

# ELETRÔNICA ANALÓGICA



TERCEIRA  
EDIÇÃO

**WERTHER SERRALHEIRO**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA  
CAMPUS ARARANGUÁ

Apostila de Eletricidade  
Desenvolvida pelo Prof. MEng. Werther Serralheiro  
Professor do Campus Araranguá do Instituto Federal de Santa Catarina  
Para a Disciplina de ELETTRÔNICA ANALÓGICA do Curso Técnico em Eletromecânica

A reprodução desta apostila deverá ser autorizada pelo IFSC

---

# SUMÁRIO



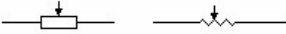

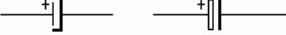

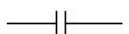

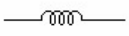

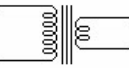

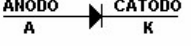



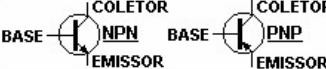

<b>1 - Componentes eletrônicos.....</b>	<b>6</b>
<b>2 - Resistores.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Tipos de Resistores.....</b>	<b>8</b>
2.1.1 Resistor de fio .....	9
2.1.2 Resistor de filme de Carbono.....	9
2.1.3 Resistor de filme metálico.....	9
<b>2.2 Código de Cores para Resistores.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 Resistores SMD.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 Resistências Variáveis.....</b>	<b>12</b>
<b>2.5 Outros tipos de resistores.....</b>	<b>13</b>
<b>3 - Capacitores.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Princípio de funcionamento.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Tipos de Capacitores.....</b>	<b>16</b>
3.2.1 Capacitores Eletrolíticos.....	16
3.2.2 Capacitores de Tântalo.....	16
3.2.3 Capacitores de Poliéster.....	16
3.2.4 Capacitores de Cerâmica.....	17
<b>3.3 Leitura da Capacitância.....</b>	<b>17</b>
3.3.1 Tensão de Trabalho.....	17
3.3.2 Identificação no capacitor cerâmico.....	17
3.3.3 Identificação do valor no capacitor de poliéster.....	18
<b>3.4 Capacitores variáveis.....</b>	<b>20</b>
<b>3.5 Simbologia de Capacitores.....</b>	<b>21</b>
<b>3.6 Carga e descarga de capacitor.....</b>	<b>22</b>
<b>4 - Indutores.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1 Construção.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2 Funcionamento de um indutor.....</b>	<b>25</b>
<b>4.3 Simbologia de Indutores.....</b>	<b>26</b>
<b>5 - Transformadores de baixa corrente.....</b>	<b>27</b>
<b>5.1 Tipos de transformadores.....</b>	<b>30</b>
5.1.1 Transformador de alimentação.....	30
5.1.2 Transformador de áudio.....	31
5.1.3 Transformador de distribuição.....	31
5.1.4 Transformadores de potencial.....	31
5.1.5 Transformador de corrente.....	31
5.1.6 Transformador de RF.....	32
5.1.7 Transformadores de pulso.....	32
<b>6 - Materiais semicondutores.....</b>	<b>33</b>

<b>6.1 Classificação dos materiais quanto à condutibilidade elétrica.....</b>	<b>33</b>
6.1.1 Materiais condutores.....	33
6.1.2 Materiais isolantes.....	34
6.1.3 Materiais semicondutores.....	34
<b>6.2 Dopagem.....</b>	<b>34</b>
<b>7 - Diodo.....</b>	<b>38</b>
<b>7.1 Introdução.....</b>	<b>38</b>
<b>7.2 Polarização.....</b>	<b>38</b>
7.2.1 Polarização direta.....	38
7.2.2 Polarização reversa.....	39
<b>7.3 Curva característica.....</b>	<b>39</b>
<b>7.4 Análise de circuitos com diodos.....</b>	<b>40</b>
<b>7.5 Retificação.....</b>	<b>41</b>
7.5.1 Meia onda.....	41
7.5.2 Onda completa.....	42
7.5.3 Onda completa em ponte.....	44
7.5.4 Retificação com filtro.....	45
<b>7.6 Diodos especiais.....</b>	<b>47</b>
7.6.1 Diodo emissor de luz (LED).....	47
7.6.2 Fotodiodo.....	47
7.6.3 Diodo Zener.....	48
<b>8 - Transistor Bipolar.....</b>	<b>50</b>
<b>8.1 Introdução.....</b>	<b>50</b>
<b>8.2 Construção física do transistor bipolar.....</b>	<b>51</b>
<b>8.3 Polarização.....</b>	<b>52</b>
8.3.1 Direta.....	52
8.3.2 Reversa.....	52
8.3.3 Direta-reversa.....	52
<b>8.4 Configurações .....</b>	<b>55</b>
8.4.1 Base comum.....	55
8.4.2 Emissor comum.....	56
8.4.3 Coletor comum.....	56
8.4.4 Representação de tensões e correntes.....	57
8.4.5 Polarização com uma única fonte.....	58
<b>8.5 Curvas Características.....</b>	<b>60</b>
8.5.1 Emissor Comum.....	60
8.5.2 Base Comum.....	61
8.5.3 Coletor comum.....	61
<b>8.6 Identificação de terminais e polaridade.....</b>	<b>62</b>
<b>9 - Tiristor.....</b>	<b>63</b>
<b>9.1 SCR.....</b>	<b>63</b>
9.1.1 Modo simplificado de operação.....	65
9.1.2 Disparo por corrente de gate (IG).....	66
9.1.3 Circuito chave CC.....	67

9.1.4 Circuito de controle AC.....	67
<b>9.2 TRIAC.....</b>	<b>70</b>
9.2.1 Circuito com TRIAC.....	71
<b>10 - Componentes Eletrônicos Especiais.....</b>	<b>74</b>
<b>10.1 JFET.....</b>	<b>74</b>
10.1.1 Polarização de um JFET.....	75
10.1.2 Curva característica de dreno.....	75
<b>10.2 MOSFET.....</b>	<b>76</b>
10.2.1 MOSFET de modo depleção.....	76
10.2.2 MOSFET de modo crescimento.....	77
<b>10.3 Fototransistor.....</b>	<b>78</b>
<b>10.4 Fotodiodo.....</b>	<b>79</b>
<b>10.5 Acoplador ótico.....</b>	<b>79</b>
<b>10.6 Termistor.....</b>	<b>80</b>
10.6.1 NTC.....	80
10.6.2 PTC.....	81
<b>10.7 LDR.....</b>	<b>81</b>
<b>10.8 Varistor.....</b>	<b>82</b>

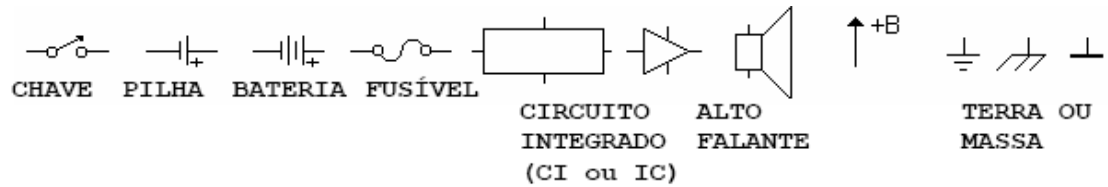
# 1 - COMPONENTES ELETRÔNICOS

Nesta apostila, irá ser abordados os principais componentes eletrônicos utilizados em circuitos de controle. O objetivo é conhecer o princípio de funcionamento dos componentes, suas características físicas, formas de especificação e testes de funcionamento. Inicialmente, iremos fazer um pequeno exercício de simbologia.

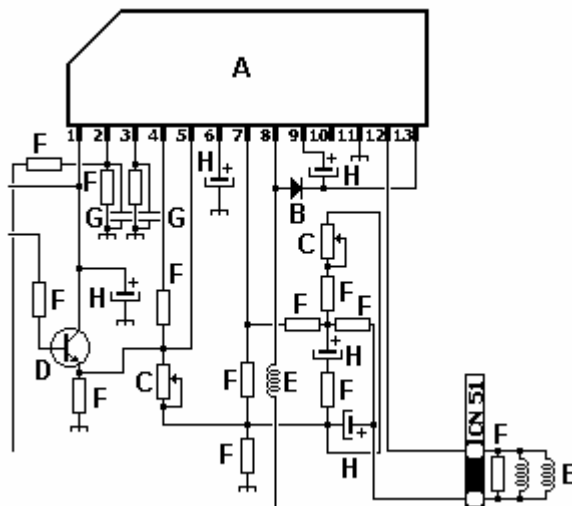
COMPONENTE	SÍMBOLO OU SÍMBOLOS	ASPECTO FÍSICO
RESISTOR		
TRIMPOT E POTENCIÔMETRO		
CAPACITOR ELETROLÍTICO		
CAPACITOR COMUM		 POLIÉSTER CERÂMICOS
BOBINA OU INDUTOR		
TRANSFORMADOR OU TRAFO		
DIODO COMUM		
LED		
TRANSISTOR		



Outros símbolos usados em eletrônica:



Abaixo temos um circuito vertical de uma TV. Cada componente possui uma letra. Coloque o nome para cada componente ao lado do circuito.



- A: \_\_\_\_\_  
B: \_\_\_\_\_  
C: \_\_\_\_\_  
D: \_\_\_\_\_  
E: \_\_\_\_\_  
F: \_\_\_\_\_  
G: \_\_\_\_\_  
H: \_\_\_\_\_



## 2 - RESISTORES

Resistores são componentes que têm por finalidade oferecer uma oposição à passagem de corrente elétrica, através de seu material. A essa oposição damos o nome de resistência elétrica, que possui como unidade o ohm ( $\Omega$ ), onde encontramos como múltiplos mais usuais:

Kilo - ohm ( $K\Omega$ )

Mega - ohm ( $M\Omega$ )

Os resistores fixos são comumente especificados por três parâmetros:

- O valor nominal da resistência elétrica;
- A tolerância, ou seja, a máxima variação em porcentagem do valor nominal;
- Máxima potência elétrica dissipada

Exemplo: Tomemos um resistor de  $1000\ \Omega \pm 5\%$  - 0,33W, isso significa que possui um valor nominal de  $1000\ \Omega$ , uma tolerância sobre esse valor de mais ou menos 5% e pode dissipar uma potência de no máximo 0,33 watts.

### 2.1 Tipos de Resistores

Dentre os tipos de resistores fixos, destacamos os de:

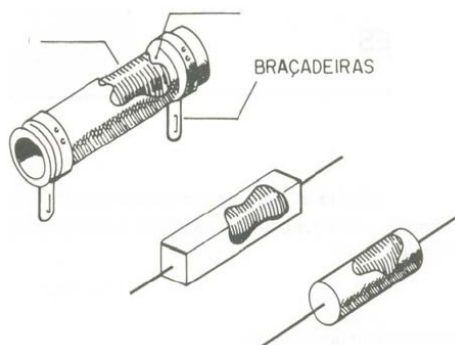
- Fio;
- Filme de carbono;
- Filme metálico.



### 2.1.1 Resistor de fio

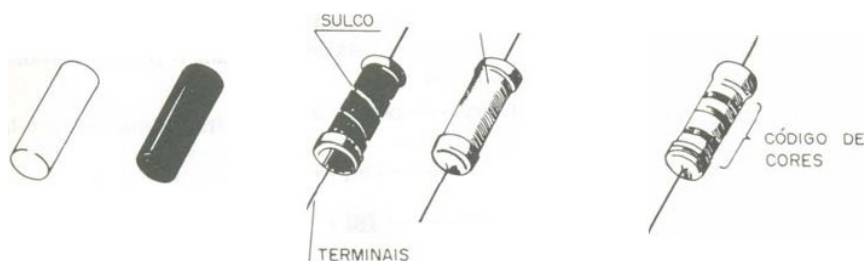
Consiste basicamente em um tubo cerâmico, que servirá de suporte para enrolarmos um determinado comprimento de fio, de liga especial para obter-se o valor de resistência desejado. Os terminais desse fio são conectados às braçadeiras presas ao tubo.

Os resistores de fio são encontrados com valores de resistência de alguns ohms até alguns Kilo-ohms, e são aplicados onde se exige altos valores de potência, acima de 5W, sendo suas especificações impressas no próprio corpo.



### 2.1.2 Resistor de filme de Carbono

Consiste em um cilindro de porcelana recoberto por um filme (película) de carbono. O valor da resistência é obtido mediante a formação de um sulco, transformando a película em uma fita helicoidal. Esse valor pode variar conforme a espessura do filme ou a largura da fita. Como revestimento, encontramos uma resina protetora sobre a qual será impresso um código de cores, identificando seu valor nominal e tolerância.



Os resistores de filme de carbono são destinados ao uso geral e suas dimensões físicas determinam a máxima potência que pode dissipar.

### 2.1.3 Resistor de filme metálico

Sua estrutura é idêntica ao de filme de carbono, somente que, utilizamos uma liga metálica (níquel-cromo) para formarmos a película, obtendo valores mais precisos de resistência com tolerâncias de 1 % e 2%.



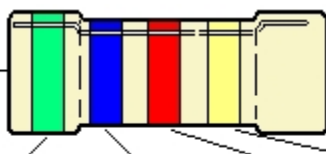
## 2.2 Código de Cores para Resistores

Os resistores são fabricados com valores que vão de alguns miliohms até cerca de 1 gigaohm. Porém, somente alguns valores limitados estão disponíveis, pertencentes às séries de valores preferenciais da norma IEC 60 063 (International Electrotechnical Commission).

Essas séries são chamadas E6, E12, E24, E96 e E192. O número da série indica quantos valores padrões existem entre 10 e 100, por exemplo. Assim, na série E12 há 12 valores disponíveis entre 10 e 100, que são 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68 e 82. Na série E24 há todos os valores da série E12 mais 11, 13, 16, 20, 24, 30, 36, 43, 51, 62, 75 e 91.

Dessa forma, são fabricados múltiplos de 10 dos valores padrões. Por exemplo, existem comercialmente resistores de resistências 0,47Ω, 4,7Ω, 47Ω, 470Ω, 4,7 kΩ, 47 kΩ, 470 kΩ, 4,7 MΩ, 47 MΩ e 470 MΩ. Isso vale para os demais valores das séries.

Lembrando da disciplina de ELETRICIDADE BÁSICA, o código de cores é a convenção utilizada para identificação de resistores de uso geral. Compreende as séries E6, E12 e E24 da norma internacional IEC.



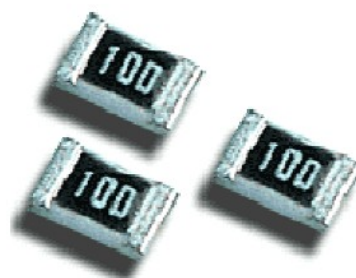
Cores	1º anel 1º dígito	2º anel 2º dígito	3º anel Multiplicador	4º anel Tolerância
Prata	-	-	0,01	10%
Ouro	-	-	0,1	5%
Preto	0	0	1	-
Marrom	1	1	10	1%
Vermelho	2	2	100	2%
Laranja	3	3	1 000	3%
Amarelo	4	4	10 000	4%
Verde	5	5	100 000	-
Azul	6	6	1 000 000	-
Violeta	7	7	10 000 000	-
Cinza	8	8	-	-
Branco	9	9	-	-

Para resistores de precisão, temos cinco faixas. O código é o mesmo. Então, para o exemplo da figura abaixo, a leitura será de 4.730  $\Omega$ , ou 4K73, com 1% de precisão.



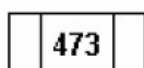
## 2.3 Resistores SMD

Existem resistores que são montados de uma forma diferente sobre a placa de circuito impresso, chamados resistores SMD (Surface Mounted Device), como os mostrados na figura ao lado.

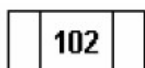




A leitura é indicada no corpo através de um número. O terceiro algarismo é o número de zeros a serem acrescentados aos primeiros, como mostra a figura abaixo:



RESISTOR DE  
47.000 OHMS  
OU 47 K



RESISTOR DE  
1.000 OHMS  
OU 1K



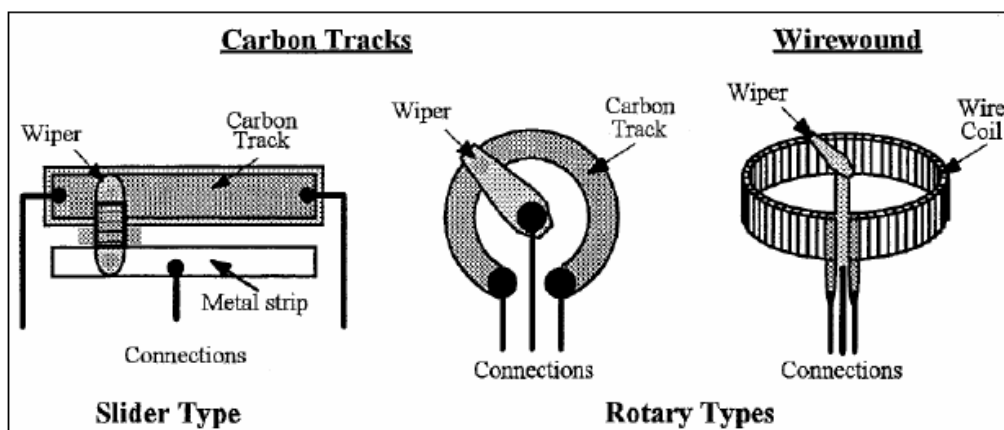
JUMPER (FIO)



## 2.4 Resistências Variáveis

Uma resistência variável é composta por uma pista com uma resistência fixa e um cursor que pode ser deslocado de modo a efetuar contato com qualquer parte da pista.

O formato da pista pode ser *deslizante* ou *rotativo*.



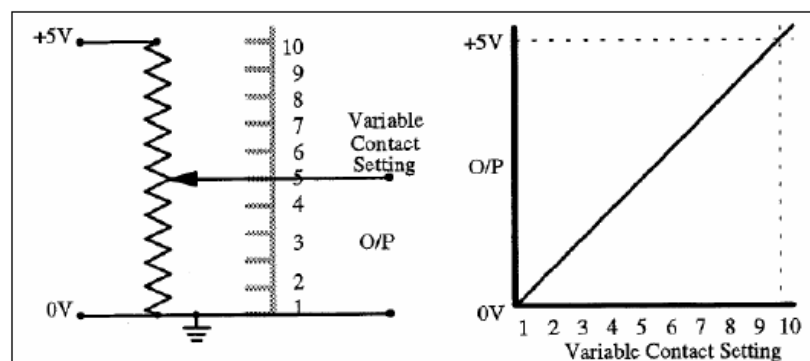
Uma resistência variável pode ser utilizada para fornecer uma tensão variável. Para tanto, aplica-se uma tensão constante aos terminais da pista fixa. O cursor permite obter uma tensão variável no ponto de contato com a pista. Se utilizarmos a resistência variável desta forma, adota-se o nome de **potenciômetro**. Se a resistência variável não possuir eixo, chamamo-na de **trimpot**.



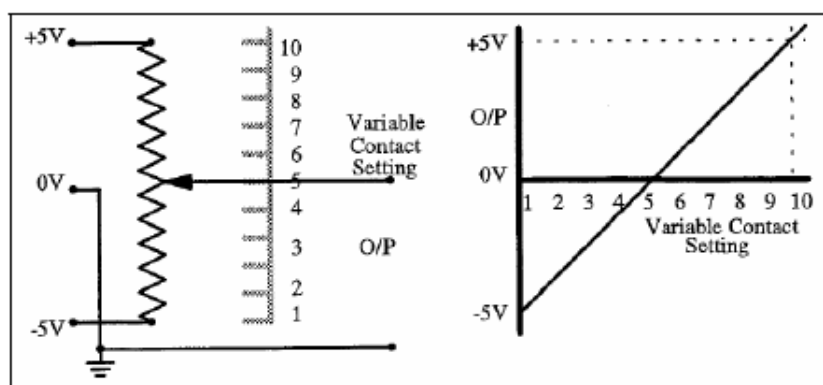
POTENCIÔMETRO



TRIMPOT

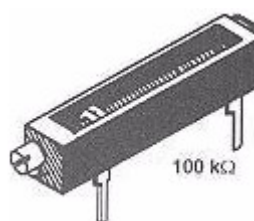


Se aplicarmos uma tensão de polaridade dupla, a amplitude e polaridade da tensão de saída irá depender da direção do movimento do cursor a partir de sua posição central, conforme a figura abaixo.



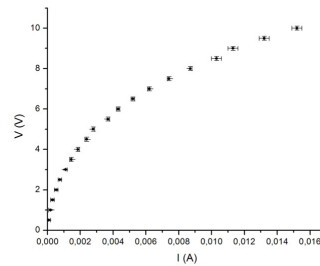
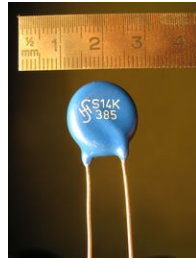
## 2.5 Outros tipos de resistores

**Potenciômetros multivoltas:** tem o corpo comprido e um eixo tipo sem-fim. Girando este eixo, ele varia a resistência bem devagar. É usado em circuitos onde o ajuste de resistência deve ser bem preciso.





**Varistor:** resistor especial que diminui sua resistência quando a tensão nos seus terminais aumenta. É usado na entrada de força de alguns aparelhos, protegendo-os de um aumento de tensão da rede elétrica. Quando a tensão nos terminais ultrapassa o limite do componente, ele entra em curto, queima o fusível e desliga o aparelho.



**Termistor:** resistor que varia a resistência com a temperatura. Iremos ver com mais detalhes no último capítulo desta apostila.

**Barra de resistores:** são vários resistores interligados dentro de uma única peça, tendo um terminal comum para todos. É usado em circuitos que requerem economia de espaço. Também pode ser chamado de *resistor package*.



## 3 - CAPACITORES

### 3.1 Princípio de funcionamento

O capacitor é formado por duas placas condutoras, separadas por um isolante chamado *dielétrico*. As placas servem para armazenar cargas elétricas e o tipo de dielétrico caracteriza o tipo de capacitor.

Aplicando tensão nos terminais do capacitor, ele armazena cargas elétricas (negativas numa placa e positivas na outra). Enquanto o capacitor está carregando, passa uma corrente no circuito chamado de *corrente de carga*. Quando o capacitor já está carregado não circula mais corrente. Para descarregar o capacitor, basta ligar um terminal no outro e a corrente que passa chama-se corrente de descarga.



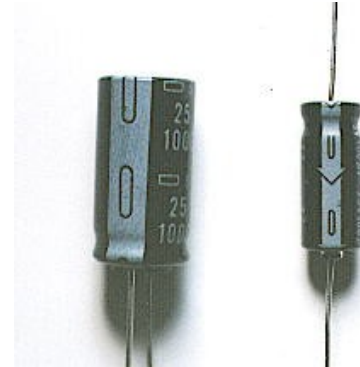




## 3.2 Tipos de Capacitores

### 3.2.1 Capacitores Eletrolíticos

Estes tipos possuem alta capacitância (valor) e são polarizados. Eles vêm com o valor indicado em microfarad ( $\mu\text{F}$ ). São usados em filtros ou acoplamento em circuitos de baixa frequência ou em circuitos temporizadores. De acordo com a posição dos terminais do capacitor eletrolítico, podemos classificá-lo em radial ou axial. Possuem uma faixa no corpo que na maioria dos casos indica o pólo negativo dele.



### 3.2.2 Capacitores de Tântalo

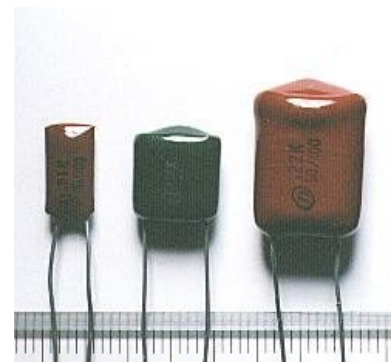
Capacitores de tântalo são capacitores eletrolíticos que usam um material chamado de tântalo para os eletrodos. Grandes valores de capacitância similares ao de alumínio podem ser obtidas. Capacitores de tântalo são superiores ao de alumínio no que se refere à temperatura e frequência de operação. Usualmente o símbolo "+" é usado para indicar o pólo positivo.

Capacitores de tântalo são um pouco mais caro que os de alumínio. São usados em circuitos que precisam que o valor da capacitância seja constante com a temperatura e frequência



### 3.2.3 Capacitores de Poliéster

É formado internamente por uma tirinha de poliéster enrolada com duas tirinhas de papel metálico. Estes capacitores possuem valor médio, geralmente entre 1 nanofarad (nF ou  $\text{kpF}$ ) a 2,2 microfarad ( $\mu\text{F}$ ). Não tem polaridade e são usados nos circuitos que trabalham em frequências mais altas. Antigamente estes capacitores possuíam anéis coloridos no corpo, sendo chamados de "zebrinha". Hoje em dia este tipo não é mais usado.

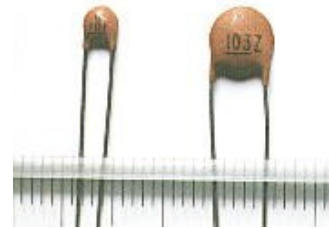






### 3.2.4 Capacitores de Cerâmica

Possuem internamente um lâmina de cerâmica. São usados em circuitos que trabalham com altas frequências. A maioria dos capacitores de cerâmica usados nos aparelhos eletrônicos possuem baixa capacitância (menos de 10 nF).



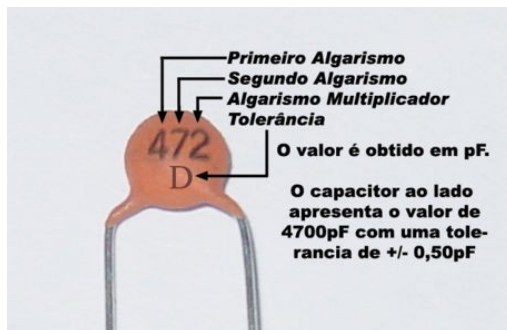
## 3.3 Leitura da Capacitância

### 3.3.1 Tensão de Trabalho

É a máxima tensão que o capacitor pode receber nos seus terminais sem estourar. No circuito o capacitor sempre trabalha com uma tensão menor que a indicada no corpo dele. Na troca de um capacitor, sempre o faça por outro com a mesma tensão ou com tensão superior.

### 3.3.2 Identificação no capacitor cerâmico

Os capacitores cerâmicos, apresentam impressos no próprio corpo, um conjunto de três algarismos e uma letra. Para se obter o valor do capacitor, os dois primeiros algarismos, representam os dois primeiros dígitos do valor do capacitor e o terceiro algarismo (algarismo multiplicador), representa o número de zeros à direita, a letra representa a tolerância (podendo ser omitida) do capacitor (faixa de valores em que a capacitância variará) para os capacitores cerâmicos até 10pF é expressa em pF os acima de 10pF é expressa em porcentagem. O valor é expresso em pF. Por exemplo um capacitor com 224F impresso no próprio corpo, possuirá uma capacitância de 220000pF com uma tolerância de +/- 1% (seu valor pode ser um por cento a mais ou a menos desse valor.)

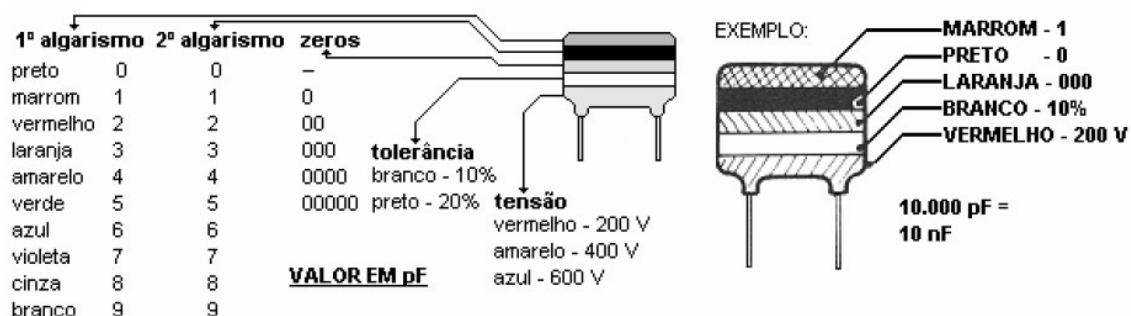


Tolerância:

Até 10pF	Acima de 10pF
B=0,10pF	F=1%
C=0,25pF	G=2%
D=0,50pF	H=3%
F=1pF	J=5%
G=2pF	K=10%

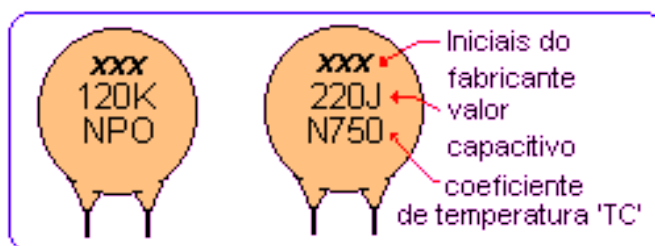
### 3.3.3 Identificação do valor no capacitor de poliéster

Para a identificação dos valores do capacitor de poliéster é usado um conjunto de 5 faixas coloridas ("zebrinha"), embora seja um método em desuso pelos fabricantes, no qual cada faixa representará respectivamente: primeiro algarismo, segundo algarismo, algarismo multiplicador, tolerância e tensão. O valor é obtido em pF.



### Variação por temperatura

Agora, um pouco sobre coeficiente de temperatura "TC", que define a variação da capacitância dentro de uma determinada faixa de temperatura. O "TC" é normalmente expresso em % ou ppm/°C (partes por milhão / °C). É usado uma seqüência de letras ou letras e números para representar os coeficientes. Observe o desenho abaixo.



Os capacitores acima são de coeficiente de temperatura linear e definido, com alta estabilidade de capacitância e perdas mínimas, sendo recomendados para aplicação em circuitos ressonantes, filtros, compensação de temperatura e acoplamento e filtragem em circuitos de RF. Na tabela abaixo estão mais alguns coeficientes de temperatura e as tolerâncias que são muito utilizadas por diversos fabricantes de capacitores.

Código	Coeficiente de temperatura
NPO	-0± 30ppm/°C
N075	-75± 30ppm/°C
N150	-150± 30ppm/°C
N220	-220± 60ppm/°C
N330	-330± 60ppm/°C
N470	-470± 60ppm/°C
N750	-750± 120ppm/°C
N1500	-1500± 250ppm/°C
N2200	-2200± 500ppm/°C
N3300	-3300± 500ppm/°C
N4700	-4700± 1000ppm/°C
N5250	-5250± 1000ppm/°C
P100	+100± 30ppm/°C

Outra forma de representar coeficientes de temperatura é mostrado abaixo. É usada em capacitores que se caracterizam pela alta capacitância por unidade de volume (dimensões reduzidas) devido a alta constante dielétrica sendo recomendados para aplicação em desacoplamentos, acoplamentos e supressão de interferências em baixas tensões.



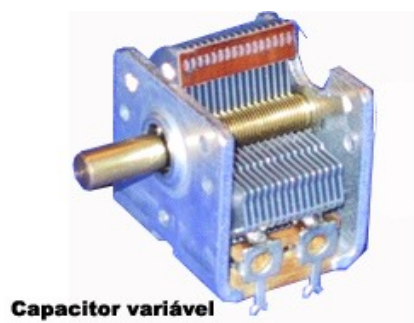
Os coeficientes são também representados com seqüências de letras e números como por exemplo: X7R, Y5F e Z5U. Para um capacitor Z5U, a faixa de operação é de +10°C que significa "Temperatura Mínima" e +85°C que significa "Temperatura Máxima" e uma variação de "Máxima de capacitância", dentro desses limites de temperatura, que não ultrapassa -56%, +22%.

Temperatura Mínima		Temperatura Máxima		Variação Máxima de Capacitância	
X Y Z	-55°C -30°C +10°C	2	+45°C	A	±1.0%
		4	+65°C	B	±1.5%
		5	+85°C	C	±2.2%
		6	+105°C	D	±3.3%
		7	+125°C	E	±4.7%
				F	±7.5%
				P	±10%
				R	±15%
				S	±22%
				T	-33%, +22%
				U	-56%, +22%
				V	-82%, +22%

### 3.4 Capacitores variáveis



















Há dois tipos distintos de capacitores variáveis, cujas capacitâncias podem ser mudadas intencionalmente e repetidamente ao longo da vida do dispositivo:

- Aqueles que usam uma construção mecânica para mudar a distância entre as placas, ou a superfície da área das placas superpostas. Esses dispositivos são chamados capacitores de sintonia, ou simplesmente "capacitores variáveis", e são usados em equipamentos de telecomunicação para sintonia e controle de frequências. Neste tipo de capacitor o elemento dielétrico é o próprio ar.
- Aqueles que usam o fato de que a espessura da camada de depleção de um diodo varia com a tensão da corrente contínua atravessando o diodo. Esses diodos são chamados de diodos de capacitância variável, varactores ou varicaps. Qualquer diodo exibe esse efeito, mas dispositivos vendidos especificamente como varactores têm uma área de junção grande e um perfil de dopagem especificamente dimensionado para maximizar a capacitância.



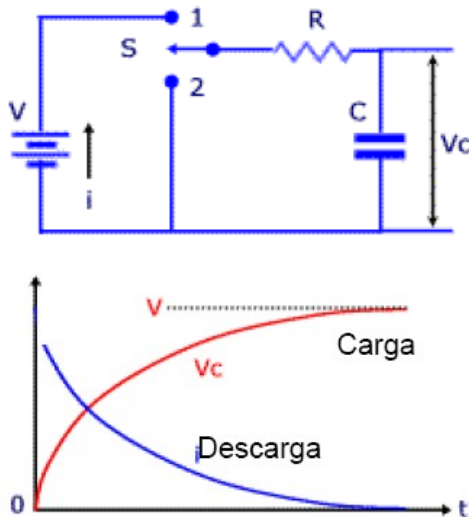
Em um capacitor microfone (comumente conhecido como um microfone condensador), o diafragma age como uma placa do capacitor, e as vibrações produzem alterações na distância entre o diafragma e uma placa fixa, alterando a tensão entre as placas.

### 3.5 Simbologia de Capacitores

	Capacitor não Polarizado		Capacitor não Polarizado
	Capacitor Variavel		Capacitor Ajustável
	Capacitor Polarizado sensível a temperatura		Capacitor polarizado sensível a tensão
	Capacitor Passante		Capacitor de estado dividido
	Capacitor Eletrolítico		Capacitor Eletrolítico
	Capacitor Eletrolítico		Capacitor Eletrolítico Múltiplo
	Capacitor com armadura aterrada		Capacitor Diferencial
	Capacitor com resistência Intrínseca em série		Capacitor com caracterização da capa exterior
	Capacitor Variavel com dupla armadura		Capacitor com tomada de corrente

### 3.6 Carga e descarga de capacitor

Observando o circuito abaixo, nota-se que se a chave S for posicionada na posição 1, inicia-se o processo de carga do capacitor C, assim a tensão  $V_c$  atingirá o limite da tensão  $V$ , onde neste ponto  $V \cong V_c$ .



O tempo deste processo é definido pela equação  $\tau = R \times C$ , chamada de constante de tempo, que é diretamente proporcional ao valor de capacitância e ao valor de resistência.

Para calcularmos o valor de tensão no capacitor  $V_c$  em um determinado instante do processo de carga temos, onde:

$$V_C = V \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$V_c$  = tensão do capacitor

$V$  = tensão da fonte

$t$  = instante analisado

$\tau$  = constante de tempo RC

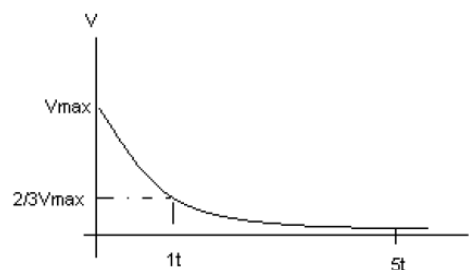
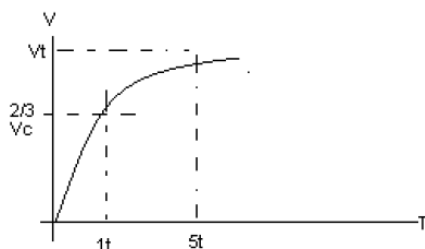
$e$  = constante matemática de Euler (2,718)

Para o processo de descarga, chave S na posição 2, o preceito teórico é o mesmo do processo de carga, sendo a equação que define a  $V_c$  em um determinado instante é:

$$V_C = V_{MAX} \times e^{-\frac{t}{\tau}}$$

onde  $V_{\max}$  é a tensão existente no capacitor C.

Aproximadamente o capacitor se carrega ou descarrega com  $2/3$  da tensão total na primeira constante de tempo e, se carrega ou descarrega totalmente após 5 constantes de tempo.





## 4 - INDUTORES

Um indutor é um dispositivo elétrico passivo que armazena energia na forma de campo magnético, normalmente combinando o efeito de vários loops da corrente elétrica. O indutor pode ser utilizado em circuitos como um filtro passa baixa, rejeitando as altas frequências.

### 4.1 Construção

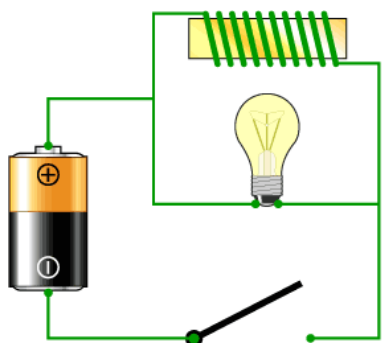
Um indutor é geralmente construído como uma bobina de material condutor, por exemplo, fio de cobre. Um núcleo de material ferromagnético aumenta a indutância concentrando as linhas de força de campo magnético que fluem pelo interior das espiras. Indutores podem ser construídos em circuitos integrados utilizando o mesmo processo que é usado em chips de computador. Nesses casos, normalmente o alumínio é utilizado como material condutor. Porém, é raro a construção de indutores em CI's; eles são volumosos em uma pequena escala, e praticamente restritos, sendo muito mais comum o uso de um circuito chamado "gyrator", que utiliza um capacitor comportando-se como se fosse um indutor.

Pequenos indutores usados para frequências muito altas são algumas vezes feitos com um fio passando através de um cilindro de ferrite.



## 4.2 Funcionamento de um indutor

Para entender como um indutor se comporta em um circuito, a figura é útil:



O que você observa na ilustração é uma bateria, uma lâmpada, uma bobina de fio em volta de um núcleo de ferro (amarelo) e um interruptor. A bobina de fio é um indutor.



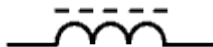

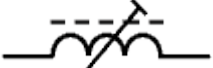
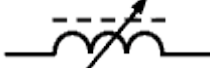



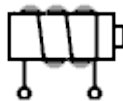
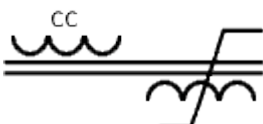



Se tirasse o indutor do circuito, teria uma lanterna comum. Você fecha o interruptor e a lâmpada se acende. Com o indutor, o comportamento é completamente diferente.

A lâmpada é um resistor - a resistência cria calor para fazer o filamento na lâmpada brilhar. O fio na bobina tem muito menos resistência. Então, o que você espera quando liga o interruptor é que a lâmpada brilhe muito fracamente. A corrente deveria seguir o caminho de baixa resistência, através do indutor. Mas o que acontece é que quando você liga o interruptor, a lâmpada brilha intensamente e, na sequência, fica mais fraca. Quando desliga o interruptor, a lâmpada brilha com intensidade e, então, desliga rapidamente.

A razão para esse comportamento estranho é o indutor. Quando a corrente começa a fluir pela bobina, esta tende a estabelecer um **campo magnético**. Enquanto o campo é estabelecido, a bobina inibe o fluxo da corrente. Uma vez que o campo esteja estabelecido, a corrente pode fluir normalmente através do fio. Quando o interruptor é desligado, o campo magnético da bobina mantém a corrente fluindo até que o campo seja nulo. Essa corrente mantém a lâmpada acesa por um período de tempo, mesmo que o interruptor esteja desligado. Em outras palavras, um indutor pode armazenar energia no seu campo magnético e tende a resistir a qualquer mudança na quantidade de corrente que flui através dele.

① Uma das maneiras de visualizar a ação de um indutor é imaginar um canal estreito com água fluindo por ele e uma roda hidráulica pesada com suas pás imergindo no canal. Imagine que, inicialmente, a água não está fluindo. Agora tente iniciar o fluxo. As pás da roda tenderão impedir o fluxo, até elas alcançarem a velocidade da água. No entanto, se tentar impedir o fluxo de água, a roda tentará manter a água se movendo até a sua velocidade de rotação diminuir e atingir a velocidade da água. Um indutor faz a mesma coisa com o fluxo de elétrons em um fio: resiste à mudança no fluxo dos elétrons.

### 4.3 Simbologia de Indutores

	Bobina núcleo Fe-Si		Bobina blindada
	Bobina com núcleo de ferro		Bobina com tomada de corrente
	Bobina ajustável		Bobina variável
	Indutância		Bobina polarizada
	Bobina eletroímã		Bobina eletroímã
	Bobina de núcleo saturado		Bobina com derivação
	Bobina de deflexão		Bobina de choque



## 5 - TRANSFORMADORES DE BAIXA CORRENTE

- a. Função e Teoria básica.
- b. Tipos e aspectos.
- c. Construção.
- d. Aplicações.
- e. Teste de funcionamento.

Dispositivo capaz de converter uma dada tensão alternada, de valor e intensidade determinada, em outra tensão alternada, de valor e intensidade de correntes diferentes, mantendo constante a potência.

Quando uma corrente passa através de um condutor, forma-se um campo magnético ao redor do mesmo. Se for usada corrente alternada, o campo magnético surge, aumenta e diminui de intensidade, reduz-se a zero, para depois se estabelecer no sentido oposto e desaparecer novamente, para cada ciclo da corrente aplicada. Assim outro condutor colocado nesse campo magnético variável terá uma tensão induzida em si mesmo.

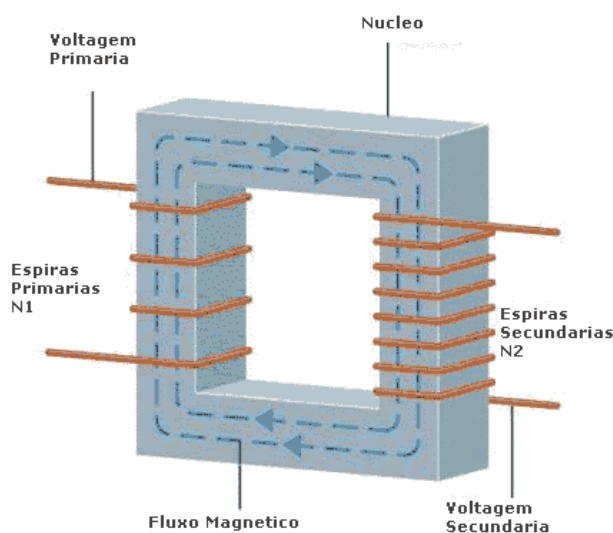
Os 2 condutores são enrolados em bobinas e colocados próximos um ao outro, de maneira que uma bobina seja cortada pelas linhas de fluxo magnético da outra. Assim, transfere-se energia de um circuito para outro, embora os 2 circuitos estejam eletricamente isolados.

A bobina em que é aplicada a tensão alternada é chamada de enrolamento primário e a corrente nesse enrolamento é denominada corrente primária. A bobina que sofre a indução é chamada de enrolamento secundário e a corrente induzida de corrente secundária.

Se o campo magnético produzido pelo primário é constante, sobre o enrolamento secundário não será induzida nenhuma tensão. A tensão induzida é proporcional à velocidade de variação do fluxo magnético provocado pela tensão aplicada no enrolamento primário, tendo por isso a mesma frequência.

Tanto a intensidade da corrente quanto a tensão no secundário podem ser maiores ou menores em relação ao primário, dependendo da relação de espiras entre as duas bobinas e da espessura dos condutores utilizados nos enrolamentos. Evidentemente, a potência de entrada e de saída do transformador mantém-se constante se forem desprezadas as perdas.

O funcionamento do transformador depende do número de espiras do enrolamento primário e do secundário.



A razão entre a tensão de saída no secundário e a tensão de entrada do primário é igual à razão entre o número de espiras das duas bobinas. Esta relação é chamada de relação de tensão.



$$\frac{N1}{N2} = \frac{U1}{U2}$$

Se desprezarmos as perdas no transformador, a potência no secundário será igual à do primário. Portanto, no transformador ideal, a relação de potências é igual a 1. Embora o transformador possa aumentar uma tensão, ele não pode aumentar uma potência, pois não se pode tirar mais potências do secundário do que colocamos no primário. Portanto, quando o transformador aumenta uma tensão, ele reduz a corrente, de maneira que a potência na saída seja sempre igual à de entrada. Esta relação é chamada de relação de correntes.

$$P1 = P2$$

$$U1 \cdot I1 = U2 \cdot I2$$

$$\frac{U1}{U2} = \frac{I2}{I1}$$

$$\frac{N1}{N2} = \frac{I2}{I1}$$

Onde:

N1 = número de espiras no primario

N2 = número de espiras no secundario

U1 = tensão no primario

U2 = tensão no secundario

I1 = corrente no primario

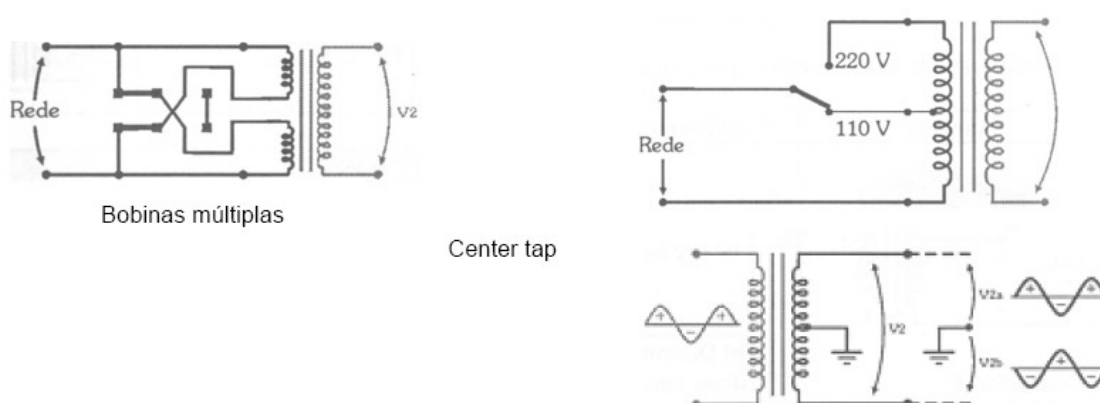
I2 = corrente no secundario

P1 = potência do primario

P2 = potência do secundario

Portanto pode-se perceber que em um trafo elevador de tensão a corrente no secundário é menor que no primário, isto é, o número de espiras do secundário deve ser menor que a do primário; no entanto para o trafo abaixador de tensão, a corrente no secundário é maior que a do primário, isto é, o número de espiras do secundário deve ser maior que a do primário.

Podemos ter algumas configurações de bobinas para conseguirmos diferentes transformações de tensão, como mostra a figura abaixo.



## 5.1 Tipos de transformadores

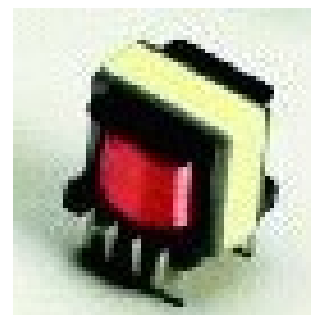
### 5.1.1 Transformador de alimentação

É usado em fontes, convertendo a tensão da rede na necessária aos circuitos eletrônicos. Seu núcleo é feito com chapas de aço-silício, que tem baixas perdas, em baixas frequências, por isto é muito eficiente. Às vezes possuem blindagens, invólucros metálicos.



### 5.1.2 Transformador de áudio

Usado em aparelhos de som a válvula e certas configurações a transistor, no acoplamento entre etapas amplificadoras e saída ao auto-falante. Geralmente é semelhante ao t. de alimentação em forma e no núcleo de aço-silício, embora também se use a ferrite. Sua resposta de frequência dentro da faixa de áudio, 20 a 20000 Hz, não é perfeitamente plana, mesmo usando materiais de alta qualidade no núcleo, o que limita seu uso.



### 5.1.3 Transformador de distribuição

Encontrado nos postes e entradas de força em alta tensão (industriais), são de alta potência e projetados para ter alta eficiência (da ordem de 99%), de modo a minimizar o desperdício de energia e o calor gerado. Possui refrigeração a óleo, que circula pelo núcleo dentro de uma carapaça metálica com grande área de contato com o ar exterior. Seu núcleo também é com chapas de aço-silício, e pode ser monofásico ou trifásico (três pares de enrolamentos).



### 5.1.4 Transformadores de potencial

Encontra-se nas cabines de entrada de energia, fornecendo a tensão secundária de 220V, em geral, para alimentar os dispositivos de controle da cabine - relés de mínima e máxima tensão (que desarmam o disjuntor fora destes limites), iluminação e medição. A tensão de primário é alta, 13.8Kv ou maior. O núcleo é de chapas de aço-silício, envolvido por blindagem metálica, com terminais de alta tensão afastados por cones salientes, adaptados a ligação às cabines. Podem ser mono ou trifásicos.

### 5.1.5 Transformador de corrente

Usado na medição de corrente, em cabines e painéis de controle de máquinas e motores. Consiste num anel circular ou quadrado, com núcleo de chapas de aço-silício e enrolamento com poucas espiras, que se instala passando o cabo dentro do furo, este atua como o primário. A corrente é medida por um amperímetro ligado ao secundário (terminais



do TC). É especificado pela relação de transformação de corrente, com a do medidor sendo padronizada em 5A, variando apenas a escala de leitura e o número de espiras do TC.

#### 5.1.6 Transformador de RF

Empregam-se em circuitos de rádio-frequência (RF, acima de 30kHz), no acoplamento entre etapas dos circuitos de rádio e TV. Sua potência em geral é baixa, e os enrolamentos têm poucas espiras. O núcleo é de ferrite, material sintético composto de óxido de ferro, níquel, zinco, cobalto e magnésio em pó, aglutinados por um plastificante.

Esta se caracteriza por ter alta permeabilidade, que se mantém em altas frequências (o que não acontece com chapas de aço-silício). Costumam ter blindagem de alumínio, para dispersar interferências, inclusive de outras partes do circuito.



#### 5.1.7 Transformadores de pulso

São usados no acoplamento, isolando o circuito de controle, de baixa tensão e potência, dos tiristores, chaves semicondutores, além de isolarem um tiristor de outro (vários secundários). Têm núcleo de ferrite e invólucro plástico, em geral.







## 6 - MATERIAIS SEMICONDUTORES

O átomo é formado basicamente por 3 tipos de partículas elementares: Elétrons, prótons e nêutrons. A carga do elétron é igual a do próton, porém de sinal contrário. Os elétrons giram em torno do núcleo distribuindo-se em diversas camadas, num total de até sete camadas. Em cada átomo, a camada mais externa é chamada de valência, e geralmente é ela que participa das reações químicas

### 6.1 *Classificação dos materiais quanto à condutibilidade elétrica*

Todos os materiais encontrados na natureza são formados por diferentes tipos de átomos, diferenciados entre si pelo seus números de prótons, elétrons e nêutrons. Cada material tem uma infinidade de características, mas uma especial em eletrônica é o comportamento à passagem de corrente. Pode-se dividir em três tipos principais:

#### 6.1.1 *Materiais condutores*

São materiais que não oferecem resistência a passagem de corrente elétrica. Quanto menor for a oposição a passagem de corrente, melhor condutor é o material. O que caracteriza o material bom condutor é o fato de os elétrons de valência estarem fracamente ligados ao átomo, encontrando grande facilidade para abandonar seus átomos e se movimentarem livremente no interior dos materiais. O cobre, por exemplo, com somente um elétron na camada de valência tem facilidade de cedê-lo para ganhar estabilidade. O elétron cedido pode tornar-se um elétron livre.



### 6.1.2 Materiais isolantes

São materiais que possuem uma resistividade muito alta, bloqueando a passagem da corrente elétrica. Os elétrons de valência estão rigidamente ligados aos seus átomos, sendo que poucos elétrons conseguem desprender-se de seus átomos para se transformarem em elétrons livres.

Consegue-se isolamento maior (resistividade) com substâncias compostas (borracha, mica, baquelita, etc.).

### 6.1.3 Materiais semicondutores

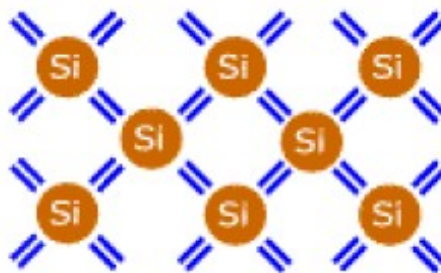
Materiais que apresentam uma resistividade elétrica intermediária. Como exemplo temos o germânio e silício. Os elementos semicondutores podem ser tratados quimicamente para transmitir e controlar uma corrente elétrica.

Seu emprego é importante na fabricação de componentes eletrônicos tais como diodos, transistores e outros de diversos graus de complexidade tecnológica, microprocessadores, e nanocircuitos usados em nanotecnologia. Portanto atualmente o elemento semicondutor é primordial na indústria eletrônica e confecção de seus componentes.

## 6.2 Dopagem

A capacidade de um átomo de se combinar com outros depende do número de elétrons de valência. A combinação só é possível quando este é menor que 8. Elementos com 8 elétrons de valência não se combinam, pois são estáveis e inertes.

Consideramos agora o silício, que é o semicondutor mais usado e tem 4 elétrons de valência.

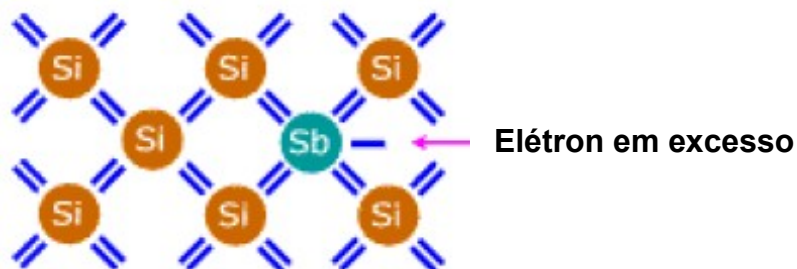


No estado puro cada par de elétrons de átomos distintos formam a chamada ligação covalente, de forma que cada átomo fique no estado mais estável, isto é, com 8 elétrons na camada externa.

O resultado é uma estrutura cristalina homogênea conforme Fig 5. Na realidade é tridimensional. Está assim mostrada por uma questão de simplicidade.

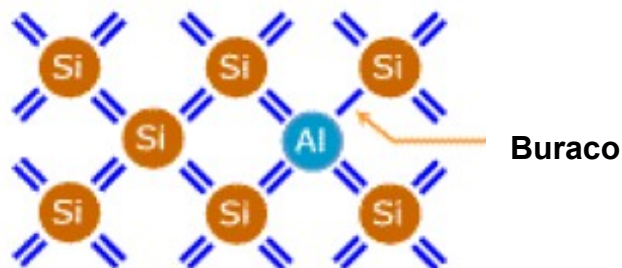
O material continua um semicondutor. Entretanto, quando certas substâncias, chamadas impurezas são adicionadas, as propriedades elétricas são radicalmente modificadas.

Se um elemento como o antimônio, que tem 5 elétrons de valência, for adicionado e alguns átomos deste substituírem o silício na estrutura cristalina, 4 dos 5 elétrons irão se comportar como se fossem os de valência do silício e o excedente será liberado para o nível de condução.



O cristal irá conduzir e, devido à carga negativa dos portadores (elétrons), é denominado **semicondutor tipo n**.

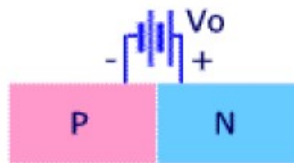
Notar que o material continua eletricamente neutro pois os átomos têm o mesmo número de prótons e elétrons. Apenas a distribuição de cargas muda, de forma a permitir a condução.



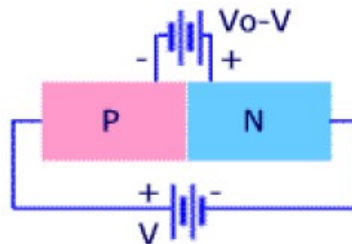
Uma impureza com 3 elétrons de valência (alumínio, por exemplo) é adicionada. Alguns átomos de silício irão transferir um elétron de valência para completar a falta no átomo da impureza, criando um buraco positivamente carregado no nível de valência e o cristal será um **semicondutor tipo p**, devido à carga positiva dos portadores (buracos).

Se um semicondutor tipo P é colocado junto a um do tipo N, na região de contato, chamada junção, haverá a formação de uma *barreira de potencial*, ou *camada de depleção*.

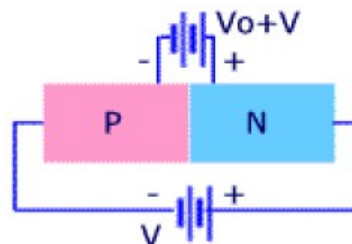
Lembrar que, no estado normal, o semicondutor é eletricamente neutro pois os átomos tanto do semicondutor quanto da impureza têm iguais números de elétrons e prótons. Na junção, os elétrons portadores da parte N tendem a ocupar buracos na parte P, deixando esta com um potencial negativo e a parte N com um potencial positivo e, assim, formando uma barreira potencial  $V_0$ . Assim, a polaridade da barreira de potencial mantém os elétrons na parte N e os buracos na parte P.



Se um potencial externo  $V > V_0$  for aplicado, o potencial de barreira será quebrado e a corrente elevada pois existem muitos elétrons em N. Diz-se então que a junção está diretamente polarizada.



No caso de inversamente polarizada, o potencial de barreira será aumentado, impedindo ainda mais a passagem de elétrons e a corrente será pequena.



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°, esta barreira é de 0,7V para o silício e 0,3V para o germânio.

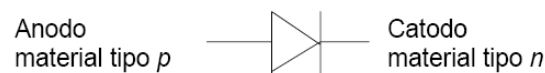




## 7 - DIODO

### 7.1 Introdução

A união de um cristal tipo p e um cristal tipo n, obtém-se uma **junção pn**, que é um dispositivo de estado sólido simples: o diodo semiconductor de junção.



### 7.2 Polarização

Polarizar um diodo significa aplicar uma diferença de potencial às suas extremidades. Supondo uma bateria sobre os terminais do diodo, há uma polarização direta se o pólo positivo da bateria for colocado em contato com o material tipo p e o pólo negativo em contato com o material tipo n.

#### 7.2.1 Polarização direta

No material tipo n os elétrons são repelidos pelo terminal da bateria e empurrado para a junção. No material tipo p as lacunas também são repelidas pelo terminal e tendem a penetrar na junção, e isto diminui a camada de depleção. Para haver fluxo livre de elétrons a tensão da bateria tem de sobrepujar o efeito da camada de depleção.



### 7.2.2 Polarização reversa

Invertendo-se as conexões entre a bateria e a junção pn, isto é, ligando o pólo positivo no material tipo n e o pólo negativo no material tipo p, a junção fica polarizada inversamente.

No material tipo n os elétrons são atraídos para o terminal positivo, afastando-se da junção. Fato análogo ocorre com as lacunas do material do tipo p. Podemos dizer que a bateria aumenta a camada de depleção, tornando praticamente impossível o deslocamento de elétrons de uma camada para outra.

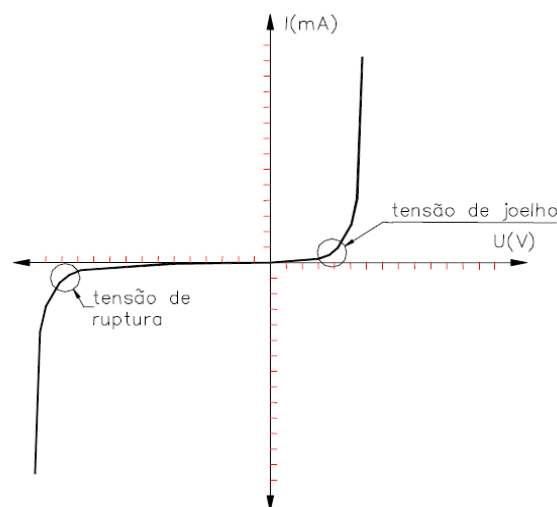
### 7.3 Curva característica

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.

Ao se aplicar a polarização direta, o diodo não conduz intensamente até que se ultrapasse a barreira potencial. A medida que a bateria se aproxima 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**. (No Si é aprox. 0,7V).

O diodo polarizado reversamente, passa uma corrente elétrica extremamente pequena, (chamada de corrente de fuga).

Se for aumentando a tensão reversa aplicada sobre o diodo, chega um momento em que atinge a tensão de ruptura (varia muito de diodo para diodo) a partir da qual a corrente aumenta sensivelmente.



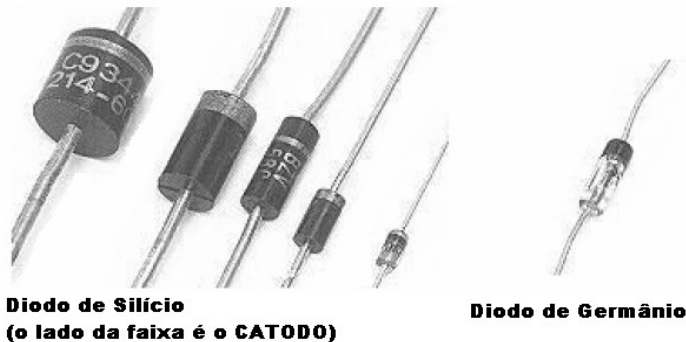


Os fabricantes em geral indicam a potência máxima ou corrente máxima suportada por um diodo.

Ex.: 1N914 -  $P_{MAX} = 250\text{mW}$

1N4001 -  $I_{MAX} = 1\text{A}$

Usualmente os diodos são divididos em duas categorias, os diodos para pequenos sinais (potência especificada abaixo de  $0,5\text{W}$ ) e os retificadores ( $P_{MAX} > 0,5\text{W}$ )

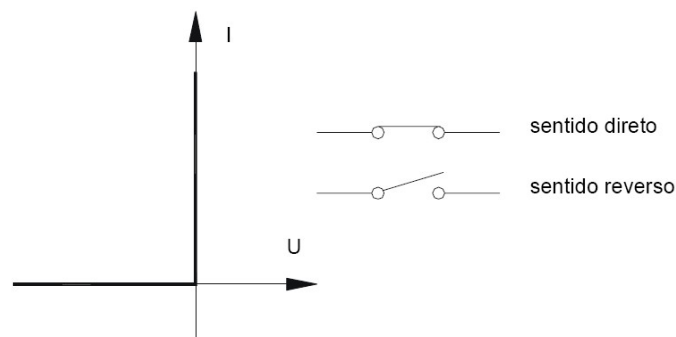


#### 7.4 Análise de circuitos com diodos

Ao analisar ou projetar circuitos com diodos se faz necessário conhecer a curva do diodo, mas dependendo da aplicação pode-se fazer aproximações para facilitar os cálculos.

##### 1ª APROXIMAÇÃO (DIDO IDEAL)

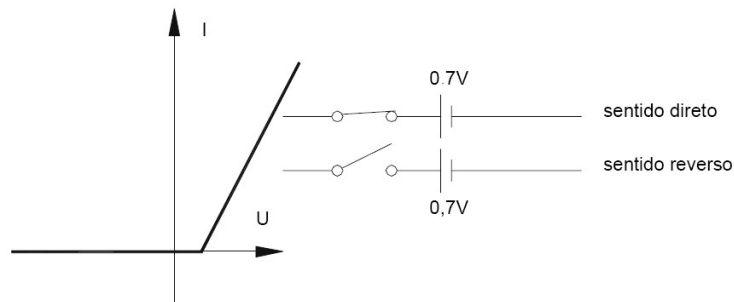
Um diodo ideal se comporta como um condutor ideal quando polarizado no sentido direto e como um isolante perfeito no sentido reverso, ou seja, funciona como uma chave aberta.





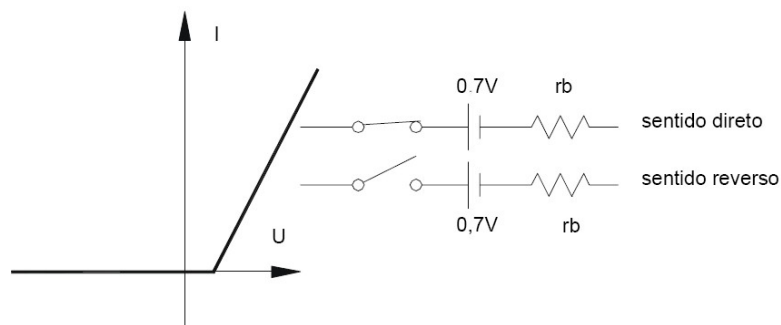
## 2ª APROXIMAÇÃO

Leva-se em conta o fato de o diodo precisar de 0,7V para iniciar a conduzir. Pensa-se no diodo como uma chave em série com uma bateria de 0,7V.



## 3ª APROXIMAÇÃO

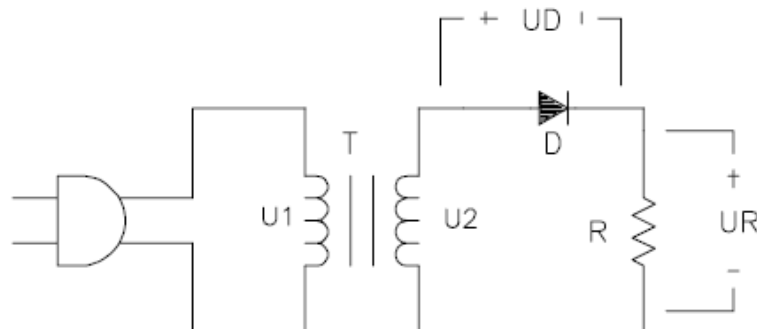
Na terceira aproximação considera a resistência interna do diodo.



## 7.5 Retificação

### 7.5.1 Meia onda

O retificador de meia onda converte a tensão de entrada ( $U_2$ ) ca numa tensão pulsante positiva  $U_R$ . Este processo de conversão de ca para cc, é conhecido como “retificação de meia onda”.

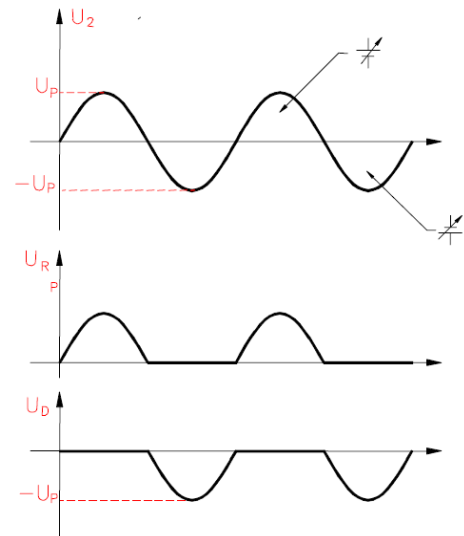


O resistor R indicado no circuito representa a carga ôhmica acoplada ao retificador, podendo ser tanto um simples resistor como um circuito complexo e normalmente ele é chamado de resistor de carga ou simplesmente de carga.

Considerando o diodo como ideal, as curvas são as mostradas na figura ao lado. A saída do secundário tem dois ciclos de tensão: Um semiciclo positivo e um negativo.

Durante o semiciclo positivo o diodo está ligado no sentido direto e age como uma chave fechada e pela lei das malhas toda a tensão do secundário incide no resistor R.

Durante o semiciclo negativo o diodo está polarizado reversamente e não há corrente circulando no circuito.



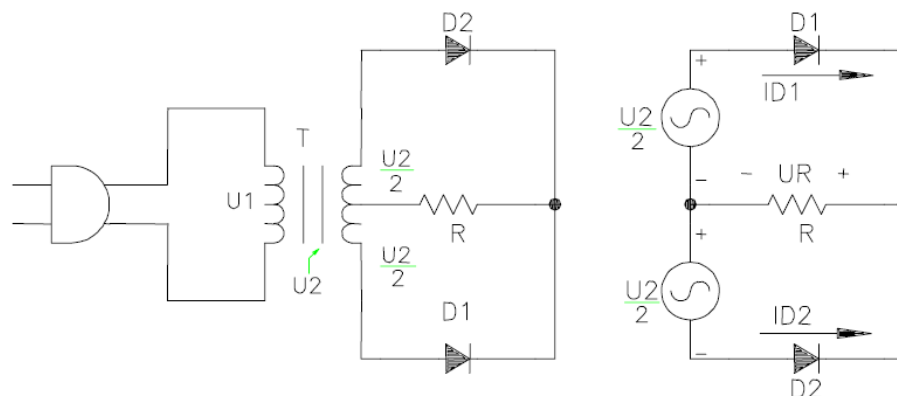
Sem corrente elétrica circulando implica em não ter tensão sob o resistor e toda a tensão do secundário fica no diodo. Este circuito é conhecido como retificador de meio ciclo porque só o semiciclo positivo é aproveitado na retificação.

A tensão média de um retificador de meia onda mostrada por um voltímetro é dado por:

$$V_{cc} = 0.318 U_P \text{ diodo ideal}$$

$$V_{cc} = 0.318 (U_P - V_{\sigma}) \text{ diodo 2ª aproximação}$$

### 7.5.2 Onda completa





A figura acima mostra um retificador de onda completa. Observe a tomada central no enrolamento secundário. Por causa dessa tomada, o circuito é equivalente a dois retificadores de meia onda.

O retificador superior retifica o semiciclo positivo da tensão do secundário, enquanto o retificador inferior retifica o semiciclo negativo da tensão do secundário.

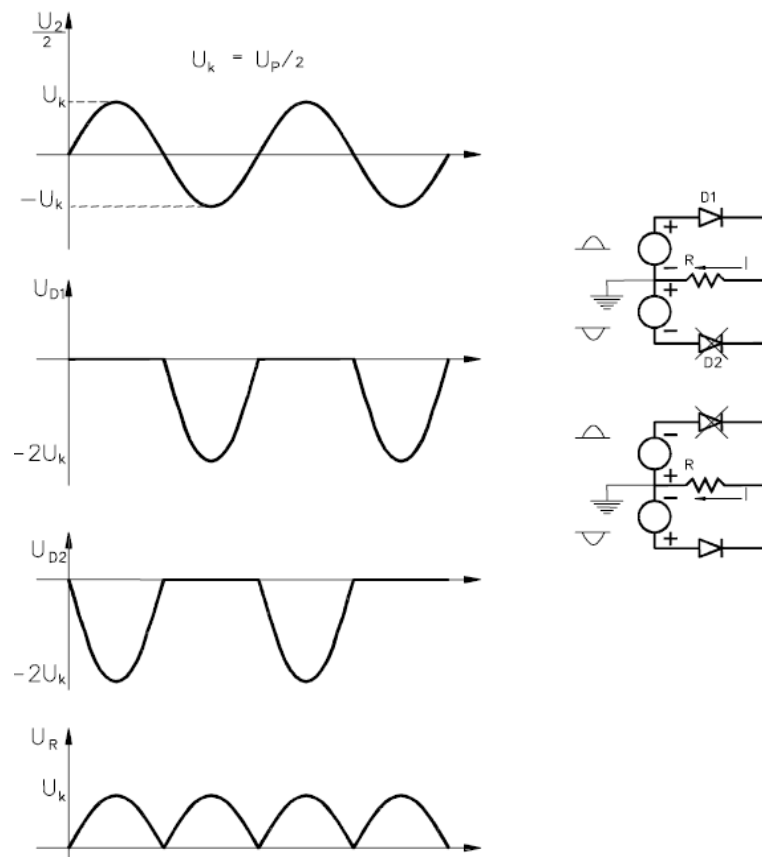
As duas tensões denominadas de  $U_2/2$  são idênticas em amplitude e fase. O transformador ideal pode ser, portanto, substituído por duas fontes de tensão idênticas, como mostra a figura à direita, sem alteração no funcionamento elétrico da rede.

Quando  $U_2/2$  é positiva, D1 está diretamente polarizado e conduz mas D2 está reversamente polarizado e cortado. Analogamente, quando  $U_2/2$  é negativa, D2 conduz e D1 cortado.

A tensão média de um retificador de meia onda mostrada por um voltímetro é similar o do retificador de meia onda com a observação de que agora tem-se um ciclo completo e o valor será o dobro. É dado por:

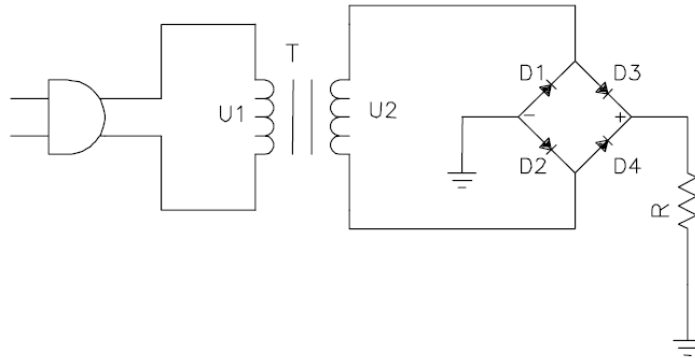
$$V_{CC} = 2 \cdot 0.318 (U_P/2) = 0,318 U_P \text{ diodo ideal Eq. 1-12}$$

$$V_{CC} = 0.636 (U_P/2 - V_\sigma) \text{ diodo 2ª aproximação Eq. 1-13}$$



### 7.5.3 Onda completa em ponte

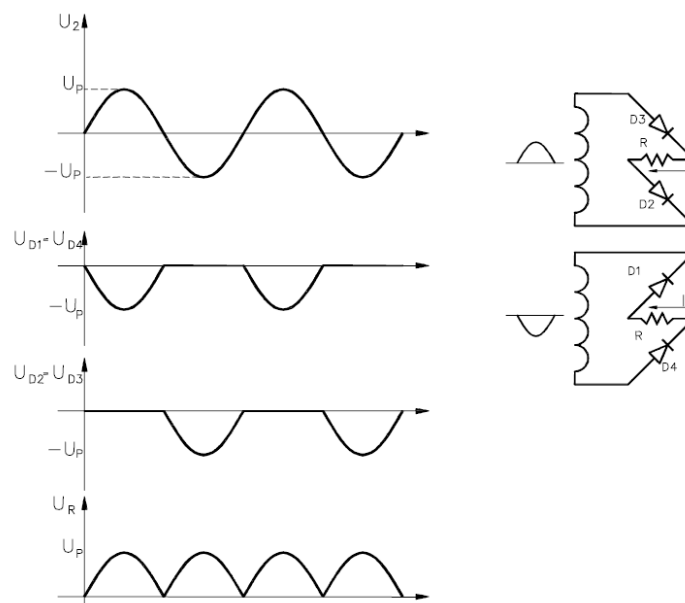
Na figura abaixo é mostrado um retificador de onda completa em ponte. Com o uso de quatro diodos no lugar de dois, elimina-se o uso da tomada central do transformador.



Durante o semiciclo positivo da tensão  $U_2$ , o diodo D3 recebe um potencial positivo em seu anodo, e o D2 um potencial negativo no catodo. Dessa forma, D2 e D3 conduzem, D1 e D4 ficam reversamente polarizado e o resistor de carga R recebe todo o semiciclo positivo da tensão  $U_2$ .

Durante o semiciclo negativo da tensão  $U_2$ , o diodo D4 recebe um potencial positivo em seu anodo, e o diodo D1 um potencial negativo no catodo, devido à inversão da polaridade de  $U_2$ . Os diodos D1 e D4 conduzem e os diodos D2 e D3 ficam reversamente polarizado.

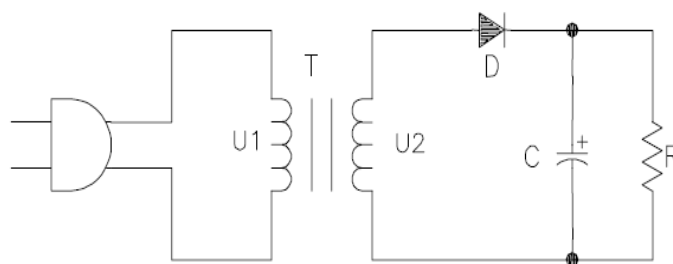
A corrente  $I$  percorre o resistor de carga sempre num mesmo sentido. Portanto a tensão  $U_R$  é sempre positiva.



#### 7.5.4 Retificação com filtro

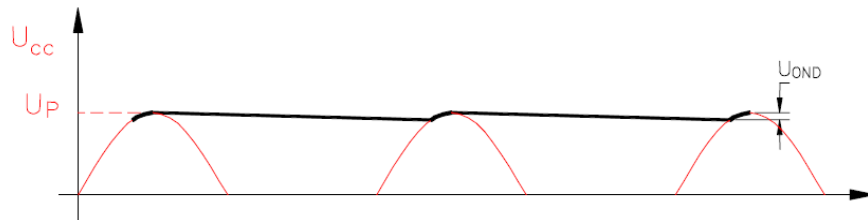
A tensão de saída de um retificador sobre um resistor de carga é pulsante. Durante um ciclo completo na saída, a tensão no resistor aumenta a partir de zero até um valor de pico e depois diminui de volta a zero. No entanto a tensão de uma bateria deve ser estável. Para obter esse tipo de tensão retificada na carga, torna-se necessário o uso de filtro.

O tipo mais comum de filtro para circuitos retificadores é o filtro com capacitor mostrado abaixo. O capacitor é colocado em paralelo ao resistor de carga. Para o entendimento do funcionamento do filtro supor o diodo como ideal e que, antes de ligar o circuito, o capacitor esteja descarregado. Ao ligar, durante o primeiro quarto de ciclo da tensão no secundário, o diodo está diretamente polarizado. Idealmente, ele funciona como uma chave fechada. Como o diodo conecta o enrolamento secundário ao capacitor, ele carrega até o valor da tensão de pico  $U_P$ .



Logo após o pico positivo, o diodo pára de conduzir, o que significa uma chave aberta. Isto devido ao fato de o capacitor ter uma tensão de pico  $U_P$ . Como a tensão no secundário é ligeiramente menor que  $U_P$ , o diodo fica reversamente polarizado e não conduz. Com o diodo aberto, o capacitor se descarrega por meio do resistor de carga. A idéia do filtro é a de que o tempo de descarga do capacitor seja muito maior que o período do sinal de entrada. Com isso, o capacitor perderá somente uma pequena parte de sua carga durante o tempo que o diodo estiver em corte.

O diodo só voltará a conduzir no momento em que a tensão no secundário iniciar a subir e seja igual a tensão no capacitor. Ele conduzirá deste ponto até a tensão no secundário atingir o valor de pico  $U_P$ . O intervalo de condução do diodo é chamado de ângulo de condução do diodo. Durante o ângulo de condução do diodo, o capacitor é carregado novamente até  $U_P$ . Nos retificadores sem filtro cada diodo tem um ângulo de condução de  $180^\circ$ .



A tensão na carga é agora uma tensão cc mais estável. A diferença para uma tensão cc pura é uma pequena ondulação (*Ripple*) causada pela carga e descarga do capacitor. Naturalmente, quanto menor a ondulação, melhor. Uma forma de reduzir a ondulação é aumentar a constante de tempo de descarga ( $R.C$ ). Na prática é aumentar o valor do capacitor. Outra forma de reduzir a ondulação é optar pelo uso de um retificador de onda completa, no qual a frequência de ondulação é o dobro do meia onda. Neste caso é carregado duas vezes a cada ciclo da tensão de entrada e descarrega-se só durante a metade do tempo de um meia onda.

Pode-se relacionar a tensão de ondulação na seguinte fórmula:

$$U_{OND} = \frac{I}{fC}$$

onde:

$U_{OND}$  = tensão de ondulação pico a pico

$I$  = corrente cc na carga

$f$  = frequência de ondulação

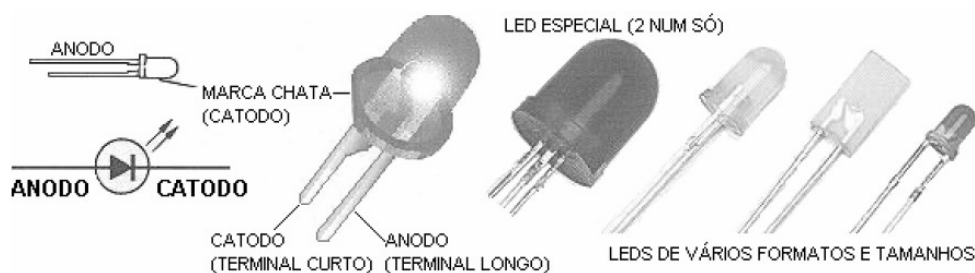
$C$  = capacitância

A escolha de um capacitor de filtro, depende, então, do valor da tensão de ondulação. Quanto menor, melhor. Mas não é viável que a tensão de ondulação seja zero. Como regra de projeto, o habitual é escolher a tensão de ondulação como sendo 10% da tensão de pico do sinal a ser retificado.

## 7.6 Diodos especiais

### 7.6.1 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. O LED é esquematizado como um diodo comum com seta apontando para fora como símbolo de luz irradiada. A corrente que circula no LED é:

$$I_D = \frac{V_S - V_D}{R}$$

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.

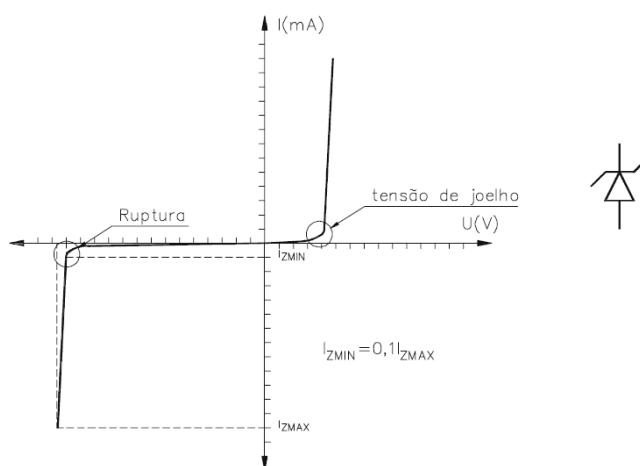
### 7.6.2 Fotodiodo

É um diodo com encapsulamento transparente, reversamente polarizado que é sensível a luz. Nele, o aumento da intensidade luminosa, aumenta sua a corrente reversa.

Num diodo polarizado reversamente, circula somente os portadores minoritários. Esses portadores existem porque a energia térmica entrega energia suficiente para alguns elétrons de valência saírem fora de suas órbitas, gerando elétrons livres e lacunas, contribuindo, assim, para a corrente reversa. Quando uma energia luminosa incide numa junção pn, ela injeta mais energia aos elétrons de valência e com isto gera mais elétrons livres. Quanto mais intensa for a luz na junção, maior será a corrente reversa num diodo.

### 7.6.3 Diodo Zener

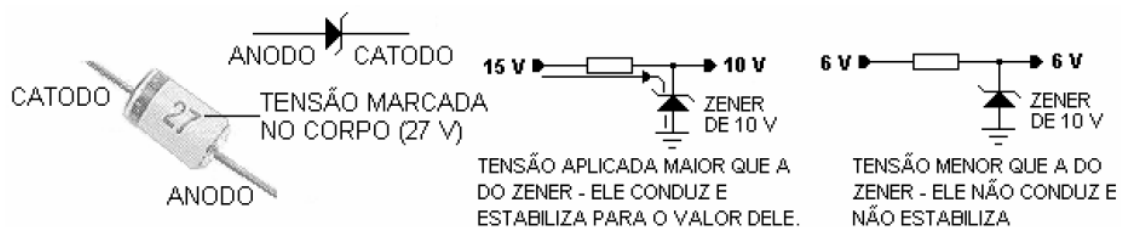
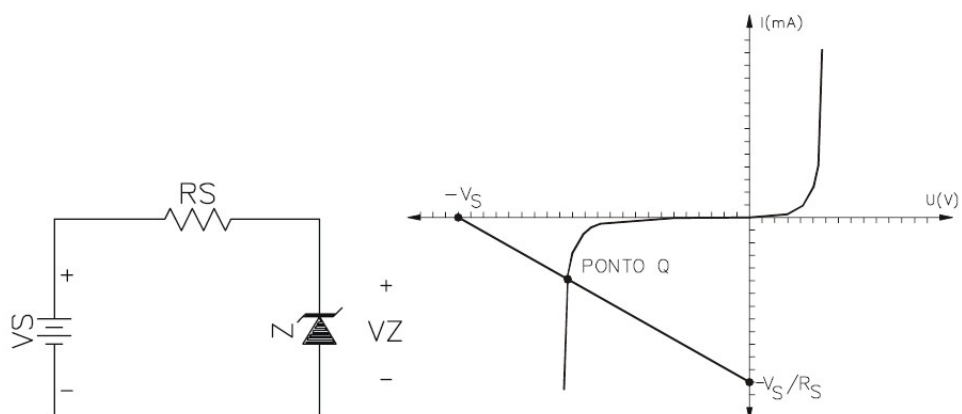
O diodo zener é um diodo construído especialmente para trabalhar na tensão de ruptura. Abaixo é mostrado a curva característica do diodo zener e sua simbologia.



O diodo zener se comporta como um diodo comum quando polarizado diretamente. Mas ao contrário de um diodo convencional, ele suporta tensões reversas próximas a tensão de ruptura.

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.







## 8 - TRANSISTOR BIPOLAR

### 8.1 Introdução

Existe uma infinidade de sinais de interesse em eletrônica que são muitos fracos, como por exemplo, as correntes elétricas que circulam no corpo humano, o sinal de saída de uma cabeça de gravação, etc., e para transforma-los em sinais úteis torna-se necessário amplificá-los. Antes da década de 50, a válvula era o elemento principal nesta tarefa. Em 1951, foi inventado o transistor. Ele foi desenvolvido a partir da tecnologia utilizada no diodo de junção, como uma alternativa em relação às válvulas, para realizar as funções de amplificação, detecção, oscilação, comutação, etc. A partir daí o desenvolvimento da eletrônica foi imenso.

Dentre todos os transistores, o bipolar é muito comum, com semelhanças ao diodo estudado anteriormente, com a diferença de o transistor ser formado por duas junções pn, enquanto o diodo por apenas uma junção.



Transistor  
baixa potência

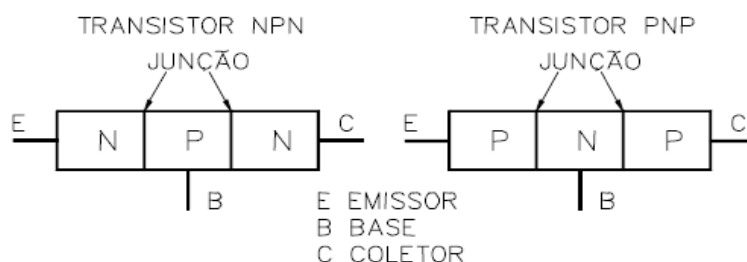


Transistor média  
potência



Transistor de  
potência

## 8.2 Construção física do transistor bipolar



O transistor bipolar é constituído por três materiais semicondutor dopado. Dois cristais tipo n e um tipo p ou dois cristais tipo p e um tipo n. O primeiro é chamado de transistor NPN e o segundo de PNP.

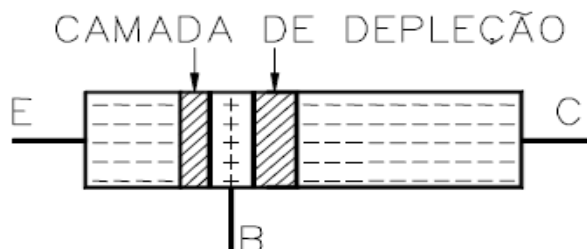
Cada um dos três cristais que compõe o transistor bipolar recebe o nome relativo a sua função. O cristal do centro recebe o nome de base, pois é comum aos outros dois cristais, é levemente dopado e muito fino.

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 tem duas junções, uma entre o emissor a base, e outra entre a base e o coletor. Por causa disso, um transistor se assemelha a dois diodos. O diodo da esquerda é comumente designado diodo emissor - base (ou só emissor) e o da direita de coletor - base (ou só coletor).

Será analisado o funcionamento do transistor NPN. A análise do transistor PNP é similar ao do NPN, bastando levar em conta que os portadores majoritários do emissor são lacunas em vez dos elétrons livres. Na prática isto significa tensões e correntes invertidas se comparadas com o NPN.

A difusão dos elétrons livres através da junção produz duas camadas de depleção. Cada camada tem aproximadamente uma barreira potencial de 0,7V (silício) em 25°C.



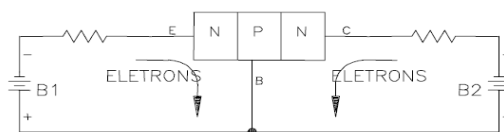
Com os diferentes níveis de dopagem de cada cristal, as camadas de depleção tem larguras diferentes. Tanto maior a largura quanto menor a dopagem. Ela penetra pouco na região do emissor, bastante na base e médio na região do coletor. A figura abaixo mostra as camadas de depleção nas junções do transistor NPN.

### 8.3 Polarização

Para o entendimento da polarização, iremos adotar como análise o transistor NPN. As junções do transistor podem ser polarizadas diretamente ou reversamente.

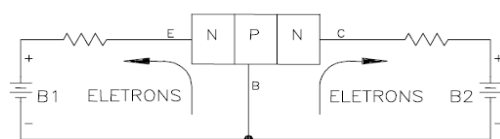
#### 8.3.1 Direta

Na figura abaixo, a bateria B1 polariza diretamente o diodo emissor, e a bateria B2 polariza diretamente o diodo coletor. Os elétrons livres entram no emissor e no coletor, juntam-se na base e retornam para as baterias. O fluxo de corrente elétrica é alto nas duas junções.



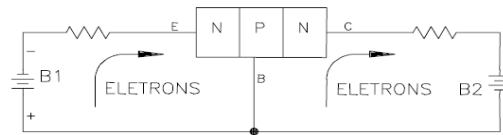
#### 8.3.2 Reversa

Na figura abaixo, os diodos emissor e coletor ficam reversamente polarizado. A corrente elétrica circulando é pequena (corrente de fuga).



#### 8.3.3 Direta-reversa

O diodo coletor está reversamente polarizado e diodo emissor diretamente polarizado. A princípio espera-se uma corrente de fuga no diodo coletor e uma alta corrente no diodo emissor. No entanto isto não acontece, nos dois diodos as correntes são altas.

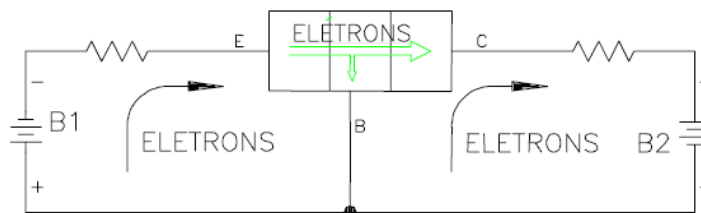


No instante em que a polarização direta é aplicada ao diodo emissor, os elétrons do emissor ainda não penetraram na região da base. Se a tensão entre base e emissor ( $V_{BE}$ ) for maior que 0,7V, muitos elétrons do emissor penetram na região da base. Estes elétrons na base podem retornar ao pólo negativo da bateria B1, ou atravessar a junção do coletor passando a região do coletor. Os elétrons que a partir da base retornam a bateria B1 são chamados de corrente de recombinação. Ela é pequena porque a base é pouco dopada.

Como a base é muito fina, grande parte dos elétrons da base passam a junção basecoletor. Esta junção, polarizada reversamente, dificulta a passagem dos portadores majoritários do cristal de base (lacunas) para o coletor, mas não dos elétrons livres.

Esses atravessam sem dificuldade a camada de depleção penetram na região de coletor. Lá os elétrons livres são atraídos para o pólo positivo da bateria B2.

Em suma, com a polarização direta do diodo emissor, é injetado uma alta corrente em direção a base. Na base uma pequena parcela da corrente, por recombinação, retorna ao pólo negativo da bateria B1 e o restante da corrente flui para o coletor e daí para o pólo positivo da bateria B2, considerando a tensão coletor - base ( $V_{CB}$ ) bem maior que a tensão emissor - base ( $V_{BE}$ ).



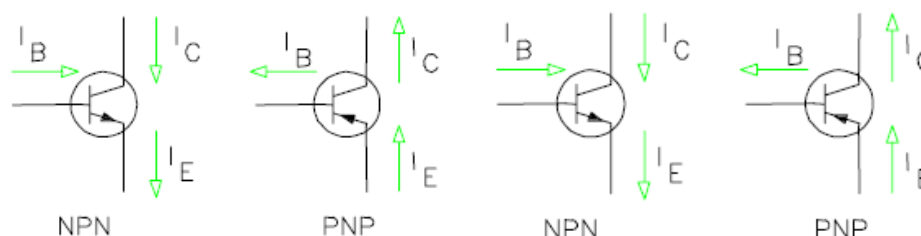
No transistor PNP as regiões dopadas são contrárias as do transistor npn. Isso significa que as lacunas são portadores majoritários no emissor em vez dos elétrons livres.

O funcionamento é como a seguir. O emissor injeta lacunas na base. A maior parte dessas lacunas circula para o coletor. Por essa razão a corrente de coletor é quase igual a do emissor. A corrente de base é muito menor que essas duas correntes.

Qualquer circuito com transistor npn pode ser convertido para uso de transistor PNP. Basta trocar os transistores, inverter a polaridade da fonte de alimentação, os diodos e capacitores polarizados. E o funcionamento será idêntico ao modelo NPN.

Considerando esta similaridade, neste curso os circuitos analisados são sempre os com transistores NPN.

A figura abaixo mostra o símbolo esquemático para um transistor PNP e NPN. A diferenciação a nível de esquemático é feito através da seta no pino do emissor. A direção da seta mostra o fluxo de corrente convencional. Na figura é mostrado também o sentido das correntes convencionais  $I_B$ ,  $I_C$  e  $I_E$ .



A lei de correntes de Kirchhoff diz que a soma de todas as correntes num nó é igual a soma das que saem. Então:

$$I_E = I_C + I_B$$

A relação entre a corrente contínua de coletor e a corrente contínua de base é chamada de ganho de corrente  $\beta_{CC}$  :

$$\beta_{CC} = \frac{I_C}{I_B}$$

Em geral mais de 95% dos elétrons livres atingem o coletor, ou seja, a corrente de emissor é praticamente igual a corrente de coletor. O parâmetro  $\alpha_{CC}$  de um transistor indica a relação entre a corrente de emissor e coletor:

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

Quanto mais fina e levemente dopada a base, mais alto o  $\alpha_{CC}$ .

Pode-se relacionar o  $\alpha_{CC}$  com o  $\beta_{CC}$  :

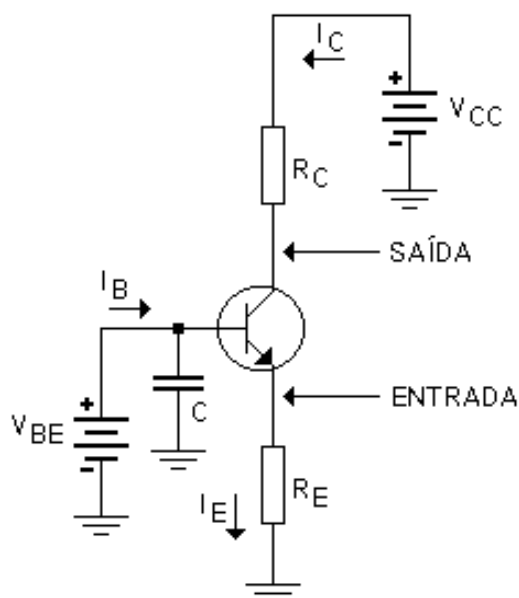
$$\beta_{CC} = \frac{\alpha_{CC}}{(1 - \alpha_{CC})} \qquad \alpha_{CC} = \frac{\beta_{CC}}{(1 + \beta_{CC})}$$

## 8.4 Configurações

Os transistores podem ser ligados em três configurações básicas: base comum (BC), emissor comum (EC) e coletor comum (CC). Essas denominações relacionam-se aos pontos onde o sinal é injetado e retirado, ou ainda, qual dos terminais do transistor é referência para a entrada e saída de sinal.

### 8.4.1 Base comum

No circuito a seguir, observa-se que o sinal é injetado entre emissor e base e retirado entre coletor e base.



#### CARACTERÍSTICAS:

Ganho de corrente ( $G_i$ ):  $< 1$

Ganho de tensão ( $G_v$ ): elevado

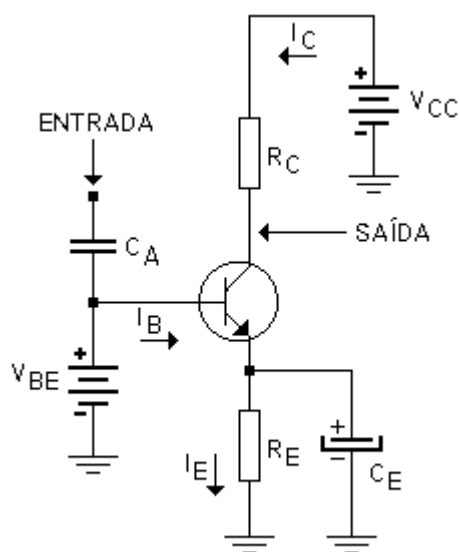
Resistência de entrada ( $R_{IN}$ ): baixa

Resistência de saída ( $R_{OUT}$ ): alta

Desta forma, pode-se dizer que a base é o terminal comum para a entrada e saída do sinal. O capacitor "C" ligado da base a terra assegura que a base seja efetivamente aterrada para sinais alternados.

### 8.4.2 Emissor comum

No circuito emissor comum, o sinal é aplicado entre base e emissor e retirado entre coletor e emissor. O capacitor no emissor "CE" assegura o aterramento do emissor para sinais alternados. CA é um capacitor de acoplamento de sinal.

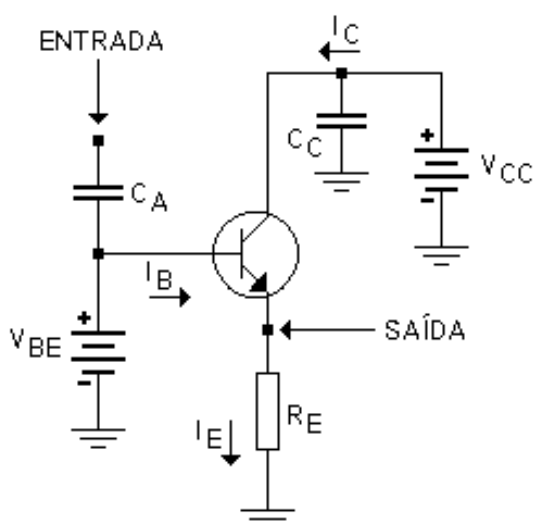


#### CARACTERÍSTICAS:

Ganho de corrente ( $G_i$ ): elevado  
 Ganho de tensão ( $G_v$ ) elevado  
 Resistência de entrada ( $R_{IN}$ ) média  
 Resistência de saída ( $R_{OUT}$ ) alta

### 8.4.3 Coletor comum

A figura a seguir mostra um circuito na configuração coletor comum.



#### CARACTERÍSTICAS:

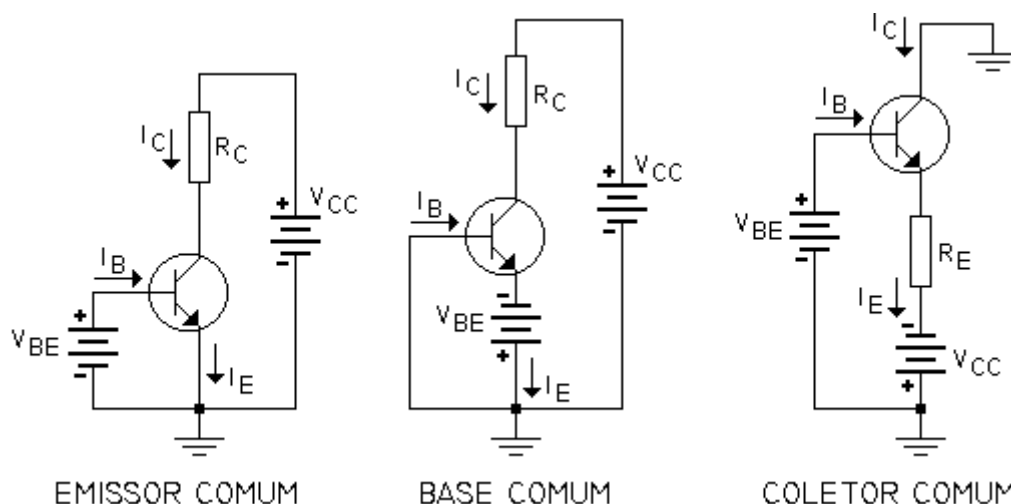
Ganho de corrente ( $G_i$ ): elevado  
 Ganho de tensão ( $G_v$ ):  $\leq 1$   
 Resistência de entrada ( $R_{IN}$ ): muito elevada  
 Resistência de saída ( $R_{OUT}$ ): muito baixa



A configuração coletor comum também é conhecida como seguidor de emissor. Essa denominação é dada devido a tendência de todo o sinal aplicado na entrada estar praticamente presente na saída (circuito de emissor).

O sinal de entrada é aplicado entre base e coletor e retirado do circuito de emissor. O capacitor "CC" ligado do coletor a terra assegura que o coletor esteja aterrado para sinais alternados. CA é um capacitor de acoplamento de sinal.

As configurações emissor comum, base comum e coletor comum, são também denominadas emissor a terra, base a terra e coletor a terra. Essas configurações também podem ser apresentadas conforme ilustram as figuras abaixo:



#### 8.4.4 Representação de tensões e correntes

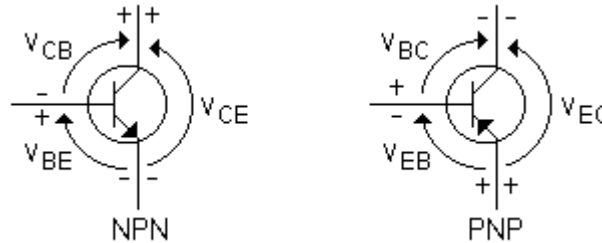
Para representar tensões e correntes em um circuito com transistores, utiliza-se usualmente o método convencional (do + para o -), através de setas.

Para as tensões, a ponta da seta aponta sempre para o potencial mais positivo e as correntes são representadas com setas em sentido contrário as das tensões.

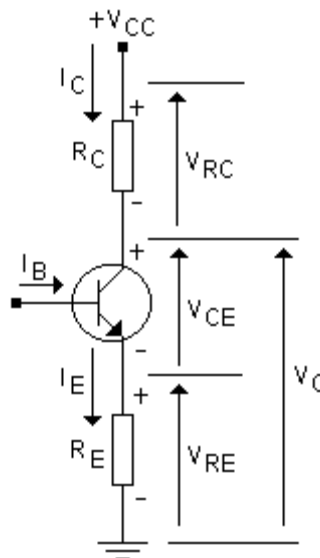
Podemos por exemplo representar uma tensão entre coletor e emissor por  $V_{CE}$  quando o transistor for NPN. Isto significa que o coletor é mais positivo do que o emissor. Em outras palavras, a primeira letra após o V (neste caso o coletor) é mais positiva do que a segunda letra (neste caso o emissor).

Para um transistor PNP a tensão entre coletor e emissor é representada por  $V_{EC}$ , indicando que o emissor é mais positivo do que o coletor.

A figura abaixo ilustra dois transistores com polaridades opostas, utilizando essa representação.



Na figura abaixo temos um outro exemplo utilizando essas representações; observe que as setas que indicam o sentido da corrente são opostas aquelas que indicam as tensões.



Para as tensões  $V_{RC}$  (tensão no resistor de coletor) e  $V_{RE}$  (tensão no resistor de emissor), a ponta da seta indica que a tensão na parte superior desses resistores é mais positiva do que na parte inferior.

#### 8.4.5 Polarização com uma única fonte

Temos visto até agora a polarização de transistores utilizando duas baterias, sendo uma para polarização da junção base-emissor e outra para a junção base-coletor.

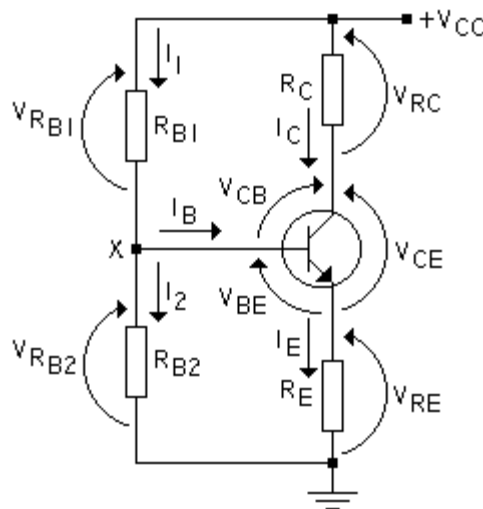
Na maioria das vezes, uma única bateria pode polarizar um circuito transistorizado, visto que o mesmo comporta-se como um circuito fechado.

As tensões nas junções do transistor e nos componentes externos, como resistores, capacitores, indutores, etc. podem ser calculadas utilizando-se as leis de Kirchhoff para tensão (LKT).

Da mesma forma, as correntes podem ser calculadas aplicando-se LKC.

A figura a seguir mostra um transistor com polarização por divisor de tensão na base, cuja teoria será vista no capítulo referente aos circuitos de polarização.

Observe atentamente as indicações das tensões e das correntes em função do sentido das setas.



Aplicando-se LKT, podemos obter várias equações:

1.  $V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - V_{RE} = 0$
2.  $V_{CE} - V_{BE} - V_{CB} = 0$
3.  $V_{CC} - V_{RB1} - V_{RB2} = 0$
4.  $V_{RB1} - V_{RC} - V_{CB} = 0$
5.  $V_{RB2} - V_{BE} - V_{RE} = 0$
6.  $V_{CC} - V_{RC} - V_{CB} - V_{BE} - V_{RE} = 0$

Aplicando-se LKC no ponto X, temos:

1.  $I_B = I_1 - I_2$
2.  $I_1 = I_2 + I_B$

## 8.5 Curvas Características

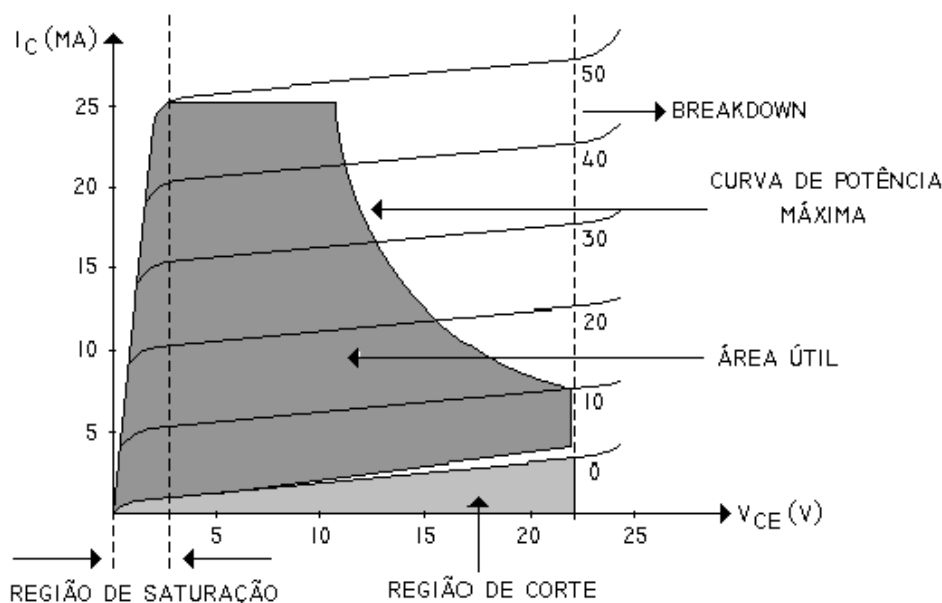
As curvas características definem a região de operação de um transistor, tais como: região de saturação, região de corte, região ativa e região de ruptura.

De acordo com as necessidades do projeto essas regiões de operação devem ser escolhidas. Quando necessitamos de um transistor como chave eletrônica, normalmente as regiões de corte e saturação são selecionadas; no caso de transistor operando como amplificador, via de regra, escolhe-se a região ativa.

A região de ruptura indica a máxima tensão que o transistor pode suportar sem riscos de danos.

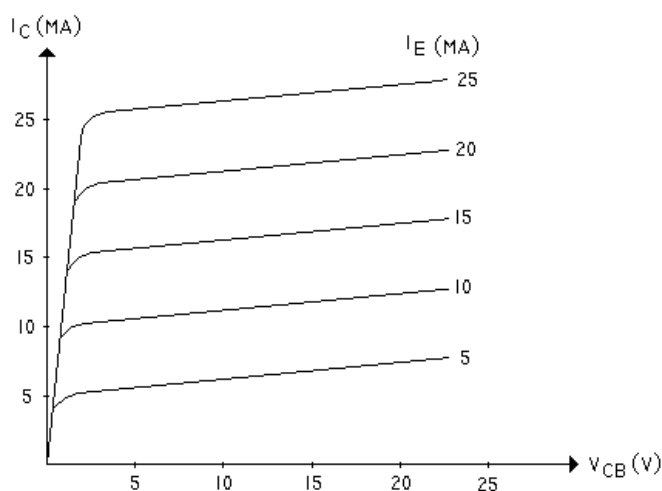
A seguir são mostradas algumas curvas características, apenas como fim didático, não sendo obedecido a rigor nenhum tipo de escala.

### 8.5.1 Emissor Comum



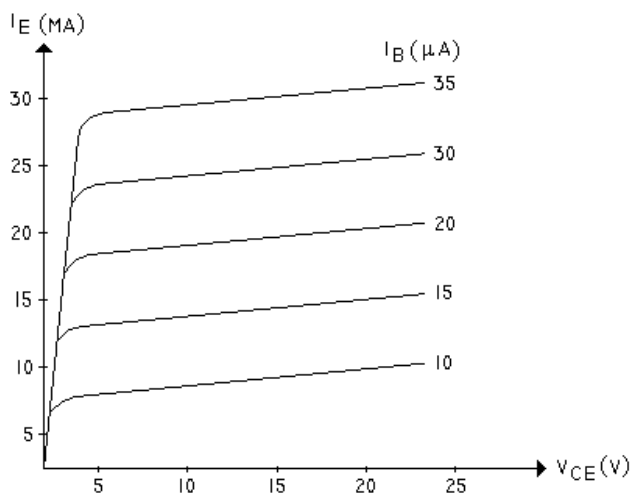
A região de corte é mostrada na área sombreada, onde  $I_B = 0$ . A curva de potência máxima representa a máxima potência que pode ser dissipada pelo transistor. A região útil é delimitada pela curva de potência máxima e é onde o transistor trabalha com segurança, não ultrapassando a máxima potência permitida.

### 8.5.2 Base Comum



Observa-se na curva característica para montagem em base comum, que a corrente de emissor controla a corrente de coletor, enquanto que na curva característica para montagem em emissor comum, a corrente de base controla a corrente de coletor.

### 8.5.3 Coletor comum

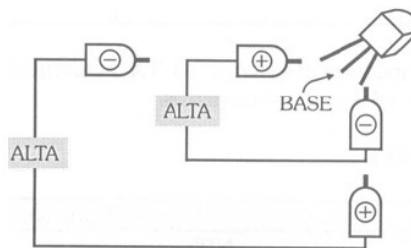


Observe a calibração dos eixos de tensão e corrente para a montagem em coletor comum, onde a corrente de base controla a corrente de emissor.

## 8.6 Identificação de terminais e polaridade

Meça as resistências direta e reversa entre os terminais do transistor, dois a dois, até que um par resulte em resistências ALTAS nos dois sentidos, o terminal que não fizer parte desta última medida é a base. A base não é, necessariamente, o terminal central do transistor.

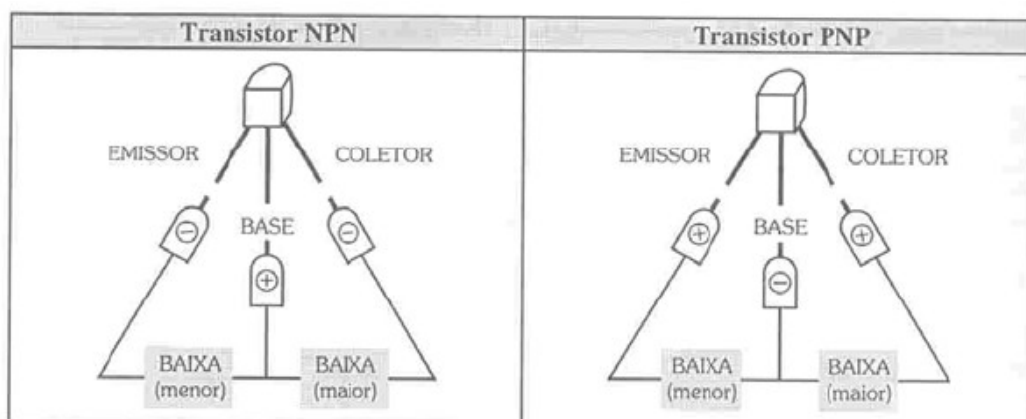
Meça as resistências diretas entre a base e os dois outros terminais. Tais medidas identificarão a polaridade do transistor, sendo NPN se a resistência direta for medida com a ponta de prova positiva (+) na base, e PNP se a resistência direta for medida com a ponta de prova negativa (-) na base.



A identificação do coletor e do emissor é feita pela comparação entre as medidas das resistências diretas (BAIXAS).

As figuras abaixo mostram como a polaridade do transistor e os terminais coletor e emissor podem ser identificados, considerando como exemplo o terminal central como base.

A resistência BAIXA de menor valor identifica o emissor por causa da variação de dopagem entre ele e o coletor. A diferença entre as resistências BAIXAS de menor e de maior valores não é grande; portanto, essas medidas devem ser realizadas com cuidado.





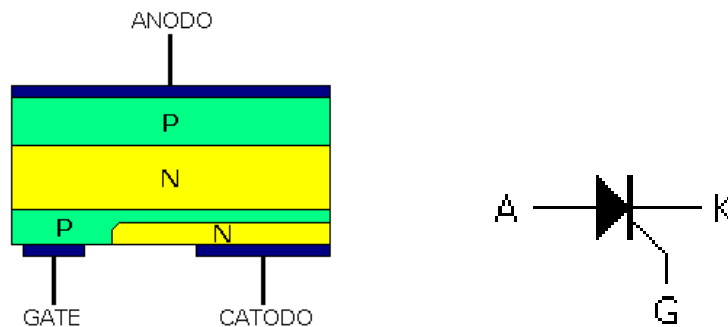
## 9 - TIRISTOR

São os componentes básicos da Eletrônica Industrial, chaveando grandes cargas, como motores, eletroímãs, aquecedores, convertendo CA em CC, CC em CA e gerando pulsos de controle para outros tiristores. O nome tiristor é proveniente do inglês THYRISTOR (thyatron + transistor, onde o thyatron é um retificador a gás usado antigamente).

### 9.1 SCR

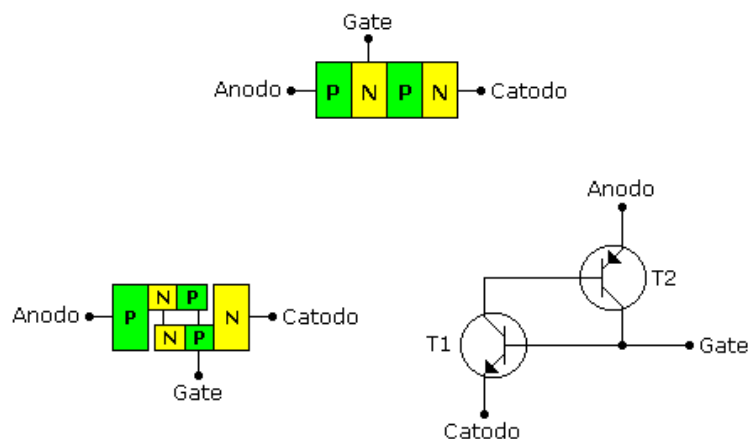
O SCR (Silicon Controlled Rectifier) é um componente eletrônico semicondutor que trabalha de forma semelhante a um diodo, ou seja, permite a passagem da corrente em um único sentido, mas no início de sua condução é regulado por um eletrodo especial, que recebe o nome de gate (porta). O gate, através de um impulso elétrico, permite então a condução do SCR.

A aplicação principal do SCR está no chaveamento eletrônico, onde as tensões de bloqueio e controle de corrente de um transistor não são suficientes.



O SCR é formado por uma estrutura de 4 regiões semicondutoras PNPN. Se dividirmos essa estrutura em duas partes, veremos que cada uma delas forma um transistor. A região que fica junto ao catodo é o gate (porta) que tem a função de levar o dispositivo à condução.

Como essas regiões são divididas em duas partes formando cada uma delas um transistor, observamos que temos um transistor PNP que é constituído pelo anodo e suas regiões contíguas e um outro transistor NPN, que é constituído pelo catodo e as duas regiões acima dele.



O circuito assim obtido forma uma estrutura fortemente realimentada, e dessa forma, qualquer sinal de corrente aplicado ao gate é amplificado e sai pelo coletor do transistor NPN.

O sinal é então aplicado à base do PNP e é amplificado novamente em seu coletor. Este coletor coincide com o terminal gate, fechando o ciclo de realimentação positiva.

O crescimento muito rápido da corrente faz com que o dispositivo entre em saturação. Nestas condições temos entre o emissor do transistor PNP que coincide com o anodo e o emissor do transistor NPN que forma o catodo uma impedância muito pequena.

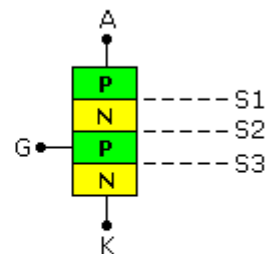
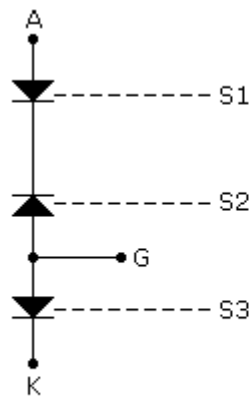


Dessa forma a entrada em condução do SCR depende do sinal aplicado no gate. Uma vez em condução, o sinal aplicado no gate perde o controle sobre a corrente que se forma entre o anodo e o catodo, uma vez que, a própria realimentação interna mantém a condução.

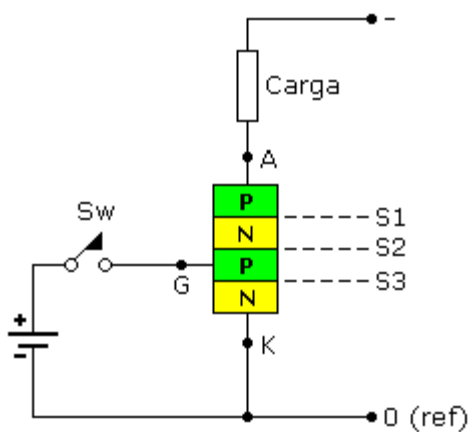
Pode-se portanto, suprimir o sinal de gate sem influir de modo algum sobre a condução do SCR. Para que o SCR entre em condução é necessário que o anodo se torne mais positivo que o catodo.

### 9.1.1 Modo simplificado de operação

As junções formam 3 camadas que denominaremos de S1, S2 e S3, sendo representadas por diodos comuns, conforme ilustra a figura a seguir.



A = anodo  
K = catodo  
G = gate ou porta

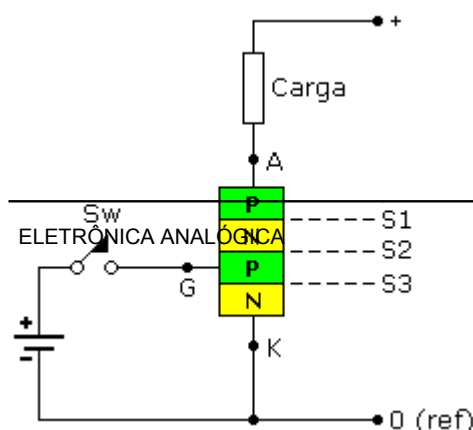


Analisaremos a seguir as condições de bloqueio e condução das camadas S1 a S3, através da aplicação de tensão positiva no gate através da chave Sw.

Não circulará corrente pelo circuito, mesmo com Sw acionada, pois S1 e S3 operam no bloqueio.

Acionando-se Sw, S3 será curto-circuitada e na camada de bloqueio S1 ocorrerá total queda de tensão e

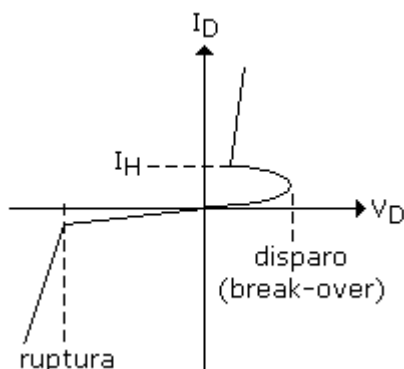
a ação de bloqueio ainda continuam.



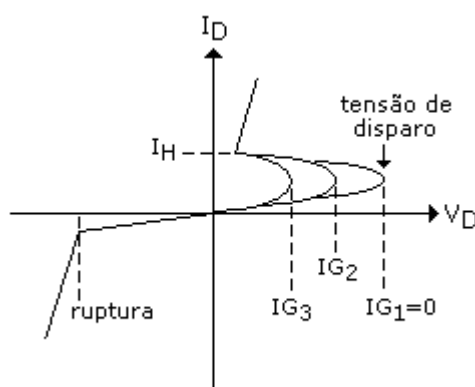
Com Sw aberta o tiristor estará bloqueado pois a secção de passagem S2 opera em bloqueio. Acionando-se Sw o bloqueio de S2 será eliminado e o tiristor conduzirá, circulando corrente pela carga.

Nestas condições o tiristor comutou no sentido de condução (teoricamente A-K), passando a corrente pela carga.

Como vimos anteriormente, após a condução a tensão de gate pode ser removida, no entanto, para que as condições de condução sejam mantidas torna-se necessário uma pequena corrente de manutenção, que denominamos  $I_H$  (holding current). Uma corrente abaixo de  $I_H$  leva o SCR ou tiristor ao corte (condição de bloqueio).



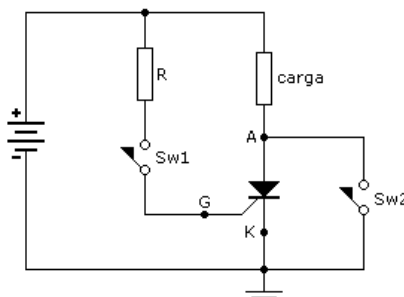
### 9.1.2 Disparo por corrente de gate ( $I_G$ )



Nestas condições  $I_{G3} > I_{G2} > I_{G1}$ . Quando  $I_G=0$ , a tensão aplicada deve atingir a tensão de disparo (break-over). Ao ser injetada uma corrente no gate, a tensão de disparo vai diminuindo, isto significa que se pode disparar o SCR (tiristor) com tensões menores do que a tensão de disparo, controlando o disparo pela corrente aplicada no gate. Para que

o SCR continue conduzindo a corrente  $I_D$  não poderá ser reduzida abaixo de  $I_H$ .

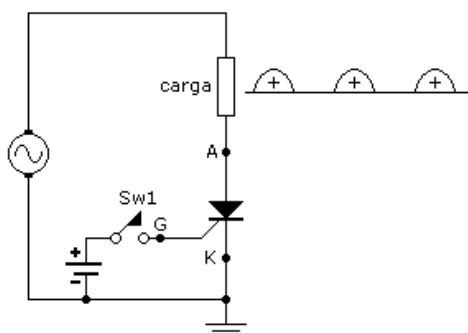
### 9.1.3 Circuito chave CC



Sw1 e Sw2 inicialmente abertas

Inicialmente não haverá corrente no SCR e na carga, pois teremos a condição de bloqueio. Fechando e abrindo Sw1, o SCR conduzirá e teremos corrente na carga e no SCR. Fechando-se Sw2, cessará a corrente no SCR e somente haverá corrente na carga. Abrindo-se Sw2, não haverá corrente na carga e no SCR, pois voltará à condição inicial (bloqueio).

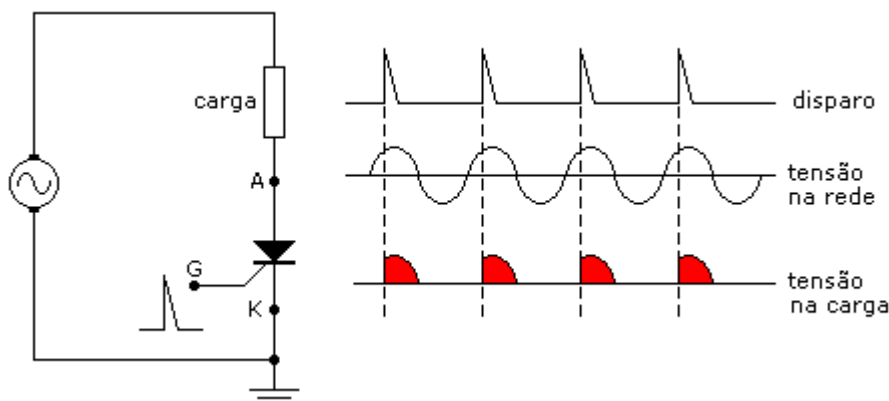
### 9.1.4 Circuito de controle AC



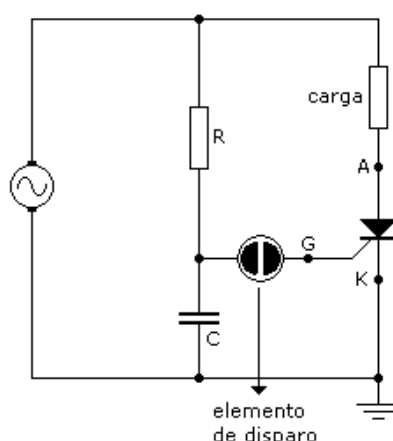
Se mantivermos o SCR disparado (basta para isso comutar Sw1), somente os semiciclos positivos são conduzidos e aparecerão na carga. No entanto, podemos aplicar um pulso de tensão no gate de tal forma a fazê-lo conduzir apenas por alguns instantes.

Observa-se que em virtude dos pulsos de disparo, o SCR começou a conduzir depois de iniciado o semiciclo positivo da tensão da rede. Durante o semiciclo negativo o SCR não conduz. Com isto a tensão na

carga ficou reduzida a pouco mais da metade do semiciclo positivo. Pode-se com isto reduzir a potência desenvolvida na carga.



O SCR pode ser usado também operar com um dispositivo de controle, que permite controlar a potência desenvolvida na carga.



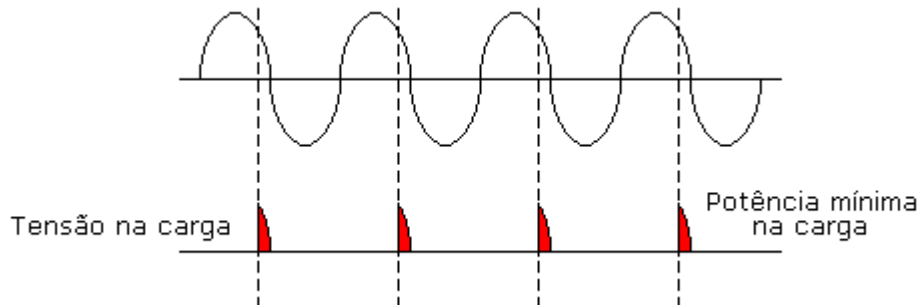
A tensão de disparo do SCR é alcançada em função do tempo de carga do capacitor C através do resistor R.

Supondo que essa tensão seja alcançada logo no início do semiciclo, o SCR dispara e conduz praticamente todo o semiciclo para a carga, que então recebe a potência máxima.

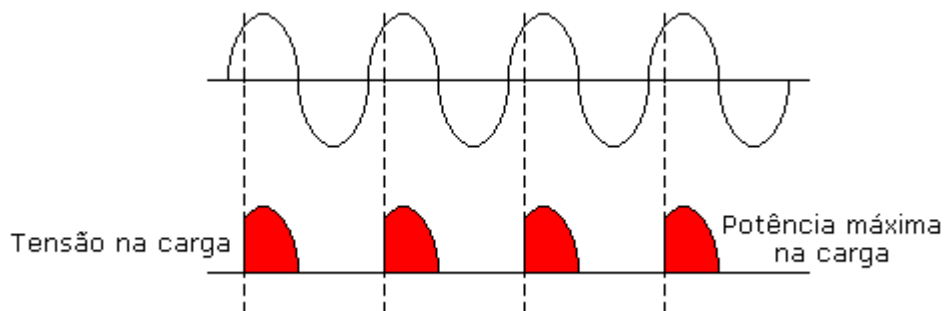
Se o valor de R for grande, a constante de tempo aumentará e a tensão de disparo só é alcançada no final do semiciclo, que corresponde a uma potência menor ou mínima.

Por outro lado, se mantivermos o SCR com seu gate continuamente polarizado por meio de uma fonte externa, o SCR disparará tão logo tenhamos por volta de 2V entre o anodo e catodo, fazendo com que na carga apareça apenas os semiciclos positivos.

A figura a seguir mostra a condição de disparo no final do semiciclo, onde a potência desenvolvida na carga é mínima.



A figura a seguir mostra a condição de disparo no início do semiciclo, onde a potência desenvolvida na carga é máxima.



① *Modificando-se o ângulo de disparo do semiciclo (início, meio ou fim), controla-se a potência desenvolvida na carga.*

Como o ângulo de disparo pode ser controlado pela constante RC, se substituirmos R por um potenciômetro, podemos variar a potência na carga, como por exemplo, o controle de luminosidade de lâmpadas incandescentes.

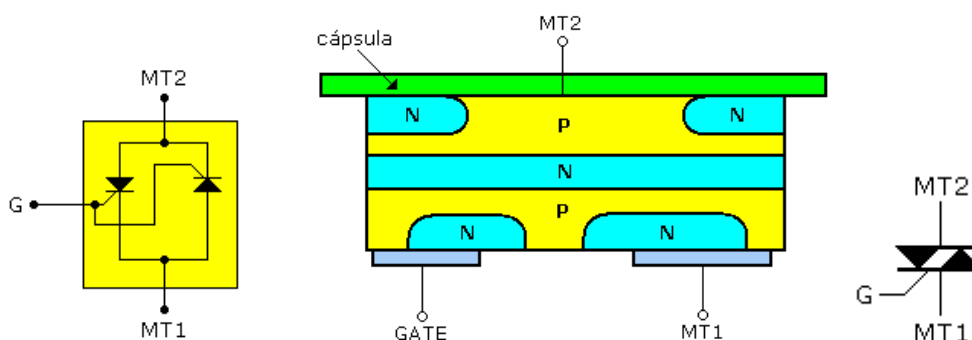
O SCR atua como uma espécie de relê eletrônico, ligando e desligando uma carga a partir de pequenas correntes; é o caso específico do circuito controlador AC visto anteriormente, onde, mantendo a polarização de gate fixa e aplicando-se AC à entrada, na carga estarão presentes somente os semiciclos positivos.

Lembrar que, com polarização de gate externa, o SCR começará a conduzir quando entre anodo e catodo tivermos uma tensão de aproximadamente 2 volts.

## 9.2 TRIAC

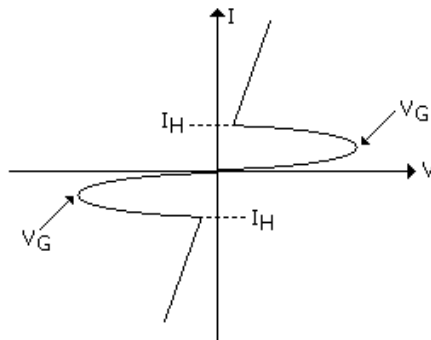
O TRIAC é um componente semicondutor que nasceu da necessidade de se dispor de um interruptor controlado, que apresentasse as características funcionais de um SCR, mas que permitisse o controle do ciclo completo da corrente alternada.

A palavra TRIAC é uma abreviação da denominação inglesa Triode AC que significa triodo para corrente alternada. Como o próprio nome indica, o componente dispõe de três eletrodos.



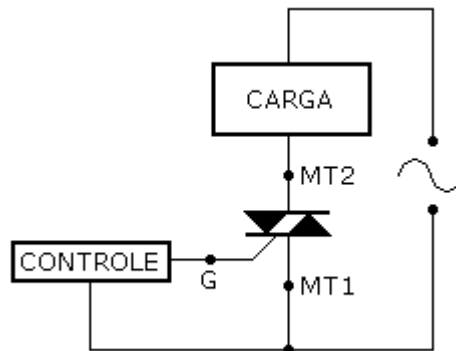
Sua estrutura compõe-se de dois sistemas interruptores, sendo um PNP e outro NPN, ligados em paralelo. Seu circuito equivalente é composto de dois SCRs complementares, ou seja, ligados em paralelo com polaridade invertida.

Observa-se no desenho os dois eletrodos principais MT2 e MT1, que neste caso não são denominados anodo e catodo, pois trabalham com dupla polaridade na tensão alternada. As curvas características assemelham-se as dos SCRs exceto que o TRIAC conduz nos quadrantes I e III.



### 9.2.1 Circuito com TRIAC

Usa-se apenas em corrente alternada (AC), e sua forma clássica de disparo é aplicando-se uma tensão positiva ou negativa no gate, o que permite fazer com que o mesmo dispare em qualquer dos semiciclos.



Existem 4 modos diferentes para disparo de um TRIAC, levando-se em conta que o referencial é sempre o MT1.

- 1) Neste caso o terminal MT2 estará positivo em relação a MT1: tensão de gate positiva, provocando a entrada de corrente através deste terminal cujo sentido é considerado positivo;
- 2) Neste caso o terminal MT2 estará positivo em relação a MT1: a corrente de gate sai do componente e neste caso temos uma tensão de gate negativa;
- 3) Neste caso o terminal MT2 estará negativo em relação a MT1: e a tensão de gate positiva, ou seja, com a corrente entrando no componente;
- 4) Neste caso o terminal MT2 estará negativo em relação a MT1: e a tensão de disparo será através de um pulso negativo.

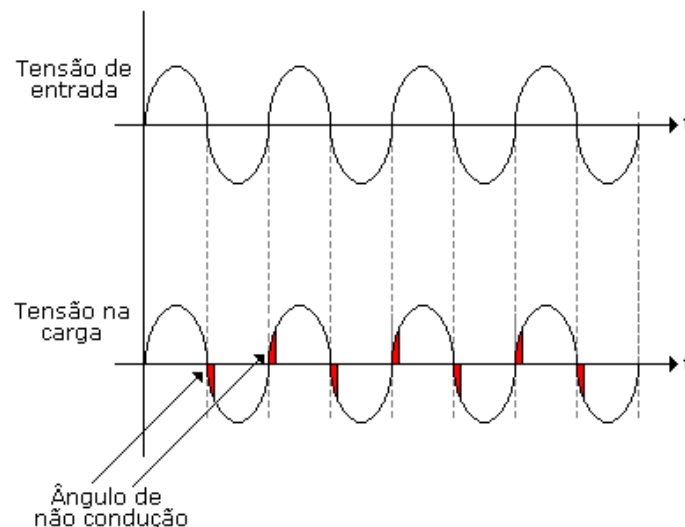
Nas modalidades 1 e 4 obtém maior sensibilidade de disparo para o TRIAC em relação às outras possibilidades. Na modalidade 3 a sensibilidade é decididamente menor e na modalidade 2 é ainda mais

reduzida. Na modalidade 2 somente deverá ser utilizada em TRIACs concebidos especialmente para esse fim.

A diferença mais importante entre o funcionamento de um TRIAC e de um SCR é que o SCR somente conduzirá pelo período de meio ciclo, quando for corretamente disparado, bloqueando-se quando a corrente muda de polaridade; no TRIAC essa condução se dá nos dois semiciclos e somente ocorrerá o bloqueio quando a corrente passa pelo valor zero (ou muito próximo a ele).

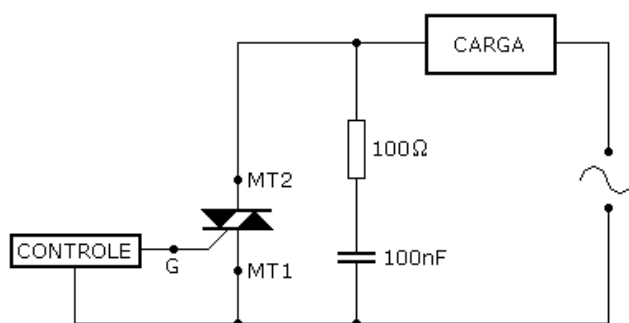
Isto implica numa pequena perda do ângulo de condução, mas não acarreta problemas se a carga for resistiva, onde temos a corrente em fase com a tensão.

No caso de cargas reativas enrolamento de um motor, por exemplo), é preciso levar em conta no esquema do circuito que, no momento em que a corrente passa pelo zero, não coincide com a mesma situação da tensão aplicada. Isto acontece porque nesses momentos ocorre impulsos de tensão entre os dois terminais do TRIAC.



A figura a seguir ilustra uma maneira de contornar esse problema, bastando para isso, acrescentar em paralelo com o TRIAC um resistor e um capacitor ligados em série, com valores típicos da ordem de  $100\Omega$  e  $100\text{ nF}$  respectivamente.



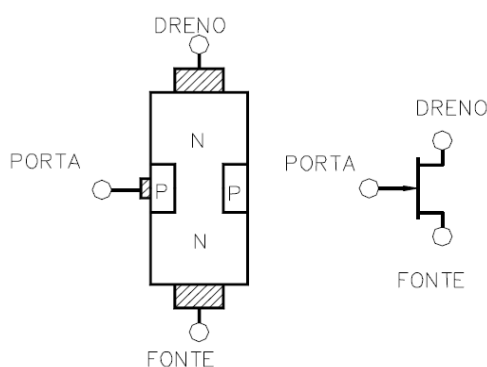




## 10 - COMPONENTES ELETRÔNICOS ESPECIAIS

### 10.1 JFET

Na figura abaixo, é mostrada a estrutura e símbolo de um transistor de efeito de campo de junção ou simplesmente JFET.

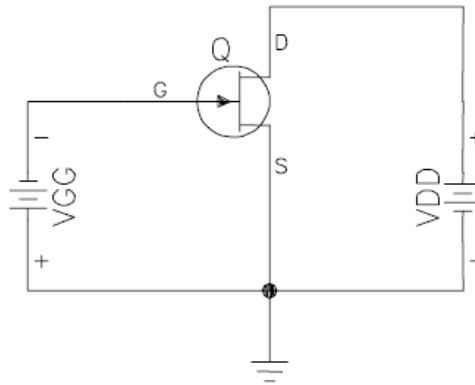


A condução se dá pela passagem de portadores de carga da fonte (S - Source) para o dreno (D), através do canal entre os elementos da porta (G - Gate).

O transistor pode ser um dispositivo com canal n (condução por elétrons) ou com canal p (condução por lacunas). Tudo que for dito sobre o dispositivo com canal n se aplica ao com canal p com sinais opostos de tensão e corrente.

### 10.1.1 Polarização de um JFET

A figura abaixo mostra a polarização convencional de um JFET com canal n. Uma alimentação positiva  $V_{DD}$  é ligada entre o dreno e a fonte, estabelecendo um fluxo de corrente através do canal. Esta corrente também depende da largura do canal.



Uma ligação negativa  $V_{GG}$  é ligada entre a porta e a fonte. Com isto a porta fica com uma polarização reversa, circulando apenas uma corrente de fuga e, portanto, uma alta impedância entre a porta e a fonte. A polarização reversa cria camadas de depleção em volta das regiões p e isto estreita o canal condutor (D-S). Quanto mais negativa a tensão  $V_{GG}$ , mais estreito torna-se o canal.

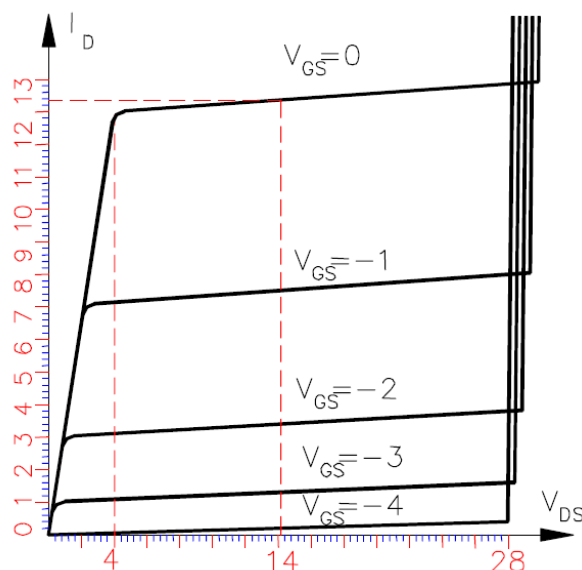
Para um dado  $V_{GG}$ , as camadas de depleção tocam-se e o canal condutor (D-S) desaparece. Neste caso, a corrente de dreno está cortada. A tensão  $V_{GG}$  que produz o corte é simbolizada por  $V_{GS(Off)}$ .

### 10.1.2 Curva característica de dreno

Para um valor constante de  $V_{GS}$ , o JFET age como um dispositivo resistivo linear (na região ôhmica) até atingir a condição de pinçamento ou estrangulamento. Acima da condição de estrangulamento e antes da ruptura por avalanche, a corrente de dreno permanece aproximadamente constante.

Os índices  $I_{DSS}$  referem-se à corrente do dreno para a fonte com a porta em curto ( $V_{GS}=0V$ ).  $I_{DSS}$  é a corrente de dreno máxima que um JFET pode produzir.

Na figura abaixo, é mostrado um exemplo de curva para um JFET. Quando o JFET está saturado (na região ôhmica),  $V_{DS}$  situa-se entre 0 e 4V, dependendo da reta de carga. A tensão de saturação mais alta (4V) é igual à intensidade da tensão de corte da portafonte ( $V_{GS(Off)} = -4V$ ). Esta é uma propriedade inerente a todos os JFET's.



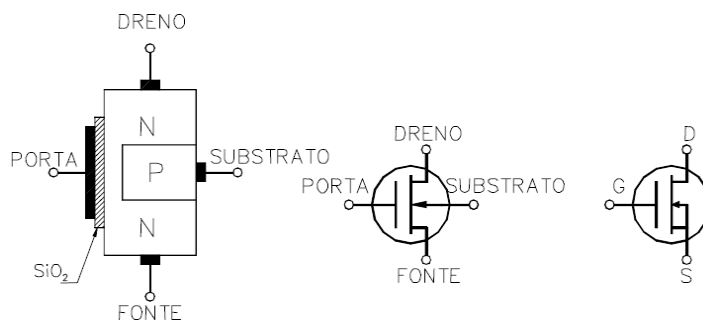
Para polarizar um transistor JFET é necessário saber a função do estágio, isto é, se o mesmo irá trabalhar como amplificador ou como resistor controlado por tensão. Como amplificador, a região de trabalho é o trecho da curva, após a condição de pinçamento e à esquerda da região de tensão  $V_{DS}$  de ruptura. Se for como resistor controlado por tensão a região de trabalho é entre  $V_{DS}$  igual a zero e antes de atingir a condição de pinçamento.

## 10.2 MOSFET

O FET de óxido de semicondutor e metal, MOSFET, tem uma fonte, uma porta e um dreno. A diferença básica para o JFET é porta isolada eletricamente do canal. Por isso, a corrente de porta é extremamente pequena, para qualquer tensão positiva ou negativa.

### 10.2.1 MOSFET de modo depleção

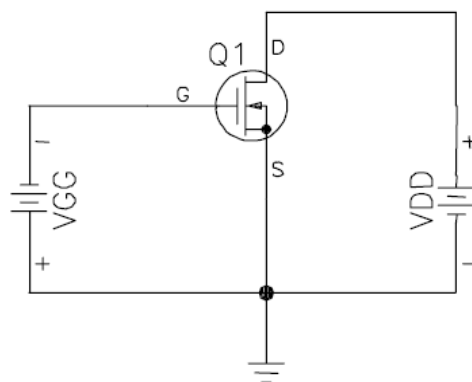
A figura abaixo mostra um MOSFET de modo depleção canal n e o seu símbolo.



O substrato em geral é conectado a fonte (pelo fabricante), Em algumas aplicações usa-se o substrato para controlar também a corrente de dreno. Neste caso o encapsulamento tem quatro terminais.

Os elétrons livres podem fluir da fonte para o dreno através do material n. A região p é chamada de substrato, e ela cria um estreitamento para a passagem dos elétrons livres da fonte ao dreno.

A fina camada de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), que é um isolante, impede a passagem de corrente da porta para o material n.



A figura acima mostra o MOSFET de modo depleção com uma tensão de porta negativa.

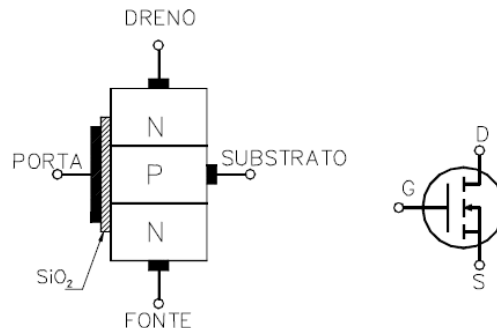
A tensão  $V_{DD}$  força os elétrons livres a fluir através do material n. Como no JFET a tensão de porta controla a largura do canal. Quanto mais negativa a tensão, menor a corrente de dreno. Até um momento que a camada de depleção fecha o canal e impede fluxo dos elétrons livres. Com  $V_{GS}$  negativo o funcionamento é similar ao JFET.

Como a porta está isolada eletricamente do canal, pode-se aplicar uma tensão positiva na porta (inversão de polaridade bateria  $V_{GG}$  do circuito). A tensão positiva na porta aumenta o número de elétrons livres que fluem através do canal. Quanto maior a tensão, maior a corrente de dreno. Isto é que a diferença de um JFET.

#### 10.2.2 MOSFET de modo crescimento

O MOSFET de modo crescimento ou intensificação é uma evolução do MOSFET de modo depleção e de uso generalizado na indústria eletrônica em especial nos circuitos digitais.

A figura abaixo mostra um MOSFET de canal n do tipo crescimento e o seu símbolo.



O substrato estende-se por todo caminho até o dióxido de silício. Não existe mais um canal n ligando a fonte e o dreno.

Quando a tensão da porta é zero, a alimentação  $V_{DD}$  força a ida dos elétrons livres da fonte para o dreno, mas substrato p tem apenas uns poucos elétrons livres produzidos termicamente. Assim, quando a tensão da porta é zero, o MOSFET fica no estado desligado (Off). Isto é totalmente diferente dos dispositivos JFET e MOSFET de modo depleção.

Quando a porta é positiva, ela atrai elétrons livres na região p. Os elétrons livres recombina-se com as lacunas na região próxima ao dióxido de silício. Quando a tensão é suficientemente positiva, todas as lacunas encostadas a dióxido de silício são preenchidas e elétrons livres começam a fluir da fonte para o dreno. O efeito é o mesmo que a criação de uma fina camada de material tipo n próximo ao dióxido de silício. Essa camada é chamada de camada de inversão tipo n. Quando ela existe o dispositivo, normalmente aberto, de repente conduz e os elétrons livres fluem facilmente da fonte para o dreno.

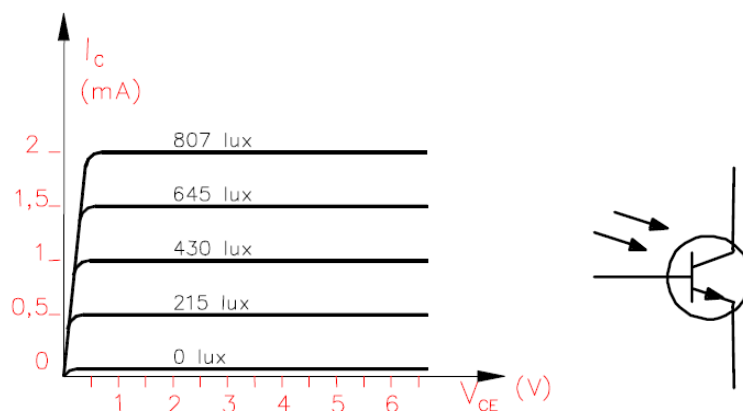
O  $V_{GS}$  mínimo que cria a camada de inversão tipo n é chamado tensão de limiar, simbolizado por  $V_{GS(th)}$ . Quando  $V_{GS}$  é menor que  $V_{GS(th)}$ , a corrente de dreno é zero. Mas quando  $V_{GS}$  é maior  $V_{GS(th)}$ , uma camada de inversão tipo n conecta a fonte ao dreno e a corrente de dreno é alta.  $V_{GS(th)}$  pode variar de menos de 1V até mais de 5V dependendo do MOSFET.

### 10.3 Fototransistor

Os fototransistores são constituídos basicamente de duas junções, havendo uma janela que permite a incidência de a luz sobre a junção



base-emissor, aumentando a condutividade deste diodo emissor, com o conseqüente aumento da corrente de coletor.



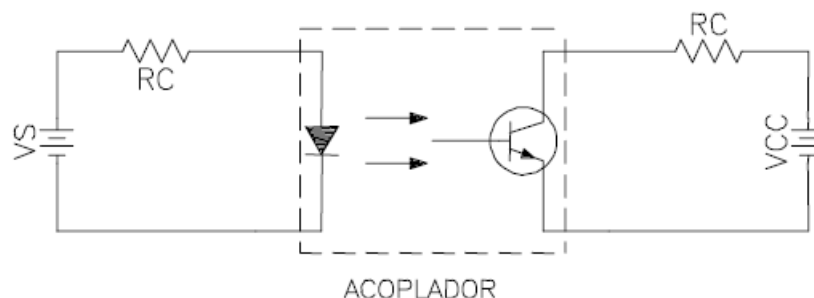
Sempre que houver luz incidindo sobre a base, haverá uma corrente de base e, portanto, o transistor deixa de ser aberto.

#### 10.4 Fotodiodo

Um fotodiodo é uma alternativa ao fototransistor. A diferença é que a luz incidindo no fotodiodo gera a corrente que atravessa o diodo, enquanto no fototransistor, esta mesma luz produz uma corrente de base e por sua vez uma corrente de coletor que é  $\beta$  vezes maior que no fotodiodo. A maior sensibilidade do fototransistor traz como desvantagem uma redução na velocidade de chaveamento.

#### 10.5 Acoplador ótico

Consiste de um LED próximo a um fototransistor, ambos encapsulados em um mesmo invólucro. Ele é muito mais sensível que um LED e fotodiodo devido ao ganho  $\beta$ . O funcionamento é simples, qualquer variação em  $V_S$  produz uma variação na corrente do LED, que faz variar a emissão de luz e, portanto, a corrente no fototransistor. Isso por sua vez, produz uma variação na tensão dos terminais coletor-emissor. Em suma, um sinal de tensão é acoplado do circuito de entrada para o circuito de saída.

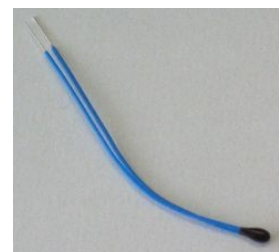


A grande vantagem de um acoplador óptico é o isolamento elétrico entre os circuitos de entrada e de saída. Não existe nenhuma relação entre os terras de entrada e saída.

## 10.6 Termistor

Termístor (ou termistor) são semicondutores sensíveis à temperatura. Conforme a curva característica do termístor, o seu valor de resistência pode diminuir ou aumentar em maior ou menor grau em uma determinada faixa de temperatura.

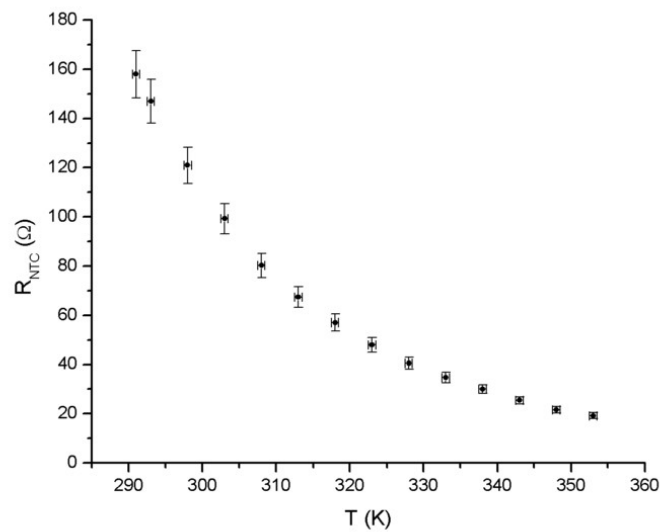
Assim alguns podem servir de proteção contra sobreaquecimento, limitando a corrente elétrica quando determinada temperatura é ultrapassada. Outra aplicação corrente, no caso a nível industrial, é a medição de temperatura (em motores por exemplo), pois podemos com o termístor obter uma variação de uma grandeza elétrica função da temperatura a que este se encontra. Existem basicamente dois tipos de termístores.



### 10.6.1 NTC

(do inglês Negative Temperature Coefficient) é um termistor ou componente eletrônico semicondutor sensível a temperatura, utilizado para controle, medição ou polarização de circuitos eletrônicos. Possui um coeficiente de variação de resistência que varia negativamente conforme a temperatura aumenta, ou seja, a sua resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura.





### 10.6.2 PTC

(do inglês Positive Temperature Coefficient) é um termistor ou componente eletrônico semiconductor sensível a temperatura. Utilizado para controle, medição ou polarização de circuitos eletrônicos. Possui um coeficiente de variação de resistência que varia positivamente conforme a temperatura aumenta, ou seja, a sua resistência elétrica aumenta com o aumento da temperatura.

### 10.7 LDR

LDR (do inglês Light Dependent Resistor ou em português Resistor Variável Conforme Incidência De Luz) é um tipo de resistor cuja resistência varia conforme a intensidade de radiação eletromagnética do espectro visível que incide sobre ele.

Um LDR é um transdutor de entrada (sensor) que converte a (luz) em valores de resistência. É feito de sulfeto de cádmio (CdS) ou seleneto de cádmio (CdSe). Sua resistência diminui quando a luz é muito alta, e quando a luz é baixa, a resistência no LDR aumenta. Um multímetro pode ser usado para encontrar a resistência na escuridão ou na presença de luz intensa. Estes são os resultados típicos para um LDR padrão:

- Escuridão : resistência máxima, geralmente acima de 1M ohms.





- Luz muito brilhante : resistência mínima, aproximadamente 100 ohms.

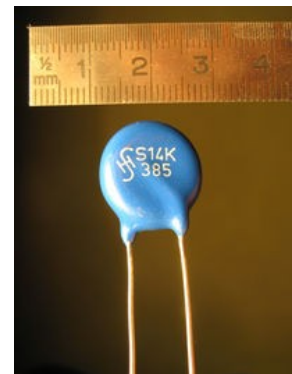
Por muitos anos o LDR mais comum foi o ORP12, mas nos últimos anos, o modelo NORP12 tem se tornado muito comum. O NORP12 possui um diâmetro de aproximadamente 13mm. LDRs menores estão também disponíveis no mercado, existem tipos onde o diâmetro é de aproximadamente 5mm. Um LDR é sensível das faixas: Infravermelho(IR), Luz visível e Ultravioleta (UV) Um LDR pode ser soldado de maneira simples, nenhuma precaução especial é requerida ao fazê-lo. Apenas deve-se ficar atento com aquecimento excessivo, como com qualquer outro componente.

O LDR é muito frequentemente utilizado nas chamadas fotocélulas que controlam o acendimento de poste de iluminação e luzes em residências. Também é utilizado em sensores foto-eletricos assim como foto-diodos.

### 10.8 Varistor

Um varistor ou VDR ( do inglês Voltage Dependent Resistor) é um componente eletrônico cujo valor de resistência elétrica é uma função da tensão aplicada nos seus terminais. Isto é, a medida que a diferença de potencial sobre o varistor aumenta, sua resistência diminui.

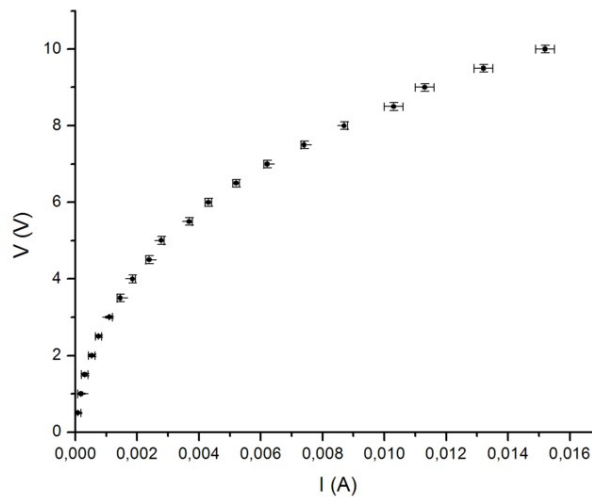
Os VDRs são geralmente utilizados como elemento de proteção contra transientes de tensão em circuitos , tal como em filtros de linha. Assim eles montados em paralelo ao circuito que se deseja proteger, por apresentarem uma característica de "limitador de tensão", impedindo que surtos de pequena duração cheguem ao circuito, e no caso de picos de tensão de maior duração, a alta corrente que circula pelo dispositivo faz com que o dispositivo de proteção (disjuntor ou fusível), desarme, desconectando o circuito da fonte de alimentação.



Atualmente, uma ampla variedade de composições são utilizadas para a obtenção de varistores. Os varistores comercialmente mais usados ainda são a base de óxido de zinco (ZnO), mas varistores de dióxido de estanho (SnO<sub>2</sub>) e dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) possuem um grande potencial tecnológico que ainda não foi utilizado. É exatamente esse o objetivo das pesquisas que estão sendo realizadas no CMDMC-LIEC, que visam otimizar as propriedades dos varistores a base de SnO<sub>2</sub>, para utilização



em altas tensões, a base de  $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$  e  $\text{TiO}_2$  para utilização em baixas tensões, para que esses dispositivos possam em um futuro bem próximo substituir os varistores a base de  $\text{ZnO}$ .



A relação tensão-corrente de um varistor pode ser dada aproximadamente pela seguinte equação empírica:

$$V = CI^\beta$$

Onde:

V é a tensão aplicada nos terminais do varistor,

I é a corrente que circula pelo componente,

C (resistência não-ôhmica) e

$\beta$  (coeficiente de não-linearidade)

Dessa relação, nota-se que quanto maior o valor de  $\beta$ , maior será a sua sensibilidade a variação de tensão.