

Sinais e Sistemas Electrónicos



Capítulo 7: Díodos e Aplicações



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



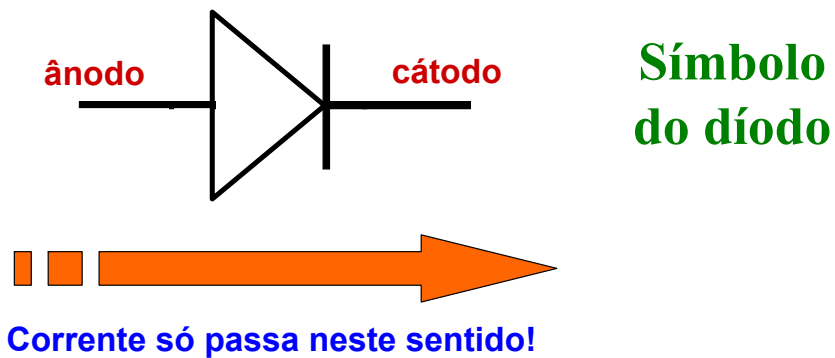
Sinais e Sistemas Electrónicos – 2022/2023

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

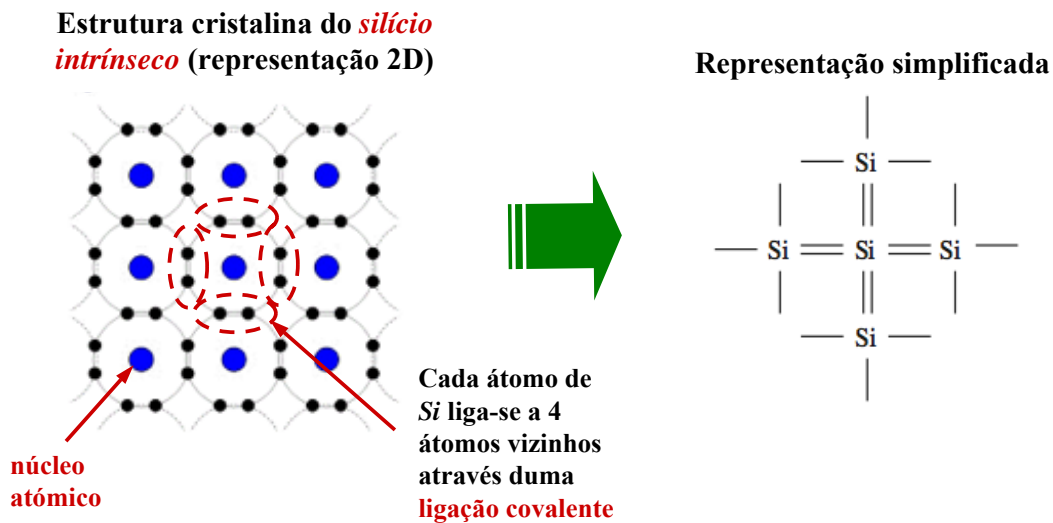
- O **díodo** é o componente electrónico (não linear) mais simples;
- Distingue-se por **conduzir apenas num sentido**: a aplicação mais comum é em circuitos de rectificação.



Fundamentos físicos do díodo

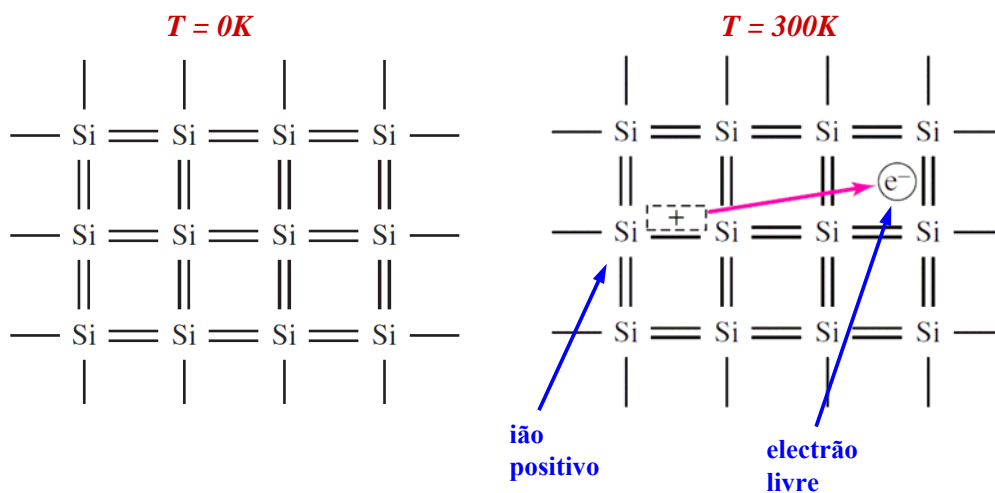
Semicondutores

- 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**:

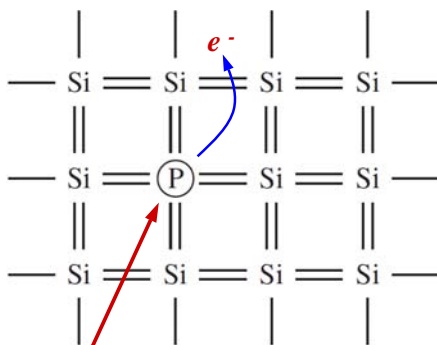
- Electrões (cargas negativas);
- Lacunas (cargas positivas).



Dopagem

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

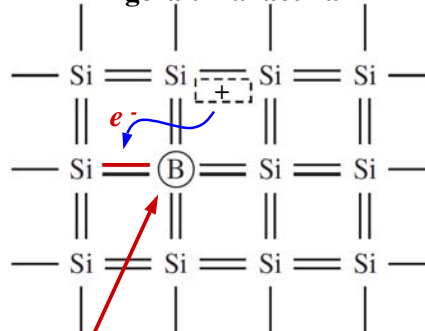
Dopagem com elemento com 5 electrões de valência (e.g fósforo - P)
gera um electrão livre



ião positivo

Silício tipo *n*

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

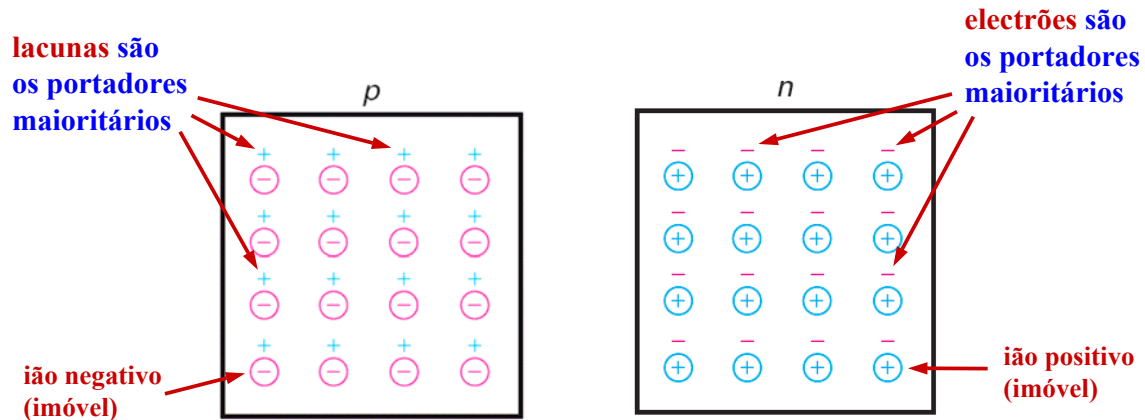


ião negativo

Silício tipo *p*

Semicondutores do tipos n e p

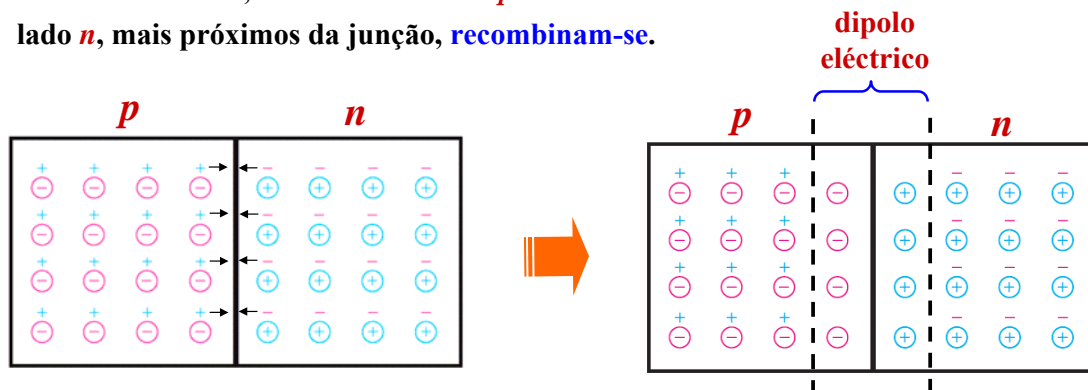
- Um semiconductor do tipo n ou p tem apenas melhor condutividade que um semiconductor intrínseco.



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

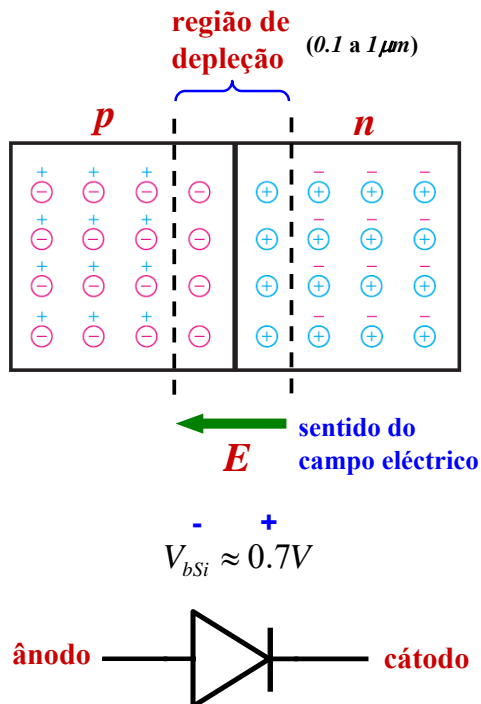
A junção pn

- ... 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

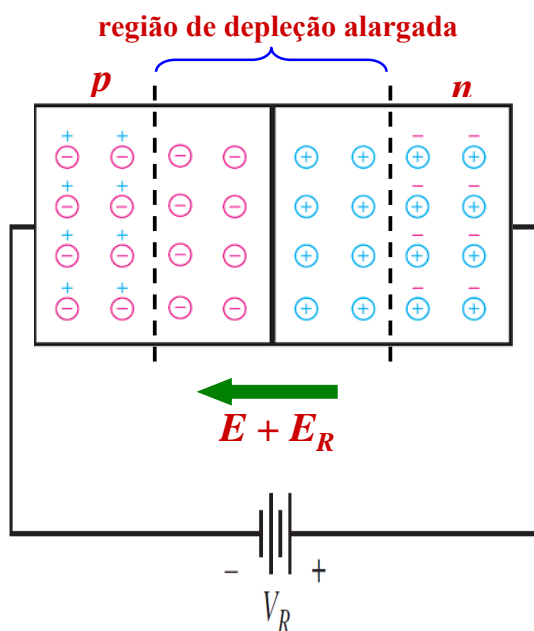


E. Martins, DETI Universidade de Aveiro

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

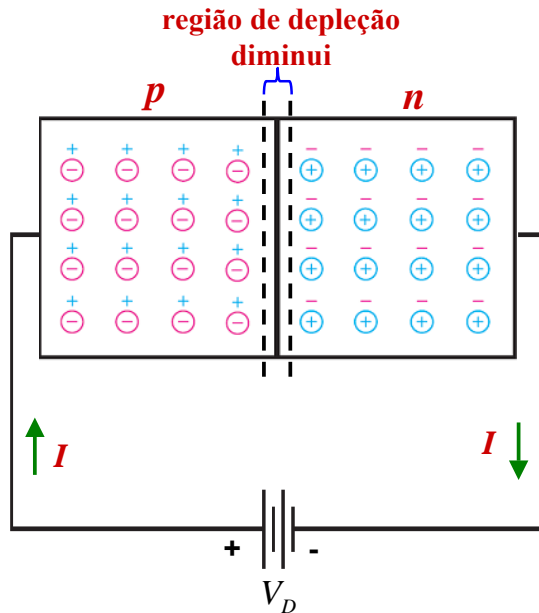


E. Martins, DETI Universidade de Aveiro

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!

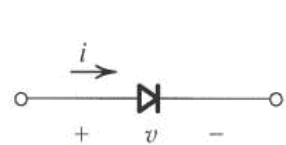
Característica corrente/tensão do díodo

Característica corrente-tensão

- Duas regiões principais de funcionamento:

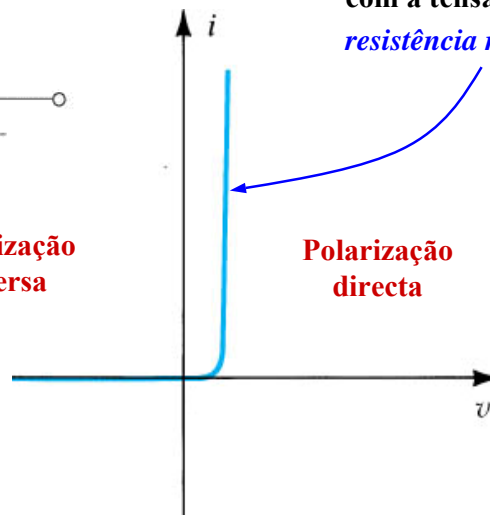
- Polarização **inversa**: $v < 0$;

- Polarização **directa**: $v > 0$.



Polarização
inversa

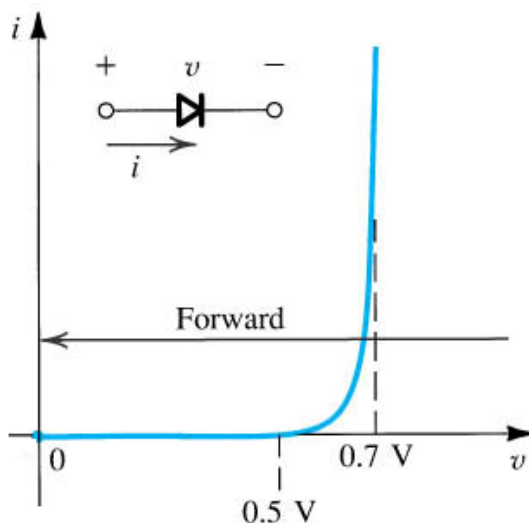
- Corrente i sobe rapidamente com a tensão $v \Rightarrow$ díodo tem *resistência muito baixa* ($< 1\Omega$).



Polarização
directa

Polarização directa

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



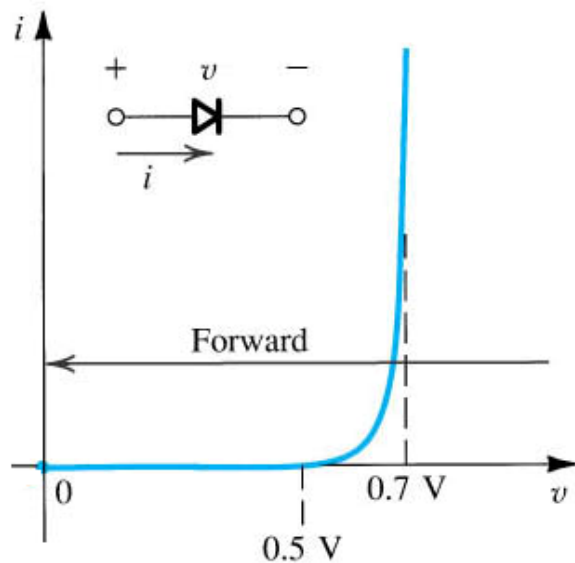
$$i = I_S \left(e^{v/nV_T} - 1 \right)$$

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

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

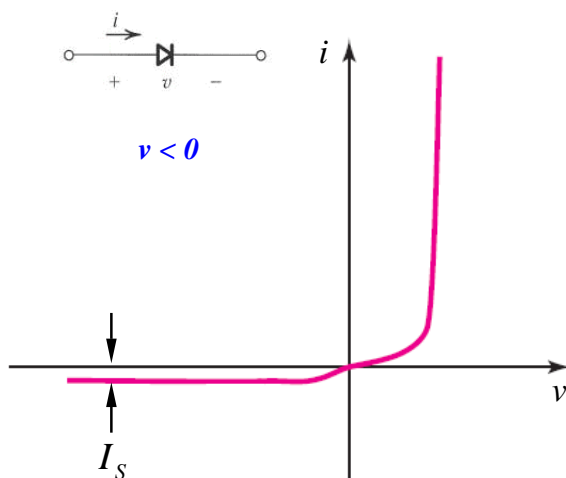
n – coeficiente de emissão: constante empírica de valor entre 1 e 2.

Polarização directa – observações importantes



- Devido à característica exponencial, abaixo de 0.5 V o díodo quase não conduz. Esta é a *tensão de cut-in*;
- Em condução normal, a tensão v varia em apenas 0.12 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 V ;
- Valores típicos para um díodo de sinal. Díodos de potência exibem valores mais elevados de tensão de condução.

Polarização inversa



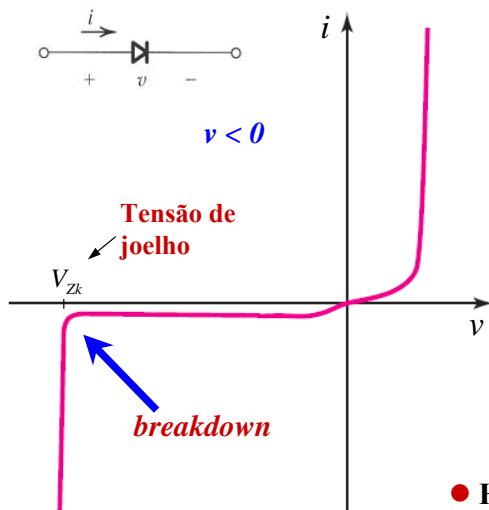
- Para valores negativos de v , bastante inferiores a nV_T , a corrente i é dada por

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

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

- Na prática, a corrente inversa é bastante maior (da ordem do $n\text{ A}$) por causa das correntes de fuga pela superfície do díodo.

Região de *breakdown*



- Campo eléctrico elevado causa um aumento súbito da corrente;
- Dois mecanismos de *breakdown*:
 - *Efeito Zener*: $V_{zk} < 5V$
 - *Avalanche*: $V_{zk} > 7V$
- 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

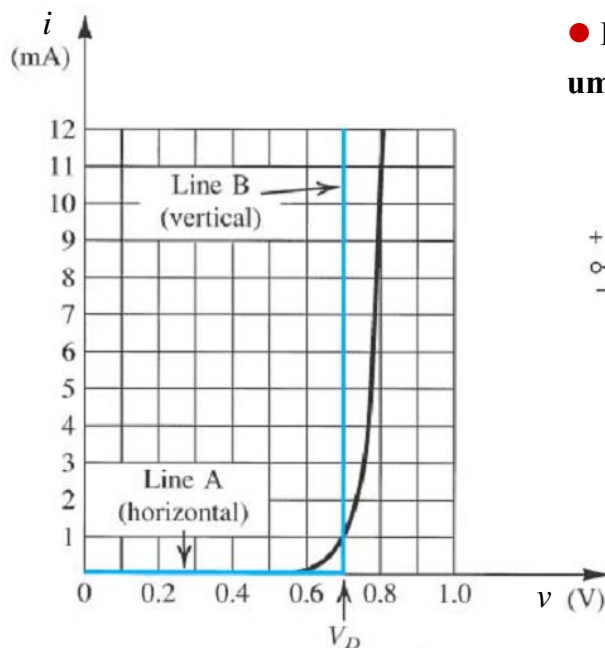
Modelos simplificados do díodo

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.**

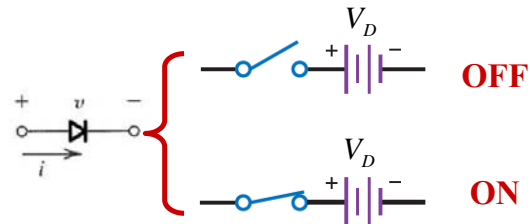
Modelo de tensão constante

- 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);

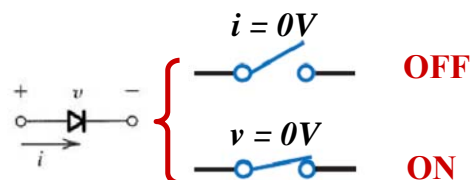
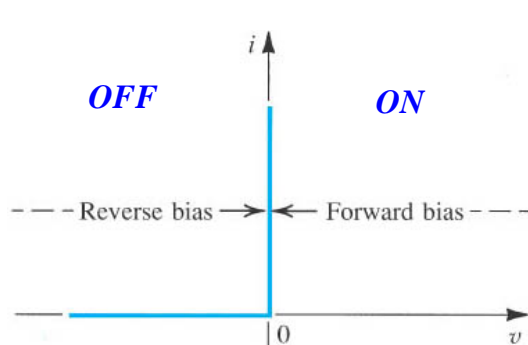


- É o modelo mais popular para análise rápida manual. É um dos que iremos usar mais.

7-23

Modelo ideal

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

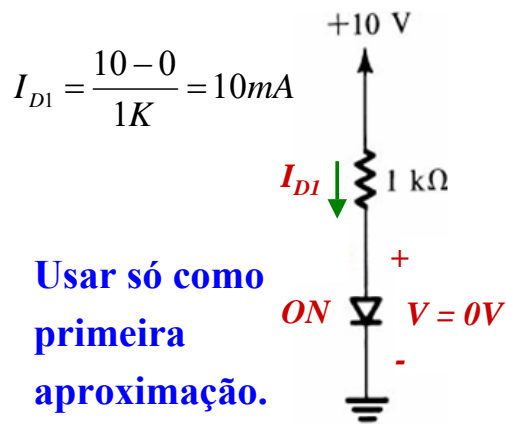


- Válido só em aplicações com tensões muito maiores que as tensões normais de condução do díodo;

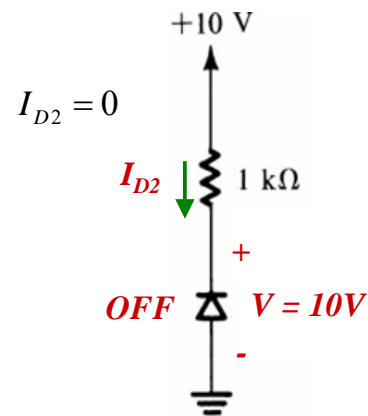
- Útil numa primeira análise de circuitos com vários díodos.

Modelo ideal

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



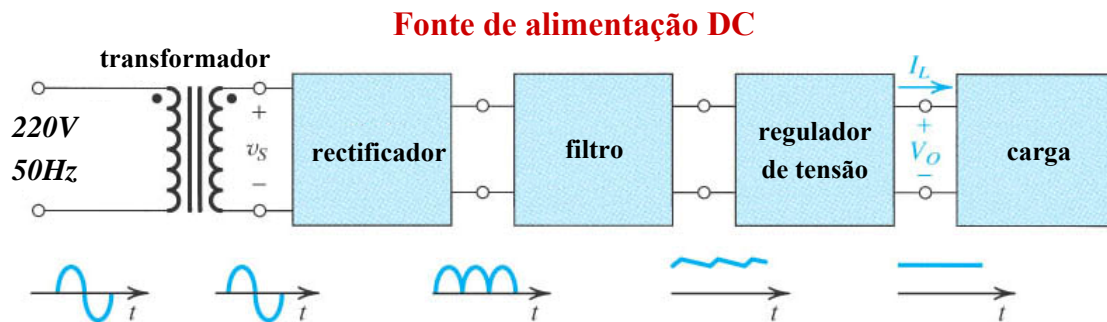
- Díodo *off*;
- Corrente no díodo é $0A$;
- Tensão inversa do díodo é a tensão de alimentação.



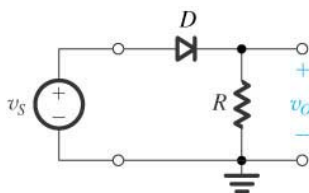
Rectificadores

Rectificadores

- É uma das aplicações práticas mais importantes dos díodos;

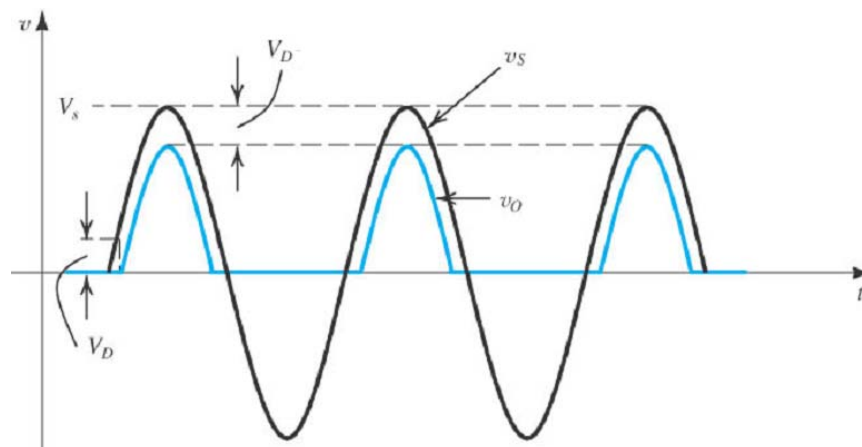


Rectificador de meia onda

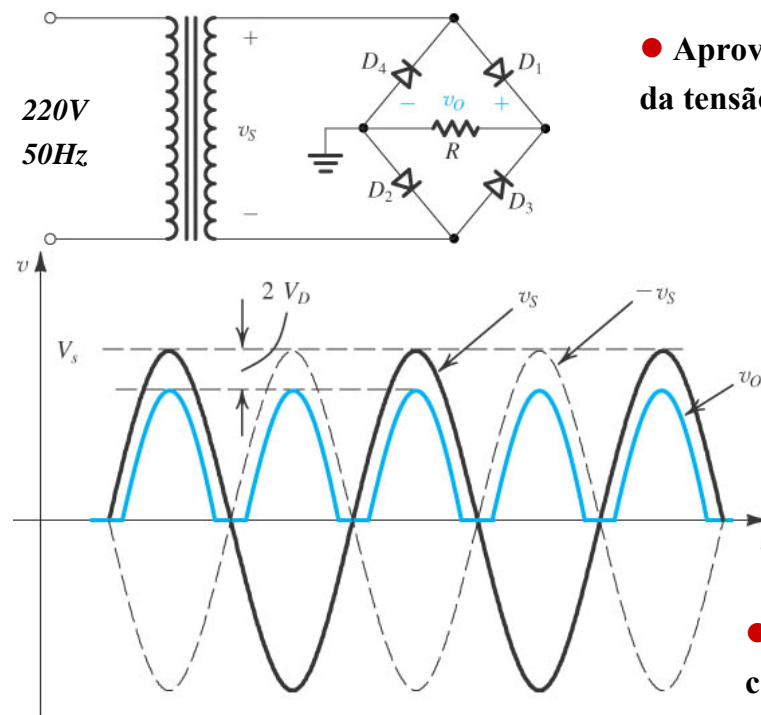


- A tensão v_O segue v_s (a menos de V_D) nas arcadas positivas:

$$v_O \approx v_s - V_D$$



Rectificador de onda completa – em ponte



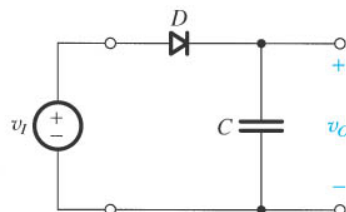
- Aproveita ambas as arcadas da tensão sinusoidal.

- Quando v_S é positivo apenas **D₁** e **D₂** conduzem;

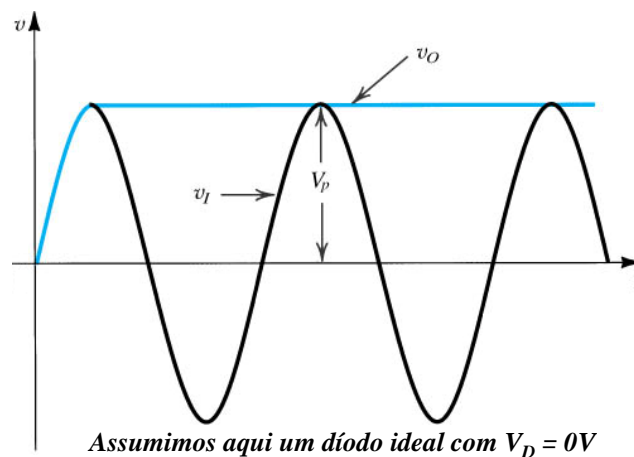
- Quando v_S é negativo apenas **D₃** e **D₄** conduzem;

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

Rectificador de meia onda com filtragem

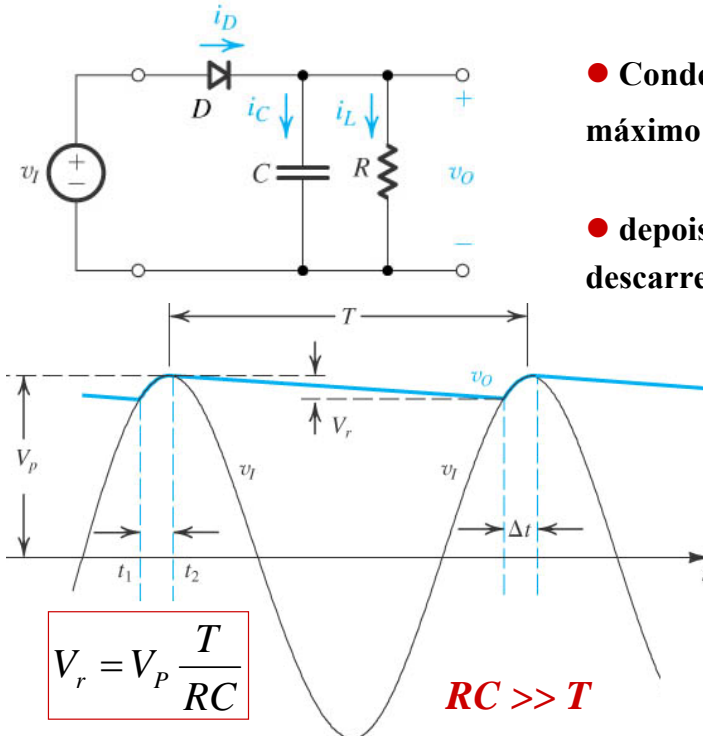


- Condensador carrega na primeira arcada positiva; depois não tem por onde descarregar.



- 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 ;

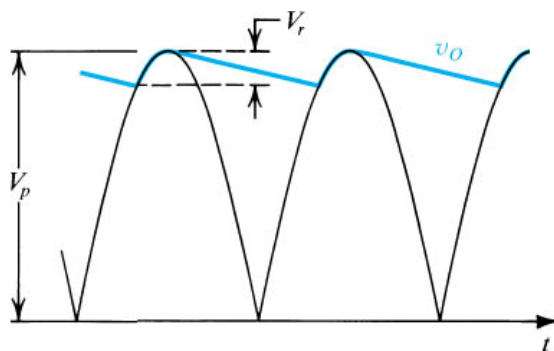
- depois **D** corta e o condensador descarrega sobre **R**;

- 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



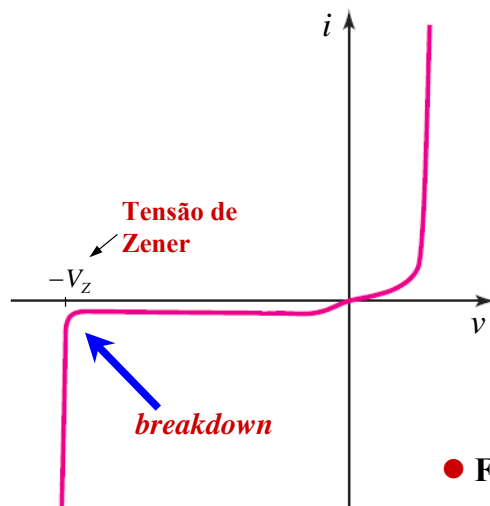
- A expressão para V_r é

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

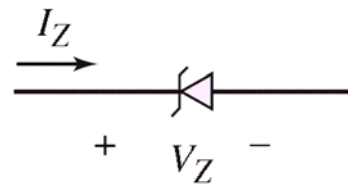
- Para o mesmo valor de *ripple* o condensador pode ter metade do valor. A corrente no diodo é menor.

Díodos Zener e aplicações

Díodo Zener



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

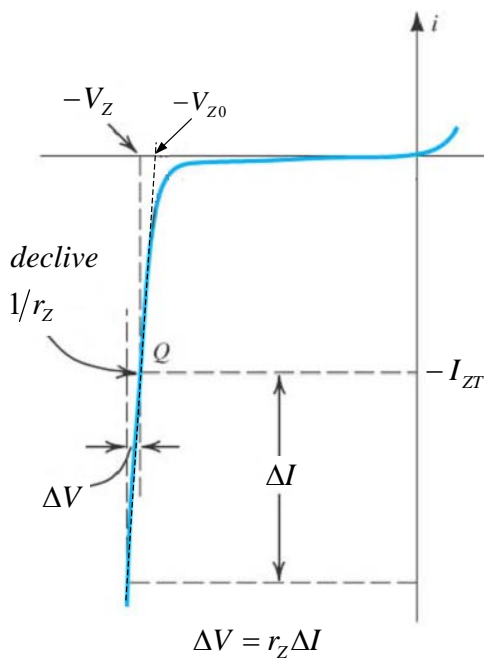


- Valor de V_Z é determinado pelo **grau de dopagem** das regiões n e p ;

- 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).

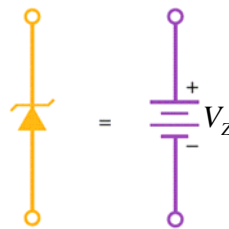
Díodo Zener - modelos



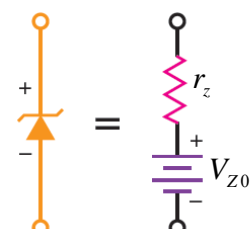
● Características importantes:

- 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 (Ω)	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

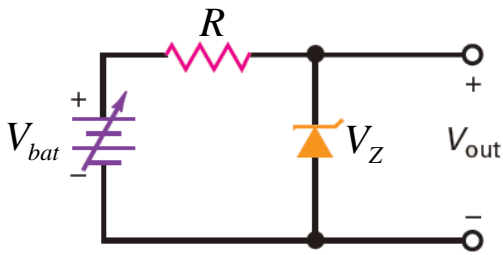
$$V_F = 0.9V @ 10mA;$$

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

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

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 $I_{ZT} = 5mA$.

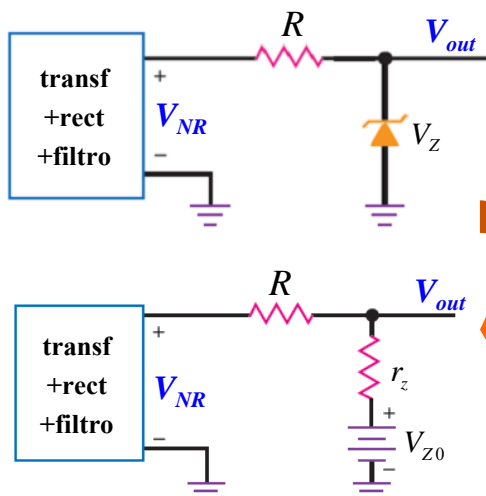
Tomando o valor médio de V_{bat} :

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

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

Aplicação 2: Zener como redutor de ripple

- A partir duma tensão não regulada (V_{NR}) de $18V$, com $1V$ de ripple, pretendemos gerar uma tensão regulada de $V_{out} = 10V$.



$$V_{NR}: V_P = 18V; V_r = 1V$$

$$V_Z = 10V \Rightarrow \text{Zener BZX79-10}$$

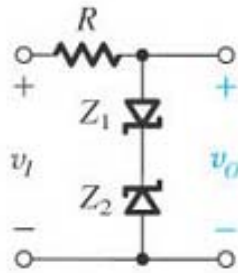
Valor de R, supondo $I_{ZT} = 5mA$:

$$R = \frac{17.5 - 10}{5} = 1.5K\Omega$$

O ripple em V_{out} calcula-se usando o valor tabelado $r_z = 10\Omega$:

$$V_{r_out} = V_r \frac{r_z}{r_z + R} = 6.6mV$$

Aplicação 3: Zener como limitador (*clipper*)



Se o valor de v_I for baixo, tal que

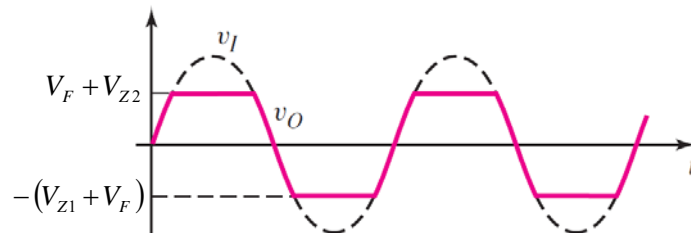
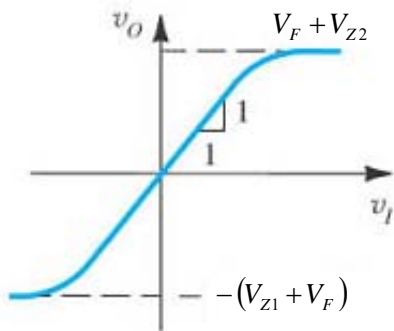
$$-(V_{Z1} + V_F) < v_I < (V_F + V_{Z2}) \Rightarrow v_O \text{ acompanha } v_I$$

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

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

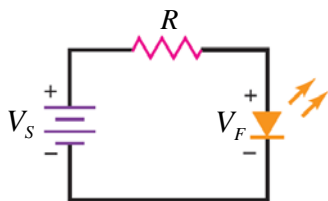
Se v_I baixar a ponto de Z_1 e Z_2 conduzirem...

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



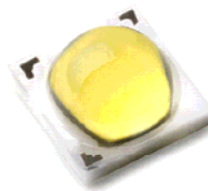
Díodo LED e fotodíodo

Díodo LED (*Light-Emitting Diodes*)



E. Martins, DETI Universidade de Aveiro

- A recombinação de electrões e lacunas nos semicondutores usados (e.g GaAs, GaP) resulta na emissão de fotões: *electroluminescência*;
- A cor da luz (λ) 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).

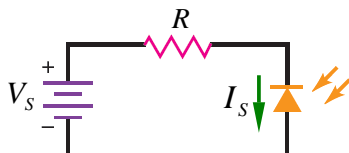


7-41

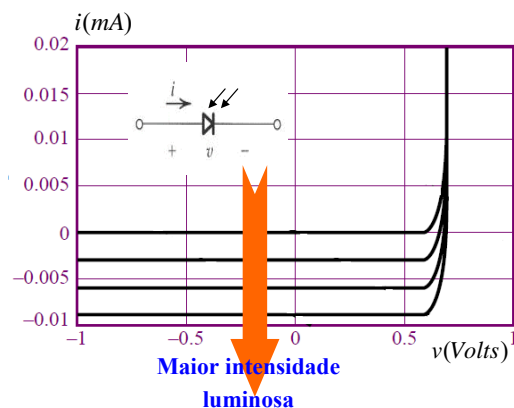
Fotodíodo



Fotodíodo do tipo **SFH213**



- Funcionam em polarização inversa;
- Fotões 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.



E. Martins, DETI Universidade de Aveiro

7-42