

# *Sinais e Sistemas Electrónicos*



## *Capítulo 7: Díodos e Aplicações*



Ernesto Martins  
[evm@ua.pt](mailto:evm@ua.pt)  
DETI (gab. 4.2.38)  
Universidade de Aveiro



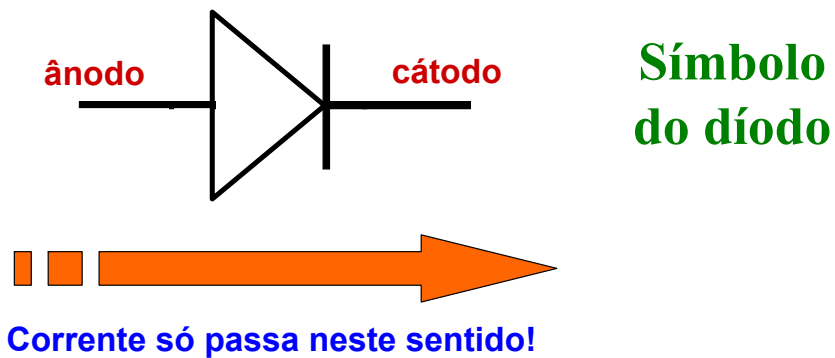
Sinais e Sistemas Electrónicos – 2023/2024

### **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;**
- **Rectificadores: meia onda; onda completa; filtragem;**
- **Díodo Zener e aplicações;**
- **Díodo LED e foto-díodo.**

## Introdução

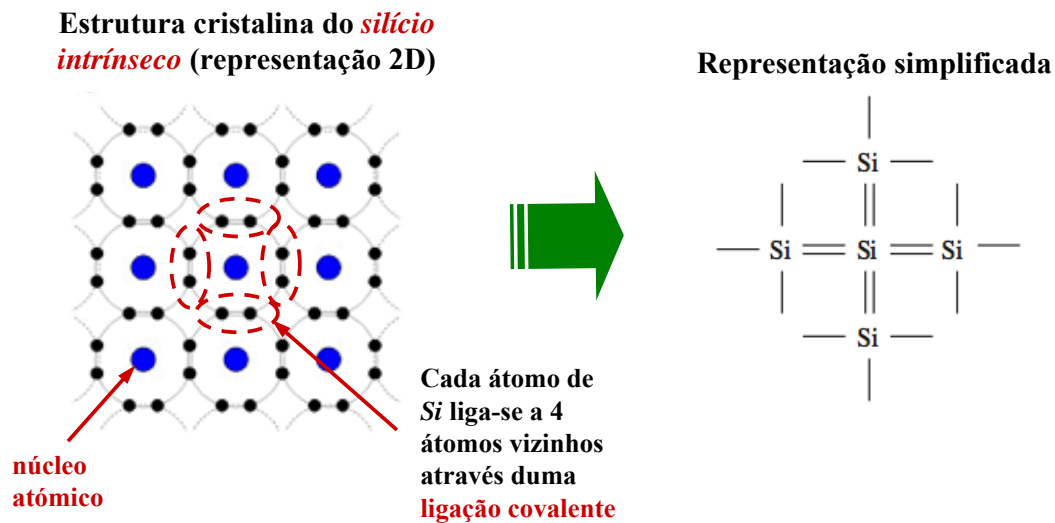
- O **díodo** é o componente electrónico (não linear) mais simples;
- Distingue-se por **conduzir apenas num sentido**: a aplicação mais comum é em circuitos de rectificação.



## Fundamentos físicos do díodo

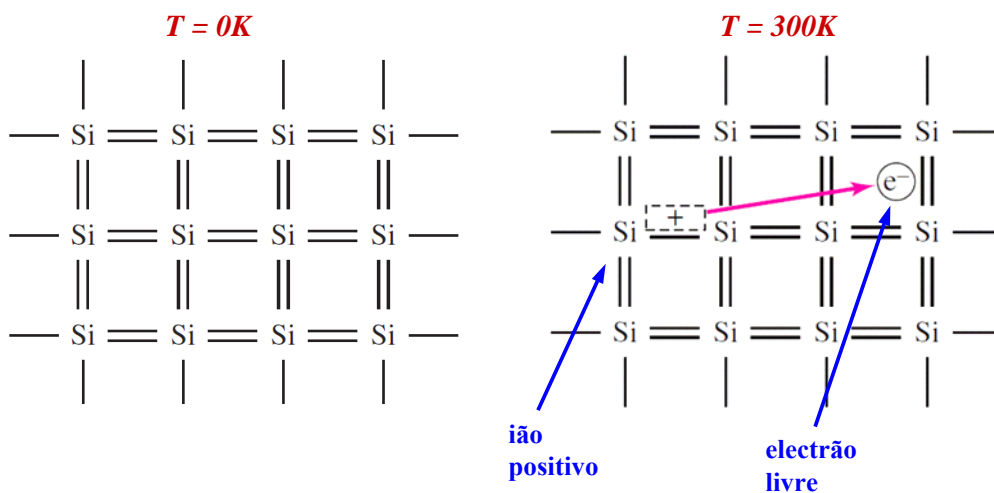
## Semicondutores

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



## 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).

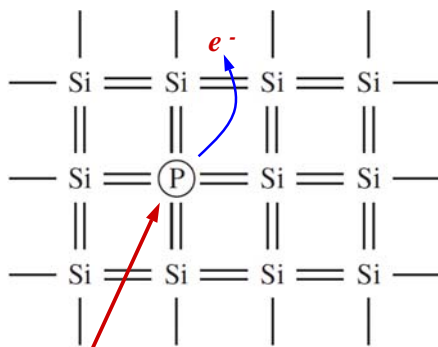


## Dopagem

● 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*

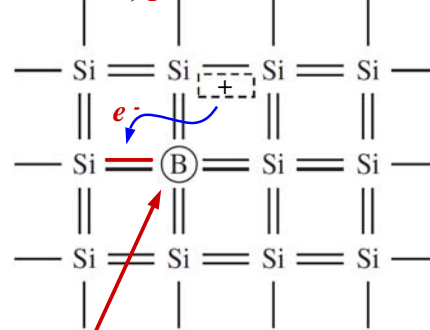


**ião positivo**

**Silício tipo *n***

**Dopagem com elemento com 3 electrões de valência (e.g boro - B)**

*gera uma lacuna*

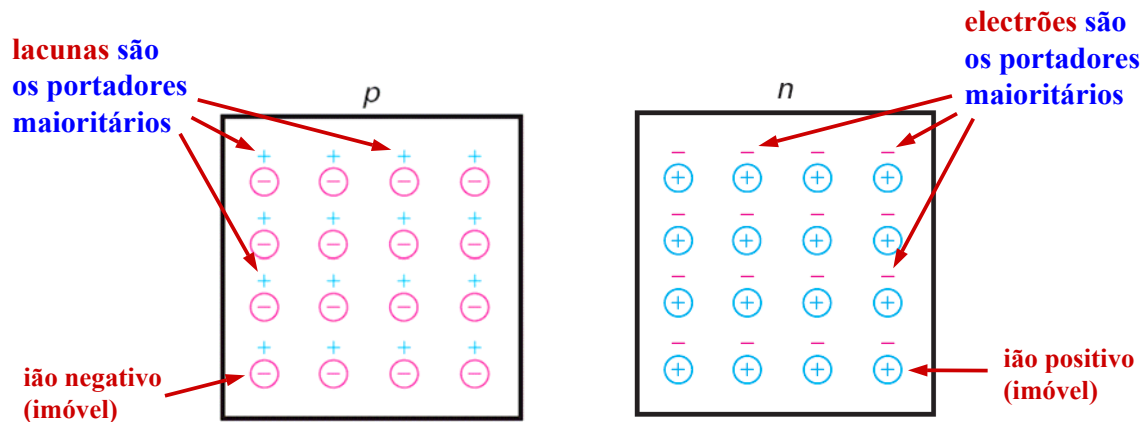


**ião negativo**

**Silício tipo *p***

## Semicondutores do tipos $n$ e $p$

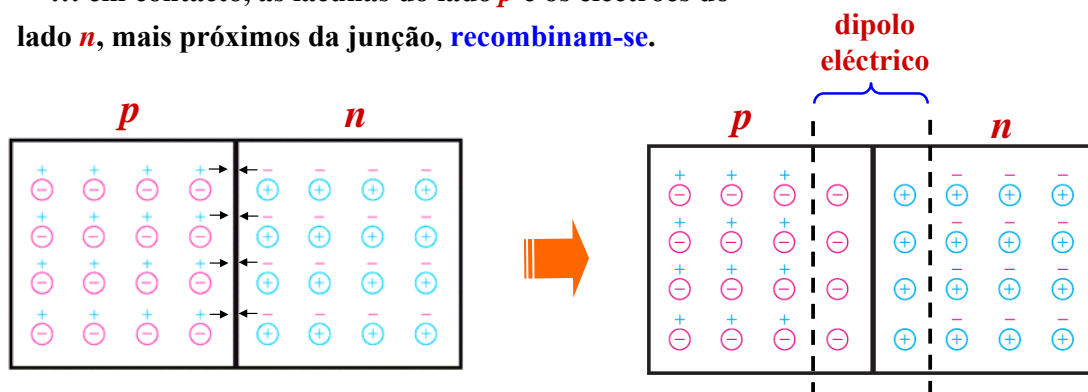
- Um semicondutor do tipo  $n$  ou  $p$  tem apenas melhor condutividade que um semicondutor intrínseco.



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

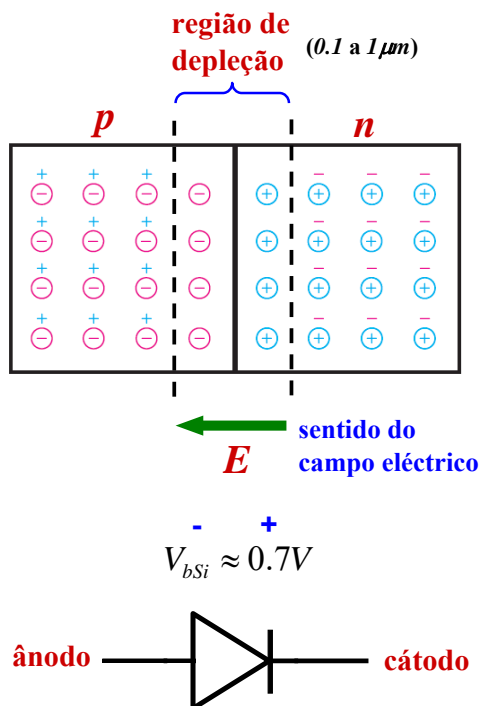
## A junção $pn$

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



- Os iões 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

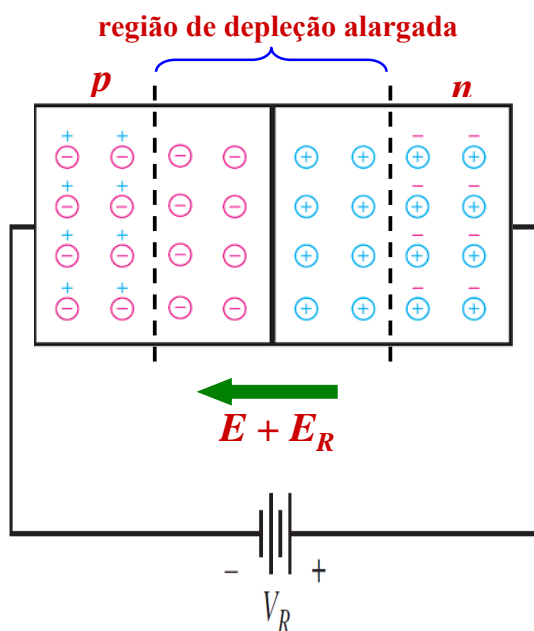


E. Martins, DETI Universidade de Aveiro

7-11

- 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

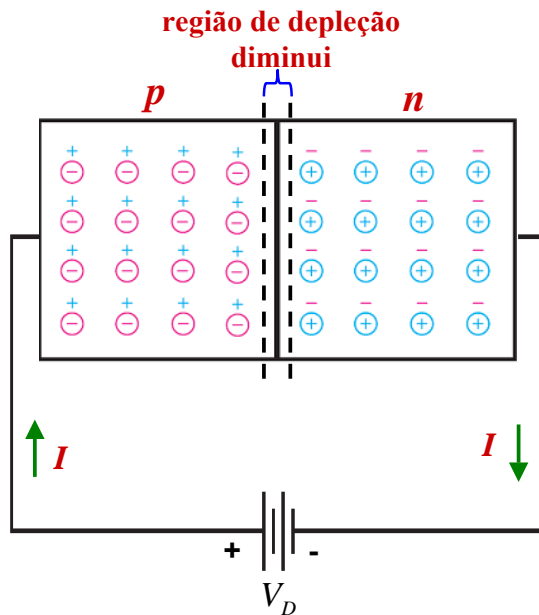


E. Martins, DETI Universidade de Aveiro

7-12

- 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!

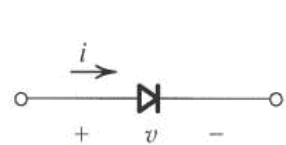
## Característica corrente/tensão do díodo

## Característica corrente-tensão

- Duas regiões principais de funcionamento:

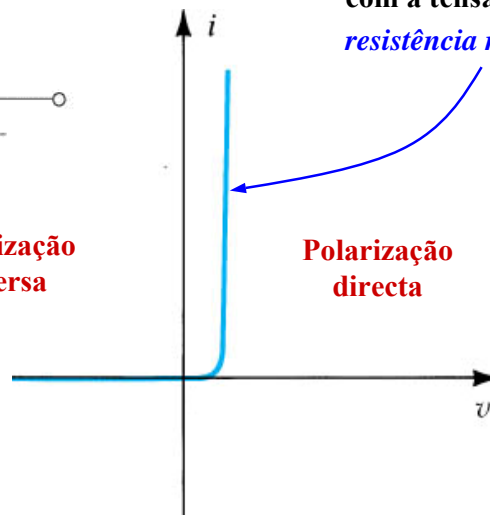
- Polarização **inversa**:  $v < 0$ ;

- Polarização **directa**:  $v > 0$ .



Polarização  
inversa

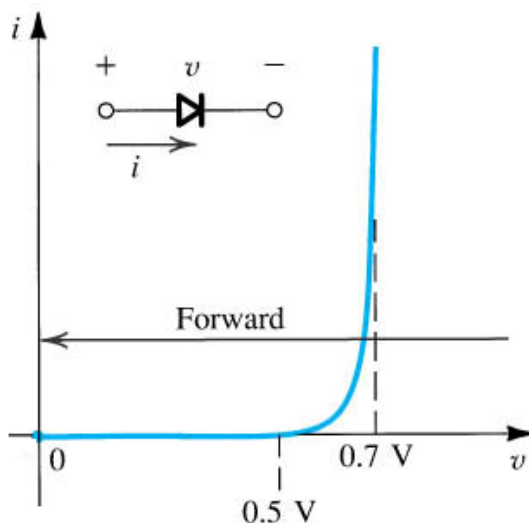
- Corrente  $i$  sobe rapidamente com a tensão  $v \Rightarrow$  díodo tem *resistência muito baixa* ( $< 1\Omega$ ).



Polarização  
directa

## Polarização directa

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



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

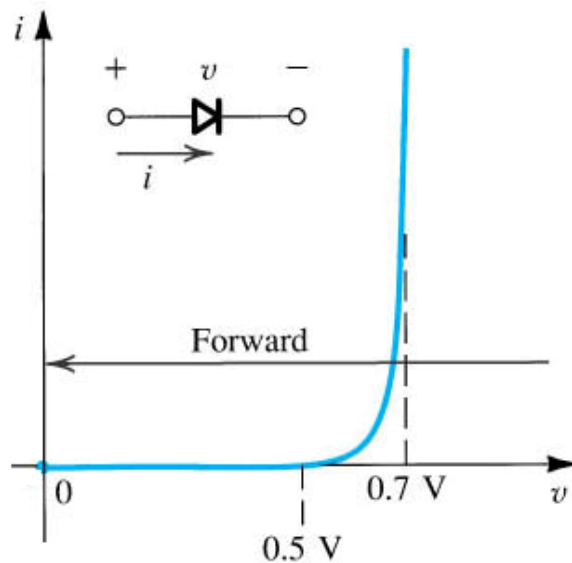
$I_S$  – corrente de saturação inversa  
(para díodos de sinal:  $10^{-15}A$ );

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

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

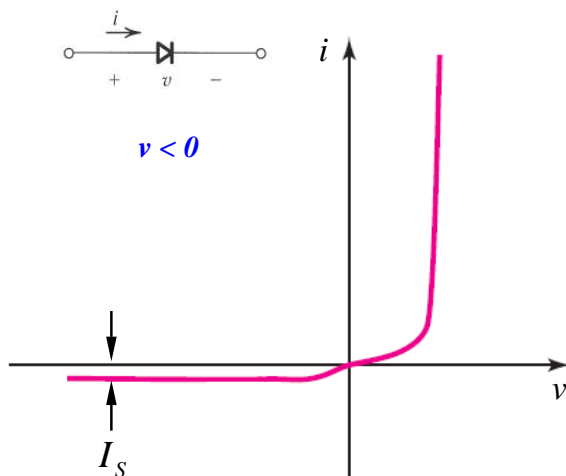


## Polarização directa – observações importantes



- Devido à característica exponencial, abaixo de  $0.5\text{ V}$  o díodo quase não conduz. Esta é a *tensão de cut-in*;
- Em condução normal, a tensão  $v$  varia em apenas  $0.12\text{ V}$  ( $n = 2$ ) por cada década (10x) de variação de  $i$ ;
- Em condução normal, o valor típico de  $v$  é entre  $0.6$  e  $0.8\text{ V}$ .

## Polarização inversa

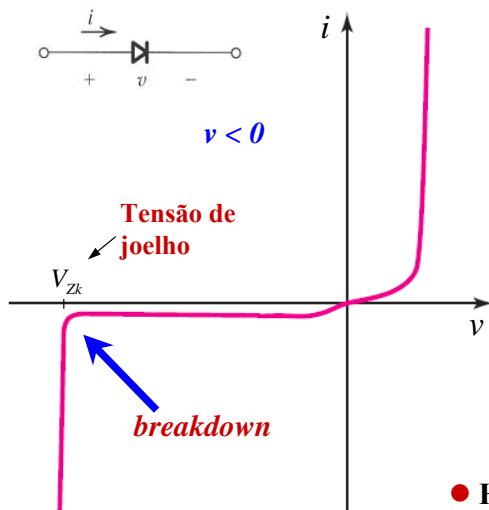


- Para valores negativos de  $v$ , bastante inferiores a  $nV_T$ , a corrente  $i$  é dada por

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

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

## Região de *breakdown*



- Campo eléctrico elevado causa um aumento súbito da corrente;
- Ocorre em todos os díodos – circuito externo deve limitar a corrente no díodo;
- Há díodos especificamente desenhados de forma a funcionar na região de *breakdown* – os díodos Zener.

## Características de díodos comuns

**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

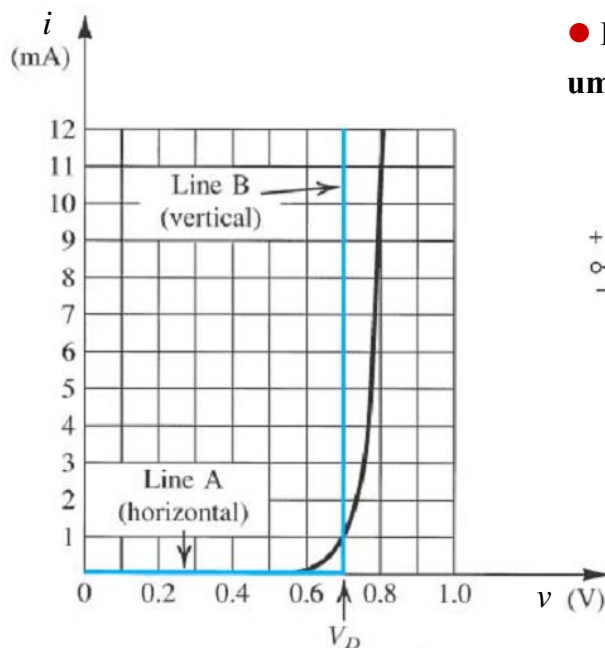
## Modelos simplificados do díodo

## 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:**
  - **Tensão constante;**
  - **Ideal.**

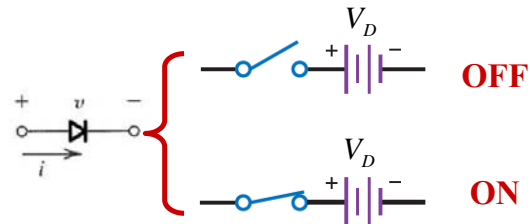
## Modelo de tensão constante

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



E. Martins, DEET Universidade de Aveiro

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

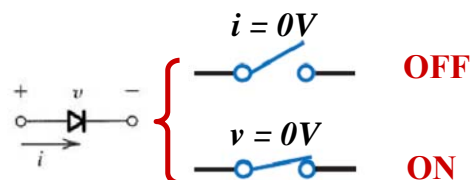
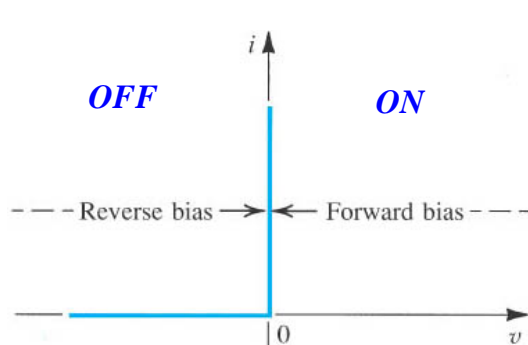


- É o modelo mais popular para análise rápida manual. É um dos que iremos usar mais.

7-23

## Modelo ideal

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

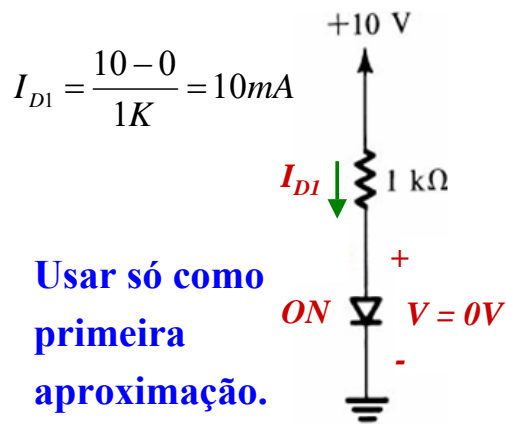


- Válido só em aplicações com tensões muito maiores que as tensões normais de condução do díodo;

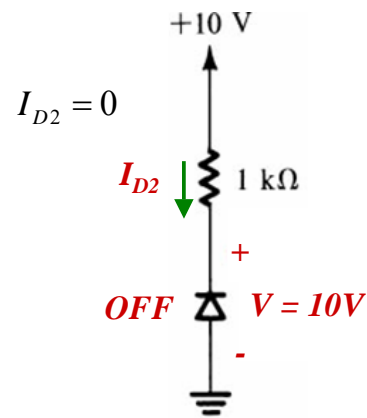
- Útil numa primeira análise de circuitos com vários díodos.

## Modelo ideal

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



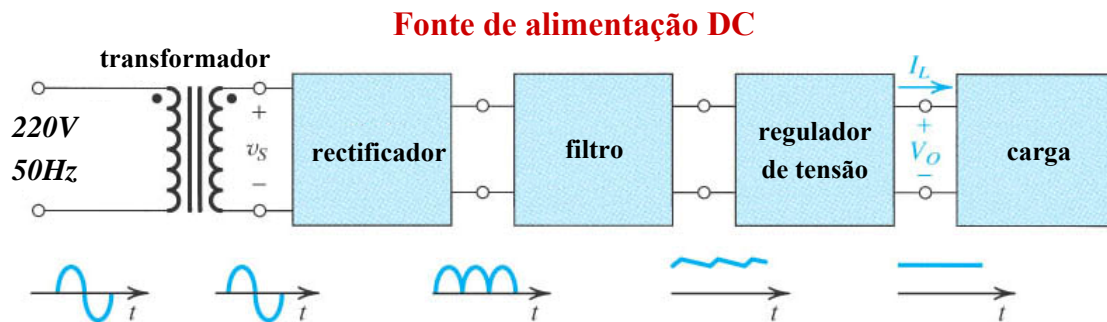
- Díodo *off*;
- Corrente no díodo é  $0A$ ;
- Tensão inversa do díodo é a tensão de alimentação.



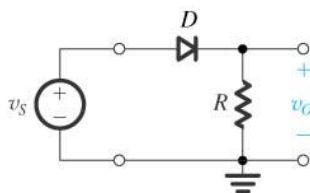
## Rectificadores

## Rectificadores

- É uma das aplicações práticas mais importantes dos díodos;

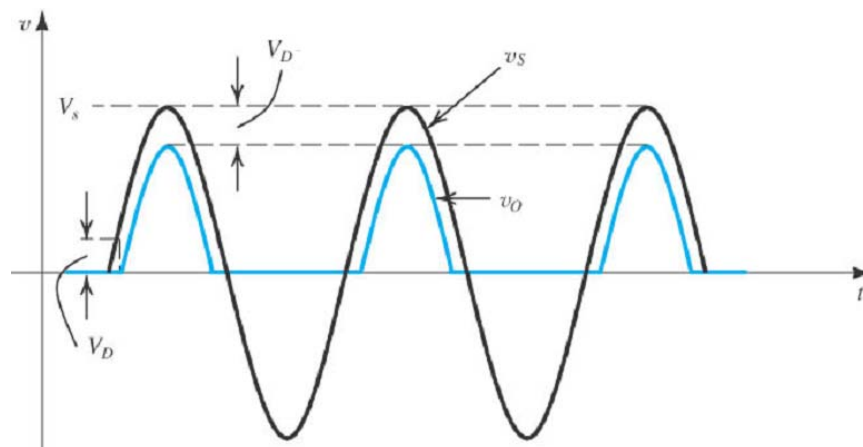


## Rectificador de meia onda

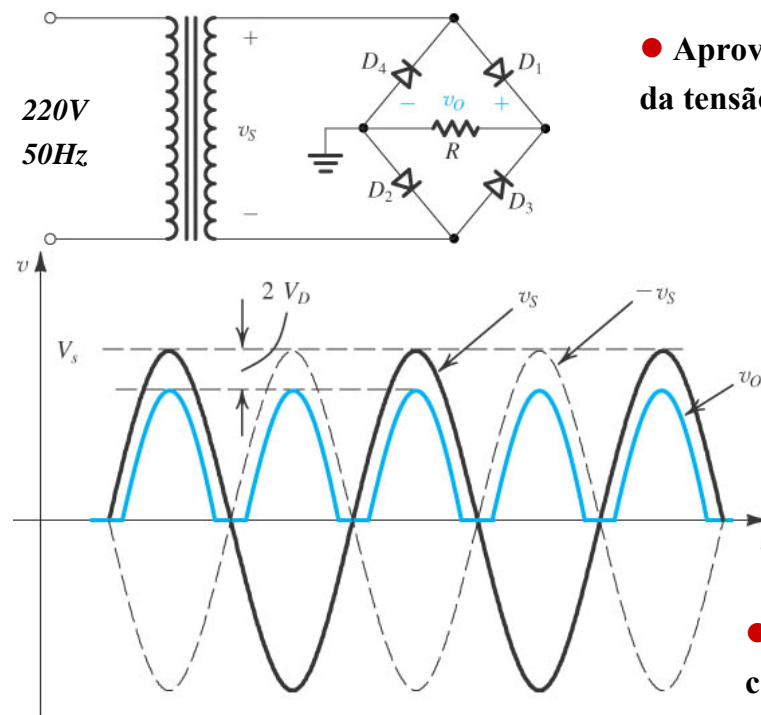


- A tensão  $v_O$  segue  $v_s$  (a menos de  $V_D$ ) nas arcadas positivas:

$$v_O \approx v_s - V_D$$



## Rectificador de onda completa – em ponte



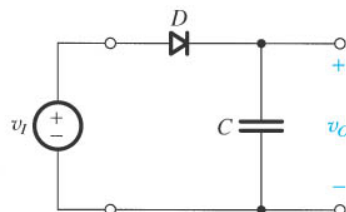
- Aproveita ambas as arcadas da tensão sinusoidal.

- Quando  $v_s$  é positivo apenas **D<sub>1</sub>** e **D<sub>2</sub>** conduzem;

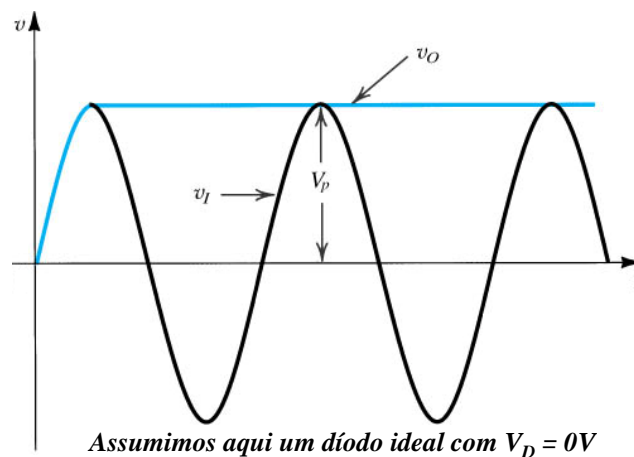
- Quando  $v_s$  é negativo apenas **D<sub>3</sub>** e **D<sub>4</sub>** conduzem;

- A tensão de saída é, neste caso, reduzida em  $2V_D$ ;

## Rectificador de meia onda com filtragem

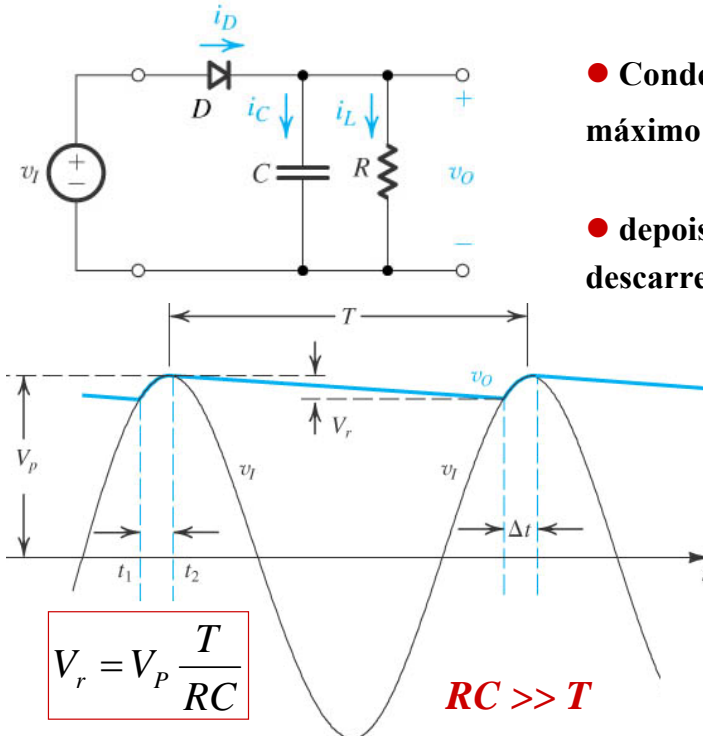


- Condensador carrega na primeira arcada positiva; depois não tem por onde descarregar.



- A tensão  $v_o$  é puramente DC, mas apenas **porque não temos carga na saída.**

## Rectificador de meia onda com filtragem



- Condensador carrega até ao valor máximo  $V_P$ ;

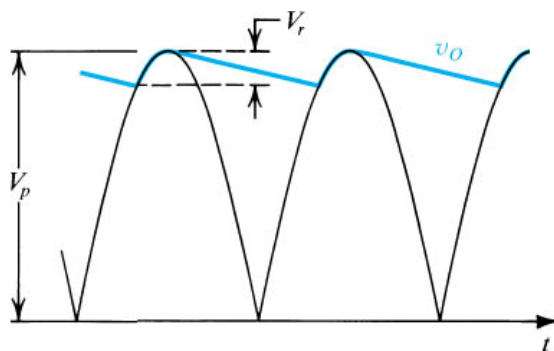
- depois **D** corta e o condensador descarrega sobre **R**;

- D** volta a conduzir quando  $v_I$  ultrapassa a tensão no condensador;

- Quando maior **C** menor será a ondulação residual – a **tensão de ripple**,  $V_r$ .

## Rectificador de onda completa com filtragem

- Neste caso a frequência de *ripple* é o dobro da frequência do sinal sinusoidal



- A expressão para  $V_r$  é

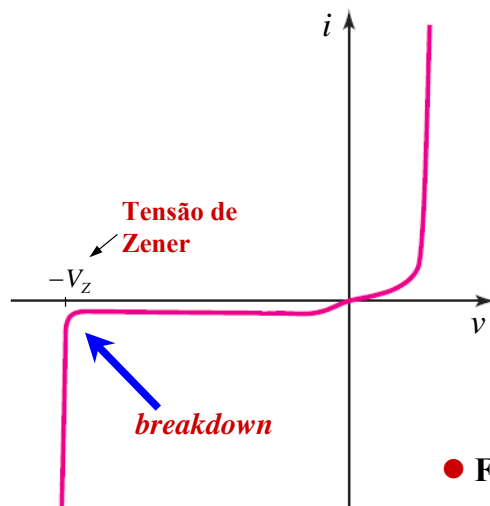
$$V_r = V_P \frac{T}{2RC}$$

- Para o mesmo valor de *ripple* o condensador pode ter metade do valor. A corrente no diodo é menor.

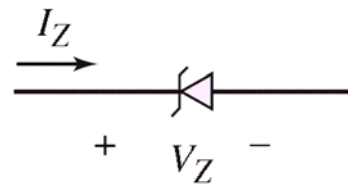


## Díodos Zener e aplicações

### Díodo Zener



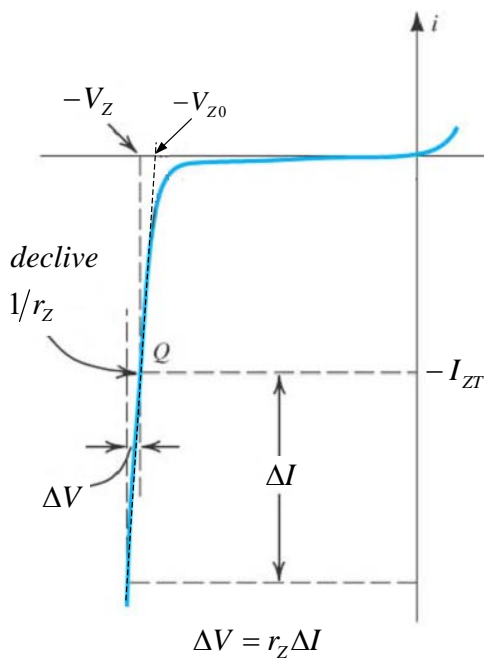
- Díodos especialmente concebidos para operar na região de **breakdown**.



- Valor de  $V_Z$  é determinado pelo **grau de dopagem** das regiões  $n$  e  $p$ ;
- Fabricados com valores padrão de  $V_Z$  entre 2V e centenas de Volt;

- O facto de  $V_Z$  variar muito pouco com a corrente, torna o zener útil para **regular tensões**, e.g. atenuar o **ripple** duma tensão (rectificada).

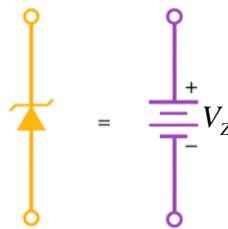
## Díodo Zener - modelos



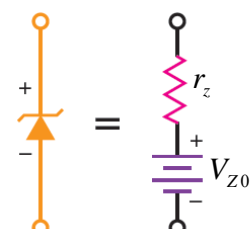
### Características importantes:

- $V_Z$ : Especificado para uma dada corrente de teste  $I_{ZT}$ ;
- $r_Z$ : Resistência dinâmica, igual ao inverso do declive na região de *breakdown*.

### Modelos do zener:



Tensão constante



Linear

## Características típicas de díodos zener - exemplo

### Série BZX79- Valores desde 2.1 a 75V



BZX79-XXX	$V_Z$ (V)	$r_Z$ ( $\Omega$ )	$I_{ZT}$ (mA)
3V3	3.3	85	5
5V1	5.1	40	5
6V8	6.8	6	5
12	12	10	5
24	24	25	5

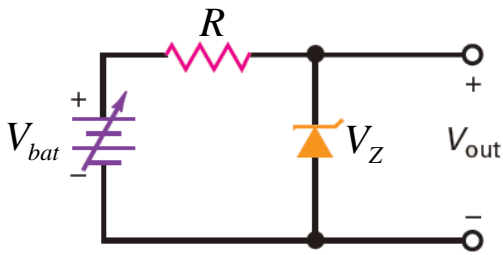
$$V_F = 0.9V @ 10mA;$$

$$P_{max} = 0.5W;$$

$$I_{Zmax} = P_{max} / V_Z$$

## Aplicação 1: Zener como regulador de tensão

- A partir duma bateria de automóvel, cuja tensão pode variar entre  $13.8V$  e  $10.5V$ , queremos gerar uma tensão constante de  $6.8V$ .



$$10.5V \leq V_{bat} \leq 13.8V$$

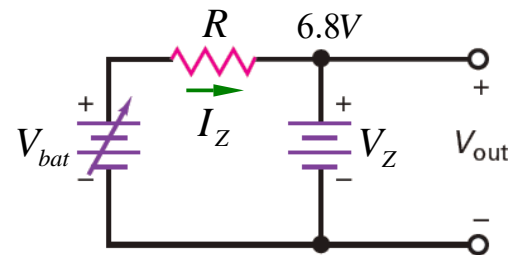
$$V_Z = 6.8V \Rightarrow \text{Zener BZX79-6V8}$$

A corrente  $I_Z$  deve ser o mais próxima possível de  $I_{ZT} = 5mA$ .

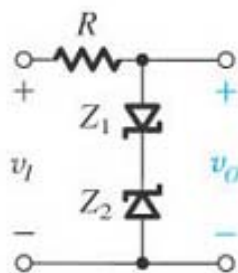
Tomando o valor médio de  $V_{bat}$  :

$$\overline{V_{bat}} = (10.5 + 13.8)/2 = 12.2V$$

$$R = \frac{\overline{V_{bat}} - V_Z}{I_{ZT}} = \frac{12.2 - 6.8}{5} \approx 1K$$



## Aplicação 2: Zener como limitador (clipper)



Se o valor de  $v_I$  for baixo, tal que

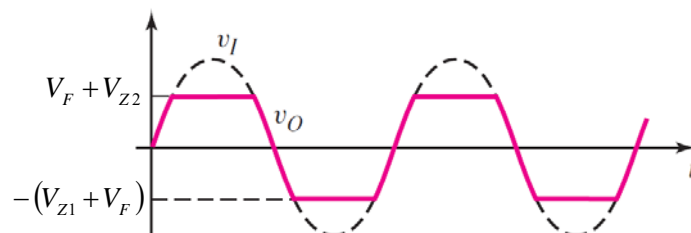
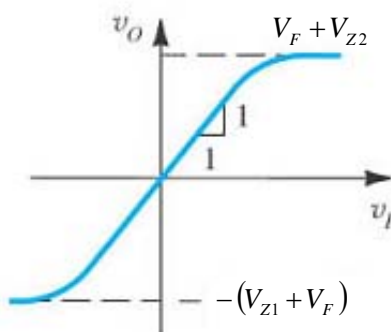
$$-(V_{Z1} + V_F) < v_I < (V_F + V_{Z2}) \Rightarrow v_O \text{ acompanha } v_I$$

Se  $v_I$  for elevado a ponto de  $Z_1$  e  $Z_2$  conduzirem...

$$\Rightarrow v_O \text{ fica limitado superiormente a } V_F + V_{Z2}$$

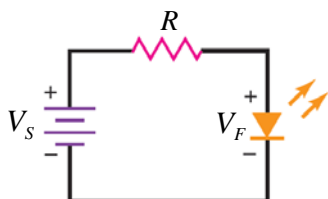
Se  $v_I$  baixar a ponto de  $Z_1$  e  $Z_2$  conduzirem...

$$\Rightarrow v_O \text{ fica limitado inferiormente a } -(V_{Z1} + V_F)$$

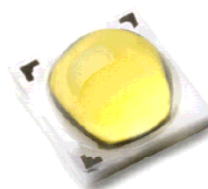


## Díodo LED e fotodíodo

### Díodo LED (*Light-Emitting Diodes*)



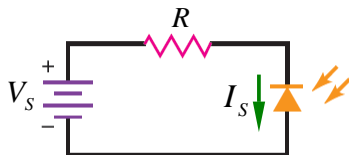
- A recombinação de electrões e lacunas nos semicondutores usados (e.g GaAs, GaP) resulta na emissão de fótons: *electroluminescência*;
- A cor da luz ( $\lambda$ ) depende dos dopantes usados e pode ser visível ou não (IR);
- Tensão directa,  $V_F$ , depende muito da cor do LED, variando de 1.7 (vermelho) a 3.3V (azul);
- Disponíveis em potências de *mW* até *Watts* (LEDs usados em iluminação).



## Fotodíodo



Fotodíodo do tipo **SFH213**



- Funcionam em polarização inversa;
- Fótons incidentes na região de depleção geram pares electrão-lacuna (*foto-ionização*), aumentando a corrente inversa,  $I_s$ , do díodo;
- Usados como detectores/medidores de intensidade luminosa.

