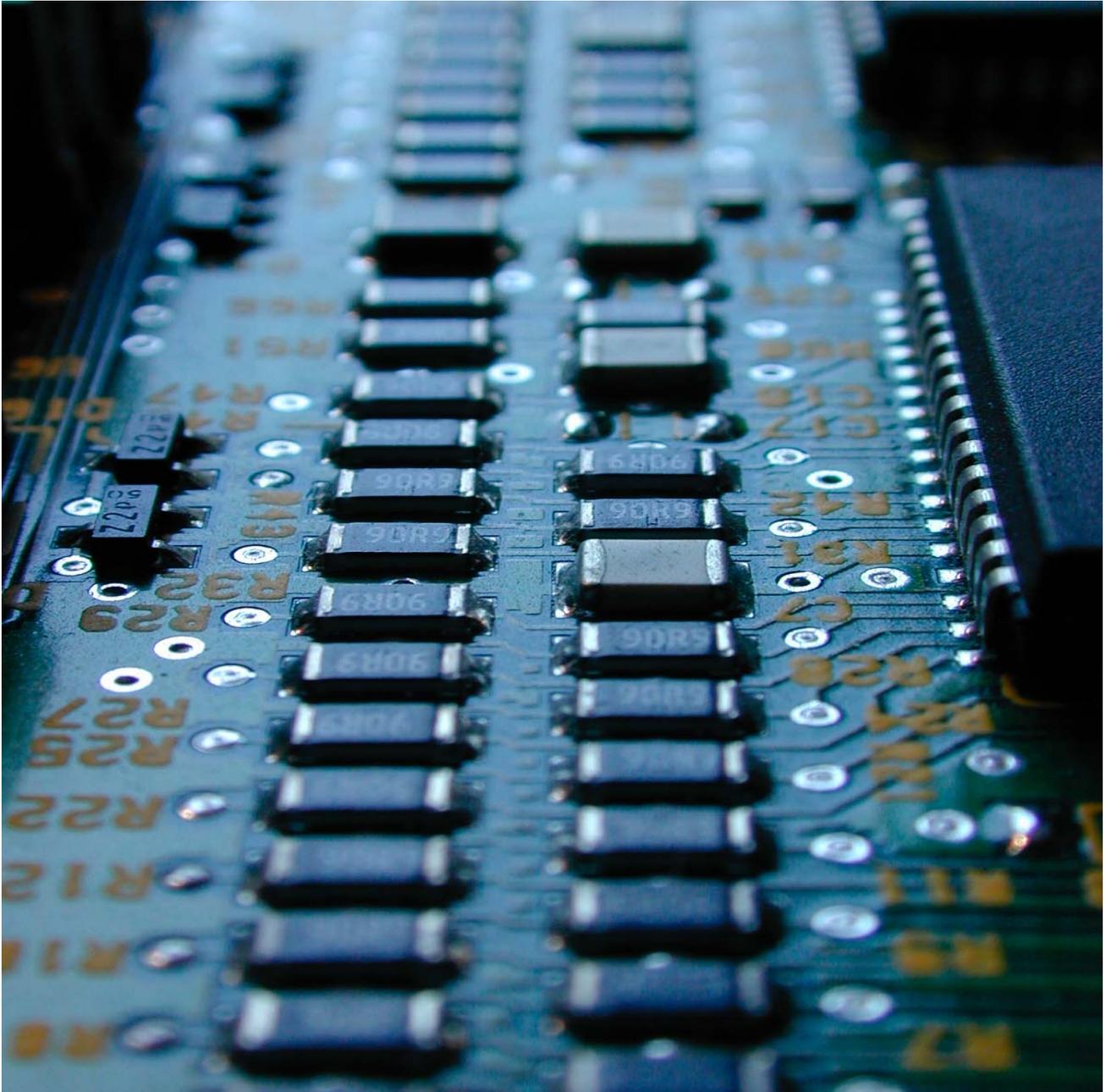




**Mineração  
Rio do Norte**

---

*projeto multifunção*



***EI 107 – Eletrônica  
Básica***

## ***APRESENTAÇÃO***

A eletrônica é um ramo da eletricidade que opera com correntes elétricas baixas, porém muito bem controladas.

O seu surgimento no século 20, principalmente após o desenvolvimento dos semicondutores, alterou fundamentalmente, não só os processos industriais, mas também o cotidiano da humanidade.

Ela está sempre presente no dia-a-dia: quando se vê a televisão, se conversa ao telefone, se ouve música no rádio, se utiliza o computador, ou mesmo quando se lê um livro. Em todos os casos desfruta-se de coisas que apenas a eletrônica é capaz de proporcionar.

Nos processos industriais, ela possui incontáveis aplicações principalmente no controle dos equipamentos.

Em função do exposto, verifica-se a grande importância do assunto para o mantenedor eletricitista, sendo fundamental conhecer-se, ao menos, os seus princípios básicos.

Com tal enfoque, esse texto foi estruturado em oito capítulos, a saber:

No Capítulo 1 apresenta-se uma revisão de conceitos, de modo a permitir o estudo da eletrônica básica.

Os Capítulos 2, 3 e 4 visam o estudo das resistências elétricas, indutores e capacitores, respectivamente, bem como o seu comportamento em um circuito.

No Capítulo 5, por outro lado, são analisados os princípios básicos do funcionamento dos diodos e algumas de suas aplicações.

O Capítulo 6 aborda o estudo das características e aplicações dos transistores bipolares, enquanto o Capítulo 7, os amplificadores operacionais.

Finalmente, no Capítulo 8, há uma introdução aos circuitos lógicos digitais.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: CONCEITOS GERAIS</b>	<b>1</b>
RESUMO	1
1.0 - INTRODUÇÃO	1
2.0 - MATÉRIA	1
3.0 - ÁTOMO	1
4.0 – NÍVEIS DE ENERGIA	2
5.0 – CARGA ELÉTRICA	2
6.0 - PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE	2
7.0 - CONDUTORES, ISOLANTES ELÉTRICOS E SEMICONDUTORES	2
7.1 – Condutores Elétricos	2
7.2 – Isolantes Elétricos	3
7.3 - Semicondutores	3
8.0 – BANDAS DE ENERGIA	3
9.0 – CAMPO ELÉTRICO	4
<b>CAPÍTULO 2: RESISTÊNCIA ELÉTRICA</b>	<b>5</b>
RESUMO	5
1.0 - INTRODUÇÃO	5
2.0 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA	5
Exercícios de fixação	5
3.0 – PRIMEIRA LEI DE OHM	6
Exercícios de fixação	6
4.0 – SEGUNDA LEI DE OHM	7
Exercícios de fixação	8
5.0 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A TEMPERATURA	9
Exercícios de fixação	9
6.0 - RESISTORES	9
7.0 – ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES	10
7.1 – Associação em Série	10
Exercícios de fixação	11
7.2 – Associação em Paralelo	11
Exercícios de fixação	12
7.3 – Associação Mista	12
Exercício de fixação	13
7.4 – Curto-Circuito	13
Exercício de fixação	14



<b>8.0 – REPRESENTAÇÃO SIMBÓLICA</b>	<b>14</b>
<b>9.0 – IDENTIFICAÇÃO DOS RESISTORES</b>	<b>15</b>
<b><i>CAPÍTULO 3: INDUTORES</i></b>	<b>16</b>
<b>RESUMO</b>	<b>16</b>
<b>1.0 - INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>2.0 - INDUTÂNCIA</b>	<b>16</b>
<b>3.0 - INDUTORES</b>	<b>17</b>
<b>4.0 - ASSOCIAÇÃO DE INDUTORES</b>	<b>17</b>
Exercícios de fixação	18
<b>5.0 – INDUTÂNCIAS EM CIRCUITOS CA</b>	<b>18</b>
<b><i>CAPÍTULO 4: CAPACITORES</i></b>	<b>20</b>
<b>RESUMO</b>	<b>20</b>
<b>1.0 - INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
<b>2.0 - CAPACITÂNCIA</b>	<b>20</b>
<b>3.0 - CAPACITORES</b>	<b>21</b>
<b>4.0 – ASSOCIAÇÃO DE CAPACITORES</b>	<b>21</b>
Exercícios de fixação	21
<b>5.0 – CAPACITÂNCIAS EM CIRCUITOS CA</b>	<b>22</b>
<b>6.0 - IDENTIFICAÇÃO DOS CAPACITORES</b>	<b>23</b>
<b><i>CAPÍTULO 5: DIODOS</i></b>	<b>25</b>
<b>RESUMO</b>	<b>25</b>
<b>1.0 - INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>2.0 - FÍSICA DOS SEMICONDUTORES</b>	<b>25</b>
2.1 – Estrutura dos Semicondutores	25
2.2 – Impurezas nos Semicondutores	25
2.3 – Impurezas Doadoras	26
2.4 – Impurezas Aceitadoras	26
2.5 – Tipos de Semicondutores	26
2.5.1 – Semicondutor tipo N	26
2.5.2 – Semicondutor tipo P	26

<b>3.0 – DIODOS COMUNS</b>	<b>26</b>
3.1 – Considerações Gerais	26
3.2 – Construção de um Diodo	26
3.3 – Polarização de um Diodo	27
3.4 – Curva Característica	27
3.5 – Reta de Carga	28
<b>4.0 – OUTROS TIPOS DE DIODOS</b>	<b>29</b>
4.1 - Diodo zener	29
4.2 - Diodo emissor de luz (LED)	30
4.3 - Fotodiodo	30
<b>5.0 – CIRCUITOS RETIFICADORES</b>	<b>31</b>
5.1 – Retificadores de Meia Onda	31
5.2 – Retificadores de Onda Completa	31
5.3 – Ponte Trifásica	32
5.4 – Ponte Graetz	33
<b>CAPÍTULO 6: TRANSISTORES BIPOLARES</b>	<b>34</b>
<b>RESUMO</b>	<b>34</b>
<b>1.0 - INTRODUÇÃO</b>	<b>34</b>
<b>2.0 – CONSIDERAÇÕES GERAIS</b>	<b>34</b>
2.1 – Simbologia	34
2.2 – Funcionamento	34
2.3 – Transistor Não Polarizado	35
<b>3.0 – POLARIZAÇÃO DO TRANSISTOR NPN</b>	<b>35</b>
3.1 – Polarização Direta	35
3.2 – Polarização Reversa	35
3.3 – Polarização Direta Reversa	35
<b>4.0 – CORRENTES NO TRANSISTOR</b>	<b>36</b>
<b>5.0 – MONTAGEM BÁSICA COM TRANSISTOR</b>	<b>36</b>
5.1 – Curva $I_B$ versus $V_{BE}$	36
5.2. - Curva $I_C$ Versus $V_{CE}$	37
<b>6.0 - MODELO DE EBERS-MOLL</b>	<b>37</b>
<b>7.0 - POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES</b>	<b>38</b>
<b>8.0 - TRANSISTOR OPERANDO COMO CHAVE</b>	<b>39</b>
<b>9.0 - TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR</b>	<b>40</b>
<b>10.0 - AMPLIFICADORES DE SINAL DE EMISSOR COMUM</b>	<b>40</b>



<b>CAPÍTULO 7: AMPLIFICADORES OPERACIONAIS</b>	<b>41</b>
RESUMO	41
1.0 - INTRODUÇÃO	41
2.0 - AMPLIFICADOR OPERACIONAL	41
3.0 CARACTERÍSTICAS DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL	42
4.0 - CONFIGURAÇÕES TÍPICAS	43
4.1 - Circuito Inversor	43
4.2 - Circuito Não Inversor	43
4.3 - Circuito Somador	44
4.4 - Circuito Subtrator	45
4.5 - Circuito Integrador	45
4.6 - Circuito Derivador	46
<b>CAPÍTULO 8: CIRCUITOS LÓGICOS DIGITAIS</b>	<b>47</b>
RESUMO	47
1.0 - INTRODUÇÃO	47
2.0 - PORTAS LÓGICAS BÁSICAS	47
2.1 - Porta Inversora - NOT	47
2.2 - Porta E - AND	48
2.3 - Porta OU - OR	48
2.4 - Porta NÃO-E - NAND	48
2.5 - Porta NÃO-OU - NOR	49
2.6 - Porta OU-Exclusivo - XOR	49
2.7 - Porta NÃO-OU-Exclusivo - XNOR	49
3.0 - CIRCUITOS INTEGRADOS DIGITAIS	50



**projeto multifunção**

***EI 107 – ELETRÔNICA BÁSICA***

***“Qual será o absurdo de hoje que será a verdade de amanhã?”***

***Alfred North Whitehead (1861 - 1947)***

Matemático inglês, co-autor dos *Principia mathematica* (1910-1913), obra fundamental no campo da lógica matemática.

## CAPÍTULO 1: CONCEITOS GERAIS

### RESUMO

Este capítulo apresenta uma revisão de conceitos, de modo a permitir o estudo da eletrônica básica.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Apesar do uso intensivo da eletricidade só ter-se iniciado no século 19, sua descoberta data de 2.000 anos e foi atribuída aos gregos. Eles observaram que quando um material, hoje conhecido como âmbar, era atritado com alguns materiais, ele conseguia atrair certos materiais, tais como folhas secas e serragem. Os gregos chamaram o âmbar de *elektron*, o que originou a palavra eletricidade.

A partir do século 17, vários cientistas desenvolverem estudos no assunto, porém consideravam que a eletricidade era um fluido composto de cargas positivas e negativas. Atualmente, porém, ela é definida como sendo produzida por partículas denominadas elétrons e prótons.

### 2.0 - MATÉRIA

*Matéria*, em termos gerais, é tudo aquilo que possui massa e ocupa lugar no espaço. Pode ser encontrada no estado sólido, líquido ou gasoso.

A matéria é formada por componentes básicos denominados *elementos*. Por exemplo, o oxigênio e hidrogênio são elementos, assim como alumínio, cobre, prata, ouro e mercúrio. Existem mais de 100 elementos conhecidos, dos quais 92 são naturais e os restantes criados artificialmente.

Os elementos podem ser combinados para produzirem materiais com características completamente diferentes das suas. A água, por exemplo, é uma substância composta constituída dos elementos hidrogênio e oxigênio. O sal comum de mesa se compõe dos elementos sódio e cloro.

Observe-se que, embora o hidrogênio e o oxigênio sejam gases, podem se combinar e produzir água, que é um líquido.

A menor partícula que uma substância composta pode ser reduzida antes de se dividir nos elementos que a compõe é chamada de *molécula*. Por

exemplo, se um grão de bauxita for dividido sucessivamente ao meio, até onde for possível manter as suas características, obtém-se uma molécula de bauxita, a qual, se dividida novamente em duas partes, chega-se aos elementos que a compõe.

### 3.0 - ÁTOMO

O *átomo* é a menor partícula que um elemento pode ser reduzido, mantendo as propriedades deste elemento. Se uma gota de água for reduzida ao menor tamanho possível, obtém-se uma molécula de água. Entretanto, se ela for reduzida mais ainda, chega-se aos átomos de hidrogênio e oxigênio.

Se o átomo de um elemento for dividido, esse elemento deixará de existir nas partículas que restarem. A razão disso é que essas partículas menores estão presentes em todos os átomos dos diferentes elementos existentes.

Um átomo contém várias partículas elementares, mas as principais para a eletricidade são os *elétrons*, *prótons* e *nêutrons*.

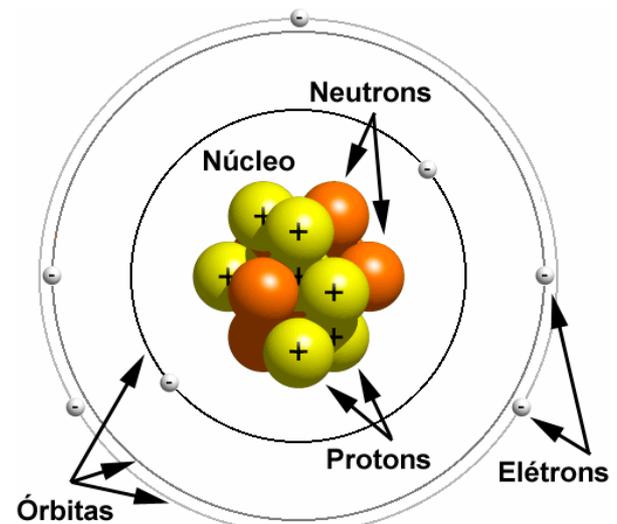


Figura 1 – Modelo do átomo.

Observe-se que os prótons e os nêutrons se localizam no núcleo do átomo e os elétrons giram em órbitas em torno desse núcleo.

Os prótons, nêutrons e elétrons são únicos e não são diferentes em cada elemento. Assim, o que

caracteriza um elemento é a quantidade destas partículas no átomo. Mais especificamente, é o número de prótons no núcleo. Isto é chamado *número atômico* e é característica única de cada elemento. Elementos diferentes têm sempre números atômicos diferentes.

#### 4.0 – NÍVEIS DE ENERGIA

A maneira com que os elétrons se distribuem nas órbitas em torno do núcleo não é aleatória. Segue regras bem definidas, que são as mesmas para todos os elementos.

Um elétron em órbita tem uma determinada quantidade de energia que o leva a só poder ocupar determinadas órbitas, ou seja, a apresentar determinados níveis de energia (no máximo, sete níveis).

É uma regra geral da natureza a estabilização na menor energia possível. Assim, os níveis são preenchidos na seqüência do menor para o maior e um nível só poderá conter elétrons se o anterior estiver completo, como é possível verificar na figura 1.

A camada (ou órbita) mais externa de um átomo é denominada *camada de valência* e não possui mais que 8 elétrons, os quais são os *elétrons de valência*.

#### 5.0 – CARGA ELÉTRICA

Os prótons, elétrons e nêutrons, quando em presença uns dos outros, apresentam um comportamento típico, a saber:

- prótons em presença de prótons se repelem;
- elétrons em presença de elétrons se repelem;
- prótons em presença de elétrons se atraem;
- nêutrons em presença de nêutrons, não se observa nem atração nem repulsão.

Para diferenciar e explicar esses comportamentos, diz-se que os prótons e elétrons são portadores de uma propriedade física especial, denominada *carga elétrica*.

Por apresentarem comportamentos opostos, torna-se claro que existem dois tipos distintos de carga elétrica. Assim, para diferenciá-las, utiliza-se a seguinte convenção:

- prótons* possuem *carga elétrica positiva*;
- elétrons* possuem *carga elétrica negativa*;
- nêutrons* não possuem *carga elétrica*.

Medidas elétricas efetuadas informam que a carga negativa do elétron é igual, porém oposta, à carga positiva do próton.

Essa quantidade comum será denominada carga elétrica elementar e indicada por  $e$ , cujo valor é:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

Onde *Coulomb* (C) é a unidade com que se medem as cargas elétricas no Sistema Internacional de Unidades (SI).

Normalmente, um átomo contém o mesmo número de elétrons e prótons, ou seja, as cargas opostas se cancelam e o átomo permanece eletricamente neutro. Entretanto, como as propriedades de um elemento são determinadas apenas pelo número de prótons, o de elétrons pode ser alterado.

Se um átomo qualquer apresentar mais prótons (+) do que elétrons (-), ele terá *carga positiva*. Em caso contrário, sua *carga é negativa*.

Átomos carregados são chamados de *íons*. Assim, um átomo carregado positivamente é um *íon positivo*, e, carregado negativamente, é um *íon negativo*.

#### 6.0 - PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE

Como esses elétrons estão menos sujeitos à força de atração do núcleo e também possuem o mais alto nível de energia, eles são aqueles que mais facilmente se tornam livres. Assim, quando uma força ou energia suficiente for aplicada a um átomo, os elétrons da camada de valência se tornarão livres, produzindo a eletricidade.

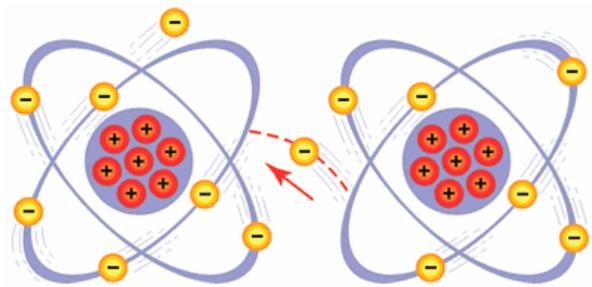


Figura 2 – Liberação de elétron – modelo.

#### 7.0 - CONDUTORES, ISOLANTES ELÉTRICOS E SEMICONDUTORES

##### 7.1 – Condutores Elétricos

*Condutor elétrico* é todo meio material que permite às partículas eletrizadas se movimentarem com facilidade. Em geral, os metais são bons condutores,

pois possuem, na camada de valência do átomo, elétrons livres que, por estarem fracamente ligados ao núcleo atômico, podem passar facilmente de um átomo a outro, formando uma verdadeira nuvem eletrônica no interior do metal.

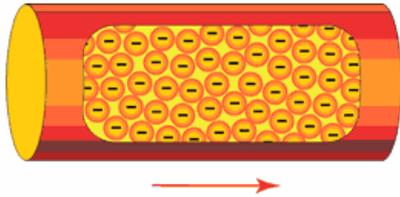


Figura 3 – Condutores – Nuvem de elétrons.

Existem condutores elétricos nos estado sólido, líquido e gasoso. É importante saber distinguir quais são os portadores de carga elétrica capazes de se movimentar através desses meios, ou seja:

- a) Nos *condutores sólidos*, cujo exemplo típico são os *metais* (tais como: ferro, aço, cobre, alumínio, latão), os portadores de carga elétrica são exclusivamente, elétrons;
- b) Nos *condutores líquidos*, cujo exemplo típico são as *soluções iônicas*, os portadores de carga elétrica são, exclusivamente, íons;
- c) Nos *gases condutores*, também ditos *gases ionizados*, os portadores de carga elétrica são íons e elétrons.

### 7.2 – Isolantes Elétricos

O *isolante elétrico*, por sua vez é aquele tipo de material que não apresenta facilidade ao movimento das partículas eletrizadas. Os não-metais, como vidro, fibra de vidro, mica, plástico, borracha, madeira; papel, resina epóxi e baquelite são bons isolantes, pois não possuem quantidade suficiente de elétrons livres para permitir a passagem das partículas através de si.

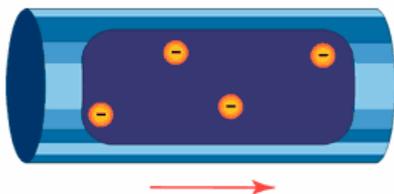


Figura 4 – Isolantes – Poucos elétrons livres.

Os isolantes são bastante empregados em conjunto com os condutores, como é o caso de fios utilizados em instalações elétricas.

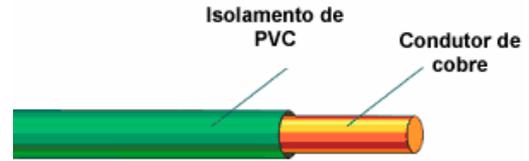


Figura 5 – Fio elétrico isolado.

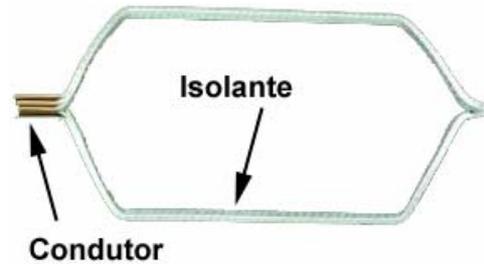


Figura 6 – Isolamento de uma bobina de motor de corrente contínua.

### 7.3 - Semicondutores

*Semicondutores* são materiais que não são nem bons condutores nem bons isolantes. Em outras palavras, eles podem conduzir a eletricidade melhor do que os isolantes, entretanto não tão bem como os condutores.

O carbono, silício, germânio, estanho e chumbo são exemplo de semicondutores.

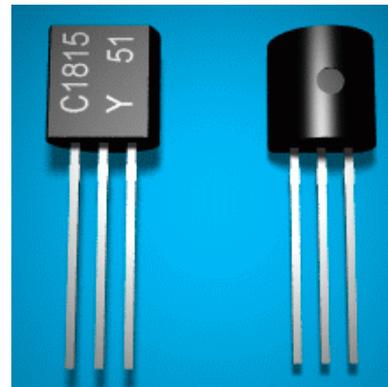


Figura 7 – Exemplos de dispositivos à base de semicondutores (transistores).

### 8.0 – BANDAS DE ENERGIA

O fato do elétron estar a uma maior ou menor distância do núcleo atômico define, para ele, a sua *banda de energia*. Por isto, os elétrons que estão nas últimas camadas de um átomo podem, dependendo do campo energético externo ao seu redor, se livrarem da sua atração ao núcleo e comporem (ou não) a nuvem eletrônica geradora de corrente elétrica nos materiais,

ou ainda, de se interagir com elétrons das últimas camadas de outro átomo, gerando ligações atômicas, chamadas covalentes. Assim, os elétrons desta camada geram uma faixa (banda) de energia chamada *banda de valência*. Como as distâncias entre as órbitas são definidas, pode existir uma faixa onde não há elétrons nem livres nem para se ligarem com outros átomos, gerando uma faixa de energia denominada *banda proibida*. Finalmente, a camada que provoca o aparecimento da nuvem eletrônica é denominada *banda de condução*.

Desta forma, pode-se classificar os materiais conforme a banda de energia através dos diagramas representativos como os da figura 8.

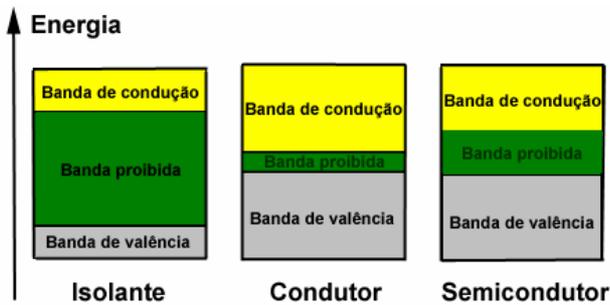


Figura 8 – Bandas de energia.

### 9.0 – CAMPO ELÉTRICO

Um dos princípios básicos da *eletricidade* é o de que *cargas elétricas de mesmo sinal se repelem e de sinais contrários se atraem*. Além disto, em um sistema eletricamente isolado, a soma das cargas elétricas é constante.

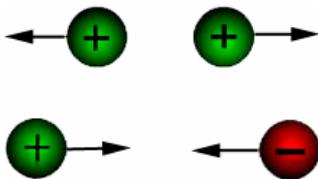


Figura 9 – Atração e repulsão de cargas elétricas.

Por outro lado, o cientista francês *Charles A. Coulomb* enunciou uma lei (*lei de Coulomb*), a qual estabelece *que as cargas elétricas exercem forças entre si. Essas forças obedecem ao princípio da ação e reação, ou seja, têm a mesma intensidade, a mesma direção e sentidos opostos*.

Desta forma, existe uma região de influência de uma determinada carga  $Q$ , onde qualquer outra carga  $q$ , nela colocada, estará sob a ação de uma força de origem elétrica. Tal região denomina-se *campo elétrico* (ou *eletrostático*) e em cada ponto ele apresenta uma intensidade  $E$ .

A exemplo do magnetismo, o campo elétrico também pode ser representado empregando-se linhas de força, como ilustra a figura 10.

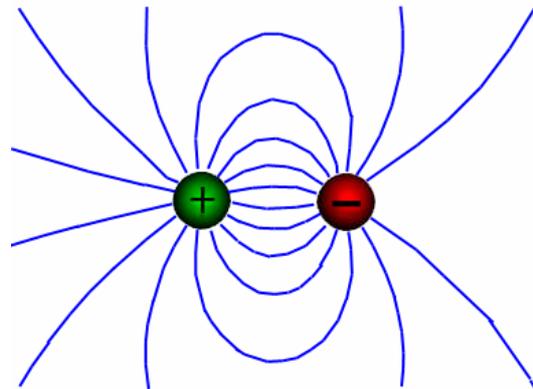


Figura 10 – Linhas de força do campo elétrico.

Observe-se que, quando se trata de campos eletrostáticos, o meio no qual os mesmos existem deverá ter resistividade muito alta, ou seja, deverá opor-se, tanto quanto possível, à passagem de corrente elétrica de condução, motivo pelo qual recebe o nome de *dielétrico*. O material que o constitui é designado por *isolante*.

## CAPÍTULO 2: RESISTÊNCIA ELÉTRICA

### RESUMO

Este capítulo visa o estudo das resistências elétricas e seu comportamento em um circuito.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Os materiais não conduzem a corrente elétrica igualmente. Como visto, existem condutores, isolantes e semicondutores.

Quase todos os metais são bons condutores, entretanto, alguns são melhores que outros, pois nem todos, possuem o mesmo número de elétrons livres.

Desta forma, corpos diferentes podem apresentar diferentes níveis de dificuldade ao movimento dos portadores de carga elétrica.

Em outras palavras, existem materiais que oferecem uma maior *resistência* (ou seja, resistem mais) à passagem do fluxo de elétrons que outros. Quanto maior a resistência, pior será a condução e vice-versa.

Portanto, considerando-se fios condutores de materiais diferentes, mas de mesmas dimensões e na mesma temperatura, será melhor condutor aquele que oferecer a menor resistência à passagem dos portadores de carga elétrica.

### 2.0 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Se uma corrente elétrica mantém sua intensidade e sentido ao longo do tempo, ela é chamada de *corrente contínua*. Desta forma, também a tensão necessária para propiciar tal situação possui mesma intensidade e sentido ao longo do tempo, ou seja, é uma *tensão contínua*.

Desta forma, para que haja a circulação de corrente contínua ( $I$ ) em um fio, é necessária a aplicação de uma tensão contínua ( $U$ ) proveniente de uma fonte aplicada a seus terminais (uma pilha ou bateria, por exemplo).

Neste sentido, a corrente contínua assumirá um determinado valor limite, pois o material que compõe o fio apresenta uma barreira à sua livre circulação, ou seja, limita a sua passagem. Tal característica dos materiais é denominada *resistência elétrica*.

Em função do exposto, pode-se definir a resistência ( $R$ ) elétrica como sendo:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

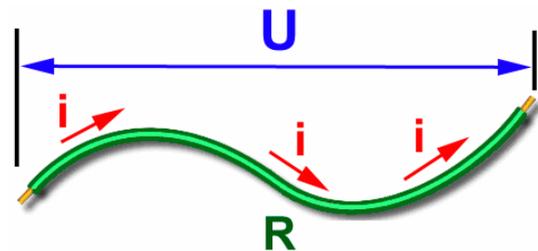


Figura 1 – Tensão, corrente e resistência em um condutor.

Note-se que, através da expressão (1), é possível concluir que a corrente contínua é proporcional à tensão contínua aplicada e inversamente proporcional à resistência, ou seja:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2)$$

Além disto, pode-se a passagem de corrente por uma resistência, resulta em uma diferença de potencial em seus terminais, ou seja:

$$U = R \times I \quad (3)$$

A unidade de resistência no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o *ohm* ( $\Omega$ ) em homenagem ao cientista e vale, de acordo com a expressão (1):

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} \quad (4)$$

Ou seja, uma resistência apresenta o valor de  $1 \Omega$  quando, ao ser submetido à de tensão de  $1 \text{ V}$ , é percorrido por uma corrente de  $1 \text{ A}$ .

### Exercícios de fixação

- 1) Aplicando-se uma diferença de potencial (ddp) de  $220 \text{ V}$  a uma resistência ôhmica, a corrente que a percorre valor é de  $5 \text{ A}$ . Nessas

condições pergunta-se: Qual é o valor da resistência?

*Solução:*

Aplicando-se a expressão (1), tem-se:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44$$

Portanto, a resistência é:

$$44 \, \Omega$$

- 2) Aplicando-se uma diferença de potencial (ddp) de 220 V a uma resistência ôhmica cujo valor é de  $20 \, \Omega$ , qual será a intensidade da corrente que a percorre?

*Solução:*

Aplicando-se a expressão (1), tem-se:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{20} = 11$$

Portanto, a corrente será de:

$$11 \, A$$

- 3) Por um fio, cuja resistência ôhmica é de  $5 \, \Omega$ , circula uma corrente contínua de intensidade 10 A. Nestas condições, calcule a ddp necessária para que isto ocorra.

*Solução:*

Aplicando-se a expressão (3), tem-se:

$$U = R \times I = 5 \times 10 = 50$$

Portanto, a diferença de potencial (ddp) será de:

$$50 \, V$$

### 3.0 – PRIMEIRA LEI DE OHM

Conforme descoberto pelo cientista alemão *Georg Simon Ohm* (1789-1854), existe uma classe particular de condutores que, a uma temperatura constante, apresenta resistência elétrica constante. Essa é a chamada *primeira lei de Ohm*.

Desta forma, os condutores que apresentam *resistência constante*, qualquer que seja a tensão e corrente, são denominados *condutores ôhmicos*. A resistência, do mesmo modo, é uma *resistência ôhmica*.

Para essas resistências, se for traçado um gráfico do comportamento da tensão em função da

corrente (ou seja, sua curva característica), verifica-se que ele é uma reta, como ilustra a figura 2.

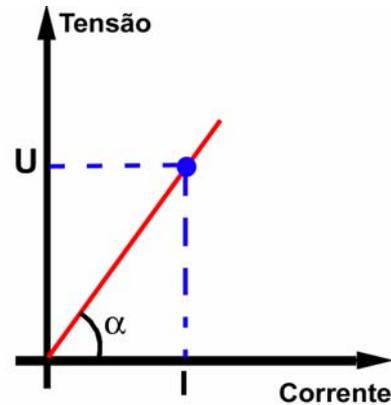


Figura 2 – Curva característica de uma resistência ôhmica.

Há resistências, entretanto, que não obedecem à primeira lei de Ohm, apresentando curva característica diferente de uma reta.

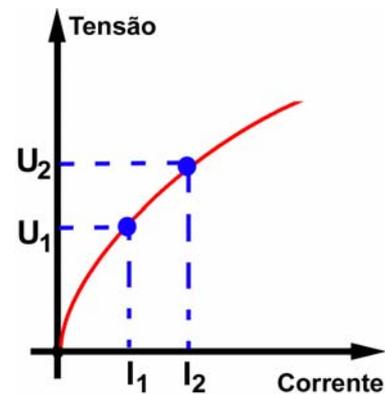


Figura 3 – Característica não-linear de uma resistência.

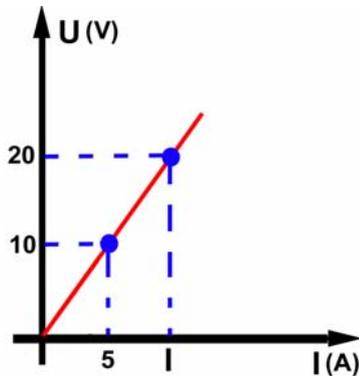
Note que, para os condutores ôhmicos, a relação entre tensão e corrente em qualquer ponto da reta será sempre a mesma e, portanto, a resistência é constante.

Para os condutores não ôhmicos, verifica-se que, para cada ponto de tensão e corrente, a relação entre elas são diferentes.

De qualquer forma, é importante ressaltar que as expressões (1), (2) e (3) sempre são válidas para qualquer tipo de resistência.

#### Exercícios de fixação

- 1) Obtenha a corrente  $I$  indicada na curva característica de uma determinada resistência de um condutor, a qual é fornecida no gráfico a seguir.



Solução:

Como a curva característica é uma reta, a resistência é constante para qualquer ponto e, assim, aplicando-se a expressão (1), tem-se:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10}{5} = 2$$

Então, aplicando-se a expressão (2), resulta:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{20}{2} = 10$$

Portanto, a corrente  $I$  será de:

$$10 \text{ A}$$

- 2) Submetendo-se um condutor à diferentes tensões e medindo-se a respectivas correntes, obteve-se os resultados da tabela mostrada a seguir:

Tensão (V)	1,5	3,0	5,4	7,0
Corrente (A)	0,20	0,30	0,45	0,5

Pergunta-se: Esse condutor é ôhmico?

Solução:

Para que um condutor seja ôhmico, ele deve apresentar resistência constante, independente da tensão e corrente aplicadas. Assim, se for aplicada a expressão (1), a cada par de valores, obtêm-se:

Tensão (V)	1,5	3,0	5,4	7,0
Corrente (A)	0,20	0,30	0,45	0,5
Resistência ( $\Omega$ )	7,5	10	12	14

Como se verifica, o valor da resistência não é constante e, portanto, não é ôhmico.

#### 4.0 – SEGUNDA LEI DE OHM

Além do descrito anteriormente, Ohm determinou, de forma experimental, que a resistência elétrica ( $R$ ) é proporcional ao seu comprimento ( $l$ ) e inversamente proporcional à área ( $A$ ) de sua seção transversal (também chamada de *bitola*). Além disto depende de uma característica do material denominada resistividade ( $\rho$ ), ou seja:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5)$$

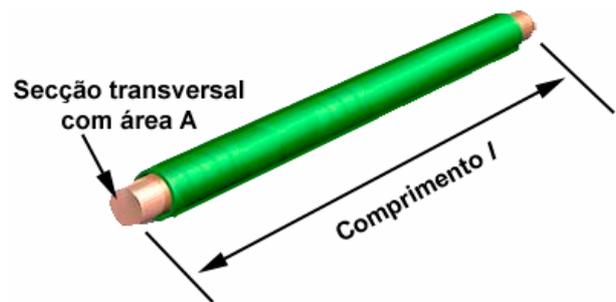


Figura 4 – Material com seção transversal de área  $A$  e comprimento  $l$ .

A expressão (5) é conhecida como a *segunda lei de Ohm*.

A *resistividade*, por outro lado, exprime a dificuldade em se estabelecer um fluxo de elétrons (ou corrente elétrica) por um determinado material.

Pelo exposto, os materiais isolantes apresentam elevada resistividade, enquanto os condutores, baixa.

A resistividade é uma propriedade intrínseca dos materiais e independente de suas dimensões geométricas, ou seja, o seu valor é função do próprio material.

A temperatura, entretanto, a afeta.

Nos metais puros, quando a temperatura aumenta, a resistividade também aumenta. Isto ocorre devido ao aumento das amplitudes de oscilação dos átomos da rede, o que aumenta a probabilidade de choques entre estes e os elétrons livres.

Nas soluções eletrolíticas, a resistividade diminui quando a temperatura aumenta, pois a viscosidade da solução diminui com o aumento da temperatura, dando maior mobilidade aos portadores de carga elétrica em solução, diminuindo a resistência da mesma.

No caso do grafite, a resistividade também diminui quando a temperatura aumenta. Isto ocorre porque mais elétrons são liberados da estrutura, quando a temperatura é elevada, aumentando o número de portadores de carga elétrica.

Algumas ligas de cobre, manganês e níquel, como a manganina e a constantan, apresentam resistividades praticamente constantes em relação à temperatura.

A unidade da resistividade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é *ohm . metro* ( $\Omega \cdot m$ ).

A tabela 1 apresenta alguns valores referidos à temperatura de 20 °C.

Material	Resistividade (a 20 °C) em $\Omega \cdot m$
Prata	$1,645 \cdot 10^{-8}$
Cobre	$1,723 \cdot 10^{-8}$
Ouro	$2,443 \cdot 10^{-8}$
Alumínio	$2,825 \cdot 10^{-8}$
Tungstênio	$5,485 \cdot 10^{-8}$
Níquel	$7,811 \cdot 10^{-8}$
Ferro	$1,229 \cdot 10^{-7}$
Constantan	$4,899 \cdot 10^{-7}$
Carbono	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Silício	$2,3 \cdot 10^3$
Poliestireno	$\sim 10^{16}$

Tabela 1 - Resistividade elétrica de diversos materiais condutores, semicondutores e isolantes (a 20 °C).

**Exercícios de fixação**

- 1) Considerando-se dois condutores, um de cobre e outro de alumínio, ambos com o mesmo comprimento e a mesma bitola, pergunta-se: Qual é o melhor condutor?

*Solução:*

Verificando-se a resistividade do alumínio na tabela 1 e aplicando-se na expressão (1), tem-se:

$$R_{\text{alumínio}} = 2,825 \cdot 10^{-8} \cdot l / A$$

Da mesma forma, para o cobre:

$$R_{\text{cobre}} = 1,723 \cdot 10^{-8} \cdot l / A$$

Dividindo-se membro a membro, resulta:

$$\frac{R_{\text{alumínio}}}{R_{\text{cobre}}} = \frac{2,825 \cdot 10^{-8}}{1,723 \cdot 10^{-8}} = 1,639$$

Portanto,

$$R_{\text{alumínio}} = 1,639 \cdot R_{\text{cobre}}$$

Ou seja, para condutores de mesmas dimensões, a resistência elétrica do alumínio é, aproximadamente, 64% maior que a do cobre.

Assim, o cobre é um melhor condutor do que o alumínio.

- 2) Considerando-se dois condutores, um de cobre e outro de alumínio com 10 metros de comprimento, ambos com a mesma bitola, pergunta-se: Qual é o comprimento do fio de cobre para que a resistência de ambos seja a mesma?

*Solução:*

Verificando-se a resistividade do alumínio na tabela 1 e aplicando-se na expressão (1), tem-se:

$$R_{\text{alumínio}} = 2,825 \cdot 10^{-8} \cdot l_{\text{alumínio}} / A$$

Da mesma forma, para o cobre:

$$R_{\text{cobre}} = 1,723 \cdot 10^{-8} \cdot l_{\text{cobre}} / A$$

Dividindo-se membro a membro, resulta:

$$\frac{R_{\text{alumínio}}}{R_{\text{cobre}}} = \frac{2,825 \cdot 10^{-8}}{1,723 \cdot 10^{-8}} \times \frac{10}{l_{\text{cobre}}}$$

Ou seja:

$$\frac{R_{\text{alumínio}}}{R_{\text{cobre}}} = 1,639 \times \frac{10}{l_{\text{cobre}}} = 1$$

$$l_{\text{cobre}} = 1,639 \times 10 = 16,39$$

Portanto, um fio de alumínio com 10 metros de comprimento apresenta a mesma resistência de um fio de cobre com mesma bitola e comprimento de 16,4 metros, aproximadamente.

- 3) Quantas vezes a bitola de um fio de alumínio deve ser maior que a de um fio de cobre para que apresentem a mesma resistência e comprimento?

*Solução:*

Verificando-se a resistividade do alumínio na tabela 1 e aplicando-se na expressão (1), tem-se:

$$R_{\text{alumínio}} = 2,825 \cdot 10^{-8} \cdot l / A_{\text{alumínio}}$$

Da mesma forma, para o cobre:

$$R_{\text{cobre}} = 1,723 \cdot 10^{-8} \cdot l / A_{\text{cobre}}$$

Dividindo-se membro a membro, resulta:

$$\frac{R_{\text{alumínio}}}{R_{\text{cobre}}} = \frac{2,825 \cdot 10^{-8}}{1,723 \cdot 10^{-8}} \times \frac{A_{\text{cobre}}}{A_{\text{alumínio}}} = 1$$

Resulta:

$$A_{\text{alumínio}} = 1,639 \cdot A_{\text{cobre}}$$

Portanto, um fio de alumínio deve apresentar uma bitola, aproximadamente, 64% maior que a do fio de cobre, para que eles possuam a mesma resistência e comprimento.

### 5.0 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A TEMPERATURA

Note-se que, como a resistência elétrica de um material é dependente da resistividade, ela também é afetada pela temperatura.

Assim, no caso de um condutor que apresente uma resistência  $R_0$  a uma temperatura  $T_0$ , a resistência  $R$  a uma temperatura  $T$  é, aproximadamente:

$$R = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (6)$$

Onde  $\alpha$  é conhecido como *coeficiente de temperatura* do material, cuja unidade é o ohm/graus Celsius ( $\Omega/^\circ\text{C}$ ).

#### Exercícios de fixação

- 1) A resistência de um condutor a  $40^\circ\text{C}$  é  $10\ \Omega$ . Sabendo-se que o coeficiente de temperatura do material do condutor é de  $0,004\ \Omega/^\circ\text{C}$ , calcule o valor de sua resistência a  $80^\circ\text{C}$ .

*Solução:*

Substituindo-se os valores correspondentes na expressão (2) tem-se:

$$R = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

$$R = 10 \cdot [1 + 0,004 (80 - 40)]$$

$$R = 11,6\ \Omega$$

- 2) A resistência elétrica de um condutor a  $30^\circ\text{C}$  é  $5\ \Omega$ . Qual é o valor da temperatura para que a resistência seja  $5,4\ \Omega$ ? Adotar o coeficiente de temperatura do material do condutor igual a  $0,004\ \Omega/^\circ\text{C}$ .

*Solução:*

Substituindo-se os valores correspondentes na expressão (2) tem-se:

$$R = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

$$5,4 = 5 \cdot [1 + 0,004 (T - 30)]$$

De onde:

$$T = 50^\circ\text{C}$$

Atente-se que, para esse caso, a elevação de temperatura entre as duas situações é de:

$$T - T_0 = 50 - 30 = 20^\circ\text{C}.$$

### 6.0 - RESISTORES

Freqüentemente, quando se conecta uma carga (como uma lâmpada ou um chuveiro, por exemplo) a uma fonte de tensão fixa, a corrente resultante no circuito é excessiva. Tal situação ocorre quando a resistência da carga é muito pequena ou a tensão de saída da fonte é muito alta.

A corrente pode ser diminuída pela redução da tensão da fonte, mas, geralmente, é impossível, ou pelo menos impraticável. Assim, a única maneira de reduzir a corrente é adicionar resistência ao circuito.

Quanto a isso, pode-se aumentar a resistência da fonte de tensão, da carga ou dos fios de ligação. Observe-se, entretanto, que as resistências da fonte e da carga são características do circuito e não podem ser alteradas. A resistência da fiação, por sua vez, é tão baixa que seriam necessários vários quilômetros de fios para se obter um aumento de alguns ohms na resistência total do circuito. Também é possível utilizar fios de ligação de resistência maior, mas seria necessária uma grande variedade de tipos de fios para interligar as partes de um circuito.

Para resolver essa situação, emprega-se um componente denominado *resistor*, o qual é, normalmente, fabricado com fios de nicromo ou tungstênio ou, ainda, com películas de grafite depositadas sobre um material isolante.

Os resistores podem ter valores fixos ou variáveis de resistência, sendo nesse último caso chamados de reostatos.



Figura 5 – Resistores em circuito eletrônico.



Figura 6 – Resistor para circuitos de potência.



Figura 7 – Exemplos de reostatos.



Figura 8 – Exemplo de reostato (potenciômetro).

Note-se que, os resistores para aplicações em circuitos eletrônicos, como o da figura 5, apresentam faixas com cores padronizadas para identificação, marcadas sobre a sua superfície.

## 7.0 – ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES

Os resistores são fabricados industrialmente e disponíveis comercialmente sob certas especificações ou valores nominais. No entanto, não é possível fabricar resistores de todos os valores.

Por essa razão, é possível empregar os reostatos, como analisado anteriormente, ou efetuar uma associação de resistores, isto é, agrupá-los adequadamente de forma que o conjunto apresente um valor específico de resistência, denominada *resistência equivalente*.

Para atender a fins práticos, os resistores podem ser associados em série, em paralelo ou em grupos mistos (série e paralelo, ao mesmo tempo).

### 7.1 – Associação em Série

O circuito ilustrado na figura 9 apresenta uma *associação em série* de resistores.

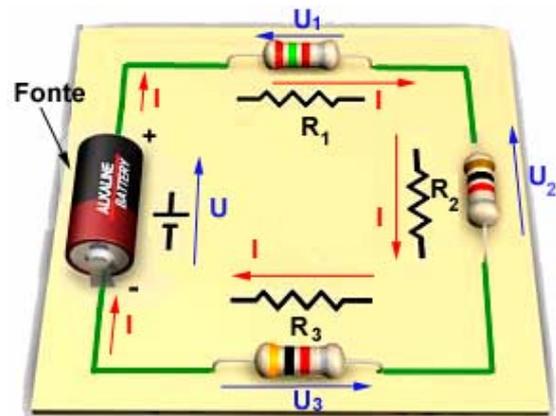


Figura 9 – Exemplo de associação em série de resistores.

Verifica-se pela análise da figura 9 que, na associação série, a corrente que circula por todos os resistores é a mesma.

Por outro lado, de acordo com a expressão (3), a tensão em uma resistência é igual ao produto de seu valor pela corrente. Assim:

$$U_1 = R_1 \times I; \quad U_2 = R_2 \times I;$$

e

$$U_3 = R_3 \times I$$

Observa-se que a soma dessas tensões devem ser, obrigatoriamente, iguais à da fonte, ou seja:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Mas, sabe-se da expressão (1) que, a divisão da tensão pela corrente, resulta em um valor de resistência, necessariamente. Assim, considerando-se a tensão da fonte e a corrente que circula devido a ela, obtêm-se uma *resistência total* ou *equivalente* de todo o circuito, ou seja:

$$R_{eq} = \frac{U}{I}$$

Ou:

$$U = R_{eq} \times I$$

Desta forma:

$$R_{eq} \times I = U_1 + U_2 + U_3$$

ou

$$R_{eq} \times I = R_1 \times I + R_2 \times I + R_3 \times I$$

Portanto:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

Sendo assim, conclui-se que, se houverem  $n$  resistores em série, a *resistência equivalente* é:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (7)$$

### Exercícios de fixação

- 1) Calcule a resistência equivalente do circuito da figura 9, sabendo-se que  $R_1 = 2,5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$  e  $R_3 = 3 \text{ k}\Omega$ .

*Solução:*

De acordo com a expressão (7), tem-se:

$$R_{eq} = 2,5 + 1 + 3 = 6,5$$

Portanto:

$$R_{eq} = 6,5 \text{ k}\Omega$$

- 2) Sabendo-se que a tensão da fonte do circuito da figura 9 é igual a 13 V, calcule a corrente e a tensão em cada resistor.

*Solução:*

A corrente  $I$  pode ser calculada utilizando a expressão (2), ou seja:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{13}{6,5 \times 10^3} = 2 \times 10^{-3}$$

Ou seja:

$$I = 2 \text{ mA}$$

Assim, as tensões são:

$$U_1 = R_1 \times I = 2,5 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-3}$$

$$U_2 = R_2 \times I = 1 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-3}$$

$$U_3 = R_3 \times I = 3 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-3}$$

Ou:

$$U_1 = 5 \text{ V} ; \quad U_2 = 2 \text{ V} \quad \text{e} \quad U_3 = 6 \text{ V}$$

Observe-se que:

$$U_1 + U_2 + U_3 = 5 + 2 + 6 = 13 = U$$

### 7.2 – Associação em Paralelo

O circuito ilustrado na figura 10 apresenta uma *associação em paralelo* de resistores.

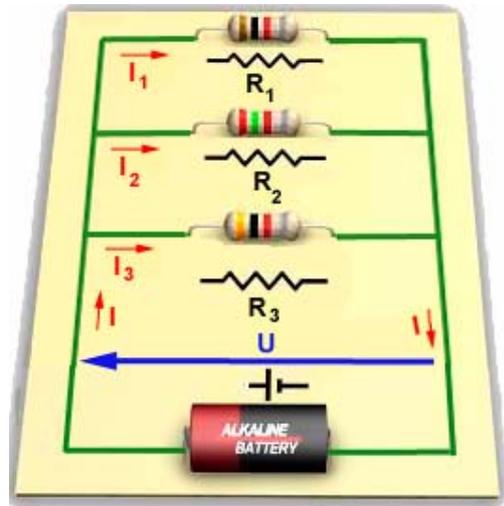


Figura 10 – Exemplo de associação em paralelo de resistores.

Verifica-se pela análise da figura 10 que, na associação paralelo, a tensão aplicada a todos os resistores é a mesma e igual a da fonte.

Por outro lado, de acordo com a expressão (2):

$$I_1 = \frac{U}{R_1} ; \quad I_2 = \frac{U}{R_2} ;$$

e

$$I_3 = \frac{U}{R_3}$$

Observa-se que a soma dessas correntes devem ser, obrigatoriamente, iguais à que a fonte fornece, ou seja:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Mas, sabe-se da expressão (1) que, a divisão da tensão pela corrente, resulta em um valor de resistência, necessariamente. Assim, considerando-se a tensão da fonte e a corrente que circula devido a ela, obtêm-se uma *resistência total* ou *equivalente* de todo o circuito, ou seja:

$$R_{eq} = \frac{U}{I}$$

Ou ainda:

$$I = \frac{U}{R_{eq}}$$

Então:

$$\frac{U}{R_{eq}} = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

Portanto:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Sendo assim, conclui-se que, se houverem  $n$  resistores em paralelo, a *resistência equivalente* é:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (8)$$

Para apenas duas resistências em paralelo, pode-se calcular a equivalente diretamente através de:

$$R_{eq} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (9)$$

### Exercícios de fixação

- 1) Calcule a resistência equivalente do circuito da figura 10, sabendo-se que  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2,5 \text{ k}\Omega$  e  $R_3 = 3 \text{ k}\Omega$ .

*Solução:*

De acordo com a expressão (8), tem-se:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2,5} + \frac{1}{3} = \frac{3 \times 2,5 + 3 + 2,5}{1 \times 2,5 \times 3}$$

Ou:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{13}{7,5}$$

Então:

$$R_{eq} = \frac{7,5}{13} = 0,58$$

Portanto:

$$R_{eq} = 0,58 \text{ k}\Omega$$

- 2) Sabendo-se que a tensão da fonte do circuito da figura 10 é igual a 13 V, calcule a corrente e a tensão em cada resistor.

*Solução:*

A tensão de cada resistor é igual a da fonte e, portanto,

$$U = 13 \text{ V}$$

As correntes podem ser calculadas utilizando-se a expressão (2), ou seja:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{13}{0,58 \times 10^3} = 22,5 \times 10^{-3}$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{13}{1 \times 10^3} = 13 \times 10^{-3}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{13}{2,5 \times 10^3} = 5,2 \times 10^{-3}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{13}{3 \times 10^3} = 4,3 \times 10^{-3}$$

Ou:

$$I = 22,5 \text{ mA}; I_1 = 13 \text{ mA};$$

$$I_2 = 5,2 \text{ mA} \text{ e } I_3 = 4,3 \text{ mA}$$

### 7.3 – Associação Mista

O circuito ilustrado na figura 11 apresenta uma *associação mista* de resistores.

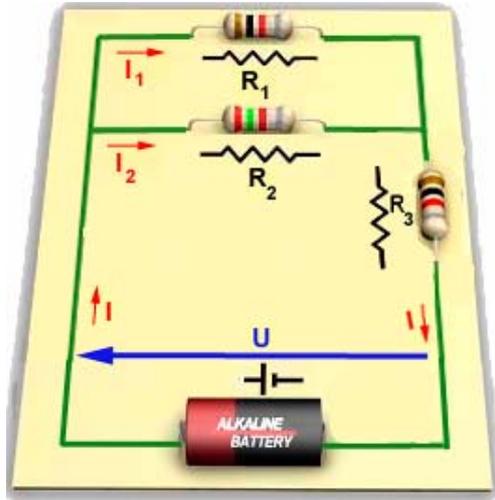


Figura 11 – Exemplo de associação mista de resistores.

O cálculo da resistência equivalente, neste caso, envolve os dois procedimentos anteriores, ou seja, calcula-se o valor correspondente para os resistores que estiverem em paralelo e os que estiverem em série, até que se obtenha apenas um único valor.

**Exercício de fixação**

Calcule a resistência equivalente do circuito da figura 11, sabendo-se que  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2,5\text{ k}\Omega$  e  $R_3 = 3\text{ k}\Omega$ .

Solução:

Observado-se a figura 11, verifica-se que as resistências  $R_1$  e  $R_2$  estão em paralelo e, assim, de acordo com a expressão (8), a resistência em paralelo ( $R_{eqp}$ ) é:

$$\frac{1}{R_{eqp}} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2,5} = \frac{2,5 + 1}{1 \times 2,5}$$

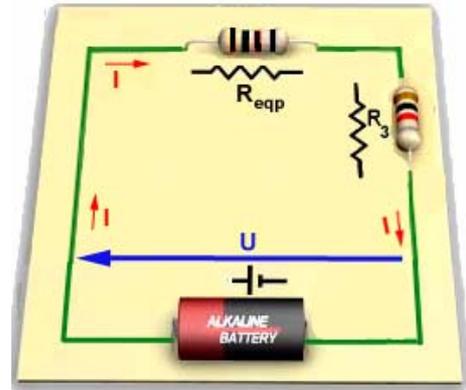
Ou:

$$\frac{1}{R_{eqp}} = \frac{3,5}{2,5}$$

Então:

$$R_{eqp} = \frac{2,5}{3,5} = 0,72$$

Observe que  $R_{eqp}$  estará em série com  $R_3$ , como ilustrado na figura a seguir.



Desta forma, de acordo com a expressão (7), tem-se:

$$R_{eq} = 0,72 + 3 = 3,72$$

Portanto:

$$R_{eq} = 3,72\text{ k}\Omega$$

**7.4 – Curto-Circuito**

A figura 12 mostra um fio de resistência elétrica desprezível, conectados entre os pontos A e B, aos quais também está conectada a resistência  $R_1$ .

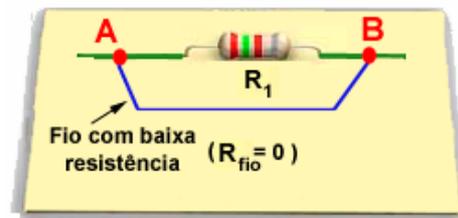


Figura 12 – Curto-circuito em resistência.

Desta forma, calculando-se a resistência equivalente entre os pontos A e B, tem-se:

$$\frac{1}{R_{eqAB}} = \frac{1}{R_{fio}} + \frac{1}{R_1}$$

Ou seja:

$$R_{eqAB} = \frac{R_{fio} \times R_1}{R_{fio} + R_1} = \frac{0 \times R_1}{0 + R_1} = 0$$

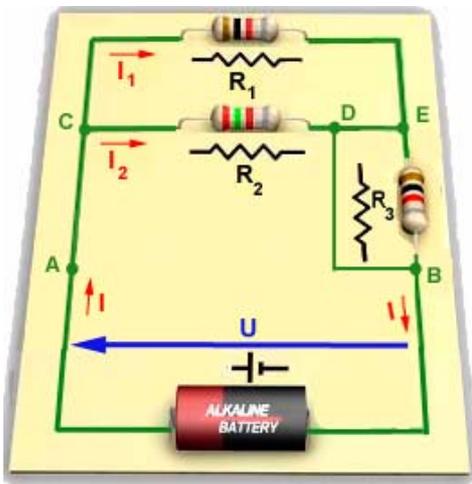
Conclui-se, então, que o fio ligado entre A e B anula a participação de  $R_1$  no circuito. Em outras palavras, diz-se que, nesta situação, se efetuou um *curto-circuito* entre os pontos A e B.

Portanto, os pontos A e B são eletricamente coincidentes, já que não há ddp entre eles.

Desta forma, quando se curto-circuita uma resistência, embora presente fisicamente, ela deixa de participar do circuito e, portanto, pode ser eliminada de quaisquer cálculos.

**Exercício de fixação**

Calcule a resistência equivalente entres os pontos A e B do circuito da figura mostrada a seguir, sabendo-se que  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2,5\text{ k}\Omega$  e  $R_3 = 3\text{ k}\Omega$ .



*Solução:*

Inspecionando-se o circuito da figura, verifica-se que as resistências  $R_1$  e  $R_2$  estão em paralelo e a resistência  $R_3$  está curto-circuitada, pois os pontos D, E e B são iguais eletricamente. Assim, de acordo com a expressão (8), a resistência em paralelo ( $R_{eq}$ ) é:

$$\frac{1}{R_{eqAB}} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2,5} = \frac{2,5+1}{1 \times 2,5}$$

Ou:

$$\frac{1}{R_{eqAB}} = \frac{3,5}{2,5}$$

Então:

$$R_{eqAB} = \frac{2,5}{3,5} = 0,72$$

Portanto:

$$R_{eqAB} = 0,72\text{ k}\Omega$$

**8.0 – REPRESENTAÇÃO SIMBÓLICA**

Os resistores são representados em desenhos elétricos pela sua resistência, como mostrado na figura 13. A simbologia para reostatos é a da figura 14.

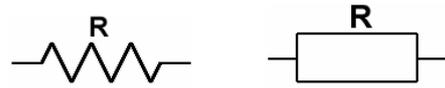


Figura 13 – Simbologia para representação de resistores em desenhos elétricos.

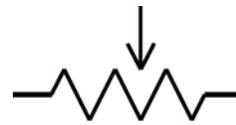


Figura 14 – Simbologia para representação de reostatos em desenhos elétricos.

Utilizando-se dessa simbologia a associação das resistências das figuras 9, 10 e 11 são as mostradas nas figura 15, 16 e 17, respectivamente.

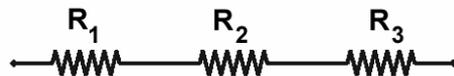


Figura 15 – Representação simbólica da associação de resistências do circuito da figura 9.

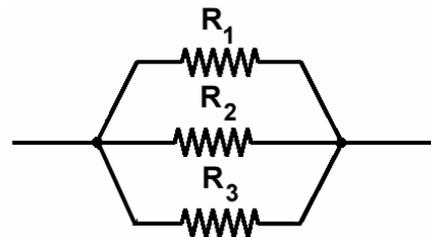


Figura 16 – Representação simbólica da associação de resistências do circuito da figura 10.

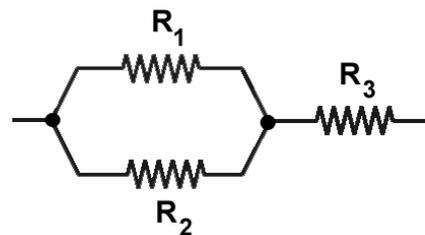


Figura 17 – Representação simbólica da associação de resistências do circuito da figura 11.

### 9.0 – IDENTIFICAÇÃO DOS RESISTORES

O valor e a precisão dos resistores podem ser obtidos através das informações lidas do próprio corpo do resistor, estas informações podem vir em um código de cores ou mesmo escritas. Quando estas informações por algum motivo não estão legíveis ou identificáveis, pode-se utilizar um ohmímetro para identificar o valor em Ohm do resistor, caso este não esteja inserido em um circuito.

Os resistores apresentam um *código de cores*, o qual é uma convenção utilizada para identificação de resistores de uso geral.

Cores	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4
Prata	-	-	0,01	10%
Ouro	-	-	0,1	5%
Preto	0	0	1	-
Marrom	01	01	10	1%
Vermelho	02	02	100	2%
Laranja	03	03	1.000	3%
Amarelo	04	04	10.000	4%
Verde	05	05	100.000	-
Azul	06	06	1.000.000	-
Violeta	07	07	10.000.000	-
Cinza	08	08	-	-
Branco	09	09	-	-

Tabela 2 – Código de cores dos resistores

As duas primeiras faixas representam o primeiro e o segundo dígito do valor da resistência, a terceira faixa representa o multiplicador e quarta faixa a porcentagem de tolerância do valor nominal da resistência do resistor.

A figura 18 apresenta um exemplo do exposto.

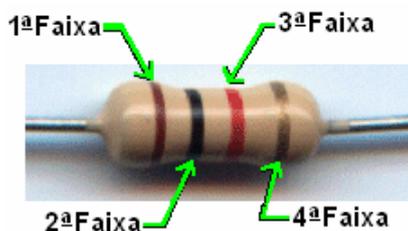


Figura 18 - Identificação de um resistor.

Faixa	1	2	3	4
Cor	Marrom	Preto	Vermelho	Ouro
Valor	1	0	2 (x100)	5%

Tabela 3 - Identificação de um resistor.

O valor do resistor é de  $1000 \Omega$  ( $1 k\Omega$ ) com 5 % de tolerância.

Devido ao processo de fabricação em massa dos resistores, não se consegue garantir para estes componentes um valor exato de resistência. Assim, o valor do resistor pode variar dentro do percentual especificado pela tolerância. Para o exemplo anterior onde a tolerância é de 5 %, o valor real do resistor está entre  $950 \Omega$  e  $1050 \Omega$ . Quanto menor a tolerância, mais caro o resistor, pois o processo de fabricação deve ser mais refinado para reduzir a variação em torno do valor nominal.

Para padronizar os valores comerciais de componentes eletrônicos, os fabricantes adotaram a tabela *RETMA*. Esta indica os valores disponíveis no mercado para os resistores. Os valores comerciais de resistores são potências de 10 multiplicadas pelos valores da tabela 4.

10	12	15	18	22	27
33	39	47	56	68	82

Tabela 4 - Valores de mercado.

Caso em um projeto, por exemplo, seja necessário utilizar um resistor com uma resistência de  $3400 \Omega$ , este valor deverá ser obtido pela associação de resistores.

O valor comercial mais próximo será  $33 \cdot 10^2 = 3300 \Omega$  (também conhecido como 3k3). Para completar os  $100 \Omega$  que faltam, pode se colocar em série um resistor de  $10 \cdot 10 = 100 \Omega$  (ou 100R) somando um total de  $3400 \Omega$ .

Em geral, identifica-se a potência de um resistor pelo seu tamanho, ou por alguma inscrição em sua superfície (para potências a partir de 1 W). A potência dos resistores comerciais pode ser de 1/8 W, 1/4 W, 1/2 W, 1 W, 2 W, 10 W, etc.

## CAPÍTULO 3: INDUTORES

### RESUMO

Este capítulo tem como objetivo estudar os indutores, bem como seu comportamento em um circuito.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Além das resistências, os circuitos de corrente alternada apresentam dois outros elementos que influenciam o seu comportamento de forma significativa. Nesse tópico, analisa-se um deles, denominado *indutância*.

### 2.0 - INDUTÂNCIA

Ao se passar uma corrente variável por uma bobina, cria-se um campo magnético, o qual também será variável.

Mas, conforme verificado por *Faraday*, sempre que houver uma variação entre um fluxo magnético e a bobina, será induzida uma tensão nos seus terminais.

Por outro lado, pela *Lei de Lenz*, essa tensão induzida produz uma corrente que cria um campo magnético, cujo sentido se opõe à variação do fluxo magnético original.

Em outras palavras, sempre que a tensão é induzida por uma variação de corrente, surge um efeito oposto que tende a limitar essa variação.

Na realidade, a *corrente* que circula por uma bobina não pode variar instantaneamente.

A propriedade que uma bobina apresenta de se opor a qualquer variação de corrente é chamada de *auto-indutância* ( $L$ ). No cotidiano, é comum se descartar o prefixo *auto* e, portanto, geralmente essa grandeza é chamada apenas de *indutância*.

É importante observar que, em *qualquer circuito* em que se *varie a corrente*, existirá a *indutância*, mesmo em apenas um fio (nesse caso, pode-se considerar que se tem uma bobina com apenas uma espira).

A indutância é medida em *henries* ( $H$ ), em homenagem ao físico americano *Joseph Henry*.

Normalmente, ela é representada em diagramas elétricos como mostrado na figura 1.



Figura 1 – Simbologia para representação da indutância em desenhos elétricos.

A indutância depende da constituição física do circuito, devendo ser medida em laboratório através dos instrumentos adequados. Um dos fatores que afetam a indutância é o número de espiras do indutor.

A figura 2 ilustra dois indutores, sendo que o indutor 1 possui duas espiras e o indutor 2 quatro espiras. Para o indutor 2 o campo formado será o dobro do campo no indutor 1 para um mesmo valor de corrente. Entretanto a tensão induzida será quatro vezes maior. Portanto, pode se dizer que a indutância varia com o quadrado do número de espiras.

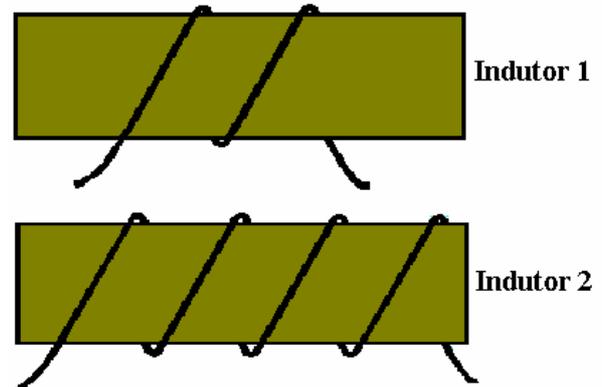


Figura 2 - Influência do número de espiras na indutância.

Um segundo fator é o diâmetro da bobina. Conforme pode ser visto na figura 3, a bobina da direita tem o dobro do diâmetro da bobina da esquerda.

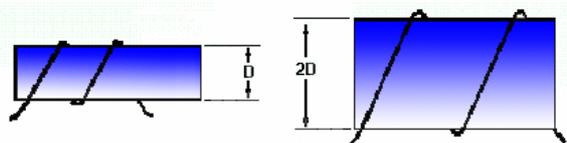


Figura 3 - Influência do diâmetro.

Ainda que o número de espiras seja o mesmo, é requerido mais condutor para a construção da bobina maior do que foi utilizado para a bobina de menor tamanho. O que faz com que existam mais linhas de campo eletromagnético, induzindo uma tensão maior.

Desta forma, a indutância aumenta, conforme se eleva a área do núcleo da bobina. Observa-se que a área do círculo é proporcional ao quadrado de seu raio, e, assim, a indutância aumenta quadraticamente em relação ao aumento do raio da bobina, ou seja, dobrando-se o raio, a indutância terá o seu valor multiplicado por quatro.

O terceiro fator a ser mencionado é o espaçamento das espiras. A figura 4 mostra um exemplo de espaçamento entre as espiras.

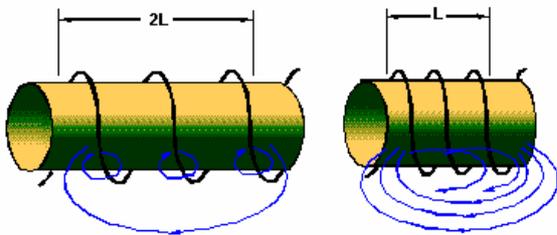


Figura 4 - Influência do espaçamento entre as espiras.

Como se vê, a bobina no lado esquerdo da figura possui três espiras, assim como a figura do lado direito. A bobina de comprimento e espaçamento maior com núcleo de ar e uma outra com o núcleo de ferro.

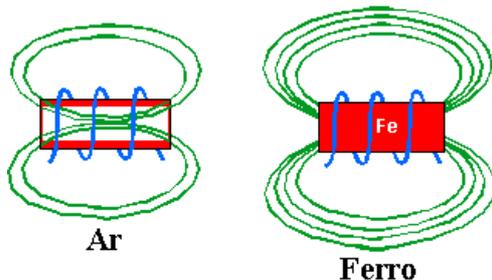


Figura 5 - Tipo de núcleo.

A bobina a direita (com núcleo de ferro) possui um núcleo que representa, em relação ao núcleo de ar, um melhor caminho magnético para as linhas de campo. A alta permeabilidade magnética do ferro faz com que este apresente uma menor relutância ao fluxo magnético o que resulta em um número maior de linhas de campo. A indutância de uma bobina aumenta de forma proporcional ao aumento da permeabilidade do material com que o núcleo é feito.

Uma outra forma de aumentar a indutância é enrolar a bobina em várias camadas, conforme ilustra a figura 6. O espaçamento menor e a dupla camada permitem uma proximidade maior entre as espiras causando um aumento do fluxo concatenado

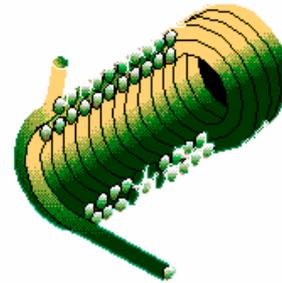


Figura 6 - Múltiplas camadas.

### 3.0 - INDUTORES

Assim como se tem resistores que apresentam uma determinada resistência à circulação de corrente, também existem *indutores* que introduzirão quantidades específicas de indutância no circuito (ou seja, uma maior ou menor oposição à variação de corrente). A figura 7 apresenta alguns exemplos de indutores.



Figura 7 – Exemplos de indutores.

### 4.0 - ASSOCIAÇÃO DE INDUTORES

Os indutores, a exemplo dos resistores, podem ser associados em série, em paralelo ou em grupos mistos (série e paralelo, ao mesmo tempo), de forma que o conjunto apresente um valor específico de indutância, denominada *indutância equivalente*.

Os procedimentos para o cálculo da indutância equivalente são os mesmos dos das resistências.

Assim, para *indutores em série*, tem-se:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \quad (1)$$

Da mesma forma, para *n indutores em paralelo*, a indutância equivalente é:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n} \quad (2)$$

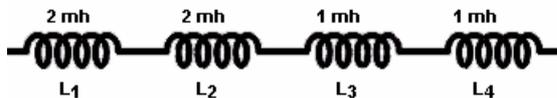
Para apenas duas indutâncias em paralelo, pode-se calcular a equivalente diretamente através de:

$$L_{eq} = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2} \quad (3)$$

O cálculo da indutância equivalente na associação mista envolve os dois procedimentos anteriores, ou seja, calcula-se o valor correspondente para os indutores que estiverem em paralelo e os que estiverem em série, até que se obtenha apenas um único valor.

#### Exercícios de fixação

- 1) Calcule a indutância equivalente do ramo de circuito mostrado a seguir:



*Solução:*

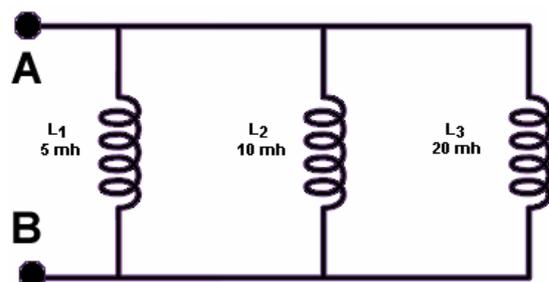
De acordo com a expressão (2), tem-se:

$$L_{eq} = 2 + 2 + 1 + 1 = 6$$

Portanto:

$$L_{eq} = 6 \text{ mH}$$

- 2) Calcule a indutância equivalente entre os pontos A e B.



*Solução:*

De acordo com a expressão (3), tem-se:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{20}$$

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{4}{20} + \frac{2}{20} + \frac{1}{20} = \frac{7}{20}$$

Portanto:

$$L_{eq} = 2,86 \text{ mH}$$

#### 5.0 – INDUTÂNCIAS EM CIRCUITOS CA

Observe-se um circuito como o da figura 8, onde se alimenta uma indutância a partir de uma fonte de tensão alternada (*circuito indutivo*).

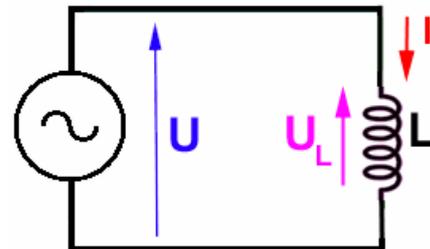


Figura 8 – Circuito indutivo.

Nas indutâncias, a tensão que surge em seus terminais é diretamente proporcional à taxa de variação (“rapidez”) da corrente que por ela circula. Assim, quanto mais alta for a frequência, maior será a “rapidez” com que a corrente varia. Além disso, quanto maior a indutância (ou seja, a oposição à variação da corrente) maior é a tensão.

Pelo exposto, verifica-se que a tensão nos terminais de uma indutância é diretamente proporcional à frequência (ou, mais propriamente à velocidade angular  $\omega$ ) e ao seu valor, ou seja:

$$U_L = \omega L I \quad (4)$$

A grandeza  $\omega L$  é chamada de *reatância indutiva* ( $X_L$ ), ou seja:

$$X_L = \omega L = 2 \pi f L \quad (5)$$

Então:

$$U_L = X_L I \quad (6)$$

Portanto:

$$X_L = \frac{U_L}{I} \quad (7)$$

Observe na expressão (7) que a reatância indutiva pode ser expressa como a relação entre a tensão e a corrente, como no caso das resistências. Portanto, ela também é dada em  $\Omega$ .

Pelo exposto, a reatância indutiva é uma oposição à passagem de corrente que resulta em uma troca contínua de energia entre fonte e o campo magnético do indutor (em um ciclo recebe e no outro fornece). Em outras palavras, a reatância indutiva, ao

contrário da resistência (que dissipa energia na forma de calor), não dissipa energia.

Em relação às formas de onda de tensão e corrente, ao serem analisadas em um osciloscópio, verifica-se que, em uma indutância, a corrente está atrasada de  $90^\circ$  da tensão, conforme se verifica na figura 9.

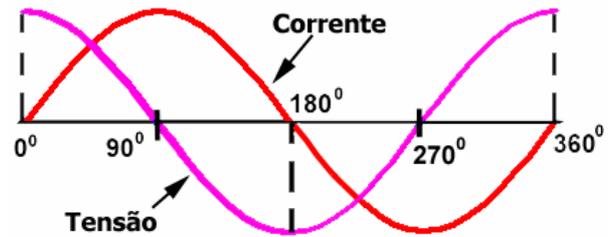


Figura 9 – Corrente atrasada de  $90^\circ$  da tensão em uma indutância.

## CAPÍTULO 4: CAPACITORES

### RESUMO

Este capítulo visa o estudo dos capacitores, bem como seu comportamento em um circuito.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Além das resistências e indutâncias, os circuitos de corrente alternada apresentam um outro elemento que influencia o seu comportamento de forma significativa, ou seja, a *capacitância*, como analisado a seguir.

### 2.0 - CAPACITÂNCIA

Considerando-se duas placas,  $P_1$  e  $P_2$ , iguais, condutoras, paralelas e inicialmente neutras.

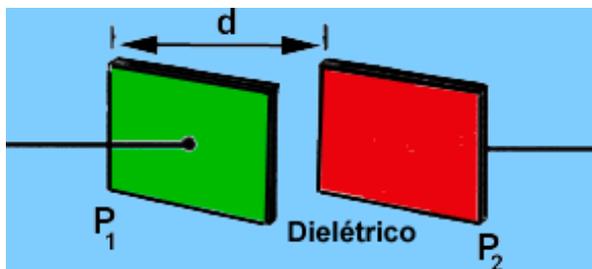


Figura 1 – Placas paralelas.

O meio existente entre elas é um isolante elétrico (dielétrico), como, por exemplo, o ar.

Ligando-se tais placas aos terminais de uma fonte de tensão contínua, como, por exemplo, uma pilha de lanterna, tem-se o mostrado na figura 2.

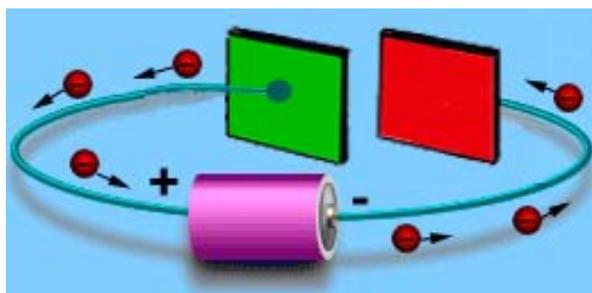


Figura 2 – Eletrização das placas.

Nesse caso, a fonte, então, "arranca" elétrons da placa  $P_1$  e introduz elétrons na placa  $P_2$ , até que a diferença de potencial entre as placas torne-se igual à sua tensão, quando, então, cessa a movimentação de cargas, ou seja, a corrente elétrica.

Dessa forma, a placa  $P_1$  fica eletrizada positivamente (carga positiva), enquanto a placa  $P_2$  fica eletrizada negativamente (carga negativa).

Após isso, mesmo desconectando a fonte das placas, elas se mantêm eletrizadas pelo fato de não haver nenhum caminho condutor por onde as cargas possam escoar.

Portanto, como se nota, é possível armazenar cargas elétricas nas placas.

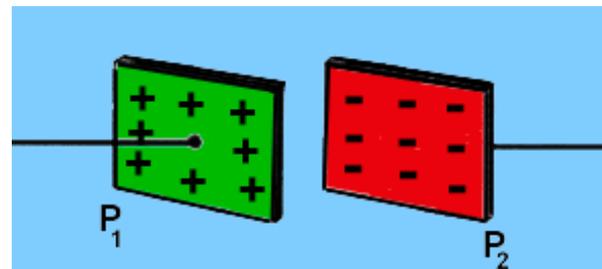


Figura 3 – Placas eletrizadas.

Se entre essas placas for inserido diferentes materiais, diferentes quantidades de carga nelas serão depositadas.

Esse elemento constituído por duas placas condutoras e paralelas, separadas por um material isolante (nesse caso, o ar) é chamado de *capacitor*.

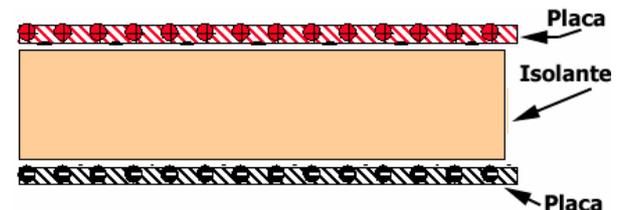


Figura 4 – Capacitor elementar.

A *capacitância* é a medida da quantidade de carga que um capacitor pode armazenar em suas placas, ou seja, de sua capacidade de armazenamento.

Ela é dada em *farads (F)*, em homenagem a *Michel Faraday*. No entanto, na prática, o farad é uma

unidade muito grande para a maioria das aplicações, sendo mais comum empregar-se o  $\mu\text{F}$  (microfarad ou  $10^{-6}$  F) ou o pF (picofarad ou  $10^{-12}$  F).

Normalmente, a capacitância é representada em diagramas elétricos como mostrado na figura 5.



Figura 5 – Simbologia para representação da capacitância em desenhos elétricos.

### 3.0 - CAPACITORES

Para os indutores, sabe-se que as *correntes* que circulam por eles *não podem variar instantaneamente*.

No caso dos *capacitores*, por outro lado, a tensão entre os seus terminais é limitada pela taxa (“rapidez”) com que as cargas são armazenadas ou retiradas de suas placas. Em outras palavras, a *tensão* aplicada em seus terminais *não pode variar instantaneamente*.

Assim, os *capacitores* introduzirão quantidades específicas de capacitância em um circuito, ou seja, *uma maior ou menor oposição à variação de tensão*.

As figuras 6 a 8 apresentam alguns exemplos de capacitores.



Figura 6 – Exemplos de capacitores.



Figura 7 – Exemplos de capacitores.



Figura 8 – Exemplos de capacitores.

### 4.0 – ASSOCIAÇÃO DE CAPACITORES

Os capacitores, a exemplo dos resistores e indutores, podem ser associados em série, em paralelo ou em grupos mistos (série e paralelo, ao mesmo tempo), de forma que o conjunto apresente um valor específico de capacitância, denominada *capacitância equivalente*.

Os procedimentos para o cálculo da capacitância equivalente são inversos aos dos das resistências e indutâncias.

Assim, para *capacitores em série*, tem-se:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1)$$

Para apenas duas capacitâncias em série, pode-se calcular a equivalente diretamente através de:

$$C_{eq} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

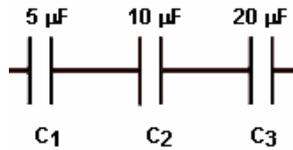
Da mesma forma, para *n capacitores em paralelo*, a capacitância equivalente é:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (3)$$

O cálculo da capacitância equivalente na associação mista envolve os dois procedimentos anteriores, ou seja, calcula-se o valor correspondente para os capacitores que estiverem em paralelo e os que estiverem em série, até que se obtenha apenas um único valor.

#### Exercícios de fixação

- 1) Calcule a capacitância equivalente do ramo de circuito mostrado a seguir:



Solução:

De acordo com a expressão (1), tem-se:

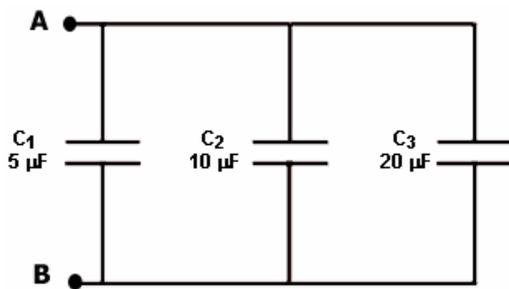
$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{20}$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{4}{20} + \frac{2}{20} + \frac{1}{20} = \frac{7}{20}$$

Portanto:

$$C_{eq} = 2,86 \mu\text{F}$$

- 2) Calcule a capacitância equivalente entre os pontos A e B.



Solução:

De acordo com a expressão (3), tem-se:

$$C_{eq} = 5 + 10 + 20 = 35$$

Portanto:

$$C_{eq} = 35 \mu\text{F}$$

### 5.0 – CAPACITÂNCIAS EM CIRCUITOS CA

Observe-se um circuito como o da figura 9, onde se alimenta uma capacitância a partir de uma fonte de tensão alternada (*circuito capacitivo*).

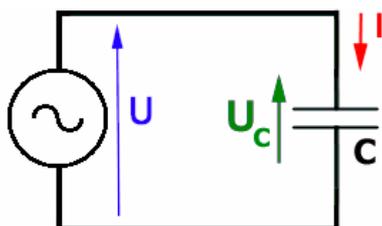


Figura 9 – Circuito capacitivo.

Em uma capacitância, a corrente que por ela circula é diretamente proporcional à taxa de variação (“rapidez”) da tensão em seus terminais. Assim, quanto mais alta for a frequência, maior será a corrente. Além disto, quanto maior a capacitância (ou seja, a oposição à variação da tensão) maior é a corrente.

Pelo exposto, verifica-se que a corrente nos terminais de uma capacitância é diretamente proporcional à frequência (ou, mais propriamente à velocidade angular  $\omega$ ) e ao seu valor, ou seja:

$$I = \omega C U_C \quad (4)$$

Ou:

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I \quad (5)$$

A grandeza  $\frac{1}{\omega C}$  é chamada de *reatância capacitiva* ( $X_C$ ), ou seja:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (6)$$

Então:

$$U_C = X_C I \quad (7)$$

Portanto:

$$X_C = \frac{U_C}{I} \quad (8)$$

Observe na expressão (8) que a reatância capacitiva pode ser expressa como a relação entre a tensão e a corrente, como no caso das resistências. Portanto, ela também é dada em  $\Omega$ .

Pelo exposto, a reatância capacitiva é uma oposição à passagem de corrente que resulta em uma troca contínua de energia entre fonte e o capacitor (em um ciclo fornece e no outro recebe). Em outras palavras, a *reatância capacitiva*, a exemplo da reatância indutiva e ao contrário da resistência (que dissipa energia na forma de calor), *não dissipa energia*.

Em relação às formas de onda de tensão e corrente, ao serem analisadas em um osciloscópio, verifica-se que, em uma capacitância, a *corrente está adiantada de 90° da tensão*, conforme se verifica na figura 10.

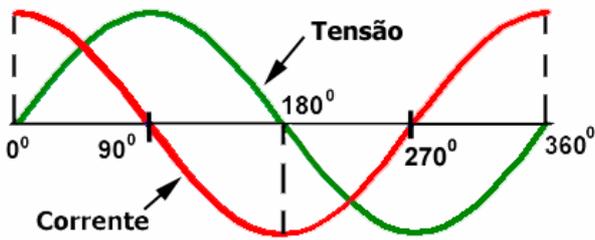


Figura 10 – Corrente adiantada de 90° da tensão em uma capacitância.

### 6.0 - IDENTIFICAÇÃO DOS CAPACITORES

O valor da capacitância e a tensão nominal da maioria dos capacitores são gravados no corpo dos mesmos, assim como a polaridade, no caso dos eletrolíticos.

A tensão nominal gravada no corpo do capacitor geralmente se refere à tensão máxima que pode ser aplicada aos terminais, sem o risco de ruptura do dielétrico.

Muitos capacitores são marcados com um código de cores semelhante ao usado para os resistores. As cores e os números correspondentes são iguais para ambos os casos.

Cor	Nº	Nº de zeros	Tolerância	Tensão Nominal
Preto	0	-	± 20%	-
Marrom	1	0	-	-
Vermelho	2	00	-	250
Laranja	3	000	-	-
Amarelo	4	0000	-	400
Verde	5	00000	-	-
Azul	6	-	-	630
Violeta	7	-	-	-
Cinza	8	-	-	-
Branco	9	-	± 10%	-

Tabela 1 – Código de cores dos capacitores.

Sendo que os valores comerciais foram padronizados utilizando a *RETMA*, como visto para resistores.

10	12	15	18	22	27
33	39	47	56	68	82

Tabela 2 – Valores Comerciais.

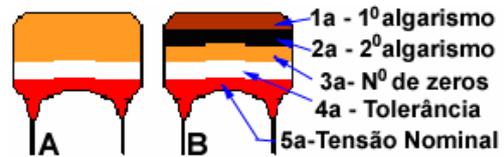


Figura 11 – Exemplo de código de cores para capacitores.

Utilizando-se a tabela 1 pode se interpretar o código de cores dos capacitores exibidos na figura 11. A leitura é feita em picofarad (pF).

Para o capacitor "B" as três primeiras cores são, marrom, preto e laranja, correspondendo a 10000 pF ou 10 nF. A cor branca, logo adiante, é referente a ±10% de tolerância. E o vermelho, representa a tensão nominal, que é de 250 volts.

Para o capacitor "A" as três primeiras cores são, laranja, laranja e laranja, correspondendo a 33000 pF, ou 33 nF. A cor branca, logo adiante, é referente a ±10% de tolerância. E o vermelho, representa a tensão nominal, que é de 250 volts.

Para capacitores que apresentam 2 números, como, por exemplo, os capacitores da figura 12, o código 3n3 significa que este capacitor é de 3,3 pF. O "n" minúsculo representa uma vírgula. Este é colocado ao meio dos números para evitar erro de interpretação.

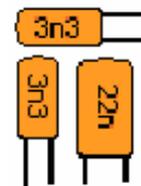


Figura 12 – Código com números e letras.

Caso o capacitor possua três números impressos, executa-se um processo similar ao código de cores para resistores. Nele, os dois primeiros representam o primeiro e o segundo algarismos significativos, e o terceiro um código para o multiplicador.

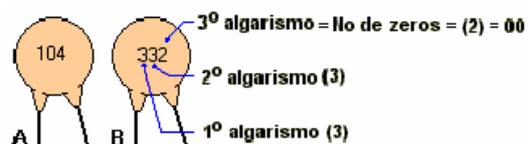


Figura 13 – Capacitores com três dígitos.

Nos capacitores da figura 14, por outro lado, tem-se uma letra maiúscula ao lado dos números.

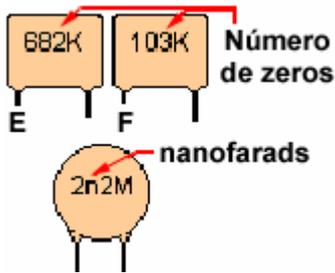


Figura 14 – Capacitores com códigos de tolerâncias de capacitância.

Esta letra refere-se à tolerância do capacitor, ou seja, o quanto que o capacitor pode variar de seu valor em uma temperatura padrão de 25 °C.

O significado de cada letra está expresso na tabela 3. Por exemplo, a letra "J" significa que este capacitor pode variar até  $\pm 5\%$  de seu valor.

Código	Até 10 pF	Acima de 10 pF
B	$\pm 0,1\text{pF}$	
C	$\pm 0,25\text{pF}$	
D	$\pm 0,5\text{pF}$	
F	$\pm 1,0\text{pF}$	$\pm 1\%$
G		$\pm 2\%$
H		$\pm 3\%$
J		$\pm 5\%$
K		$\pm 10\%$
M		$\pm 20\%$
S		-50% -20%
Z		+80% -20% ou +100% -20%
P		+100% -0%

Tabela 3 - Códigos de tolerâncias de capacitância.

## **CAPÍTULO 5: DIODOS**

### **RESUMO**

Este capítulo apresenta os princípios básicos do funcionamento dos diodos.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Um *diodo* é um elemento retificador e apresenta múltiplas aplicações.

Ele permite a *condução de corrente* em apenas um sentido. Para ser mais preciso, quando inversamente polarizado, conduz uma corrente tão pequena no sentido inverso que pode ser desprezada, a qual é chamada de corrente inversa de saturação.

Quando está polarizado diretamente, conduz corrente no sentido direto, mas provoca uma pequena queda de tensão no circuito. Se o diodo for de silício, esta tensão é de 0,6 a 0,7 V. Na realidade, se a tensão direta aplicada ao diodo não ultrapassar 0,5 V, ele não chega a conduzir ou conduz uma corrente de valor muito baixo.

### **2.0 - FÍSICA DOS SEMICONDUTORES**

#### **2.1 – Estrutura dos Semicondutores**

Os átomos de germânio e silício possuem uma camada de valência com quatro elétrons. Quando os átomos de germânio (ou silício) agrupam-se entre si, formam uma estrutura ordenada chamada de estrutura cristalina. Nessa estrutura, cada átomo une-se a quatro outros átomos vizinhos, por meio de ligações covalentes, e cada um dos quatro elétrons da camada de valência de um átomo é compartilhado com um átomo vizinho, de modo que dois átomos adjacentes compartilham os dois elétrons.

Com o aumento da temperatura algumas ligações covalentes recebem energia suficiente para se romperem, fazendo com que os elétrons das ligações rompidas passem a se movimentar livremente no interior do cristal, tornando-se elétrons livres.

Com a quebra das ligações covalentes, no local onde havia um elétron de valência, passa a existir uma região com carga positiva, uma vez que o átomo era neutro e um elétron o abandonou. Essa região positiva recebe o nome de lacuna ou buraco. As

lacunas não têm existência real, pois são apenas espaços vazios provocados por elétrons que abandonam as ligações covalentes rompidas. Sempre que uma ligação covalente é rompida, surgem simultaneamente um elétron e uma lacuna. Entretanto, pode ocorrer o inverso, um elétron preencher o lugar de uma lacuna, completando a ligação covalente. Como tanto os elétrons como as lacunas sempre aparecem e desaparecem aos pares, pode-se afirmar que o número de lacunas é sempre igual à de elétrons livres.

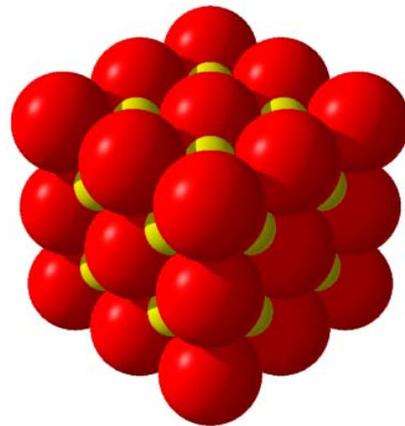


Figura 1 – Estrutura Cristalina.

Quando o cristal de silício ou germânio é submetido a uma diferença de potencial, os elétrons livres se movem no sentido do maior potencial elétrico e as lacunas por consequência se movem no sentido contrário ao movimento dos elétrons.

#### **2.2 – Impurezas nos Semicondutores**

Os cristais de silício são encontrados na natureza misturados com outros elementos. Dado a dificuldade de se controlar as características destes cristais é feito um processo de purificação do cristal e, em seguida, são injetadas, através de um processo controlado, impurezas na ordem de 1 para cada  $10^6$  átomos do cristal, com a intenção de se alterar produção de elétrons livres e lacunas.

A este processo de inserção dá-se o nome de *dopagem*. As impurezas utilizadas na dopagem de um cristal semicondutor podem ser de dois tipos: *doadoras* e *aceitadoras*.

**2.3 – Impurezas Doadoras**

São adicionados átomos pentavalentes (com 5 elétrons na camada de valência) no cristal de silício. O átomo pentavalente entra no lugar de um átomo de silício dentro do cristal, absorvendo as suas quatro ligações covalentes, e fica com um elétron fracamente ligado ao núcleo do pentavalente.

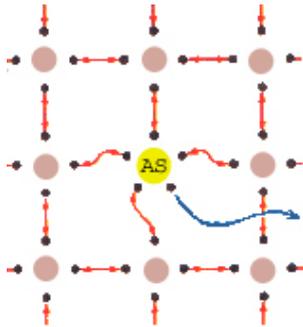


Figura 2 – Adição de um átomo pentavalente ao silício.

**2.4 – Impurezas Aceitadoras**

São adicionados átomos trivalentes (com 3 elétrons na camada de valência) no cristal de silício. 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.

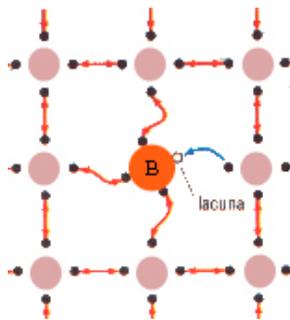


Figura 3 – Adição de um átomo trivalente ao silício.

**2.5 – Tipos de Semicondutores**

Um semicondutor pode ser dopado para ter um excesso de elétrons livres ou excesso de lacunas.

Assim, obtêm dois tipos de semicondutores, ou seja, os do tipo N e os do tipo P.

**2.5.1 – Semicondutor tipo N**

O cristal que foi dopado com impureza doadora é chamado *semicondutor tipo N*, onde N está relacionado com *negativo*.

Como os elétrons livres excedem em número as lacunas em um *semicondutor tipo N*, os *elétrons* são chamados *portadores majoritários* e as *lacunas*, *portadores minoritários*.

**2.5.2 – Semicondutor 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 elétrons livres em um *semicondutor tipo P*, as *lacunas* são chamadas *portadores majoritários* e os *elétrons livres*, *portadores minoritários*.

**3.0 – DIODOS COMUNS**

**3.1 – Considerações Gerais**

O *diodo* é um dos elementos mais básicos da eletrônica. Ele é utilizado em diversos circuitos, desde fontes de alimentação a conversores AC-DC trifásicos.

O funcionamento do diodo é análogo a uma chave. Assim, ele pode estar conduzindo ou não conduzindo a corrente elétrica.



Figura 4 – Diodo Retificador comum.

**3.2 – Construção de um Diodo**

A união de um *cristal tipo P* e a de um *cristal tipo N* resulta em uma *junção PN*, o qual é um dispositivo de estado sólido simples: o *diodo semicondutor de junção*.

Devido à repulsão mútua, os elétrons livres do lado N espalham-se em todas as direções, sendo que alguns atravessam a junção e se combinam com as lacunas. Quando isto ocorre, a lacuna desaparece e o átomo associado torna-se *carregado negativamente* (um *ion negativo*).

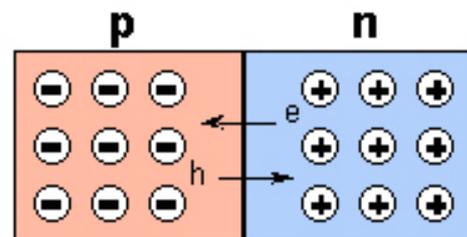


Figura 5 – Combinação dos elétrons com as lacunas.

Cada vez que um elétron atravessa a junção ele cria um par de íons. Os íons estão fixo na estrutura do cristal por causa da ligação covalente. À medida que o número de íons aumenta a região próxima à junção fica sem elétrons livres e lacunas. Chama-se a esta região de *camada de depleção*.

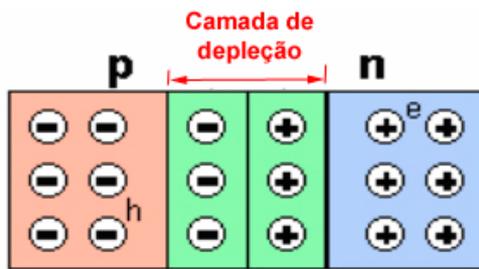


Figura 6 – Camada de depleção.

Além de certo ponto, a camada de depleção age como uma barreira impedindo a continuação da difusão dos elétrons livres. A intensidade da camada de depleção aumenta com cada elétron que atravessa a junção até que se atinja um equilíbrio. A diferença de potencial através da camada de depleção é chamada de barreira de potencial. A 25 °C esta barreira é de 0,7 V para o silício e 0,3 V para o germânio.

O símbolo mais usual para o diodo é mostrado na figura 7, onde é mostrado que o lado do *material tipo P* é chamado de anodo, enquanto o do *material tipo N* de catodo.

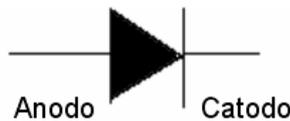


Figura 7 – Símbolo do Diodo.

### 3.3 – Polarização de um Diodo

*Polarizar* um diodo significa *aplicar uma diferença de potencial às suas extremidades*.

Supondo-se uma bateria aplicada aos terminais do diodo, há uma *polarização direta* se o *pólo positivo* da bateria for colocado em contato com o *material tipo P (anodo)* e o *pólo negativo* em contato com o *material tipo N (catodo)*.

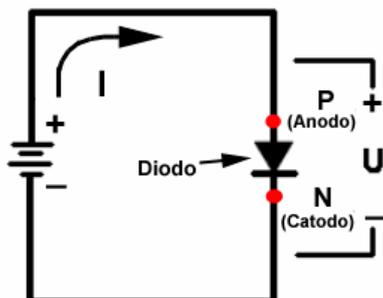


Figura 8 – Polarização direta.

Na *polarização direta*, o *diodo* funciona como uma *chave fechada*, conduzindo a corrente elétrica gerada pela bateria através dele.

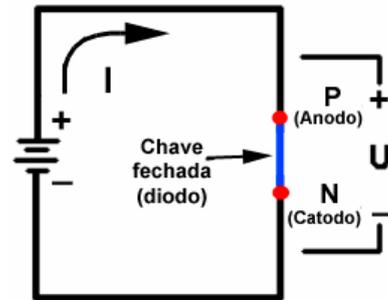


Figura 9 – Polarização direta – Diodo representado por uma chave.

Ao se inverter os pólos da bateria em relação aos terminais do diodo, ele ficará *polarizado inversamente* ou *reversamente*. Neste caso, ele *bloqueia*, ou seja, o diodo opera como uma chave aberta e não há circulação de corrente.

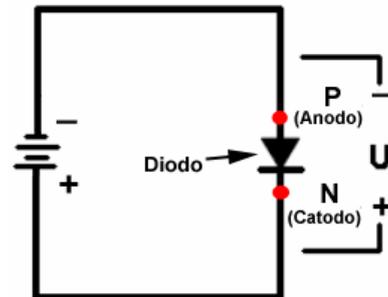


Figura 10 – Polarização reversa.

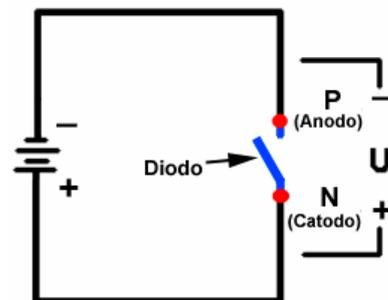


Figura 11 – Polarização reversa – Diodo representado por uma chave.

### 3.4 – Curva Característica

A *curva característica* de um diodo é um gráfico que relaciona cada valor da tensão aplicada com a respectiva corrente elétrica que atravessa o diodo.

Na polarização direta, a curva característica possui o aspecto da mostrada na figura 12.

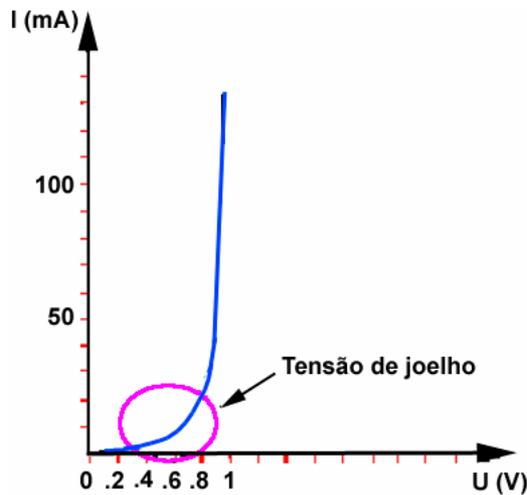


Figura 12 – Tensão de joelho.

Na polarização direta, o diodo não conduz intensamente até que se ultrapasse a barreira potencial. À medida que a tensão aplicada se aproxime do potencial da barreira, os elétrons livres e as lacunas começam a atravessar a junção em grandes quantidades. A tensão para a qual a corrente começa a aumentar rapidamente é chamada de *tensão de joelho* e é da ordem de 0,7 V, aproximadamente.

Para a polarização reversa a curva é semelhante à mostrada na figura 13.

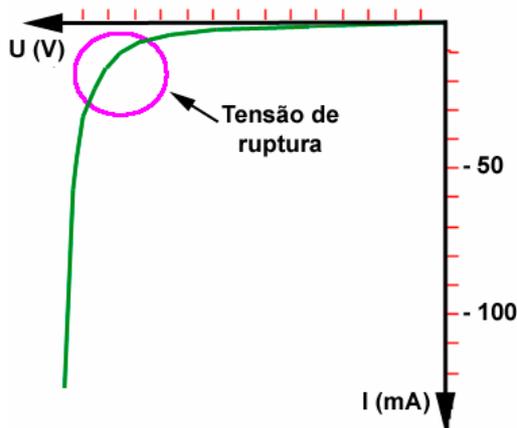


Figura 13 – Tensão de ruptura.

No diodo polarizado reversamente, há a circulação de uma corrente elétrica extremamente pequena, chamada de corrente de fuga. Aumentando a tensão reversa aplicada sobre o diodo, chegara um momento em que se atinge a tensão de ruptura, e a partir da qual a corrente aumenta sensivelmente.

Em função do exposto, a curva característica completa do diodo é a ilustrada na figura 14

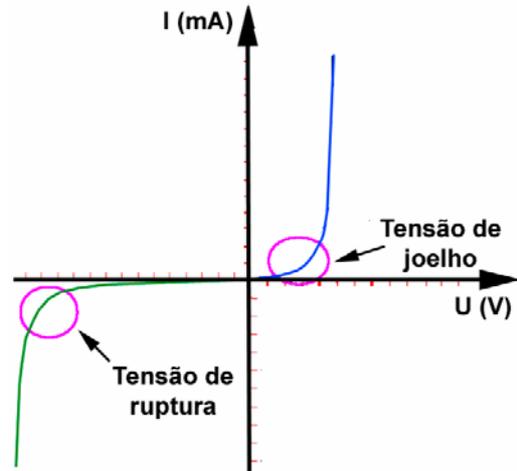


Figura 14 – Curva característica do diodo.

### 3.5 – Reta de Carga

Em um diodo polarizado diretamente, uma pequena tensão aplicada pode gerar uma alta intensidade de corrente. Em geral, um resistor é usado em série com o diodo para limitar a corrente elétrica que passa através deles, como ilustra a figura 15.

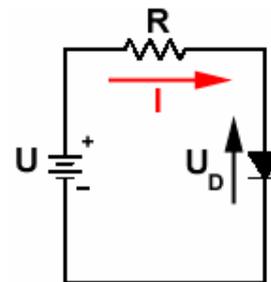


Figura 15 – Circuito com diodo e resistor limitador de corrente.

Como a curva característica do diodo não é linear, torna-se complexo determinar através de equações o valor da corrente e tensão sobre o diodo e resistor limitador de corrente.

No entanto, é possível empregar-se um método gráfico para determinar o valor exato da corrente e da tensão sobre o diodo.

Nesse caso, determina-se o comportamento da corrente em função da tensão sobre o diodo ( $U_D$ ), ou seja:

$$I = \frac{U - U_D}{R} \quad (1)$$

Se, por exemplo:

$$U = 2 \text{ V} \quad e \quad R = 100 \, \Omega$$

Tem-se:

$$I = 20 \times 10^{-3} - 0,01U_D$$

A qual é a equação de uma reta denominada *reta de carga*.

Assim, utilizando-se os gráficos da curva do diodo e da reta de carga, obtêm-se a situação mostrada na figura 16.

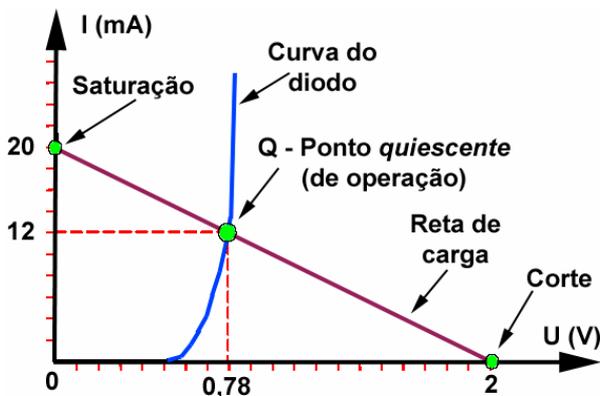


Figura 16 – Reta de carga e ponto quiescente (de operação).

No gráfico da figura 16, os pontos notáveis são:

- Ponto de saturação* é aquele no qual ocorre o valor máximo que a corrente pode assumir;
- Ponto de corte* é aquele no qual ocorre o valor mínimo que a corrente pode assumir;
- Ponto de operação ou quiescente* é o de operação do diodo para a respectiva carga. No exemplo, a tensão no diodo é de 0,78 V e a corrente 12 mA.

#### 4.0 – OUTROS TIPOS DE DIODOS

Existem outros tipos de diodos, no entanto o princípio de funcionamento é o mesmo para todos eles.

Serão analisados apenas os mais importantes a seguir.

##### 4.1 - Diodo zener

O *diodo zener* foi construído para operar na região de ruptura. Assim, ele apresenta um funcionamento normal quando polarizado diretamente e uma tensão muito próxima à tensão de ruptura quando polarizado reversamente.

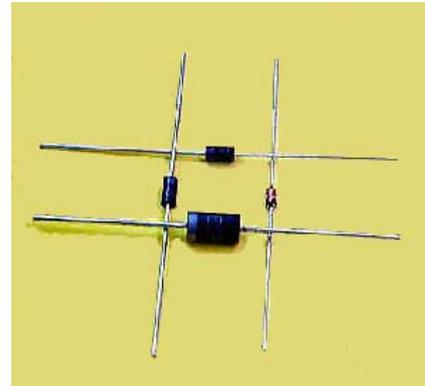


Figura 17 - Diodos zener.

As figuras 18 e 19 apresentam, respectivamente, o símbolo e a curva característica do diodo zener.

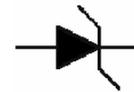


Figura 18 – Símbolo do diodo zener.

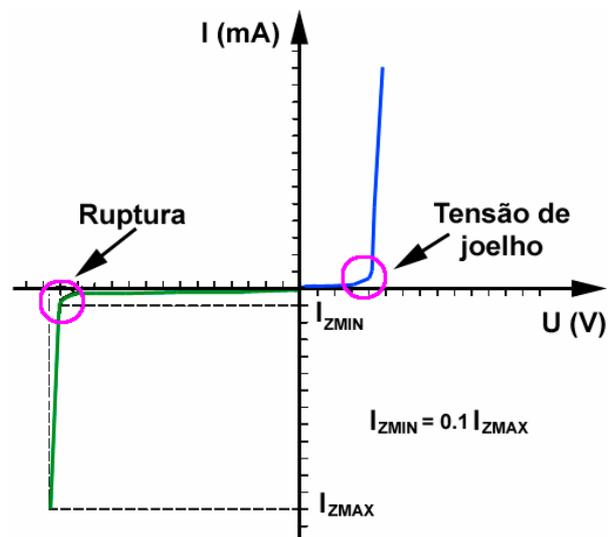
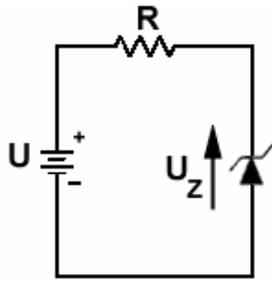
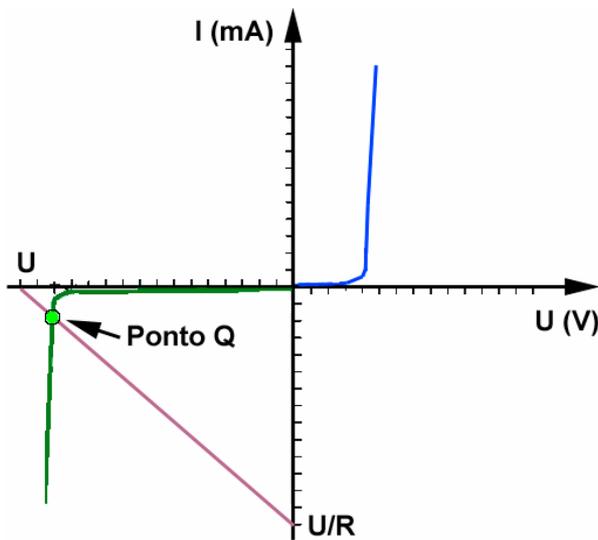


Figura 19 – Curva característica e faixa de operação do diodo zener.

A sua principal aplicação é a de conseguir uma tensão estável (tensão de ruptura). Normalmente, ele está polarizado reversamente e em série com um resistor limitador de corrente. Graficamente é possível obter a corrente elétrica sob o zener com o uso de reta de carga, como ilustra a figura 20.



a) Circuito com diodo zener.



b) Reta de carga.

Figura 20 – Reta de carga e ponto quiescente (de operação) do diodo zener.

#### 4.2 - Diodo emissor de luz (LED)

O *diodo emissor de luz (LED)* é um diodo que quando polarizado diretamente emite luz visível (amarela, verde, vermelha, laranja ou azul) ou luz infravermelha.

Ao contrário dos diodos comuns não é feito de silício, que é um material opaco, e sim, de elementos como gálio, arsênio e fósforo. É amplamente usada em equipamentos devido a sua longa vida, baixa tensão de acionamento e boa resposta em circuitos de chaveamento.

A polarização do LED é similar ao um diodo comum, ou seja, acoplado em série com um resistor limitador de corrente.

Para a maioria dos LED's disponíveis no mercado, a queda de tensão típica é de 1,5 a 2,5V para correntes entre 10 e 50mA.

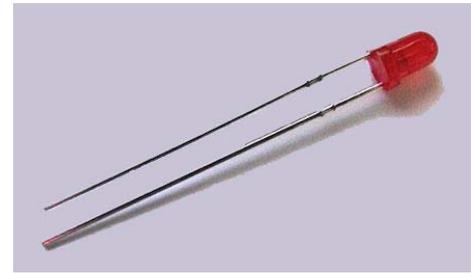


Figura 21 - Diodo Emissor de Luz (LED)

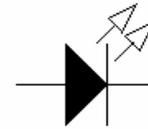


Figura 22 – Símbolo do LED

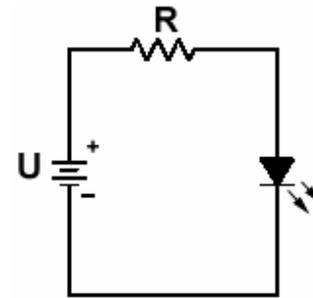


Figura 23 – Circuito com LED

#### 4.3 - Fotodiodo



Figura 24 - Foto Diodo.

É um diodo semicondutor em que a junção está exposta à luz. A energia luminosa desloca elétrons para a banda de condução, reduzindo a barreira de potencial pelo aumento do número de elétrons, que podem circular se aplicada polarização reversa. Quando a junção é inversamente polarizada, na ausência de luz incidente na mesma, a corrente é praticamente nula. O número de portadores dessa junção, e com ele a corrente elétrica, aumenta com o aumento da intensidade luminosa no cristal.

O *fotodiodo* é usado como sensor em controle remoto, em sistemas de fibra óptica, leitoras de código de barras, scanner (digitalizador de imagens, para computador), canetas ópticas (que permitem escrever na tela do computador), toca-discos CD, fotômetros e como sensor indireto de posição e velocidade.

**5.0 – CIRCUITOS RETIFICADORES**

Os circuitos retificadores são utilizados em fontes que convertem sinais AC em sinais DC.

A forma de onda básica da tensão fornecida na rede elétrica é dada na figura 25.

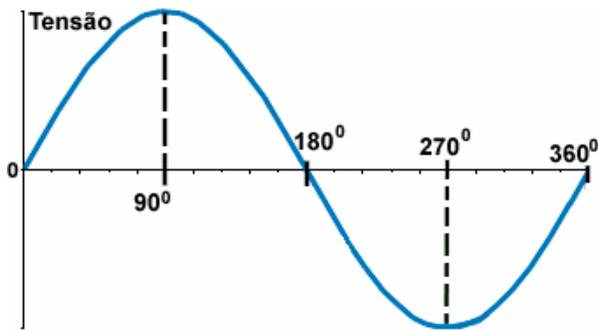


Figura 25 – Forma de onda da rede.

**5.1 – Retificadores de Meia Onda**

O *retificador de meia onda* converte uma tensão fornecida por uma fonte AC em tensão contínua pulsante. O circuito é mostrado na figura 26.

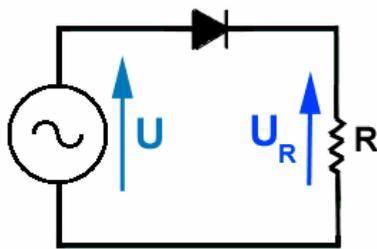


Figura 26 – Circuito retificador de meia onda.

A forma de onda da tensão no resistor R é dada na figura 27.

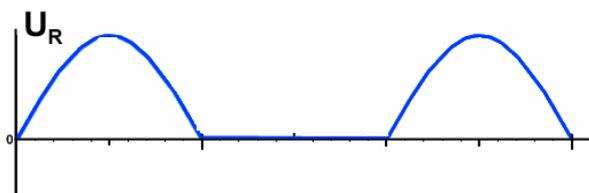


Figura 27 – Forma de onda no resistor R do circuito retificador de meia onda

A partir da forma de onda fica mais simples entender o funcionamento do circuito. Quando a onda está em seu semiciclo positivo, ela polariza o diodo diretamente, conduzindo uma corrente pelo resistor R. Quando a onda passa para o seu semiciclo negativo, o diodo se polariza reversamente, bloqueando a corrente elétrica e dando origem à forma de onda característica da tensão no resistor.

O valor médio da tensão no circuito retificador de meia onda é dado por:

$$V_m = 0,318 \times U$$

**5.2 – Retificadores de Onda Completa**

O *retificador de onda completa* é um circuito que permite utilizar os dois ciclos da onda. A sua configuração, também chamada de ponte retificadora monofásica, é dada na figura 28.

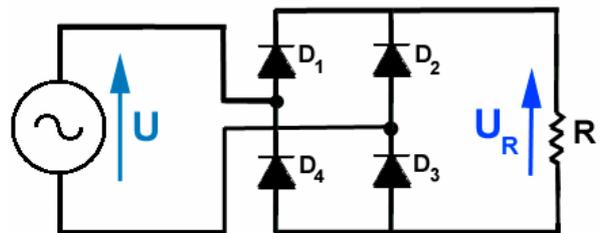
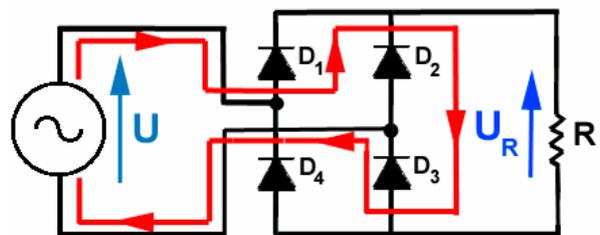
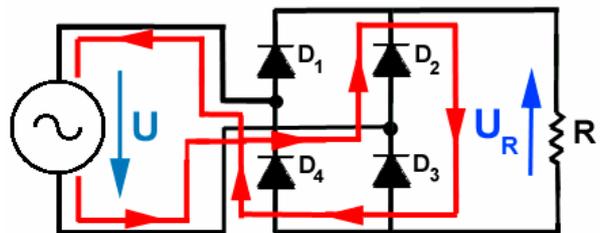


Figura 28 – Circuito retificador de onda completa.

A tensão aplicada no diodo é proveniente da corrente que passa pelos diodos 1 e 3, no semiciclo positivo e dos diodos 2 e 4 no semiciclo negativo.



a) Semiciclo positivo.



b) Semiciclo negativo.

Figura 29 – Conduções nos semiciclos.

Note que em cada semiciclo os diodos formam um caminho para corrente de tal forma que ela sempre passa pelo resistor da mesma forma. Assim, a forma de onda no resistor é dada pela figura 30.

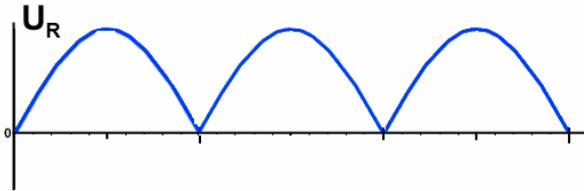


Figura 30 – Forma de onda no resistor ligado ao retificador de onda completa.

**5.3 – Ponte Trifásica**

A *ponte trifásica* permite a retificação de fontes AC trifásicas empregando-se um diodo para cada fase, como ilustra a figura 31.

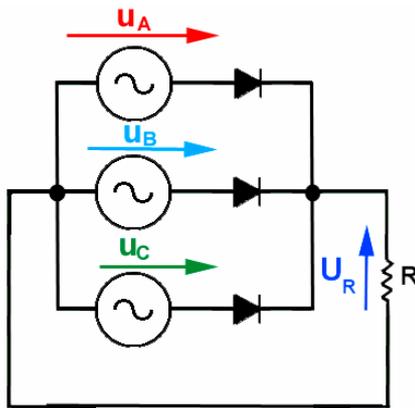


Figura 31 – Ponte trifásica.

As tensões trifásicas, como se sabe, são defasadas de  $120^\circ$ , como ilustrado na figura 32.

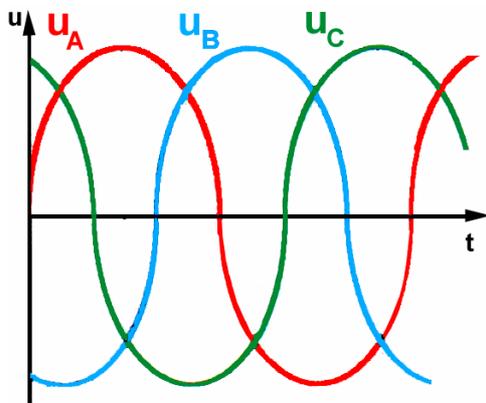


Figura 32 – Tensões trifásicas.

Desta forma, cada diodo conduzirá (um de cada vez), a partir do ponto de cruzamento das tensões (*cross-over*), como os indicados na figura 33.

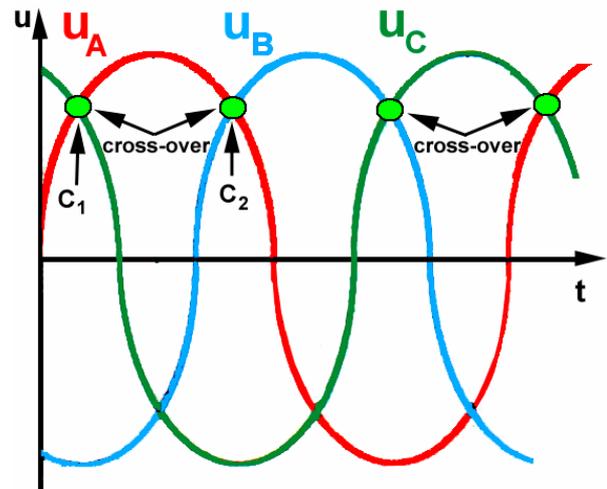


Figura 33 – Pontos de *cross-over*.

Entre os pontos  $C_1$  e  $C_2$  da figura 33, por exemplo, a tensão no diodo da fase A se torna maior que a dos demais. Desta forma, ele fica polarizado diretamente e conduz, enquanto os demais ficam polarizados reversamente e, portanto, bloqueados.

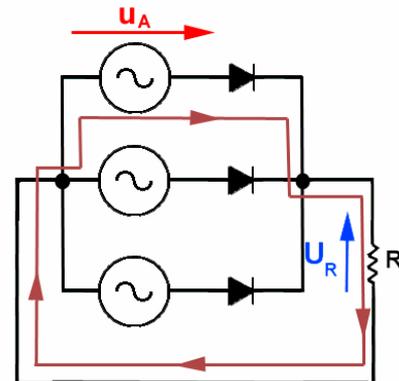


Figura 34 – Condução de diodo da fase A.

A cada *cross-over*, o processo se repete para cada uma das fases e cada diodo conduz  $120^\circ$ . A forma de onda resultante é a ilustrada na figura 35.

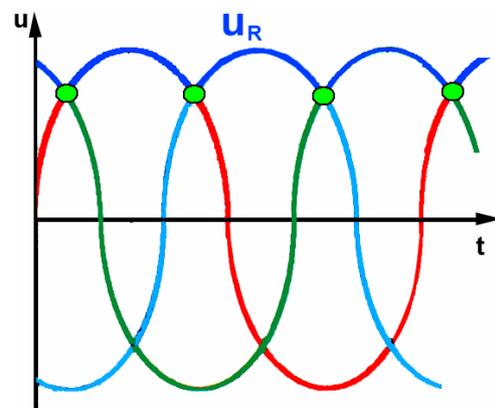


Figura 35 – Tensão retificada.

**5.4 – Ponte Graetz**

A *ponte Graetz* (ou de *seis pulsos*), também permite a retificação de fontes AC trifásicas, porém possui seis diodos, como ilustra a figura 36.

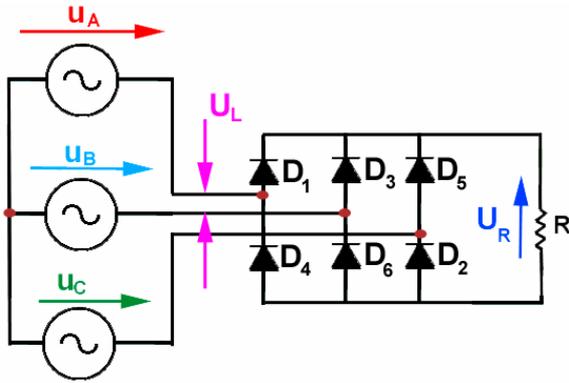


Figura 36 – Ponte Graetz (seis pulsos).

Nessa ponte, os diodos aos pares, em processo semelhante ao mostrado na figura 29 para o retificador de onda completa. Cada diodo conduz  $120^\circ$ , da mesma forma (e pelos mesmos motivos) que na ponte trifásica. Sendo assim, necessariamente, cada par de diodos conduzem  $60^\circ$  e, por isso, a ponte é de seis pulsos.

Isso permite que a ondulação da tensão seja menor que nas demais pontes.

A numeração diodos na figura 36 indica a seqüência de entrada em condução dos mesmos.

A figura 37 ilustra a forma de onda retificada pela ponte Graetz. Nela, estão indicados os pares de diodos que conduzem conforme a tensão de alimentação (entre fases) os polarizam direta ou reversamente ao longo do tempo.

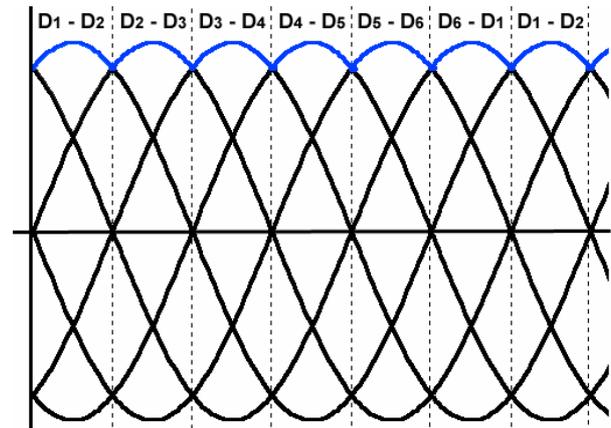


Figura 37 – Tensão retificada.

## **CAPÍTULO 6: TRANSISTORES BIPOLARES**

### **RESUMO**

Este capítulo aborda o estudo das características e aplicações dos transistores bipolares.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Os *transistores* surgiram pela necessidade de amplificar sinais eletrônicos, tais como aqueles emitidos pelo corpo humano, os quais eram impossíveis de serem tratados com os equipamentos convencionais.

Eles foram inventados em 1947 e são considerados uma das maiores revoluções tecnológicas do século 20, devido principalmente a enorme redução de dimensões frente às válvulas, que até então operavam as mesmas funções.

Desenvolvido a partir da tecnologia utilizada no diodo de junção, ele veio como uma alternativa para as válvulas operando como amplificador, detector, oscilador, comutador, etc. O transistor foi responsável pela explosão do crescimento da eletrônica no mundo sendo largamente utilizado nos dias de hoje.

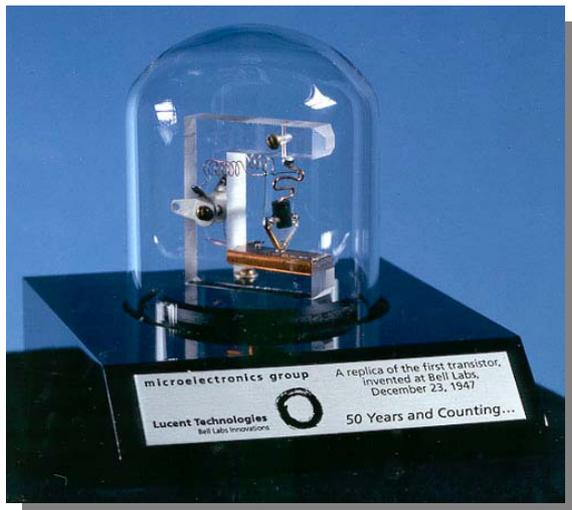


Figura 1 – Réplica do 1º transistor.

O foco deste capítulo será analisar os *transistores bipolares*. Eles se assemelham muito aos diodos estudados anteriormente, diferenciando-se em relação número de junções pn. Enquanto os diodos possuem uma junção, os transistores possuem duas.

### **2.0 – CONSIDERAÇÕES GERAIS**

#### **2.1 – Simbologia**

As figuras 2a e 2b trazem a representação esquemática dos transistores NPN e PNP.



Figura 2 – Simbologia dos transistores bipolares.

A diferenciação é feita através do sentido da seta, que representa a direção do fluxo convencional da corrente.



Figura 3 – Exemplos de transistores bipolares.

#### **2.2 – Funcionamento**

O transistor bipolar possui duas configurações básicas de dopagem, como citado, ou seja, pnp e npn. No primeiro caso, têm-se dois cristais do tipo p e um do tipo n e, no segundo, dois do tipo n e um do tipo p.

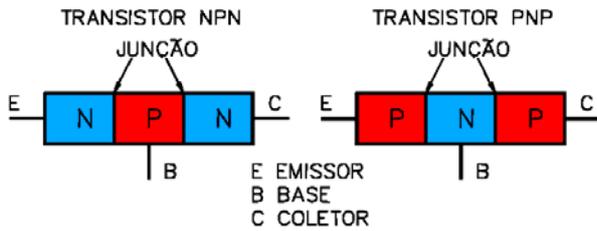


Figura 4 – Transistor PNP e NPN

Como se observa na figura 4, cada um dos três cristais que compõe o transistor bipolar recebe um nome específico.

O cristal do centro recebe o nome de base, pois é comum aos outros dois cristais, é levemente dopado e muito fino. Um cristal da extremidade recebe o nome de emissor por emitir portadores de carga, é fortemente dopado e, finalmente, o último cristal tem o nome de coletor por receber os portadores de carga, tem uma dopagem média.

O transistor pode ser interpretado como sendo dois diodos, um entre coletor e base, e outro entre emissor e base.

Nos próximos tópicos, analisa-se o funcionamento do transistor npn. A análise do transistor pnp é similar, bastando levar em conta que os portadores majoritários do emissor são lacunas ao invés dos elétrons livres. Na prática, isto significa tensões e correntes invertidas se comparadas com o npn.

### 2.3 – Transistor Não Polarizado



Figura 5 – Camadas de depleção em transistor NPN.

A difusão dos elétrons livres através da junção produz duas camadas de depleção. Cada camada tem, aproximadamente, uma barreira potencial de 0,7 V (silício) em 25 °C. Com os diferentes níveis de dopagem de cada cristal, as camadas de depleção têm larguras diferentes. Tanto maior a largura quanto menor a dopagem. Ela penetra pouco na região do emissor, bastante na base e médio na região do coletor.

### 3.0 – POLARIZAÇÃO DO TRANSISTOR NPN

Existem duas maneiras diferentes de polarizarmos o transistor: direta e inversamente.

### 3.1 – Polarização Direta

Observa-se na figura 6 que a bateria B1 tem seu pólo negativo no emissor (N) e o positivo na base (P), caracterizando uma polarização direta. O mesmo pode ser dito de B2, mas agora em relação ao coletor.

Com essa configuração temos os elétrons livres entrando pelo emissor e coletor, passando pela base e, finalmente, retornando às baterias. O fluxo de corrente elétrica é alto nas duas junções.

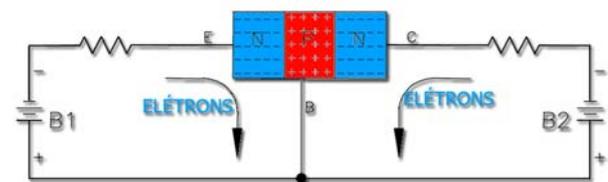


Figura 6 – Polarização direta do transistor NPN

### 3.2 – Polarização Reversa

Nesta situação, tem-se o inverso da anterior. A corrente vai partir da base para emissor e coletor devido à inversão das fontes B1 e B2. A corrente de circulação é baixa e recebe o nome de corrente de fuga.

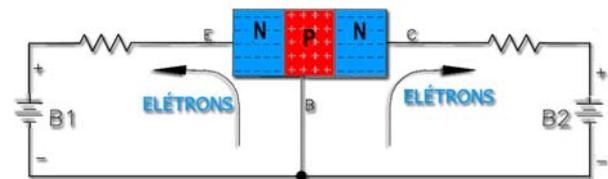


Figura 7 – Polarização inversa do transistor NPN.

### 3.3 – Polarização Direta Reversa

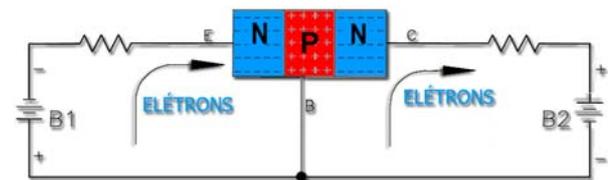


Figura 8 – Polarização direta reversa.

Na figura 8 tem-se um misto das situações anteriores. A junção coletor - base está polarizada reversamente e a junção emissor - base diretamente.

Nesta situação temos uma alta corrente tanto no emissor quanto no coletor.

No instante em que a polarização direta é aplicada ao diodo emissor, os elétrons do emissor ainda não penetraram na região da base. Se a tensão entre base e emissor ( $V_{BE}$ ) for maior que 0,7 V, tem-se o fluxo de elétrons do emissor para a região da base. Estes elétrons na base podem retornar ao pólo negativo da bateria B1, ou atravessar a junção do coletor

passando à região do coletor. Os elétrons que a partir da base retornam a bateria B1 são chamados de corrente de recombinação. Como a base é pouco dopada, esta corrente torna-se muito pequena.

A grande maioria dos elétrons na base passam para o coletor. Isso se dá principalmente devido à fina espessura das paredes da base.

Uma vez polarizada reversamente, a *junção coletor – base* dificulta a passagem das lacunas (portadores majoritários) e permite a passagem dos elétrons livres. Esses atravessam a camada de depleção e vão em direção ao coletor, sendo atraídos pelo pólo positivo da bateria. Ou seja, uma pequena parcela da corrente injetada no emissor retorna pela base por recombinação, o restante flui para o coletor e vai até o pólo positivo da bateria B2.

Geralmente, a *tensão entre coletor e base* é bem superior à *tensão entre emissor e base*.

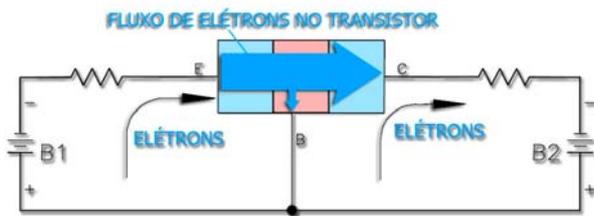


Figura 9 – Polarização direta reversa - correntes.

**4.0 – CORRENTES NO TRANSISTOR**

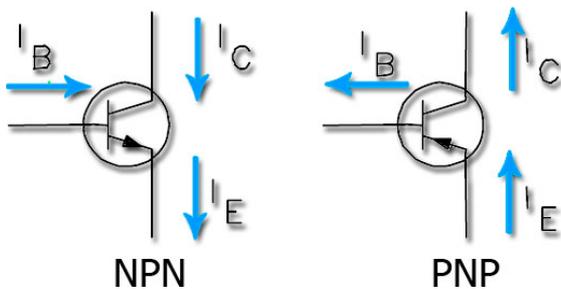


Figura 10 – Correntes do transistor.

De acordo com a lei de Kirchoff, a soma das correntes que entram em um nó é igual à soma das correntes que saem deste, ou seja:

$$I_E = I_C + I_B$$

A corrente contínua de base se relaciona com a corrente contínua de coletor através de um parâmetro chamado ganho de corrente ( $\beta_{cc}$ ).

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

Cerca de 5% dos elétrons livres não atinge o coletor, fazendo com que possamos considerar a corrente de emissor praticamente igual à corrente de coletor. Para isso temos outro parâmetro que relaciona essas duas correntes, chama-se  $\alpha_{cc}$ .

$$\alpha_{cc} = \frac{I_C}{I_E}$$

Como ambos os parâmetros são relações das correntes do transistor, podemos levantar uma expressão os relaciona:

$$\alpha_{cc} = \beta / (\beta + 1)$$

**5.0 – MONTAGEM BÁSICA COM TRANSISTOR**

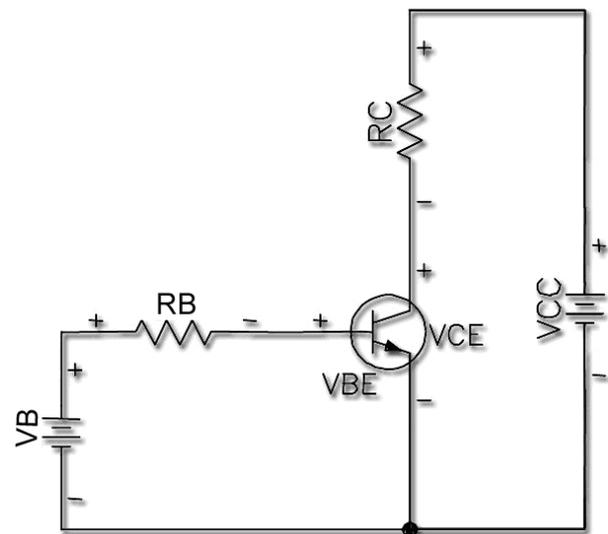


Figura 11 – Circuito básico (Emissor comum).

Na figura 11, tem-se uma montagem básica de circuito com transistor, conhecida como emissor comum. Chama-se assim porque o pólo negativo das fontes está ligado no emissor, ou seja, o emissor é comum para base e coletor. Essa análise pode se estender para os outros dois casos que serão tratados futuramente, coletor comum e base comum.

O circuito é constituído por duas malhas. A malha da esquerda que contém a tensão  $V_{BE}$  e malha da direita com a tensão  $V_{CE}$ .

Equacionando as malhas tem-se:

$$V_S = R_S I_B + V_{BE}$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

5.1 – Curva  $I_B$  versus  $V_{BE}$

Existe uma relação entre  $I_B$  e  $V_{BE}$ , ou seja, para cada  $I_B$  existe uma tensão  $V_{BE}$  correspondente.

Naturalmente, esta curva semelhante à curva do diodo.

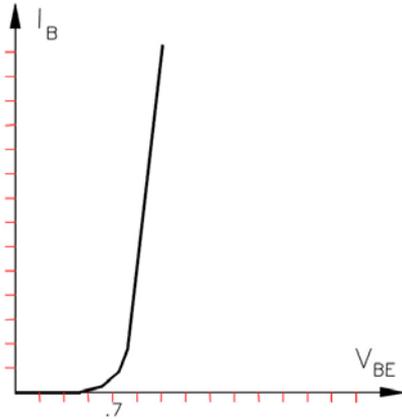


Figura 12 – Curva de  $I_B - V_{BE}$ .

5.2. - Curva  $I_C$  Versus  $V_{CE}$

A partir de  $V_{CC}$  e  $V_S$  é possível obter diversos valores de  $I_C$  e  $V_{CE}$ . A figura 13 mostra esta relação supondo um  $I_B$  fixo.

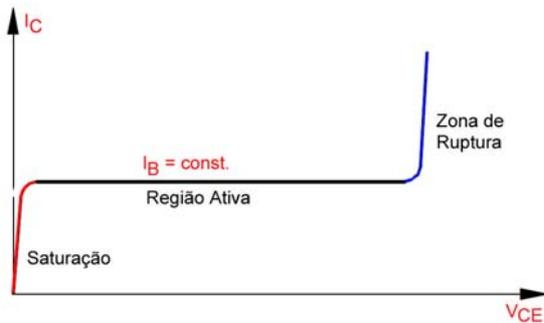


Figura 13 – Curva característica.

A parte da curva em vermelho é chamada de região de saturação. Na região de saturação o diodo coletor está polarizado diretamente. Por isso, perde-se o funcionamento convencional do transistor, passa a simular uma pequena resistência ôhmica entre o coletor e emissor. Com isso fica impossível manter a relação

$$I_C = \beta_{cc} I_B.$$

A parte em preto é chamada de região ativa. Nesta região uma variação do  $V_{CE}$  não influencia no valor de  $I_C$ , ou seja,  $I_C$  mantém-se constante e igual à  $I_B \beta_{CC}$ .

Para sair da região de saturação e entrar na região ativa, é necessária uma polarização reversa do diodo coletor. Como  $V_{BE}$  na região ativa é em torno de 0,7 V, isto requer um  $V_{CE}$  maior que 1 V.

A região em azul é chamada de zona de ruptura. Esta região deve ser evitada uma vez que operando nessa região o transistor poderá se danificar.

A região de corte é um caso especial na curva  $I_C \times V_{CE}$ . É quando  $I_B = 0$  (equivalente ao terminal da base aberto). A corrente de coletor com terminal da base aberto é designada por  $I_{CEO}$  (corrente de coletor para emissor com base aberta). Esta corrente é muito pequena, quase zero. Em geral se considera: Se  $I_B = 0$ , então  $I_C = 0$ .

O gráfico fornecido pelo fabricante leva em consideração diversos  $I_B$ 's. Um exemplo está na figura 14.

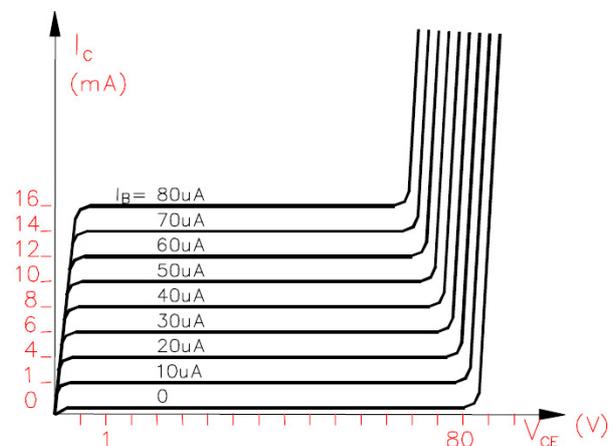


Figura 14 – Curvas do fabricante.

Notar no gráfico que para um dado valor de  $V_{CE}$  existem diversas possibilidades de valores para  $I_C$ . Isto ocorre, porque é necessário ter o valor fixo de  $I_B$ . Então para cada  $I_B$  há uma curva relacionando  $I_C$  e  $V_{CE}$ .

No gráfico de exemplo, a tensão de ruptura está em torno de 80 V e na região ativa para um  $I_B = 40 \mu A$ ,

tem-se que o  $\beta_{cc} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{8 \times 10^{-3}}{40 \times 10^{-6}} = 200$ .

Mesmo para outros valores de  $I_B$ , o  $\beta_{CC}$  se mantém constante na região ativa. Na prática, isso não é verdade, pois ele varia com a temperatura ambiente e mesmo com  $I_C$ .

6.0 - MODELO DE EBERS-MOLL

Uma estratégia normalmente utilizada para a análise de circuitos transistorizados é lançar mão de um circuito equivalente que utiliza componentes mis simples.

O modelo de Ebers-Moll é um circuito equivalente do transistor levando em consideração que ele esteja trabalhando na região ativa, ou seja: o diodo emissor deve estar polarizado diretamente; o diodo coletor deve estar polarizado reversamente e a tensão

do diodo coletor deve ser menor do que a tensão de ruptura. (Vide figura 15).

O modelo faz algumas simplificações, ou seja:

- a)  $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ ;
- b)  $I_C = I_E$ , isto implica em:  

$$I_B = I_E / \beta_{CC};$$
- c) Despreza a diferença de potencial produzida pela corrente de base ao atravessar a resistência de espalhamento da base.

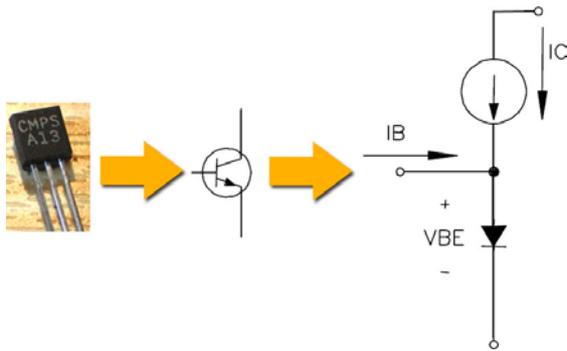


Figura 15 – Modelo de Ebers-Moll.

**7.0 - POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES**

Com circuitos transistorizados podem-se obter inúmeras funções. No entanto, é necessário que os transistores sejam ajustados em um ponto de funcionamento correto. Tal ponto chama-se *ponto de operação* ou *quiescente* de um transistor.

Para determinarmos o ponto de operação de um transistor devemos polarizá-lo. Um dos circuitos utilizados para polarização é mostrado na figura 16.

Devemos agora determinar os valores de correntes e tensões nos diversos componentes. Usamos então a reta de carga.

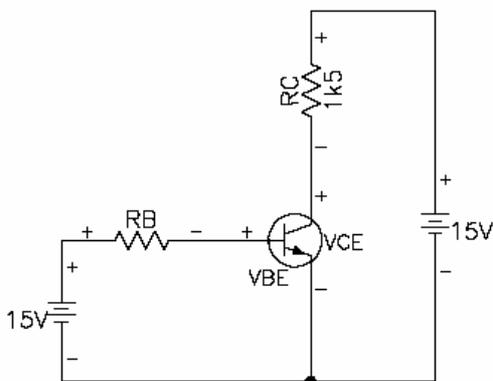


Figura 16 – Circuito de polarização.

O traçado da reta de carga é obtido a partir das curvas do transistor. Os gráficos de tais curvas relacionam a tensão  $V_{CE}$  (*tensão coletor-emissor*) e a corrente  $I_C$  (corrente de coletor). Note que cada curva corresponde a uma corrente  $I_B$  (corrente de base) diferente. Logo, devemos calcular a corrente  $I_B$  necessária para o nosso circuito. O cálculo da corrente da base é feito fechando-se a malha que relaciona a fonte de alimentação da base, a resistência da base (consideraremos  $R_B = 500 \Omega$ ) e a tensão  $V_{BE}$  (*tensão base emissor*).

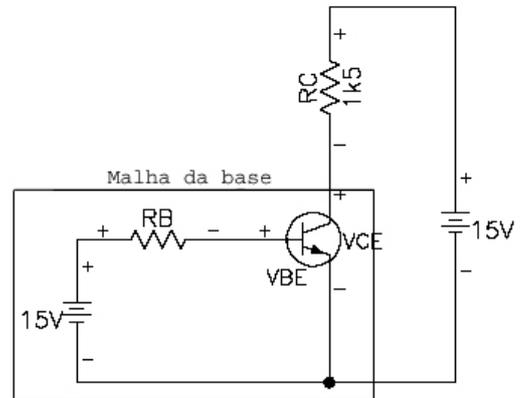


Figura 17 – Malha da base.

Assim, pela lei de Ohm temos:

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{15 - 0,7}{500} = 29 \mu A$$

A tensão  $V_{BE}$  é considerada como sendo 0,7 V. Deve-se, agora, determinar os extremos da reta de carga, uma vez que dois pontos definem uma reta. Assim, usando novamente a lei de Ohm e considerando primeiramente  $V_{CE} = 0$ , tem-se:

$$I_C = \frac{(V_{cc} - V_{CE})}{R_C}$$

$$I_C = \frac{(15 - 0)}{1500} = 10 \text{ mA}$$

Da mesma forma, calcula-se  $V_{CE}$ , fazendo-se agora  $I_C = 0$ .

$$I_C = \frac{(V_{cc} - V_{CE})}{R_C}$$

$$0 = \frac{(15 - V_{CE})}{1500}$$

Desta equação, vemos que  $V_{CE}$  com  $I_C = 0$  é igual à tensão da bateria  $V_{cc}$  portanto:

$$V_{CE} = V_{cc}$$

$$V_{CE} = 15 \text{ V}$$

Com todos os cálculos realizados traçamos a reta de carga e achamos o ponto de operação, que se encontra na interseção da reta de carga com a respectiva curva referente ao valor  $I_B$  calculado.

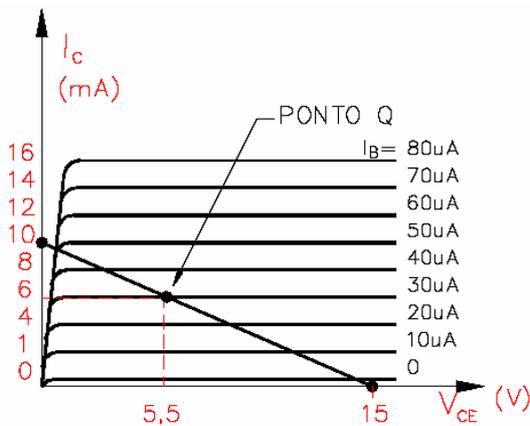


Figura 18 – Reta de carga e ponto de operação Q.

O ponto de operação encontrado foi 5,5 V em  $V_{CE}$  e 6 mA em  $I_C$ . Para o deslocamento do ponto deve-se alterar o valor de  $I_B$ . Isto é feito alterando o valor da resistência  $R_B$ .

Assim, o ponto de operação do transistor pode se deslocar sobre a reta de carga. O ponto da reta que intercepta  $I_B = 0$  é conhecido como ponto de operação em corte, ou somente corte. Da mesma forma, o ponto que corta o valor de  $I_B$  mais elevado é conhecido como *ponto de operação de saturação*, ou apenas *saturação*.

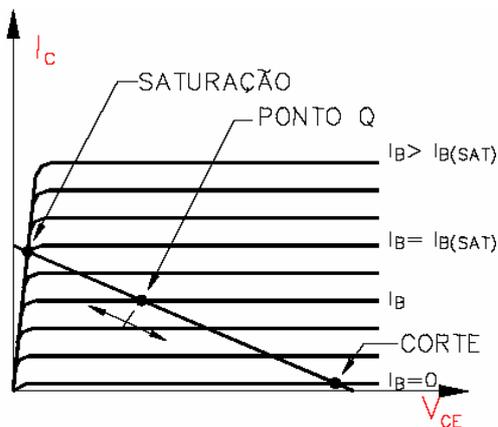


Figura 19 – Pontos de saturação e corte.

**8.0 - TRANSISTOR OPERANDO COMO CHAVE**

O transistor consiste em um componente eletrônico que através da sua base conseguimos controlar a corrente que passa entre o coletor e o emissor. No entanto, podemos utilizar o transistor como uma chave eletrônica na qual se pode acionar ou não, causando a circulação ou a não circulação de corrente.

Neste tipo de operação, o ponto quiescente do transistor esta na região de saturação, ou na região de corte. Assim, tem-se uma chave que pode ser controlada eletronicamente.

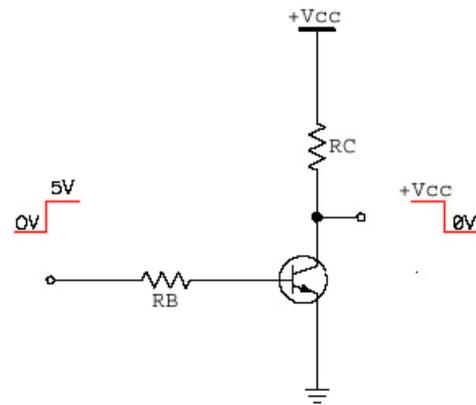


Figura 20 – Transistor operando como chave fechada.

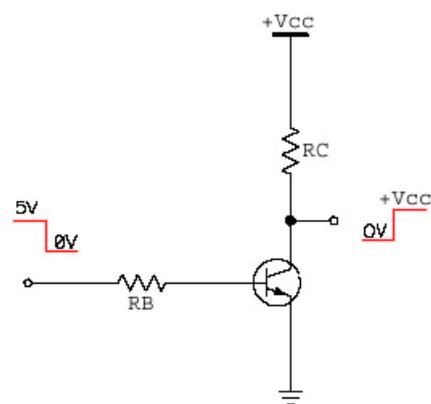


Figura 21 – Transistor operando como chave aberta.

As figuras 20 e 21, apresentam a configuração básica do transistor operando como chave. A corrente na base controla o funcionamento do transistor. Quando há tensão na base, há a circulação de uma corrente que polariza o transistor e o leva a saturação. A tensão  $V_{CE}$  torna-se zero. O comportamento do componente é de uma chave fechada. Quando não há tensão na base, não há circulação de corrente e o transistor é levado ao corte.  $V_{CE}$  é igual a  $V_{cc}$ . O componente opera como uma chave aberta.

**9.0 - TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR**

O transistor pode usado também como amplificador de sinais. Mesmo com o avanço das técnicas de construção de CI's e o advento dos amplificadores operacionais, os amplificadores com transistores ainda são utilizados.

O circuito mais usado em amplificadores é chamado de polarização por divisor de tensão.

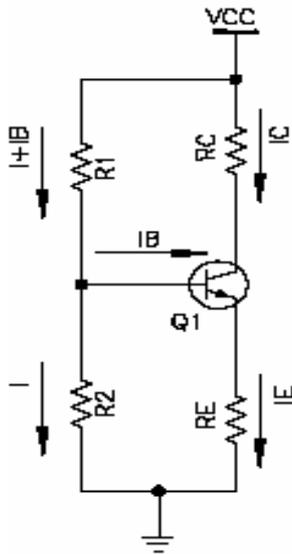


Figura 22 – Polarização por divisor de tensão.

Esta configuração consiste em fixar uma tensão na base a partir dos resistores divisores de tensão  $R_1$  e  $R_2$ . O valor de  $I$  deve ser bem maior que  $I_B$ , de forma que  $I_B$  não influencie na tensão sob  $R_2$ . Como regra prática, considera-se a corrente  $I$ , 20 vezes maior que  $I_B$ .

A tensão  $V_{r2}$  é dada pela divisão de tensão entre  $R_1$  e  $R_2$ , portanto:

$$V_{r2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{cc}$$

A corrente no coletor é dada por:

$$I_c = \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_c - R_e}$$

**10.0 - AMPLIFICADORES DE SINAL DE EMISSOR COMUM**

Após a análise da polarização por divisor de tensão pode-se então introduzir o conceito do amplificador de sinal de emissor comum.

O circuito consiste em amplificar um sinal alternado  $V_S$  aplicado a sua base através do capacitor de acoplamento  $C_1$ . Uma vez aplicado o sinal o circuito vai amplificar a o mesmo e aplicá-lo na carga RL que se encontra na saída do amplificador.

Ao injetar um pequeno sinal CA à base do transistor, ele se somará às tensões CC de polarização e induzirá flutuações na corrente de coletor de mesma forma e frequência. Ele será chamado de amplificador linear se não mudar a forma do sinal na saída. Desde que a amplitude do sinal de entrada seja pequena, o transistor usará somente uma pequena parte da reta de carga e a operação será linear. Por outro lado se o sinal de entrada for muito grande, as flutuações ao longo da reta de carga levarão o transistor à saturação e ao corte.



Figura 21 – Operação linear do amplificador.

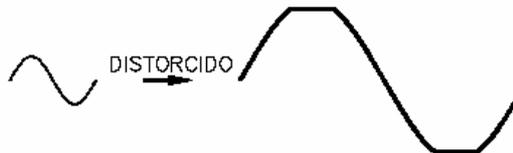


Figura 22 – Operação distorcida do amplificador.

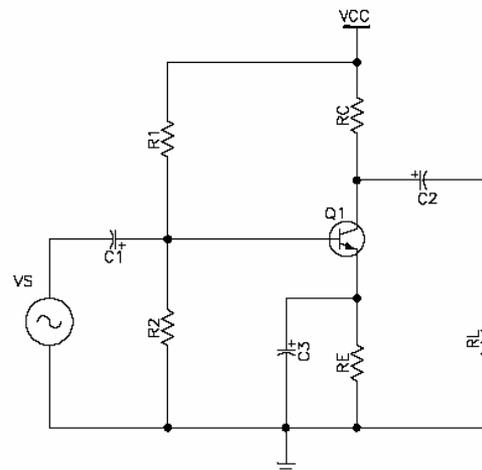


Figura 23 – Amplificador de Emissor Comum.

## **CAPÍTULO 7: AMPLIFICADORES OPERACIONAIS**

### **RESUMO**

Neste capítulo abordam-se os amplificadores operacionais, com objetivo de mostrar o que são e qual a sua utilização.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

*Amplificadores operacionais* são *circuitos integrados (CI's)* muito utilizados em instrumentação analógica, permitindo a execução, com elevados níveis de precisão, de uma série de operações matemáticas, tais como adição, multiplicação, comparação, etc.

Devido a este fato, inicialmente foram utilizados em computadores analógicos.

Neste capítulo, os amplificadores operacionais serão tratados como um bloco, uma vez que o objetivo deste texto está voltado para as características do componente e suas aplicações.

### **2.0 - AMPLIFICADOR OPERACIONAL**

Existem diversos tipos de amplificadores operacionais de vários fabricantes e tipos de encapsulamentos. A figura 1 mostra um exemplo típico, o popular 741.

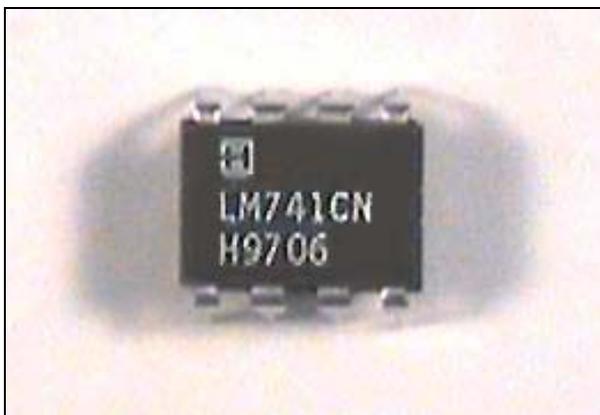


Figura 1 - Amplificador Operacional 741.

Os códigos de identificação dos operacionais aparecem na seguinte forma: **xy (ABC)D EF**.

Onde:

**xy** - Prefixo que identifica o fabricante.

Por exemplo:

AD - Analog Devices;

CA - RCA;

LM - National Semiconductor Corporation;

MR - Motorola;

ME/SE - Signetics;

TL - Texas Instruments;

UA - Fairchild.

**(ABC)** - Tipo de circuito, 3 a 7 números e/ou letras.

**D** - Gama de temperaturas:

**C** - Comercial - 0 a 70° C;

**I** - Industrial - 25 a 85° C;

**M** - Militar - 55 a 125° C.

**EF** - Tipo de encapsulamento - 1 a 2 letras

**D** - Plástico (circuito impresso);

**J** - Cerâmico;

**N,P** - Plástico.

No caso do exemplo da figura 1, tem-se:

**LM** - fabricante National Semiconductor Corporation;

**741** - Tipo de operacional;

**C** - Comercial - 0 a 70° C;

**N** - encapsulamento plástico.

O diagrama interno para este CI pode ser visto na figura 2. A alimentação é feita pelos pinos 4 e 7, sendo o pino 7 ligado ao terminal de tensão positiva da fonte de alimentação (+Vcc, em geral + 15 V) e, o pino 4, ao terminal de tensão negativa da fonte de alimentação (-Vcc, em geral - 15 V). Existem duas entradas de sinal e uma saída. O pino 2 é a entrada inversora, o pino 3 a entrada não inversora e a saída está no pino 6.

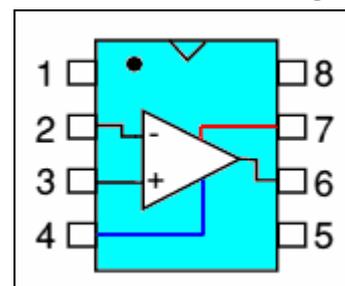


Figura 2 - Diagrama interno do 741.

Conforme já foi mencionado, existem vários tipos de amplificadores operacionais e, portanto, deste ponto em diante, o amplificador operacional (algumas vezes abreviados para "opamp" ou "ampop") será representado apenas pelo seu símbolo, o qual é apresentado na figura 3.

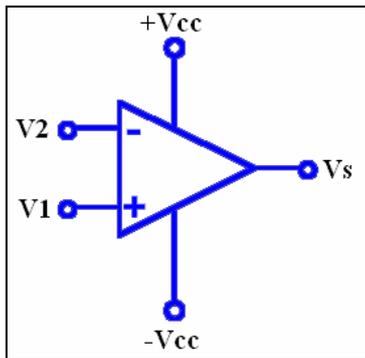


Figura 3 - Símbolo do amplificador operacional.

### 3.0 CARACTERÍSTICAS DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Em um amplificador operacional a razão entre o sinal da saída e a diferença dos sinais em suas entradas é conhecida como ganho. Este é expresso pela variável "A" na equação 1.

$$V_s = A.(V_1 - V_2) \quad (1)$$

Desta forma a tensão na saída de um operacional será a diferença entre as tensões aplicadas em suas entradas multiplicadas pelo ganho A.

Em um amplificador ideal o ganho A (em malha aberta, ou seja, sem realimentação) é infinito, porém em circuitos reais considera-se o ganho como sendo da ordem de 100.000. Pode-se observar pela equação 1 que o amplificador é linear. Mas na prática existe um limite máximo de tensão para qual o circuito ainda mantém a sua linearidade, este valor é conhecido como *tensão de saturação*. Sendo que existe uma *tensão de saturação positiva* e uma *negativa*. Em geral:

$$V_{sat+} = +V - I \quad (2)$$

e

$$V_{sat-} = -V + 2 \quad (3)$$

Podendo, ainda, ser simétrico (em relação a 0 V):

$$V_{sat\pm} = \pm |V - 2| \quad (4)$$

Um *amplificador operacional ideal* teria as seguintes características:

- Ganho em malha aberta infinito;
- Impedância de entrada infinita;
- Impedância de saída zero;
- Resposta de frequência de zero a infinito - isto quer dizer que a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada não depende da frequência;
- Tensão de saída nula para sinais de igual valor nas entradas.

Nos casos práticos, *isto não ocorre*. O que se encontra em geral, é:

- Ganho em malha aberta - em torno de 100.000 (variando de acordo com o tipo de amplificador operacional);
- Impedância de entrada - maior do que  $2 \text{ M}\Omega$ ;
- Impedância de saída - na faixa de  $50\text{-}75 \Omega$ ;
- Resposta de frequência - na prática a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada decresce a partir de uma determinada frequência que varia de acordo com o operacional escolhido;
- Nos circuitos práticos o valor da saída com as entradas iguais apresenta um pequeno valor.

Um amplificador operacional ideal tem sempre uma saída nula quando as entradas são iguais. Nos casos práticos, ocorre sempre uma pequena saída para as entradas iguais, esta condição é chamada de modo comum. Já a condição usual quando as tensões de entrada são diferentes é chamada de modo diferencial. O parâmetro que expressa, em decibéis, a relação dos ganhos em ambas condições é chamado de relação de rejeição em modo comum, mais conhecido pela sigla inglesa *CMRR* (*common mode rejection ratio*). O CMRR é igual a  $20.\log$  (ganho modo diferencial / ganho modo comum). Para um circuito ideal o CMRR seria infinito.

As características exibidas anteriormente fazem do amplificador operacional um circuito de fácil aplicação, sua alta impedância de entrada faz com que ele não drene corrente do circuito ligado a sua entrada, muitas vezes um sensor. Sua baixa impedância de saída permite com que a tensão amplificada seja quase totalmente entregue a carga, sem que ele mesmo represente também uma carga. Porém, deve-se salientar que o amplificador operacional é amplificador de sinal, não devendo ser utilizado como amplificador de potência.

O circuito amplificador com ganho infinito, ou na prática, ganho extremamente elevado, tende a ser instável. Desta forma qualquer ruído (mesmo os gerados pelos componentes internos do operacional)

poderia levar a tensão de saída do operacional para saturação. Desse modo, o amplificador operacional geralmente é montado com realimentação, também denominada, Malha Fechada. O que permite estabilizar e ainda determinar o ganho do circuito amplificador.

#### 4.0 - CONFIGURAÇÕES TÍPICAS

##### 4.1 - Circuito Inversor

Esta é uma das mais comuns utilizações do amplificador operacional. Ela requer (além das fontes de alimentação) apenas dois resistores  $R_1$  e  $R_2$ . A figura 4 ilustra este tipo de ligação. O sinal de entrada é alimentado pelo resistor  $R_1$ , enquanto o resistor  $R_2$  fecha a malha ligando a saída à entrada inversora. Sendo que a entrada não inversora está aterrada.

Como o ganho do operacional é muito alto, pode se considerar que a corrente que passa por  $R_1$  é igual à corrente que passa por  $R_2$ , assim:

$$\frac{V_{ent} - V_2}{R_1} = \frac{V_2 - V_s}{R_2}$$

$$\frac{V_2 - V_s}{V_{ent} - V_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Como, assume-se que  $V_1$  e  $V_2$  possuem o mesmo potencial e  $V_1$  está aterrado, então  $V_2$  é igual a zero (o que é conhecido como terra virtual), logo:

$$-\frac{V_s}{V_{ent}} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{V_s}{V_{ent}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Assim tem-se:

$$V_s = -V_{ent} \cdot (R_2/R_1) \quad (5)$$

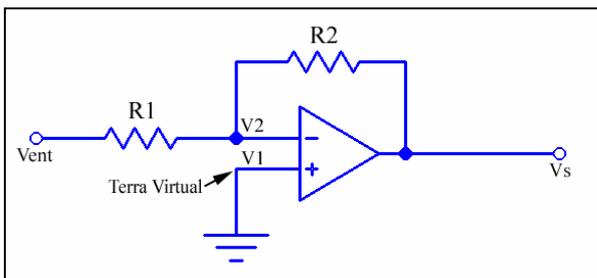


Figura 4 - Amplificador operacional como inversor.

Valor absoluto do ganho deste circuito é dado pela relação  $R_2/R_1$ , sendo que a tensão de saída pode ser calculada através da equação (5)

Exemplo:

A figura 5 mostra um circuito inversor onde  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  e  $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ . O sinal de tensão na entrada do circuito é fornecido por uma fonte de tensão alternada, amplitude da tensão é de  $5 \text{ V}_{rms}$  ( $rms = \text{valor médio quadrático}$ ) e a frequência é de  $100 \text{ Hz}$ . As fontes de alimentação do circuito são simétricas fornecendo  $+15$  e  $-15 \text{ Vcc}$ . Na saída do circuito foi colocada uma carga resistiva de  $1 \text{ k}\Omega$ .

Pela equação (5) pode-se concluir que a tensão na saída será o dobro da tensão na entrada, porém com o sinal invertido, conforme pode ser visto na figura 6.

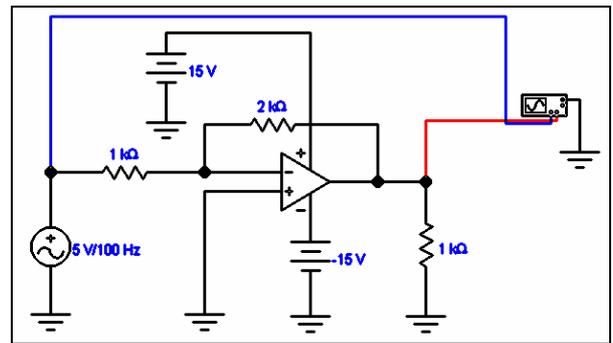


Figura 5 - Amplificador operacional como inversor.

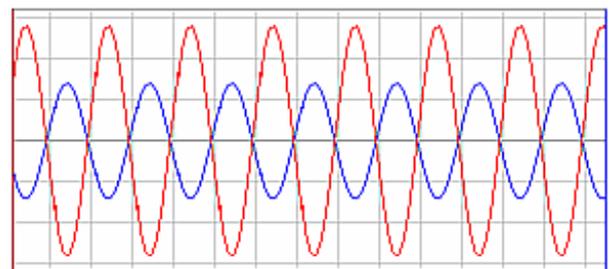


Figura 6 - Formas de onda para o amplificador operacional como inversor.

##### 4.2 - Circuito Não Inversor

Em algumas situações não é interessante que o sinal da tensão de saída seja invertido, como por exemplo, quando se quer monitorar o sinal de um sensor de temperatura. Para uma elevação na temperatura, espera-se uma elevação no sinal de tensão na saída do operacional. Para este ou outros tipo de circuitos onde não deseja uma inversão do sinal, pode se utilizar a configuração exibida na figura 7.

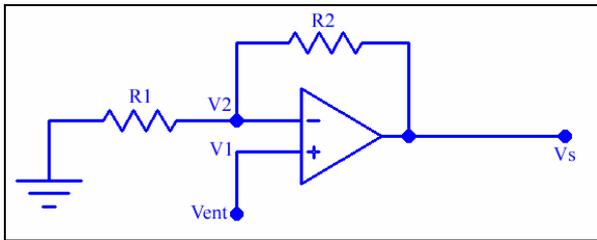


Figura 7 - Amplificador operacional circuito não inversor.

Como a corrente que passa por  $R_1$  é a mesma que passa por  $R_2$  e  $V_1$  tem o mesmo potencial que  $V_2$ , então:

$$\frac{0 - V_{ent}}{R_1} = \frac{V_s - V_{ent}}{R_2}$$

$$\frac{V_{ent}}{V_{ent} \cdot R_1} = \frac{V_s - V_{ent}}{V_{ent} \cdot R_2}$$

$$\frac{V_s}{V_{ent}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Assim, tem-se que:

$$V_s = V_{ent} \cdot (1 + R_2/R_1) \quad (6)$$

Pela equação 6 pode-se calcular o ganho para esta configuração.

Exemplo:

A figura 8 mostra um circuito não inversor onde  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  e  $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ . O sinal de tensão na entrada do circuito é fornecido por uma fonte de tensão alternada, amplitude da tensão é de 2 Vrms e a frequência é de 100 Hz. As fontes de alimentação do circuito são simétricas fornecendo +15 e -15 Vcc. Na saída do circuito foi colocada uma carga resistiva de  $1 \text{ k}\Omega$ .

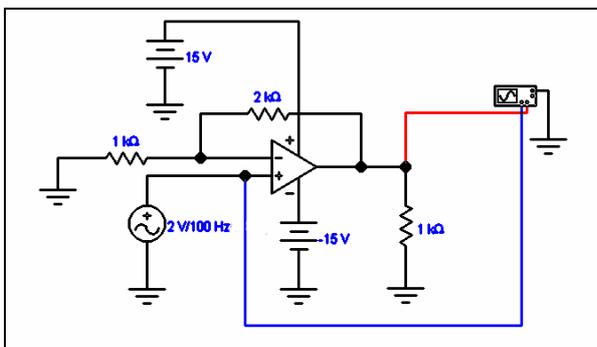


Figura 8 - Circuito com amplificador operacional não inversor.

Pode-se observar pela equação 6 que o ganho deste circuito para os mesmos valores de  $R_1$  e  $R_2$  utilizados no exemplo da figura 5 é maior do que para a configuração como inversor. A figura 9 mostra as formas de onda de entrada e saída para o circuito da figura 8.

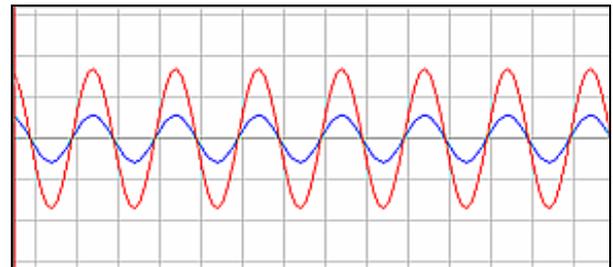


Figura 9 - Formas de onda para o amplificador operacional não inversor.

### 4.3 - Circuito Somador

O *circuito somador*, conforme o próprio nome diz, possui uma tensão na saída cujo valor é igual a soma das tensões em suas entradas multiplicadas por um ganho A, se o valor de A for 1, será exatamente a soma das entradas, porém com o sinal invertido, pois os sinais estão sendo somados através da entrada inversora.

Observando o circuito da figura 10, pode-se questionar se o mesmo não poderia ser feito sem a utilização de um operacional. No entanto, a soma apenas ocorre devido a impedância de entrada muito elevada do operacional, que praticamente não drena corrente das fontes de sinal de entrada. Caso não houvesse o operacional, o sinal resultante seria algo entre o valor de  $V_a$  e  $V_b$ , dependendo das resistências internas das respectivas fontes.

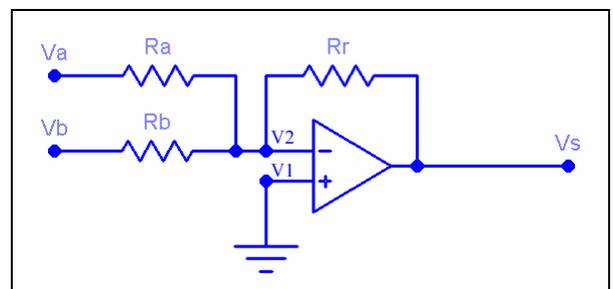


Figura 10 - Circuito somador inversor.

A corrente no resistor  $R_r$  (resistor de realimentação) é igual à soma das correntes que passam por  $R_a$  e  $R_b$ , assim:

$$V_a/R_a + V_b/R_b = (V_2 - V_s)/R_r$$

Como  $V_2$  e  $V_1$  tem o mesmo potencial (0 V):

$$-V_s/R_r = V_a/R_a + V_b/R_b$$

Para  $R_a = R_b = R_e$  (resistor de entrada):

$$V_s/R_r = - (V_a + V_b)/R_e$$

Tem-se que:

$$V_s = - R_r/R_e (V_a + V_b) \quad (7)$$

O ganho final do circuito somador inversor é dado por  $A = -R_r/R_e$ , assim a tensão na saída será  $A.(V_a + V_b)$ .

A configuração para o circuito somador não inversor pode ser vista na figura 11.

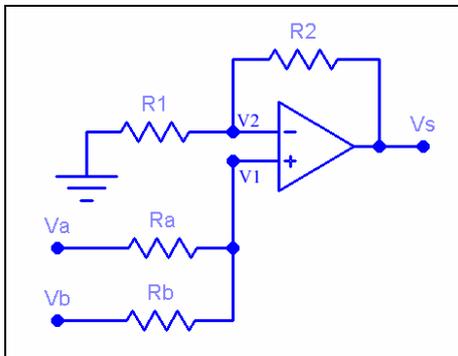


Figura 11 - Circuito somador não inversor.

Para o circuito acima o valor da tensão de saída é expresso por:

$$V_s = (R_2/R_1 + 1) \cdot [1/(R_a + R_b)] \cdot (R_a \cdot V_b + R_b \cdot V_a) \quad (8)$$

Para  $R_a = R_b = R_e$ :

$$V_s = (R_2/R_1 + 1) \cdot [(V_a + V_b)/2] \quad (9)$$

Pode-se ainda acrescentar um circuito inversor à saída do circuito somador inversor. Assim, se o circuito inversor possuir um ganho  $A = R_2/R_1 = 1$ , a tensão de saída final terá o mesmo valor da tensão de saída do circuito somador inversor, mas não terá o sinal invertido. A figura 12 ilustra o circuito completo.

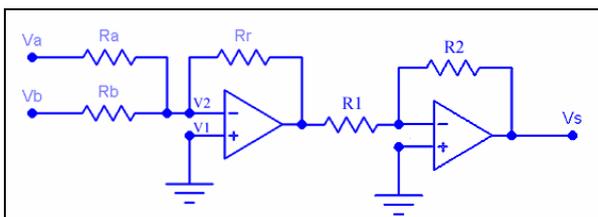


Figura 12 - Invertendo a saída do circuito somador inversor.

#### 4.4 - Circuito Subtrator

O objetivo deste circuito é amplificar a diferença entre os sinais de entrada. A configuração para este circuito está ilustrada na figura 13.

Em geral, nestes circuitos, o valor dos resistores  $R_1$  e  $R_1'$  são iguais. Da mesma forma os resistores  $R_2$  e  $R_2'$ , também são iguais. Portanto, para este circuito o valor da tensão na saída pode ser expresso por:

$$V_s = R_2/R_1 \cdot (V_b - V_a) \quad (10)$$

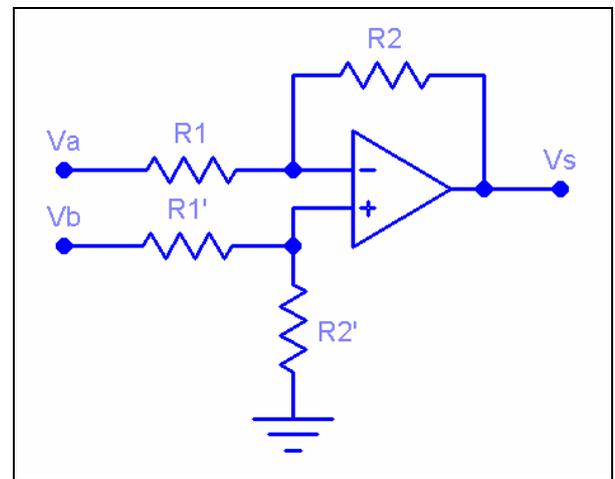


Figura 13 - Circuito subtrator.

#### 4.5 - Circuito Integrador

O amplificador operacional pode ser utilizado para construir circuitos integradores, para isto deve-se colocar um capacitor como elemento de realimentação. Conforme está ilustrado na figura 14.

O circuito integrador fornece uma tensão de saída proporcional à área embaixo da curva do sinal de entrada. Assim:

$$V_s = -1/(R \cdot C) \cdot (\text{Área da Curva Vent.}) \cdot (\text{Tempo}) \quad (11)$$

O circuito integrador converte o sinal Vent em uma fonte de corrente constante carregando o capacitor C de forma linear. Elevando a tensão sobre o mesmo. Deve-se atentar para o sinal negativo na equação 11, pois ele indica que a saída será invertida. A figura 15 exemplifica os sinais de entrada e saída para uma onda quadrada, já a figura 16 mostra os sinais de entrada e saída para entrada triangular. Neste último caso, a integração de uma reta (sinal triangular) gera uma curva, e as várias curvas unidas geram uma forma de onda que se assemelha a uma senoide.

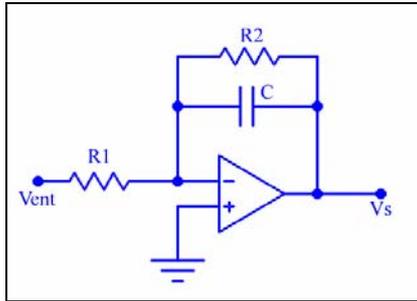


Figura 14 - Circuito integrador.

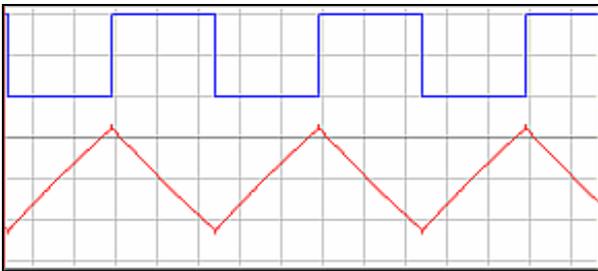


Figura 15 - Circuito integrador Vent - onda quadrada.

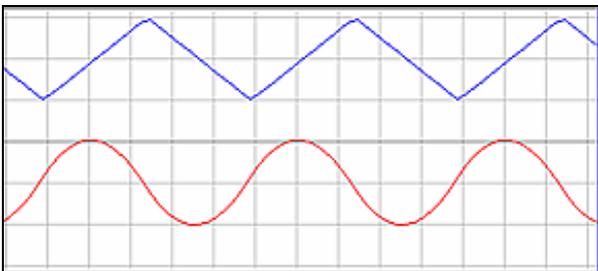


Figura 16 - Circuito integrador Vent - onda triangular.

O resistor  $R_2$  em paralelo ao capacitor, mostrado na figura 14, serve limitar o ganho em baixas frequências (próximas de zero) ou no caso de haver algum "offset" (compensação) no sinal de entrada, pois nestes casos o circuito poderá ir para a saturação. O valor de resistor  $R_2$ , a ser adotado, deve ser maior do que  $10.R_1$ .

#### 4.6 - Circuito Derivador

A tensão na saída do circuito derivador é proporcional à taxa de variação do sinal de entrada no tempo, ou seja:

$$V_s = -RC.(\Delta V_{ent}/\Delta t) \quad (12)$$

Este tipo de circuito informa o quão rápida é a variação do sinal de entrada em função do tempo, este sinal pode representar uma grandeza física como temperatura, por exemplo. Deve-se notar o sinal negativo na equação 12 que indica a inversão do sinal na saída. O funcionamento deste circuito é inverso ao do circuito integrador, visto anteriormente. Pode-se notar isto através da figura 18 que ilustra os sinais na entrada e na saída para um sinal de entrada triangular.

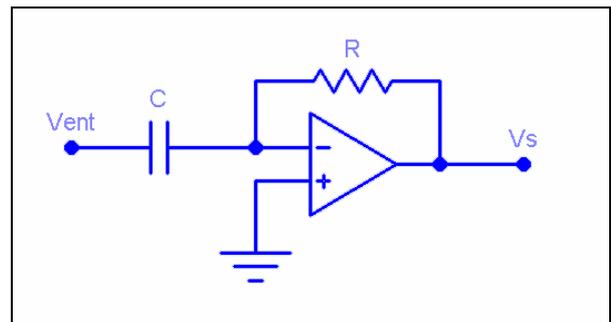


Figura 17 - Circuito derivador.

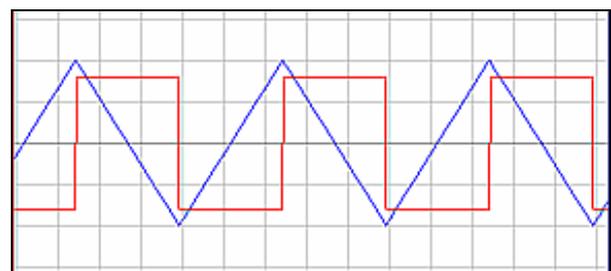


Figura 18 - Circuito derivador, Vent - onda triangular.

## CAPÍTULO 8: CIRCUITOS LÓGICOS DIGITAIS

### RESUMO

Este capítulo tem por objetivo ser uma introdução aos circuitos lógicos digitais.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Os *circuitos digitais* são dispositivos, em geral circuitos integrados, para os quais o sinal na saída é uma função da combinação dos sinais de entrada.

De forma diferente dos circuitos analógicos os sinais utilizados pelos circuitos digitais possuem níveis bem definidos, são eles: nível lógico alto e nível lógico baixo. Conforme ilustra a figura 1.

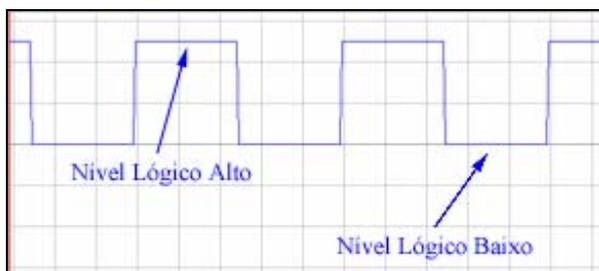


Figura 1 - Níveis lógicos.

O nível lógico alto também pode ser chamado de verdadeiro, ligado, positivo, acesso, etc. Da mesma forma o nível lógico baixo pode ser chamado de falso, desligado, apagado, etc. Nota-se na figura 1 que a transição entre um nível e outro é quase instantânea, isto ocorre porque apenas estes dois níveis ou estados são interessantes para a lógica digital.

Nos circuitos digitais, os níveis lógicos representam variáveis lógicas. Uma variável lógica é uma variável que tem três propriedades distintas:

- A variável lógica só pode assumir um (ou o outro) de dois valores possíveis (por exemplo, *verdadeiro* ou *falso*);
- Os valores são expressos por afirmações declarativas;
- Os dois valores possíveis devem ser mutuamente exclusivos.

Este conceito é interessante, pois o matemático *George Boole* (1815-1864) desenvolveu

um método algébrico chamado *álgebra de Boole*, onde são definidos três operadores:

Nome	Função	Operação
NÃO	Negação	$S = \bar{A}$
E	Interseção	$S = A \cdot B$
OU	União	$S = A + B$

Tabela 1 - Operações lógicas.

As variáveis lógicas, conforme mencionado anteriormente, podem assumir apenas dois valores. Estes são representados pelos números 0 (zero) e 1 (um), respectivamente, verdadeiro e falso.

### 2.0 - PORTAS LÓGICAS BÁSICAS

As *portas lógicas* ou *blocos lógicos* executam as funções mostradas na tabela 1. Para entender seu funcionamento, acompanhando cada bloco, haverá uma tabela da verdade que descreve os estados da saída para cada estado possível na entrada de cada porta lógica.

#### 2.1 - Porta Inversora - NOT

A *porta inversora* é também conhecida pela palavra inglesa *NOT* (*não*). Executa a *função de negação* (ver tabela 1).

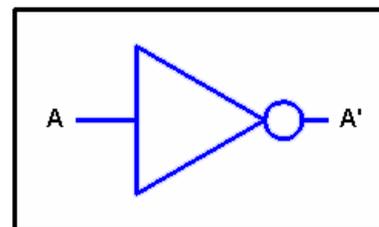


Figura 2 - Porta Inversora.

#### Tabela da Verdade

A saída da porta inversora é sempre igual ao inverso de sua entrada. O apóstrofo (') ao lado da variável A, significa "*A negado*" ou "*Não A*".

A	A'
0	1
1	0

Tabela 2 - Porta inversora.

2.2 - Porta E - AND

A porta E executa a função intersecção (ver tabela 1). Para facilitar o entendimento de como funciona a porta, pode-se fazer uma analogia com o circuito com chaves em série analógico da figura 3.

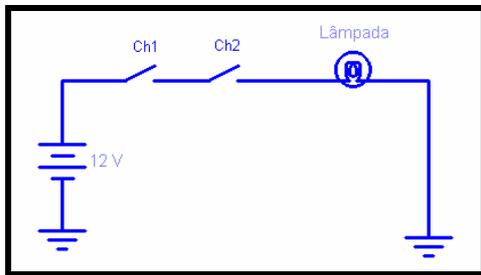


Figura 3 - Circuito com chaves em série.

No circuito da figura 3, a lâmpada irá acender somente se a chave Ch1 e a chave Ch2 estiverem fechadas. De forma análoga, para a saída da porta E ser verdadeira, ambas as entradas devem ser verdadeiras.

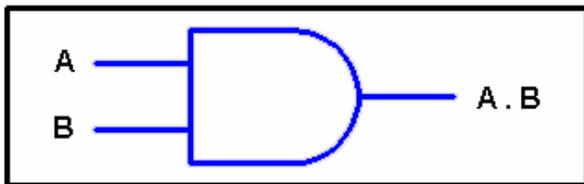


Figura 4 - Porta E.

Tabela da Verdade

A saída será verdadeira (1) somente quando as duas entradas forem verdadeiras (1 e 1).

A	B	A.B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabela 3 - Porta E.

2.3 - Porta OU - OR

A porta OU executa a função união (ver tabela 1). A porta ou funciona de forma análoga ao circuito com chaves em paralelo da figura 5.

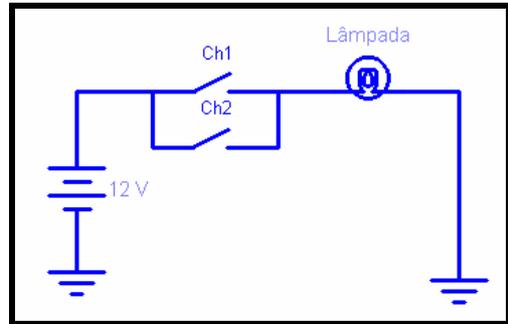


Figura 5 - Circuito com chaves em paralelo.

No circuito da figura 5, basta que uma das chaves esteja fechada para lâmpada acender. De forma análoga, para a saída da porta OU ser verdadeira basta que uma de suas entradas seja verdadeira.

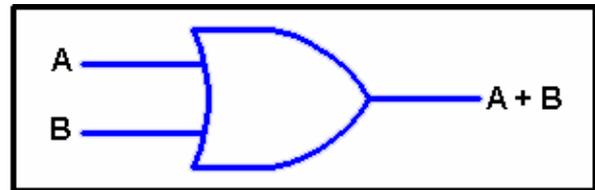


Figura 6 - Porta OU.

Tabela da Verdade

Para que a saída seja verdadeira (1), basta que uma de suas entradas seja verdadeira (1).

A	B	A+B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Tabela 4 - Porta OU.

2.4 - Porta NÃO-E - NAND

Esta porta é a combinação da porta E seguida de uma porta inversora.

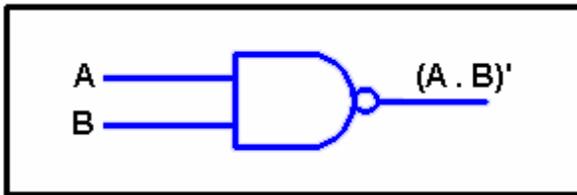


Figura 7 - Porta NÃO E.

Tabela da Verdade

A saída será *falsa* (0) somente quando *ambas* as *entradas* forem *verdadeiras* (1 e 1).

A	B	(A.B)'
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tabela 5 - Porta NÃO E.

**2.5 - Porta NÃO-OU - NOR**

Esta porta é a *combinação* da porta OU seguida de uma porta *inversora*.

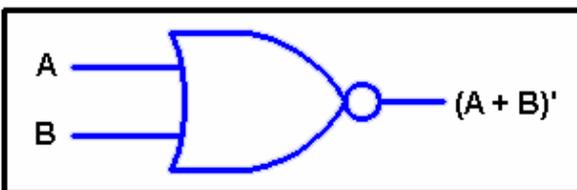


Figura 8 - Porta NÃO OU.

Tabela da Verdade

A saída será *verdadeira* (1) somente quando *ambas* as *entradas* forem *falsas* (0 e 0).

A	B	(A + B)'
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Tabela 6 - Porta NÃO OU.

**2.6 - Porta OU-Exclusivo - XOR**

Esta porta equivale à *combinação* de *três* portas *lógicas*, conforme pode ser visto na figura 9.

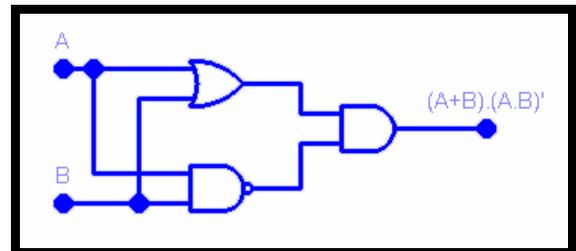


Figura 9 - Circuito equivalente da Porta OU Exclusivo.

O símbolo da *porta OU Exclusivo* está ilustrado na figura 10.

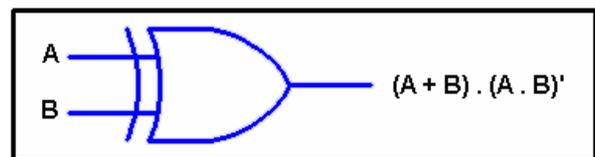


Figura 10 - Porta OU Exclusivo.

Tabela da Verdade

A saída será *verdadeira* (1) somente quando as *entradas* forem *diferentes*.

A	B	XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tabela 7 - Porta OU Exclusivo.

**2.7 - Porta NÃO-OU-Exclusivo - XNOR**

Esta porta é a *composição* de uma porta OU Exclusivo seguida de uma porta *Inversora*.

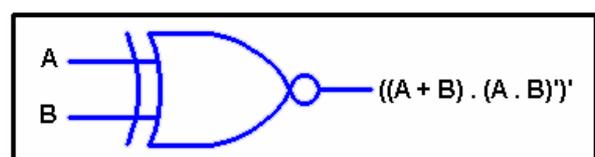


Figura 11 - Porta OU Exclusivo.

Tabela da Verdade

A saída será verdadeira (1) somente quando as entradas forem iguais.

A	B	XNOR
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabela 8 - Porta NÃO OU Exclusivo.

**3.0 - CIRCUITOS INTEGRADOS DIGITAIS**

As portas lógicas apresentadas constituem a base para a montagem de circuitos digitais mais complexos, na prática esta montagem é feita utilizando-se circuitos integradas que contém conjuntos de portas lógicas básicas.

Os integrados podem utilizar a lógica *TTL* - *Transistor to Transistor Logic* (*Lógica Transistor-Transistor*), onde o nível lógico alto corresponde à uma faixa de tensão entre 2 e 5 V e o nível lógico baixo pode variar entre 0 e 0,8 V. A faixa de tensão entre 0,8 e 2 V deve ser evitada, pois gera um nível lógico indeterminado. Além disso, podem utilizar a lógica *CMOS* - *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (*Metal-Óxido Semicondutor Complementares*), sendo que, para esta família, o nível lógico depende da tensão de alimentação que pode variar, dependendo do modelo, de 3 a 18 V.

Exemplo:

O CI 7400 é TTL da família 74nm, este integrado contém quatro portas lógicas NÃO-E, sua pinagem pode ser vista na figura 12. E seu diagrama interno está ilustrado na figura 13.

Como os circuitos integrados são fabricados com um determinado número portas, muitas vezes é interessante combiná-las para formar outros tipos de portas lógicas.

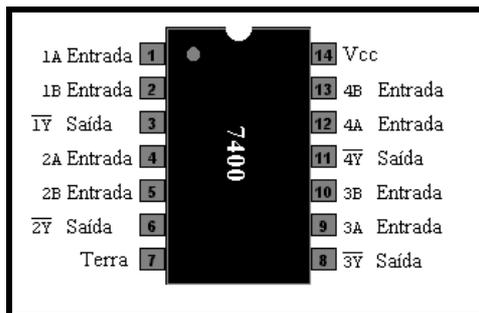


Figura 12 - CI 7400 - 4 Portas NÃO-E.

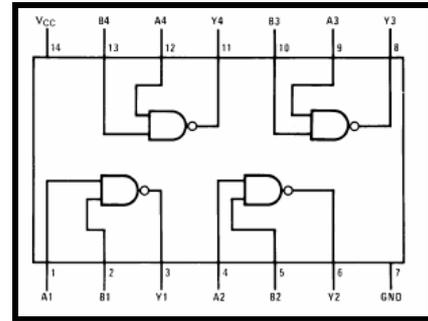


Figura 13 - Diagrama interno do 7400.

Exemplo:

Pode-se utilizar uma das portas lógicas do CI 7400 para formar uma porta inversora, conforme mostra a figura 14.

$$\bar{A} = \overline{(A.A)}$$

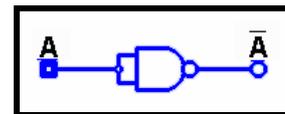


Figura 14 - Porta Inversora utilizando uma porta NÃO-E.

Pode-se utilizar duas portas NÃO-E para formar uma porta E, pois  $((A.B))' = A.B$ :

$$X = \overline{\overline{(A.B)}} = A.B$$

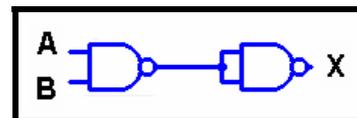


Figura 15 - Porta E utilizando portas NÃO-E.

Pode-se, também, formar uma porta OU, utilizando-se três portas NÃO-E, pois  $(\overline{A}.B)' = A+B$ .

$$X = \overline{(\overline{A}.B)} = A+B$$

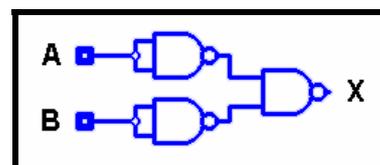


Figura 16 - Porta OU utilizando portas NÃO-E.