



## 2. Semicondutores. Díodos

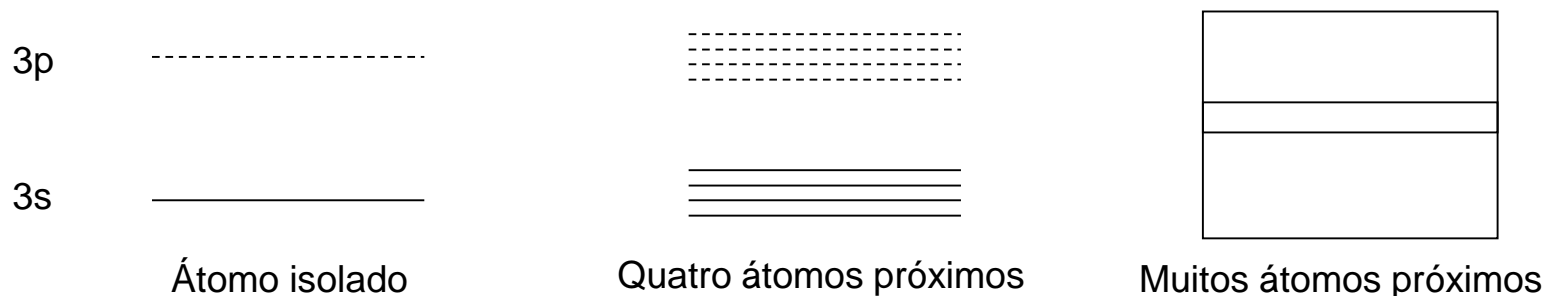




## 2.1 – Bandas de energia nos sólidos

Elementos com configurações electrónicas semelhantes, têm propriedades físicas diferentes. Caso do carbono (isolante), silício e germânio (semicondutores) e estanho (metal). Este comportamento pode ser explicada pela teoria das bandas de energia nos sólidos.

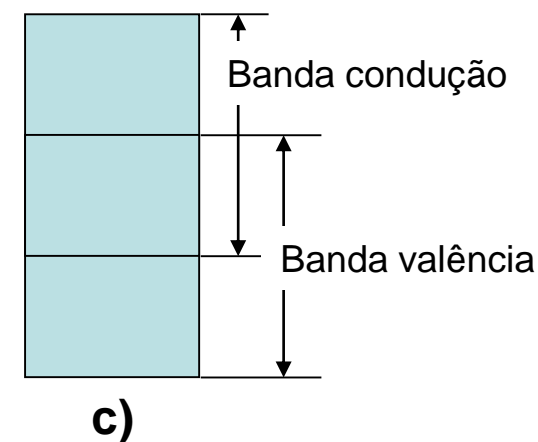
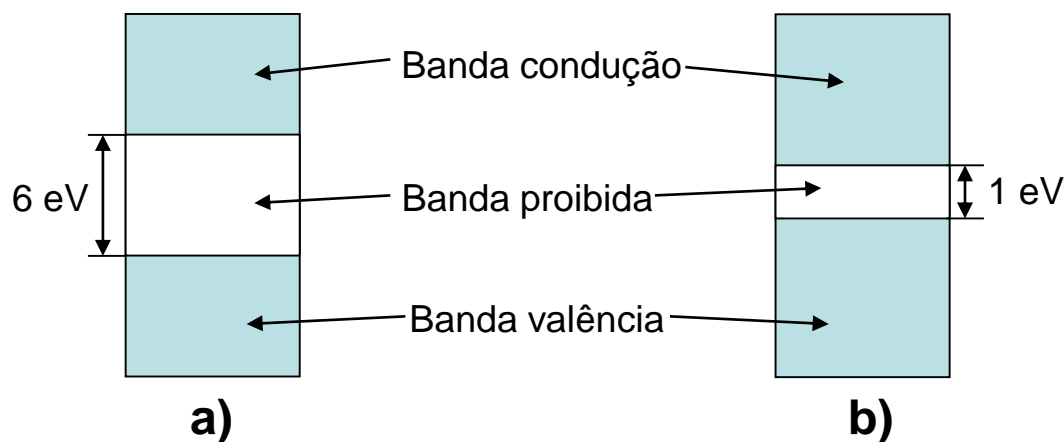
Num cristal os estados permitidos para os electrões consistem num número elevado de níveis de energia discretos bastante próximos entre si, que se designa por banda de energia.



Nalgumas substâncias existe um hiato de energia (banda proibida) entre a última banda ocupada por electrões (Banda de valência) e a banda seguinte (Banda de Condução).

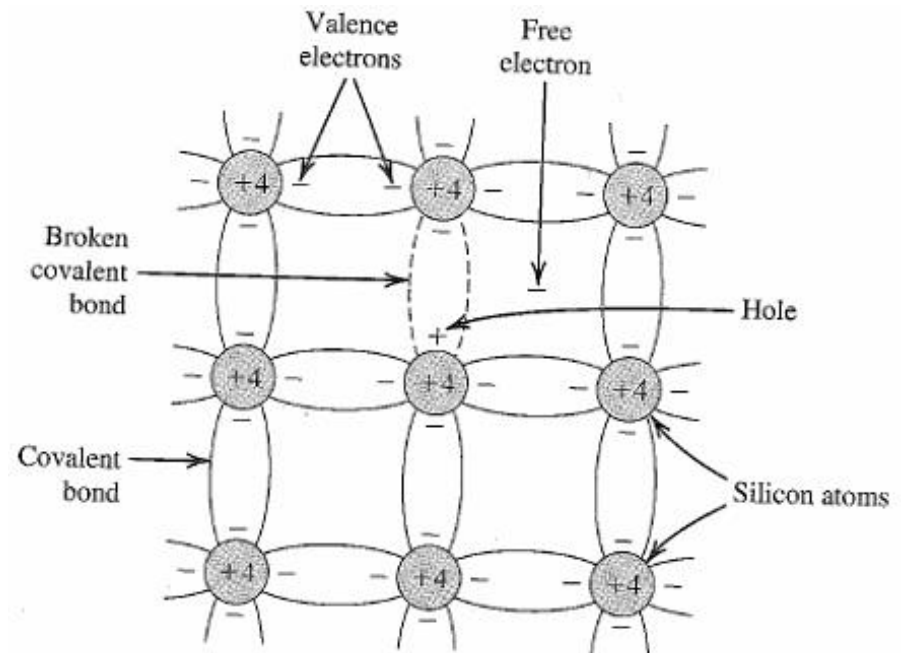
## 2.2 – Metais, isolantes, semicondutores

- a) Num **isolante** a banda proibida tem uma largura elevada, não podendo os electrões de valência passar para a banda de condução sem o fornecimento de uma quantidade de energia elevada.
- b) Num **semicondutor** intrínseco a largura da banda proibida é pequena (0.72 eV para Ge e 1.1 eV para Si a 300 K).
- c) Num **metal** a banda de condução e a banda de valência sobrepõem-se (fig c), pelo que os electrões podem-se mover facilmente para níveis superiores fornecendo uma pequena quantidade de energia.



## 2.3 – Semicondutor intrínseco.

Num semicondutor puro (ou intrínseco) as forças de ligação entre átomos resultam da partilha dos electrões de valência com os átomos vizinhos, designando-se por **ligações covalentes**.



Como todos os electrões de valência participam em ligações covalentes, a baixas temperaturas não há portadores de carga livres, comportando-se o semicondutor como um isolante. Aumentando a temperatura a condutividade aumenta, pois algumas das ligações são quebradas, resultando num electrão livre e numa ligação covalente incompleta, que se designa por **lacuna** ou **buraco**.



As **lacunas** comportam-se como um portador de carga eléctrica positiva livre. Quando uma ligação fica incompleta, pode ser facilmente preenchida por um electrão de valência de um átomo vizinho, que por sua vez deixa uma ligação incompleta, e assim sucessivamente. O movimento da lacuna num sentido implica o transporte de um electrão numa distância igual, mas em sentido contrário.

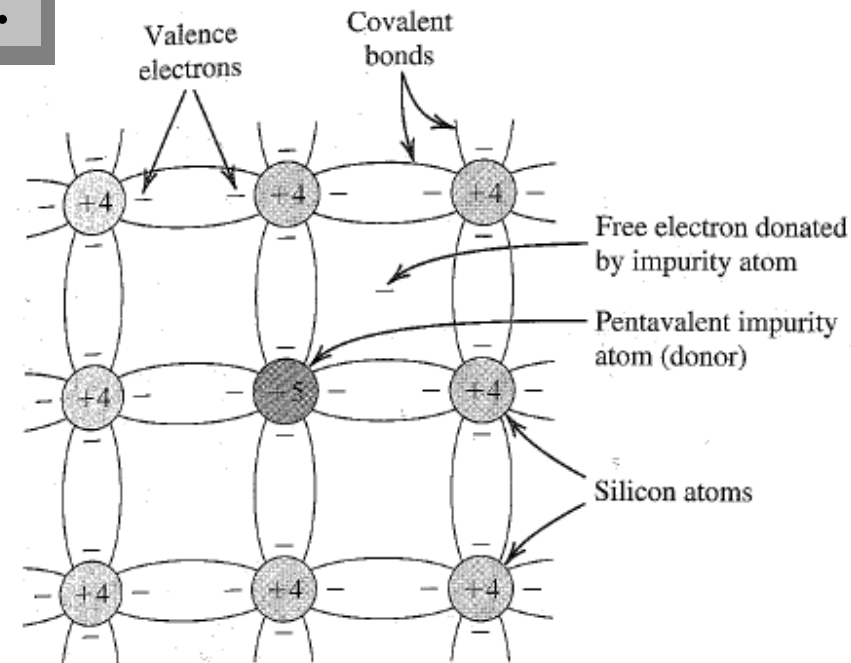
Num semiconductor o  $n^0$  de lacunas,  $p$ , é igual ao  $n^0$  de electrões livres,  $n$ ,

$$n = p = n_i \quad \text{ou} \quad np = n_i^2$$

onde  $n_i$  é a concentração intrínseca, cujo valor depende da temperatura.

## 2.3 – Semicondutores extrínsecos ou dopados.

Se ao semiconductor puro são adicionadas impurezas pentavalentes (Fósforo, arsénio) quatro dos cinco electrões de valência ocupam ligações covalentes, ficando o quinto electrão livre. Estas impurezas cedem os electrões em excesso, pelo que se referem como impurezas dadoras e dão origem a um **semiconductor tipo N**.

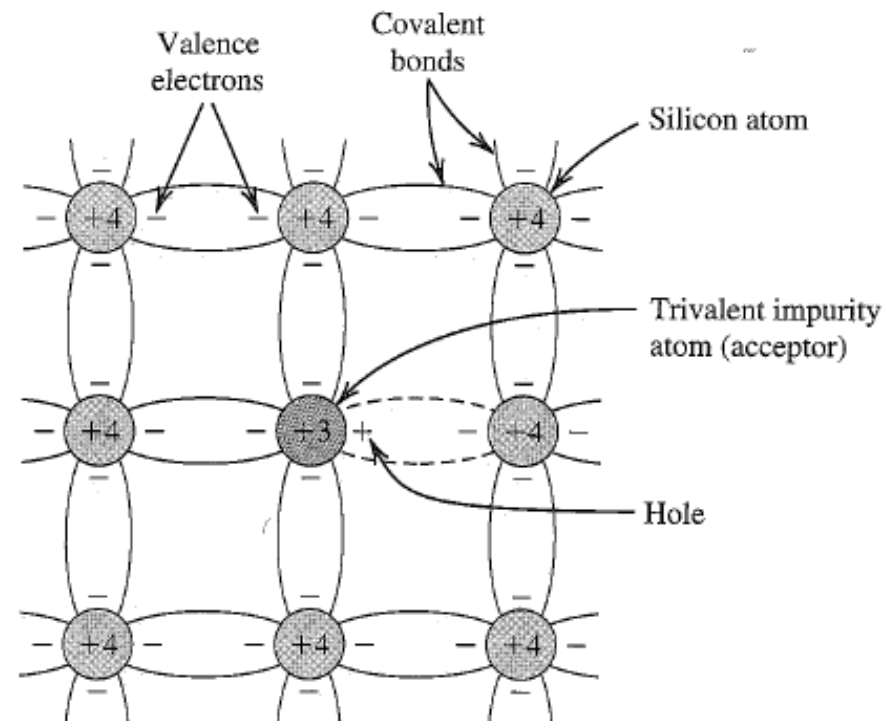


Num **semiconductor tipo N** os electrões são os portadores maioritários, com uma concentração igual à de átomos dadores ( $N_D$ ). A concentração de buracos no semiconductor diminui, devido ao aumento da taxa de recombinação dos buracos com os electrões, e é igual a

$$p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Se o semiconductor puro é dopado com uma impureza trivalente (boro, gálio) apenas três das quatro ligações covalentes são preenchidas, criando um buraco. Estas impurezas dizem-se aceitadoras e dão origem a **semicondutores tipo P**, nos quais predominam os buracos como portadores de carga, com uma concentração igual à de átomos dadores ( $N_A$ ). A concentração de electrões é

$$n = \frac{n_i^2}{N_A}$$





## 2.5 – Componentes de corrente num semiconductor.

A diferença fundamental entre um metal e um semiconductor é que enquanto os metais são unipolares (possuem apenas portadores de carga negativos), os semicondutores são bipolares, pois tanto os buracos como os electrões contribuem para a corrente total através de um semiconductor.

Aplicando um campo eléctrico a um metal os electrões livres são acelerados até efectuarem uma colisão com um ião da rede, reduzindo-se a sua velocidade a zero. Após um certo tempo estabelece-se um estado estacionário sendo a velocidade média de deriva dos electrões proporcional ao campo aplicado

$$v_d = \mu E$$

onde  $\mu$  designa-se por mobilidade do electrão.

A densidade de corrente é

$$J = \frac{I}{A} = qn v_d$$

onde  $I$  é a intensidade de corrente, e  $n$  é a concentração de electrões no metal.





No caso de um semiconductor os buracos e os electrões movem-se em sentidos opostos, mas como têm sinais contrários as suas correntes têm o mesmo sentido, sendo a densidade de **corrente de condução**

$$J = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

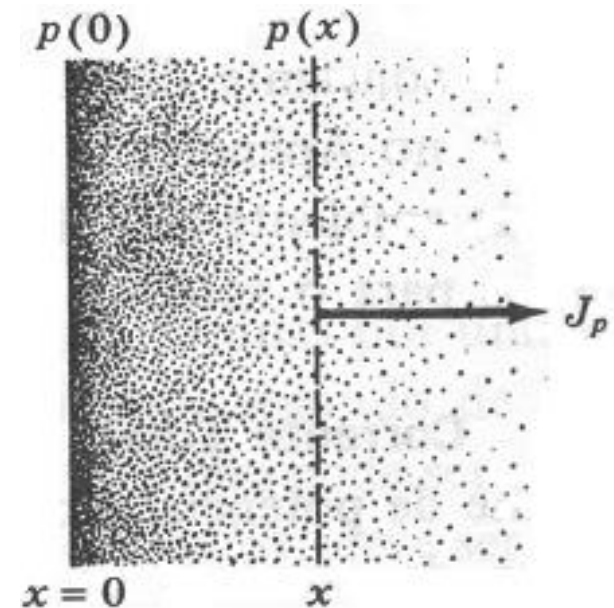
onde  $\mu_n$  é a mobilidade dos electrões  $\mu_p$  a mobilidade dos buracos.

No caso de um semiconductor além da **corrente de condução** o transporte de carga eléctrica pode ocorrer também por **difusão**.

Se existir um gradiente de concentração de portadores (buracos) no semiconductor, então para uma superfície imaginária no seu interior, a densidade de buracos de um lado é maior que do outro. Assim é de esperar que mais buracos atravessem a superfície do lado de maior concentração para o de menor, sendo a densidade de corrente de difusão dos buracos

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

onde  $D_p$  é a constante de difusão dos buracos.





A constante de difusão relaciona-se com a mobilidade pela relação de Einstein

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T = \frac{T}{11600}$$

onde  $D_n$  é constante de difusão os electrões e  $V_T$  é a tensão equivalente, cujo valor à temperatura ambiente (293K) é  $V_T=25$  mV.

Num semiconductor se existir um gradiente de potencial e de concentração a densidade total de corrente dos buracos é

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

e a de electrões

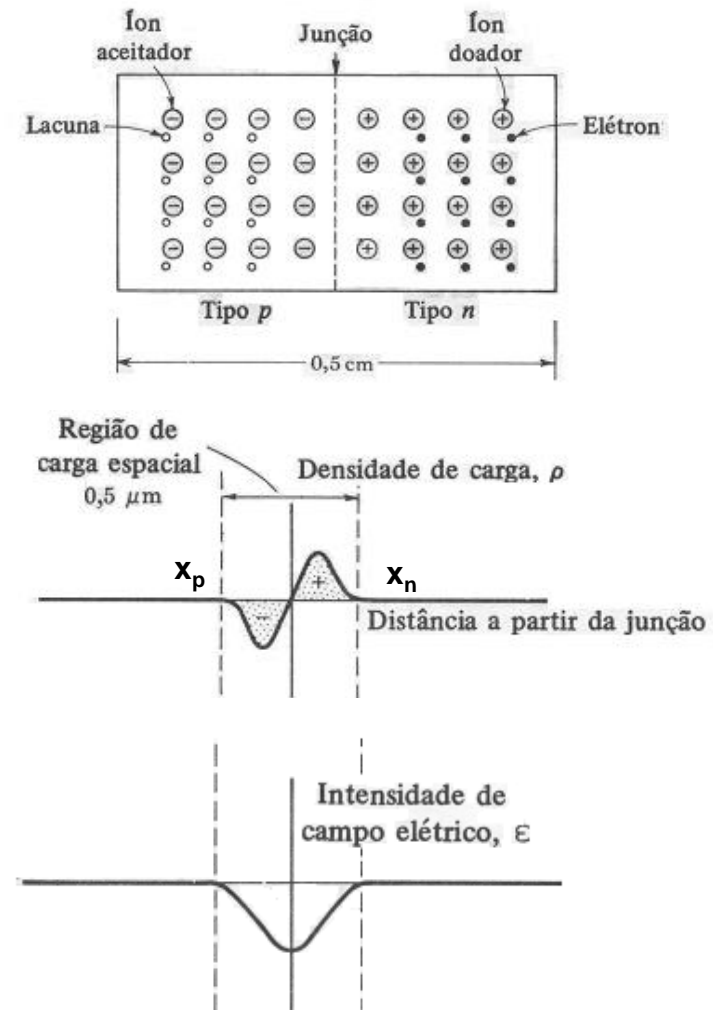
$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

## 3.1 – Junção PN.

Uma junção PN é formada dopando um cristal semiconductor com impurezas aceitadoras de um lado e dadoras do outro. Inicialmente, devido ao gradiente de concentração de portadores, ocorre a difusão de lacunas do lado P para o lado N e de electrões no sentido contrário.

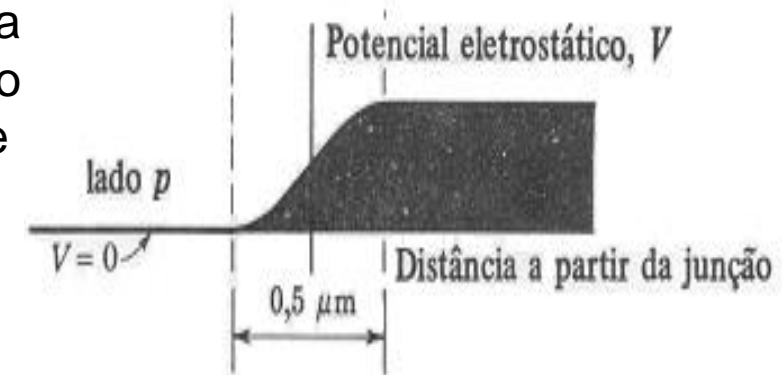
Na vizinhança da junção PN surge uma região constituída por iões não neutralizados, resultantes da recombinação dos electrões com as lacunas, que se designa por **região de depleção ou zona de transição** pelo facto de se encontrar empobrecida de cargas móveis.

Devido à distribuição de carga na região de depleção, surge nesta região um campo eléctrico orientado de forma a contrabalançar a difusão de portadores, resultando numa corrente nula através da junção.



A região de depleção actua assim como uma barreira (de potencial) contra a difusão dos portadores, sendo a variação de potencial nesta região obtida a partir de

$$J_p = 0 = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$



Integrando no espaço

$$V_0 = V_{NP} = V_T \ln \frac{P_{p0}}{P_{n0}} = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Para as dopagens vulgarmente utilizadas o potencial de contacto é de 0.6 V para o Si e 0.2V para o germânio.

A largura total da zona de depleção

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0}$$

## 3.2 – Polarização de uma junção PN.

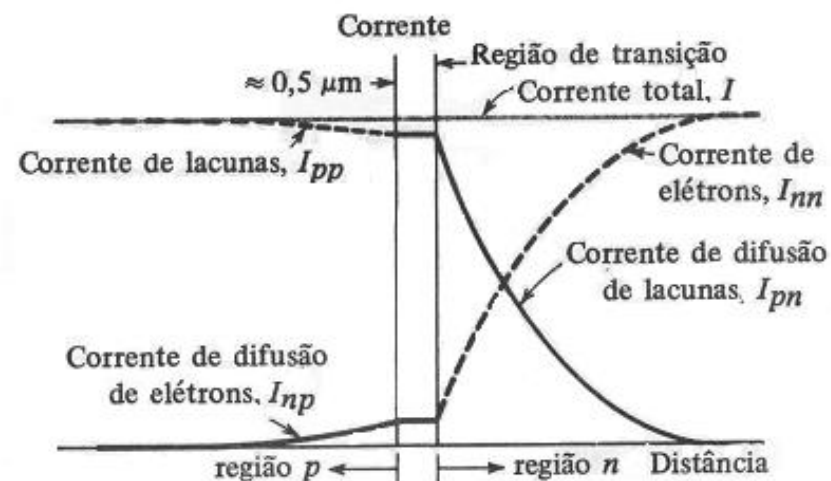
A junção PN tem uma natureza aproximadamente unidireccional, permitindo apenas a passagem de corrente num único sentido.

### Junção polarizada directamente

Uma junção PN diz-se **polarizada directamente** se o potencial aplicado ao lado P é superior ao do lado N. Numa junção ideal, a tensão aplicada vai reduzir o campo eléctrico através da zona de depleção, reduzindo a sua largura. A altura da barreira de potencial diminui, o que facilita a difusão de buracos e electrões através da junção.

A corrente total através da junção tem uma componente devido às lacunas injectadas no lado N,  $I_{Pn}(0)$ , e outra componente devido aos electrões injectados no lado P,  $I_{Np}(0)$ ,

$$I = I_{Pn}(0) + I_{Np}(0) = I_0(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$$





A corrente de portadores minoritários deve-se essencialmente à difusão através da junção. No caso dos portadores majoritários a corrente tem uma componente de deriva e outra de difusão.

A corrente total através do dispositivo é constante e possui um carácter bipolar, variando a proporção de lacunas e de electrões com a distância à zona de depleção.

## Junção polarizada inversamente

Quando o potencial aplicado ao lado P é inferior ao do lado N a junção PN diz-se **polarizada inversamente**. O efeito desta tensão é reforçar o campo eléctrico na zona de depleção, aumentando a sua largura. A zona de depleção passa a constituir uma forte barreira à difusão dos portadores majoritários através da junção, não sendo no entanto os portadores minoritários afectados.

A corrente de portadores minoritários tem sentido oposto à da polarização directa. A sua magnitude é independente da polarização inversa mas aumenta com a temperatura, sendo dada por

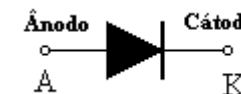
$$I = I_0(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \cong -I_0$$

onde  $I_0$  é a corrente de saturação inversa.



### 3.3 – Característica tensão-corrente de um díodo. Dependência da temperatura.

A junção PN juntamente com os seus contactos óhmicos, formam um dispositivo de dois terminais chamado de **díodo de junção**, representado pelo símbolo da figura ao lado.

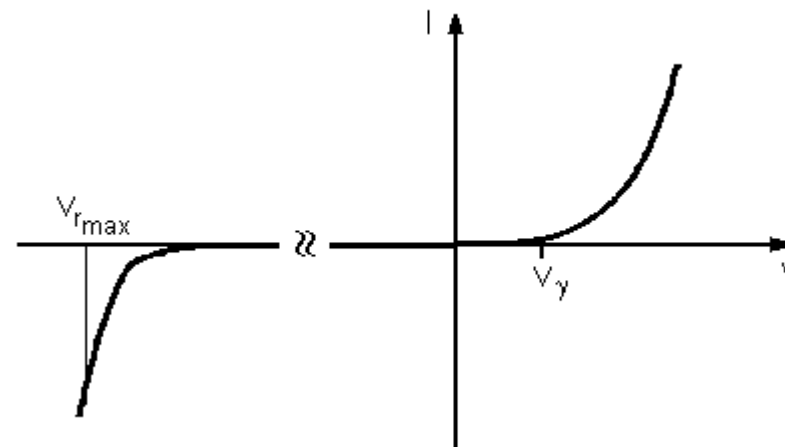


A corrente no díodo está relacionada com a tensão aplicada pela relação

$$I = I_0(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1)$$

onde o factor  $\eta$  depende do material semiconductor e da intensidade de corrente. No germânio  $\eta=1$  e para o silício  $\eta=2$ .

Saliente-se a existência de uma **tensão limiar**, abaixo da qual a corrente é muito pequena (inferior a 1% da corrente máxima nominal). Esta tensão limiar (ou tensão de corte) é de 0.2 V para o germânio e de 0.6V para o silício.





A tensão limiar é a tensão necessária para diminuir a barreira de potencial da junção PN, permitindo a condução a através desta. Para valores de tensão superiores à tensão de limiar, a corrente aumenta rapidamente sendo apenas limitada pela resistência dos contactos óhmicos e pela resistência do cristal.

Para tensões inferiores à tensão limiar, a corrente é muito pequena. Para tensões inversas elevadas, superiores à tensão de disrupção (ou de zener), o díodo entra bruscamente em condução podendo ocorrer a sua destruição.

A relação V-I do díodo tem uma dependência implícita na temperatura, através de  $I_0$  e de  $V_T$ .

- Observa-se experimentalmente que a corrente de saturação inversa varia de 7%/°C, ou seja duplica para cada elevação de 10°C na temperatura.
- Para manter a corrente constante com o aumento da temperatura, então a tensão aplicada deve diminuir à taxa de

$$\frac{dV}{dT} = -2.5mV / ^\circ C,$$

diminuindo  $\frac{dV}{dT}$  com o aumento da temperatura.







## 3.4 – Aproximações do díodo

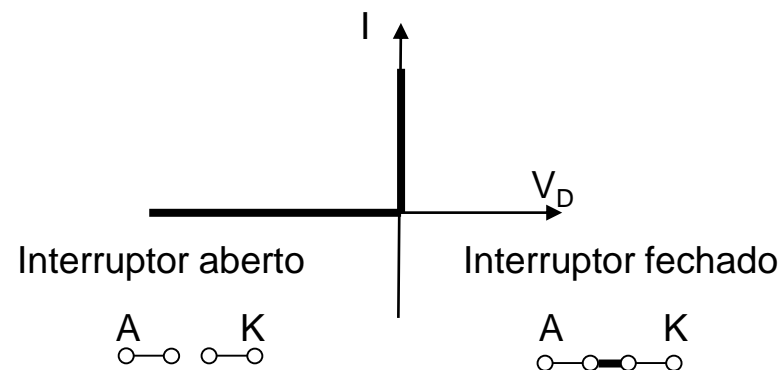
### O díodo ideal.

O comportamento unidireccional do díodo pode ser representado pela característica V-I da junção PN ideal.

O díodo ideal pode ser visto como um interruptor electrónico cujo estado de condução ou não-condução é determinado pela polaridade da tensão no díodo  $V_D$ .

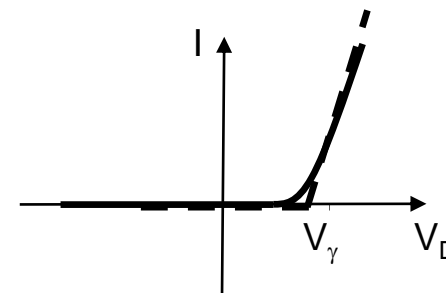
- Quando **polarizado directamente** ( $I > 0$ ), o díodo conduz comportando-se como um curto-circuito ( $V_D = 0$ ).
- Quando **polarizado inversamente** ( $V_D < 0$ ), o díodo não conduz comportando-se como um circuito aberto ( $I = 0$ ).

No díodo ideal não há dissipação de potência, pois em qualquer dos casos temos  $P = V_D \cdot I = 0$ .

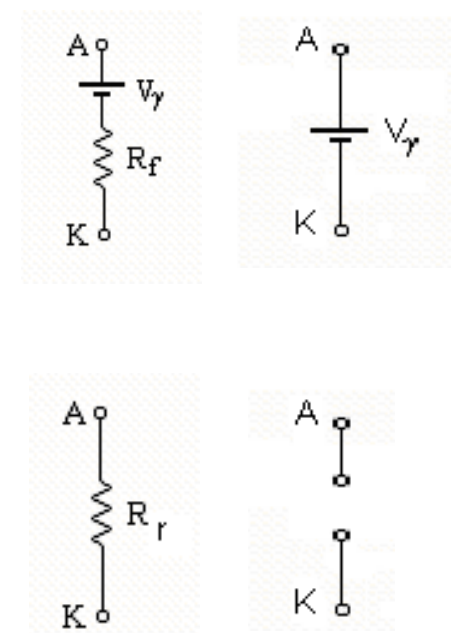


## Modelo do díodo de junção para sinais fortes

O díodo pode ser representado por uma combinação de componentes lineares e ideais, permitindo a utilização dos métodos tradicionais de análise de circuitos. A característica V-I de um díodo real pode-se linearizar por partes:

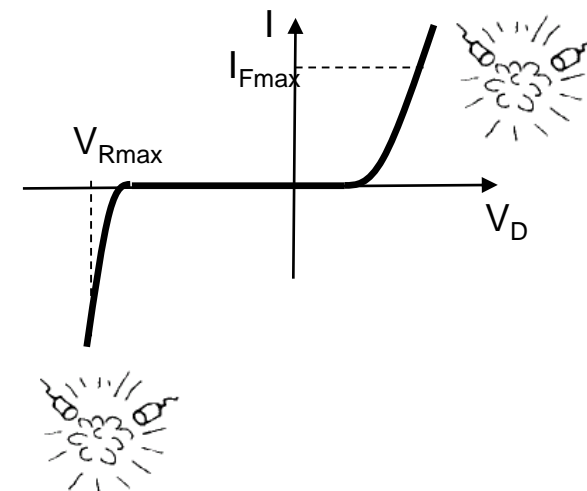


- Quando **polarizado directamente** ( $V_D > V_\gamma$ ), o díodo conduz, oferecendo uma pequena resistência de condução ( $R_f$ ), tipicamente entre 5 e 50  $\Omega$ . Em geral, para simplificar a análise dos circuitos, considera-se  $R_f = 0$ , sendo a queda de tensão no díodo apenas a da tensão limiar.
- Quando  $V_D < V_\gamma$ , a corrente através do díodo é muito pequena, podendo-se aproximar o díodo por uma resistência de valor elevado (da ordem de vários K $\Omega$ ). Normalmente considera-se  $R_r = \infty$  (circuito aberto) para simplificar a análise dos circuitos com díodos.



## 3.5 – Limites de operação de um díodo.

Os fabricantes especificam quais os limites de operação do díodo através dos valores máximos admissíveis para a **tensão inversa** e para a **corrente nominal**. Se estes limites forem ultrapassados a potência dissipada no díodo pode originar a sua destruição.



### Tempos de comutação do díodo

O díodo não consegue passar imediatamente de um estado para outro, por exemplo condução (ON) para não condução (OFF), decorrendo um certo intervalo de tempo até atingir o regime estacionário.

- **tempo de restabelecimento inverso**,  $t_{rr}$ , intervalo de tempo que decorre desde a comutação de ON para OFF até a corrente no díodo atingir determinado valor.
- **tempo de restabelecimento directo**,  $t_{fr}$ , intervalo de tempo necessário para que a tensão no díodo passe de 10% para 90% do valor final quando passa de OFF para ON

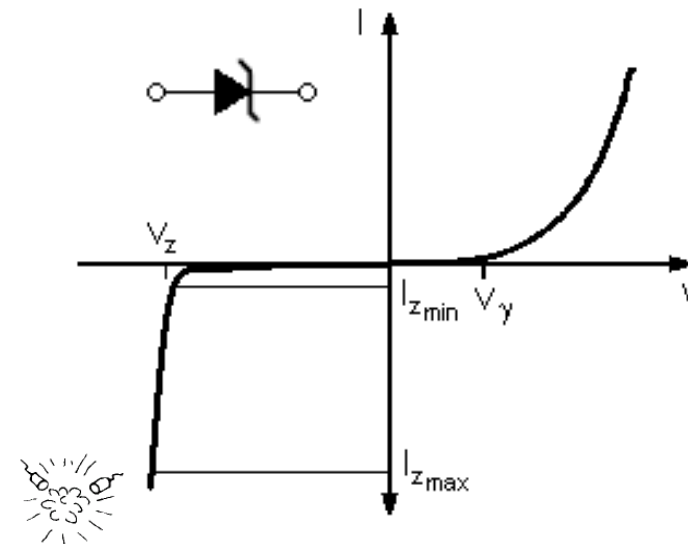
### 3.7 – Tipos de Díodos

#### Díodo Zener

Estes díodos são projectados com tensões de disrupção seleccionadas e com capacidade de dissipação energética para funcionar nessa região da característica V-I do díodo.

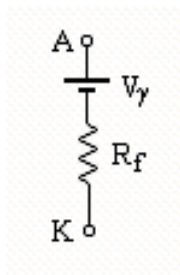
A disrupção pode ocorrer devido a dois mecanismos:

- **Multiplicação em avalanche**, os portadores minoritários ao serem acelerados pelo campo na zona de depleção podem ganhar energia suficiente para quebrar uma ligação covalente ao colidir com os iões da rede cristalina. Assim é gerado um novo par electrão-lacuna, os quais podem ser acelerados pelo campo e gerar novos portadores, etc.
- **Disrupção de Zener**, o campo eléctrico intenso na zona de depleção pode exercer uma força suficientemente intensa sobre um electrão ligado, de modo a quebrar a ligação covalente. É predominante para tensões de disrupção inferiores a 6V.

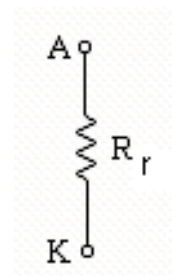


A característica do díodo Zener pode ser aproximada por partes, obtendo-se o correspondente modelo para grandes sinais

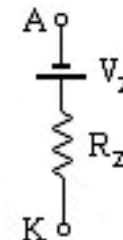
Polarizado  
directamente



Polarizado  
inversamente



Polarizado  
inversamente, na  
zona de disrupção



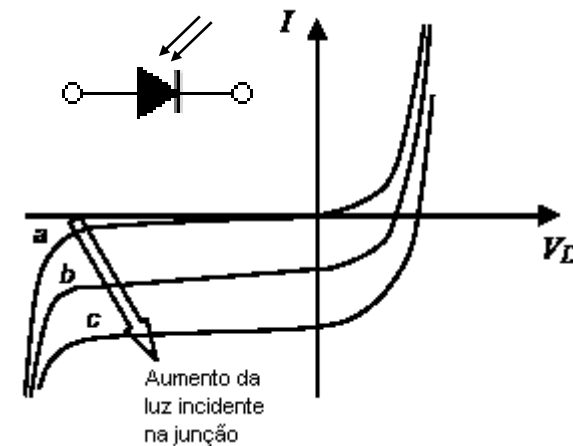
Os **díodos Zener** quando polarizados inversamente mantêm aos seus terminais uma tensão constante (igual à tensão de Zener) independente da corrente no díodo, mas dependente da temperatura. O coeficiente de temperatura é aproximadamente  $0.1\%/^{\circ}\text{C}$  sendo positivo, se predomina o efeito de avalanche, ou negativo, se predomina a disrupção de Zener.

Os fabricantes normalmente especificam a **potência máxima** (corrente máxima), e a **corrente mínima de utilização**,  $I_{zmin}$ , abaixo da qual a tensão no díodo deixa de se manter constante.

## Fotodíodo

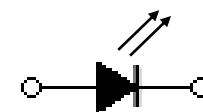
Os **fotodíodos** são concebidos de forma que a radiação incida sobre a junção, aproveitando o facto da geração de portadores minoritários num semiconductor variar quase linearmente com o fluxo luminoso.

Podem ser polarizados directa ou inversamente, funcionando no regime fotovoltaico ou fotocondutivo respectivamente. No primeiro actuam como conversores de energia solar produzindo uma corrente proporcional à intensidade luminosa, no modo fotocondutivo são usados como detectores de radiação (violeta até ao infravermelho).



## Díodo emissor de luz (LED)

Em certos semicondutores (Arsenieto de Gálio) a energia de um electrão é libertada sob a forma de radiação, ao passar da banda de condução para a banda de valência no processo de recombinação electrão-lacuna.



A luz é emitida junto da junção, dado que grande parte da recombinação ocorre nesta zona, sendo grande parte da radiação emitida no espectro infravermelho. A eficiência do processo aumenta com a corrente e com a diminuição da temperatura.



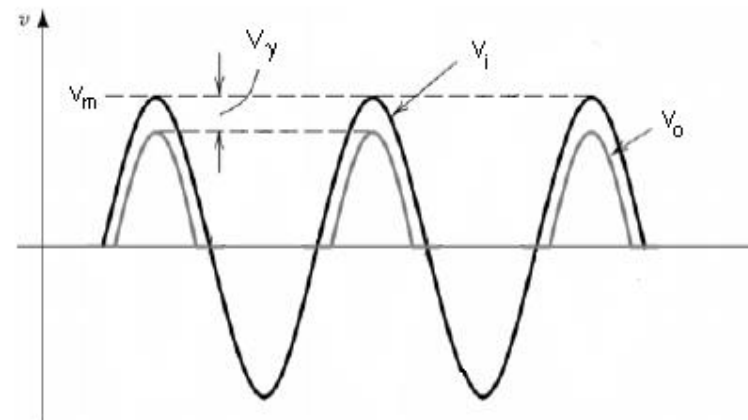
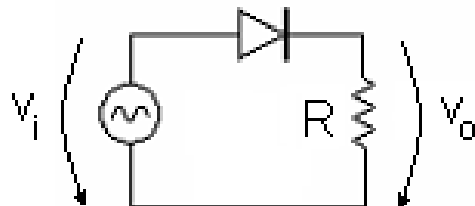
## 3.8 – Circuitos com Díodos

O método geral de análise de circuitos com díodos, consiste em fazer suposições sobre o estado de cada díodo e substituí-lo pelo seu modelo linearizado de acordo com o estado que se admitiu.

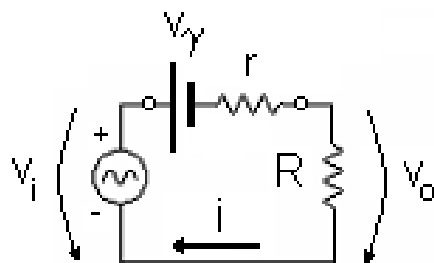
Uma vez substituídos todos os díodos pelo seu esquema equivalente o circuito torna-se linear, podendo ser usados os métodos de análise de circuitos estudados anteriormente.

- A hipótese inicial do díodo estar em condução é confirmada verificando se a corrente atravessa o díodo do ânodo para o cátodo. Caso contrário, a hipótese inicial é falsa, devendo-se iniciar novamente a análise com o díodo no estado de não condução.
- A suposição inicial do díodo estar no estado de não condução é verificada calculando a queda de tensão no díodo e confirmando se é inferior à tensão de corte ou se o díodo está polarizado inversamente. Caso contrário, a hipótese inicial será falsa, pelo que devemos reiniciar o processo a análise supondo que o díodo está em condução.

## Circuito rectificador meia onda



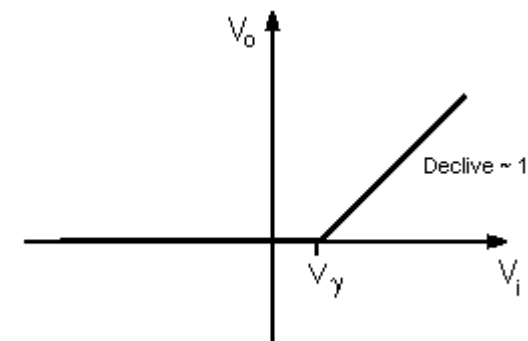
Díodo conduz



$$i = \frac{V_i - V_\gamma}{r + R} > 0 \quad \Rightarrow \quad V_i > V_\gamma$$

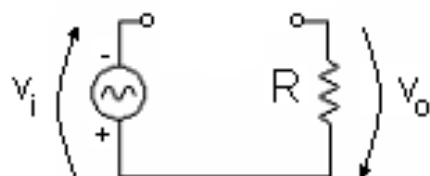
$$V_o = R \cdot i = \frac{R}{r + R} (V_i - V_\gamma)$$

$$\text{Se } R \gg r \text{ então } V_o \approx (V_i - V_\gamma)$$



Característica de transferência

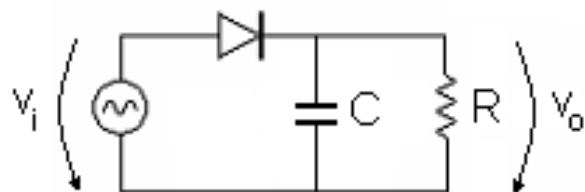
Díodo não conduz



$$\text{Se } V_i < V_\gamma \quad \Rightarrow \quad i = 0 \text{ A} \quad \text{e} \quad V_o = 0 \text{ V}$$



## Rectificador com filtragem. Fonte de alimentação.



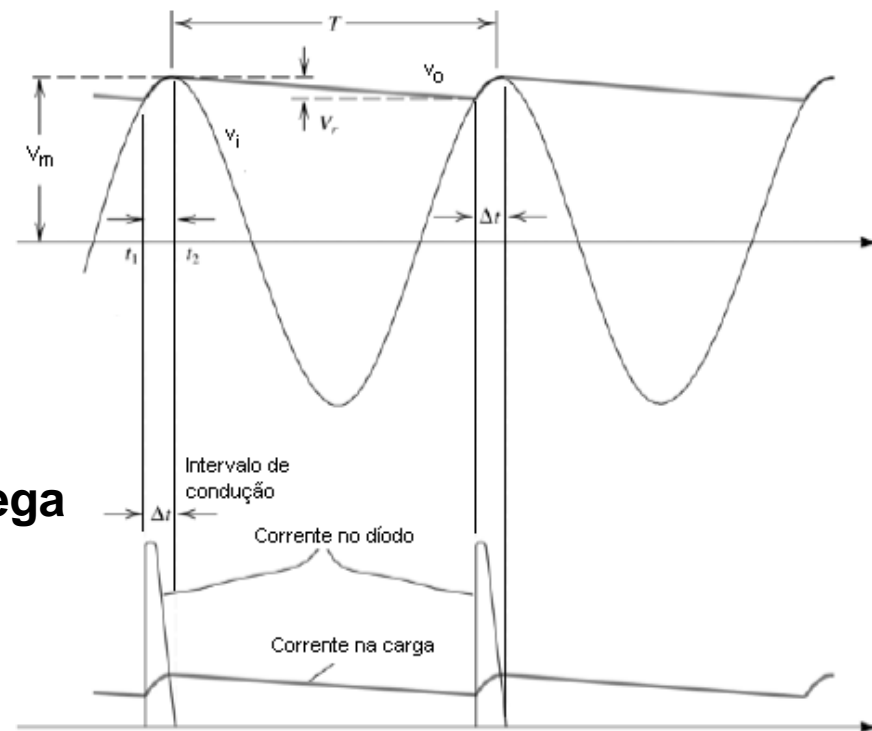
Díodo conduz  $\Rightarrow$  **Condensador carrega**

Díodo não conduz  $\Rightarrow$  **Condensador descarrega**

**Tensão de Ondulação:** 
$$V_r = \frac{\Delta Q}{C} \approx \frac{I_{dc}}{fC}$$

**Tensão média de saída:**

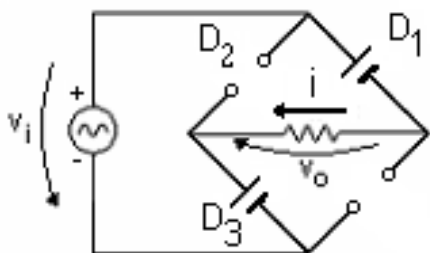
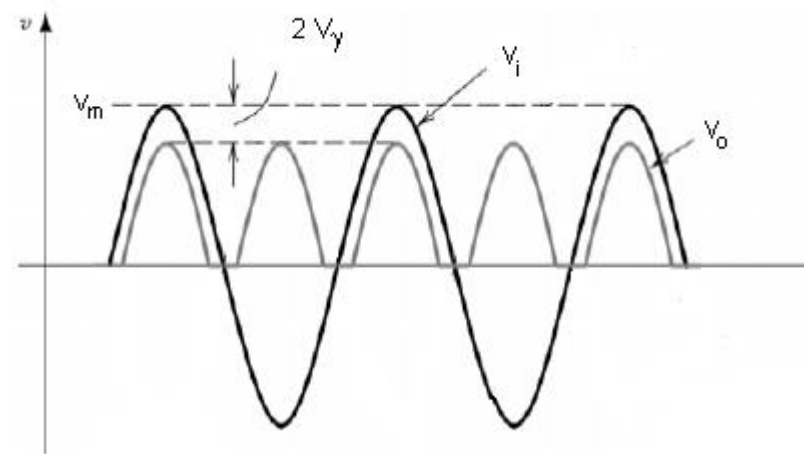
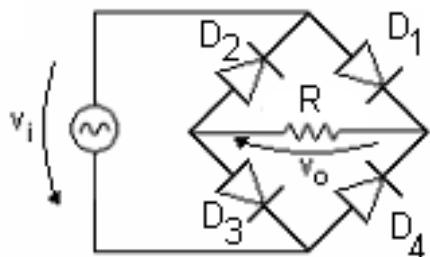
$$V_{dc} = R \cdot I_{dc} \approx V_m - \frac{V_r}{2}$$



**Regulação de tensão:**

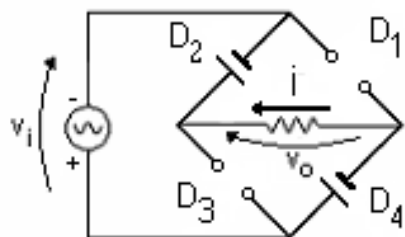
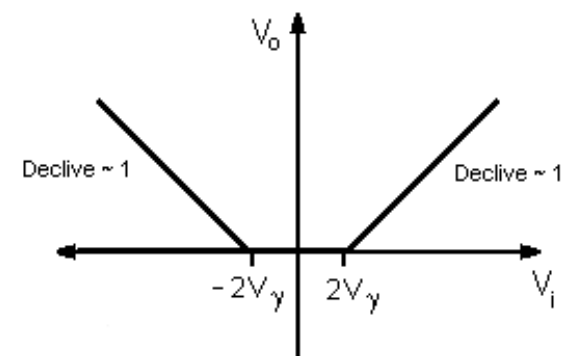
$$r = \frac{V_o|_{\text{sem carga}} - V_o|_{\text{com carga}}}{V_o|_{\text{com carga}}} = \frac{V_r}{2V_{dc}} \times 100\%$$

## Ponte rectificadora de onda completa.



$$i = \frac{V_i - V_{\gamma 1} - V_{\gamma 3}}{R} > 0 \Rightarrow V_i > V_{\gamma 1} + V_{\gamma 3}$$

Se  $V_{\gamma 1} = V_{\gamma 3} = V_{\gamma}$  então  $V_o \approx (V_i - 2V_{\gamma})$

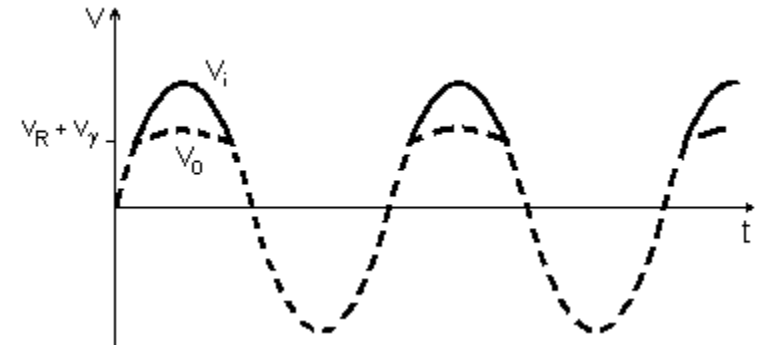
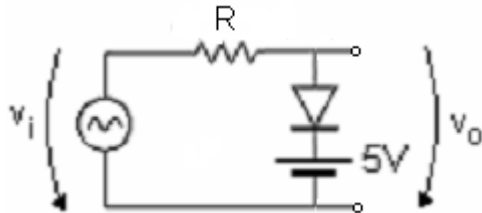


$$i = \frac{V_i - V_{\gamma 2} - V_{\gamma 4}}{R} > 0 \Rightarrow -V_i < -(V_{\gamma 2} + V_{\gamma 4})$$

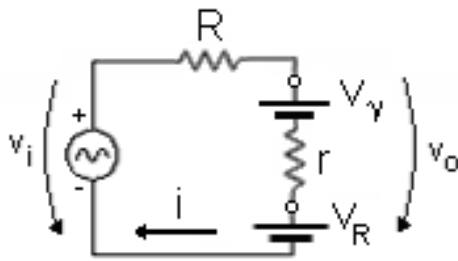
Se  $V_{\gamma 2} = V_{\gamma 4} = V_{\gamma}$  então  $V_o \approx (V_i - 2V_{\gamma})$

**Característica de transferência**

## Circuitos limitadores



Díodo conduz

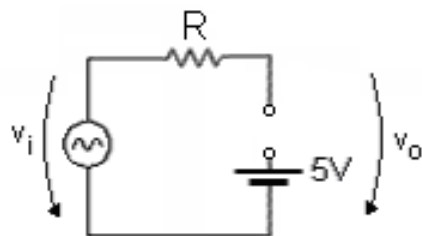


$$i = \frac{V_i - V_\gamma - V_R}{r + R} > 0 \quad \Rightarrow \quad V_i > V_R + V_\gamma$$

$$V_o = r \cdot i + (V_\gamma + V_R)$$

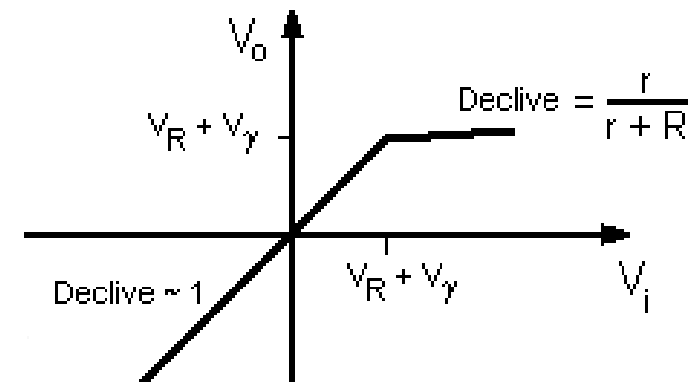
$$= \frac{r}{r + R} V_i + \frac{R}{r + R} (V_\gamma + V_R)$$

Díodo não conduz

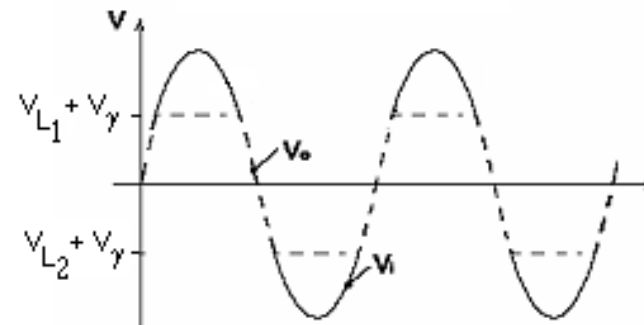
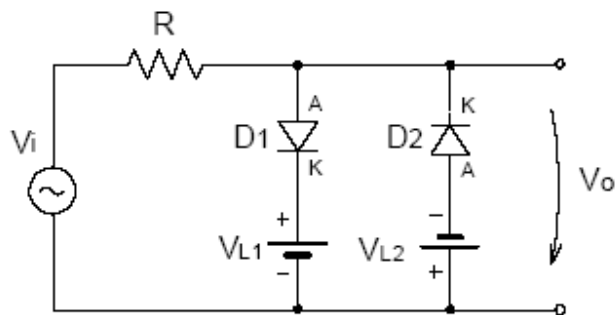
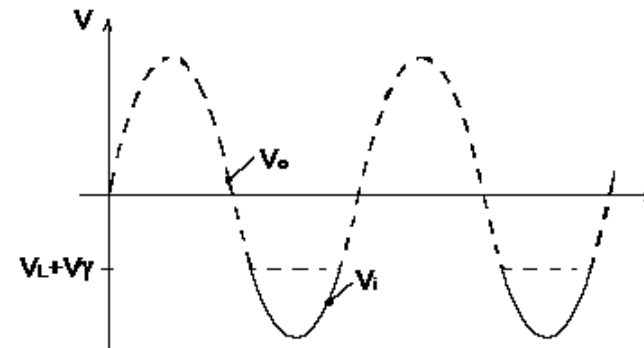
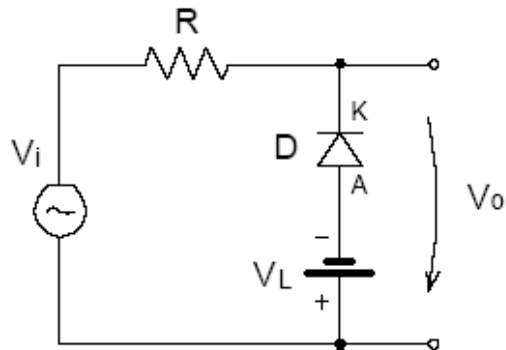


$$V_i < V_R + V_\gamma$$

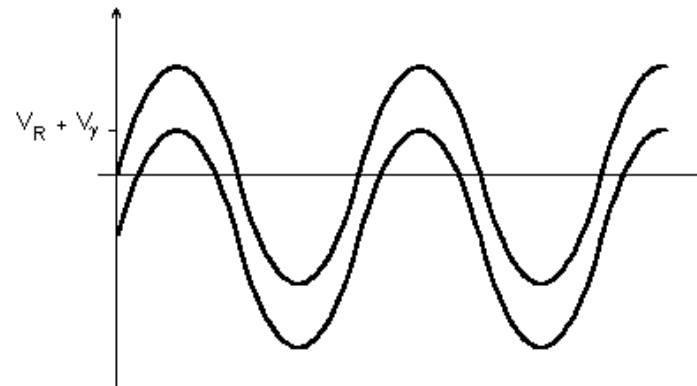
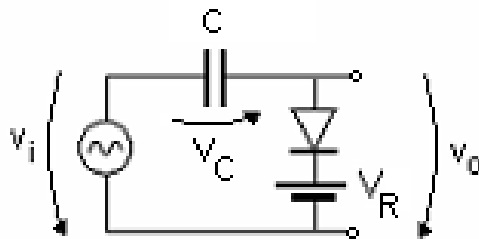
$$V_o = V_i$$



## Circuitos limitadores



## Circuito fixador.



Inicialmente o condensador está descarregado, sendo carregado durante o primeiro semi-ciclo positivo quando o díodo conduz. A tensão no condensador será

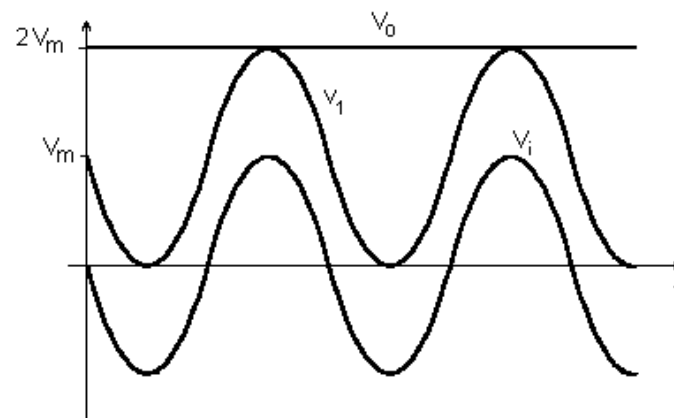
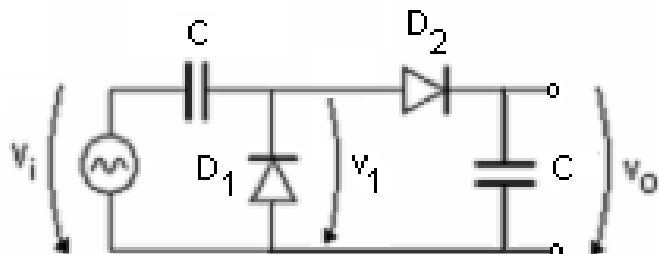
$$V_C = V_m - (V_R + V_\gamma)$$

Como o condensador não pode descarregar, nos semiciclos seguintes a tensão na saída será

$$V_o = V_i - V_C = V_i - (V_m - (V_R + V_\gamma))$$

O sinal de saída é o sinal de entrada com uma componente contínua  $V_R + V_\gamma - V_m$ , sendo este tipo de circuitos por vezes designados de recuperadores de CC.

## Circuito duplicador de tensão



Este circuito pode ser visto como um circuito fixador o qual adiciona uma componente contínua  $V_m$ , seguido dum rectificador com filtragem (também designado por detector de pico).

Este circuito pode ser generalizado ligando ao diodo  $D_2$  um segundo circuito duplicador, obtendo-se um quadriplicador de tensão, etc.