



**MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL  
FORÇA AÉREA PORTUGUESA  
CENTRO DE FORMAÇÃO MILITAR E TÉCNICA**

Curso de Formação de Praças - RC

**COMPÊNDIO**

**ELECTRÓNICA ELEMENTAR**

EPR: NEL

CCF 335-35

Março 2009







**MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL  
FORÇA AÉREA PORTUGUESA  
CENTRO DE FORMAÇÃO MILITAR E TÉCNICA**

**CARTA DE PROMULGAÇÃO**

**MARÇO 2009**

1. O Compêndio de "Electrónica Elementar" é uma Publicação "NÃO CLASSIFICADA".
2. Esta publicação entra em vigor logo que recebida.
3. É permitido copiar ou fazer extractos desta publicação sem autorização da entidade promulgadora.

**O COMANDANTE**



**José Alberto Fangueiro da Mata**

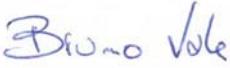
**COR/PILAV**



## **REGISTO DE ALTERAÇÕES**

IDENTIFICAÇÃO DA ALTERAÇÃO, Nº DE REGISTO, DATA	DATA DE INTRODUÇÃO	DATA DE ENTRADA EM VIGOR	ASSINATURA, POSTO E UNIDADE DE QUEM INTRODUZIU A ALTERAÇÃO



<b>Cursos:</b>	Curso de Formação de Praças – RC
<b>Nome do Compêndio:</b>	Electrónica Elementar
<b>Disciplina:</b>	Fundamentos de Electrónica, Electrónica Elementar
<b>Data:</b>	Janeiro 2009
<b>Compilado Por:</b>	TEN/TMMEL Bruno Vale
<b>Verificado Por:</b>	Gabinete da Qualidade da Formação
<b>Comando G. Formação:</b>	TCOR / ENGAER José Saúde 
<b>Director de Área:</b>	MAJ / TMMEL Abílio Carmo 
<b>Director de Curso:</b>	TEN / TMMEL Jorge Martins 
<b>Formador:</b>	TEN / TMMEL Bruno Vale 

## ATENÇÃO:

Esta publicação destina-se a apoiar os formandos a frequentarem o Curso de Formação de Praças nas especialidades MARME, MMA, MMT, OPCOM e OPINF nas disciplinas de Fundamentos de Electrónica e Electrónica Elementar.

Não pretendendo ser uma publicação exaustiva do curso em questão, apresenta-se como uma ferramenta de consulta quer durante a duração do curso, quer após a sua conclusão.



# ÍNDICE

<b>FÍSICA DOS SEMICONDUTORES .....</b>	<b>7</b>
<b>ESTRUTURA ATÓMICA .....</b>	<b>7</b>
<b>MOLÉCULAS.....</b>	<b>7</b>
<b>ÁTOMO.....</b>	<b>9</b>
<b>O EQUILÍBRIO ELÉCTRICO DO ÁTOMO.....</b>	<b>9</b>
<b>O EQUILÍBRIO MECÂNICO DO ÁTOMO.....</b>	<b>10</b>
<b>CONDUTORES, ISOLADORES E SEMICONDUTORES .....</b>	<b>10</b>
<b>CONDUTORES.....</b>	<b>10</b>
<b>ISOLADORES.....</b>	<b>10</b>
<b>SEMICONDUTORES.....</b>	<b>10</b>
<b>NÍVEIS DE ENERGIA .....</b>	<b>12</b>
<b>ESTRUTURA ATÓMICA DO SILÍCIO E DO GERMÂNIO .....</b>	<b>13</b>
<b>SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS E INTRÍNSECOS .....</b>	<b>14</b>
<b>IMPUREZAS TRIVALENTES E PENTAVALENTES .....</b>	<b>15</b>
<i>Impurezas Dadoras ou Pentavalentes.....</i>	<i>15</i>
<i>Impurezas Aceitadoras ou Trivalentes.....</i>	<i>15</i>
<b>SEMICONDUTORES TIPO N E TIPO P.....</b>	<b>16</b>
<i>Semicondutores Tipo N.....</i>	<i>16</i>
<i>Semicondutores do Tipo P .....</i>	<i>16</i>
<b>DÍODO DE JUNÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>FORMAÇÃO DA JUNÇÃO PN .....</b>	<b>17</b>
<b>CONSTITUIÇÃO DA JUNÇÃO PN .....</b>	<b>18</b>
<b>SÍMBOLO GRÁFICO .....</b>	<b>18</b>
<b>CAMPO ELÉCTRICO DA JUNÇÃO PN .....</b>	<b>19</b>
<b>POLARIZAÇÃO DIRECTA E INVERSA DA JUNÇÃO PN.....</b>	<b>19</b>
<i>Polarização Directa.....</i>	<i>19</i>
<i>Polarização Inversa.....</i>	<i>19</i>
<b>CURVA CARACTERÍSTICA E APROXIMAÇÕES MATEMÁTICAS.....</b>	<b>20</b>
<b>CURVA CARACTERÍSTICA .....</b>	<b>20</b>
<b>PARÂMETROS DO DÍODO.....</b>	<b>20</b>
<b>APLICAÇÕES DOS DÍODOS DE JUNÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>TESTE DE DÍODOS USANDO UM MULTÍMETRO.....</b>	<b>22</b>
<i>Multímetro Analógico .....</i>	<i>22</i>
<i>Multímetro Digital .....</i>	<i>23</i>
<b>DÍODOS ESPECIAIS .....</b>	<b>25</b>

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>O DÍODO ZENER.....</b>	<b>25</b>
<b>FOTODÍODO .....</b>	<b>27</b>
<b>SÍMBOLO GRÁFICO .....</b>	<b>28</b>
<b>LED .....</b>	<b>28</b>
<b>SÍMBOLO GRÁFICO .....</b>	<b>29</b>
<b>TENSÃO E CORRENTE DO LED.....</b>	<b>29</b>
<b>BRILHO DO LED.....</b>	<b>29</b>
<b>INDICADOR DE SETE SEGMENTOS .....</b>	<b>30</b>
<b>FONTES DE ALIMENTAÇÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>TRANSFORMADOR.....</b>	<b>31</b>
<b>CIRCUITOS RECTIFICADORES.....</b>	<b>32</b>
<b>RECTIFICAÇÃO DE MEIA ONDA .....</b>	<b>32</b>
<b>RECTIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA COM PONTO MÉDIO.....</b>	<b>33</b>
<b>CARACTERÍSTICAS DO RECTIFICADOR .....</b>	<b>34</b>
<i>Frequência de saída .....</i>	<i>34</i>
<b>RECTIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA COM PONTE DE DÍODOS.....</b>	<b>34</b>
<b>FILTROS.....</b>	<b>36</b>
<b>FILTROS RC .....</b>	<b>36</b>
<b>ESTABILIZADOR .....</b>	<b>37</b>
<b>TRANSÍSTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>O TRANSÍSTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>CONSTITUIÇÃO DO TRANSÍSTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>SÍMBOLO GRÁFICO .....</b>	<b>40</b>
<b>FUNCIONAMENTO DOS TRANSÍSTORES .....</b>	<b>41</b>
<b>CORRENTES DO TRANSÍSTOR .....</b>	<b>42</b>
<b>CURVA CARACTERÍSTICA.....</b>	<b>43</b>
<b>TIPOS DE MONTAGEM.....</b>	<b>46</b>
<i>Emissor Comum.....</i>	<i>46</i>
<i>Colector Comum.....</i>	<i>46</i>
<i>Base Comum.....</i>	<i>47</i>
<i>Zonas de funcionamento .....</i>	<i>47</i>
<b>O TRANSÍSTOR COMO COMUTADOR E AMPLIFICADOR .....</b>	<b>48</b>
<b>TIRISTORES .....</b>	<b>51</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>SCR .....</b>	<b>52</b>

<b>SÍMBOLO GRÁFICO</b> .....	54
<b>CIRCUITOS DE DISPARO DO TIRISTOR</b> .....	55
<b>PROTECÇÃO DO TIRISTOR FRENTE A ALTAS VARIAÇÕES DE CORRENTE (<math>\partial I/\partial T</math>) E DE TENSÃO (<math>\partial V/\partial T</math>)</b> .....	56
<b>MÉTODOS E CIRCUITOS DE COMUTAÇÃO</b> .....	56
<b>TRIAC</b> .....	57
<b>SÍMBOLO GRÁFICO</b> .....	57
<b>CURVA CARACTERÍSTICA</b> .....	58
<b>COMUTAÇÃO POR ZERO</b> .....	59
<b>DIAC</b> .....	59
<b>SÍMBOLO GRÁFICO</b> .....	60
<b>CONTROLO DE FASE DE ONDA COMPLETA</b> .....	61
<b>OSCILADORES</b> .....	63
<b>OSCILADORES RC</b> .....	64
<i>Oscilador em ponte de Wien</i> .....	64
<i>Oscilador de duplo T</i> .....	65
Filtro de duplo T .....	65
Oscilador de duplo T .....	66
<i>Oscilador de desfasamento</i> .....	66
<b>OSCILADORES LC</b> .....	67
<i>Oscilador de Colpitts</i> .....	68
<i>Condição de funcionamento</i> .....	69
<i>Oscilador de Armstrong</i> .....	69
<i>Oscilador de Hartley</i> .....	70
<b>OSCILADOR A CRISTAL</b> .....	70
<b>MULTIVIBRADORES</b> .....	72
<b>TEMPORIZADOR 555</b> .....	72
<i>Funcionamento monoestável</i> .....	72
<i>Funcionamento astável</i> .....	73
<i>Esquema funcional</i> .....	74
<b>AMPLIFICADORES OPERACIONAIS</b> .....	75
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	75
<b>AMPLIFICADOR OPERACIONAL</b> .....	75
<b>AMPLIFICADOR INVERSOR</b> .....	76
<b>AMPLIFICADOR NÃO – INVERSOR</b> .....	77
<b>SEGUIDOR DE TENSÃO</b> .....	77
<b>AMPLIFICADOR DA DIFERENÇA</b> .....	78
<b>INTEGRADOR INVERSOR</b> .....	78
<b>AMPLIFICADOR DIFERENCIADOR</b> .....	79
<b>O PAR DIFERENCIAL</b> .....	79

<b>FILTROS ACTIVOS .....</b>	<b>80</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>83</b>
<b>LISTA DE PÁGINAS EM VIGOR .....</b>	<b>LPV-1</b>

# FÍSICA DOS SEMICONDUTORES

## ESTRUTURA ATÓMICA

Toda a matéria existente é formada por um número infinito de substâncias, aparentemente diferentes e que podem ser observadas pelos nossos sentidos, sob a forma de três estados distintos, nomeadamente o sólido, o líquido e o gasoso.

Durante o período do Renascimento, a Química veio a provar que existe um número de substâncias limitado e que toda a infinidade de substâncias que conhecemos é fruto das combinações entre aquelas. São 106 as substâncias que estão catalogadas numa tabela, designada por **Tabela Periódica** e que pode ser consultada na figura 1. Os elementos 93 a 103, denominados transuranianos, foram sintetizados.

Como já anteriormente foi referido, as 106 substâncias que constituem os elementos, combinando-se entre si de diversas formas, dão, por sua vez, origem a milhares de outras substâncias que se chamam compostos. Como exemplos de compostos temos por exemplo a água, o cloreto de sódio, o amoníaco, etc.

## MOLÉCULAS

Ao ser analisado um composto qualquer, por exemplo uma pedra de sal, ao iniciar um processo de divisões consecutivas, verifica-se que a dada altura, a mesma deixa de apresentar as propriedades que a caracterizam, como a cor, o paladar, etc. A mais pequena partícula que ainda exibe as propriedades do cloreto de sódio (sal), designa-se por **molécula**.

# *Periodic Table of the Elements*

*Los Alamos National Laboratory's Chemistry Division Presents a*

Figura 1 – Tabela Periódica dos Elementos

## ÁTOMO

Por sua vez, na base das **moléculas**, estão ainda partículas de dimensões inferiores que são designadas por **átomos** e que conservam as propriedades características de um dos 106 elementos da **Tabela Periódica**. Agora, analisando a composição de cada átomo, podemos constatar que estes são compostos por um **núcleo central**, **núcleo atómico** ou simplesmente **núcleo** e uma **nuvem electrónica**, onde iremos distinguir 3 tipos de partículas elementares designadas por **Electrões, Protões e Neutrões**.

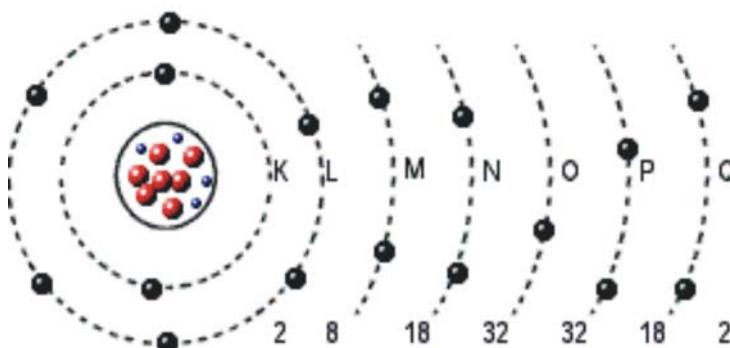


Figura 2 – Modelo atómico e respectivas camadas electrónicas

A carga do **electrão** é igual a do **protão**, porém de sinal contrário. Os **electrões** giram em torno do **núcleo** distribuindo-se em diversas **órbitas**, num total máximo de sete. A mais externa de todas recebe a designação de **orbita de valência, ou camada de valência**, sendo a mesma responsável pelas ligações atómicas entre átomos da mesma espécie ou de elementos diferentes, bem como pelas reacções químicas nas quais eles participam.

Nos diferentes meios que contactamos diariamente, encontramos o mais variado tipo de átomos, diferenciados entre si pelos seus diferentes números de **protões, electrões e neutrões**, os quais, consequentemente, lhes conferem as mais diversas propriedades químicas.

## O EQUILÍBRIO ELÉCTRICO DO ÁTOMO

Em qualquer átomo o número de electrões é sempre **igual** ao número de protões, o que significa que a quantidade de cargas eléctricas negativas iguala as positivas, o que se traduz numa neutralidade do átomo.

Para alterar a neutralidade do átomo, há que introduzir ou retirar electrões ao átomo em causa. A partir da altura que o átomo passa a ter mais electrões ou protões, recebe o nome de **ião negativo** ou **ião positivo** respectivamente.

## O EQUILÍBRIO MECÂNICO DO ÁTOMO

Na estrutura atómica, os protões encontram-se alojados no núcleo, enquanto os electrões se movem em órbitas circulares em torno do núcleo, verifica-se que resulta desta situação um equilíbrio de forças designadas de centrípeta e centrífuga que têm sentidos opostos e módulos iguais, o que mantém o equilíbrio do átomo.

## CONDUTORES, ISOLADORES E SEMICONDUTORES

O material que serve de base ao fabrico de dispositivos electrónicos semicondutores, não é um bom condutor, nem um bom isolante, mas sim o que vulgarmente designamos de semicondutor.

### CONDUTORES

São materiais que não oferecem grande resistência a passagem da corrente eléctrica. Quanto menor for a oposição à passagem de corrente, melhor condutor é o material. O que caracteriza o material bom condutor é o facto de os electrões de valência estarem fracamente ligados ao átomo, encontrando grande facilidade para se libertarem e se movimentarem livremente no interior dos materiais. Como exemplos de bons condutores, temos por exemplo o Ouro (Au), a Prata (Ag) e Cobre (Cu), Alumínio (Al), Bronze, Platina, Carvão, Constantan. O cobre apresenta apenas um electrão na camada de valência, tem uma enorme facilidade em cedê-lo para ganhar estabilidade. O electrão cedido facilmente se torna um electrão livre.

### ISOLADORES

São materiais que oferecem uma elevada resistência à passagem da corrente eléctrica. Neste tipo de materiais, os electrões de valência estão rigidamente ligados aos seu átomos, sendo muito poucos os que se conseguem libertar para se transformarem em electrões livres. Como exemplos de materiais isoladores, podemos referir a Borracha, Mica, Baquelite, Amianto, Ebonite, Papel Parafinado, Porcelana e Fibra de Vidro.

### SEMICONDUTORES

São materiais que apresentam uma resistividade eléctrica que fica localizada entre a dos Condutores e dos Isoladores. Como exemplos mais conhecidos, temos o **Germânio** e **Silício**. É a partir destes materiais que se conseguem os mais variados tipos de componentes electrónicos, sendo por esta razão sujeitos a um

breve estudo nos parágrafos seguintes.

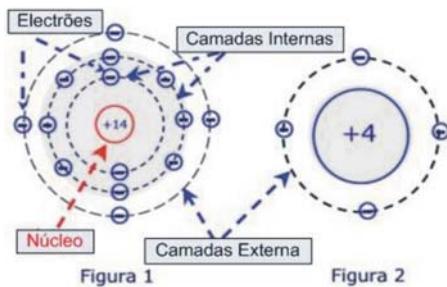


Figura 3 – Configuração electrónica do silício

<b>Material</b>	<b>Resistência Específica (<math>\Omega \cdot \text{cm}</math>)</b>
Cobre	$10^{-6}$
Ferro	$10^{-4}$
Silício	entre 1 e $10^7$
Germânio	entre 1 e $10^8$
Âmbar	maior que $10^{16}$

Tabela 1 – Resistência específica de alguns materiais

De entre os **Semicondutores** mais utilizados, há que referir o Silício (Si) e o Germânio (Ge), pertencentes ao grupo IV da **Tabela Periódica**. São muito utilizados na construção de dispositivos electrónicos. Actualmente o Silício é o mais utilizado, uma vez que as suas características são melhores em comparação com o Germânio e também por ser mais abundante na natureza.

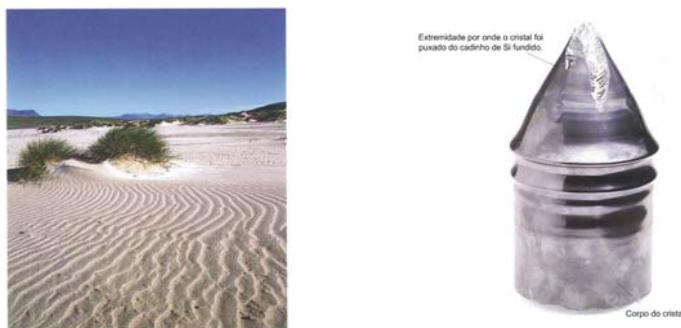


Figura 4 – Silício, na sua forma natural e depois de purificado

Juntamente com o Si e Ge existem outros materiais também catalogados na tabela periódica conforme a

tabela 2.

Grupos	III	IV	V
Elementos	B - Boro	Si – Silício	P – Fósforo
	Ga – Gálio	Ge – Germânio	As – Arsénio
	In – Índio	Sn – Estanho	Sb – Antimónio

Tabela 2 – Alguns elementos condutores

Em comparação com os metais e isolantes, as propriedades eléctricas dos semicondutores são afectadas pela variação da temperatura, exposição a luz e acréscimos de impurezas.

Por outras palavras, significa que os electrões de valência podem absorver energia externa suficiente para se tornarem electrões livres. À temperatura ambiente há aproximadamente  $1,5 \times 10^{10}$  portadores livres disponíveis para a condução de electricidade por centímetro cúbico de silício intrínseco, sendo que à mesma temperatura o germânio terá aproximadamente 1000 vezes mais portadores livres. Uma mudança na temperatura de um material semicondutor pode alterar consideravelmente o número de portadores disponíveis. Com o aumento da temperatura, os electrões de valência absorvem energia térmica suficiente para quebra das ligações covalentes, contribuindo para o aumento da condutividade do material.

## NÍVEIS DE ENERGIA

Na estrutura atómica isolada há níveis de energia discretos, associados a cada electrão bem como à sua respectiva órbita. Entre esses níveis discretos, não poderá haver nenhum electrão a circular. A figura seguinte mostra os diferentes níveis de energia, para um átomo isolado.

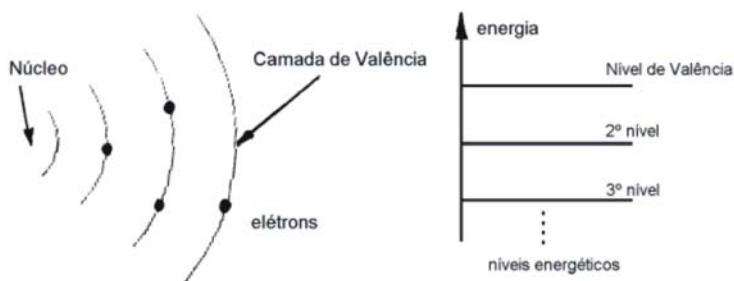


Figura 5 – Níveis energéticos de um átomo

Os electrões que ocupam a camada de valência, têm um nível energético mais elevado do que qualquer outro electrão do átomo, contudo esse nível pode tornar-se ainda mais elevado quando o electrão se torna livre. Quando os átomos de Silício ou Germânio formam o cristal, cada átomo da estrutura sob a influência dos seus vizinhos fazem com que seus electrões ocupem posições diferentes, dentro de uma mesma órbita, do átomo vizinho. O resultado final é uma expansão dos níveis discretos de energia possíveis. A figura seguinte ilustra essa situação.

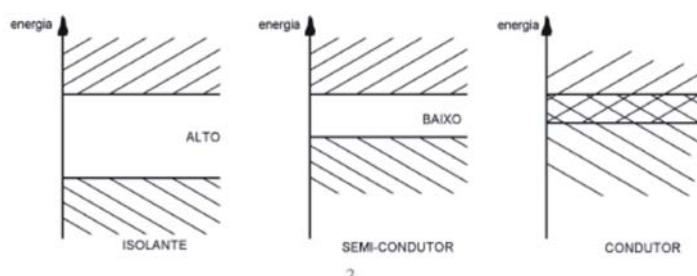


Figura 6 – Níveis de energia dos diferentes tipos de materiais

## ESTRUTURA ATÓMICA DO SILÍCIO E DO GERMÂNIO

Os átomos de **Germânio** e **Silício** são caracterizados por possuírem na sua **camada de valência**, 4 electrões. Quando os átomos de **Germânio**, ou **Silício** se agrupam entre si, formam uma **estrutura cristalina**, ou seja, são substâncias cujos átomos se posicionam no espaço, formando uma estrutura ordenada. Nessa estrutura, cada átomo une-se a quatro outros átomos vizinhos, por meio de **ligações covalentes**, e cada um dos quatro electrões de valência de um átomo é compartilhado com um átomo vizinho, de modo que dois átomos adjacentes compartilham os dois electrões, como se pode ver na figura 7.

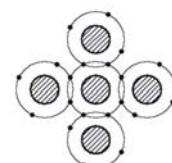


Figura 7 – Ligações covalentes de um semicondutor

Se nas estruturas com **Germânio** ou **Silício** não fosse possível romper a **ligações covalentes**, elas seriam materiais isolantes. No entanto, com o aumento da temperatura algumas ligações covalentes recebem energia suficiente para se romperem, fazendo com que os electrões das ligações rompidas passem a movimentar-se livremente no interior do cristal, tornando-se electrões livres como se pode observar na figura 8.

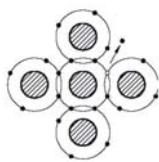


Figura 8 – Electrão que se liberta da estrutura cristalina e se torna livre

Com a quebra das **ligações covalentes**, no local onde havia um electrão de valência, passa a existir uma região com carga positiva, uma vez que o átomo era neutro e um electrão o abandonou. Essa região positiva recebe o nome de **lacuna**. As lacunas não têm existência real, pois são apenas espaços vazios provocados por electrões que abandonam as ligações covalentes rompidas. Sempre que uma ligação **covalente é rompida**, surgem, simultaneamente um electrão e uma lacuna. Entretanto, pode ocorrer o inverso, um electrão preencher o lugar de uma lacuna, completando a ligação covalente. A este processo, chama-se **recombinação**. Como os electrões e as lacunas aparecem e desaparecem aos pares, pode-se afirmar que o número de lacunas é sempre igual ao de electrões livres. Quando os cristais de **silício** ou **germânio** são submetidos a uma diferença de potencial, os electrões livres movem-se no sentido do maior potencial eléctrico e as lacunas por consequência, no sentido contrário ao movimento dos electrões.

## SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS E INTRÍNSECOS

Os cristais de **Silício** e **Germânio** são encontrados na natureza, misturados com outros elementos. Dada a dificuldade de se controlarem as características destes cristais, é feito um processo de purificação do mesmo através do qual se obtém um material semicondutor **Intrínseco**, ou puro. Em seguida são injectados através de um processo controlado, propositadamente uma certa quantidade de átomos estranhos cuidadosamente escolhidos na ordem de 1 para cada  $10^6$  átomos do cristal, com a intenção de se alterar produção de **electrões livres** e **lacunas**, aumentando assim a condutividade do material. Através deste último processo, obtém-se um material semicondutor **Extrínseco**. A este processo de inserção de impurezas, dá-se o nome de **dopagem**. As impurezas utilizadas na dopagem de um cristal semicondutor podem ser de dois tipos:

- Impurezas **Dadoras** ou **Pentavalentes**,
- Impurezas **Aceitadoras** ou **Trivalentes**,

## IMPUREZAS TRIVALENTES E PENTAVALENTES

### IMPUREZAS DADORAS OU PENTAVALENTES

Estes tipos de elementos são caracterizados por possuírem 5 electrões na sua camada de valência. Como exemplo pode-se referir o Fósforo, o Arsénio e Antimónio. O átomo pentavalente entra no lugar de um átomo de **silício** dentro do cristal absorvendo as suas quatro ligações covalentes, e fica um electrão fracoamente ligado ao núcleo do pentavalente. Deste modo, uma pequena quantidade de energia é suficiente para se tornar livre.

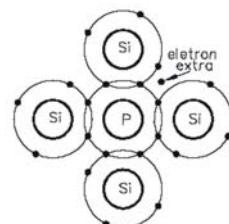


Figura 9 – Estrutura do silício dopado com um elemento Pentavalente

### IMPUREZAS ACEITADORAS OU TRIVALENTES

Este tipo de elementos caracteriza-se por possuir na sua camada de valência, 3 electrões. Como exemplos de elementos com esta configuração atómica, temos o Boro, o Alumínio e o Gálio. O átomo trivalente entra no lugar de um átomo de **silício** dentro do cristal absorvendo três das suas quatro ligações covalentes. Isto significa que existe uma lacuna na órbita de valência de cada átomo trivalente.

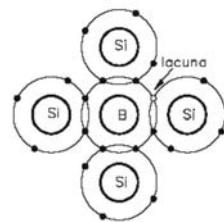


Figura 10 – Estrutura atómica do silício dopado com um elemento Trivalente

Um semicondutor pode ser dopado para ter um excesso de electrões livres ou excesso de lacunas. Por isso existem dois tipos de semicondutores:

- Semicondutor **Tipo N**;
- Semicondutor **Tipo P**;

## SEMICONDUTORES TIPO N E TIPO P

### SEMICONDUTORES TIPO N

O cristal que foi dopado com impureza **dadora** é chamado semicondutor **Tipo N**, onde  $n$  está relacionado com negativo. Como os electrões livres excedem em número as lacunas num semicondutor **tipo n**, os electrões são chamados portadores maioritários e as lacunas, portadores minoritários. O efeito deste processo de dopagem pode ser observado na figura que segue.

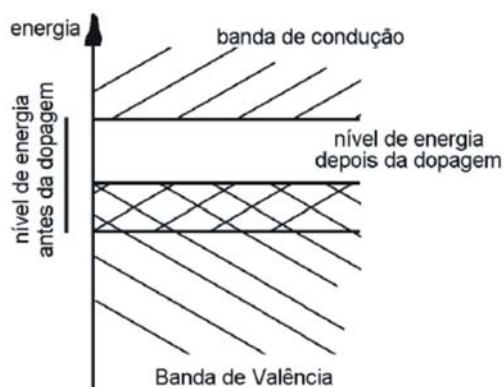


Figura 11 – Sobreposição de bandas energéticas num material do tipo N

### SEMICONDUTORES DO TIPO P

O cristal que foi dopado com impureza **aceitadora** é chamado semicondutor **Tipo P**, onde  $p$  está relacionado com positivo. Como as lacunas excedem em número os electrões livres num semicondutor **tipo p**, as lacunas são chamadas portadores maioritários e os electrões livres, portadores minoritários.

# DÍODO DE JUNÇÃO

## INTRODUÇÃO

A junção PN é um bloco básico sob o qual se fundamenta toda a operação dos dispositivos semicondutores. O componente electrónico a que a mesma dá origem, é designado de **Díodo de Junção**, que é um componente electrónico passivo, isto é que não tem a capacidade de amplificar nem comutar sinais. Outra característica fundamental desta junção é a não linearidade matemática, entre a tensão medida aos seus terminais e a intensidade da corrente que a percorre. Como consequência do referido, o díodo vai apresentar um valor de resistência dinâmica.

## FORMAÇÃO DA JUNÇÃO PN

Quando sobre um mesmo cristal semicondutor se introduzem impurezas dadoras num lado e aceitadoras no outro forma-se uma junção PN. O ião dador é representado por um P, porque após ter cedido um electrão, torna-se um ião positivo. O ião aceitador representa-se por N porque, após aceitar um electrão, torna-se um ião negativo. Inicialmente apenas existem portadores maioritários (da dopagem), ou seja, lacunas do lado esquerdo e electrões do lado direito.

Devido à desigualdade de densidade dos portadores de cada um dos lados, as lacunas deslocam-se para a direita e os electrões para a esquerda, produzindo uma corrente de difusão dos portadores maioritários. Como resultado desta difusão surge um campo eléctrico na junção. O equilíbrio é restabelecido quando o campo se torna suficientemente elevado para impedir o processo de difusão.

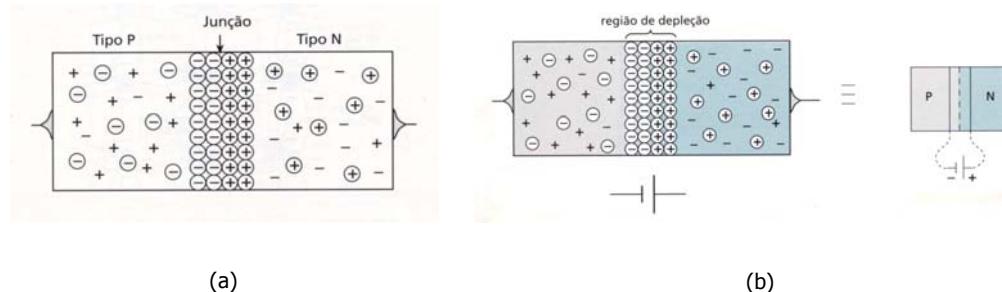


Figura 12 – Representação de um Díodo de Junção

Aparece uma região para cada um dos lados da junção onde, por se terem efectuado recombinações electrão-lacuna, não existem portadores livres que normalmente é designada de **zona de deplecção** ou **barreira potencial**. Pode-se imaginar um gerador na junção PN que apenas traduz os seus efeitos internos, mas cuja diferença de potencial não é possível medir (figura 12(b)). Esta diferença tende a produzir uma corrente de condução dos portadores maioritários, em direcção oposta a corrente de difusão. Em condições de equilíbrio, a corrente de difusão é exactamente compensada pela corrente de condução, sendo nula a corrente através da junção.

Por outras palavras, quando nenhuma tensão é aplicada exteriormente, a diferença de potencial cria uma barreira, **de 0,7V para o Silício e de 0,3V para o Germânio**, que impede a difusão das cargas maioritárias através da junção. Os electrões do lado N que tendem a difundir-se são repelidos pela carga espacial negativa do lado P, sendo as lacunas repelidas pela carga espacial positiva do lado N.

## CONSTITUIÇÃO DA JUNÇÃO PN

O díodo semicondutor é constituído por uma junção entre dois tipos de semicondutores, um do tipo P e outro do tipo N. O semicondutor do tipo N tem, devido à adição de uma impureza conveniente, excesso de electrões, enquanto o do tipo P tem excesso de lacunas. Esta junção tem a propriedade de só conduzir num dos sentidos, que é aquele em que à camada P está positiva em relação à camada N.

A representação em bloco de um díodo tem o aspecto mostrado na figura 12 (a) e o símbolo utilizado nos diagramas de circuitos é o apresentado na figura 13.

## SÍMBOLO GRÁFICO

O símbolo gráfico usado para representar o díodo de junção, é o que se apresenta na figura 13. Já foi dito anteriormente que o fluxo da corrente eléctrica no díodo é feita do ânodo (A) para o cátodo (K), ou seja, da região P para a região N.



Figura 13 – Símbolo gráfico do díodo

## CAMPO ELÉCTRICO DA JUNÇÃO PN

### POLARIZAÇÃO DIRECTA E INVERSA DA JUNÇÃO PN

Para melhor se poder compreender o funcionamento do díodo, é necessário analisar as suas formas de polarização (directa e inversa).

#### POLARIZAÇÃO DIRECTA

Para que um díodo esteja directamente polarizado, é necessário que o valor da tensão de alimentação seja superior ao valor do potencial de barreira, nesta situação o díodo encontra-se à condução.

A excitação externa provocada pela corrente  $I$  em sentido directo faz com que sejam fornecidos electrões ao lado N que vão neutralizar a carga existente na zona de depleção, fazendo com que esta seja reduzida. Se a zona de depleção é reduzida então a barreira de potencial também diminui fazendo aumentar a corrente de difusão  $I_D$ . A barreira de potencial (**0,3V para Germânio e 0,7V para Silício**) é agora mais baixa que o valor  $V_0$ . Aparece então aos terminais do díodo uma diferença de potencial em sentido directo. Uma outra forma de entender a redução da barreira de potencial é considerar a aplicação de uma tensão  $V$  em sentido directo. A polaridade é de tal forma que as cargas positivas do lado P e as cargas negativas do lado N são repelidas (cargas do mesmo sinal repelem-se) obrigando que a região de depleção seja reduzida

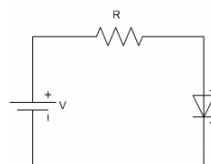


Figura 14 – Polarização Directa

#### POLARIZAÇÃO INVERSA

Considere-se uma junção PN excitada por uma corrente  $I$  em sentido inverso. No circuito externo, esta corrente é transportada por electrões que se movimentam do material N para o material P, assim os electrões abandonam o lado N e as lacunas o lado P. Este movimento origina um aumento da largura da camada de depleção e, consequentemente, um aumento da carga armazenada. Deste modo, a tensão própria da junção aumenta provocando uma diminuição da corrente de difusão  $I_D$ . Aos terminais do díodo vai aparecer a tensão  $|V_R|$ , e a corrente no díodo será muito baixa (da ordem de nA para os díodos de Si), do ponto de vista prático será zero. Esta corrente inversa também chamada de corrente de fuga só depende de aspectos construtivos (dopagem) e da temperatura (duplica de valor para cada 10 graus de aumento na temperatura). O díodo deve ter a capacidade para suportar a tensão inversa aos seus terminais,

(50V para os diodos da família 1N4001) caso contrário pode ocorrer um fenómeno chamado de avalanche que pode provocar a destruição do diodo.

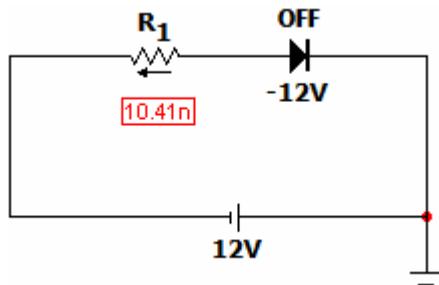


Figura 15 – Díodo Inversamente Polarizado

## CURVA CARACTERÍSTICA E APROXIMAÇÕES MATEMÁTICAS

### CURVA CARACTERÍSTICA

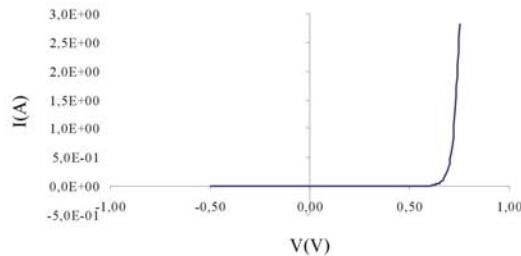


Figura 16 – Curva característica do diodo

Uma das aplicações mais comuns dos diodos é a **rectificação**, isto é, a obtenção de uma tensão contínua a partir de uma tensão alternada. Se intercalarmos um diodo à saída de uma fonte de alimentação sinusoidal, ele só conduz na metade do ciclo em que está polarizado directamente, bloqueando quase completamente a outra metade (rectificação de meia-onda). Outra grande aplicação dos diodos é a **comutação**.

### PARÂMETROS DO DÍODO

Os principais parâmetros podem ser obtidos analisando a folha de características do componente. Na figura está ilustrada uma página de uma folha de características de um componente.



## 1N4001 - 1N4007

### Features

- Low forward voltage drop.
- High surge current capability.



### General Purpose Rectifiers

#### Absolute Maximum Ratings\* $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value							Units
		4001	4002	4003	4004	4005	4006	4007	
$V_{RRM}$	Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
$I_{AV}$	Average Rectified Forward Current, .375" lead length (@ $T_A = 75^\circ\text{C}$ )				1.0				A
$I_{FS}$	Non-repetitive Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave				30				A
$T_{SG}$	Storage Temperature Range				-55 to +175				°C
$T_J$	Operating Junction Temperature				-55 to +175				°C

\* These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

### Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Value							Units
$P_D$	Power Dissipation	3.0							W
$R_{JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	50							°C/W

### Electrical Characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Device							Units
		4001	4002	4003	4004	4005	4006	4007	
$V_F$	Forward Voltage @ 1.0 A				1.1				V
$I_R$	Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle $T_A = 75^\circ\text{C}$				30				μA
$I_S$	Reverse Current @ rated $V_R$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 100^\circ\text{C}$				5.0				μA
$C_T$	Total Capacitance $V_R = 4.0 \text{ V}, f = 1.0 \text{ MHz}$				500				μF
					15				pF

## APLICAÇÕES DOS DÍODOS DE JUNÇÃO

- Rectificação de sinais
- Sensores de temperatura
- Detectores de sinal
- Aplicações em Electrónica de potência como díodo "freewheeling"
- Dispositivos de tensão de referência em alguns circuitos

## TESTE DE DÍODOS USANDO UM MULTÍMETRO

Um multímetro é um equipamento de teste e medida extremamente versátil. Como o próprio nome indica, estes instrumentos permitem medir um grande número de grandezas eléctricas, apresentando para tal um considerável número de escalas que poderão ser de comutação automática ou manual. Alguns destes aparelhos, incorporam ainda testes específicos para alguns componentes como seja o caso de díodos, transístores, condensadores e bobinas. Como opções mais avançadas poderão ainda dar indicação de valores médios, eficazes, máximos, relativos, medir dB's, funcionar como geradores de sinais e de tons.



(a) Multímetro digital

(b) Multímetro analógico

Figura 17 - Multímetros

Entre as várias grandezas possíveis de medir e testes possíveis de efectuar com multímetros, destacam-se:

- 💡 Intensidades de corrente (alternadas e contínuas), tensões (alternadas e contínuas), resistências, temperaturas, frequências, capacidades, indutâncias, teste audível de continuidade, teste de díodos, teste de junções e teste de tensões lógicas.

## MULTÍMETRO ANALÓGICO

Para se testar um díodo fazendo uso deste tipo de multímetro, deve-se seleccionar uma escala que permita a medida de resistências.

É importante lembrar que ao seleccionar uma escala de resistências, na maioria dos multímetros deste tipo, as pontas ficam invertidas, particularmente nas escalas que permitem medidas mais elevadas.

Para testar o diodo, primeiro é necessário saber concretamente qual é a sua polaridade. Após esta verificação, polariza-se o componente directamente e observa-se a leitura no visor do aparelho. Com um diodo em bom estado e mediante este tipo de polarização, deve aparecer a indicação de um valor de resistência finita, que dependerá do diodo, da escala e do próprio aparelho. Se o diodo estiver em aberto a indicação de resistência será infinita e se estiver em curto-circuito a mesma será nula.

Polarizando o diodo inversamente, caso ele esteja em bom estado, não deverá conduzir, sendo indicada pelo aparelho uma resistência infinita. Caso o diodo esteja em aberto a indicação deverá continuar a ser a mesma e se o diodo estiver em curto-circuito a indicação de resistência deverá ser nula.

## **MULTÍMETRO DIGITAL**

O teste de diodos com um multímetro digital, é mais simples que o anteriormente descrito. Com este tipo de multímetro não há a inversão das polaridades das pontas. Este tipo de multímetro quando seleccionado para efectuar este tipo de teste passa a disponibilizar aos seus terminais uma tensão de aproximadamente 3 V e é capaz de fornecer uma corrente com cerca de 1 mA. De seguida polariza-se o dispositivo directamente e inversamente. Quando polarizado directamente, e o diodo em bom estado, o aparelho dá a indicação da tensão de limiar que caracteriza o material semicondutor do componente. Ainda neste tipo de polarização, se o diodo estiver em curto-circuito, obtém-se uma indicação de 0 V pois não existe queda de tensão na junção. Se o diodo estiver em aberto, o multímetro indicará o valor da tensão debitada pelo aparelho aos seus terminais.

Quando polarizado inversamente e caso o componente esteja em bom estado, a indicação será de não condução ou seja o aparelho indicará no seu visor a tensão que está a debitar para as pontas. Caso o componente esteja em aberto a indicação será a mesma que a anterior e para finalizar se ele estiver em curto-circuito, a indicação será de 0 V.



# DÍODOS ESPECIAIS

## INTRODUÇÃO

Os díodos mais vulgares são os rectificadores, contudo existem outros com características especiais que lhe permitem funcionar como reguladores ou limitadores. De entre estes é possível referir o Zener.

## O Díodo Zener

O díodo regulador de estado sólido, vulgarmente designado por díodo Zener, por ser este o nome do investigador que primeiramente estudou o fenómeno que predomina no seu interior, começou a ser conhecido desde 1950. É um semicondutor muito semelhante ao díodo rectificador. A diferença está no seu comportamento quando inversamente polarizado. É muito utilizado na regulação de tensões em alguns pontos dos mais variados circuitos. O seu símbolo gráfico é o representado na figura seguinte.

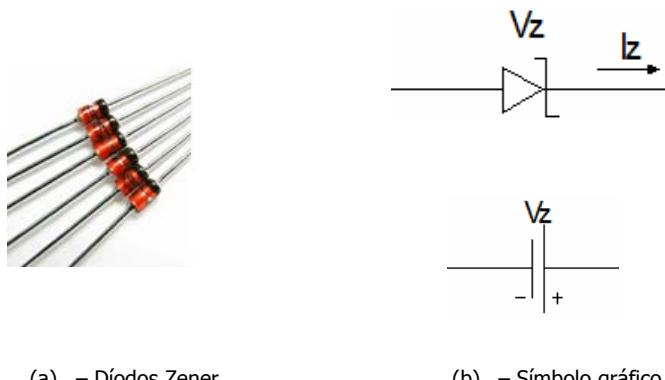
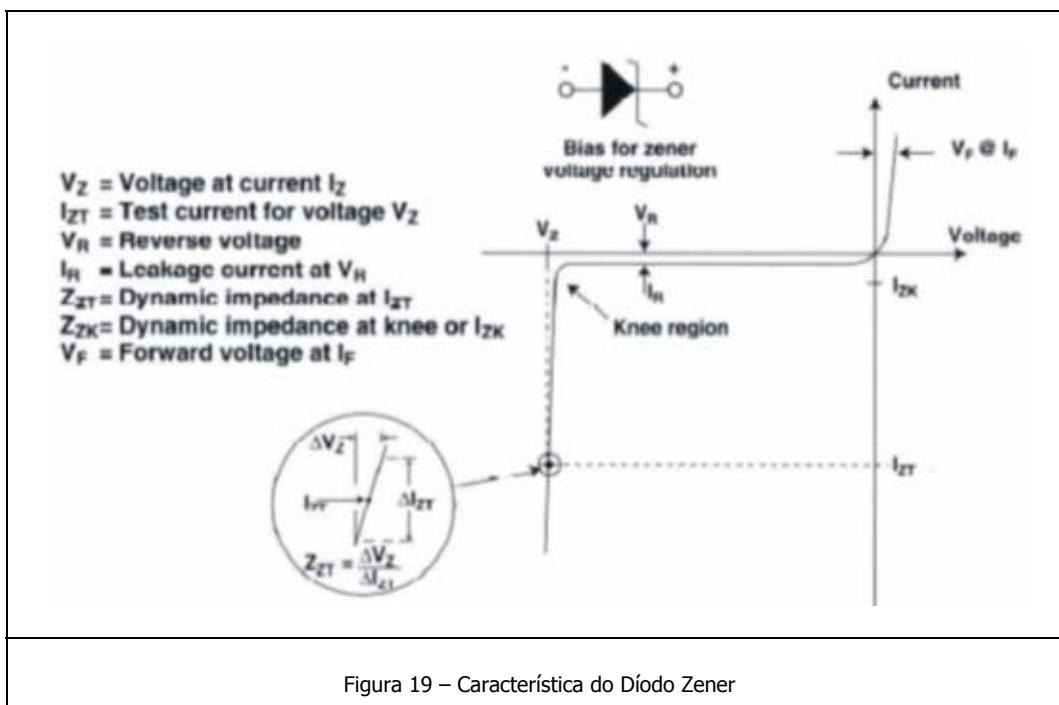


Figura 18 – Díodo Zener e Símbolo gráfico

Um díodo Zener é uma Junção PN especialmente projectada e concebida para operar na região de ruptura, onde grandes variações de corrente produzem pequenas variações de tensões, apresentando assim, aos seus terminais, uma tensão bastante estável.

Para operar num circuito, **um díodo Zener é polarizado inversamente**, pois quando polarizado directamente comporta-se como um díodo normal. Como mostra a curva característica do dispositivo em questão, quando a tensão de polarização inversa excede a tensão de Zener, o díodo entra em condução, apresentando aos seus terminais uma tensão relativamente constante que corresponde à tensão de Zener. O Zener é construído com uma área de dissipação de potência suficiente para suportar o efeito avalanche.



Podemos observar que para correntes superiores à corrente de joelho ( $I_{ZK}$ ), fornecida pelo fabricante, a característica  $i-v$ , é praticamente uma recta. Isto acontece porque a junção fica fortemente dopada, tornando a zona de depleção muito estreita. Assim, o valor do campo eléctrico aumenta significativamente pelo que vai extraír electrões das órbitas de valência, criando-se assim, electrões livres. A esta criação de electrões livres dá-se o nome de **efeito de Zener**. Os valores de tensão de Zener ( $V_z$ ), são específicos para uma corrente de teste particular ( $I_{ZT}$ ). Para além destas duas grandezas, o fabricante também especifica a resistência dinâmica ( $r_z$ ) e a potência máxima que o diodo pode dissipar, que pode ser calculada pela forma:

$$P_{zm} = V_z \cdot I_{zm}$$

Como a sua principal característica é ter aos seus terminais uma tensão estável, pode ser utilizado como regulador de tensão aos terminais de uma carga, quando colocado em paralelo com a mesma, como podemos verificar na figura 20. Para que o zener funcione como regulador, a tensão da fonte ( $V_s$ ) tem que ser superior à tensão de zener ( $V_z$ ), sendo esta a tensão para a qual o diodo foi dimensionado.

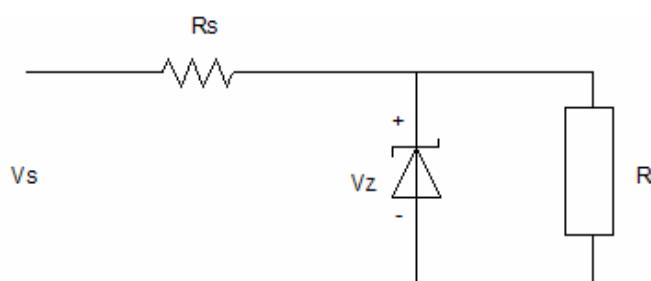


Figura 20 – Ligação de um diodo zener como regulador de tensão

Devido às adversas condições que um díodo Zener pode ser sujeito, é conveniente introduzir uma resistência  $R_s$  em série com a carga. Esta resistência actua como limitadora de corrente o que confere protecção ao díodo. A intensidade de corrente que percorre o díodo é dada pela expressão:

$$I_z = \left[ \frac{(V_s - V_z)}{R} \right] - I_L$$

Onde,  $V_s$  é o valor máximo da tensão da fonte de alimentação,  $V_z$  é a tensão nominal do díodo Zener e  $I_L$  é a corrente que circula na carga.

Polarizado inversamente, enquanto a tensão aos seus terminais é inferior à tensão de zener, o díodo apenas é atravessado uma pequena corrente de fuga designada por  $I_R$  da ordem dos  $\mu\text{A}$ . A medida da variação  $\frac{\Delta V_z}{\Delta I_z}$  é designada de Resistência dinâmica do Zener e é expressa em  $\Omega$ , tipicamente entre alguns Ohm até dezenas de Ohm. Quanto menor for este valor para a tensão de Zener nominal, mais constante será a tensão do Zener face à variação da corrente.

## FOTODÍODO

O fotodíodo é um díodo de junção construído de modo a possibilitar a utilização de luz como factor determinante no controlo da corrente eléctrica. É uma junção PN cuja região de funcionamento é limitada pela região de polarização inversa e caracteriza-se como sendo sensível à luz. A aplicação da luz à junção resulta numa transferência de energia das ondas luminosas (na forma de fotões) para a estrutura atómica, resultando num aumento do número de portadores minoritários e um aumento da corrente inversa.

Quando se incide energia luminosa numa junção PN, essa energia pode desalojar electrões de valência. Quanto maior for esta energia maior será a corrente inversa na junção. Por outras palavras pode-se afirmar que a quantidade de luz que incide na junção controla a corrente inversa do díodo.

A corrente inversa e o fluxo luminoso variam de uma forma praticamente linear, ou seja, um aumento da intensidade luminosa resulta num aumento semelhante na corrente inversa. Quando a luz incidente é nula, a corrente inversa também é nula.

O fotodíodo possui uma janela, que permite a passagem da luz através do invólucro e chegue à junção, produzindo assim electrões livres e lacunas. Este dispositivo é colocado no circuito inversamente polarizado. A corrente típica situa-se na faixa de algumas dezenas de  $\mu\text{A}$  e tem o aspecto físico da figura 21.

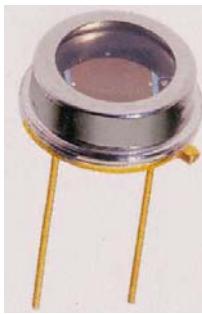


Figura 21 – Aspecto físico do fotodíodo

Podemos utilizar este dispositivo de duas maneiras diferentes. Como célula fotovoltaica, onde a incidência de luz gera uma tensão, ou como célula fotocondutiva, onde a incidência de luz provoca uma corrente.

Assim, o fotodíodo pode ser aplicado na fotodetecção, nomeadamente nos sistemas de iluminação pública, para que o circuito ligue ou desligue consoante a claridade. Pode ser aplicado também na unidade ópticas dos leitores de DVD's e em sistemas de contador de pulso.

## SÍMBOLO GRÁFICO

A figura 22 representa o símbolo gráfico do fotodíodo. As setas a apontar para o dispositivo indicam a luz incidente.



Figura 22 – Símbolo gráfico do fotodíodo

## LED

Num diodo comum, quando directamente polarizado, os electrões livres combinam-se com as lacunas. À medida que esses electrões caem de um nível de energia alto para um nível mais baixo, eles irradiam energia que é dissipada sob a forma de calor. Nos diodos emissores de luz, LED (Light Emitter Diode), essa energia é dissipada sob a forma de luz. Esses electrões ao baixarem de nível de energia provocam ondas luminosas que variam a sua fase entre 0 e 360º. O LED têm vindo a substituir a lâmpada incandescente devido às suas baixas tensão e corrente, o que na prática se resume a uma potência mais baixa.

O Silício é um material opaco que bloqueia a passagem de luz, daí serem utilizados materiais como o Gálio, o Arsénio e o Fósforo, para se obterem estes dispositivos. Assim podemos obter LEDs que irradiam luz vermelha, verde, amarela, azul, laranja ou infravermelha (invisível). A cor irradiada depende do material utilizado e do nível de dopagem. O LED cuja junção é de Arsénio ou Gálio, emite radiação infravermelha. Utilizando o Fósforo, obtém-se a cor vermelha ou amarela, dependendo da concentração. Se se utilizar

Fosfeto de Gálio dopado com Nitrogénio, a luz irradiada pode ser verde ou amarela. Hoje em dia, com o uso de outros materiais, consegue-se fabricar leds que emitem luz azul, violeta e até ultravioleta. Existem também os LEDs brancos, mas esses são geralmente LEDs emissores de cor azul, revestidos com uma camada de fósforo do mesmo tipo usado nas lâmpadas fluorescentes, que absorve a luz azul e emite a luz branca. Os LEDs da gama visível podem ser aplicados em diversos aparelhos com as mais variadas funções, por exemplo como indicador de tensão no circuito. Os da gama invisível são aplicados em sistemas de alarme contra intrusão e em leitores de CDs.

## SÍMBOLO GRÁFICO

Podemos observar na figura seguinte, o símbolo gráfico do LED. É um símbolo semelhante ao do diodo comum. As setas simbolizam a luz irradiada.



Figura 23 - Símbolo gráfico do LED

No mercado podemos encontrar LEDs das mais variadas formas:



Figura 24 – LEDs

## TENSÃO E CORRENTE DO LED

Os LEDs têm uma queda de tensão típica de 1,5 a 2,5V para correntes de 10 a 50mA, dependendo estes valores, do LED, da cor irradiada, da tolerância e da dopagem.

Estes dispositivos têm tensões de disruptão muito baixas, entre 3 e 5V, pelo que são facilmente danificáveis se não existir rigor.

## BRILHO DO LED

O brilho de um LED depende da corrente que o percorre. A melhor forma de se controlar o brilho é utilizar um circuito série composto por uma fonte de tensão, de valor superior ao valor de funcionamento do LED,

por uma resistência e pelo LED. A resistência irá limitar a corrente no LED, fazendo com que a corrente seja constante e deste modo o brilho também será constante.

## INDICADOR DE SETE SEGMENTOS

Os indicadores de sete segmentos são dispositivos amplamente utilizados, nomeadamente em mostradores digitais. Cada dispositivo destes é capaz de mostrar todos os números de 0 a 9 e ainda algumas letras (A, b, C, d, E, F, H, h I, L, O, P, U).

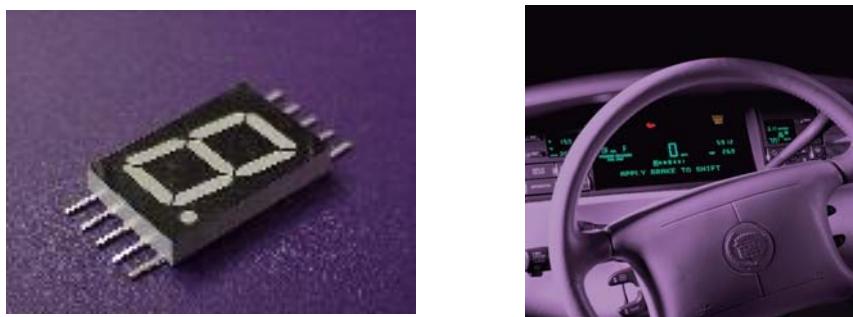


Figura 25 – Indicadores de sete segmentos

Cada indicador é composto por sete LEDs. A figura 26 mostra-nos o esquema deste dispositivo. Neste circuito estão representadas as resistências limitadoras de corrente. Ligando à terra determinadas resistências, consegue-se obter os dígitos ou as letras. Por exemplo, ligando à terra os segmentos A, B, C, D, E e F, obtém-se o número 0.

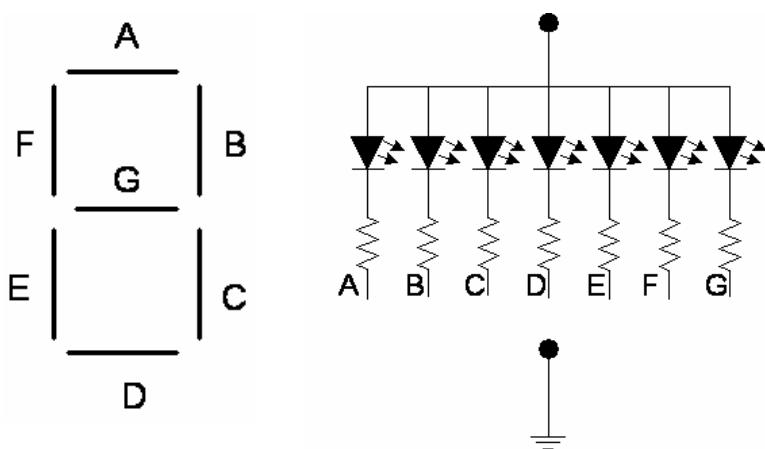


Figura 26 – Esquema do indicador de sete segmentos

# FONTES DE ALIMENTAÇÃO

## INTRODUÇÃO

A grande maioria dos equipamentos electrónicos é alimentada com uma tensão contínua, normalmente de 3V a 30V, mas a tensão disponível nas tomadas nas nossas casas é de 230V. Para transformar a tensão alternada disponível na tomada em tensão contínua, é necessário utilizar um circuito, normalmente conhecido como fonte de alimentação. Uma fonte de alimentação é composta por alguns blocos, tal como mostrado na figura seguinte.

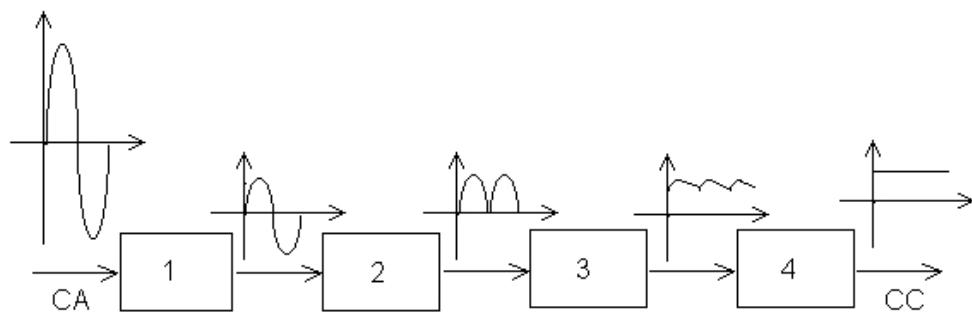


Figura 27 – Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação

Em que:

- 1 – Transformador** – reduz o nível de tensão disponível nas tomadas, para valores adequados aos diferentes equipamentos.
- 2 – Rectificador** – transforma a tensão alternada (ca) em tensão contínua (cc) pulsatória.
- 3 – Filtro** – transforma a tensão contínua pulsatória vinda do rectificador, em tensão contínua com ondulação (ripple).
- 4 – Estabilizador** – tem a função de transformar a tensão contínua com ondulação em tensão contínua linear, que é utilizada pelos equipamentos electrónicos.

## TRANSFORMADOR

Na maior parte das fontes de alimentação, o transformador baixa o nível da tensão de entrada para valores eficazes na faixa dos 5 a 24V.

## CIRCUITOS RECTIFICADORES

Este bloco é o responsável pela transformação de uma tensão alternada em tensão contínua. O principal componente electrónico utilizado nestes circuitos é o díodo, que desempenha um papel fundamental nas fontes de alimentação. É possível ter vários tipos de circuitos rectificadores, meia-onda e onda-completa.

## RECTIFICAÇÃO DE MEIA ONDA

Este tipo de rectificação raramente é usado e quando tal acontece, apenas se verifica em circuitos onde o consumo de potência seja mínimo. A sua rentabilidade é inferior a 50%, considerando as perdas no transformador e nos díodos. A figura apresentada a seguir exibe o sinal de entrada, a configuração típica deste tipo de circuito e finalmente o sinal de saída.

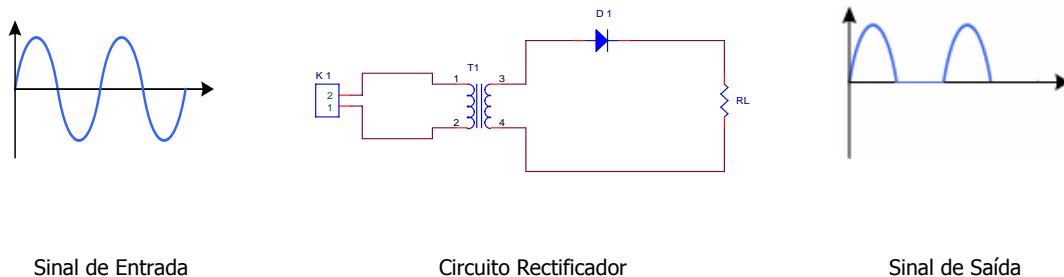


Figura 28 – Rectificação de meia onda

Onde:

$K_1$  – Ficha de ligação à rede eléctrica;

$T_1$  – Transformador abaixador;

$D_1$  – Díodo rectificador;

$R_L$  – Carga a alimentar;

Na entrada do circuito,  $K_1$ , temos o sinal proveniente da rede eléctrica, que é alternado e sinusoidal. Ao ser aplicado ao transformador  $T_1$ , a sua forma continua inalterada, sendo apenas reduzida a amplitude do mesmo. O díodo  $D_1$ , funciona como um interruptor automático que abre e fecha mediante a polaridade da tensão que lhe é aplicada. Desta forma, é o grande responsável pela transformação que se pretende incutir ao sinal. Como se pode observar pela análise da figura anterior e pela explicação do funcionamento do circuito, o sinal de saída nada tem a ver com o sinal de tensão aplicado à carga, já que esse sinal é

semelhante ao disponibilizado por uma bateria. No entanto, neste ponto do circuito o sinal de saída é contínuo (sempre com o mesmo sinal, positivo e negativo) embora variável, tal como ilustrado na figura 29.

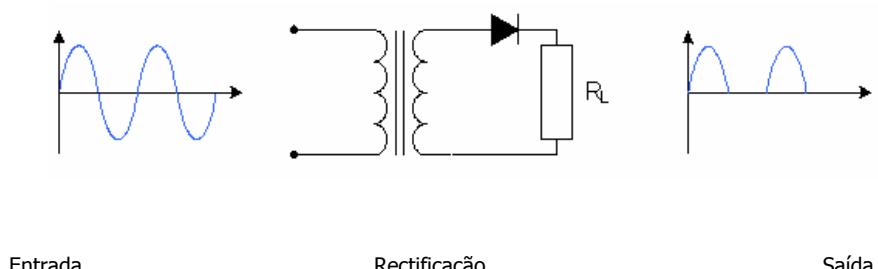


Figura 29 – Rectificação de meia onda

## RECTIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA COM PONTO MÉDIO

Para se efectuar uma rectificação de onda completa pode utilizar-se um transformador com ponto médio acessível tal como ilustrado na figura 30. Este rectificador é equivalente a dois rectificadores de meia-onda, cada um com uma tensão de entrada igual a metade da tensão secundária. O díodo  $D_1$  conduz nas alternâncias positivas e o díodo  $D_2$  nas alternâncias negativas. Como se pode concluir pela análise do circuito, a tensão na carga é positiva e mantém sempre a mesma polaridade, e a corrente mantém sempre o mesmo sentido em ambas as alternâncias.

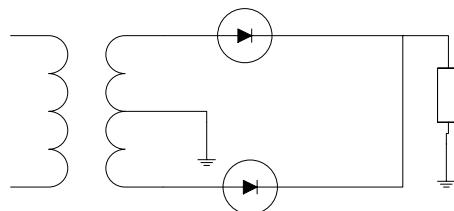
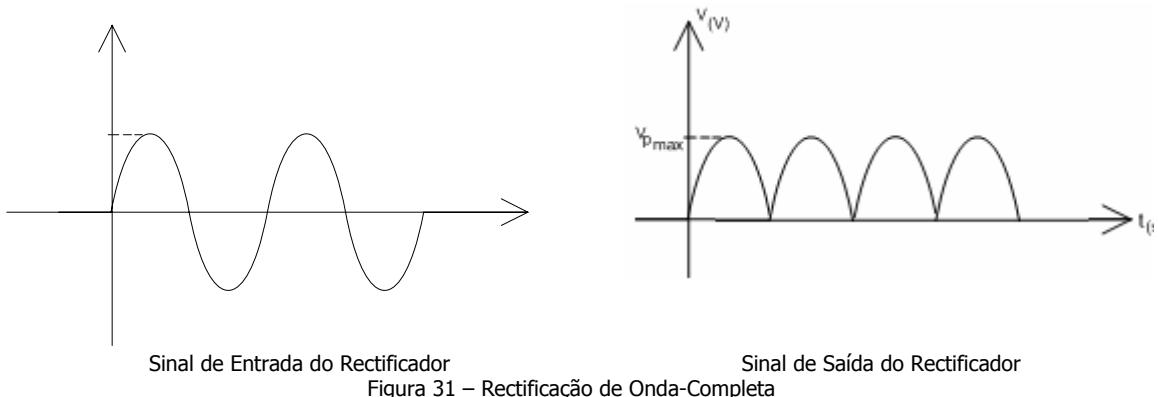


Figura 30 – Rectificador de onda completa com transformador de ponto médio

### Características da tensão de saída:

$$V_{P_{\max}} = V_P - V_{\gamma}$$

*Nota:  $V_v$  – queda de tensão no diodo*



## CARACTERÍSTICAS DO RECTIFICADOR

### FREQUÊNCIA DE SAÍDA

Num rectificador de meia-onda a frequência de saída é igual à frequência de entrada. Mas num rectificador de onda completa a frequência de saída é o dobro da frequência de entrada. Neste caso, o rectificador inverte as alternâncias positivas, de forma que resulta no dobro das alternâncias positivas.

$$f_{out} = 2f_{in}$$

### RECTIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA COM PONTE DE DÍODOS

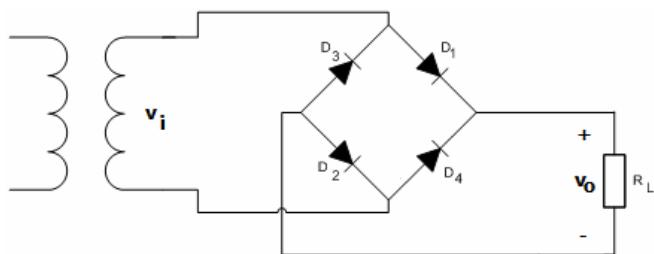
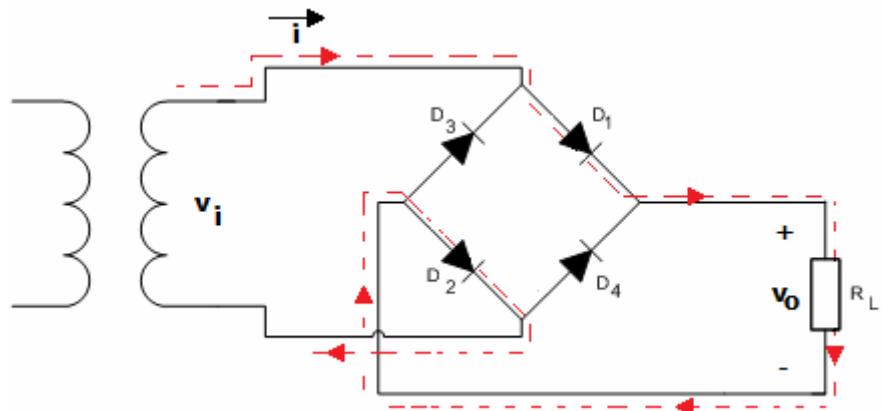
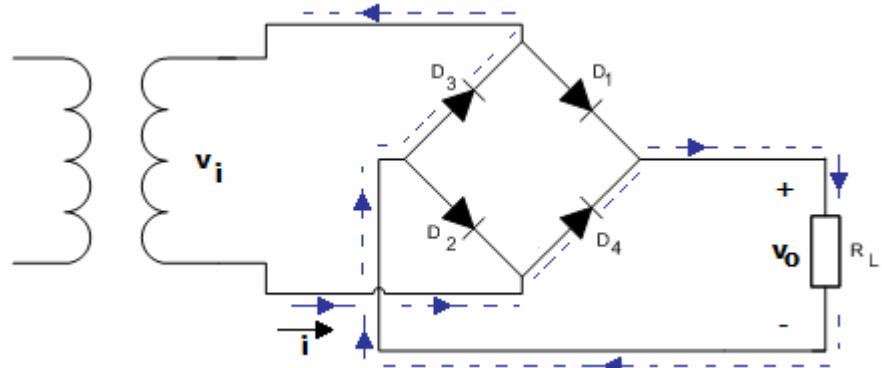


Figura 32 – Rectificação de onda completa com ponte de díodos

Este rectificador é semelhante a um rectificador de ponto médio, porque faz uma rectificação de onda-completa. Neste caso, conduzem dois diodos simultaneamente, D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub> nas alternâncias positivas e D<sub>3</sub> e D<sub>4</sub> nas alternâncias negativas, tal como se ilustra na figura 33.



a) Percurso da corrente nas alternâncias positivas



b) Percurso da corrente nas alternâncias negativas

Figura 33 – Rectificador de onda-completa com ponte de diodos

Quando surge um semi-ciclo positivo, os diodos D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub> ficam ON e os diodos D<sub>3</sub> e D<sub>4</sub> ficam OFF, a corrente percorre o sentido indicado na figura 33 (a). No semi-ciclo negativo os diodos D<sub>3</sub> e D<sub>4</sub> ficam ON e os diodos D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub> ficam OFF, o que faz com que na carga R<sub>L</sub>, circule uma corrente com o sentido indicado na figura 33 (b). Pela análise de ambas as figuras (33 (a e b)), verifica-se que na carga a corrente tem sempre o mesmo sentido. Esta corrente é unidireccional (contínua) e pulsatória, com a forma indicada na figura 34.

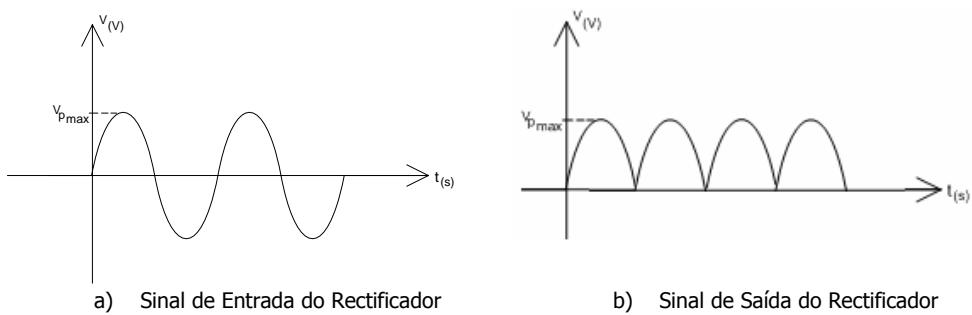


Figura 33 – Rectificação de Onda-Completa com ponte de diodos

Já foi dito anteriormente que uma tensão contínua é unidireccional e constante. Pela observação do gráfico anterior podemos verificar que já estamos perante uma tensão unidireccional, mas ainda não é constante pois o seu valor é pulsatório. Para contornar esta questão vão ser inseridos filtros no circuito anterior.

## FILTROS

### FILTROS RC

O tipo mais comum de filtro é o de condensador de entrada, eficaz na maioria dos casos. Contudo, se este tipo de filtro não satisfizer os requisitos do circuito pode haver a necessidade de recorrer a componentes adicionais. A tensão que se obtém na carga de um rectificador de onda-completa tem uma forma já anteriormente estudada, como se pode verificar na figura 33(b).

Durante um ciclo completo, a tensão cresce desde zero a um valor de pico máximo, caindo de novo até zero. Este padrão de tensão está longe de ser o indicado para a maioria dos equipamentos electrónicos, pois estes necessitam de uma tensão contínua similar à fornecida por uma bateria. Para se obter uma tensão próxima deste padrão, é necessário o uso de um filtro, que neste caso consiste na adição de um condensador em paralelo com a carga como se mostra na figura.

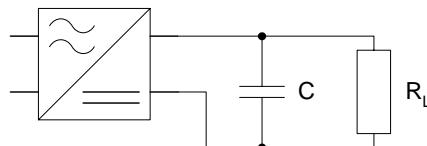


Figura 35 – Filtro

A interpretação do que se passa é bastante simples. Inicialmente o condensador carrega à tensão máxima do circuito. Quando a forma de onda sinusoidal evolui no tempo, e depois de atingir o seu máximo, começa a decair, o condensador passa a fornecer a carga que anteriormente havia armazenado, o que vai contribuir para uma diminuição da tensão de **ripple**, fazendo com que a forma de onda se aproxime da tensão contínua. O valor da tensão de **ripple** é dado por:

$$U_{\text{ripple}} = \frac{I}{fC}$$

Onde:

$U_{\text{ripple}}$  – tensão de **ripple** (pico-a-pico)

I – Corrente de carga

f – Frequência da tensão rectificada

C – Capacidade do condensador

Quanto maior for a capacidade do condensador, maior será a sua capacidade para fornecer energia e consequentemente mais próxima da tensão contínua ficará a forma de onda obtida.

Há que salientar também que o aumento da capacidade do condensador, produz um pico de corrente muito elevado, que pode danificar a ponte rectificadora, caso esta não esteja convenientemente dimensionada. O valor de tensão na carga, a seguir ao condensador é dado por:

$$V_L = V_{\max} - V_D$$

A forma de onda obtida é a ilustrada na figura seguinte:

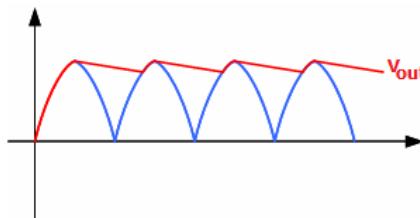


Figura 36 – Onda de saída com ondulação (Ripple)

## ESTABILIZADOR

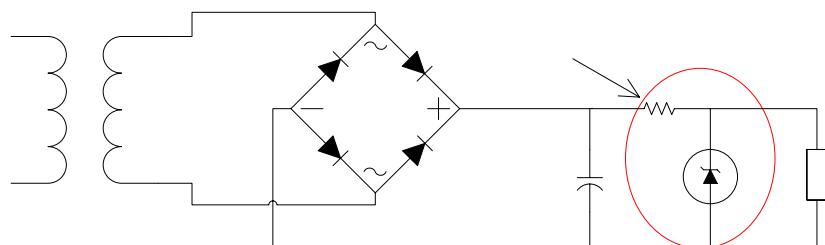


Figura 37 – Fonte de Alimentação com circuito estabilizador

O circuito estabilizador pode aproveitar esta entrada DC para produzir uma tensão DC que não só possui menos "ripple" ou variação AC, como ainda mantém constante o nível de saída, mesmo para variações na entrada ou na carga a que está ligada. Esta estabilização é geralmente obtida, utilizando-se um diodo zener. Para poder funcionar correctamente no circuito e estabilizar ou regular o valor da tensão, o circuito com diodo zener deve obedecer a algumas condições. O diodo zener deve estar inversamente polarizado, a tensão da fonte deve ser superior à tensão de zener e deve ter uma resistência em série para limitar a corrente.

Com este circuito a tensão aplicada à carga será sempre igual à tensão de zener, independentemente de tensões na carga ou na própria tensão de alimentação, tal como a tensão de *ripple*, presente nos rectificadores com filtragem por condensador.



# TRANSÍSTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO

## INTRODUÇÃO

Em electrónica existe uma infinidade de sinais de fraca intensidade, que para se tornarem úteis, necessitam de ser amplificados. Até à década de 50, essa amplificação era feita através de válvulas electrónicas, razão pela qual os computadores tinham dimensões enormes.

Em 1951, William Shockley, John Bardeen e Walter Brattain inventaram o primeiro transístor, representado na figura seguinte, que tinha como funções, amplificar, oscilar, comutar, etc.



Figura 38 – Primeiro transístor

Basicamente o seu funcionamento versa na utilização de uma tensão entre dois terminais para controlar a corrente no terceiro terminal.

## O TRANSÍSTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO

A designação de bipolar deve-se ao facto de a corrente ser conduzida tanto por electrões como por lacunas.

## CONSTITUIÇÃO DO TRANSÍSTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO

O transístor é constituído por três regiões dopadas, o **emissor** (E), a **base** (B) e o **colector** (C), sendo o emissor e o colector sempre do mesmo tipo de semicondutor. Assim, é possível obter dois tipos de transístores, o **PNP** e o **NPN**, como se pode verificar na figura seguinte.

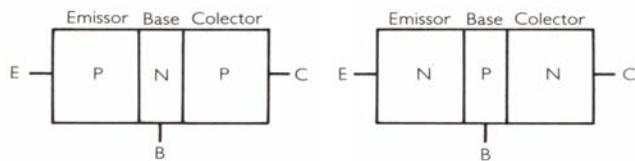


Figura 39 – Constituição dos transístores PNP e NPN

A região de emissor é a que tem uma maior concentração de impurezas enquanto a base é a que tem uma dopagem mais fraca. O transíster é constituído por duas junções PN, a junção emissor-base e a junção colector-base, daí que quando não polarizado, se pode afirmar que estamos perante dois díodos em montagem reflectida, conforme a figura 40. Polarizando qualquer uma das junções, directa ou inversamente, verifica-se que estas se comportam exactamente como as junções PN anteriormente estudadas.

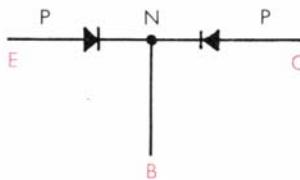


Figura 40 – Transíster PNP não polarizado

Cada junção possui uma zona de depleção cuja barreira de potencial é de cerca de 0,7V para junções de silício e de cerca de 0,3V para junções de germânio. O nosso estudo incidirá nos transístores NPN de silício, por estes serem mais utilizados.

## SÍMBOLO GRÁFICO

A figura 41 ilustra os símbolos gráficos para os dois tipos de transístores acima referidos. O emissor tem uma seta que indica o sentido da corrente (convencional).

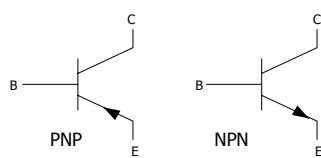


Figura 41 – Símbolos gráficos dos transístores PNP e NPN

## FUNCIONAMENTO DOS TRANSÍSTORES

O funcionamento dos transístores rege-se pela física dos semicondutores e as suas características variam com as tensões aplicadas, com as potências dissipadas e com a temperatura ambiente.

Num transístor polarizado, a função do emissor é injectar os seus electrões livres na base. Por sua vez a base tem como função fazer passar esses mesmos electrões para o colector. Se  $V_{BB}$  for superior à barreira de potencial da junção emissor-base,  $V_{BE}$ , os electrões livres do emissor entram na base. Estes electrões podem fluir para o colector ou saem da base para a fonte  $V_{BB}$ , através de  $R_B$ , como se pode verificar na figura 42. Na realidade a maioria deles segue para o colector porque a base é muito fina e fracamente dopada, poucos são aqueles que recombina com lacunas na base. Depois de entrarem no colector, os electrões são atraídos pelas lacunas da fonte de tensão  $V_{CC}$ .

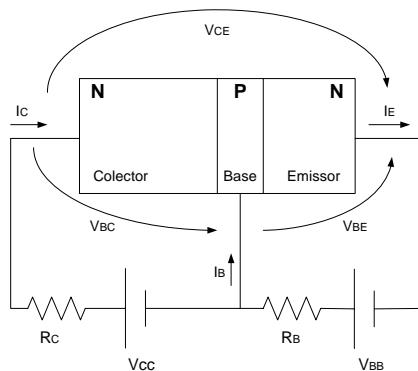


Figura 42 – Transístor NPN polarizado

Nesta figura estão também representadas as tensões e as correntes (no sentido convencional) fundamentais do transístor NPN, onde  $I_B$  representa a corrente da base,  $I_C$  a corrente do colector,  $I_E$  a corrente do emissor,  $V_{BE}$  a tensão entre a base e o emissor, que geralmente é 0,7V se o transístor for de silício,  $V_{CE}$  a tensão entre o colector e o emissor e  $V_{BC}$  representa a tensão entre a base e o colector.

Relativamente ao transístor PNP, o funcionamento é semelhante mas com sentidos de correntes opostos, como mostra a figura 43. Enquanto que no NPN, os electrões são os portadores maioritários no emissor, no PNP os portadores maioritários no emissor são as lacunas. Assim o emissor injecta lacunas na base, que seguem posteriormente para o colector. Geralmente um circuito que utilize transístores PNP, é utilizada uma fonte  $V_{CC}$  com um valor negativo.

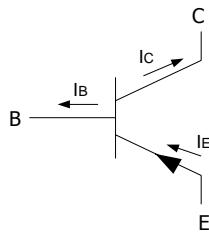


Figura 43 – Sentido das correntes no transistor PNP

## CORRENTES DO TRANSÍSTOR

O transistor possui três correntes causadas pelos portadores maioritários do emissor. A corrente de colector que é aproximadamente igual à corrente de emissor e a corrente de base, que é muito pequena comparativamente com as duas anteriores. Estas correntes podem ser relacionadas. Segundo a lei das correntes de Kirchhoff, o somatório das correntes que convergem num determinado ponto, é igual ao somatório das correntes que divergem desse mesmo ponto. Assim, pode-se obter a expressão fundamental das correntes dos transístores:

$$I_E = I_C + I_B$$

Como a corrente de base é muito pequena:

$$I_E \approx I_C$$

Esta comparação leva-nos a duas constantes, o  $\alpha$  (alfa) e o  $\beta$  (beta). O  $\alpha$  define-se como o ganho de corrente em base comum, sendo a razão entre a corrente de colector e a corrente de emissor:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

Sendo estas duas correntes praticamente iguais,  $\alpha$  é aproximadamente igual a 1. Na realidade  $\alpha$  varia entre 0,95 e 0,99.

O  $\beta$ , também conhecido como ganho de corrente em emissor comum, é a razão entre a corrente de colector e a corrente de base:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

O valor desta constante é fortemente influenciado pela largura da região da base e pela concentração de portadores da base e do emissor. Tipicamente, o valor de  $\beta$  está compreendido entre 100 e 300. Relacionando as fórmulas anteriores, obtém-se:

$$I_E = I_C + I_B \Leftrightarrow I_E = \beta I_B + I_B \Leftrightarrow I_E = I_B(\beta + 1)$$

$$I_E = I_C + I_B \Leftrightarrow I_E = I_C + \frac{I_C}{\beta} \Leftrightarrow I_E = I_C \left( \frac{\beta + 1}{\beta} \right)$$

Deste resultado, deduz-se que:

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

E consequentemente:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

## CURVA CARACTERÍSTICA

Por vezes torna-se útil descrever graficamente as características  $i-v$  do transístor. Utilizando o circuito da figura seguinte, é possível fazer esse estudo.

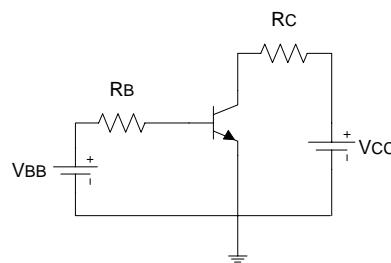


Figura 44 – Montagem básica com transístor NPN

Começando pela característica  $i_B - V_{BE}$ :

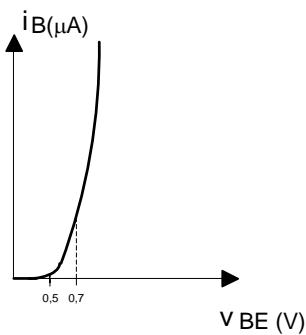


Figura 45 – Característica  $i_B - V_{BE}$  para um transístor NPN

A curva é parecida com a curva característica do diodo, isto porque a base e o emissor formam uma junção PN, neste caso polarizada directamente.

Falta então estudar a característica de colector, ou seja,  $i_C$  em função de  $V_{CE}$ :

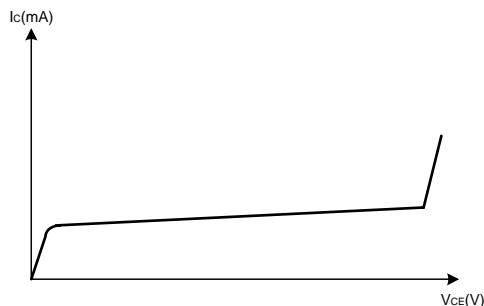


Figura 46 – Característica  $i_C - V_{CE}$  para um transístor NPN

Quando  $V_{CE}$  é igual a zero, a junção colectora não está polarizada e como tal, a corrente também é nula. Ao aumentarmos essa tensão, a corrente aumenta de uma forma quase proporcional. Segue-se a zona onde por mais que  $V_{CE}$  aumente, a corrente mantém-se praticamente constante. Por fim temos a **disrupção**, que é a zona que ao ser atingida, danificará o transístor pois este atinge uma potência elevada. Esse valor corresponde ao  $V_{CEmáx}$  que consta nas folhas de dados de cada transístor.

A **potência de dissipação** pode ser calculada pela fórmula:

$$P_D = V_{CE} \times I_C$$

Esta é a característica para um valor de  $I_B$ , no entanto, variando  $R_B$  ou  $V_{BB}$ , obtemos vários valores de  $I_B$ . Obtém-se assim uma família de curvas, como se pode observar na figura seguinte.

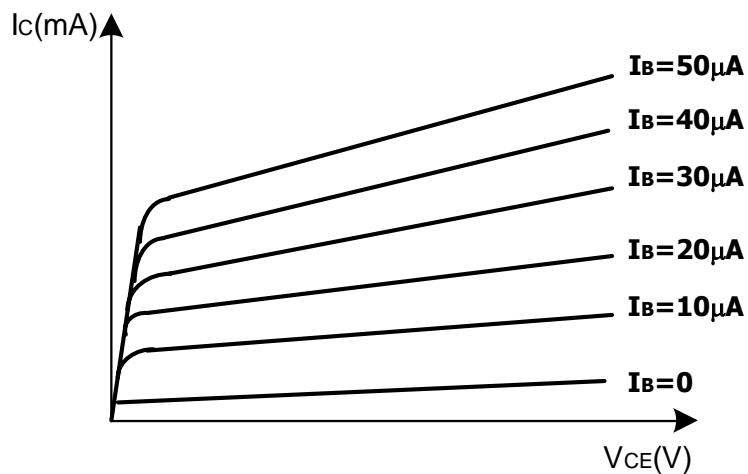


Figura 47 – Característica  $i_c$ - $V_{CE}$  para um transístor NPN, com diversos valores de  $i_b$

Apesar destas correntes não serem constantes, a partir de determinado ponto, são rectas com uma determinada inclinação. Prolongando essas rectas para valores negativos de  $V_{CE}$ , verifica-se que elas se interceptam todos num só ponto,  $V_A$ , conhecido como **Tensão de Early**, em homenagem ao primeiro cientista a estudar este fenómeno.

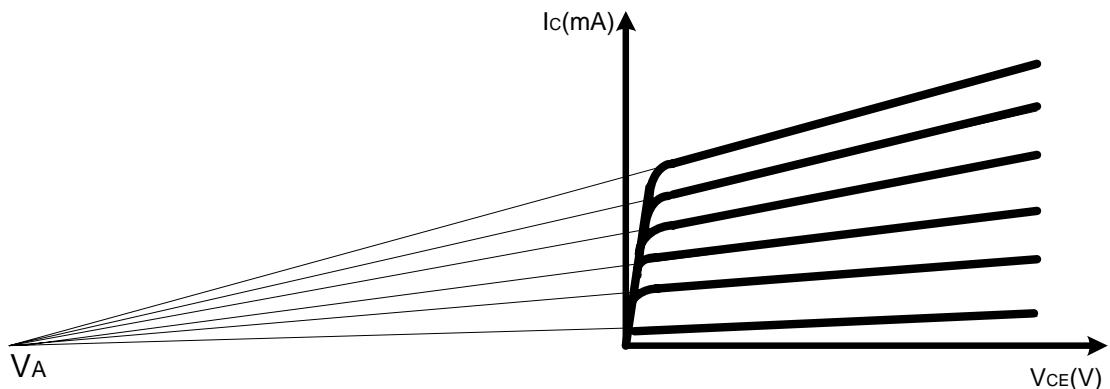


Figura 48 – Tensão de Early ( $V_A$ )

De referir que todo este estudo incidiu no transístor NPN. De facto as características do PNP são semelhantes, no entanto apresentam correntes de coletor e de base negativas e  $V_{CE}$  negativo.

## TIPOS DE MONTAGEM

Existem três tipos de montagens que se pode fazer com transístores: Emissor comum (EC), Colector comum (CC) e Base comum (BC).

### EMISSOR COMUM

O emissor é o terminal que é comum ao circuito de entrada e ao circuito de saída, daí ser reconhecido como emissor comum. A fonte  $V_{BB}$  polariza directamente a junção emissora. Variando esta fonte ou  $R_B$ , consegue-se variar a corrente de base. Esta corrente, por sua vez, faz variar a corrente de colector. Esta montagem é utilizada quando se pretende amplificar a corrente e a tensão.

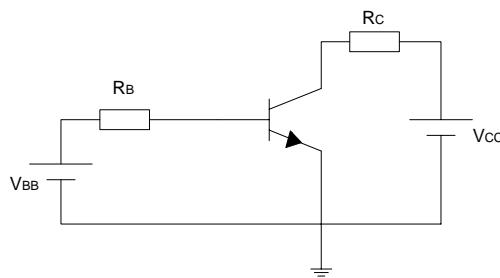


Figura 49 – Montagem em emissor comum

### COLECTOR COMUM

O colector é o terminal comum aos circuitos de entrada e de saída. Uma pequena corrente de base, comanda uma grande corrente de emissor, à custa de uma tensão de entrada,  $V_{BC}$ , praticamente igual a  $V_{CE}$ . Este tipo de montagem é utilizada quando se pretende amplificar apenas a corrente.

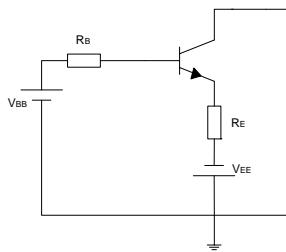


Figura 50 – Montagem em colector comum

## BASE COMUM

Analogamente à montagem de emissor comum, a montagem da figura 51, é chamada de base comum, por ter a base como terminal comum à entrada e à saída do circuito. Este tipo de montagem é utilizada quando se pretende amplificar apenas a tensão.

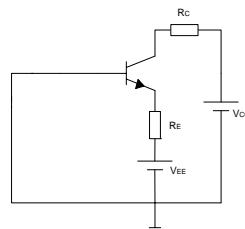


Figura 51 – Montagem em base comum

## ZONAS DE FUNCIONAMENTO

As características de saída dividem-se em três zonas de funcionamento do transístor, figura 52.

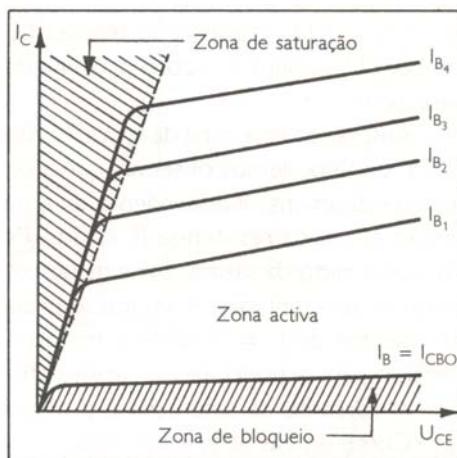


Figura 52 – Zona de funcionamento do transístor

A primeira destas áreas é a **zona activa** é caracterizada pela polarização directa da junção de emissor e pela polarização inversa da junção de colector. É a zona à direita, com tensões  $U_{CE}$  superiores a algumas décimas de volt e acima da curva de  $I_B = 0$ . Nesta zona a corrente de colector responde com maior sensibilidade a um sinal de entrada ou variação da corrente de base.

Se o parâmetro  $\alpha$  fosse constante, a corrente  $I_C$  não dependeria de  $U_{CE}$  e as curvas seriam horizontais. Se a tensão  $|U_{CE}|$  aumenta de alguns volts a 10 V, implica um aumento no parâmetro  $\alpha$ , que cresce, por exemplo, de 0,98 para 0,985, o que faz  $\beta$  variar de 49 para 66, ou seja, uma variação de 34 % enquanto

$\alpha$  só varia 0,5%. Torna-se evidente que pequenas variações de  $\alpha$  produzem grandes variações de  $\beta$  e grandes variações nas curvas de saída.

A segunda das áreas é a **zona de bloqueio ou zona de corte**. Por observação da figura 52, conclui-se que essa zona tem uma corrente de colector igual a  $I_{CBO}$  e uma corrente de emissor nula.

No transístor de germânio uma tensão inversa na junção do emissor de 0,1 V será suficiente para bloquear o transístor.

Nos transístores de silício, o parâmetro  $\alpha$  é quase zero devido às recombinações da zona de depleção da junção de emissor. Assim, com  $I_B = 0$  temos  $I_C \approx I_E$ , o que corresponde a estar próximo do corte.

A terceira zona, chamada **zona de saturação**, é caracterizada por ter as junções de colector e emissor polarizadas directamente com uma tensão, pelo menos igual à tensão de arranque  $U_r$ . Como  $U_{CE} = U_{BE} - U_{BC}$  e porque as tensões  $U_{BE}$  e  $U_{BC}$  são do mesmo sinal e da ordem das décimas de volt, também  $U_{CE}$  o será. É a zona próxima do eixo das ordenadas, em que as curvas tendem rapidamente para zero. Normalmente considera-se que o transístor está à saturação quando  $U_{CE} < 0,3V$ .

Na tabela 2 pode-se observar um quadro resumo das zonas de funcionamento.

Modo de Funcionamento	Junção EB	Junção CB	Aplicações
<b>Zona Activa</b>	Polarizada directamente	Polarizada inversamente	Amplificadores
<b>Zona de Corte</b>	Polarizada inversamente	Polarizada inversamente	Interruptores, portas lógicas, circuitos TTL, etc.
<b>Zona de Saturação</b>	Polarizada directamente	Polarizada directamente	

Tabela 2 – Zonas de funcionamento do transístor

## O TRANSÍSTOR COMO COMUTADOR E AMPLIFICADOR

Na montagem emissor comum ou colector comum podemos observar que uma variação pequena da corrente de base produz variações significativas da corrente de colector. Diremos que houve uma **amplificação de corrente**.

Nas montagens emissor ou base comum à custa de pequenas tensões ou das suas variações comandamos tensões de saída mais elevadas. Há uma **amplificação de tensão**.

Em qualquer das montagens, a potência em jogo no circuito de entrada é sempre menor do que a do circuito de saída. Teremos sempre uma **amplificação de potência**.

O transístor no circuito da figura 53 (a) é usado como interruptor para ligar ou desligar a carga  $R_L$ , da fonte de tensão, com a diferença de que o transístor pode ser operado electricamente e com uma resposta mais rápida do que o interruptor mecânico da figura 53 (b).

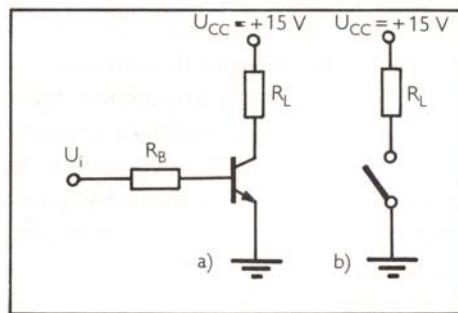


Figura 53 – Transístor como comutador e amplificador

Quando o transístor está bloqueado, a resistência  $R_L$  está desligada da fonte de tensão. Idealmente a corrente seria nula, mas na prática é perfeitamente desprezável. Se o transístor estiver saturado, a carga  $R_L$  está ligada à tensão  $U_{CC}$ , embora haja uma queda de tensão também desprezável no transístor.

Chama-se **comutação** à passagem do estado bloqueado ao estado saturado e vice-versa. A comutação não é um fenómeno instantâneo. A passagem rápida de um estado ao outro necessita de transístores fabricados especialmente para esse fim.



# TIRISTORES

## INTRODUÇÃO

Tiristores são componentes electrónicos, bastante utilizados na electrónica de potência, com realimentação interna para produzir uma acção de comutação. O SCR, o TRIAC e o DIAC são os tiristores mais conhecidos. Utilizam-se na protecção contra sobretensões, em manobradores de motores, conversão AC – CA e CA – AC, sistemas de iluminação e outras cargas de correntes intensas.

É conhecido por ter uma característica estacionária tensão-corrente, representada na figura 54. A característica tem duas zonas. Na zona I, as correntes são baixas, podendo as tensões ser elevadas, estando assim o dispositivo **bloqueado**. Na zona II, as tensões são baixas e as correntes podem ser elevadas, colocando o dispositivo em **condução**. Assim, o tiristor pode ser considerado como comutador electrónico.

A transição da zona I para a II é instável e na figura está a tracejado pois não é possível ter um ponto de funcionamento em repouso nesta zona. A tensão  $U_B$  para a qual se dá a transição, chama-se tensão de báscula. A corrente  $I_L$  para o qual se inicia o estado de condução designa-se por corrente de fecho.

Depois de o tiristor estar à condução, para se voltar à zona I, é necessário baixar a corrente até ao valor da corrente de manutenção ( $I_H$ ). As transições de I para II e de II para I fazem-se por percursos diferentes pelo que o sistema apresenta histerese.

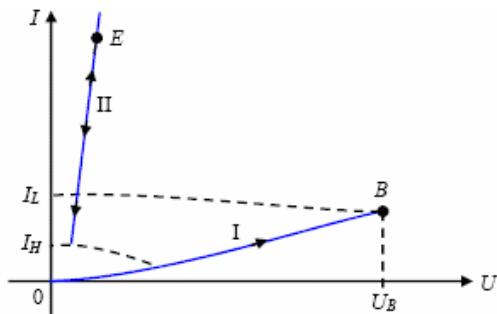


Figura 54 – Característica dos tiristores

Tiristor é a designação genérica que se dá a todos os dispositivos de quatro camadas de material semicondutor e três junções PN. É um elemento biestável que trabalha na região de saturação ou na região de corte. A estrutura semicondutora comum é PNPN, tal como se pode ver na figura 55. A trava ideal é um circuito que permite compreender o funcionamento do tiristor.

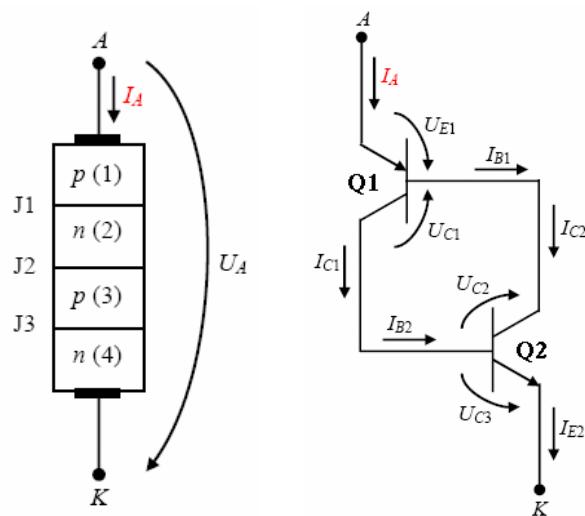


Figura 55 – Estrutura do tiristor e trava ideal

As regiões das extremidades têm características emissoras. A estrutura pode ser interpretada como sendo dois transistores (um PNP e outro NPN) ligados pelas respectivas bases. O colector de Q1 excita a base de Q2 e o colector de Q2 activa a base do Q1. Esta ligação funciona como sendo uma realimentação positiva, pois qualquer variação de corrente na base de Q2 é amplificada e realimentada através de Q1.

Não havendo inicialmente corrente no colector, ambos os transistores estão ao **corte**. Quando se aplica um impulso positivo na base de Q2, ou negativo na base de Q1, o transistor será activado, fornecendo uma corrente amplificada à base do outro, que amplificará esta corrente, fornecendo assim uma corrente ainda maior à base do transistore que recebeu o pulso. Este processo leva a que os transistores entrem rapidamente à **saturação**.

## SCR

Dentro do grupo dos tiristores, o SCR (Silicon Controlled Rectifier), rectificador controlado de silício é o mais vulgarmente utilizado. Basicamente é a estrutura do díodo de quatro camadas com um terminal adicional, designado por terminal de porta ou de *gate*, que tem como função controlar a tensão de báscula.

Com polarização directa aplicada, apenas a junção J2 fica inversamente polarizada, pela qual circula uma corrente inversa de saturação. Ao introduzir-se uma corrente de gate,  $I_G$ , o número de portadores de carga que predominam nessa região P vai aumentar, facilitando a multiplicação em avalanche. Assim, controlando a tensão de *gate*,  $U_G$ , controla-se a corrente dessa região, conseguindo-se variar a tensão de disparo do tiristor, pois esta depende do número de electrões que percorrem a junção J3 polarizada directamente.

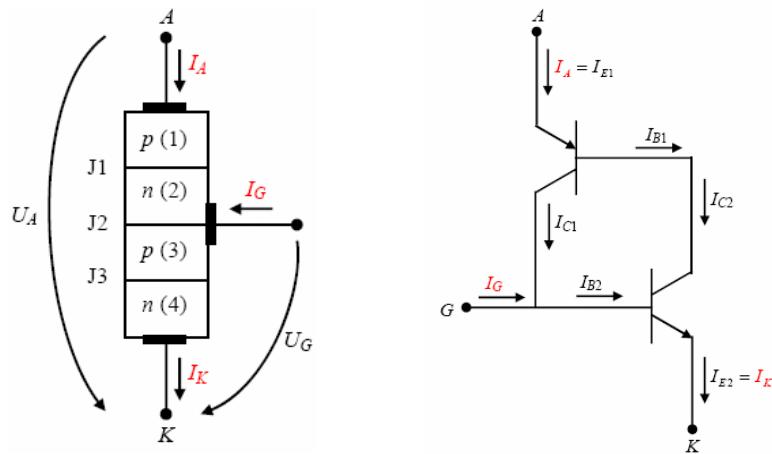


Figura 56 – Estrutura do SCR e modelo dos dois transístores

O SCR entre à condução, a *gate* deixa de exercer influência sobre o SCR. Nesta situação a tensão entre o ânodo (A) e o cátodo (K) ronda os 0,8V. Depois do SCR passar à condução, só existe uma forma de cortar a corrente. A técnica consiste em fazer diminuir a corrente que o percorre a um valor inferior à sua corrente de manutenção.

Na figura 57, podemos observar a curva característica do SCR, onde se destaca os estados de funcionamento ON e OFF. Pode também observar-se três zonas distintas, a zona de polarização inversa, a zona de polarização directa sem disparo do SCR e a zona de condução. A primeira corresponde à polarização inversa, onde o SCR se encontra ao corte, circulando nele apenas uma pequena corrente de fugas até que a tensão chegue à tensão de ruptura inversa ou tensão de breakdown,  $V_{BD}$ . Neste caso a corrente aumenta rapidamente, levando à destruição do tiristor.

Na segunda região, apesar da polarização directa, o tiristor continua ao corte, existindo, mais uma vez, uma pequena corrente de fugas.

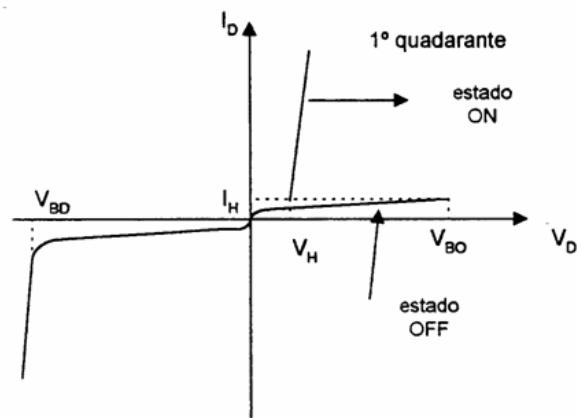


Figura 57 – Curva característica do SCR

Quando a polarização directa é progressivamente aumentada, atinge-se um ponto em que a corrente directa aumenta rapidamente, passando o SCR para a condução. A tensão à qual se dá este fenómeno é conhecida por tensão de ruptura directa ou tensão de breakover,  $V_{BO}$ . A corrente nesta região é praticamente limitada pela impedância da carga do circuito externo.

Em condições de polarização directa, a tensão de ruptura directa pode ser controlada através da corrente de gate, como se pode constatar na figura 58.

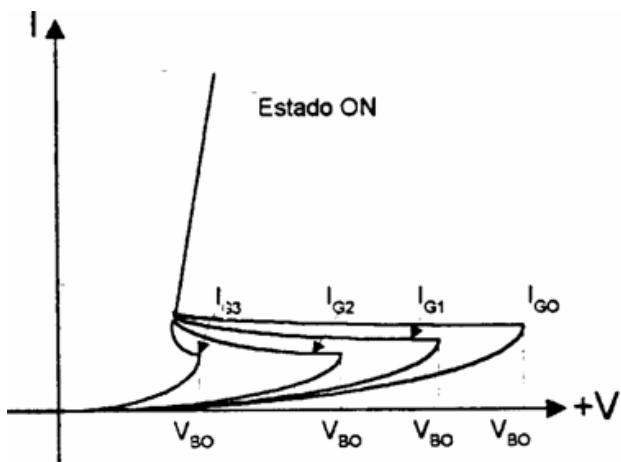


Figura 58 – Comportamento do SCR, para várias correntes de gate

Note-se que à medida que a corrente de gate aumenta, a tensão de ruptura directa reduz-se. Após o SCR ter sido disparado, a corrente que o atravessa é independente da corrente de gate.

## SÍMBOLO GRÁFICO

O símbolo gráfico do SCR, como se pode verificar na figura seguinte, é semelhante ao do diodo com a inclusão da porta.

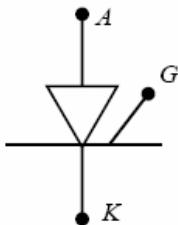


Figura 59 – Símbolo gráfico do SCR

## CIRCUITOS DE DISPARO DO TIRISTOR

Nos vários circuitos possíveis de disparo do SCR pode-se fornecer à gate uma corrente contínua, entrando o tiristor à condução logo que o ânodo tenha uma tensão superior ao cátodo. Este método tem o inconveniente de que a energia de controlo consumida é muito maior do que a necessária ao disparo. Utilizando impulsos melhora-se este consumo, pois apesar da energia do impulso ser elevada, a energia total diminui. Estes impulsos obtêm-se mediante a descarga de um condensador na gate. Quando os impulsos acontecem quando a tensão da rede passa por zero, então diz-se que os disparos são síncronos. Se for noutra qualquer altura do ciclo, diz-se que os disparos são assíncronos.

Apesar dos circuitos de disparo assíncronos serem mais económicos, originam interferências de radiofrequência, durante o processo de disparo, pelo que não dispensam o uso de filtros.

Os circuitos síncronos não produzem interferências durante o processo de comutação, uma vez que a comutação é efectuada quando a tensão da rede de alimentação passa por zero ou próximo.

Outro circuito de disparo utilizado é o controlo de fase e é utilizado quando se pretende o controlo contínuo da potência da corrente alternada que se fornece a uma carga. Este tipo de controlo, que usa um controlador proporcional, consiste em ligar a carga a uma fração controlada de cada ciclo, por meio do disparo do tiristor numa determinada fase da onda. O esquema de blocos deste circuito de disparo está representado na figura seguinte.

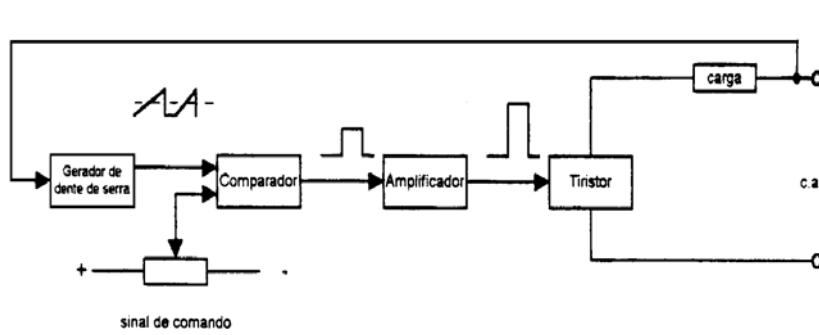


Figura 60 – Diagrama de blocos do disparo por controlo de fase

## PROTECÇÃO DO TIRISTOR FRENTE A ALTAS VARIAÇÕES DE CORRENTE ( $\partial I / \partial t$ ) E DE TENSÃO ( $\partial V / \partial t$ )

O processo utilizado para protecção do tiristor frente a rápidas variações de correntes ( $\partial I / \partial t$ ) é utilizar uma bobine em série, conforme a figura seguinte, que se comporta como um retardador de corrente, até se saturar, altura a partir do qual a corrente circula livremente. Como consequência a potência dissipada na zona da gate diminui no intervalo de tempo que o tiristor está ao corte.

A colocação de uma resistência em série com um condensador, ambos em paralelo com o SCR, como se representa na figura seguinte, limita o pico de tensão induzida, produzido no processo de corte do SCR.

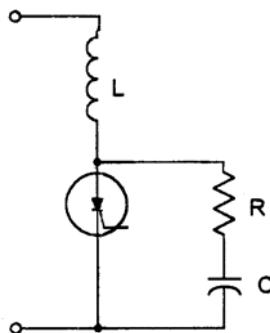


Figura 61 – Protecção do SCR frente a altas variações de corrente e tensão

## MÉTODOS E CIRCUITOS DE COMUTAÇÃO

Existem dois métodos para colocar o SCR ao corte. A comutação natural, quando se faz com que a corrente de condução seja inferior à de manutenção quer seja através de um interruptor, quer seja através do aumento da impedância da carga. A comutação forçada, quando se inverte a tensão entre o ânodo e o cátodo através de um circuito exterior.

Na figura 62, pode-se observar os circuitos de bloqueio. O da figura a) é considerado de comutação natural. Os restantes são de comutação forçada. Nos circuitos e) e f), utiliza-se um tiristor adicional e um transístor, respectivamente, para que estes quando entrarem à condução provoquem a descarga do condensador sobre o tiristor.

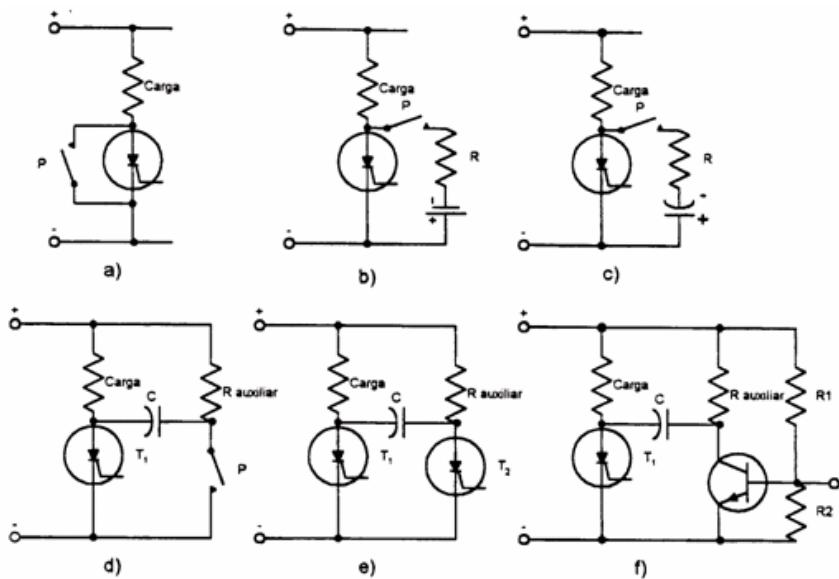


Figura 62 – Circuitos de bloqueio do tiristor

## TRIAC

O TRIAC (Triod Alternating Current Switch) é um tiristor bidireccional que resulta da montagem em antiparalelo de dois SCR com um terminal de gate comum. Trata-se de um tiristor equivalente ao SCR, mas para aplicação em AC. A estrutura interna do TRIAC está representada na figura seguinte.

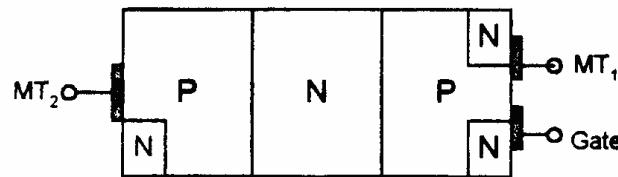


Figura 63 – Estrutura interna do TRIAC

A tensão é aplicada directamente aos eléctrodos MT1 e MT2. O TRIAC de pois de disparado, só deixa de conduzir quando a tensão alternada entre MT1 e MT2 se anula, o que significa que o TRIAC tem de ser disparado em cada uma das alternâncias.

## SÍMBOLO GRÁFICO

Na figura seguinte está representado o símbolo gráfico do TRIAC.

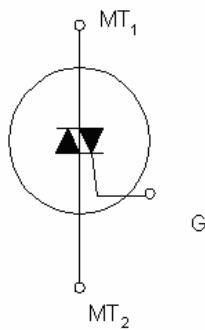


Figura 64 – Símbolo gráfico do TRIAC

## CURVA CARACTERÍSTICA

A curva característica do TRIAC encontra-se na figura 65, onde se verifica uma simetria, o que indica um comportamento idêntico na condução para ambos os sentidos, daí se dizer que o TRIAC é um dispositivo bidireccional. A principal vantagem deste dispositivo em relação ao SCR é o facto do impulso de disparo na gate poder ser positivo ou negativo.

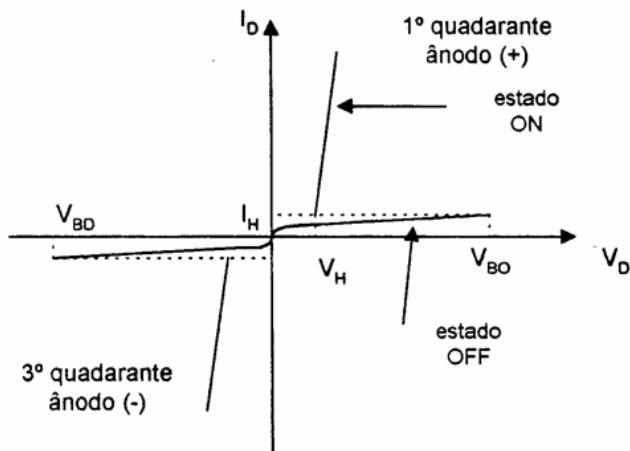


Figura 65 – Curva característica do TRIAC

Como a polaridade da corrente de disparo pode ser de qualquer tipo, o circuito de comando da gate pode ser formado por uma simples resistência de protecção num circuito auxiliar de comando, como representado na figura 66.

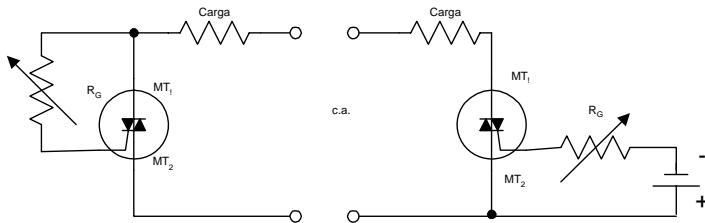


Figura 66 – Circuitos de disparo do TRIAC

## COMUTAÇÃO POR ZERO

Um interruptor ideal é aquele que comuta de OFF para ON quando a tensão aos seus terminais é nula, e que o coloca ao corte quando a corrente que o atravessa é nula. É a comutação por zero também conhecida por *zero voltage switching*.

Quando um circuito de potência é ligado ou desligado, podem gerar-se componentes de alta frequência no instante em que se realiza a comutação, podendo estas produzir interferências indesejáveis. O uso de tiristores permite eliminar interferências devido ao corte brusco de correntes, já que as suas características só permitem o bloqueio quando a corrente se aproxima de zero.

A figura 67 representa um circuito de disparo por zero coma ajuda de outro TRIAC. Enquanto T<sub>1</sub> conduz, T<sub>2</sub> permanece ao corte. Quando T<sub>1</sub> ficar ao corte, T<sub>2</sub> entra à condução logo que receba um impulso na gate.

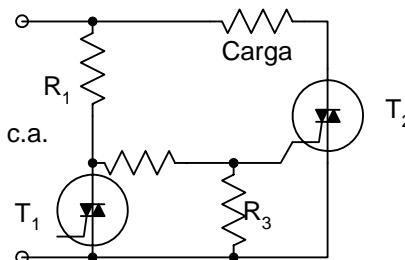


Figura 67 – Circuito de disparo por zero

## DIAC

O DIAC, Diode Alternating Current Switch, cuja estrutura se mostra na figura 68, é um diodo de avalanche com dois eléctrodos, que pode passar do corte à condução para ambos os sentidos da tensão aplicada.

É muito utilizado como dispositivo de disparo de TRIAC's em circuitos de controlo de intensidade luminosa, aquecimento, velocidade de motores e outras aplicações semelhantes.

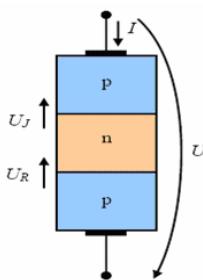


Figura 68 – Estrutura interna do DIAC

Estruturalmente, o DIAC assemelha-se a um transístor bipolar. A principal diferença consiste em que no DIAC, a concentração de impurezas é idêntica em ambas as junções, resultando assim, numa característica simétrica bidireccional. Quando se aplica através do DIAC uma tensão positiva ou negativa, que se faz aumentar progressivamente, verifica-se a existência de uma pequena corrente de fuga que se mantém com um valor reduzido até se atingir a tensão de breakover. Aqui acontece a avalanche e como o dispositivo tem uma característica de resistência negativa, a corrente aumenta mesmo com a diminuição da tensão aplicada.

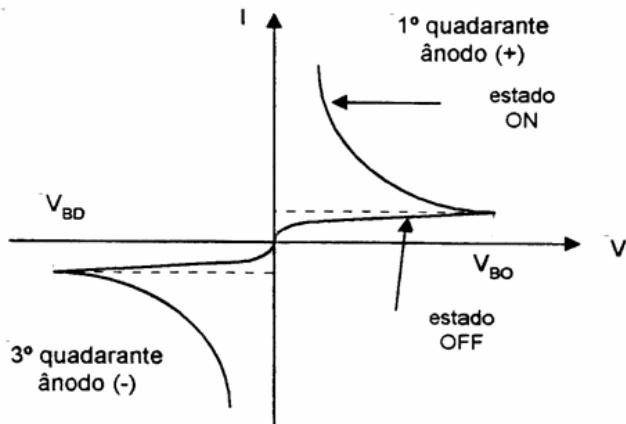


Figura 68 – Curva característica do DIAC

## SÍMBOLO GRÁFICO

O símbolo gráfico deste dispositivo está representado na figura seguinte.

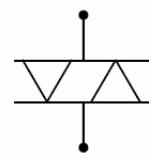


Figura 69 – Símbolo gráfico do DIAC

## CONTROLO DE FASE DE ONDA COMPLETA

Uma das aplicações do DIAC é no controlo de fase de onda completa, através do disparo de um TRIAC com um DIAC, como se pode verificar na figura 70.

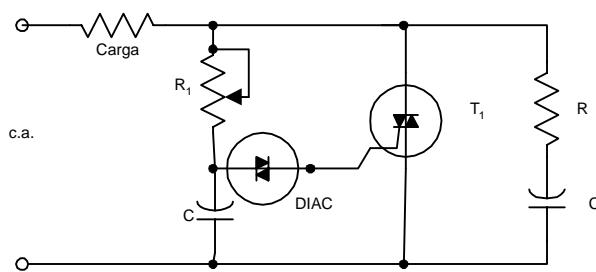


Figura 70 – Controlo de fase de onda completa



## OSCILADORES

O oscilador é um dispositivo que converte energia de corrente contínua, em energia de corrente alternada. Pode dizer-se que um oscilador é um amplificador realimentado positivamente. São circuitos astáveis apenas numa determinada frequência, e essa será a sua frequência de oscilação.

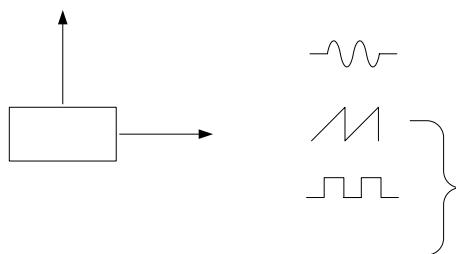


Figura 71 - Osciladores

Os osciladores podem ser classificados quanto à forma de onda gerada:

- { 1 – Sinusoidais – fornecem ondas sinusoidais
- 2 – Relaxação – fornecem ondas não sinusoidais

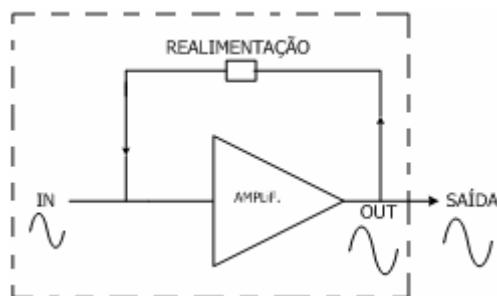


Figura 72 - Oscilador

Os osciladores, têm associado um factor de oscilação que é definido como sendo o inverso do ganho do amplificador. O factor de oscilação representa-se por  $\beta$ ; O ganho representa-se por  $A$ .

$$\beta = \frac{1}{A}$$

Isto leva-nos ao critério de Barkhausen, que terá que ser respeitado para se conseguir uma onda sem ruído. O critério é  $A * \beta = 1$ . Só assim se consegue uma onda perfeita. Não se respeitando, a amplitude da onda diminui (caso  $A * \beta < 1$ ) ou aumenta (caso  $A * \beta > 1$ ), conforme se pode verificar na figura seguinte.

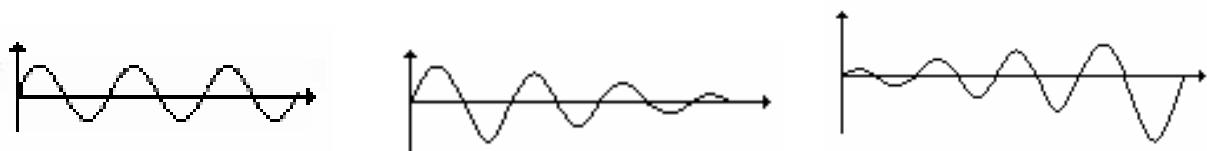


Figura 73 – Forma de onda de saída de um oscilador

a) para  $A * \beta = 1$ b) para  $A * \beta < 1$ c) para  $A * \beta > 1$ 

Quanto aos componentes da malha de realimentação, podemos classificar os osciladores, como:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{RC- para frequências} < 1\text{MHz} \\ \text{LC- para frequências} \geq 1\text{MHz} \\ \text{Cristal - para frequências mais estáveis} \end{array} \right.$

## OSCILADORES RC

Os osciladores RC podem ser de diferentes tipos, tais como:

- ✓ Oscilador em Ponte de Wien;
- ✓ Oscilador de duplo T;
- ✓ Osciladores de desfasamento.

## OSCILADOR EM PONTE DE WIEN

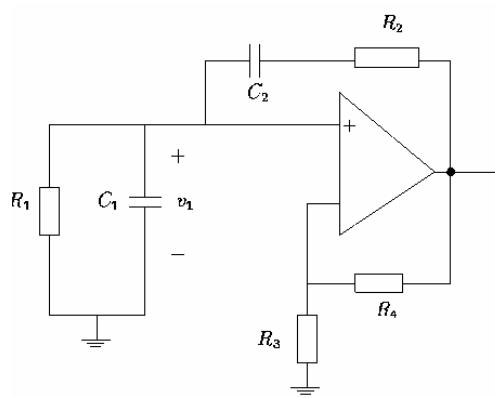


Figura 74 – Oscilador em Ponte de Wien

Um oscilador em ponte de Wien é um circuito oscilador normalizado para frequências baixas a moderadas, na gama de 5Hz até 1MHz. Utiliza-se sempre nos geradores de áudio comerciais. Utiliza um circuito de realimentação em ressonância chamado de circuito avanço-atraso. Nas frequências muito baixas o

condensador em série comporta-se com um circuito aberto ao sinal de entrada, não havendo sinal de saída. Nas frequências muito altas o condensador em paralelo aparece curto-circuitado, não havendo saída. Entre estes extremos a tensão atinge um valor máximo. A frequência em que a saída é máxima é chamada de frequência de ressonância  $f_o$ . Nesta frequência, a fracção retroactiva  $B$  atinge um valor máximo de  $1/3$ . À frequência de ressonância o desfasamento entre a tensão de entrada e a tensão de saída é nulo. Então, a fase pode variar entre  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ .

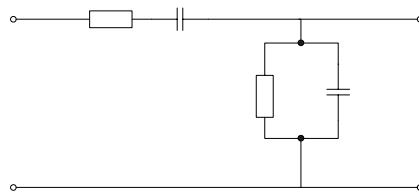


Figura 75 – Circuito avanço-atraso

Para o cálculo da frequência de ressonância, utilizamos a fórmula:

$$\frac{1}{2\pi RC} = f_o$$

## OSCILADOR DE DUPLO T

### FILTRO DE DUPLO T

Apesar do oscilador em ponte de Wien ser muito utilizado para frequências até 1MHz, usam-se outros osciladores RC em diferentes aplicações.

A figura 76 ilustra um filtro de duplo T. A análise matemática deste circuito mostra que o seu comportamento tem uma fase variável, figura 77 (b), a frequência  $f_o$  ocorre quando o valor do desfasamento é  $0^\circ$ . Na figura 77 (c), verifica-se que o ganho vale 1, para as altas e para as baixas-frequências. A equação que traduz a frequência de ressonância deste tipo de filtro é a seguinte:

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

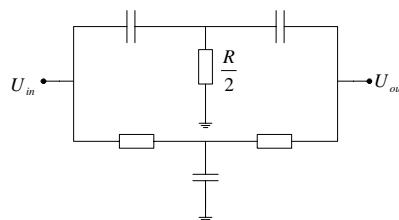
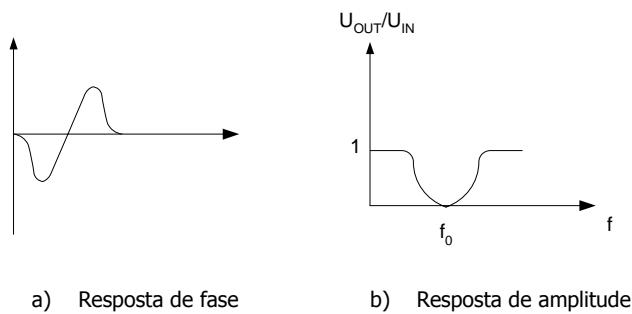


Figura 76 – Filtro de duplo T



## OSCILADOR DE DUPLO T

A figura 78 esquematiza um oscilador de duplo T. A realimentação positiva para a entrada não-inversora faz-se por meio de um divisor de tensão. A realimentação negativa faz-se através do filtro de duplo T. Quando se começa a fornecer energia, a resistência da lâmpada  $R_2$  é baixa e a realimentação positiva é máxima. Assim que aparecem as oscilações, a resistência da lâmpada aumenta e a realimentação positiva diminui.

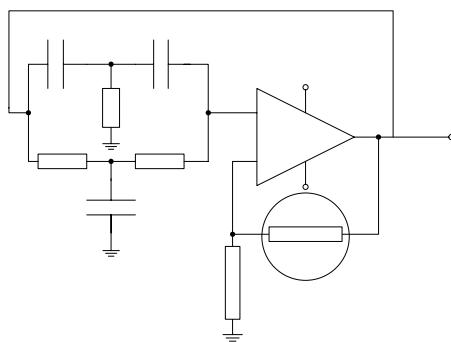


Figura 78 – Oscilador de duplo T

No filtro de duplo T ajusta-se a resistência  $R/2$ . Isto é necessário, visto que o circuito oscila para uma frequência ligeiramente diferente da frequência de ressonância ideal. Para garantir que o circuito funcione correctamente, o divisor de tensão deve ter  $R_2$  muito maior que  $R_1$ . Como orientação,  $R_2/R_1$  encontra-se entre 10 e 1000.

## OSCILADOR DE DESFASAMENTO

A figura 79 mostra um oscilador de desfasamento, com três circuitos de avanço no percurso de realimentação. Note-se que um circuito de avanço produz um desfasamento entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , conforme a frequência. Para uma dada frequência, o desfasamento total dos três circuitos de avanço é de  $180^\circ$  ( $60^\circ$  para cada circuito). O amplificador provoca um desfasamento adicional de  $180^\circ$ , porque o sinal excita a entrada inversora. O que faz com que o desfasamento total seja de  $360^\circ$ , ou seja  $0^\circ$ . Se  $AB$  for maior que 1 nesta frequência, então começam as oscilações. A figura 80 esquematiza um projecto alternativo, utiliza três

circuitos de atraso. O funcionamento é análogo. O amplificador produz um desfasamento de  $180^\circ$  e os três circuitos impõem um desfasamento de  $-180^\circ$ , para uma frequência mais alta, então o desfasamento total será  $0^\circ$ . Novamente se  $AB$  for maior que 1 começam as oscilações. Este tipo de oscilador não é muito utilizado, já que não é fácil conseguir o seu ajuste numa vasta gama de frequências.

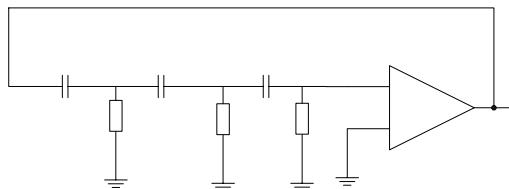


Figura 79 – Oscilador de desfasamento com três circuitos de avanço

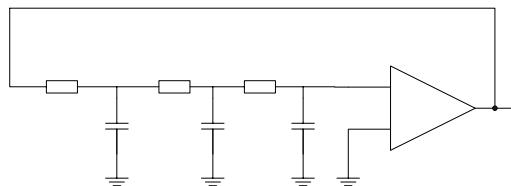


Figura 80 – Oscilador de desfasamento com três circuitos de atraso

## OSCILADORES LC

Uma forma de conseguir oscilações de alta frequência é utilizando um oscilador LC, circuito usado para frequências entre 1MHz e 500MHz. Com um amplificador e um circuito em malha fechada LC faz-se a realimentação do sinal com amplitude e fase correctas para manter as oscilações.

A análise e o projecto de osciladores de alta frequência são difíceis porque nas frequências mais elevadas as capacidades de dispersão e as indutâncias das pontas terminais tornam-se importantes na determinação da frequência de oscilação, ganho de realimentação, potência de saída e outras grandezas alteradas.

O acoplamento à carga deste tipo de osciladores pode ser feito de duas formas:

- ✓ Por condensador;
- ✓ Por transformador;

Os osciladores LC podem ser de diferentes tipos, tais como:

- ✓ Oscilador de Colpitts;
- ✓ Oscilador de Armstrong;
- ✓ Osciladores de Hartley.

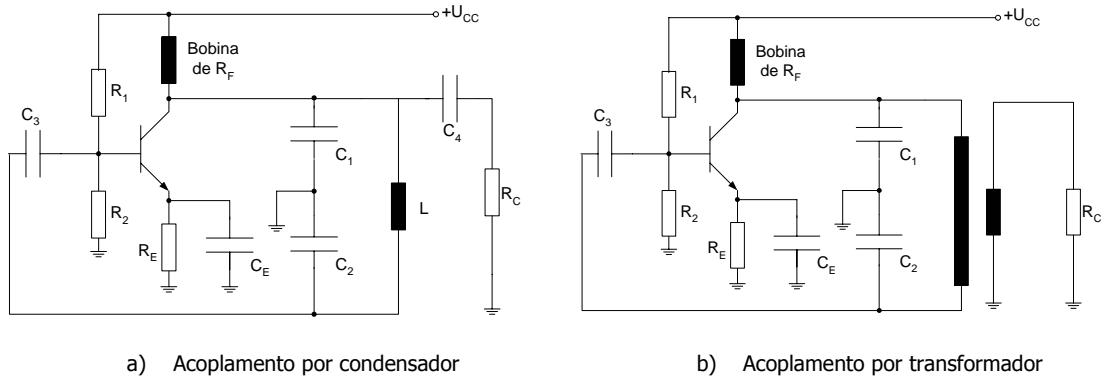


Figura 81 – Tipos de acoplamento

## OSCILADOR DE COLPITTS

Apesar de ser bom para baixas frequências, o oscilador em ponte de Wien, não se adapta às altas frequências (muito acima de 1MHz). O principal problema reside na limitação de largura de banda ( $f_{un}$ ) do amplificador operacional.

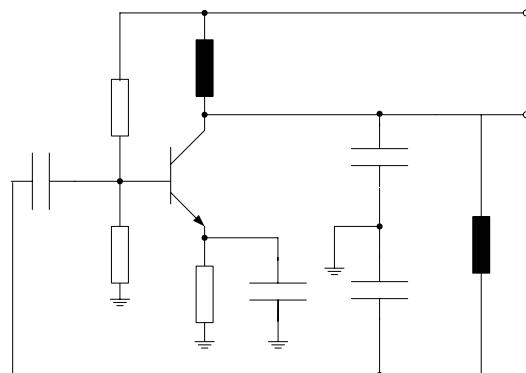


Figura 82 – Oscilador de Colpitts

A figura 82 é um esquema de um oscilador de Colpitts, na configuração emissor comum. A polaridade por divisor de tensão impõe um determinado ponto de operação em repouso. A bobina de radiofrequência possui uma elevada indutância  $X_L$ , pelo que aparece como um circuito aberto ao sinal alternado. O circuito tem ganho de tensão em baixa frequência igual a  $r_c / r_e$ , onde  $r_c$  é a resistência de colector em corrente alternada. Como a bobina de  $R_F$  se comporta como circuito aberto ao sinal alternado, a resistência do colector em corrente alternada é fundamentalmente a resistência em corrente alternada da malha ressonante.

A frequência de ressonância e a capacidade equivalente são dadas por:

$$\checkmark \quad f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

## CONDIÇÃO DE FUNCIONAMENTO

A condição de arranque de um oscilador é que se verifique  $AB>1$  à frequência de ressonância da malha ressonante. Esta condição equivale a  $A>1/B$ . O ganho de realimentação neste tipo de oscilador é dado por:

$$\checkmark \quad B = \frac{C_1}{C_2}$$

O ganho de tensão mínimo para o início do funcionamento do oscilador é:

$$\checkmark \quad A_{\min} = \frac{C_2}{C_1}$$

## OSCILADOR DE ARMSTRONG

A figura 83 ilustra um oscilador de Armstrong. Neste circuito o colector excita um circuito LC em ressonância.<sup>8</sup> Utiliza-se o sinal de realimentação num pequeno enrolamento secundário, que se aplica na base. No transformador verifica-se um desfasamento de  $180^\circ$ , o que significa que o desfasamento total é de  $0^\circ$ . Então o ganho de realimentação será:

$$\checkmark \quad B = \frac{M}{L}$$

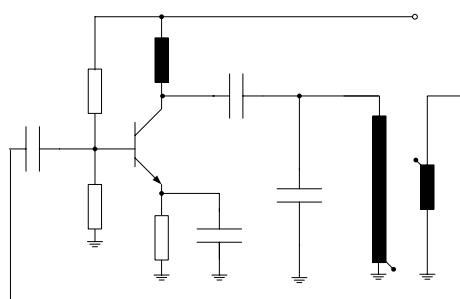


Figura 83 – Oscilador de Armstrong

Onde  $M$  é a indutividade mútua e  $L$  a indutividade própria do primário. Para que o oscilador de Armstrong arranque, o ganho de tensão deve ser maior que  $1/B$ . Um oscilador de Armstrong utiliza um acoplamento por transformador para o sinal de realimentação.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \quad B = \frac{M}{L}; \quad A_{\min} = \frac{L}{M}$$

## OSCILADOR DE HARTLEY

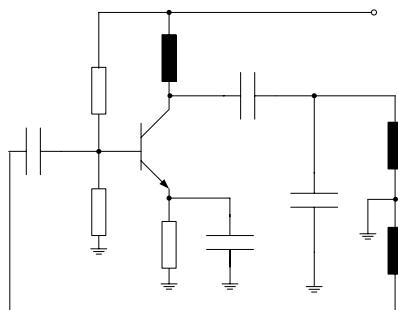


Figura 84 – Oscilador de Hartley

Num oscilador de Hartley a tensão de realimentação desenvolve-se através do divisor de tensão indutivo.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \quad L = L_1 + L_2 \quad B = \frac{L_2}{L_1} \quad A_{\min} = \frac{L_1}{L_2}$$

## OSCILADOR A CRISTAL

Quando a exactidão e a estabilidade da frequência de oscilação forem importantes, usa-se um oscilador de quartzo. Na figura 84, o sinal de realimentação vem de uma saída capacitiva. O cristal (abreviado por XTAL) actua como um indutor de elevada indutividade em série com um condensador de pequena capacidade.

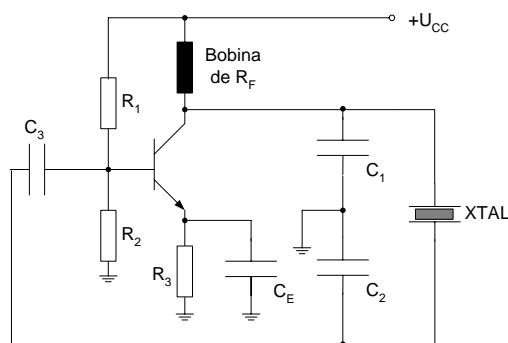


Figura 84 – Oscilador de Cristal

Alguns cristais encontrados na natureza exibem o efeito piezoeléctrico. Quando se aplica uma tensão alternada aos seus terminais verifica-se que os cristais vibram à frequência da tensão aplicada. Inversamente, se se forçar mecanicamente que estes cristais vibrem, vê-se que geram uma tensão alternada da mesma frequência. As principais substâncias que produzem este efeito piezoeléctrico, são o quartzo, os sais de Rochelle e a turmalina.

Os sais de Rochelle possuem a maior actividade piezoeléctrica. Para uma dada tensão alternada vibram mais que o quartzo ou a turmalina. Porém, são os mais fracos mecanicamente, porque se quebram com facilidade. Os sais de Rochelle têm sido utilizados para fazer microfones, grava-discos, auscultadores e altifalantes. A turmalina apresenta a menor actividade piezoeléctrica, mas é a mais robusta das três substâncias. Também é a mais cara, às vezes usa-se para as altas frequências. O quartzo é o compromisso entre a actividade piezoeléctrica dos sais de Rochelle e a robustez da turmalina. Como é barato e abundante na natureza, o quartzo utiliza-se muito nos osciladores e filtros de radiofrequência.

Quando o cristal não está a vibrar, o seu comportamento equivale a uma capacidade  $C_m$ , porque tem duas placas metálicas separadas por um dieléctrico, a esta capacidade dá-se o nome de capacidade de montagem. Quando o cristal está a vibrar comporta-se como um circuito sintonizado. Os cristais têm um factor de qualidade Q elevado. O factor de qualidade de um cristal pode ser facilmente superior a 10000. Um valor de Q alto significa que os osciladores de cristal têm uma frequência muito estável.

- ✓ Frequência de ressonância

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{Q^2}{Q^2 + 1}}$$

- ✓ Frequência de ressonância em série

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}}$$

- ✓ Frequência de ressonância em paralelo

$$C_p = \frac{C_m C_s}{C_m + C_s}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}}$$

## MULTIVIBRADORES

Os multivibradores podem ser astáveis e monoestáveis. Existem inúmeros circuitos integrados que, quando inseridos em determinados circuito funcionam como multivibradores, tais como NE555, LM555, CA555 e MC1455, são temporizadores que trabalham num de dois modos já referidos (astável ou monoestável). No modo monoestável produzem atrasos temporais exactos, desde micro-segundos a horas. No modo astável originam ondas rectangulares com um ciclo de serviço variável. Neste ponto vamos tratar mais aprofundadamente os temporizadores 555.

## TEMPORIZADOR 555

### FUNCIONAMENTO MONOESTÁVEL

A figura 85 ilustra o funcionamento monoestável. O temporizador 555, tem uma tensão de saída baixa, na qual permanece indefinidamente. Quando o temporizador 555 recebe um impulso no ponto A, num dado instante, a tensão de saída comuta de estado baixo para alto. A saída permanece alta num dado intervalo de tempo e depois retorna ao estado baixo, após um atraso no tempo igual a  $T_i$ . A saída permanecerá no estado baixo até receber um novo impulso.

Um multivibrador é um circuito de dois estados que tem zero, um ou dois estados de saída estáveis. Quando o temporizador 555 é usado no modo monoestável chama-se multivibrador monoestável, porque tem um só estado. Este multivibrador é estável no estado baixo até receber um impulso, o que faz variar temporariamente a saída para o estado alto. Porém, o estado alto não é estável, visto que a saída retorna ao estado baixo logo que o impulso termine.

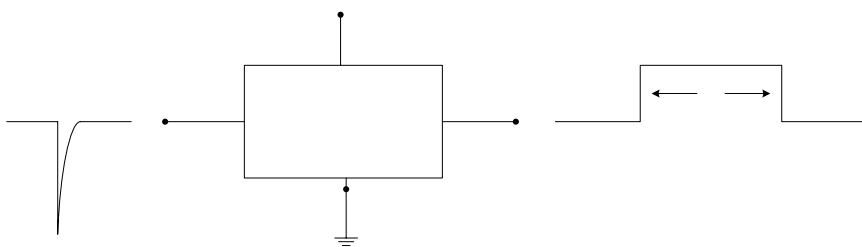


Figura 85 – Temporizador 555 usado no modo monoestável (1 impulso)

Quando o temporizador 555 está a funcionar no modo monoestável refere-se frequentemente por multivibrador de um impulso, visto que, somente um impulso de saída por cada disparo de entrada. A duração deste impulso pode ser perfeitamente controlada através de uma resistência e de um condensador

externos. O temporizador 555 é um circuito integrado de 8 pinos, este temporizador trabalha com qualquer tensão de alimentação entre +4,5V e +18V.

## FUNCIONAMENTO ASTÁVEL

O temporizador 555 também pode ser utilizado para funcionar como multivibrador astável, quando usado desta forma não tem estados estáveis, o que significa que não pode permanecer indefinidamente em nenhum estado. A figura 86 mostra um esquema funcional deste temporizador. A sua saída é uma sequência de impulsos rectangulares. Este temporizador a funcionar no modo astável pode também ser chamado de multivibrador de livre funcionamento.

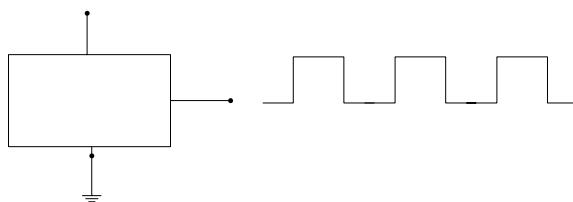


Figura 86 – Temporizador 555 usado no modo astável

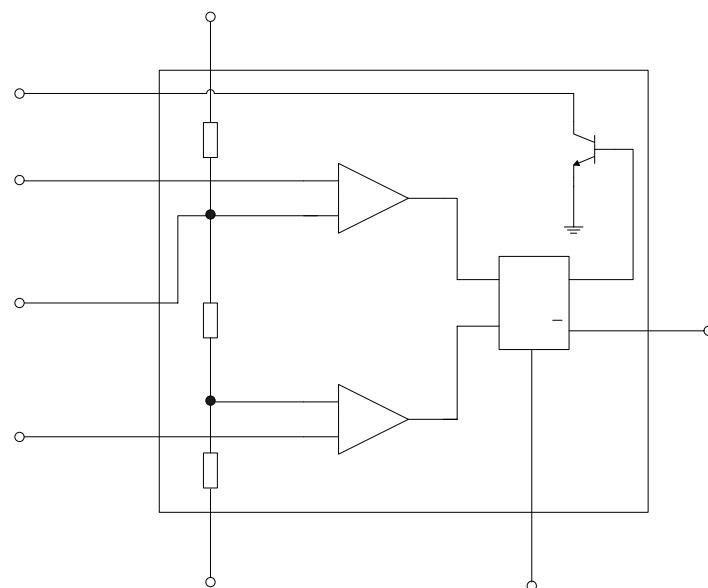


Figura 87 – Esquema funcional simplificado de um temporizador 555

Nota: Todas as resistências valem 5KΩ.

## ESQUEMA FUNCIONAL

A figura 87 representa o esquema funcional do temporizador 555, que contém dois comparadores, um divisor de tensão e um transístor NPN. Dado que o divisor de tensão possui duas resistências iguais, o comparador superior tem o ponto de inversão em:

$$U_{vs} = \frac{2U_{cc}}{3}$$

O comparador inferior tem o ponto de inversão em:

$$U_{vi} = \frac{U_{cc}}{3}$$

O pino 6 liga ao comparador superior, a tensão que esse pino tem presente chama-se tensão de threshold. Esta tensão vem dos componentes externos, não incluídos no esquema. Quando essa tensão é maior que  $U_{vs}$  o comparador tem uma saída alta. O pino 2 liga ao comparador inferior, e a tensão presente neste pino chama-se tensão de trigger, ou tensão de disparo. Quando o temporizador está activo a tensão de disparo é alta. Quando a tensão de disparo desce para um valor menor que  $U_{vi}$  o comparador inferior produz uma saída alta. O pino 4 pode ser usado para repor a tensão de saída a zero. O pino 5 pode ser utilizado para controlar a frequência de saída com o temporizador 555 no modo astável.

# AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

## INTRODUÇÃO

Os Amplificadores Operacionais, também conhecidos por AMPOP's são dispositivos extremamente versáteis com imensas aplicações na electrónica. Como o próprio nome indica, são amplificadores que efectuam operações matemáticas tais como a soma, a subtracção, a multiplicação e a integração. São apresentados como circuitos integrados.

## AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Um AMPOP ideal tem uma impedância de entrada infinita, uma corrente de entrada nula, um ganho de tensão infinito, uma impedância de saída nula, uma largura de banda infinita e uma tensão de desvio de entrada nula. Assim pode-se representar o AMPOP utilizando o esquema equivalente da figura 88. Apesar do estudo ser feito com base nas características ideais do AMPOP, na realidade essas características são um pouco diferentes. Tendo como referência o LM741, o ganho é aproximadamente 100000, a corrente de entrada é de  $80\text{nA}$ , a largura de banda é cerca de 1MHz e a tensão de desvio de entrada é 2mV.

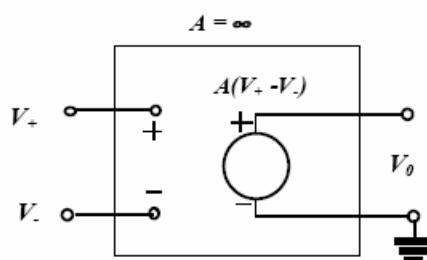


Figura 88 – Esquema equivalente de um AMPOP

O símbolo gráfico AMPOP é:

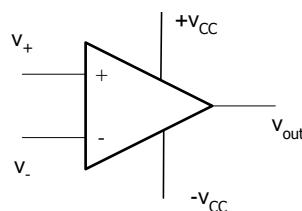


Figura 89 – Símbolo gráfico do Amplificador Operacional

O sinal + corresponde à entrada não inversora, enquanto que o sinal – representa a entrada inversora.

O AMPOP é vulgarmente utilizado em duas configurações básicas, a montagem inversora e a não inversora. A partir destas duas configurações pode-se obter outras.

## AMPLIFICADOR INVERSOR

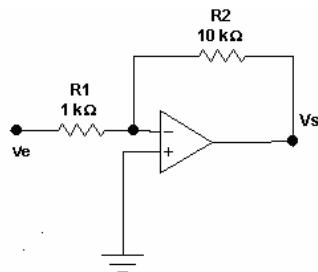


Figura 90 – Amplificador inversor

O amplificador inversor é o circuito mais básico. É um circuito que usa realimentação negativa para estabilizar o ganho de tensão. Este tipo de realimentação é utilizada porque o ganho em malha aberta é tão elevado e por isso muito instável que se torna imprescindível estabilizar o ganho.

A entrada  $v_e$ , excita a entrada inversora através de  $R_1$ , resultando uma tensão na entrada não inversora. A tensão de entrada é amplificada, produzindo uma tensão de saída desfasada de  $180^\circ$ . Essa tensão é enviada para a entrada através da malha de realimentação.

Tendo como referência as características ideais e tendo em conta o facto de se ter uma massa virtual entre as duas entradas do AMPOP, a tensão nos dois terminais é igual, logo  $v_+ = v_- = 0$ . Como a impedância de entrada é infinita, as correntes desses dois terminais são nulas ( $i_+ = i_- = 0$ ). A tensão de saída desta montagem é:

$$v_s = A(v_+ - v_-)$$

Como  $I_1 = \frac{v_e}{R_1}$  e  $I_2 = \frac{v_s}{R_2}$ , o ganho será:

$$I_1 = I_2 \Leftrightarrow \frac{v_e}{R_1} = \frac{v_s}{R_2} \Leftrightarrow \frac{v_s}{v_e} = -\frac{R_2}{R_1} = A_f = -\frac{R_2}{R_1}$$

## AMPLIFICADOR NÃO – INVERSOR

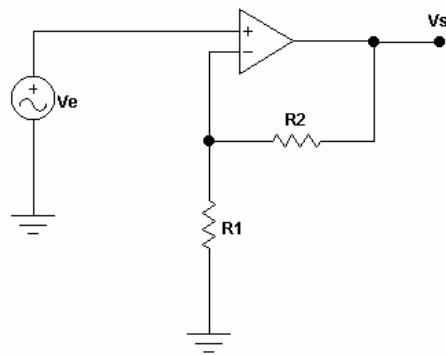


Figura 91 – Amplificador não-inversor

A tensão de entrada excita a entrada não-inversora, sendo esta tensão amplificada e colocada na saída. Posteriormente, é enviada para a entrada através da malha de realimentação.

Olhando para a demonstração anterior, a tensão nos dois terminais de entrada é igual, logo  $v_+ = v_- = v_e$ . Utilizando a lei dos nós temos:

$$\frac{v_-}{R_1} = \frac{v_s - v_-}{R_2}$$

O ganho será:

$$v_e \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = v_s \frac{1}{R_2} \Leftrightarrow \frac{v_s}{v_e} = A_f = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

## SEGUIDOR DE TENSÃO

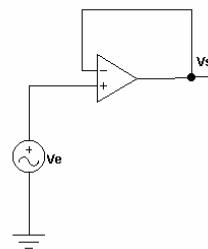


Figura 92 – Seguidor de tensão

O seguidor de tensão, também conhecido como buffer ou circuito tampão, implementa um ganho unitário, originando uma tensão de saída exactamente igual à tensão de entrada sem que haja uma queda de tensão acentuada.

## AMPLIFICADOR DA DIFERENÇA

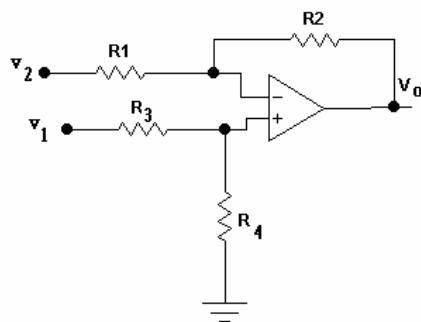


Figura 93 – Amplificador da diferença

A utilização conjunta das montagens inversora e não inversora permite construir um circuito que amplifica a diferença entre os dois sinais. Aplicando o teorema da sobreposição, a tensão de saída é

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_1 - \frac{R_2}{R_1} v_2.$$

Se  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ , então  $v_o = \frac{R_4}{R_3} v_1 - v_2$ .

## INTEGRADOR INVERSOR

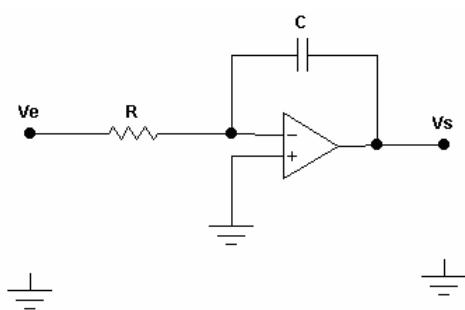


Figura 94 – Integrador inveror

Analizando o circuito no domínio do tempo e sabendo que  $v_R = R \times i_R$  e  $i_C = C \frac{\partial v_C}{\partial t}$ , temos:

$i_R = i_C \Leftrightarrow \frac{v_e}{R} = -C \frac{\partial v_s}{\partial t}$ . A tensão de saída é  $v_s = -\frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C dt + v_s(t_0) \partial t$ . Como as correntes do

condensador e da resistência são iguais,  $v_s = -\frac{1}{C} \int_{t_0}^t \frac{v_e}{R} dt + v_s(t_0) \partial t$ .

## AMPLIFICADOR DIFERENCIADOR

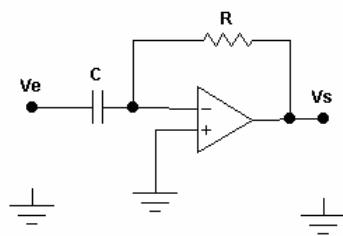


Figura 95 – Amplificador diferenciador

Analizando o circuito, mais uma vez no domínio do tempo, sabendo que  $i_R = -\frac{v_s}{R}$  e  $i_C = C \frac{\partial v_C}{\partial t}$ , temos:

$i_R = i_C \Leftrightarrow -\frac{v_s}{R} = C \frac{\partial v_e}{\partial t}$ . A tensão de saída é  $v_s = -RC \frac{\partial v_e}{\partial t}$ .

## O PAR DIFERENCIAL

Os Circuitos Integrados são constituídos por resistências, diodos, transístores e alguns condensadores, de baixa capacidade. Por este motivo, o acoplamento entre andares não pode ser feito com condensadores. Assim, na maior parte dos Integrados, é utilizado o acoplamento directo entre andares. O par diferencial é o circuito que preenche a lacuna de não se poder utilizar condensadores com grandes capacidades. Geralmente é utilizado como andar de entrada da generalidade dos amplificadores operacionais por permitir uma entrada diferencial, elevada impedância de entrada e rejeição de ruído. Para além de ser utilizado nos amplificadores operacionais, também é muito utilizado em multiplicadores analógicos, moduladores e detectores de fase. A família lógica ECL (*Emitter Coupled Logic*) é baseada nestes circuitos.

Obtém-se um par diferencial ligando-se em paralelo dois andares em emissor comum, conforme a figura seguinte.

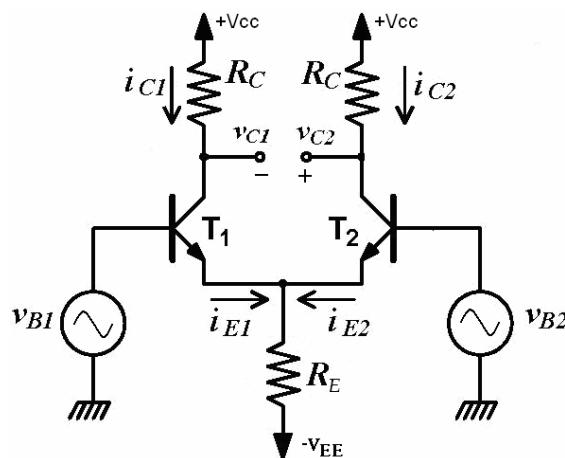


Figura 96 – Par diferencial

Embora existam duas tensões de entrada,  $v_{B1}$  e  $v_{B2}$ , e duas tensões de saída,  $v_{C1}$  e  $v_{C2}$ , tudo pode ser visto como um único andar, onde a tensão de saída  $v_{out}$  do andar é dada por:

$$V_{out} = V_{C2} - V_{C1}$$

Esta tensão é conhecida como saída diferencial por ser a diferença das duas tensões de saída. O circuito ideal é constituído por transistores e resistências iguais. Nesta situação e com tensões de entrada iguais,  $v_{out}$  é igual a zero. Quando  $v_{B1}$  for superior a  $v_{B2}$ ,  $v_{out}$  tem a polaridade que a figura 96 mostra. Caso  $v_{B1}$  seja inferior a  $v_{B2}$ , então a polaridade é invertida. A entrada  $v_{B1}$  é denominada entrada não inversora, por  $v_{out}$  estar em fase com  $v_{B1}$ , enquanto que a entrada  $v_{B2}$  é denominada entrada inversora, por  $v_{out}$  estar desfasado de  $180^\circ$  com  $v_{B2}$ .

Geralmente apenas uma destas entradas se encontra activa, estando a outra ligada à terra.

## FILTROS ACTIVOS

Praticamente todos os sistemas de comunicações utilizam filtros. São circuitos que deixam passar determinadas frequências e que rejeitam outras, com o objectivo de separar sinais desejados dos indesejados, bloquear sinais de interferência ou fortalecer sinais de voz ou áudio. Os filtros podem ser passivos, quando construídos com resistências, bobinas e condensadores, ou activos. Os filtros activos são construídos com resistências, condensadores e AMPOP's. Os amplificadores integrador e o diferenciador são a base de construção destes filtros. Assim consegue-se obter quatro filtros diferentes. O filtro passa-baixo, o passa-alto, o passa-banda e o corta-banda.

O filtro **passa-baixo** é um filtro que deixa passar todas as frequências abaixo da sua frequência de corte, bloqueando todas aquelas que se encontram acima dessa mesma frequência. Um dos esquemas eléctricos possíveis e o seu gráfico de resposta em frequência estão representados na figura 97.

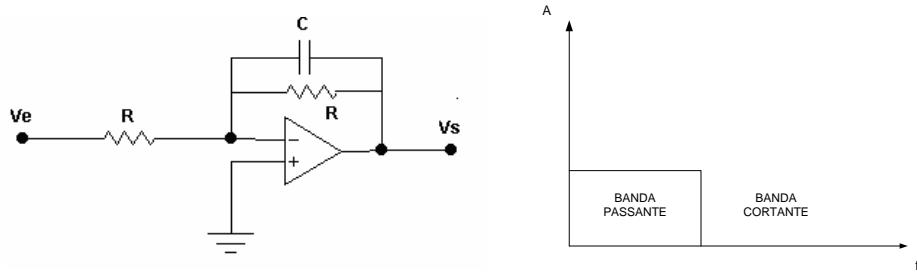


Figura 97 – Filtro passa-baixo

Por outro lado, o **filtro passa-alto**, bloqueia todas as frequências abaixo da sua frequência de corte, como se pode verificar na figura 98, aceitando todas aquelas que se encontram acima da frequência de corte.

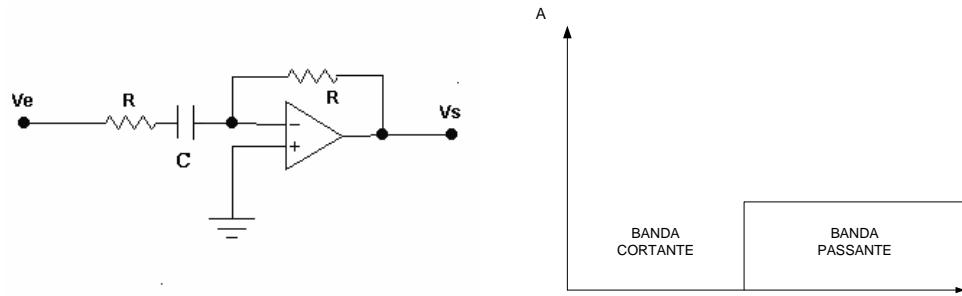


Figura 98 – Filtro passa-alto

O filtro **passa-banda** é utilizado principalmente na sintonização de sinais de radiodifusão e nas telecomunicações. É um circuito com duas frequências de corte (inferior e superior), que deixa passar todas as frequências compreendidas entre as duas frequências de corte, rejeitando todas as outras. A sua resposta em frequência está representada na figura 99.

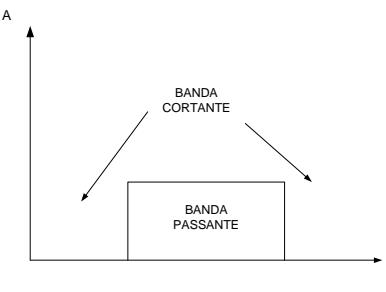


Figura 99 – Filtro passa-banda

O filtro **corta-banda** é exactamente o oposto do filtro anterior como se pode verificar na figura 100. Rejeita todas as frequências que se encontram entre as frequências de corte, deixando passar todas as outras.

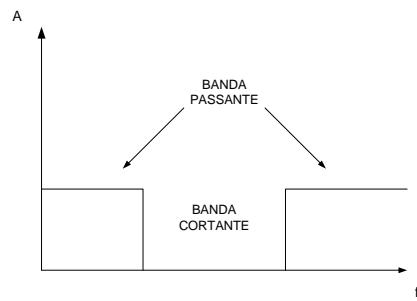


Figura 100 – Filtro corta-banda

## BIBLIOGRAFIA

- Princípios de Electrónica – Volume 1, Albert Paul Malvino, MacGraw-Hill, 6ª edição
- Princípios de Electrónica – Volume 2, Albert Paul Malvino, MacGraw-Hill, 6ª edição
- Microelectrónica, Sedra Smith, Makron Books
- Microelectronics, Millman, MacGrawHill, *international editions*
- Apontamentos Pessoais



## LISTA DE PÁGINAS EM VIGOR

PÁGINAS	EM VIGOR
CAPA (Verso em branco)	ORIGINAL
CARTA DE PROMULGAÇÃO (Verso em branco)	ORIGINAL
REGISTO DE ALTERAÇÕES (Verso em branco)	ORIGINAL
1 (Verso em branco)	ORIGINAL
3 a 22	ORIGINAL
23 (Verso em branco)	ORIGINAL
25 a 36	ORIGINAL
37 (Verso em branco)	ORIGINAL
39 a 48	ORIGINAL
49 (Verso em branco)	ORIGINAL
51 a 60	ORIGINAL
61 (Verso em branco)	ORIGINAL
63 a 82	ORIGINAL
83 (Verso em branco)	ORIGINAL
LPV-1 (Verso em branco)	ORIGINAL