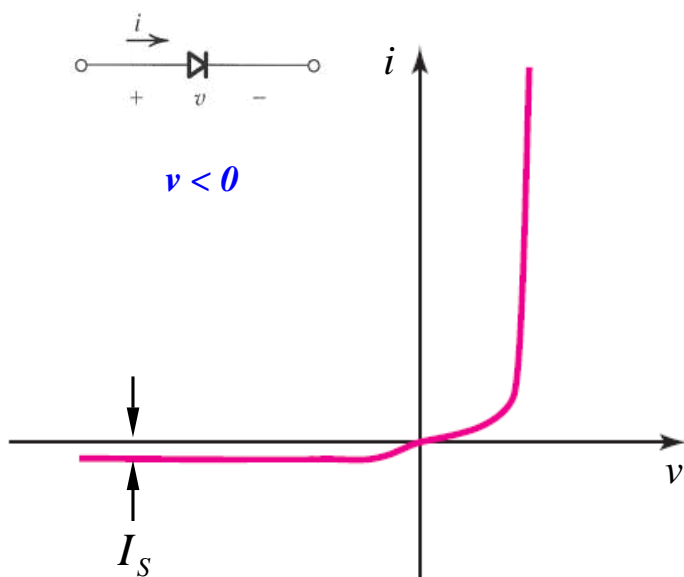
n – coeficiente de emissão: constante empírica de valor entre 1 e 2.

Polarização directa – observações importantes



- Devido à característica exponencial, abaixo de $0.5V$ o díodo quase não conduz. Esta é a *tensão de cut-in*;
- Em condução normal, a tensão v varia em apenas $0.12V$ ($n = 2$) por cada década (10x) de variação de i ;
- Em condução normal, o valor típico de v é entre 0.6 e $0.8V$;
- Valores típicos para um díodo de sinal. Díodos de potência exibem valores mais elevados de tensão de condução.

Polarização inversa



- Para valores negativos de v , bastante inferiores a nV_T , a corrente i é dada por

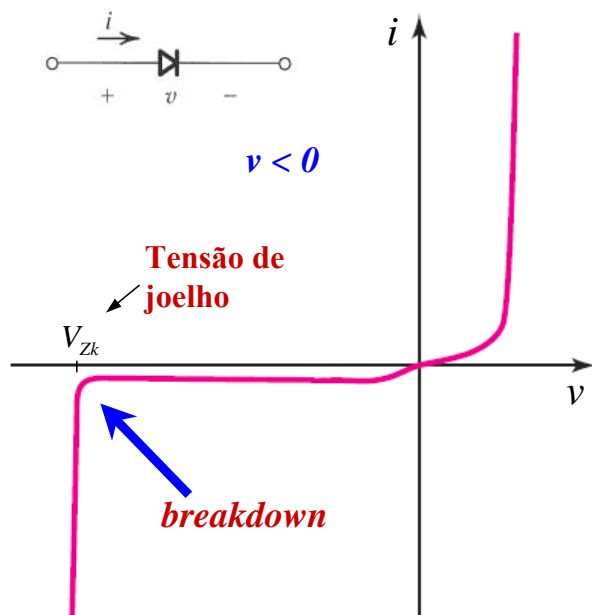
$$i = I_S \left(e^{v/nV_T} - 1 \right) \approx -I_S$$

que é a *corrente de saturação inversa* da junção, da ordem dos $10^{-15}A$, (bastante insensível a v)

- I_S é causada pela geração espontânea de pares electrão-lacuna na região de depleção, por efeito térmico.

- Na prática, a corrente inversa é bastante maior (da ordem do nA) por causa das correntes de fuga pela superfície do díodo.

Região de *breakdown*



- Campo eléctrico elevado na região de depleção causa um aumento súbito da corrente;
- Dois mecanismos de *breakdown*:
 - *Efeito Zener*: acontece para dopagens elevadas; portadores atravessam a região de depleção por efeito de túnel;
 - *Avalanche*: electrões com elevada energia cinética na região de depleção chocam com átomos, criando mais pares electrão-lacuna num efeito multiplicativo.

- Ocorre em todos os díodos e é, geralmente, de evitar. Mas há díodos especificamente desenhados de forma a funcionar na região de *breakdown*;

Características mais importantes dos díodos

1N4148
(díodo de sinal)



1N4007
(díodo de potência)



Características		1N4148	1N4007
V_F	Tensão directa @ 10mA @ 1A	0.7V	0.6V 1.1V
$I_{F(max)}$	Corrente directa máxima	0.3A	1A
$V_{R(max)}$	Tensão inversa máxima	75V	1000V
$I_{R(max)}$	Corrente inversa máxima @ 25°C @ 100°C	10nA	5µA 50µA
$P_{(max)}$	Potência máxima dissipada	0.5W	3W

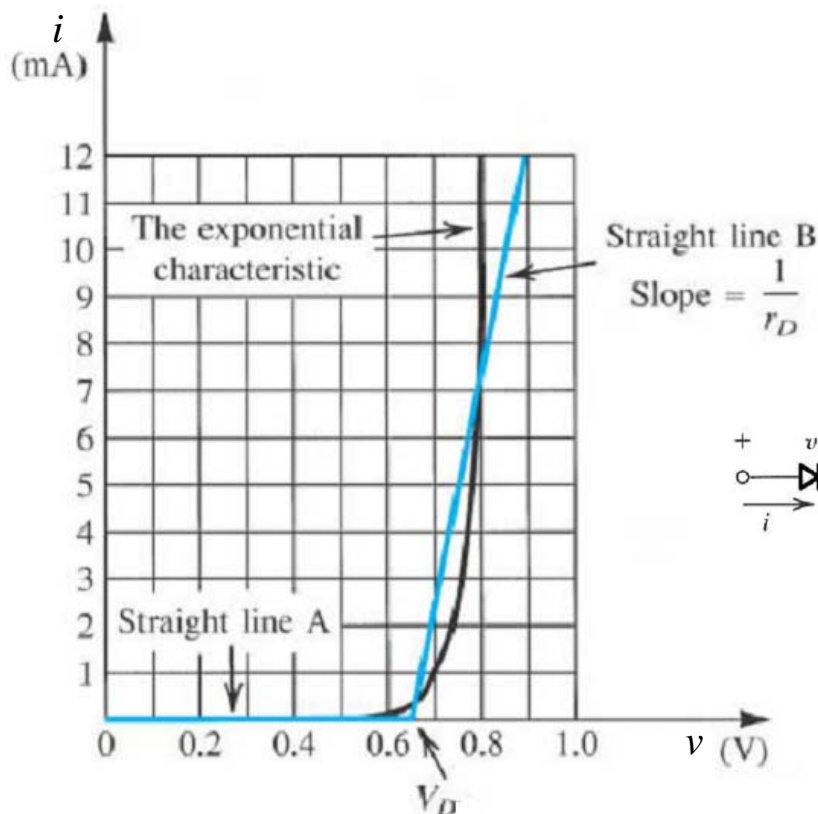
Modelos simplificados do díodo

Modelos do díodo para análise de circuitos

- **Exponencial** – baseado na relação exponencial $i(v)$. É o mais preciso mas também o mais difícil de usar.
- **Na prática, os modelos que se usam são:**
 - **Linear por segmentos** (*piecewise linear*);
 - **Tensão constante;**
 - **Ideal.**

Modelo linear por segmentos

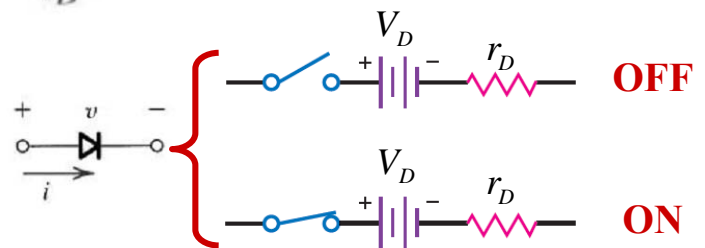
- A curva $i(v)$ do díodo é aproximada por duas rectas.



$$i = \begin{cases} 0, & v \leq V_D \\ (v - V_D)/r_D, & v \geq V_D \end{cases}$$

- V_D e r_D são escolhidos em função da gama de corrente do díodo;

- Ou:

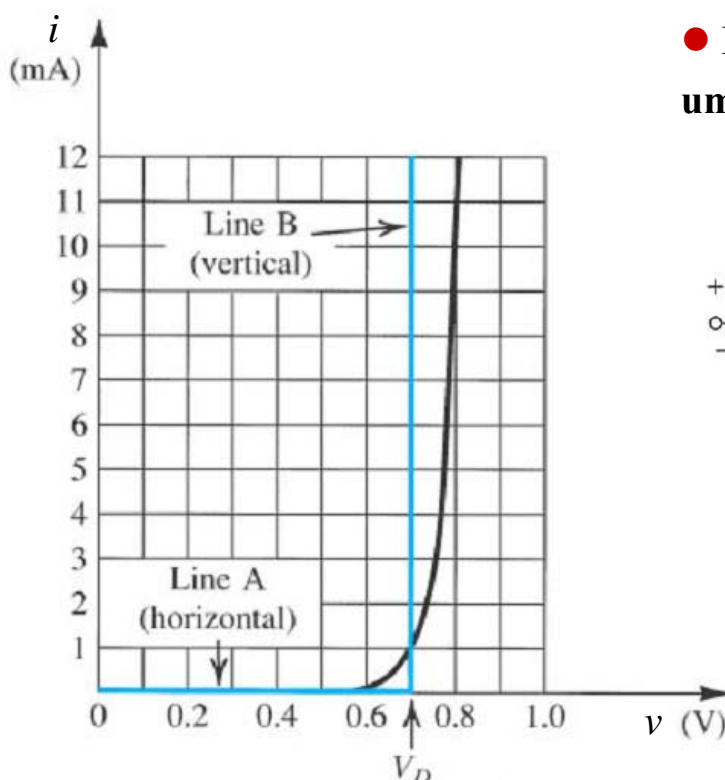


- Neste exemplo temos $V_D = 0.65V$ e $r_D = 20\Omega$.

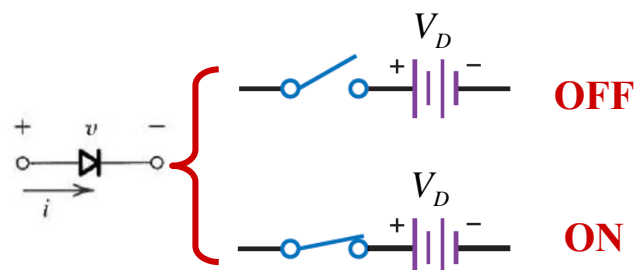
4-23

Modelo de tensão constante

- Curva $i(v)$ do díodo é simplificada para uma linha vertical – despreza-se r_D ;



- Em condução, o díodo apresenta uma tensão V_D constante (0.7V);

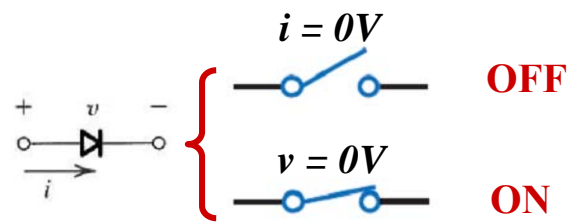
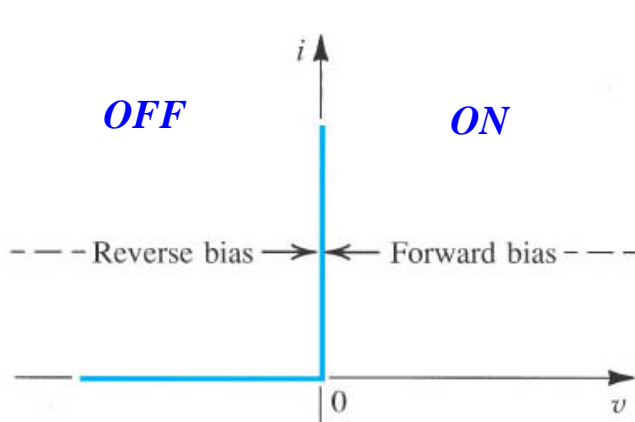


- É o modelo mais popular para análise rápida manual. É um dos que iremos usar mais.

4-24

Modelo ideal

- Considera que o díodo é um interruptor ideal com $V_F = 0V$;



- Válido só em aplicações com tensões muito maiores que as tensões normais de condução do díodo;

- Útil numa primeira análise de circuitos com vários díodos.

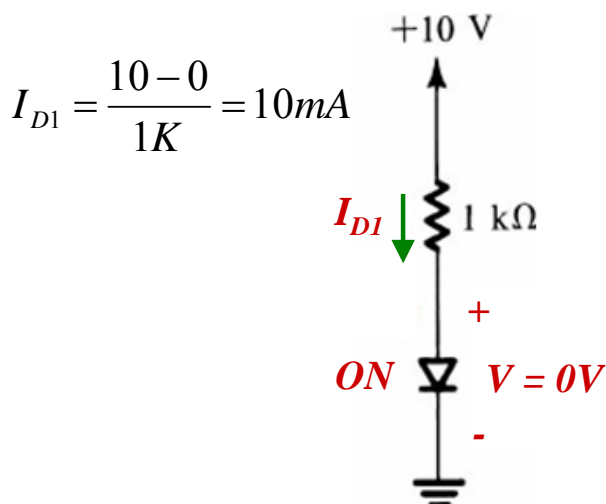
Modelos do díodo: conclusão

- **Exponencial:** Resultados precisos; é raramente necessário;
- **Linear por segmentos (V_D e r_D):** Suficientemente preciso na maior parte das aplicações;
- **Tensão constante (V_D ; r_D é desprezado):** Quando a resistência do circuito é pelo menos $100x$ superior a r_D ;
- **Ideal (V_D e r_D desprezados):** Quando as tensões são maiores que V_D e as resistências pelo menos $100x$ superiores a r_D .

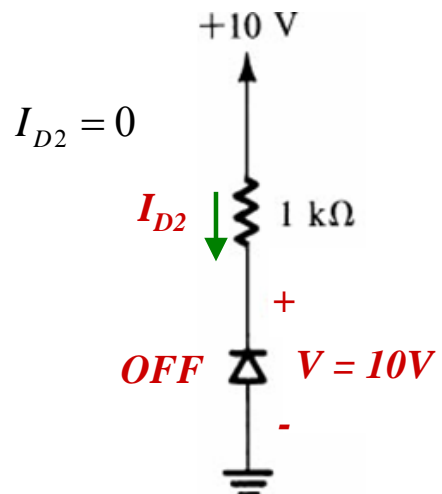
Exemplos de aplicação dos modelos

Modelo ideal

- Díodo *on*;
- Tensão no díodo é $0V$;
- Corrente é limitada apenas pela resistência.



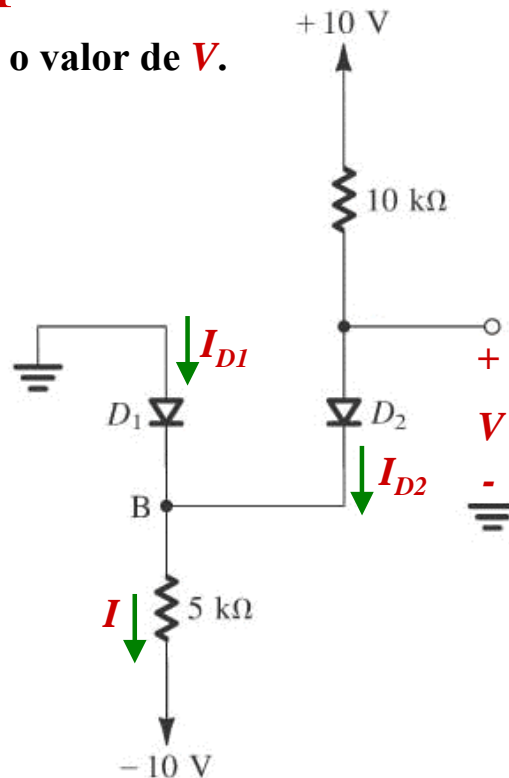
- Díodo *off*;
- Corrente no díodo é $0A$;
- Tensão inversa do díodo é a tensão de alimentação.



Circuitos simples com díodos

Exemplo 1

- Determinar o valor de V .

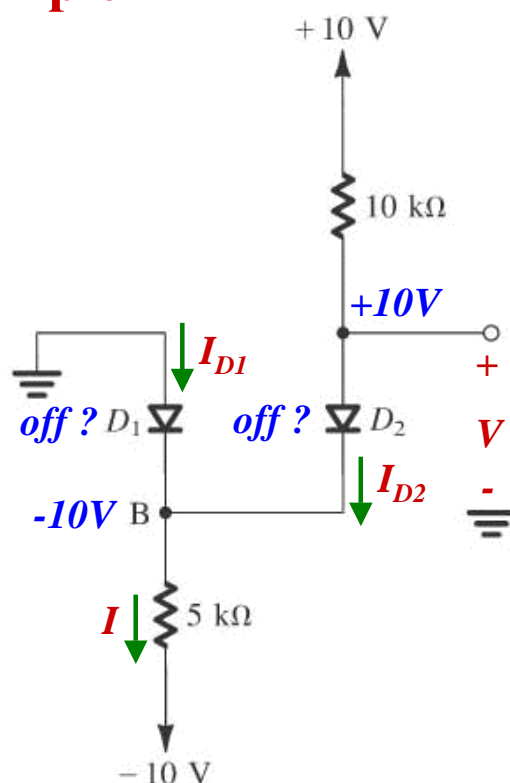


● A questão crucial é: qual, ou quais, os díodos que estão *on* ou *off*;

● A melhor maneira de começar é aplicar o modelo ideal do díodo.

Circuitos simples com díodos

Exemplo 1



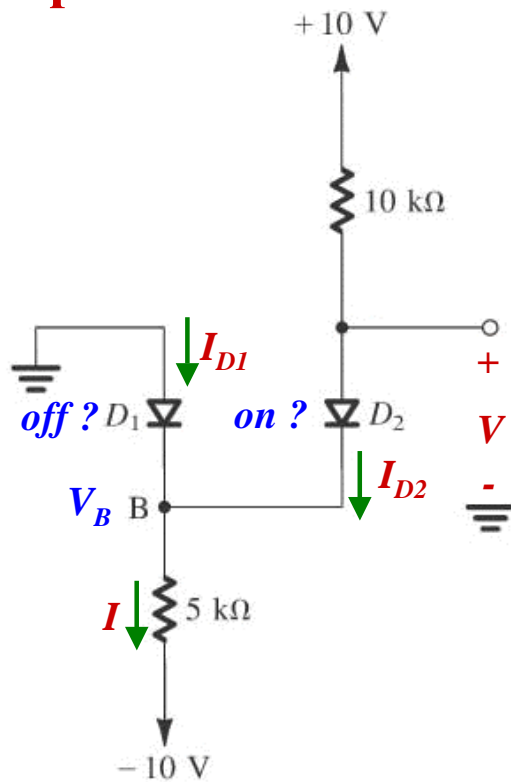
1º hipótese - D1 *off* e D2 *off* ?

● Com estas tensões directas, D1 e D2 não podem estar ambos *off*!

● Resultados contradizem premissas.
Hipótese impossível!

Circuitos simples com díodos

Exemplo 1



2º hipótese - D1 off e D2 on ?

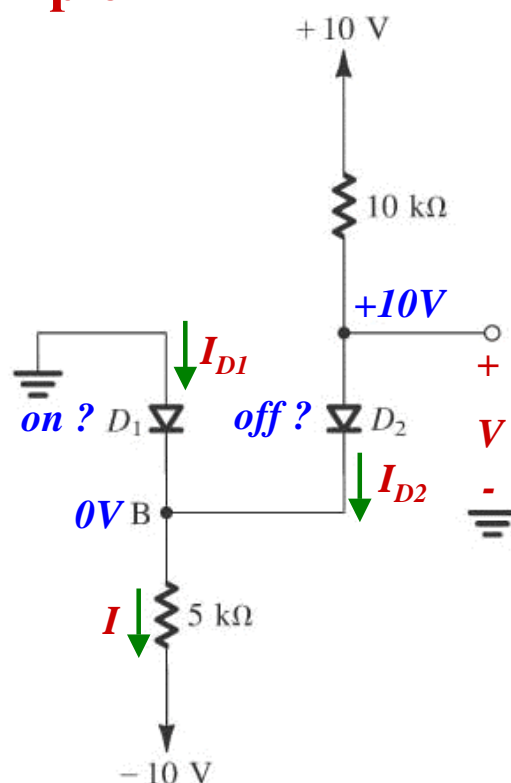
$$V_B = 5I + (-10)$$

$$V_B = \frac{5}{5+10} 20 + (-10) = -3.3V$$

- Com $V_B < 0V$, D1 não pode estar *off*!
 - Resultados contradizem premissas.
- Hipótese impossível!**

Circuitos simples com díodos

Exemplo 1



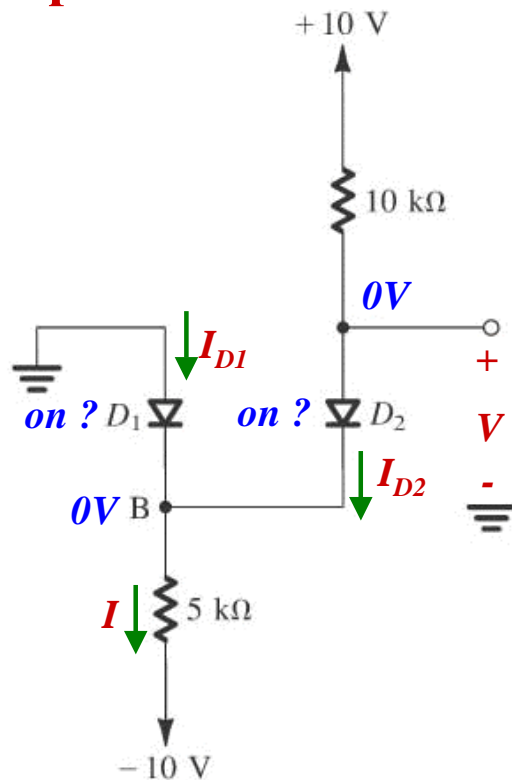
3º hipótese - D1 on e D2 off ?

- Com $V_{D2} = 10V$, D2 não pode estar *off*!

- Resultados contradizem premissas.
- Hipótese impossível!**

Circuitos simples com díodos

Exemplo 1



4º hipótese - D1 on e D2 on ?

$$I_{D2} = \frac{10}{10} = 1mA$$

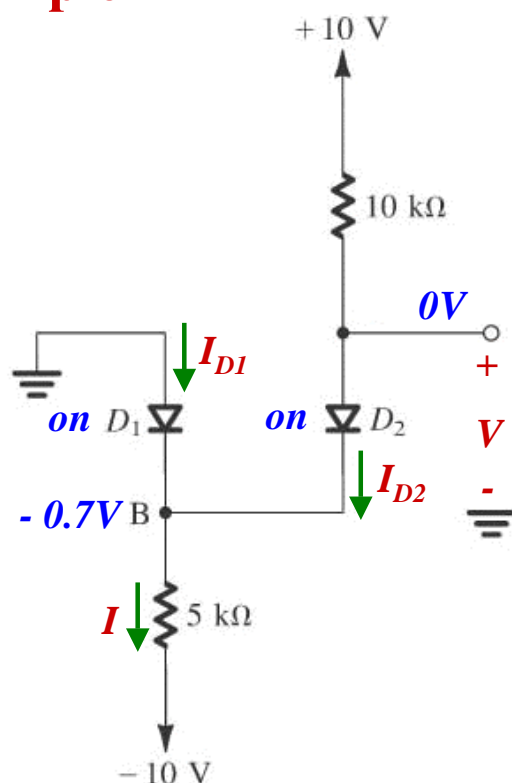
$$I = \frac{10}{5} = 2mA$$

$$I_{D1} = I - I_{D2} = 1mA$$

● Hipótese válida!

Circuitos simples com díodos

Exemplo 1



4º hipótese — podemos agora refinar a análise usando o **modelo de tensão constante**.

$$I_{D2} = \frac{10}{10} = 1mA$$

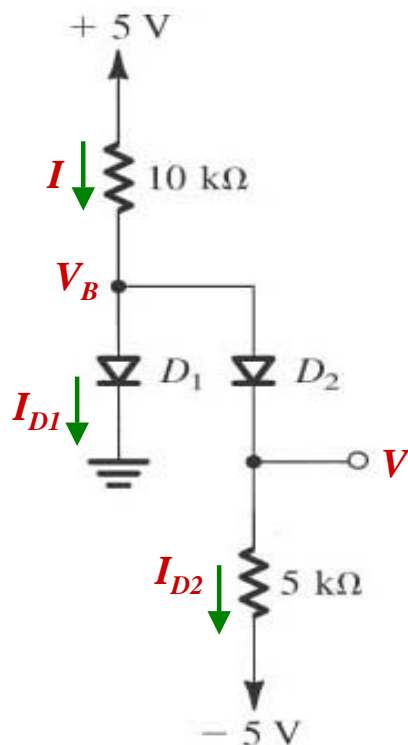
$$I = \frac{-0.7 - (-10)}{5} = 1.86mA$$

$$I_{D1} = I - I_{D2} = 0.86mA$$

$$V = 0V$$

Circuitos simples com díodos

Exemplo 2 - Determinar o valor de V .



1º hipótese - D1 *off* e D2 *off* ?

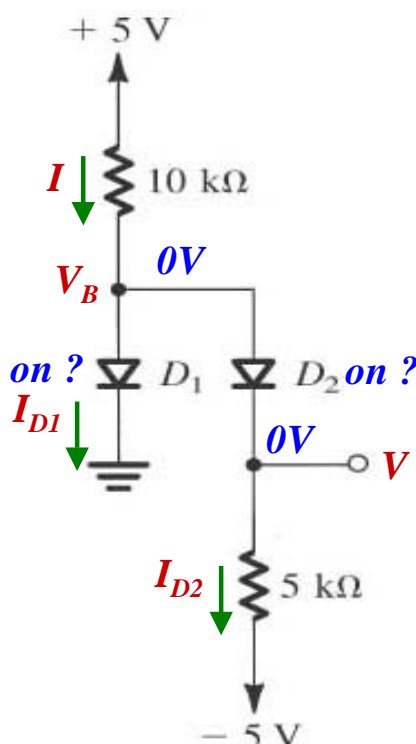
● **Impossível** porque as tensões de +5 e -5V obrigam a que pelo menos um dos díodos conduza.

2º hipótese - D1 *on* e D2 *off* ?

● **Impossível** porque teríamos $V_B = 0V$ obrigando D2 a conduzir também.

Circuitos simples com díodos

Exemplo 2



● Consideremos então a hipótese.

3º hipótese - D1 *on* e D2 *on* ?

$$I_{D2} = \frac{5}{5} = 1mA$$

$$I = \frac{5}{10} = 0.5mA$$

$$I_{D1} = I - I_{D2} = 0.5 - 1 = -0.5mA$$

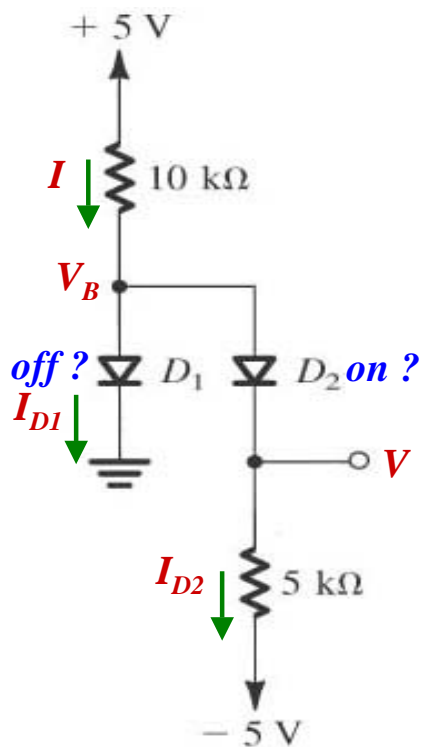
● Corrente em D1 não pode ser negativa!

● Resultados contradizem premissas.

Hipótese impossível!

Circuitos simples com díodos

Exemplo 2



4º hipótese - D1 *off* e D2 *on* ?

$$V_B = V = 5I_{D2} - 5$$

$$V_B = 5 \frac{5 - (-5)}{10 + 5} - 5 = -1.67V$$

- Com $V_B < 0V$, D1 está de facto *off*!
- Hipótese válida!