

### Prática n.º 6

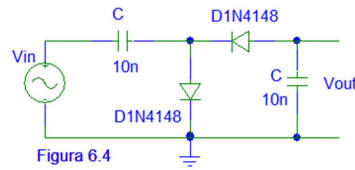
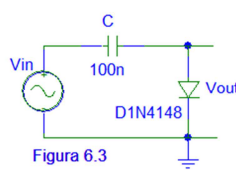
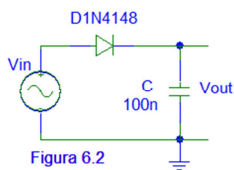
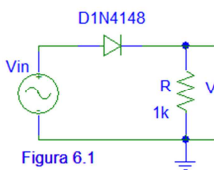
#### Estudo de aplicações de circuitos com díodos

[Faça o estudo dos circuitos (cálculos e/ou simulações) antes da aula]

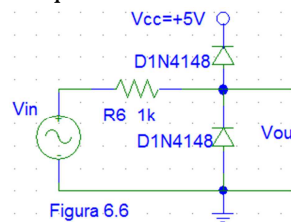
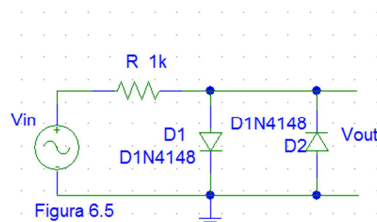
- 1. Preparação prévia:** Considere os circuitos das Figs. 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, assumindo que os geradores  $V_{in}$  produzem sinais em tensão da forma  $V_{in} = a + V_p \sin(2\pi \times 10^3 \cdot t)$  V.
- i) Esboce a resposta temporal (com duração de pelo menos 3 períodos) do circuito da Fig. 6.1 (tensão de saída) se forem aplicados à entrada sinais  $V_{in}$  com  $V_p = 2$  V, e  $a=0$  V,  $a=+2$  V e  $a=-2$  V, indicando nos gráficos (um para cada valor de  $a$ ) as grandezas representadas nos eixos coordenados e as unidades em que são expressas. Considere o modelo do díodo ideal.
  - ii) Repita a alínea anterior para o circuito da Fig. 6.2, considerando neste caso que o gerador é ligado ao circuito num instante em que a amplitude instantânea de  $V_{in}$  é nula.
  - iii) Repita a alínea i) agora para o circuito da Fig. 6.3.
  - iv) Considere o circuito da Fig. 6.4. Esboce o comportamento do circuito para um sinal da forma  $V_{in} = 10\sin(2\pi \times 10^3 \cdot t)$  V.
  - v) Considerando o modelo do díodo correspondente ao díodo ideal em série com uma queda de tensão igual a 0,7 V, esboce o comportamento dos circuitos das Figs. 6.5 e 6.6.
  - vi) Simule os circuitos no PSpice. Nas simulações use o díodo ideal e depois o díodo D1N4148.

**2. Realização experimental:**

- a) Monte, sucessivamente, os três circuitos na placa de teste (Figs. 6.1, 6.2 e 6.3), e observe as tensões de entrada e de saída para sinais de entrada sinusoidais com  $a=0$  V,  $a=+2$  V e  $a=-2$  V. Indique a função realizada por cada circuito, e comente os resultados obtidos.
- b) Implemente na placa de teste o circuito da Fig. 6.4, e aplique à entrada um sinal da forma  $V_{in} = 10\sin(2\pi \times 10^3 \cdot t)$  V. Observe os sinais  $V_{in}$  e  $V_{out}$  no osciloscópio e compare os resultados experimentais com as suas previsões.




- c) Monte na placa de teste, sucessivamente, os circuitos das Fig. 6.5 e 6.6. Observe a tensão de saída quando aplica à entrada um sinal sinusoidal de amplitude 5 V e frequência algumas centenas de hertz. Aumente manualmente o valor da amplitude do sinal aplicado e observe o comportamento do sinal de saída. Descreva e comente o que observa.



## Anexo I: Díodo junção retificador

(em revisão)

A figura  representa o símbolo genérico de um díodo semiconductor rectificador (de ora em diante também designado simplesmente por díodo<sup>1</sup>). Um díodo rectificador é um componente não-linear que permite a passagem de corrente no sentido do ânodo para o cátodo se a queda de tensão do ânodo para o cátodo  $V_D$  atingir um valor limiar ( $\sim 0,7$  V para díodos de silício) que depende do material de que é feito e das suas características físicas (a discutir mais adiante).

### I Introdução

Muitos autores consideram que a electrónica surgiu com a invenção da válvula de tríodo, por Lee De Forest, em 1907.<sup>2</sup> A válvula de tríodo<sup>3</sup> é um dispositivo que tornou possível a amplificação de sinais eléctricos. O principal produto de massas da electrónica na primeira metade do século XX foi o rádio, que possibilitou a difusão sonora de informação e entretenimento à distância. Mais tarde surgiu o sistema de transmissão de sons e imagens em movimento: a televisão. Porém, a electrónica baseada em válvulas de vácuo apresentava grande inconveniente, porque as válvulas eram grandes, frágeis e aqueciam muito, e por isso tinham vida curta, e a sua fabricação era dispendiosa, além de outras desvantagens técnicas. Por estas razões, desde logo se começou a procurar um dispositivo que não apresentasse as desvantagens das válvulas. O grande passo foi dado em 1947 por J. Bardeen, W. Brattain e W. Shockley, três físicos dos laboratórios da Bell Telephone que estudavam as propriedades de condução electrónica em materiais semicondutores. Naquele ano eles inventaram o transístor. (<http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/transistor.htm>.)

O aperfeiçoamento do transístor e a miniaturização dos sistemas electrónicos com o desenvolvimento dos circuitos integrados levaram à difusão das aplicações da electrónica. O advento da electrónica dos semicondutores e das tecnologias associadas foi uma das alavancas mais importantes das transformações económicas e sociais ocorridas no século XX. Os países que mais investiram no domínio da tecnologia electrónica e/ou tecnologias afins, têm hoje grande vantagem competitiva em relação aos demais.

A funcionalidade dos primeiros transístores resulta das propriedades das junções  $pn$ . A relação corrente-tensão (I-V) numa junção  $pn$  é não-linear. A característica corrente-tensão de um díodo de junção  $pn$  é exponencial, isto é, a corrente aumenta exponencialmente com a tensão aos terminais da junção  $pn$   $V_D$ . Se a tensão entre o ânodo e o cátodo  $V_D$  da junção for maior que zero volt diz-se que

<sup>1</sup> O vocábulo díodo resulta do grego *di-hodós*: elemento com dois contactos ou duas vias; no sentido lato uma resistência, por exemplo, é um díodo. Contudo, a designação *díodo* universalizou-se como correspondendo a dispositivos semicondutores com dois terminais, particularmente referindo-se a díodos baseados em junções  $p-n$ .

<sup>2</sup> A válvula de tríodo consiste de um tubo de vácuo com três eléctrodos: o cátodo, no qual os electrões são emitidos, o ânodo, que recebe os electrões e a grelha, que serve para controlar o fluxo de electrões e possibilitar a amplificação de sinais. (<https://pt.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%ADodo>)

<sup>3</sup> O vocábulo tríodo resulta do grego *tri-hodós*: elemento com três contactos ou duas vias.

a junção está polarizada directamente; se a tensão entre o ânodo e o cátodo for negativa ( $V_D < 0$  V), diz-se que está polarizado inversamente. Para os díodos de junção  $pn$  de silício o valor do limiar de queda de tensão entre o ânodo e o cátodo  $V_D$  para que haja franca condução é, aproximadamente, 0,7 V, isto é, se a diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo for  $\sim 0,7$  V a corrente que percorre a junção  $pn$  é apenas limitada pelo circuito onde esta se encontra inserida. Se a queda de tensão entre o ânodo e o cátodo for inferior a  $\sim 0,7$  V pode considerar-se, numa primeira aproximação, que o díodo não conduz e se comporta como um aberto (não deixa passar corrente).

## II Semicondutores, dopagem e Junções $p-n$

Quase todos os componentes electrónico semicondutores baseiam o seu comportamento em junções  $pn$  ou equivalente. O comportamento dos portadores de carga na banda de valência (vazios, lacunas, etc.) e dos electrões na banda de condução depende das características da junção, i.e., a(s) junções  $p-n$  de um dispositivo determina a(s) característica(s) corrente-tensão ( $I-V$ ) do dispositivo. O díodo semiconductor bipolar é formado por uma junção  $p-n$ . O transistor bipolar é formado por duas junções  $pn$ . (A palavra díodo resulta do grego *di-hodós*: elemento com dois contactos ou duas vias). Contudo, a designação *díodo* universalizou-se como correspondendo a dispositivos semicondutores com dois terminais, particularmente a díodos baseados em junções  $p-n$ .

Num material cristalino, por exemplo, no germânio, os electrões de valência de um átomo são repartidos entre os átomos adjacentes formando ligações covalentes; as orbitais de valência dos átomos isolados dão origem a bandas de valência num material cristalino. Num cristal semiconductor, a zero kelvin, a banda de valência está totalmente preenchida, apresentando-se a banda imediatamente superior - banda de condução, onde os electrões podem comportar como electrões quase livres - completamente desocupada.<sup>4</sup> Contudo, à medida que a temperatura do semiconductor aumenta, parte dos electrões de valência adquirem energia suficiente para escaparem à influência directa dos átomos, ocupando estados na banda de condução. Dado que os átomos eram electricamente neutros, um número de átomos, igual ao número de electrões quase livres, adquire agora carga positiva. A ausência de um electrão na ligação covalente aparece como uma carga positiva na banda de valência no ponto onde o electrão se encontrava, o qual poderá atrair e aceitar um electrão ligado a um átomo vizinho. A concentração de electrões na banda de condução de um semiconductor puro (ou intrínseco) varia exponencialmente com a temperatura, o que faz com que a sua condutividade dependa fortemente da temperatura. Esta propriedade faz com que os semicondutores intrínsecos sejam pouco usados em dispositivos electrónicos/optoelectrónicos.

A condutividade dos semicondutores pode, no entanto, ser drasticamente alterada dopando o semiconductor com átomos diferentes dos que compõem o cristal semiconductor puro. A dopagem de um semiconductor consiste na substituição de uma fracção muito pequena de átomos do semiconductor puro por um número igual de átomos (de tamanho idêntico), e com mais/menos um electrão de valência. Quando a dopagem é efectuada com átomos com mais um electrão de valência

<sup>4</sup> A menor separação em energia entre dois estados electrónicos destas duas bandas designa-se por **hiato** do semiconductor e representa-se por  $E_g$ . Nos semicondutores mais usados em electrónica e optoelectrónica,  $E_g < 2$  eV.

(impureza dadora) do que o átomo original, o semiconductor obtido designa-se do tipo  $n$  (cria-se um excesso de cargas livres negativas, em número idêntico ao das impurezas dadoras); se o átomo dopante possuir menos um electrão de valência o semiconductor resultante diz-se do tipo  $p$  (as ligações covalentes entre o átomo dopante - impureza aceitadora - e os seus vizinhos efectuam-se, agora, com menos um electrões de valência, i.e., cria-se uma lacuna/buraco na ligação). Verifica-se que a carência de um electrão nas ligações, em número igual ao da fracção das impurezas aceitadoras, se comporta sobe a acção de um campo eléctrico como uma carga positiva. A deficiência de um electrão é designada de lacuna ou vazio. Os semicondutores dopados são designados por semicondutores extrínsecos.

O semiconductor mais usado em electrónica é o silício (elemento do quarto grupo da tabela periódica); em optoelectrónica os mais usados são o arsenieto de gálio (GaAs) (material de que são feitos os lasers semicondutores presentes nos leitores de disco compacto), o fosfato de índio e ligas sintéticas de InGaAsP e InGaAlAs (ligas semicondutoras usadas para fabricar os lasers empregues em redes de comunicação por fibra óptica).

### III Característica Corrente - Tensão ( $I-V$ ) de uma Junção $p-n$

Uma junção  $p-n$  corresponde à zona de confluência de duas regiões com densidades de carga livre de polaridades opostas num material semiconductor. Genericamente, para formar uma junção  $p-n$  parte-se de uma porção (pastilha) de material semiconductor extrínseco (isto é dopado, tipo  $n$  ou tipo  $p$ ). A junção  $p-n$  é obtida dopando uma zona localizada da pastilha semicondutora com dopagem tipo  $n$ , Fig. 1, por exemplo, com impurezas dadoras de forma a obter nessa região uma zona do tipo  $p$ : a junção  $p-n$  propriamente dita corresponde à fronteira entre a nova região do tipo  $p$  e o restante semiconductor do tipo  $n$ . No processo de formação da junção  $p-n$ , cargas livres do lado  $n$  (electrões) e cargas livres do lado  $p$  (lacunas), são transferidas, por difusão, para a região oposta, criando-se uma deficiência de electrões do lado  $n$  e de lacunas do lado  $p$ , na vizinhança da junção até se igualarem os níveis de Fermi em ambos os lados da junção. Esta distribuição de carga origina uma barreira de potencial na junção, Fig. 1 (esquerda), que se opõe ao movimento dos electrões no sentido do lado  $n$  para o lado  $p$  (o mesmo se aplica às lacunas, do lado  $p$  para o lado  $n$ ).

A aplicação de uma tensão (positiva) entre o lado  $p$  e o lado  $n$  (lado  $p$  está um potencial superior ao do lado  $n$ ) reduz a barreira de potencial, permitindo que se estabeleça uma corrente (dita directa) através da junção  $p-n$ , Fig. 1 (centro). Se ao invés se aplicar uma tensão entre o lado  $n$  e o lado  $p$ , a barreira de potencial aumenta, a corrente que atravessa a junção pode considerar-se desprezável, Fig. (direita). (Uma junção com características ligeiramente diferentes obtém-se na ligação de um semiconductor a um metal (junção semiconductor-metal).

Quando se aplica uma ddp positiva entre o ânodo (região  $p$ ) e o cátodo (região  $n$ ) como indicado na Fig. 1(centro), a barreira de potencial decresce e estabelece-se uma corrente eléctrica de  $p$  para  $n$  (o sentido convencional). Quando a tensão de polarização directa atinge um valor que anula a barreira de potencial, isto é, quando a tensão aplicada é igual à altura da barreira de potencial  $V_0$ , que no caso de junções  $p-n$  em silício é da ordem de 0.7 V, diz-se que o díodo está em estado de

franca condução. Quando em perfeita/franca condução, a queda de tensão aos terminais da junção varia muito pouco com a corrente que o percorre, mantendo-se aproximadamente igual a  $V_0 \sim 0.7$  V (no caso do silício; 0.3 V para junções de germânio).

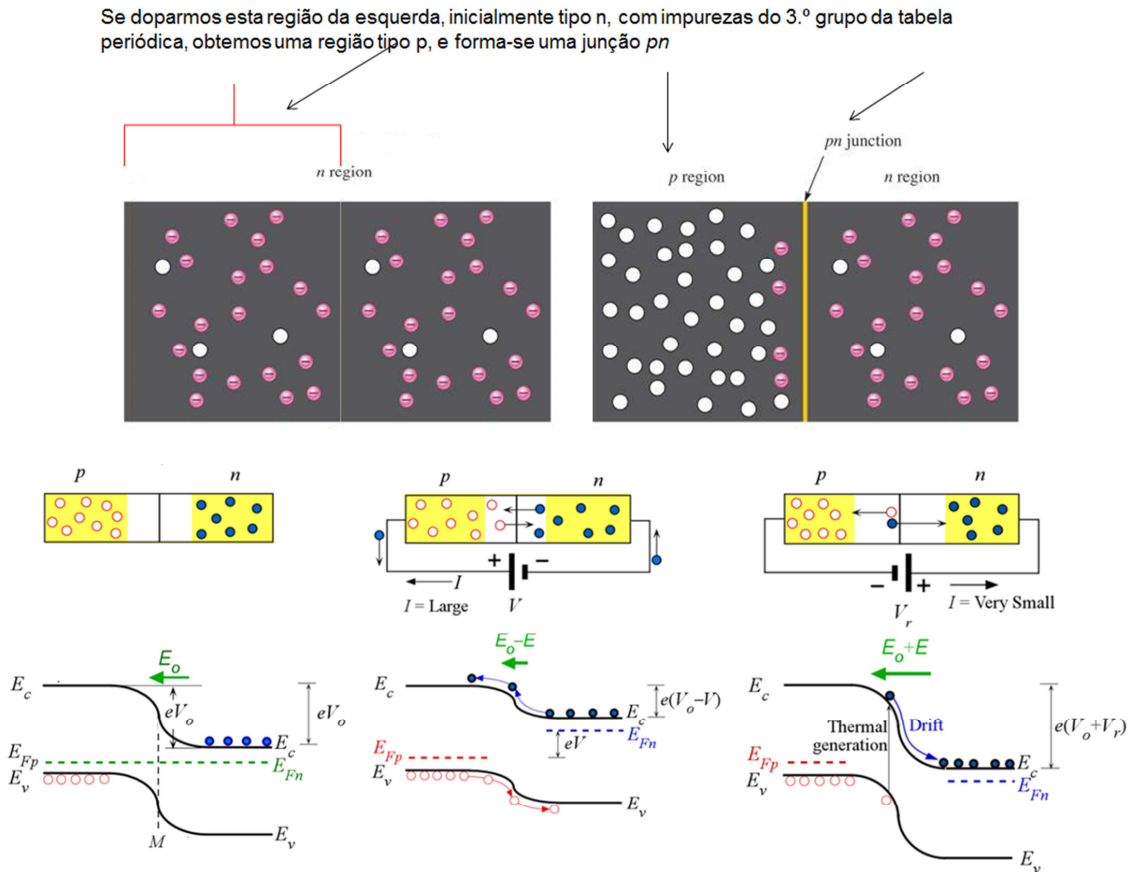


Fig. 1. Diagramas de uma junção p-n: topo) Formação da junção pn; esquerda) junção não polarizada; centro) junção polarizada diretamente; direita) junção polarizada inversamente. Os círculos preenchidos (azuis) representam elétrons livres e os círculos não preenchidos representam lacunas livres.

Nestas condições, a junção diz-se polarizada diretamente. (A tensão e a corrente são consideradas positivas quando o dispositivo se encontra polarizado diretamente, i.e., quando o potencial na região p é superior ao potencial na região n.) A relação corrente-tensão ( $I$ - $V$ ), i.e., a característica corrente-tensão ( $I$ - $V$ ) de uma junção p-n em polarização directa está representada no 1º quadrante do gráfico da Fig. 2.<sup>5</sup> A junção está polarizada inversamente, Fig. 1 (direita), quando o potencial no ânodo é inferior ao potencial no cátodo, isto é, a ddp entre p e n é negativa. Nestas condições, a

<sup>5</sup> A característica corrente-tensão ( $I$ - $V$ ) de um dispositivo corresponde à representação gráfica da corrente  $I$  que percorre o elemento em função da tensão  $V$  aplicada aos seus terminais.

altura da barreira de potencial aumenta e a junção conduz muito fracamente, apresentando elevada resistência. A característica  $I$ - $V$  da junção em **polarização inversa** está representada no 3º quadrante do gráfico da Fig. 2. O valor da corrente inversa  $I_S$  na zona de fraca condução designa-se por **corrente de fuga**, e depende das propriedades físicas da junção. A corrente de fuga  $I_S$  é da ordem de **micro/nanoampere** para junções de silício (da ordem do microampere no caso do germânio). Na prática considera-se que quando a junção está **polarizada inversamente** existe um **circuito aberto** no ramo do circuito contendo a junção  $p$ - $n$ .

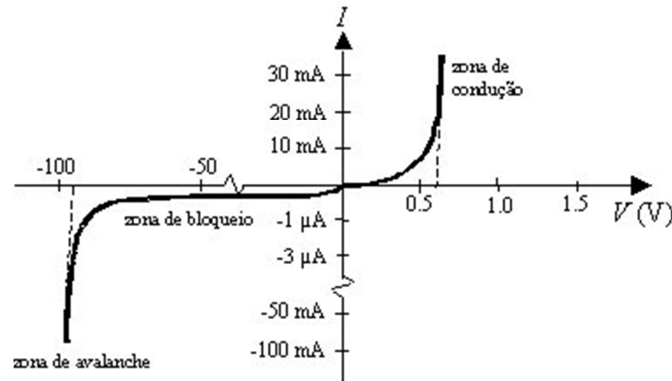


Fig. 2. Característica  $I$ - $V$  típica de uma junção  $p$ - $n$ . Note as escalas diferentes no 1º e no 3º quadrante.

Para cada junção, existe um valor de tensão de polarização inversa a partir do qual a corrente inversa (i.e., a corrente de  $n$  para  $p$ ) aumenta bruscamente, sendo apenas limitada pelos elementos externos à junção: **zona de avalanche ou ruptura**.<sup>6</sup> Este valor de tensão de polarização inversa designa-se por **tensão de rutura ou de Zener**  $V_R$  (tipicamente  $V_R \gg V_0$ ). O processo de ruptura numa junção pode ocorrer como consequência de dois mecanismos diferentes: o efeito de Zener e o mecanismo de avalanche. (Embora diferentes, ambos resultam da acção do campo eléctrico que existe na região de carga espacial da junção  $p$ - $n$ , sobre os portadores livres. O processo de rutura ocorre quando o campo eléctrico na junção atinge um valor do campo de *rutura* do material.)

A característica  $I$ - $V$  de uma junção  $p$ - $n$  na região de polarização directa (1º quadrante do gráfico da Fig. 3) tem a forma quase exponencial. Em boa aproximação, a corrente directa  $I$  é dada por:

$$I = I_S \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right), \quad (1)$$

onde  $V$  representa a tensão aos terminais da junção,  $I_S$  é a corrente de fuga. O parâmetro  $V_T$  depende da temperatura:  $V_T = k_B T / q$ , onde  $k_B$  é a constante de Boltzmann,  $q$  é a carga eléctrica elementar, e  $T$  é a temperatura absoluta; à temperatura ambiente ( $T \sim 300$  K):  $V_T = 25$  mV. No 3º quadrante, a corrente

<sup>6</sup> Desde que a corrente no díodo seja inferior a um valor que depende das características da junção, este processo de ruptura nada tem de destrutivo.

é praticamente constante e igual à corrente de fuga  $I_s$ , enquanto a tensão inversa aplicada for inferior à tensão de ruptura  $V_P$ :  $I = -I_s$ .

#### IV Díodo retificador

O dispositivo mais comum baseado numa junção  $p-n$  é o díodo retificador (elemento normalmente usado em retificação [transformação de corrente bidirecional (ca) em corrente unidirecional (cc)] e em processamento de sinal associado à retificação. Na Fig. 3 é indicado o símbolo genérico de um díodo retificador ou simplesmente díodo. Os terminais A e C designam-se por Ânodo (junção metal-semicondutor tipo  $p$ ) e Cátodo (junção semicondutor tipo  $n$  - metal) – rever Fig. 1).<sup>7</sup>

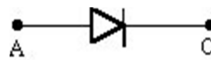


Fig. 3. Símbolo do díodo.

A característica  $I-V$  de um díodo retificador (díodo de junção) é idêntica à da Fig. 2. Contudo, em muitas situações práticas é conveniente usar versões aproximadas, mais simplificadas, da característica real de um díodo. Assim, em certas circunstâncias, pode-se aproximar o comportamento de díodo real como o corresponde ao de um díodo ideal, Fig. 4.a): **um díodo ideal** apresenta uma resistência eléctrica nula se a tensão  $V_D$  aos seus terminais for igual a 0 V - a tensão aos seus terminais da junção mantém-se constante e igual a 0 V qualquer que seja o valor da corrente directa que o atravesse; se a tensão  $V_D$  for inferior a 0 V o díodo não conduz, comportando-se como um circuito aberto.

Num modelo mais aproximado de um díodo real: considera-se que o díodo real se comporta como um **díodo ideal em série com uma fonte de tensão de força electromotriz igual à tensão limiar de condução**  $V_D=0.7$  V, Fig. 4.b). Num modelo mais próximo da realidade, um díodo real quando polarizado directamente apresenta também **uma pequena resistência à passagem da corrente**, a resistência de condução directa  $R_D$ , Fig. 4.c). Ter presente que a característica corrente-tensão de um díodo real é bem representada por uma função exponencial, isto é, a corrente varia exponencialmente com a tensão aos terminais do díodo  $V_D$ . A tangente em cada ponto dessa curva representa a resistência diferencial do díodo,  $R_D$ . A Fig. 4(c) representa a característica de um díodo **real linearizada**, modelo mais próximo da realidade.

<sup>7</sup> As denominações ânodo e cátodo correspondem às designações dos eléctrodos da válvula termiônica muito usada, antes da invenção do transístor, como retificador de corrente constituída por dois eléctrodos (ânodo e cátodo) em um gás nobre muito rarefeito.

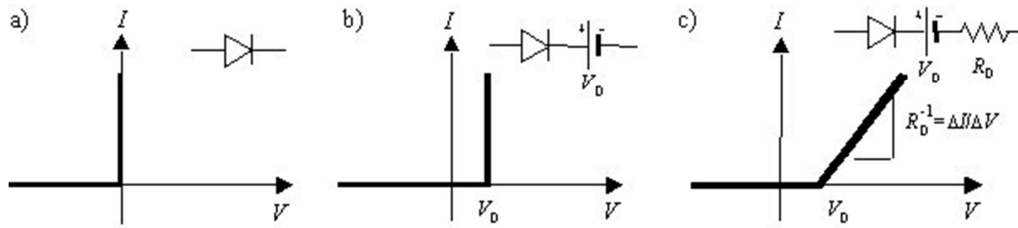


Fig. 4. Curvas características aproximadas e os correspondentes modelos eléctricos do díodo: (a) o díodo ideal; (b) o díodo ideal mais a tensão do limiar de condução  $V_D$ ; (c) o díodo com característica linearizada, isto é, o díodo ideal mais a tensão do limiar de condução  $V_D$  mais a resistência de condução direta  $R_D$ .

Relembrar que quando polarizada inversamente, uma junção  $pn$  apresenta um valor de tensão para o qual passa abruptamente do modo não condução para condução, em resultado de vários processos físico, de que se destaca o efeito avalanche. Deve-se por isso ter em atenção ao valor da tensão inversa que se aplica em comparação com a tensão de rotura de um díodo.

### V Determinação da Característica (I-V) de um Díodo

O díodo é um componente não-linear, i.e., a relação corrente-tensão não é linear. A não linearidade da característica do díodo faz com que o cálculo das correntes em circuitos contendo díodos seja um pouco mais complicado que no caso de circuitos lineares. A título de exemplo, vamos determinar a corrente no circuito da Fig. 5, que contém um díodo com a característica indicada.

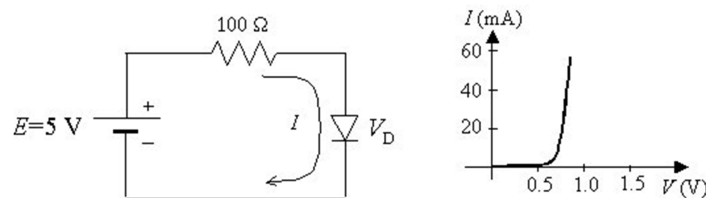


Fig. 5. Circuito contendo um díodo e característica  $I$ - $V$  do díodo.

Para determinarmos a corrente  $I$ , vamos começar por admitir que o díodo está em franca condução. Podemos então tomar a queda de tensão aos terminais do díodo como constante e igual a  $0.7\text{ V}$  (para díodos de silício), i.e., o díodo pode ser substituído por uma fonte de tensão de força eletromotriz  $0,7\text{ V}$  ( $V_D=0,7\text{ V}$ , ver Fig.4). O circuito é, portanto, transformado num circuito linear. Da lei das malhas resulta que:

$$5 - 100I - 0,7 = 0$$

$$\Leftrightarrow I = 43\text{ mA}$$

Numa primeira aproximação, o método de resolução acima apresentado é bastante simples e útil em muitas situações, permitindo estimar o valor da corrente  $I$  sem envolver cálculo elaborado. Contudo, na grande maioria dos casos é necessário conhecer o valor de  $I$  com mais rigor. E pode mesmo



acontecer que, ao contrário do que foi assumido, o díodo não esteja em franca condução. Neste caso, teremos que aplicar as leis dos circuitos tendo em conta a característica  $I$ - $V$  do díodo. Como foi referido atrás a Eq. (1) descreve, em muito boa aproximação, a característica corrente-tensão do díodo. A determinação mais precisa de  $I$  envolve a resolução de um sistema de duas equações, a equação da malha e a Eq. (1):

$$\begin{cases} V_D(I) = E - RI \\ I(V_D) = I_S \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \end{cases} \quad (2)$$

Este sistema permite-nos determinar o ponto de funcionamento. A solução é laboriosa em virtude de envolver uma equação transcendente (pressupõe-se o conhecimento dos parâmetros da Eq. (1) para o díodo em consideração). No entanto, a solução pode achar-se na forma gráfica, se dispusermos da curva característica do díodo; a equação da malha corresponde à reta de carga do circuito:

$$I(V_D) = \frac{5}{100} - \frac{V_D}{100}. \quad (3)$$

Podemos traçar num mesmo gráfico a reta de carga do circuito e a característica do díodo. O valor da corrente no circuito corresponde ao ponto de intersecção da reta de carga do circuito e da característica do díodo, i.e.,  $I=I_D$  e  $V=V_D$ . Esta situação está representada na Fig. 6. Do gráfico obtém-se  $I_D=42$  mA.

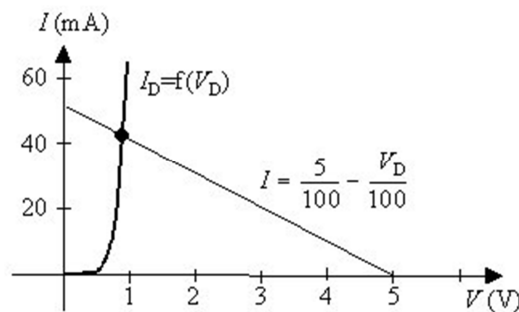




Fig. 6. Reta de carga do circuito e característica  $I$ - $V$  do díodo.


#### IV Outros tipos de díodos

Há junções  $p$ - $n$  desenhadas especificamente para várias finalidades/funcionalidades. São indicados a seguir outros tipos de díodos de junção e as respectivas aplicações.

Díodo de Zener (  ): díodo desenhado especialmente para operar na região de avalanche/ruptura, onde a tensão aos terminais do díodo, tensão de Zener  $V_Z$ , permanece

praticamente constante, ainda que a corrente inversa varie significativamente. O díodo de Zener é muito utilizado em circuitos estabilizadores de tensão como elemento de referência de tensão.

Díodo de Túnel (): este díodo obtido dopando fortemente as regiões  $p$  e  $n$  da junção, por forma que o nível de Fermi do lado  $p$  se localiza na banda de valência e o nível de Fermi do lado  $n$  se situa na banda de condução. Neste caso diz-se que a junção está degenerada. Nestas condições, a **espessura barreira de potencial** existente entre os lados  $p$  e  $n$  é da ordem de grandeza do comprimento de onda dos electrões no semiconductor, permitindo que os electrões de condução do lado  $n$  atravessem a barreira de potencial da junção transitando directamente da banda de condução do lado  $n$  para a banda de valência do lado  $p$ , onde há estados desocupado acima do nível de Fermi. Este processo é uma demonstração do efeito de túnel em estruturas semicondutoras (efeito de natureza inteiramente quântica). O contrário do que acontece no díodo rectificador, em polarização directa a corrente começa por aumentar com a tensão até atingir um máximo local decrescendo em seguida até atingir um mínimo local, aumentando monotonamente a partir deste ponto (a partir do mínimo de corrente a curva  $I-V$  do díodo túnel é idêntica à do díodo rectificador). Uma das características mais importantes da curva  $I-V$  do díodo túnel é a existência de uma região na qual  $dI/dV < 0$ , **região de condutância/resistência diferencial negativa**, o que corresponde a uma resistência negativa para sinais de corrente alternada, cujo valor depende da tensão aplicada ao díodo. ([https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel diode](https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_diode)) Quando operando nesta região de resistência diferencial negativa, o díodo túnel fornece potência ac ao circuito, ao contrário de uma resistência ou díodo rectificador que dissipam sempre energia. Estes díodos são utilizados em circuitos osciladores e amplificadores de sinal. Como o tempo de transição é muito pequeno, o díodo túnel é um dispositivo bastante rápido (a frequência de corte destes componentes pode atingir dezenas de GHz).<sup>8</sup>

Varator (varicap/varistor) (): em geral, a capacidade eléctrica da junção de um díodo varia com a tensão aos seus terminais. Os varatores são díodos de junção especialmente desenhados de forma a fortalecer a dependência na tensão da capacidade da junção. São muito usados em osciladores cuja frequência é controlada por tensão (“voltage control oscillators, VCOs”).

### Díodo de Barreira de Schottky


Quando um metal é colocado em contacto directo com um semiconductor, ocorre uma transferência de cargas de um lado para o outro de modo a igualar os níveis de Fermi, à semelhança do que acontece numa junção  $p-n$ . A diferença entre o contacto de dois semicondutores e o contacto metal-semiconductor resulta de os vazios não poderem passar do semiconductor para o metal.<sup>9</sup> A transferência de carga origina zonas de carga de polaridade opostas de ambos os lados da junção, resultando numa barreira de potencial designada de barreira de Schottky. Não é de estranhar, portanto, que a característica corrente-tensão de uma junção metal-semiconductor seja semelhante à da junção  $p-n$ . Na verdade, o primeiro elemento semiconductor construído foi díodo de contacto


<sup>8</sup> Existem vários díodos com uma ou mais junções  $p-n$ , muito usados em osciladores e geradores de micro-ondas, com a capacidade de produzir potências de dezenas de watt.

<sup>9</sup> Os vazios são quase-partículas que *existem* apenas nos semicondutores.

metal-semicondutor, usado como detector nos primeiros rádios. Foi também com contactos metal-semicondutor que o primeiro transístor foi construído em 1947. Ao contrário do que acontece numa junção  $p-n$ , a corrente no díodo Schottky é devida aos portadores maioritários, o que faz com que a frequência de corte neste díodo seja muito superior à do díodo de junção  $p-n$ . Verifica-se também, que a tensão de franca condução  $V_D$  é significativamente inferior à da junção  $p-n$ . Estes díodos não suportam correntes elevadas, não podendo ser usados em circuitos rectificadores. Os díodos Schottky são muito usados como detectores de sinais de alta-frequência.

### Díodos de Junção Optoelectrónicos

Fotodíodo () , detector de radiação ótica na banda do visível e infravermelho próximo: a zona de junção das regiões  $n$  e  $p$  é deficitária em cargas livres (região de depleção ou região de carga espacial). A radiação ótica de energia superior à largura da banda proibida entre as bandas de condução e de valência (ou hiato do semiconductor) incidente na região de depleção é fortemente absorvida, gerando pares de portadores de carga (pares electrão-vazio) que por acção do campo eléctrico existente na junção são removidos da junção e injectados no circuito, contribuindo para a corrente total no circuito. Os foto-díodos são díodos desenhados para maximizar a conversão optoelectrónica e em geral são operados em polarização inversa. Estes dispositivos são utilizados como detectores de luz nas mais diversas aplicações, desde simples detectores ópticos até sofisticados sistemas de comunicação óptica.

LED (“light emitting diode”, ) , díodo emissor de luz: a injeção de portadores de carga na zona da junção  $p-n$  aumenta a probabilidade de ocorrência de transições com emissão radiativa. O aumento da concentração de electrões na região  $p$  e de vazios na região  $n$  estimula as transições da banda de condução para a banda de valência. LEDs são junções especialmente desenhadas para maximizar a probabilidade das transições radiativas entre a banda de condução e a banda de valência. A emissão radiativa (conversão eletro-óptica) só é significativa em semicondutores de hiato directo.<sup>10</sup> A energia da radiação electromagnética emitida depende do valor do hiato do semiconductor  $E_g$ . Para o GaAs  $E_g=1.424$  eV, e, portanto, a radiação emitida é infravermelha ( $\sim 870$  nm); os LEDs de AlGaAs podem ser desenhados para emitir no visível ( $\sim 400 - 750$  nm).

Díodo laser: “LED” desenhado de forma a maximizar a conversão eletro-óptica, com confinamento e realimentação da radiação gerada, cuja emissão de radiação reside essencialmente no processo de **emissão estimulada**. Os lasers são fontes ópticas de elevada pureza espectral e a radiação emitida é coerente. São usados, por exemplo, em leitores de disco compacto, em sistemas de comunicação por fibra óptica e como fontes de energia para outros lasers.

<sup>10</sup> Um semiconductor diz-se de hiato directo, quando o valor de energia mínima nas bandas de condução e o valor da energia máxima nas bandas de valência ocorre no mesmo ponto do espaço dos momentos  $\vec{k}$  (vetor de onda dos electrões e das lacunas). O silício é um semiconductor hiato indirecto; o GaAs é um semiconductor directo.

## VII Circuitos de Rectificação e de Detecção de Pico

O díodo de junção é um elemento não-linear, i.e., possui uma característica corrente-tensão ( $I-V$ ) não linear. Como elemento não-linear apresenta inúmeras aplicações. Uma das mais comuns é a **rectificação** de uma tensão alternada, i.e., transformação de corrente bidireccional em corrente unidireccional. Outra aplicação do díodo, baseada na sua propriedade de rectificação, é em circuitos detectores de pico, empregues na detecção de ondas moduladas em amplitude nos receptores de rádio. Neste trabalho analisam-se, detalhadamente, circuitos rectificadores e de filtragem.

Em geral, um circuito electrónico com componentes discretos e/ou integrados, necessita de uma tensão de alimentação contínua para um funcionamento eficiente. Uma vez que o fornecimento de energia eléctrica é realizado na forma de tensão alternada, é necessário transformar esta tensão em tensão contínua. A grande maioria dos equipamentos eléctricos/electrónicos tem, em geral, associada uma fonte de alimentação de tensão contínua ou circuito complementar que realiza a necessária conversão. O processo de transformação de uma tensão alternada em tensão contínua é designado por rectificação. Na rectificação uma das alternâncias do sinal alterno é eliminada ou então o seu sentido é invertido.

Em associação com condensadores e resistências, os díodos são usados em **circuitos detectores de pico**, i.e., circuitos que *determinam* o valor de pico de um dado sinal. Os circuitos detectores de pico podem ser, também, usados como **circuitos desmoduladores**. O díodo é aplicado em **circuitos limitadores** e **circuitos fixadores de nível**. Com circuitos contendo díodos e resistências, é possível alterar, por exemplo, uma onda triangular, transformando-a, aproximadamente, numa sinusóide. Os díodos são, também, muito úteis em **circuitos multiplicadores de tensão**. As aplicações atrás enumeradas podem ser consideradas aplicações de potência. Os díodos são também muito usados em **aplicações de sinal**. Outra aplicação do díodo é em electrónica digital. Díodos, em associação com resistências, podem ser usados para implementar as portas lógicas digitais **OU** e **E**.

A capacidade de conduzir num só sentido faz do díodo de junção um elemento extremamente útil para materializar várias funções. O díodo de junção alimentado por uma tensão alternada conduz numa das alternâncias, passando ao estado de bloqueio na alternância seguinte. Assim, usando um ou mais díodos, é possível transformar uma tensão alternada em tensão unidireccional.

### A. Rectificação de Meia Onda

A capacidade de conduzir num só sentido faz do díodo de junção um elemento extremamente útil para materializar várias funções. O díodo de junção alimentado por uma tensão alternada conduz numa das alternâncias, passando ao estado de bloqueio na alternância seguinte. Assim, usando um ou mais díodos, é possível transformar uma tensão alternada em tensão unidireccional. Consideremos o circuito da Fig. 7, ao qual é aplicada uma tensão sinusoidal  $v_i$ . Qual será a forma do sinal de saída  $v_o$ . Para simplificar, vamos supor que se trata de um díodo ideal, isto é, durante as arcadas positivas da sinusóide comporta-se como um interruptor fechado, e como um interruptor aberto para as arcadas negativas, s da rectificação de meia onda.

8(a). A forma de onda de saída está representada em Fig. 8(b).

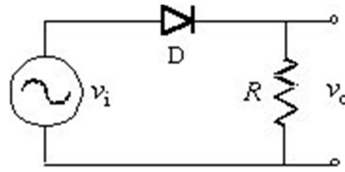


Fig. 7. Circuito rectificador de meia onda.

Conclui-se que o circuito da Fig. 7 elimina as alternâncias negativas da tensão de entrada, obtendo-se na saída apenas *metade* do sinal de entrada, i.e., há supressão de uma alternância e aproveitamento da outra. O circuito funciona como um **rectificador de meia onda**; o valor médio do sinal rectificado é igual a  $V_p/\pi$ . Ter em atenção que, durante a arcada negativa, a tensão aos terminais do díodo é igual ao valor de pico da tensão de entrada. Portanto, a tensão a rectificar deve ter um valor de pico significativamente inferior à tensão de ruptura do díodo  $V_R$ .

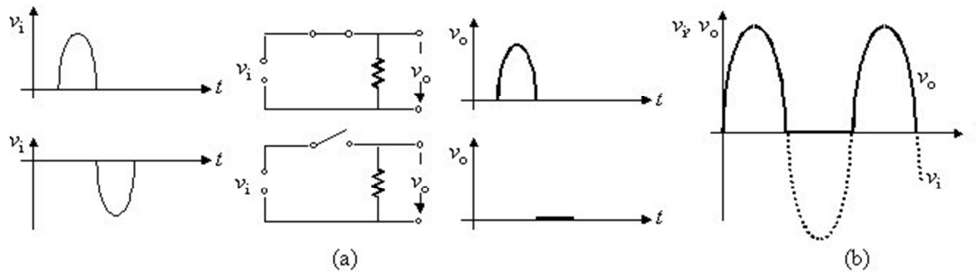


Fig. 8. Fases da rectificação de meia onda.

## B. Rectificação de Onda Completa

É possível aproveitar as duas alternâncias, e, portanto, duplicar o valor médio do sinal de saída: **rectificação de onda completa**. O circuito da Fig. 9 executa rectificação de onda completa, i.e., os dois semiciclos de tensão alternada passam a ter a mesma polaridade, aproveitando as duas alternâncias da onda. Os díodos assim ligados constituem uma **ponte rectificadora**.

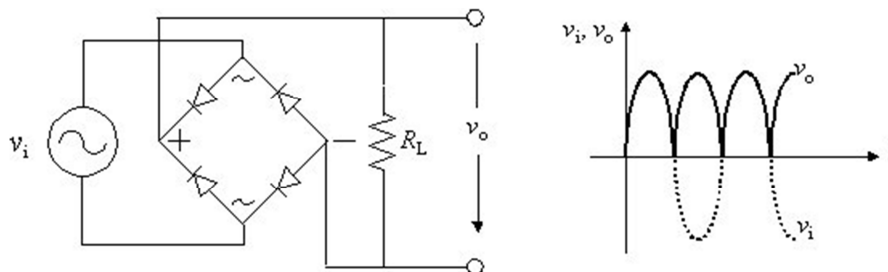


Fig. 9. Rectificação de onda completa.

A análise cuidada do circuito permite verificar que numa alternância um par de díodos colocados em posições opostas no losango conduz, enquanto o outro par bloqueia. Invertendo-se os papéis na alternância seguinte. Desta forma a corrente através da resistência apresenta sempre o mesmo sentido e a tensão de saída (tensão aos terminais da resistência) tem a forma indicada na Fig. 3. O valor médio da tensão de saída é agora igual a  $2V_p/\pi$ . Deve-se ter em atenção que a tensão à saída da ponte rectificadora deve ser substancialmente menor do que a **tensão de ruptura dos díodos**.

O sinal de entrada na ponte rectificadora pode ser a tensão no secundário de um transformador ou o sinal da rede. Está dado o primeiro passo para obter, a partir de uma tensão alternada, uma tensão contínua, essencial para o funcionamento de muitos dos circuitos electrónicos. Se se pretender um sinal de valor médio superior ou com menor ondulação, coloca-se na saída do circuito rectificador um filtro, geralmente, formado por condensadores e/ou bobines.

No caso do sinal de entrada ser proveniente de um gerador de sinal, alimentado a partir da rede, e a fonte de tensão alternada ou o seu equivalente tiver um terminal à massa, a carga  $R_L$  deverá estar flutuante; se a fonte de tensão alternada estiver flutuante (não tiver um terminal à massa), podemos ligar qualquer dos terminais de  $R_L$  ao comum do circuito. Quando se implementa uma ponte rectificadora, é sempre necessário ter o cuidado de ver em que caso se está, para evitar curto-circuito.

### C. Circuito Detector de Pico – Filtragem

Na secção anterior, foram apresentados os circuitos capazes de obter tensões unidireccionais, constituídas por uma tensão contínua à qual se sobrepõe uma tensão alternada, de frequência  $2f$  no caso de rectificação completa e de frequência  $f$  no caso de rectificação de meia onda.

Há circuitos/equipamentos que só desempenham a sua acção de forma eficiente se a ondulação do sinal rectificado for muito pequena ou praticamente nula. A tensão unidireccional produzida pelo circuito representado na Fig. 10 não é constante. Esta ondulação pode ser eliminada incorporando um filtro, geralmente, formado por condensadores e/ou bobines, à saída da ponte rectificadora.

O circuito representado na Fig. 10 é utilizado em diversas aplicações, que vão da rectificação de sinais alternados à descodificação de um sinal AM (amplitude modulada).

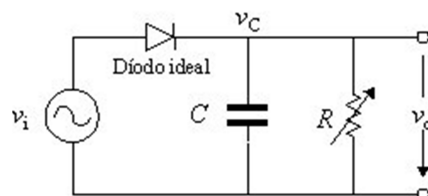


Fig. 10. Circuito detector de pico.

Quando se aplica ao circuito a forma de onda indicada na Fig. 11, a tensão aos terminais do condensador  $v_C$  irá acompanhar a tensão de entrada porque, sendo a díodo ideal, logo que  $v_i \geq 0$  o díodo conduz (actua como curto-circuito) e o condensador carrega com uma constante de tempo muito pequena quando comparada com o período da tensão de entrada. Após  $v_i$  atingir  $V_p$  inicia-se a fase descendente, começando o condensador a descarregar, mas agora, com uma constante de tempo  $\tau=RC$  muito maior. Se  $\tau$  for consideravelmente superior ao período  $T$  do sinal de entrada, a tensão  $v_C$  vai diminuir muito mais lentamente do que  $v_i$  e o díodo ficará em corte até que  $v_i(t)$  volte a ser maior ou igual a  $v_C(t)$ . Enquanto a tensão  $v_C(t)$  decresce, a tensão de entrada  $v_i$  vai evoluir, até atingir o seu valor mínimo, e começar de novo a aumentar. A partir do instante em que  $v_i$  iguala  $v_C$  ( $= V_{C_{\min}}$ ), o díodo passa a conduzir novamente e a tensão aos terminais do condensador acompanha o crescimento de  $v_i$ , até a tensão de entrada atingir  $V_p$ . O processo agora descrito repete-se enquanto subsistir  $v_i$ . Se  $\tau \gg T$ , o condensador descarrega muito pouco até ao início do período de carga seguinte. Se o circuito a montante do condensador for rectificador de onda completa, a situação é mais vantajosa do ponto de vista energético, uma vez que  $\tau$  compete com  $T/2$ , i.e., o condensador tem menos tempo para descarregar.

O sinal de saída apresenta uma oscilação com amplitude  $V_p - V_{C_{\min}}$ , como está esquematicamente representado na Fig. 11. Ter em atenção que durante a fase de bloqueio o díodo está sujeito a uma tensão inversa igual a  $2V_p$ .

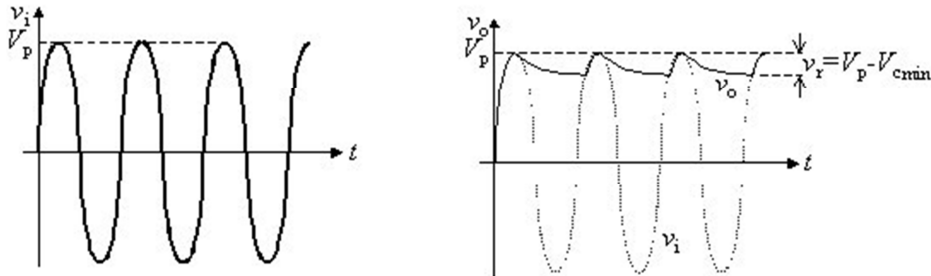


Fig. 11. Formas de onda de entrada e de saída do circuito da Fig. 4.

A ondulação da tensão de saída devida à carga, seguida da descarga do condensador, é conhecido como “ripple” ou **ondulação residual**, e o valor da amplitude da ondulação designa-se por **tensão residual** ou de “ripple”  $V_r$ . A amplitude da tensão residual  $V_r$  depende da relação entre o tempo de descarga do condensador (a constante de tempo do circuito de descarga é  $RC$ ), e o período  $T$  do sinal de entrada:

$$V_r \approx V_p \frac{T}{2RC} . \quad (1)$$

Para um dado sinal de entrada, de frequência constante, quanto maior for a constante de tempo  $\tau=RC$ , menor será  $V_r$ , já que maior será  $V_{C_{\min}}$ . Para uma dada frequência do sinal de entrada, a frequência de saída de rectificação de onda completa é o dobro da frequência de saída da

rectificação de meia onda. Em resultado, a filtragem em um rectificador de onda completa é energeticamente mais favorável, pois o valor médio da tensão de saída é superior, uma vez que a ondulação residual é menor.

A razão entre o valor de amplitude da ondulação e o valor médio da tensão de saída, define o grau de ondulação  $F_r (=V_r/V_m)$ , também conhecido como fator de “ripple”. O grau de ondulação indica a maior ou menor aproximação da tensão de saída a uma tensão contínua. Define-se o fator de forma  $F_f$  de uma grandeza ondulatoria como a razão entre o valor eficaz e o valor médio da ondulação. Na rectificação de onda completa sem rectificação obtém-se:  $F_r=0.48$  e  $F_f=1.11$  ( $F_r=1.21$  e  $F_f=1.57$ , no caso de rectificação de meia onda).<sup>11</sup> Idealmente, o fator de “ripple” seria igual a zero ( $F_r=0$ ), enquanto o factor de forma seria igual a 1 ( $F_f=1$ ).

Como veremos, mais tarde, há circuitos/componentes que necessitam de ser alimentados com duas fontes de alimentação de polaridade oposta,  $\pm V_{cc}$ . Na Fig. 12 representa-se o esquema de um circuito de rectificação de onda completa bipolar. Qualquer das duas fontes parciais, indicadas na Fig. 12, é de rectificação de onda completa.

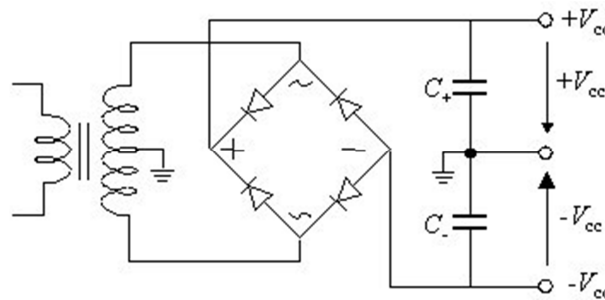


Fig. 12. Circuito rectificador bipolar.

Deve ter-se em atenção, ao dimensionar uma fonte deste tipo, é necessário não esquecer que quando **um diodo não conduz fica sujeito a uma tensão inversa igual ao valor da tensão de pico**. Convém, também, lembrar que, para além do valor da capacidade, é necessário conhecer a **tensão máxima à qual o condensador pode estar sujeito**, assim como o valor da corrente que o vai atravessar.

#### D. Estabilização

O valor da tensão de saída no circuito da Fig. 10 acompanha as variações do valor de pico da tensão de entrada, isto é, se o valor de pico da tensão alternada variar, o valor médio da tensão de saída

<sup>11</sup> A tensão que temos vindo a usar corresponde a uma tensão monofásica. Contudo, a eficiência da rectificação aumenta se forem empregues sinais de entrada polifásicos (por exemplo, sinais trifásicos). A frequência da tensão monofásica em Portugal é igual a 50 Hz; o valor de pico da tensão (amplitude) é  $\sim 311$  V ( $220\sqrt{2}$  V).



segue essa variação, i.e., a variação da tensão alternada, essa variação é transmitida à tensão de saída. A tensão de saída depende, também, da carga, i.e., se se pedir corrente, a tensão diminui. Porém, há um sem número de equipamentos que não tolera variações na tensão contínua de alimentação, sendo necessário adicionar ao circuito rectificador com filtragem um bloco estabilizador. É corrente definir a **regulação** de uma fonte de tensão, como:

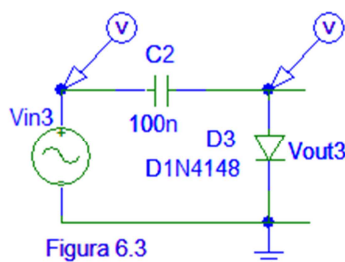
$$\text{Regulação} = (V_{0\text{vazio}} - V_{0\text{carga-máxima}}) / V_{0\text{vazio}} \times 100\%. \quad (2)$$

Pode-se definir, de modo inteiramente análogo, uma regulação para variações da tensão de entrada. É costume falar em **regulação de linha** e **regulação de carga**.

O díodo de Zener é um dispositivo capaz de manter uma diferença de potencial praticamente constante entre os seus terminais, ainda que varie sensivelmente a corrente que o atravessa, e é, muitas vezes, empregue na estabilização da tensão de saída do circuito rectificador. Um díodo Zener polarizado inversamente, de tensão de ruptura igual ao valor da tensão pretendida para a saída, é colocado, em série com uma resistência, entre aos terminais de saída do circuito rectificador com filtragem. A tensão *não regulada* deve ser superior à tensão de ruptura do díodo. É essencial que a corrente que percorre o díodo seja suficiente para o manter em regime de ruptura (ou avalanche).<sup>12</sup> Para tensões pequenas (poucos volts), é comum usar díodos rectificadores polarizados directamente, em série, até perfazer a tensão pretendida. Contudo, existem circuitos integrados, contendo a ponte rectificadora, o circuito de filtragem e o elemento/bloco de estabilização, capazes de proporcionar uma tensão contínua regulável.

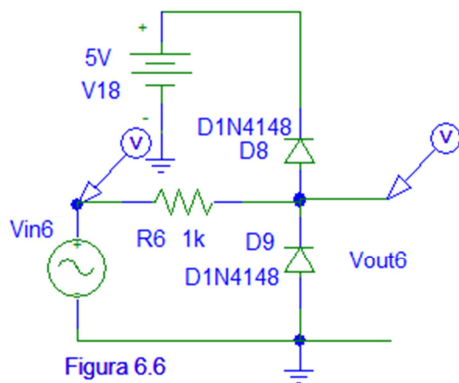
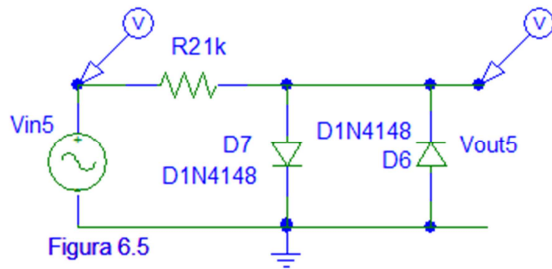
Antes de terminar este guia, convém fazer referência a um aspecto de ordem prática: quando desligamos uma fonte, se aos seus terminais não se encontrar ligada qualquer carga, os condensadores de filtragem permanecem carregados, o que pode ser perigoso para pessoas e equipamentos. É, por isso, conveniente colocar em paralelo com eles uma **resistência de sangria** de valor muito superior ao da carga habitual, a qual assegura a descarga do condensador ao fim de alguns segundos.

### E. Circuito fixador de nível

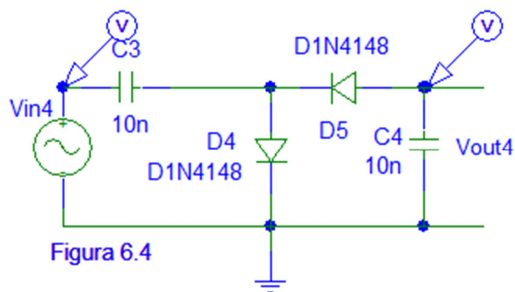


### F. Circuito limitador

<sup>12</sup> O conhecimento da potência a dissipar no díodo Zener é fundamental para a escolha do díodo a utilizar.



### G. Circuito duplicador / multiplicador de tensão



### Bibliografia

Microelectronic Circuits, Section 3.6 (Rectifier Circuits), 3ª Edição, A. S. Sedra, and K. C. Smith, Saunders College Publishing, London 1991.

Electronics Fundamentals: Circuits, Devices, and Applications, T. L. Floyd, Prentice-Hall, 2000.

Electrónica Analógica, António J. G. Padilla, Editora McGraw-Hill de Portugal, 1993.

Física de Materiais e Dispositivos Electrónicos, Sérgio M. Rezende, Editora da Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 1996.