

# Aula # 3 – Junção PN e Díodos de junção

Bartolomeu J. Ubisse  
&  
Hélder Marrenjo

Universidade Eduardo Mondlane  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Física

2017

# Conteúdos

- 1 Conteúdos
- 2 Objectivos e Métodos
- 3 Junção PN
- 4 Circuitos Retificadores
- 5 Tarefas individuais
- 6 Bibliografia

# Objectivos e Métodos

## Objectivos

No final desta sessão, os estudantes devem:

- 1 Explicar o processo de surgimento de barreira de potencial numa junção PN;
- 2 Explicar os mecanismos de polarização de um diodo s/condutor;
- 3 Resolver exercícios que integram diodos s/condutores;
- 4 Explicar os mecanismos de retificação de corrente (ac-dc), filtragem e circuito regulador. Dimensionar uma fonte de alimentação dc.

## Métodos

- Elaboração conjunta.

# Junção PN

A junção PN é o elemento básico de funcionamento de vários dispositivos eletrónicos como é o caso de **díodo de junção**, **optoelectónicos** (eg. LED e fotodetetores), FETs e TBJs.

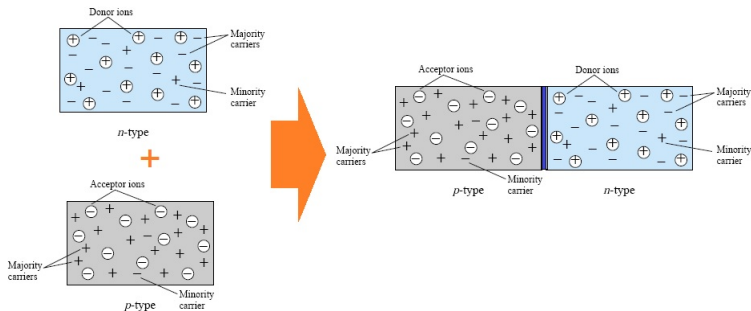


Figura 1: Junção PN

# Junção PN

O que ocorre após a união destes dois materiais (P e N)?

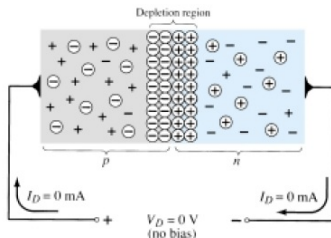


Figura 2: Barreira de potencial

- **Difusão** - As lacunas no material do **tipo P** vão se difundindo através da interface para o material do tipo N e, os electrões do material do **tipo n** também vão se difundindo para o **lado P**.

$$\vec{J}_{dif} = -qD_p \nabla p + qD_n \nabla n \quad (1)$$

- **Deriva** - Electrões e lacunas livres vão se movimentando ordenadamente pela acção de campo eléctrico que, neste caso, é criado pelas cargas espaciais na vizinhança da interface.

$$\vec{J}_{der} = qp\mu_p \vec{E} + qn\mu_n \vec{E} \quad (2)$$

# Junção PN - *Barreira de potencial*

Até quando tem lugar a passagem de portadores de carga pela interface da junção ?

- A difusão dos portadores tem lugar até ao momento em que a **corrente de deriva se iguala a corrente de difusão** ( $\vec{J}_{dif} = \vec{J}_{der}$ ). Neste momento, cria-se uma **barreira de potencial** junto da interface e, esta, impede a passagem de mais portadores.



Assim, considerando-se o movimento de electrões e admitindo-se que este seja ao longo do x, sucede:

$$n\mu_n\vec{E} = -D_n\frac{dn}{dx}\vec{i} \quad (3)$$

## Junção PN - *Barreira de potencial*

Considerando que,

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi \quad (4)$$

e recorrendo-se às relações de Einstein,

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (5)$$

Substituindo-se eqs. 4 e 5 na eq. 3 resulta:

$$V_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad (6)$$

Repare que a barreira de potencial é função das densidades de portadores de carga em equilíbrio. Assim, exactamente nas faces da junção,

$$n_n \approx N_D \wedge n_p \approx n_i^2 / N_A \quad (7)$$

Substituindo-se relações.7 na eq.6 sucede:

$$V_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} \quad (8)$$

## Junção PN - *Barreira de potencial*

Embora a dependência entre a barreira de potencial e a temperatura seja directa, deve-se notar que sempre que se aumentar a temperatura mais portadores de carga atravessarão a junção e, quando se atingir novo equilíbrio, esta será relativamente menor. ↗ **Sabe porquê?**





## Junção PN - Relação i-v

A relação i-v duma junção PN é dada pela seguinte equação de Shockley<sup>1</sup>

$$I_D = I_S(e^{V_D/\eta V_T} - 1) \quad (9)$$

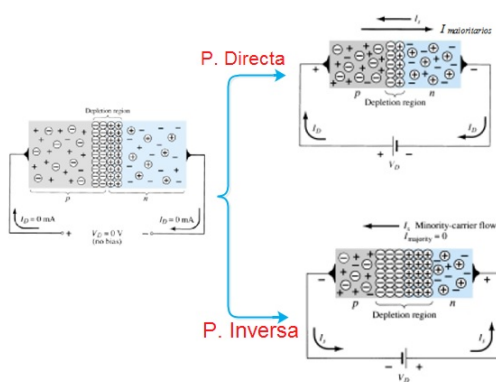
Onde,  $I_D$  é corrente directa;  $I_S$  é corrente de saturação;  $V_D$  é a tensão de alimentação do diodo;  $V_T$  é a tensão térmica e  $\eta$  é o factor de escala que varia de 1 a 2.

*Nas nossas considerações usaremos  $\eta = 1$*

---

<sup>1</sup>A dedução desta equação será feita na cadeira de Semicondutores e Dispositivos Semicondutores

# Junção PN - Polarização



- O que está detras da variação da barreira de potencial?
- Recorda-se do estado das impurezas nestes materiais?

Figura 3: Polarização directa e inversa da junção PN

# Curva i-v da junção PN

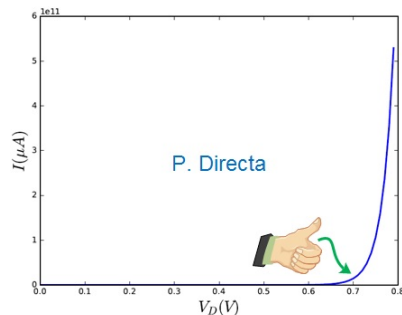
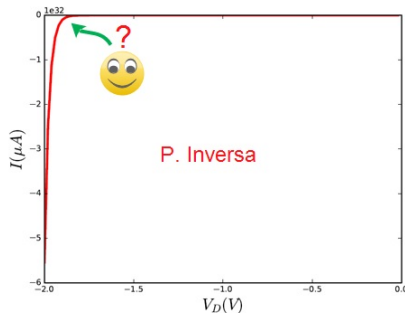


Figura 4: Curva I-V da Junção PN

# Curva i-v da junção PN

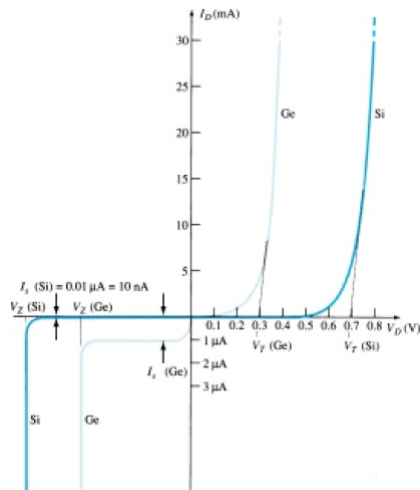


Figura 5: Curva I-V da Junção PN

# Modo de operação do díodo semiconductor

## Modelos simplificados de díodos

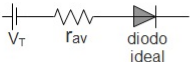
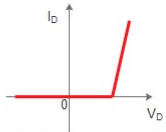

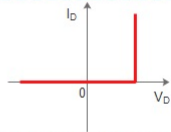

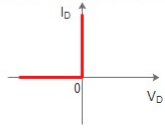
O facto de o díodo apresentar uma característica **i-v não linear** tras dificuldades na análise de circuitos em que ele é parte integrante. Assim, como alternativa, três modelos de simplificação são usados, a saber:

- 1 Modelo de bateria com resistência;
- 2 Modelo da queda de tensão constante e
- 3 Modelo do díodo ideal.

*Nas nossas considerações usaremos o modelo da queda de tensão constante , porém, na prática todos os modelos podem ser usados dependendo das exigências impostas.*

# Modo de operação do díodo semiconductor

Tabela: Modelos simplificados do díodo

Modelo de bateria com resistencia			
Modelo de queda de tensao constante	$R \gg r_{av}$		
Modelo de díodo ideal	$R \gg r_{av}$ $V \gg V_T$		

# Símbolo dos díodos

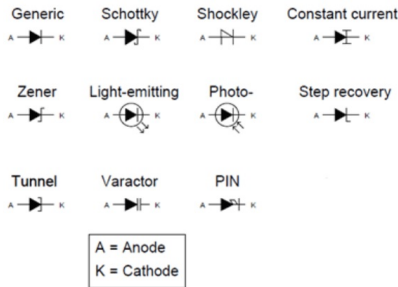


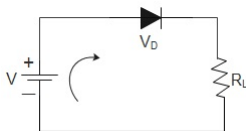
Figura 6: Símbolo



Figura 7: Visualização

# Recta de carga

O ponto de funcionamento de um díodo determina-se pela intersecção da recta de carga e a curva característica.



$$I = \frac{V}{R_L} \big|_{V_D=0V} \quad (12)$$

Kirchoff:

$$V = V_D + I \times R_L \quad (10)$$

$$V_D = V \big|_{I_D=0A} \quad (11)$$

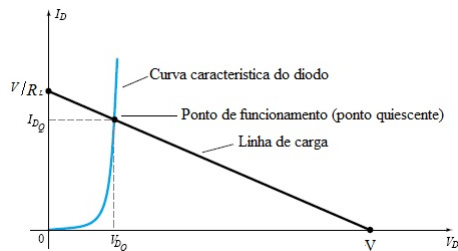
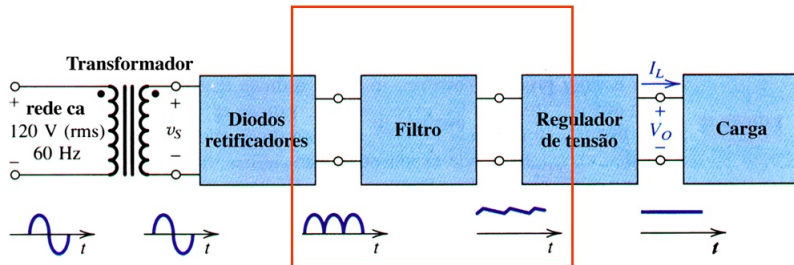


Figura 8: Linha de carga



# Questões?

# Circuitos Retificadores



O retificador pode ser:

- Meia onda e
- Onda completa

# Circuitos Retificadores - Meia Onda

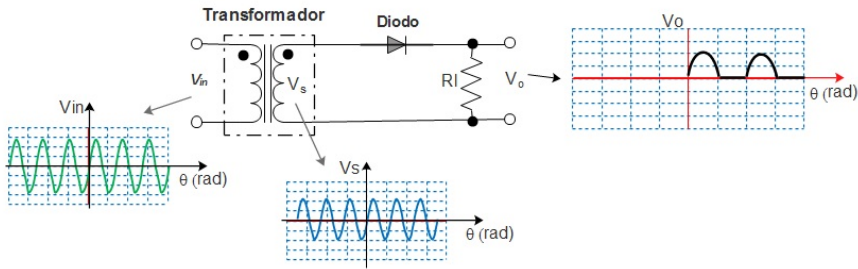


Figura 9: Retificador meia onda

$$V_s = V_p \sin \omega t \quad (13)$$

$$V_{av} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (V_p - 0.7) \sin \omega t dt = \frac{V_p - 0.7}{\pi} \quad (14)$$

# Circuitos Retificadores - Meia Onda

Nota que a tensão média ( $V_{av}$ ) é também considerada como contínua ( $V_{dc}$ ). A corrente é:

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{V_p - 0.7}{R_L} \sin \omega t dt = \frac{I_p}{\pi} \quad (15)$$

As potências são dadas por:

$$P_{dc} = I_{dc}^2 \times R_L = \left( \frac{I_p}{\pi} \right)^2 \times R_L \quad (16)$$

$$P_{ac} = I_{ef}^2 \times R_L = \frac{I_p^2 \times R_L}{4} \quad (17)$$

$$(18)$$

Repare que a corrente eficaz<sup>2</sup> ( $I_{ef}$ ) para a meia onda é  $I_{ef} = \frac{I_p}{2}$   
<sup>2</sup>Demonstre esta relação.

# Circuitos Retificadores - Meia Onda

Rendimento:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \approx 40.5\% \quad (19)$$

Sabe o que significa esta percentagem? Considera ela boa?

Frequência

$$f_{in} = f_o \quad (20)$$

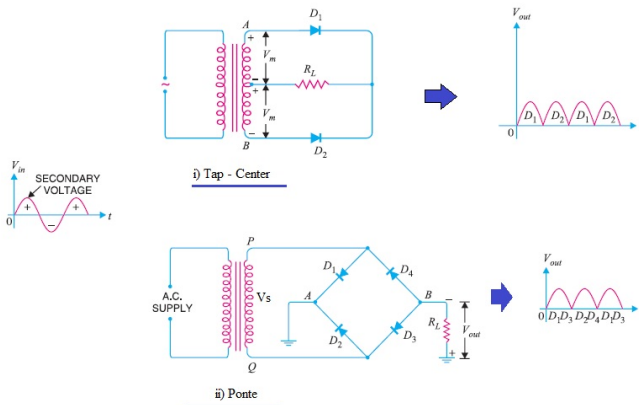
Pois,

$$T_{in} = T_o \quad (21)$$

# Circuitos Retificadores - Onda Completa

A retificação onda completa faz-se por duas maneiras:

- 1 Tap Center e
- 2 Ponte



# Circuitos Retificadores - Onda Completa

Quanto aos parâmetros de saídas procede-se da mesma forma que o retificador meia-onda alterando-se somente o extremo superior da integral por  $T$ . Assim,

$$I_{dc} = \frac{2I_P}{\pi} \quad (22)$$

$$V_{dc} = \frac{2V_P}{\pi} \quad (23)$$

$$I_{ef} = \frac{I_P}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

$$V_{ef} = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

## Rendimento

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \approx 81\% \quad (26)$$

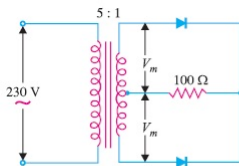
Sugere alguma coisa?

## Frequência

$$T_o = 0.5 T_{in} \quad (27)$$

$$f_o = 2f_{in} \quad (28)$$

# Circuitos Retificadores - Onda Completa



i) Tap Center

Tap-Center

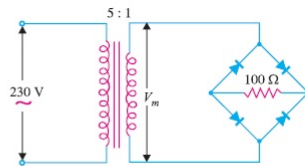
$$V_{ef} = 230 \times 1/5 = 46V \quad (29)$$

$$V_p^* = \sqrt{2} \times V_{ef} = 65V \quad (30)$$

$$V_P = 0.5 \times V_p^* = 32.5V \quad (31)$$

$$I_{dc} = \frac{2V_P}{\pi R_L} = 0.2069A \quad (32)$$

$$V_{dc} = \frac{2V_P}{\pi} = 20.7V \quad (33)$$



ii) Ponte

Ponte

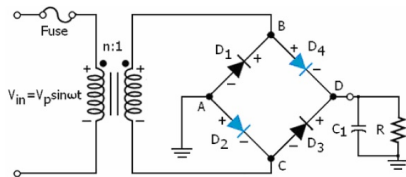
$$V_p = 65V \quad (34)$$

$$V_{dc} = \frac{2V_p}{\pi} = 41.4V \quad (35)$$

O que concluir?



# Filtro capacitivo



$$C = \frac{dq}{dv} \Rightarrow i_C = C \frac{dv}{dt} \quad (36)$$

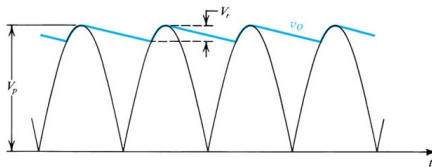
$$V_C(t) = V_P e^{-t/RC} \quad (37)$$

$$V_C = V_L \quad (38)$$

t-tempo de descarga do capacitor.

A tensão ripple é:

$$V_r = V_P - V_L = V_P (1 - e^{-t/RC}) \quad (39)$$



# Filtro capacitivo

Para que o sinal se aproxime ao contínuo na saída da capacitor é necessário que o tempo de descarga deste capacitor seja muitas vezes menor que a constante  $RC$ , ié,

$$t \ll RC \quad (40)$$

Cumprindo-se a eq.40, então pode se fazer a expansão em série de Taylor:

$$e^{-t/RC} \simeq 1 - \frac{t}{RC} \quad (41)$$

Então:

$$V_r = V_P \left( \frac{t}{RC} \right) \quad (42)$$

Admitindo-se agora que  $t$ -seja considerado como o período ( $T$ ), então:

$$V_r = V_P \frac{T}{RC} = \frac{V_P}{2RCf} \quad (43)$$

# Filtro capacitivo

As correntes no díodo são

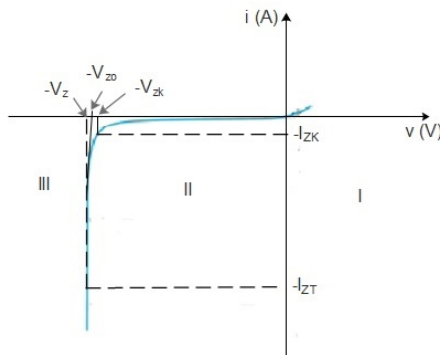
$$i_{D_{medio}} = i_L \left( 1 + \pi \sqrt{V_P / 2V_r} \right) \quad (44)$$

$$i_{D_{pico}} = i_L \left( 1 + 2\pi \sqrt{V_P / 2V_r} \right) \quad (45)$$

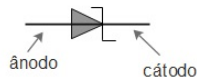
$$V_{D_{dc}} = V_P \left( 1 - \frac{1}{2fR_L C} \right) \quad (46)$$

# Regulador Zener

O díodo Zener é destinado a funcionar na polarização inversa. Nesta condição, ele mantém **constante a tensão mesmo com a variação da corrente**, conforme se ilustra na figura 10.



*Simbolo*



*Zonas*

- I - Polarização directa
- II - Polarização Inversa
- III - Zona de ruptura

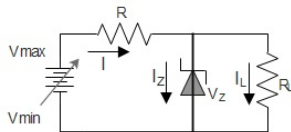
Figura 10:

# Regulador Zener

## Condições de utilização do regulador zener

- O díodo zener é polarizado inversamente;
- A tensão de alimentação ( $V_S$ ) deve ser superior que a tensão de ruptura do díodo ( $V_Z$ );
- O díodo zener é ligado a uma resistência ( $R$ ) em série convista a se limitar a corrente e permitir que esta não seja superior a  $I_{ZM}$ , pois, caso contrário o díodo pode se danificar;

# Regulador Zener



- Removendo-se o díodo para saber se pode funcionar ou não.

$$V_L = \frac{R_L}{R_L + R} V_{min} \quad (47)$$

- Comparar o valor de  $V_L$  com o  $V_Z$  fornecido pelo fabricante.

- Tendo-se Verificado o funcionamento do díodo, então para a tensão mínima considera-se  $V_L = V_Z$ .

$$V_{min} = \frac{R_L + R}{R_L} V_L \quad (48)$$

$$V_{max} = I_{max} R + V_Z \quad (49)$$

$$I_{max} = I_{ZM} + I_L \quad (50)$$

$$I_L = V_Z / R_L \quad (51)$$

# Tarefas individuais

Resolva as questões referentes a aula # 3 e entrega dois (2) dias antes da aula seguinte (**faz parte das avaliações !**).

# Bibliografia

- ❶ Malvino, A. (1999). Princípios de Electrónica. Sexta Edição. Mc Graw Hill. Pp. 109 – 215
- ❷ Robert Boylestad & Louis Nashelsky. *Electronic Devices and Circuit Theory*. Seventh Edition.
- ❸ Sedra A. S & Smith K.C (2000) Microelectrônica. 4<sup>a</sup> Edição. São Paulo, Brasil.