# MATERIAIS ELÉTRICOS: COMPÊNDIO DE TRABALHOS VOLUME 5

# **SUMÁRIO**

RESISTORES - Isabela Aguiar Dias43	31
UTILIZAÇÃO DE INDUTORES NO RAMO DA ENGENHARIA ELÉTRICA - Kauai Palma Silva4	
CAPACITORES - Camila da Silva Limons47	72
CAPACITORES: DIFERENTES TIPOS E DIFERENTES MATERIA EMPREGADOS NA FABRICAÇÃO - Maurício Romani49	IS 94
CAPACITOR DE TÂNTALO - Diego Raphael de Oliveira5	19
TIRISTOR SCR: RETIFICADOR CONTROLADO DE SILICIO - Fernando Wint	

### **RESISTORES**

### Isabela Aguiar Dias

# 1. INTRODUÇÃO

Os resistores são componentes básicos usados nos circuitos elétricos e eletrônicos para controlar a intensidade de corrente que passa pelos diversos componentes bem com controlar a tensão aplicada em cada parte do circuito.

O funcionamento dos resistores está baseado na resistência elétrica que todos os materiais, com exceção dos supercondutores, possuem de dificultarem a passagem da corrente elétrica. Quando um resistor é percorrido por uma corrente elétrica, ele tende a aquecer por causa do efeito Joule. A potência dissipada pelo resistor é igual ao produto da intensidade da corrente pela tensão aplicada no resistor, portanto, resistores de baixa resistência permitem a passagem de correntes grandes e portanto são eles quem mais dissipam calor. Para evitar o aquecimento excessivo dos resistores eles devem ter tamanhos os apropriados, quanto maior o resistor, mais superfície exposta ele possui, isso significa que ele pode irradiar melhor o calor para o meio ambiente. Existem resistores pirolíticos de diferentes tamanhos, 1W, ½W, ¼W ... conforme a aplicação que terão. A identificação do valor de resistência dos resistores é feita por um código de 4 faixas de cores. As duas primeiras faixas informam uma medida de resistência, a terceira faixa informa a potência de dez que multiplica esta medida.

Quanto aos processos de fabricação os resistores podem ser classificados em resistores de película de carvão, resistores bobinados e resistores de fita metálica.

Existe um grupo especial de resistores que são muito sensíveis a fatores externos, são os resistores termosensíveis NTC (Coeficiente térmico negativo) e PTC (Coeficiente térmico positivo), os resistores sensíveis a tensão, VDR (resistor dependente de voltagem) e os resistores sensíveis a luz, LDR (Resistor dependente da luz).

#### 2. RESISTORES

Os resistores fazem parte de um circuito elétrico e incorporados dentro de dispositivos microelectrónicos ou semicondutores. A medição crítica de um resistor é

a resistência, que serve como relação de voltagem para corrente é medida em ohms, uma unidade SI. Um componente tem uma resistência de 1 ohm se uma voltagem de 1 volt no componente fazer com que percorra, pelo mesmo, uma corrente de 1 ampère, o que é equivalente à circulação de 1 coulomb de carga elétrica, aproximadamente 6.241506 x 10<sup>18</sup> elétrons por segundo. Qualquer objeto físico, de qualquer material é um tipo de resistor. A maioria dos metais são materiais condutores, e opõe baixa resistência ao fluxo de corrente elétrica. O corpo humano, um pedaço de plástico, ou mesmo o vácuo têm uma resistência que pode ser mensurada.

Materiais que possuem resistência muito alta são chamados isolantes ou isoladores. A relação entre tensão, corrente e resistência, através de um objeto é dada por uma simples equação, Lei de Ohm:

$$R = \frac{V}{I}$$

Onde V é a tensão em volts, I é a corrente que circula através de um objeto em ampères, e R é a resistência em ohms. Se V e I tiverem uma relação linear -- isto é, R é constante -- ao longo de uma gama de valores, o material do objeto é chamado de ohmico.

Um resistor ideal tem uma resistência fixa ao longo de todas as frequências e amplitudes de tensão e corrente. Materiais supercondutores em temperaturas muito baixas têm resistência zero. Isolantes (tais como ar, diamante, ou outros materiais não-condutores) podem ter resistência extremamente alta (mas não infinita), mas falham e admitem que ocorra um grande fluxo de corrente sob voltagens suficientemente altas. A resistência de um componente pode ser calculada pelas suas características físicas. A resistência é proporcional ao comprimento do resistor e à resistividade do material (uma propriedade do material), e inversamente proporcional à área da secção transversal. A equação para determinar a resistência de uma seção do material é: Onde P é a resistividade do material, I é o comprimento, e A é a área da secção transversal. Isso pode ser estendido a uma integral para áreas mais complexas, mas essa fórmula simples é aplicável a fios cilíndricos e à maioria dos condutores comuns.

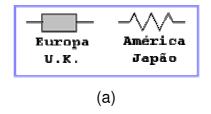
$$R=\rho\frac{l}{\Delta}$$

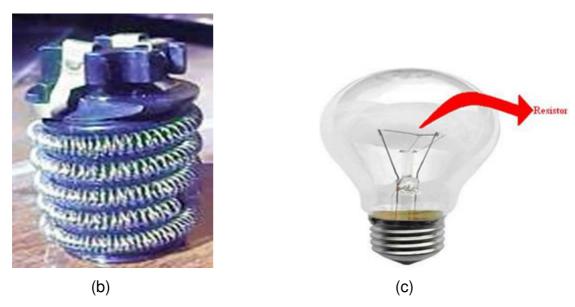
**TABELA 1** – Resistividade a 20°C de alguns materiais

Material	Resistividade (nΩ.m)
Cobre	17,7
Alumínio	28,3
Bismuto	1190
Prata	16,3
Níquel	77,7
Nicromel	995

Esse valor está sujeito a mudanças em altas freqüências devido ao efeito skin, que diminui a superfície disponível da área. Resistores padrões são vendidos com capacidades variando desde uns poucos miliohms até cerca de um gigaohm; apenas uma série limitada de valores, chamados valores preferenciais, estão disponíveis. Na prática, o componente discreto vendido como "resistor" não é um resistor perfeito como definido acima.

Um resistor tem uma voltagem e corrente máximas de trabalho, acima das quais a resistência pode mudar (drasticamente, em alguns casos) ou o resistor pode se danificar fisicamente (queimar, por exemplo). Embora alguns resistores tenham as taxas de voltagem e corrente especificadas, a maioria deles são taxadas em função de sua potência máxima, que é determinada pelo tamanho físico. As taxas mais comuns para resistores de composição de carbono e filme de metal são 1/8 watt, 1/4 watt e 1/2 watt. Resistores de filme de metal são mais estáveis que os de carbono quanto a mudanças de temperatura e a idade. Resistores maiores são capazes de dissipar mais calor por causa de sua área de superfície maior. Resistores dos tipos wire-wound e sand-filled são usados quando se necessita de taxas grandes de potência, como 20 Watts. Além disso, todos os os resistores reais também introduzem alguma indutância e capacitância, que mudam o comportamento dinâmico do resistor da equação ideal. A representação do resistor pode ser dada de duas formas, tanto como um "retângulo" ou um "zig-zag ".





**FIGURA 1** – (a) representação de resistor, (b) e (c) exemplos de aplicação de resistor em chuveiros e filamentos de lâmpadas respectivamente.

# 2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS QUANTO À RESISTÊNCIA

A resistência própria de cada material (resistência específica) está associada ao número de elétrons na camada de valência. Quanto maior o número de elétrons de valência, maior a dificuldade de se obter portadores de carga (elétrons livres) e portanto maior a resistência (menor a condução de corrente).

Condutores, são os materiais que apresentam até 3 elétrons de valência e apresentam muitos elétrons livres à temperatura ambiente e, portanto, possuem baixa resistência elétrica.

Isolantes, são os materiais que apresentam muitos elétrons de valência, com esta camada praticamente completa e estável. Assim, apresentam poucos elétrons livres à temperatura ambiente e, portanto, possuem alta resistência elétrica.

Supercondutores são os materiais que, sob determinadas condições como baixas temperaturas, apresentam resistência elétrica nula. Têm a grande vantagem de não apresentarem perdas térmicas na condução de corrente elétrica.

O fenômeno da supercondutividade foi apresentado pela primeira vez em 1911 pelo físico holandês Kammerlingh Onnes. Ele utilizou mercúrio resfriado até a temperatura do gás Hélio líquido, ou seja, alguns graus acima do zero absoluto (-273,15oC). O físico suíço Karl Alexander Muller obteve a supercondutividade utilizando uma cerâmica com óxido de cobre a uma temperatura mais alta, 35K (aproximadamente –238oC). A supercondutividade tem sido muito pesquisada atualmente e já se tem notícia de se obter o fenômeno em cerâmicas a temperaturas de 123K (-150oC).

Semicondutores, alguns cristais, como o Silício, o Germânio, o Arseneto de Gálio, entre outros, possuem a característica de apresentarem alta resistência sob determinadas condições e baixa resistência em outras. As propriedades desses cristais são utilizadas para a fabricação de componentes eletrônicos como os diodos, os transistores, os circuitos integrados e os microprocessadores.

# 2.2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE RESISTORES

Características fundamentais:

Valor nominal da resistência [Ohm]

Potência de dissipação nominal [W]

Características secundárias:

Tolerância [%] (indica a diferença máxima em percentagem de variação do valor da resistência)

Coeficiente de temperatura

Coeficiente de tensão

Tensão máxima nominal [V]

Tensão de ruído

Diagrama de potência-temperatura

Característica resistência-freqüência

Potência de dissipação nominal [W]\* Tolerância [%] (indica a diferença máxima (+/-) entre o valor nominal e o valor real da resistência) Os três primeiros são sempre indicados. A sucessão de valores nominais de resistência se ajusta a uma progressão geométrica:

$$N = 10 \left( \frac{n-1}{k} \right)$$

onde Né o valor nominal da resistência na posição ne ké um coeficiente relacionado com a tolerância:

**TABELA 2** – Tolerância da resistência

Tolerância [%]	k	Nome da Série
20	6	E6
10	12	E12
5	24	E24
2	48	E48
1	96	E96
0.5	192	E192
0.25	192	E192
0.1	192	E192

# 2.3 CLASSIFICAÇÃO DE RESISTORES

# 2.3.1 RESISTOR DE VALOR ALTERÁVEL



FIGURA 2 – Resistor de valor alterável

É um resistor que possui um controle para alteração de sua resistência por ação diretamente manual ou através de chave de fenda.

# 2.3.2 RESISTOR VARIÁVEL

O resistor variável é utilizado para controlar o volume sonoro em rádio, televisor etc.

## 2.3.3 RESISTOR AJUSTÁVEL

O resistor ajustável é utilizado para proporcionar ajustes definitivos nos circuitos.

#### 2.3.4 RESITOR ESPECIAL

Resistor Especial é um resistor cuja resistência é estabelecida por fenômenos físicos, como a luz, temperatura, tensão elétrica, pressão e outros.

#### 2.3.5 RESITOR FIXO



#### FIGURA 3 – Resistor fixo

Resistor fixo é um resistor que possibilita um único valor de resistência.

### 2.3.6 RESISTORES DE POTÊNCIA

São resistores de fio, geralmente de nÍquel-cromo, para valores de potência acima de 5W.

#### 2.3.7 RESISTOR USO GERAL

São resistores de potência de película de carbono para valores de potência de 1/8W à 2.5W.

O valor da resistência destes resistores é fornecido por anéis coloridos, impressos no corpo do resistor (código de cores comum), o valor da potência é fornecido na última faixa.

#### 2.3.8 RESISTOR DE PRECISÃO

São resistores de película de carbono fabricados por processo especiais. A tolerância do valor da resistência deste resistor é quase nula.

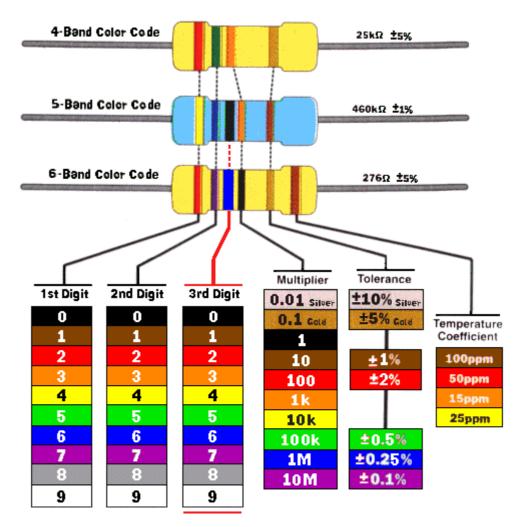
#### 3. RESISTORES DE VALORES FIXOS

O valor de um resistor de carbono pode ser facilmente determinado de acordo com as cores que apresenta na cápsula que envolve o material resistivo, ou então usando um ohmímetro.

A primeira faixa é interpretada como o primeiro dígito do valor ôhmico da resistência do resistor. A segunda faixa dá o segundo dígito. A terceira faixa é chamada de multiplicador e não é interpretada do mesmo modo. O número associado à cor do multiplicador nos informa quantos "zeros" devem ser colocados após os dígitos que já temos.

Se houver a existência de uma quarta faixa, um pouco mais afastada das outras três, é a faixa de tolerância. Ela nos informa a precisão do valor real da resistência em relação ao valor lido pelo código de cores. Isso é expresso em termos

de porcentagem. A maioria dos resistores obtidos nas lojas apresentam uma faixa de cor prata, indicando que o valor real da resistência está dentro da tolerância dos 10% do valor nominal.



**FIGURA 4** – Diagrama de cores na capa de um resistor.

Nas tabelas a seguir são mostrados os valores normalizados de resistores entre 1 e 10. Os outros valores padronizados podem ser obtidos multiplicando esses valores por potências de 10.

**TABELA 3** – Valores normalizados de resistores de 1 e 10.

Série E6	1.0				1.5				2.2				3.3				4.7				6.8			
Série E12	1.0		1.2		1.5		1.8		2.2		2.7		3.3		3.9		4.7		5.6		6.8		8.2	
Série E24	l .	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1

# 4. RESISTORES DE VALORES VARIÁVEIS



FIGURA 5 – Resistores de valores variáveis.

O resistor variável é um resistor cujos valores podem ser ajustados por um movimento mecânico, por exemplo, rodando manualmente. Os resistores variáveis podem ser dos baratos, de volta simples, ou de múltiplas voltas com um elemento helicoidal. Alguns têm um display mecânico para contar as voltas. Tradicionalmente, resistores variáveis são não-confiáveis, porque o fio ou o metal podem se corroer ou se desgastar. Alguns resistores variáveis modernos usam materiais plásticos que não corroem. Outro método de controle, que não é exatamente um resistor, mas se comporta como um, envolve um sistema sensor fotoelétrico que mede a densidade ótica de um pedaço de filme. Desde que o sensor não toque o filme, é impossível haver desgaste.

### **4.1 REOSTATO**

É um resistor variável com dois terminais, sendo um fixo e o outro deslizante. Geralmente são utilizados com altas correntes.

#### 4.2 POTENCIÔMETRO

É um tipo de resistor variável comum, sendo comumente utilizado para controlar o volume em amplificadores de áudio.

### 4.3 METAL ÓXIDO VARISTOR OU M.O.V. / VARISTORES

É um tipo especial de resistor que tem dois valores de resistência muito diferentes, um valor muito alto em baixas voltagens (abaixo de uma voltagem específica), e outro valor baixo de resistência se submetido a altas voltagens (acima da voltagem específica do varistor). Ele é usado geralmente para proteção contra

curtos-circuitos em extensões ou pára-raios usados nos postes de ruas, ou como "trava" em circuitos eletromotores. . É utilizada no projeto de VCOs (Voltage Controlled Oscilators), VCFs (Voltage Controlled Filters), etc.

#### **4.4 LDR**

Em 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 ou 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 disponíveís no mercado, existem tipos onde o diâmetro é de aproximadamente 5mm. Um LDR é sensivel das faixas: Infravermelho(IR), Luz vizivel 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 residencias. Tambem é utilizado em sensores foto-eletricos assim como foto-diodos.



FIGURA 6 – LDR

# **4.5 TERMÍSTOR (OU TERMISTOR)**

São semicondutores sensíveis à temperatura. Existem basicamente dois tipos de termístores:

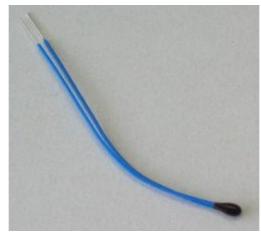
NTC (do inglês Negative Temperature Coefficient) - termístores cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é negativo: a resistência diminui com o aumento da temperatura. São freqüentemente usados em detectores simples de temperaturas, e instrumentos de medidas.

PTC (do inglês Positive Temperature Coefficient) - termístores cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é positivo: a resistência aumenta com o aumento da 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 eléctrica 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 eléctrica função da temperatura a que este se encontra.

Uma versão especializada de PTC é o polyswitch que age como um fusível auto-rearmável.



**FIGURA 7** – Termístor (ou termistor)

### 5. CURVA CARACTERÍSTICA DE RESISTORES

Ao aplicar-se uma diferença de potencial (tensão) V, sobre um condutor de resistência R, circulará sobre este condutor uma corrente elétrica i, sendo o valor da resistência dada pela equação V = R.i onde V é medida em volts (V), i é medida em

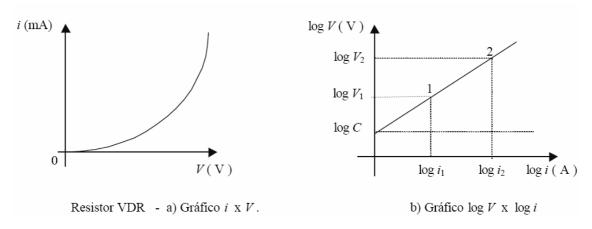
ampéres (A) e R, em ohms. Esta equação é uma definição geral de resistência. Ela pode ser utilizada para qualquer tipo de resistor. Uma resistência é dita ôhmica quando o seu valor numérico independe da tensão aplicada. Se o valor numérico da resistência depender da tensão aplicada, ela é dita não-ôhmica. Quando um resistor obedece à Lei de Ohm, o gráfico i x V é uma linha reta, sendo, por isso, chamado de resistor linear. Em determinados tipos de resistores metálicos, a resistência é constante e independente da tensão aplicada apenas se a temperatura permanecer constante.

Um exemplo de resistor não-linear é o varistor ou VDR (Voltage Dependent Resistor). Sua resistência é altamente dependente da tensão aplicada, por causa da resistência de contato variável entre os cristais misturados que o compõem. Sua característica elétrica é determinada por complicadas redes em série e em paralelo de cristais de carbeto de silício pressionados entre si.

Para o VDR a dependência de V com a corrente i é dada pela equação:  $V=Ci^{\beta}$  onde  $\beta$  depende da composição do material utilizado e do processo de fabricação, tendo valores que variam de 0,05 a 0,40. A constante C depende da temperatura e de características geométricas do VDR, com valores entre 15 e 1000 W. As constantes C e  $\beta$  são determinadas diretamente de um gráfico log V em função de log i, com log V representado no eixo das ordenadas e log i no das abcissas. Aplicando logaritmos decimais aos dois termos da equação V =  $Ci^{\beta}$  tem-se:

$$log V = log C + \beta log i$$

A equação acima é análoga à equação da reta y = A + Bx.



**FIGURA 8** – Gráficos de corrente por tensão para um resistor VDR

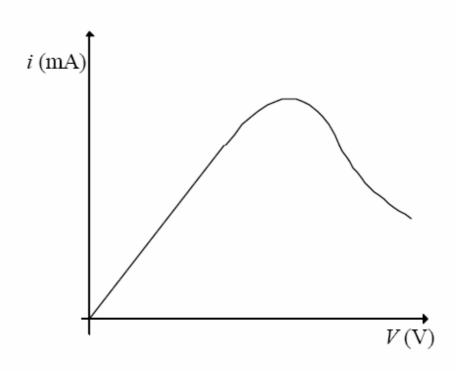
Os dois gráficos da figura representam a curva i em função de V e log V em função de log i para o mesmo varistor.

Existem materiais, conhecidos como semicondutores, que apresentam uma variação de resistência com a temperatura de características incomuns. Eles apresentam um coeficiente de variação da resistência com a temperatura que é grande e negativo, NTC (Negative Temperature Coefficient ), denominados termistores (resistores sensíveis à temperatura). A sua resistência se reduz acentuadamente com o aumento de temperatura e, por este motivo, são comumente utilizados como sensores de temperatura.

Os termistores são fabricados com várias misturas de óxidos, tais como: manganês, níquel, cobalto,ferro, zinco, titânio e magnésio. Podem ter a forma de contas, cilindros ou discos. Estes óxidos são misturados em proporções devidas, para apresentar a resistividade e o coeficiente de variação da resistência com a temperatura desejados.

As medidas de tensão e corrente dos termistores são interessantes quando a sua temperatura for maior que a do ambiente. Se a corrente é pequena, o calor produzido no resistor é desprezível e não há decréscimo na resistência. Se a corrente for proporcional à tensão aplicada, a resistência é constante (embora dependa da temperatura ambiente). Com o posterior acréscimo da corrente, há um aumento na temperatura do termistor em relação à temperatura ambiente. A resistência diminui, embora a corrente continue aumentando. Quando a corrente estabiliza, a tensão também estabiliza e a temperatura do resistor é alta, podendo queimá-lo se não houver dissipação eficiente de calor.

Há resistores que apresentam elevado coeficiente positivo de variação da resistência com a temperatura (figura 2), denominados PTC (Positive Temperature Coefficient). São conhecidos como condutores frios, sendo sua condutividade muito maior em baixas que em altas temperaturas. Os resistores PTC são feitos de BaTiO3 ou soluções sólidas de BaTiO3 e SrTiO3.



# Curva característica de um PTC

FIGURA 9 – gráfico da tensão por corrente para um resisteor PTC

O gráfico corrente x tensão de um PTC mostra nitidamente sua propriedade limitadora de corrente, daí a sua utilidade em muitos circuitos de proteção. Ele obedece à Lei de Ohm para tensões razoavelmente baixas (até 8V aproximadamente), porém, com o aumento gradativo da tensão, a corrente decresce devido ao aumento da resistência causada pelo aquecimento do varistor. A resistência de um PTC também depende da temperatura ambiente e de sua dissipação térmica no meio que o envolve.

O filamento de uma lâmpada incandescente apresenta também uma resistência não - linear. Para correntes pequenas, a resistência é menor do que para correntes elevadas. O aumento da resistência, neste caso, é devido ao efeito Joule produzido pela própria alimentação da lâmpada.

# 6. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

# 6.1 POR DEPOSIÇÃO DE FILME DE MATERIAL RESISTIVO

- → Resistência de carbono aglomerado;
- → Resistência de película de carbono;
- → Resistência de película metálica;

### 6.1.1 RESISTÊNCIA DE CARBONO AGLOMERADO

Estes resistores são fabricados utilizando uma mistura de pó de grafite com um material neutro (talco, argila, areia ou resina acrílica). A resistência é dada pela densidade de pó de grafite na mistura.

O acabamento deste componente é feito com camadas de verniz, esmalte ou resina.

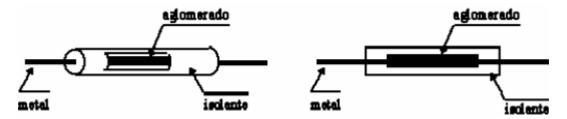


FIGURA 10 – Resistência de Carbono aglomerado

- → Apresenta baixa precisão.
- →Tolerâncias de 5%, 10 e 20 %.
- →A oxidação do carbono pode provocar a alteração do valor nominal da resistência.
  - → Apresenta altos níveis de tensão de ruído.
  - →baixo custo de 3 a 6 vezes menor que os de película metálica.

### 6.1.2 RESISTÊNCIA DE PELÍCULA DE CARBONO

Este componente é fabricado pela deposição em vácuo de uma fina película de carbono cristalino e puro sobre um bastão cerâmico, para resistores de valor elevado, o valor é ajustado pela abertura de um suco espiralado sobre sua superfície, quanto mais próxima estiver uma volta da outra na estria maior será a resistência do resistor, finalmente o resistor será recoberto por uma camada protetora de esmalte.

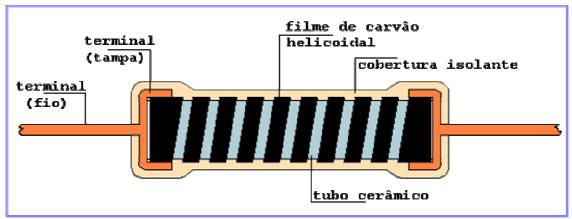


FIGURA 11 – Resistência de Película de carbono

### Vantagens:

- → Estes resistores são bastante precisos.
- → Apresentam baixos níveis de ruído.
- → Apresentam grande estabilidade nos circuitos.
- → São fabricados com tolerância de ± 1%
- → Alcançam valores de 100 M W.

# 6.1.3 RESISTÊNCIA DE PELÍCULA METÁLICA

Este componente é fabricado de um modo muito semelhante ao do resistor de carbono onde o grafite é substituído por uma liga metálica que apresenta alta resistividade ou por um óxido metálico. A película normalmente é inoxidável, o que impede a variação do valor da resistência com o passar do tempo. Pode ser fabricado em espiral o que aumenta a resistência.

### Vantagens:

- → Apresentam grande precisão
- →Tolerâncias entre 0,1% e 2%.
- → Desvantagens
- →alto custo
- →baixa potência de dissipação.

#### **6.2 FIO RESISTIVO ENROLADO**

- → Resistência bobinada:
- → Resistência bobinada vitrificada;

#### 6.2.1 RESISTOR BOBINADO

Este componente pode ser fabricado com um material de resistência específica ou pela união de vários materiais, ou pelo uso de ligas metálicas. O fio condutor é enrolado em um tubo cerâmico e para evitar curto-circuito entre as espiras, é feito o recobrimento do fio com esmalte que suporta altas temperaturas.

#### Vantagens:

- →Baixo custo.
- → Alta dissipação de potência.

### Desvantagens:

- → Grandes dimensões
- →Baixa precisão

### 6.2.2 RESISTENCIA BOBINADA VITRIFICADA

O processo de fabricação é o mesmo do resistor bobinado, tendo como diferenças que o tubo onde é enrolado o condutor é vitrificado e a isolação entre as espiras é feita com uma camada de material vítreo de grande espessura. Isto permite um melhor isolamento térmico da resistência de outros componentes que podem interferir em suas características elétricas.

#### 7. RESISTORES VARIÁVEIS

Estes componentes são bastante empregados em controle de volume, controle de fontes de alimentação e em filtros, são conhecidos por "Trimpots", "potenciômetros" ou "reostatos" e podem ser fabricados tanto com películas de carbono, metálicas ou por fio enrolado, e a variação da resistência é obtida pela variação comprimento do condutor ou pela área da película metálica definida entre o cursor e os terminais do componente.

#### 7.1 EFEITOS DA TEMPERATURA NA RESISTENCIA

O aumento da temperatura de um condutor pode ser provocado tanto pela corrente que circula por ele como pela absorção de calor do ambiente. Na maioria dos condutores este aumento corresponde ao aumento da resistência, conforme mostrado na Figura 3. Observamos que existe uma relação linear entre a temperatura e a resistência na faixa de temperatura na qual o material condutor é normalmente usado. Embora a curva passe a ser não-linear quando a resistência se aproxima de zero, uma linha reta pode ser extrapolada como uma continuação da

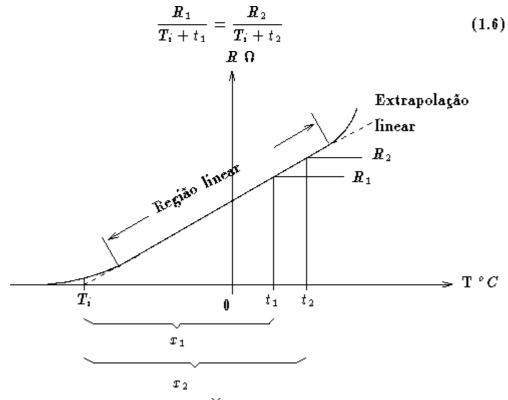
parte reta da curva. A curva extrapolada intercepta o eixo de temperatura no ponto  $T_i$  chamado de *temperatura inferida de resistência zero* ou *zero absoluto inferido* ( $T_i$  = -234,5  $^{\circ}$  C para cobre recozido).

Considerando duas resistências  $^{R_1}$ e  $^{R_2}$  às temperaturas  $^{t_1}$ e  $^{t_2}$ , respectivamente, vemos que a extrapolação linear fornece uma relação de semelhança de triângulos relacionando  $^{R_1}$ e  $^{R_2}$ .

Assim,

$$\frac{R_1}{x_1} = \frac{R_2}{x_2} \tag{1.5}$$

Sendo que os lados  $^{x_1}$ e  $^{x_2}$ possuem comprimentos  $^{x_1+t_2}$ respectivamente:



**FIGURA 12 -** Resistência <sup>×</sup>Temperatura para um metal condutor

#### 7.2 COEFICIENTE DE TEMPERATURA

Devido a relação linear entre a resistência e a temperatura, a inclinação  $\Delta R/\Delta T$  é constante e uma variação de  $\mathbf{1}^0C$ resulta na mesma variação  $\Delta R$ na resistência, conforme mostra a Figura 12. A variação de resistência por unidade por variação em  $^0C$ na temperatura, referida a qualquer ponto n na curva

R x T, é definida como o *coeficiente de temperatura da resistência*, representada por α, que é:

$$\alpha_n = \frac{\Delta R}{\Delta T} \cdot \frac{1}{R_n} \tag{1.7}$$

O índice de  $\alpha$ define a temperatura de referência, o que torna aparente que  $\alpha$  varia com a temperatura. Na Figura 4,  $\alpha_1 = \frac{\Delta R/R_1}{2}$ e  $\alpha_3 = \frac{\Delta R/R_3}{2}$ ; sendo  $\alpha_1 > \alpha_3$ ; sendo  $\alpha_1 > \alpha_3$ .

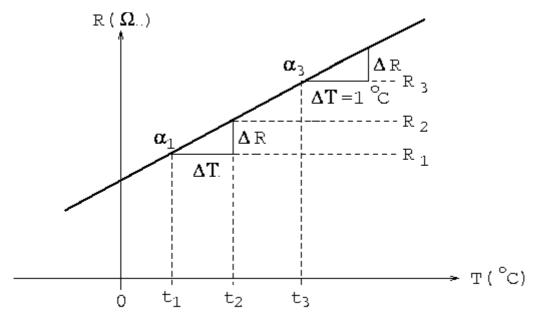


Figura 4 - Coeficiente de temperatura FIGURA 13 - cálculo do coeficiente de temperatura.

É possível calcular o coeficiente de temperatura da resistência através da temperatura inferida de resistência zero. Se referirmos a Figura 3 e substituirmos  $\Delta T = T_i + t_n \frac{\Delta R}{e} = 0 + \frac{R}{n} \text{na Equação } \frac{1.7}{e}, \text{ iremos obter a expressão:}$ 

$$\alpha_n = \frac{R_n}{T_i + t_n} \cdot (\frac{1}{R_n}) = \frac{1}{T_i + t_n} \tag{1.8}$$

A partir desta última expressão, vemos que se  $t_n = \mathbf{0}^0 C$ , então  $\alpha_0$ , o coeficiente de temperatura a  $\mathbf{0}^0 C$ , é o inverso de  $\mathbf{T}_i$ .

$$\alpha_0 = \frac{1}{T_i} \tag{1.9}$$

<b>TABELA 4</b> – coeficiente de temperatu	a e zero absoluto inferid	o de alguns materiais.
--	---------------------------	------------------------

Material condutor	Zero absoluto inferido	Coef. De temperatura
Alumínio	-236	0,00424
Latão	-489	0,00208
Cobre recosido	-234,5	0,00427
Cobre duro	-242	0,00413
Ouro	-274	0,00365
Chumbo	-224	0,00466
Níquel-cromo	-2270	0,00044
Platina	-310	0,00323
Prata	-243	0,00412
Estanho	-218	0,00458
Tungstênio	-202	0,00495
Zinco	-250	0,004

O valor da resistência  $^{I\!\!R_2}$ da Figura 4 pode ser expresso em termos de  $^{I\!\!R_1}$ como.

$$R_2 = R_1 + \Delta R \tag{1.10}$$

Assim, se a variação R obtida a partir da Equação  $\underline{1.7}$  como  $\Delta R = \alpha_1 R_1 \Delta T$  é substituída na Equação  $\underline{1.10}$ , resulta:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_1(t_2 - t_1)] \tag{1.11}$$

# 8. CONCLUSÃO

Os resistores são de importante utilização nas engenharias, principalmente na engenharia elétrica, pois são utilizados com a finalidade de oferecer oposição à passagem de corrente elétrica a algum material.

Após este trabalho foi possível conhecer os diversos tipos de resistores, tantos os de valores fixos, como os de valores variáveis, e entender como funcionam.

### 9. REFERÊNCIAS

RESISTOR. Disponível em: <a href="http://pt.wikipedia.org/wiki/Resistor">http://pt.wikipedia.org/wiki/Resistor</a> Acesso em: 1 jul. 2008.

RESISTORES. Disponível em:

<a href="http://discipulosdeeinstein.vilabol.uol.com.br/Resumos/Resistores.html">http://discipulosdeeinstein.vilabol.uol.com.br/Resumos/Resistores.html</a> Acesso em: 1 jul. 2008.

CURVA CARACTERÍSTICA DE RESISTORES. Disponível em: <www.fisica.ufsc.br/~lab2/pdfs/exp02.pdf> Acesso em: 1 jul. 2008.

# UTILIZAÇÃO DE INDUTORES NO RAMO DA ENGENHARIA ELÉTRICA

### Kauana Palma Silva

# 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização, a fabrição e a grande utilização de indutores no ramo da Engenharia Elétrica.

Indutores apresentam uma característica elétrica dominante que é simples. Apresenta uma proporcionalidade entre a variação corrente entre seus terminais e a diferença de potencial elétrico nos mesmos. Possui, portanto, uma característica elétrica dominante com natureza de uma indutância. Um indutor é fundamentalmente um armazenador de energia sob a forma de um campo magnético.

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 freqüências.

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 usados em chips de computador. Nesses casos, normalmente o alumínio é utilizado como material condutor. Porém, é raro a construção de indutores em Cl'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 alguma vezes feitos com um fio passando através de um cilindro de ferrite.

Os indutores ou bobinas apresentam núcleos (espaço interno entre as extremidades das espiras), que podem ser: ar; ferrite; ferro laminado. O indutor tem como objetivo principal o armazenamento de corrente não esquecendo também que ele é usado como filtro para determinadas fregüências de um sinal qualquer.

Geralmente as bobinas trabalham, na sua grande maioria com dois terminais, isto que dizer que nós podemos Ter bobinas com mais de dois terminais. A espira de

uma bobina, na verdade corresponde a uma volta de fio. Os indutores apresentam como unidade o Henry (H).

Os indutores podem ser ligados em série (a corrente que passa no primeiro indutor é a mesma que passa no ultimo indutor); em paralelo (a tensão aplicada no primeiro componente é a mesma que passa no ultimo componente) e mista (é a mistura da associação em série e paralela).

### 2. INDUTORES

Os indutores são bastante usados em circuitos de radiofreqüência (RF), como os usados em receptores de rádio, TV, FM. Na sua fôrma mais simples consistem de um pedaço de fio enrolado em uma fôrma (tubo) de material isolante como plástico, cerâmica ou ferrite ou mesmo sem fôrma (ar). Esse enrolamento simples é conhecido por bobina.

O indutor tem funções diferentes, dependendo do circuito onde ele é usado. Pode produzir sinais de corrente alternada (CA) de rádio e TV, quando usado nos circuitos osciladores. Pode bloquear uma freqüência alta (CA) e deixar passar uma freqüência baixa, quando usado nos filtros.

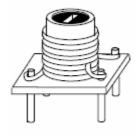


FIGURA 1 – Indutor

### 2.1 UM POUCO DE HISTÓRIA

O físico dinamarquês Oersted, em 1819, descobriu que correntes elétricas, quando circulavam em um condutor, produziam um campo magnético. Na realidade, Oersted colocou uma bússola próxima a um fio, pelo qual circulava uma grande corrente elétrica, e descobriu que a agulha (ponteiro) da bússola se movia com a passagem da corrente. Dai a dedução de que a corrente elétrica circulando pelo fio produzia um campo magnético e este campo magnético podia ser aumentado se o fio condutor fosse enrolado em fôrma de uma bobina, com muitas espiras.

Dessa experiência feita por Oersted surgiram os galvanômetros, que são instrumentos que medem a passagem da corrente elétrica. Também esse fenômeno é hoje usado para a construção de motores, dínamos, alternadores, eletro-imãs e uma grande variedade de componentes eletrônicos. Um desses componentes é a bobina, usadas em rádio, TV, vídeo, transmissores, etc.

A indutância de um indutor é medida em HENRY, abreviado H. Como 1H é um valor muito grande de indutância para os circuitos normais, usam-se os submúltiplos do Henry:

1 milihenry = 0,001 H = 1 mH

1 microhenry = 0,000001 H = 1  $\mu$ H

#### 2.2 FORMATO DOS INDUTORES

Os indutores podem tomar uma grande variedade de formatos e é necessária certa prática para identificá-los e nno confundi-los com outros componentes eletrônicos. A figura 2 ilustra alguns dos tipos mais usados de indutores, com e sem núcleo, sendo alguns fixos e outros ajustáveis. Esses tipos serão discutidos no próximo item.



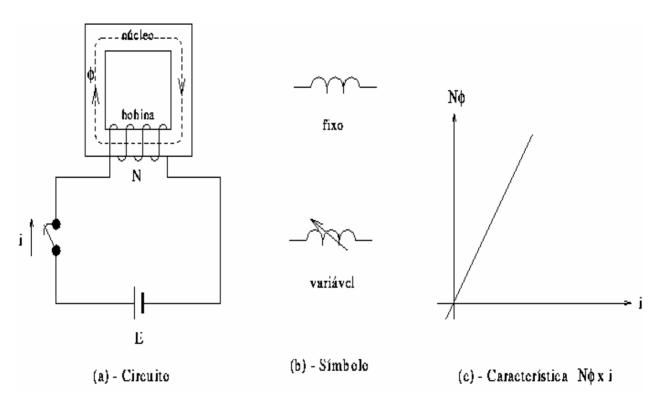
FIGURA 2 – diferentes tipos de indutores

O tamanho dos indutores é proporcional a sua indutância e quanto maior o número de espiras de um indutor, maior é a sua indutância em henrys.

Como os resistores e capacitores, o indutor também pode ser encontrado em trLs tipos básicos: fixos, ajustáveis e variáveis. Os indutores variáveis são usados em casos especiais e nos circuitos eletrônicos comuns os mais usados sno os fixos e os ajustáveis.

# 2.3 DEFINIÇÃO FORMAL DE INDUTORES

Considere a bobina da Figura 3(a). Quando a chave é fechada, a corrente tende a crescer, causando o aumento do fluxo. O crescimento da corrente não é instantâneo. Em outras palavras, uma força-contra-eletromotriz, fcem, é induzida de forma a se opor ao crescimento da corrente.



**FIGURA 3** – (a)circuito com indutor, (b) símbolo de indutor, (c) gráfico fluxo magnético por corrente.

Considerando-se o núcleo de ar, ou outros materiais não-magnéticos, a característica de fluxo por corrente é linear. P produto N pelo fluxo é denominado fluxo concatenado (representado por  $\lambda$ ). A constante de proporcionalidade que relaciona o fluxo concatenado e a corrente, isto é, a inclinação da reta, é definida como indutância (L):

$$L = \frac{N\phi}{i}$$

A unidade de indutância é weber por ampère, que é definida como um henry.

Para o núcleo de material magnético a característica N\$\psi\$ x i deixa de ser linear e na prática esta curva é representada em função da densidade de fluxo (B) e intensidade de campo (H).

As grandezas fluxo e corrente se relacionam respectivamente com as grandezas B e H, conforme as equações abaixo:

$$B = \frac{\Phi}{A} \qquad H = i \frac{N}{1}$$

Onde:

B = densidade de fluxo em tesla (T)

 $\phi$  = fluxo em weber (Wb)

A = área da seção reta do núcleo em m<sup>2</sup>

H = intensidade de campo em ampere-espira por metro

i = corrente em ampere

N = número de espiras

I = comprimento médio do núcleo em m

A relação entre B e H é denominada permeabilidade absoluta, representada por:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

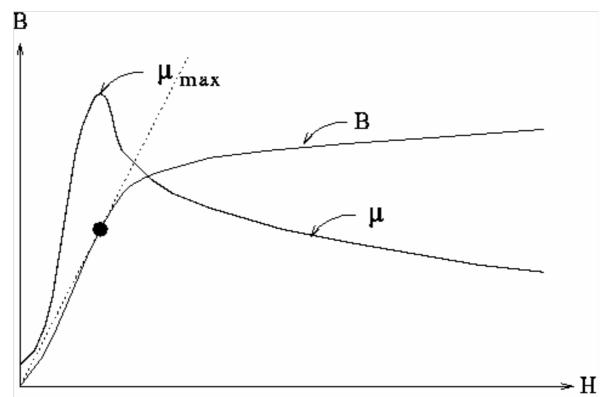
Substituindo as Equações acima temos:

$$\mu = \frac{\frac{\Phi}{A}}{i\frac{N}{T}}$$

Rearranjando:

$$\mu = \Bigl(\frac{N\varphi}{i}\Bigr)\frac{l}{AN^2} = L\frac{l}{AN^2} \quad \text{ou} \qquad L = \mu\left(\frac{AN^2}{l}\right)$$

A permeabilidade absoluta dos materiais magnéticos varia com a densidade de fluxo, conforme mostra a Figura 4.



**FIGURA 4** – A variação da permeabilidade absoluta dos materiais magnéticos com a densidade de fluxo.

A permeabilidade dos materiais é tomada em relação à permeabilidade do vácuo ( $\mu_0$ ), que vale  $4\pi$ .  $10^{-7}$  H/m.

Assim,

$$\mu_{\rm F} = \frac{\mu}{\mu_0}$$

A permeabilidade relativa,  $\mu_{\mathbb{F}}$ , de materiais não-magnéticos como o ar, o cobre, a madeira, o vidro e o plástico é igual a 1. Por outro lado, o  $\mu_{\mathbb{F}}$  de materiais magnéticos como o cobalto, o níquel, o ferro, o aço e suas ligas é muito maior do que 1.

A Equação da indutância pode ser reescrita em função da permeabilidade relativa:

$$L = \mu_{\rm r} \mu_0 \left( \frac{AN^2}{l} \right) = \mu_{\rm r} \mu_0 4 \pi. \, 10^{-7} \left( \frac{AN^2}{l} \right)$$

A indutância pode ser aumentada variando-se os fatores geométricos, o número de espiras ou ainda escolhendo-se material com permeabilidade relativa maior. Assim, para uma dada bobina (com fatores geométricos e número de espiras fixos) a permeabilidade relativa atua como um "amplificador" da indutância.

A Tabela abaixo mostra a permeabilidade relativa para alguns materiais.

**TABELA 1** – Permeabilidade relativa.

Material	Permeabilidade relativa
Ar	1
Chapa para geradores (liga de Fe, Si)	5.000 a 8.000
Mumetal (liga de Ni, Fe, Cu, Cr)	45.000
Liga 1040 (liga de Ni, Fe, Mo, Cu)	100.000

# 3. FABRICAÇÃO DE INDUTORES

Indutores são produzidos enrolando um fio condutor, em geral sobre uma fôrma de material isolante que lhe dá suporte mecânico. Existem indutores construídos sem qualquer fôrma, por exemplo quando o próprio fio é suficientemente rígido, ou quando são enrolados diretamente sobre um núcleo magnético.

# 3.1 PROCESSO PARA FABRICAÇÃO DE INDUTORES

Trata-se de um indutor de enrolamento de fio que inclui um núcleo dielétrico, terminais incluindo grampos de fio que são grampeados em torno do núcleo, e um enrolamento de fio disposto em torno do perímetro do núcleo e ligado aos terminais. Um revestimento tal como um revestimento adesivo é disposto sobre o enrolamento de fio e entre os terminais.

O processo de fabricação dos indutores é um processo contínuo. Tendo início com um material bobinado, que pode ser estudado, os indutores são formados seqüencialmente sobre um material de núcleo. Os indutores não são fisicamente separados até os estágios finais de fabricação, o que contrasta com o processo da técnica anterior em que cada indutor é construído individualmente sobre um núcleo individual que foi fabricado com tolerâncias rigorosas e enrolado individualmente.

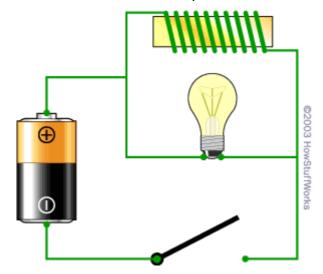
Em virtude das características dos componentes do indutor, podem ser obtidas tolerâncias extremamente rigorosas (tipicamente cerca de 0,005" ou 0,0127 mm), resultando em valores de indutância altamente controlados.

#### 4. OS FUNDAMENTOS

Em um esquema elétrico, um indutor é mostrado da seguinte maneira:

\_\_\_\_\_\_\_

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



**FIGURA 5** – Esquema de circuito com um indutor

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 você leu sabe como funciona um eletroímã, talvez perceba que o indutor é um eletroímã. 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. 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 seqüência, 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.

# 4.1 SIMULAÇÃO

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.

# 3.2 A UNIDADE HENRY

A capacidade de um indutor é controlada por quatro fatores:

- o número de espiras (mais espiras significam maior indutância)
- o material em que as bobinas são enroladas (o núcleo)
- a área da seção transversal da bobina (mais área significa maior indutância)
- o comprimento da bobina (uma bobina curta significa espiras mais estreitas -ou sobreposição que significa maior indutância).

Um núcleo de ferro oferece ao indutor muito mais indutância do que o ar ou do que qualquer outro material ofereceria. A unidade padrão da indutância é o henry. A equação para calcular o número de henries em um indutor é:

H = (4 \* Pi \* número de espiras \* número de espiras \* área da bobina \* mu) / (comprimento da bobina \* 10.000.000)

A área e o comprimento da bobina são definidos em metros. O termo mu é a permeabilidade do núcleo. O ar tem permeabilidade de 1, enquanto o aço pode ter uma permeabilidade de 2 mil.

# 4.3 APLICAÇÕES

Suponha que você pegue uma bobina, com talvez 2 metros de diâmetro, contendo cinco ou seis espiras. Você faz algumas caneletas na estrada e coloca as bobinas nelas. Você fixou um medidor de indução à bobina e verificou qual é a indução dela.

Agora, estacione um carro sobre a bobina e confira a indutância novamente. Ela será muito maior, devido ao grande objeto de aço posicionado no campo magnético da bobina. O carro estacionado sobre a bobina está agindo como o núcleo do indutor e a sua presença muda a indutância. A maioria dos sensores de semáforos usa uma bobina como essa. O sensor, constantemente, testa a indutância da bobina na rua e quando essa aumenta, ele sabe que existe um carro esperando.

Normalmente você usa uma bobina muito menor. Um intenso uso para indutores é juntá-los com capacitores para criar osciladores.

### 4.3.1 INDUTORES COM NUCLEO DE AR

São componentes usados em freqüências altas (rádio- freqüências) ou em equipamento especial, em que se deseja evitar não-linearidades ou efeitos de temperatura associados com os núcleos magnéticos;

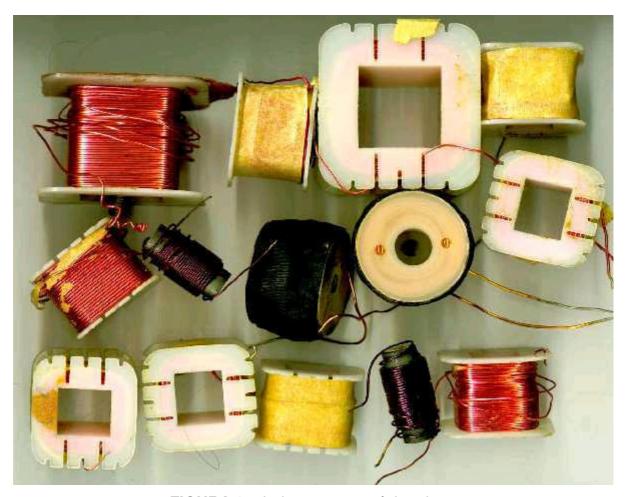


FIGURA 6 - Indutores com núcleo de ar

# 4.3.2 INDUTORES COM NÚCLEO DE FERRITE

São componentes adequados quando se quer indutância elevada, em freqüências não muito altas. Para freqüências de áudio ou menores usam-se normalmente núcleos laminados de ferro-silício ou análogos; para freqüências acima dessa faixa recorre-se a núcleos sinterizados de ferrite.



FIGURA 7 – Indutores com núcleo de ferrite

# 4.3.3 INDUTORES COM NÚCLEO DE FERRITE TOROIDAL



FIGURA 8 – toróides com núcleo de ferrite

# 4.3.4 INDUTORES AJUSTÁVEIS



FIGURA 9 - Indutores ajustáveis

### 4.3.5 INDUTORES REAIS

Os indutores perfeitos seriam dispositivos capazes de armazenar energia exclusivamente sob forma magnética, sem nenhuma perda ou dissipação de energia. Nos indutores reais, parte da energia fornecida é dissipada, pôr transformação em calor, seja pôr efeito da resistência dos fios condutores ou das várias perdas no material do núcleo. Além disso, parte da energia pode ser armazenada sob forma eletrostática, nas capacitâncias associadas com a bobina.

Assim sendo, o modelo de um indutor real incluirá uma ou mais resistências de perdas, que dão conta da energia dissipada, e uma capacitância parasita, que leva em conta o armazenamento da energia sob forma eletrostática. Em geral medese a qualidade do indutor real pôr algum índice de mérito, associado com as energias, armazenada e dissipada.

### 5. PERDAS E CAPACITÂNCAS PARASITAS NOS INDUTORES

Os indutores reais não são perfeitos, pois parte da energia que lhes é fornecida é dissipada (transformada em calor ) ou armazenada sob forma eletrostática. As perdas no indutor ocorrem nos fios do enrolamento ou no material do núcleo. As perdas no fio decorrem do efeito Joule (RI2) nos fios.

A resistência a ser considerada aqui é maior que a resistência ôhmica do fio medida em CC (ou em freqüências muito baixas, ver Tabela de Fios no Apêndice I ) pôr causa do efeito pelicular. De fato, demonstra-se em Eletromagnetismo que à

medida que sobe a freqüência, a corrente tende a concentrar-se cada vez mais nas bordas do fio. ocasionando assim um aumento da resistência efetiva.

Para reduzir este efeito pode-se fazer o enrolamento com fio "litz", que não é senão um cabo composto com fios extremamente finos. As perdas no núcleo da bobina decorrem de vários efeitos: perdas Foucault (ou pôr correntes induzidas), perdas histeréticas e perdas dielétricas. As duas primeiras são especialmente importantes em núcleos ferromagnéticos.

Para representar todas estas perdas costumam-se incluir no modelo do indutor uma resistência de perdas. A resistência de perdas pode ser considerada em série ou em paralelo com a indutância. Levando aos dois modelos indicados na figura 12. Ambas as resistências são função da freqüência, sendo que para o modelo série, o valor da resistência varia lentamente com a freqüência, na faixa de utilização da bobina. Para o modelo paralelo, a variação com a freqüência é mais significante.

Para comparar o desempenho das bobinas com perdas costuma-se definir um índice de mérito Q este índice depende da freqüência ú e do modelo; as definições empregadas são:

$$Q_{S} = \frac{\omega L_{S}}{R_{s}} \text{ (associação em série)}$$

$$Q_p = \frac{R_p}{\omega L_v} \; (associa \zeta \tilde{a}o \; em \; paralelo)$$

# 6. MAGNETIZAÇÃO DE UM MATERIAL

Sabe-se que o campo magnético (H) está relacionado com a circulação de corrente elétrica por um condutor e que a indução magnética ou densidade de fluxo magnético (B) está relacionada com a tensão. Desta forma, ao invés de traçar a curva B versus H, pode-se desenhar a curva V versus I e obter uma imagem do que seria a curva de magnetização do material.

Os materiais podem ser classificados em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos conforme sua permeabilidade magnética ( $\mu$ ). Materiais diamagnéticos e paramagnéticos possuem uma permeabilidade próxima de um ( $\mu \cong 1$ ), sendo que os diamagnéticos possuem  $\mu < 1$  e os paramagnéticos  $\mu > 1$ . Os materiais de maior interesse na engenharia para construção de dispositivos

eletromagnéticos são os ferromagnéticos, os quais possuem uma permeabilidade elevada, muito maior que um  $\mu \gg 1$ .

Lembrando que a permeabilidade pode ser associada com a facilidade à passagem do fluxo magnético, portanto quanto maior, mais "condutor" de fluxo magnético o material será. Na figura 10 são mostradas duas curvas, a primeira delas é a curva típica de magnetização de um ferrite, enquanto a segunda mostra a variação da permeabilidade com a temperatura.

Pela figura pode-se verificar que existe uma região de comportamento praticamente linear, ou seja, para aumentos da intensidade de campo magnético (H) o material sofre uma indução proporcional (B). No entanto, para intensidades de campo muito altas o material satura, chegando ao limite de indução possível e a partir daí não ocorrem mais aumentos significativos na indução (B) para aumentos no campo magnético (H).

A região de operação depende da aplicação desejada. Para um indutor, normalmente se evita trabalhar próximo da região de saturação, pois nesse caso, em termos de circuitos elétricos, o efeito é a queda da indutância (L) e consequente alterações no funcionamento do circuito.

É importante observar que a temperatura afeta muito a permeabilidade magnética do material, daí ser importante especificar com cuidado a temperatura de operação do componente e do circuito onde o mesmo será aplicado.

Na figura 11 mostram-se o comportamento dos momentos (dipolos) magnéticos submetidos a diferentes temperaturas. Nota-se que, como o material é ferromagnético, com baixas temperaturas os dipolos estão alinhados, caracterizando uma alta permeabilidade. Já com aumento da temperatura começa a ocorrer um desalinhamento dos dipolos, o que é caracterizado como uma diminuição da permeabilidade ( $\mu$ ). Acima da temperatura de Curie (Tc), o material começa a ter comportamento de paramagnético ( $\mu \cong 1$ ).

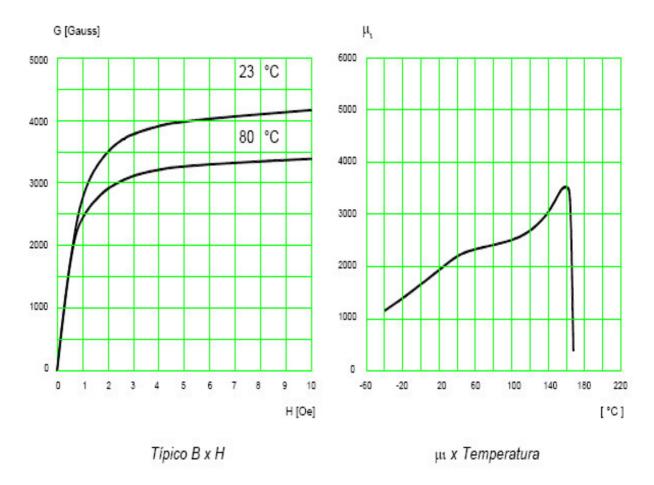


FIGURA 10 – Curvas de magnetização e variação da permeabilidade com a temperatura.

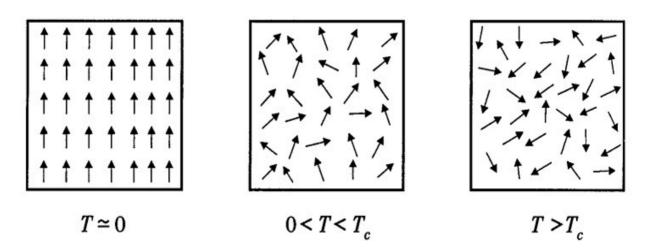


FIGURA 10 – Momentos magnéticos para diferentes temperaturas.

## 7. A FÍSICA DO INDUTOR

# 7.1 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 usados em chips de computador.

Nesses casos, normalmente o alumínio é utilizado como material condutor. Porém, é raro a construção de indutores em Cl'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 freqüências muito altas são algumas vezes feitos com um fio passando através de um cilindro de ferrite.

## 7.2 INDUTÂNCIA

Indutância é a grandeza física associada aos indutores, é simbolizada pela letra L, medida em Henry (H), e representada graficamente por um fio helicoidal. Em outras palavras é um parâmetro dos circuitos lineares que relaciona a tensão induzida por um campo magnético variável à corrente responsável pelo campo. A tensão entre os terminais de um indutor é proporcional à taxa de variação da corrente que o atravessa.

Matematicamente temos:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

Onde u(t) é a tensão instântanea, sua unidade de medida é o volt (V), L é a indutância, sua unidade de medida é o Henry (H), i é a corrente, sua unidade de medida é o ampere (A) e t o tempo (s).

#### 7.3 EM CIRCUITOS ELÉTRICOS

Um indutor resiste somente a mudanças de corrente. Um indutor ideal não oferece resistência para corrente direta, exceto quando a corrente é ligada e desligada, caso em que faz a mudança de modo mais gradual. Porém, todos os

indutores do mundo real são construídos a partir de materiais com resistência elétrica finita, que se opõe até mesmo à corrente direta.

No geral, a relação entre a variação da tensão de acordo com o tempo u(t) através de um indutor com indutância L e a variação da corrente de acordo com o tempo i(t) que passa por ele é descrita pela equação diferencial:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

Quando uma corrente alternada (CA) senoidal flui por um indutor, uma tensão alternada senoidal (ou força eletromotriz, Fem) é induzida. A amplitude da Fem está relacionada com a amplitude da corrente e com a freqüência da senóide pela seguinte equação:

$$U = I \times \omega L$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular da senóide definida em termos da frequência f por:

$$\omega = 2\pi f$$

A reatância indutiva é definida por:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

Onde  $X_L$ é a reatância indutiva medida em Ohms (medida de resistência),  $\omega$  é a freqüência angular, f é a freqüência em hertz, e L é a indutância.

A reatância indutiva é o componente positivo imaginário da impedância.

A impedância complexa de um indutor é dada por:

$$Z = i\omega L = i2\pi f L = iX$$

Onde *j* é a unidade imaginária.

# 7.4 APLICAÇÕES

Os indutores estão relacionados aos eletromagnetos em estrutura, mas são usados para um propósito diferente: armazenar energia em um campo magnético.

Por sua habilidade de alterar sinais CA, os indutores são usados extensivamente em circuitos analógicos e processamento de sinais, incluindo recepções e transmissões de rádio. Como a reatância indutiva  $X_L$  muda com a freqüência, um filtro eletrônico pode usar indutores em conjunto com capacitores e outros componentes para filtrar partes específicas da freqüência do espectro.

Dois (ou mais) indutores acoplados formam um transformador, que é um componente fundamental de qualquer rede elétrica nacional.

Um indutor é normalmente usado como saída de uma fonte chaveada de alimentação. O indutor é carregado para uma fração específica da freqüência de troca do regulador e descarregado pelo restante do ciclo. Esta relação de carrega/descarrega é o que reduz (ou impulsiona) a tensão de entrada para seu novo nível.

# 8. APLICAÇÕES

Com esse trabalho podemos verificar as grandes diferenças entre os indutores construídos com núcleo de ar e de ferro, além de verificarmos também influência dos 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 freqüências.

Os indutores com núcleo de ar (não magnético), usados em freqüências altas (radiofreqüências) ou em equipamento especial, em que se deseja evitar não-linearidades ou efeitos de temperatura associados com os núcleos magnéticos;

Os indutores com núcleo ferromagnético, adequados quando se quer indutância elevada, em freqüências não muito altas. Para freqüências de áudio ou menores usam-se normalmente núcleos laminados de ferro-silício ou análogos; para frequências acima dessa faixa recorre-se a núcleos sintetizados de ferrite.

#### 9. REFERÊNCIAS

CLOSE, Charles M. Circuitos lineares. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1975

BOYLESTAD, Robert L; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos.** 8ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

BOYLESTAD, Robert L; NASHELSKY, Louis. **Circuitos Elétricos.** 10ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

SCHMIDT, Walfredo. **Materiais Elétricos.** Ed Edgar Blucher.

INDUTORES com núcleo de ferrite. Disponível em: <www.thornton.com.br> Acesso em: 1 jul. 2008.

INDUTORES. Disponível em <a href="http://pt.wikipedia.org/wiki/Indutor">http://pt.wikipedia.org/wiki/Indutor</a>>. Acesso em 2 jul. 2008.

#### CAPACITORES

#### Camila da Silva Limons

# 1. INTRODUÇÃO

O capacitor é um componente eletrônico que desde a época das válvulas já estava fazendo seu papel de filtrar sinais e embora apresentasse características construtivas diferentes das atuais, a funcionalidade era a mesma.

Existem muitos tipos de capacitores e talvez este seja o componente eletrônico que mais apresentou diversificação até hoje. Capacitores eletrolíticos, de tântalo, cerâmicos, de poliéster, uma variedade sem fim. Com tanto tipos, sem dúvida estes componentes apresentam um certo grau de complexidade na hora de identificar as suas características e seus valores.

Um capacitor apresenta uma característica elétrica dominante que é muito simples. Apresenta uma proporcionalidade entre corrente entre seus terminais e a variação da diferença de potencial elétrico nos terminais. Ou seja, possui uma característica elétrica dominante com a natureza de uma capacitância. Um capacitor é fundamentalmente um armazenador de energia sob a forma de um campo eletrostático.

São utilizados com o fim de eliminar sinais indesejados, oferecendo um caminho mais fácil pelo qual a energia associada a esses sinais espúrios pode ser escoada, impedindo-a de invadir o circuito protegido. Nestas aplicações, normalmente quanto maior a capacitância melhor o efeito obtido e podem apresentar grandes tolerâncias.

Já capacitores empregados em aplicações que requerem maior precisão, tais como os capacitores que determinam à freqüência de oscilação de um circuito, possuem tolerâncias menores.

Construtivamente, os capacitores são obtidos sempre que dois materiais condutores (placas ou armaduras) são mantidos separados por um material isolante (dielétrico).

Considerando a forma de fixação na placa de circuito impresso, dizemos que existem os capacitores axiais e os radiais. O primeiro possui os terminais em lados diametralmente opostos, enquanto que os radiais possuem os terminais do mesmo lado e são utilizados em montagem "em pé".

Os capacitores são componentes que freqüentemente apresentam degradação ao longo da utilização e precisam ser substituídos.

Os capacitores, por exemplo, têm tendência a aumentar sua resistência interna de acordo com sua "idade". Esta resistência nem sempre é acusada através do velho teste de "carga e descarga" do capacitor no ohmímetro analógico nem em muitos dos medidores atualmente existentes, pois esta resistência série equivalente se manifesta mais fortemente nas relativamente altas freqüências (acima de 15 KHz). Para testar um capacitor com este tipo de problema existem instrumentos que excitam o componente com um sinal de relativa alta freqüência (em torno de 10 KHz) e mede suas características.

Os capacitores que normalmente são mais afetados são os que trabalham em regiões quentes dos circuitos ou em etapas de relativa altas freqüências, principalmente dentro de fontes chaveadas e saídas horizontais de televisores ou em outros circuitos que funcionem dentro destas características, como alguns equipamentos médicos.

O trabalho apresentado a seguir, visa a enunciar as principais características dos capacitores; e para cada tipo de capacitor, mostrar os materiais utilizados e os processos de fabricação.

#### 2. CAPACITORES

Capacitores ou condensadores são elementos elétricos capazes de armazenar carga elétrica e, conseqüentemente, energia potencial elétrica. Podem ser esféricos, cilíndricos ou planos, constituindo-se de dois condutores denominados armaduras que, ao serem eletrizados, num processo de indução total, armazenam cargas elétricas de mesmo valor absoluto, porém de sinais contrários.

Os formatos típicos consistem em dois eletrodos ou placas que armazenam cargas opostas. Estas duas placas são condutoras e são separadas por um isolante ou por um dielétrico. A carga é armazenada na superfície das placas, no limite com o dielétrico. Devido ao fato de cada placa armazenar cargas iguais, porém opostas, a carga *total* no dispositivo é sempre zero.

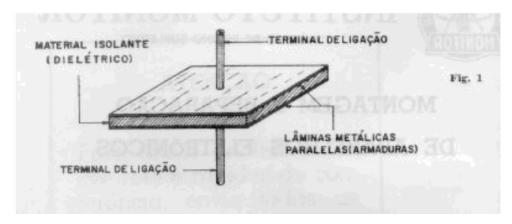


FIGURA 1 – Construção básica de um capacitor

Capacitores são freqüentemente classificados de acordo com o material usados como dielétrico. Os seguintes tipos de dielétricos são usados:

- Cerâmica (valores baixos até cerca de 1 μF)
- Poliestireno (geralmente na escala de picofarads)
- Poliéster (de aproximadamente 1 nF até 1000000 μF)
- Polipropileno(baixa perda. alta tensão, resistente a variações)
- Tântalo (compacto, dispositivo de baixa tensão, de até 100 µF aproximadamente)
- Eletrolítico(de alta potência, compacto mas com muita perda, na escala de 1 μF a 1000 μF)

**TABELA 1** – Tipos de capacitores e algumas se suas características

				Faixa de
Tipo	Dielétrico	Armadura	Fixa de Valor	Tensão
		Folhas de		
Papel	Papel Parafinado	alumínio	1ηF - 10μF	150 - 1000 V
		Folhas de		
Mica	Folhas de Mica	alumínio	1ρF - 22ηF	200 - 5000 V
		Folhas de		
Styroflex	Tiras de Poliéster	alumínio	4,7ρF - 22ηF	25 - 630 V
		Folhas de		
Folha de poliéster	Folhas de Poliéster	alumínio	1ηF - 1μF	100 - 1000 V
		Alumínio		
Poliéster metalizado	Folhas de Poliéster	Depositado	10ηϜ - 2,2μϜ	63 - 1000 V
Policarbonato	Folhas de	Alumínio		
Metalizado	Policarbonato	Depositado	10ηϜ - 2,2μϜ	63 - 1000 V
		Prata		
Cerâmico Tipo 1	Disco Cerâmico	depositada	0,5ρF - 330ρF	63 - 1000 V
	Disco de Titanato de	Prata		
Cerâmico Tipo 2	Bário	depositada	100ρF - 470ρF	15 - 1000 V
		Folhas de	0,47ρF -	
Eletrolítico de alumínio	Óxido de Alumínio	alumínio	220000µF	4 - 500 V
		Tântalo		
eletrolítico de Tântalo	Óxido de Tântalo	metalizado	2,2μF - 220μF	3 - 100 V

O capacitor tem inúmeras aplicações na eletrônica, podendo servir para armazenar energia elétrica, carregando-se e descarregando-se muitas vezes por segundo. Na eletrônica, para pequenas variações da diferença de potencial, o capacitor pode fornecer ou absorver cargas elétricas, pode ainda gerar campos elétricos de diferentes intensidades ou muito intensos em pequenos volumes.

A propriedade que estes dispositivos têm de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo eletrostático é chamada de capacitância ou capacidade (C) e é medida pelo quociente da quantidade de carga (Q) armazenada pela diferença de potencial ou *tensão* (V) que existe entre as placas:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), um capacitor tem a capacitância de um farad (F) quando um coulomb de carga causa uma diferença de potencial de um volt (V) entre as placas.

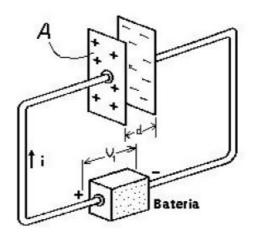


FIGURA 2 – Esquema básico de um capacitor de placas planas paralelas

A capacitância de um capacitor é uma constante característica do componente, assim, ela vai depender de certos fatores próprios do capacitor. A área das armaduras, por exemplo, influi na capacitância, que é tanto maior quanto maior for o valor desta área. Em outras palavras, a capacitância C é proporcional à área A de cada armadura. A espessura do dielétrico é um outro fator que influi na capacitância. Verifica-se que quanto menor for a distância d entre as armaduras maior será a capacitância C do componente. Este fato também é utilizado nos capacitores modernos, nos quais se usam dielétricos de grande poder de isolamento, com espessura bastante reduzida, de modo a obter grande capacitância.

A capacitância de um capacitor de placas paralelas constituído de dois eletrodos planos idênticos de área A separados à distância constante d é aproximadamente igual a:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

onde

- C é a capacitância em farads
- ε<sub>0</sub> é a permissividade eletrostática do vácuo ou espaço livre
- $\varepsilon_r$  é a constante dielétrica ou permissividade relativa do isolante utilizado.

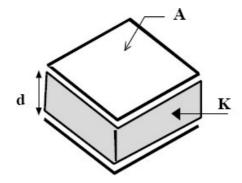


FIGURA 3 – Parâmetros utilizados para cálculo da capacitância

A presença das cargas elétricas armazenadas nas placas induz (eletrização por indução) cargas no dielétrico causando a sua polarização. Estas cargas induzidas e a conseqüente polarização do dielétrico determinam a chamada "permissividade elétrica ε". Cada material dielétrico tem seu próprio valor de permissividade, que nos dá uma noção da sua capacidade de se polarizar.

Uma medida mais prática e mais conhecida é a chamada permissividade relativa ou constante dielétrica, conhecida como K ou  $\epsilon_r$ . A constante dielétrica é a relação entre a permissividade do dielétrico do material em uso e a permissividade do vácuo.

**TABELA 2** – Constante dielétrica para diversos materiais.

	Constante	
Material	Dielétrica K	K Usual
Vácuo	1	1
Ar	1,0001	1
Água	78	78
Óxido de Alumínio	7 a 8	
Cerâmica	≥10	
Vidro	4 a 10	8
Vidro Pyrex	4,5	4,5
Mica	6 a 8	6
Papel	2 a 5	3,5
Pertinax	5	5
Policarbonato (MKC ou MAC)	3	3
Poliéster (MKT)	3,0 a 3,2	
Polipropileno (MKP)	2,1 a 2,3	
Poliestireno (MKS)	2,5	2,5
Porcelana	4 a 8	6,5
Óxido de Tântalo	11	11
Teflon	2,0 a 2,1	
Baquelite	4,8	4,8

Outras propriedades importantes dos capacitores, além de sua capacitância, são a máxima tensão de trabalho e a quantidade de energia perdida no dielétrico.

#### 3. TIPOS DE CAPACITORES

#### 3.1 CAPACITORES DE DISCO CERÂMICO

Os Capacitores de Disco Cerâmico são capacitores cujo dielétrico é feito de material cerâmico. O emprego deste tipo de componente varia dos circuitos de alta freqüência, com modelos compensados termicamente e com baixa tolerância, aos de baixa freqüência, como capacitores de acoplamento e de filtro. Além dos tubulares, podem ser encontrados capacitores na forma de disco e de placa quebrada ou retangular.

A fabricação desses capacitores começa com o pó da cerâmica que é colocado numa prensa e comprimido em forma de pastilhas(dielétrico do futuro capacitor). Após, as pastilhas são introduzidas num forno para tratamento térmico, sendo rigorosamente inspecionadas na saída do mesmo.

Depois da fabricação da pastilha, coloca-se prata vaporizada nas duas faces da mesma, que formarão as placas do capacitor.

A soldagem dos terminais, realizada sobre a camada de prata, vem após os discos sofrerem um banho desengordurante para limpeza.

A próxima etapa é a impregnação com resina para proteção e isolamento, sendo, após, realizado em uma estufa um processo de endurecimento da resina impregnada.

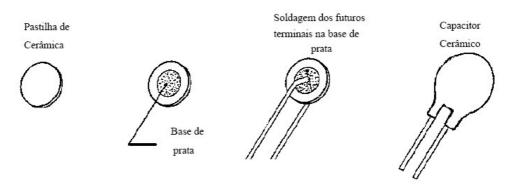


FIGURA 4 - Etapas do processo de fabricação dos capacitores de disco cerâmico

Os capacitores cerâmicos apresentam:

- Indutância parasitária praticamente nula
- Fator de potência nulo
- Alta constante dielétrica
- Capacitâncias entre frações de pF a 1 nF
- Ideais para circuitos sintonizadores.



FIGURA 5 – Capacitores de disco cerâmico

## 3.2 CAPACITORES CERÂMICOS MULTICAMADAS

Os capacitores cerâmicos multicamadas são construídos a partir da superposição de finas camadas de material dielétrico cerâmico com metal depositado sobre suas superfícies formando uma espécie de "sanduíche". Daí a denominação de multicamadas.

As camadas metálicas individuais são conectadas umas às outras através de uma terminação metálica onde são soldados os terminais do capacitor.

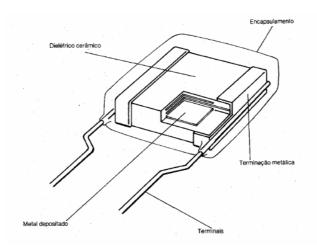


FIGURA 6 – Estrutura de um capacitor cerâmico multicamadas



FIGURA 7 - Capacitor multicamadas

Estes capacitores apresentam baixas perdas, capacitância estável, alta resistência de isolação e alta capacitância em pequenas dimensões. Suas outras características são semelhantes a dos outros capacitores cerâmicos.

#### 3.3 CAPACITORES ELETROLÍTICOS

São aqueles que, com as mesmas dimensões, atingem maiores capacitâncias. São formados por uma tira metal recoberta por uma camada de óxido que atua como um dielétrico; sobre a camada de óxido é colocada uma tira de papel impregnado com um líquido condutor chamado eletrólito, ao qual se sobrepõe uma segunda lâmina de alumínio em contato elétrico com o papel.

Os capacitores eletrolíticos são utilizados em circuitos em que ocorrem tensões contínuas, sobrepostas a tensões alternadas menores.

## 3.3.1 CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO

Basicamente, todo capacitor é constituído de duas armaduras com um dielétrico entre estas. A principal diferença entre os capacitores eletrolíticos para os demais capacitores reside no fato de que um dos eletrodos - o cátodo - é constituído de um fluído condutor - o eletrólito - e não somente uma armadura metálica. O outro eletrodo, o ânodo, é constituído de uma folha de alumínio em cuja superfície é formada, por processo eletroquímico, uma camada de óxido de alumínio servindo como dielétrico.

A preferência por capacitores eletrolíticos deve-se à sua alta capacitância específica (grandes valores de capacitância em volume relativamente reduzido) apresentando capacitâncias na ordem de MICROFARADS. Como nos outros capacitores, sua capacitância é diretamente proporcional à área das placas e inversamente proporcional a distância entre ambas. Nos capacitores eletrolíticos esta distância é determinada pela espessura da camada de óxido formada sobre a folha de anodo.

O óxido de alumínio (K≈10) apresenta, sobre os outros dielétricos, não somente a vantagem de poder ser obtido em filmes de muito menor espessura, mas também a propriedade de **s**uportar altas tensões elétricas. Mesmo em capacitores de tensão mais elevada, teremos, no máximo, um afastamento entre armaduras de 0,7 mm, donde se esclarece em parte sua alta capacitância específica ( a espessura mínima de um dielétrico como o papel, por exemplo, é de 6 a 8 mm).

Outro fator é o aumento da superfície dos eletrodos resultante da cauterização eletroquímica que torna a folha de alumínio rugosa. Uma vez que o catodo do capacitor eletrolítico é constituído por eletrólito, este preenche idealmente as reentrância da folha de ânodo, como indica a figura 8.

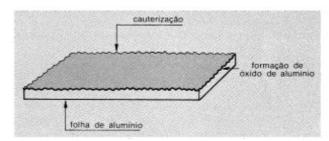


FIGURA 8 – Construção do capacitor eletrolítico bobinado

As principais desvantagens deste tipo de componente são a sua elevada tolerância (chegando a 100 % maior que o valor nominal, e 10 % no sentido negativo) e o fato de ser altamente influenciado pela temperatura tanto na capacitância como na resistência de perda.

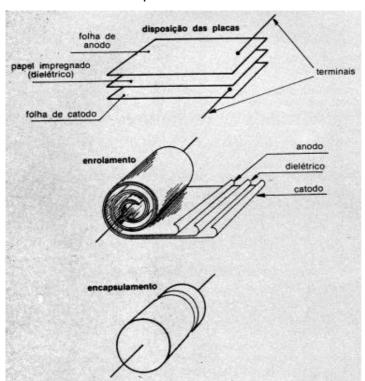


FIGURA 9 – Estrutura de um capacitor eletrolítico de alumínio

O método de construção dos capacitores eletrolíticos difere fundamentalmente dos demais capacitores. Tem-se, nesses capacitores, os seguintes elementos:

- Primeira armadura: é uma folha fina de alumínio, constituindo-se no "terminal positivo" do capacitor.
- Dielétrico: é uma camada finíssima de óxido de alumínio, depositada sobre a primeira armadura. Esta camada de óxido é criada por um tratamento eletroquímico chamado oxidação anódica, aplicado na folha da primeira armadura.
- Segunda armadura: é um líquido condutor de corrente elétrica (eletrólito), que entra em contato com a superfície oxidada da primeira armadura. Para melhorar o contato, é usada uma folha de papel poroso embebida com o eletrólito e uma segunda folha de alumínio, sem tratamento eletroquímico, chamada de "folha de catodo". Tem-se assim o "terminal negativo" do capacitor eletrolítico.

O "sanduíche" assim formado é enrolado e colocado no interior de uma "caneca" de alumínio, vedada por uma espécie de tampão de borracha. A "caneca" faz contato com o eletrólito, sendo portanto eletricamente ligada ao terminal negativo do capacitor. Um fio metálico atravessa o tampão de borracha e faz contato com a folha de alumínio da primeira armadura. Tem-se assim a construção chamada axial.

Dispõe-se também de capacitores eletrolíticos com terminais unilaterais, chamada montagem radial. Neste caso, apesar de ambos os terminais atravessarem o tampão de borracha, também tem-se a "caneca" metálica fazendo contato com o eletrólito e portanto eletricamente ligada ao terminal negativo.

Para elevar ainda mais a capacitância dos capacitores eletrolíticos, a folha de alumínio da primeira armadura recebe um tratamento eletroquímico prévio de decapagem ou corrosão, antes da oxidação. Como resultado, obtém-se uma superfície rugosa, com área de contato efetiva muito maior do que se teria com folhas lisas. Como a segunda armadora é um fluido, ele se adapta perfeitamente à superfície áspera da primeira armadura.

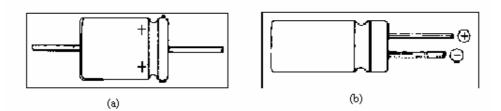


FIGURA 10 – (a) Capacitor eletrolítico com terminais axiais (b) Capacitor eletrolítico com terminais radiais



FIGURA 11 – Capacitores eletrolíticos de alumínio

O capacitor eletrolítico de alumínio, só funciona convenientemente quando ligamos o pólo positivo ao ânodo e o pólo negativo ao cátodo. Se fizermos a ligação de maneira contrária, inicia-se um processo eletrolítico que depositará uma camada de óxido sobre a folha de cátodo. Durante este processo ocorre a geração interna de calor e gás que pode destruir (até explodir) o capacitor.

Existem também capacitores eletrolíticos não-polarizados, os bipolares. Nestes, em lugar da folha de cátodo normalmente usada, utiliza-se uma segunda folha de ânodo, formada nas mesmas condições da primeira, Uma construção deste tipo permite tanto o funcionamento sob tensão CC, em qualquer polaridade, como também com tensões alternadas.

O capacitor eletrolítico bipolar necessita de até o dobro do volume de um polarizado de mesma capacitância e tensão, pois o valor da capacitância é igual a metade das capacitâncias parciais.

#### 3.3.2 CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE TÂNTALO

Os capacitores eletrolíticos de tântalo assemelham-se aos capacitores de alumínio, mas, mesmo alcançando as mesmas capacitâncias, são de tamanho menor. Utilizam o Óxido de Tântalo como isolante e também são polarizados devido à existência do eletrólito.

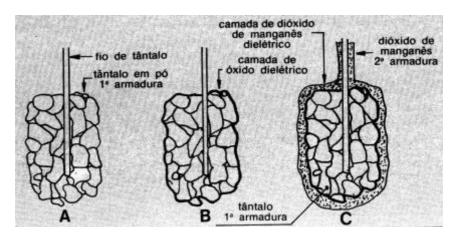


FIGURA 12 – Aspectos construtivos de um capacitor de tântalo

Os capacitores de óxido de tântalo são designados especificamente para aplicações em circuito impresso e que requeiram baixa corrente de fuga e baixo fator de perdas. Oferecem ainda:

- Longa vida operacional;

Grande compacticidade (alta capacitância em volume relativamente reduzido); - Elevada estabilidade dos parâmetros elétricos.

Seu emprego é aconselhável sobretudo como capacitor de acoplamento para estágios de baixas freqüências, graças ao seu baixo nível de ruído, muito inferior ao do capacitor de alumínio. Além do tipo tubular, é encontrado também em forma de 'gota'.

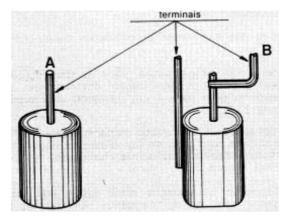


FIGURA 13- Formação básica do capacitor de tântalo

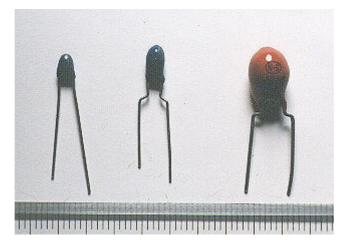


FIGURA 14 – Capacitores de Tântalo

## 3.3.3 CAPACITORES ELETROLÍTICOS LÍQUIDOS

Capacitor que consiste de um eletrodo de metal imerso em uma solução eletrolítica. O eletrodo e a solução são as duas placas do capacitor, enquanto que uma película de óxido que se forma no eletrodo é o dielétrico. A película de dielétrico é formada pelo escoamento da corrente do eletrólito para o eletrodo.

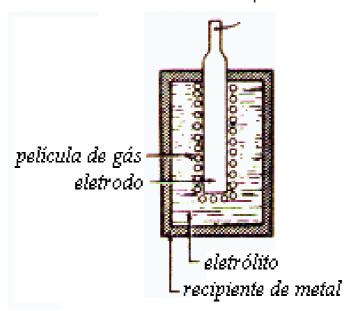


FIGURA 15 – Estrutura de um capacitor eletrolítico líquido

#### 3.4 CAPACITORES DE FILME PLÁSTICO

Os capacitores de filme plástico se caracterizam por apresentarem como dielétrico uma lâmina de material plástico (poliéster, polipropileno, poliestireno, policarbonato). Sua capacitância é da ordem de nanofarads.

Suas principais características são baixíssimas perdas no dielétrico, alta

resistência de isolação, estabilidade da capacitância, baixa porosidade e consequente resistência à umidade.

Podemos classifica-los também em:

 Tipo Não Metalizado: Possuem dielétrico de filme plástico e armaduras de folhas de alumínio. O conjunto armaduras mais o dielétrico pode ser bobinado ou então sanfonado, conforme a opção construtiva.. O capacitor de filme plástico não metalizado não é auto-regenerativo, mas apresenta melhores características de corrente máxima admitida.

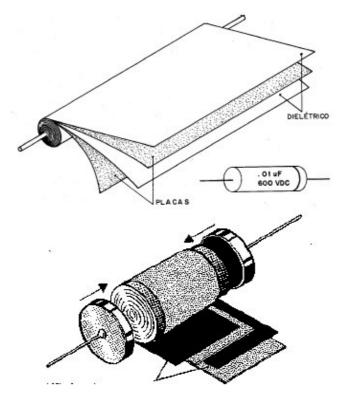
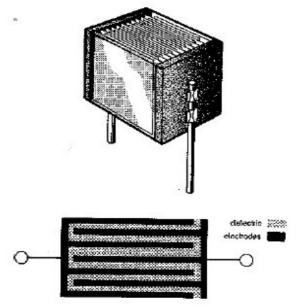


FIGURA 16 - Estrutura construtiva do capacitor de filme plástico não metalizado bobinado

Tipo Metalizado: Têm como característica marcante a propriedade de autoregeneração. O dielétrico desses capacitores consiste de filmes de plástico em cuja superfície é depositada, por processo de vaporização, uma fina camada de alumínio, deixando-o metalizado. Na fabricação do capacitor pode-se bobinar ou dispor o conjunto armaduras-mais-dielétrico em camadas (em sanfona). Através da contactação das superfícies laterais dos capacitores com metal vaporizado, obtémse bom contato entre as armaduras e os terminais, assegurando baixa indutância e baixas perdas. No caso de aplicação de uma sobretensão que perfure o dielétrico a camada de alumínio existente ao redor do furo é submetida a elevada temperatura,

transformando-se em óxido de alumínio (isolante) desfazendo-se então o curtocircuito. Este fenômeno é conhecido como auto-regeneração.



**FIGURA 17** - Estrutura construtiva do capacitor de filme plástico metalizado sanfonado.

#### 3.4.1 CAPACITORES STYROFLEX

É o primeiro capacitor a utilizar o plástico como dielétrico, neste caso o poliestireno. Este material apresenta a constante dielétrica mais baixa entre os plásticos e não sofre influência das freqüências altas. Neste tipo de capacitor são enroladas folhas de poliestireno entre folhas de alumínio.

As principais vantagens deste tipo de capacitor são: o reduzido fator de perda, alta precisão, tolerância baixa (em torno de 0,25 %), tensões de trabalho entre 30 e 600 V.

#### 3.4.2 CAPACITORES DE POLIPROPILENO

O polipropileno é um plástico com propriedades análogas ao polietileno, e apresenta resistência ao calor, aos solventes orgânicos e a radiação. O modo de fabricação é o utilizado no capacitor de poliestireno.

Estes componentes são ideais para aplicação em circuitos de filtros ou ressonantes.

É capaz de trabalhar com níveis de corrente maiores que aqueles suportados pelo capacitor de poliéster. As cores e a forma de identificação do componente costumam ser as mesmas utilizadas no capacitor de poliéster.



FIGURA 18 - Capacitores Stiroflex

#### 3.4.3 CAPACITORES DE POLIÉSTER

É formado internamente por uma tirinha de poliéster enrolada com duas tirinhas de papel metálico. O capacitor de poliéster possui capacitância mediana, desde alguns nF até alguns uF. Apresenta capacidade de operar em freqüências elevadas, porém com baixa capacidade de corrente. Em geral apresenta dimensões relativamente pequenas.

Estes componentes foram criados para substituir os capacitores de papel, tendo como principais vantagens sobre os constituídos de papel: maior resistência mecânica, não é um material higroscópico, suporta ampla margem de temperatura (-50 °C a 150 °C) com grande rigidez dielétrica.

Por apresentar variações de sua capacitância com a freqüência, não são recomendados para aplicação em dispositivos que operem em freqüências superiores a MHz.



FIGURA 19 - Capacitor de Poliéster

#### 3.5 CAPACITORES DE MICA

Estes tipos de capacitores são fabricados alternando-se películas de mica (silicato de alumínio) com folhas de alumínio. Esses capacitores têm boa estabilidade por que o seu coeficiente de temperatura é pequeno. Tem também excelentes características de freqüência, sendo usados em circuitos ressonantes e filtros de alta freqüência. Como tem boa isolação, sendo ideais para circuitos de alta

tensão. Suas capacitâncias variam de 5pF a 100 nF, apresentando elevada precisão.



FIGURA 20 - Capacitores de Mica

#### 3.6 CAPACITORES DE PAPEL

São fabricados enrolando-se uma ou mais folhas de papel entre folhas metálicas. Todo o conjunto é envolvido em resina termoplástica. Esse tipo de componente é barato e é aplicado em usos gerais.

Capacitores de filtro com dielétrico de papel são volumosos e seu valor é em geral limitado a menos do que 10 m F. Eles não são polarizados e podem suportar altas tensões. Não há fuga apreciável de corrente através de um destes capacitores.

Para melhorar as características o papel pode ser impregnado com óleo, o que ocasiona:

- Aumento da rigidez dielétrica.
- Aumento da margem de temperatura de aplicação do capacitor.
- Aplicação de altas tensões.

#### 3.7 CAPACITORES VARIÁVEIS

Capacitores variáveis são aqueles que permitem que o seu valor de capacitância seja variado dentro de uma determinada faixa de valores.

Geralmente são construídos com dielétrico de ar ou de filme plástico e sua capacitância pode ser variada por meio de um eixo ou parafuso, no qual estão montadas as placas ou grupos de placas móveis. Um outro grupo de placas é fixo e é montado sobre um material isolante, o corpo ou chassi do componente.

O grupo de placas móveis que constitui o capacitor variável é formado por placas metálicas em forma de segmentos, unidas a um eixo central de movimento rotativo ou a um parafuso de aperto que permitem, em ambos os casos, variar a posição ou distância entre as placas móveis e fixas. Variando a distância entre as placas ou a área superposta das placas, variamos a capacitância.

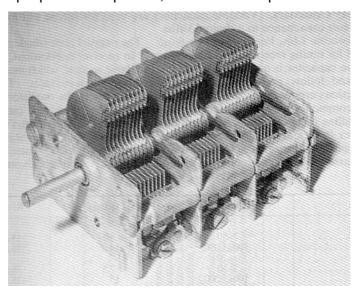


FIGURA 21 - Capacitor Variável

#### 3.7.1 TRIMMERS

Os capacitores variáveis do tipo "trimmer" são constituídos geralmente por 2 placas metálicas, separadas por uma lâmina de mica, dispostos de tal forma que é possível variar-se a separação entre ambas mediante a pressão exercida entre elas por um parafuso. Desta forma pode-se ajustar a sua capacitância.

São normalmente utilizados em rádios portáteis e em diversos dispositivos eletrônicos. Tem capacitâncias máximas em torno de 500 pF. São utilizados principalmente para o ajuste do valor correto da capacitância total de um circuito.

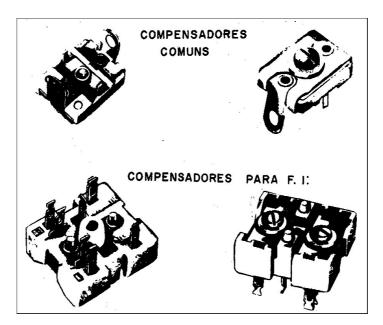


FIGURA 22 - Aspectos construtivos dos capacitores tipo "trimmer".



FIGURA 23 - "Trimmers"

## 4. CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível concluir que o capacitor é um dispositivo extremamente útil na engenharia, principalmente nas áreas elétricas e eletrônicas.

Os diversos tipos de capacitores variam de suas formas de fabricação e materiais utilizados. Cada material fornece uma característica diferente ao capacitor, existindo assim diversos modelos de capacitores com funções e características diferentes. Conhecer um pouco desses materiais e suas particularidades é extremamente importante para uma maior compreensão dos capacitores e para analisar qual tipo deve ser utilizado em cada caso específico.

# 5. REFERÊNCIAS

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa VILLAÇA, Marco Valério Miorim. **Capacitores.** 3. ed. Florianópolis: CEFET, 2000.

RESPOSTA técnica. Disponível em: <a href="http://www.sbrt.ibict.br">http://www.sbrt.ibict.br</a> > Acesso em: 6 jun. 2008.

MEHL, Evaldo L.M. **Capacitores Eletrolíticos de Alumínio:**Alguns cuidados e considerações práticas. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads>. Acesso em: 8 jun. 2008

CAPACITORES. Disponível em <a href="https://www.lps.usp.br/lps/arquivos/conteudo/grad/dwnld/Capacitores.ppt">www.lps.usp.br/lps/arquivos/conteudo/grad/dwnld/Capacitores.ppt</a>. Acesso em: 7 jun. 2008

# CAPACITORES: DIFERENTES TIPOS E DIFERENTES MATERIAIS EMPREGADOS NA FABRICAÇÃO

#### Maurício Romani

# 1. INTRODUÇÃO

Capacitor, antigamente chamado condensador, é um componente que armazena energia num campo elétrico, acumulando um desequilíbrio interno de carga elétrica. Desde a época das válvulas, os capacitores já faziam seu papel de filtrar sinais e embora apresentasse características construtivas diferentes das atuais, a funcionalidade era a mesma.

Existem muitos tipos de capacitores e talvez este seja o componente eletrônico que mais apresentou diversificação até hoje. Capacitores eletrolíticos, de tântalo, cerâmicos, de poliéster, uma variedade sem fim. Com tanto tipos, sem dúvida estes componentes apresentam um certo grau de complexidade na hora de identificar as suas características e seus valores.

Um capacitor apresenta uma característica elétrica dominante que é muito simples. Apresenta uma proporcionalidade entre corrente entre seus terminais e a variação da diferença de potencial elétrico nos terminais. Ou seja, possui uma característica elétrica dominante com a natureza de uma capacitância. Um capacitor é fundamentalmente um armazenador de energia sob a forma de um campo eletrostático.

São utilizados com o fim de eliminar sinais indesejados, oferecendo um caminho mais fácil pelo qual a energia associada a esses sinais espúrios pode ser escoada, impedindo-a de invadir o circuito protegido. Nestas aplicações, normalmente quanto maior a capacitância melhor o efeito obtido e podem apresentar grandes tolerâncias.

Já capacitores empregados em aplicações que requerem maior precisão, tais como os capacitores que determinam à freqüência de oscilação de um circuito, possuem tolerâncias menores.

Construtivamente, os capacitores são obtidos sempre que dois materiais condutores (placas ou armaduras) são mantidos separados por um material isolante (dielétrico).

Considerando a forma de fixação na placa de circuito impresso, dizemos que existem os capacitores axiais e os radiais. O primeiro possui os terminais em lados diametralmente opostos, enquanto que os radiais possuem os terminais do mesmo lado e são utilizados em montagem "em pé".

Os capacitores são componentes que frequentemente apresentam degradação ao longo da utilização e precisam ser substituídos.

Os capacitores, por exemplo, têm tendência a aumentar sua resistência interna de acordo com sua "idade". Esta resistência nem sempre é acusada através do velho teste de "carga e descarga" do capacitor no ohmímetro analógico nem em muitos dos medidores atualmente existentes, pois esta resistência série equivalente se manifesta mais fortemente nas relativamente altas freqüências (acima de 15 KHz). Para testar um capacitor com este tipo de problema existem instrumentos que excitam o componente com um sinal de relativa alta freqüência (em torno de 10 KHz) e mede suas características.

Os capacitores que normalmente são mais afetados são os que trabalham em regiões quentes dos circuitos ou em etapas de relativa alta freqüência, principalmente dentro de fontes chaveadas e saídas horizontais de televisores ou em outros circuitos que funcionem dentro destas características, como alguns equipamentos médicos.

O trabalho apresentado a seguir, visa a enunciar as principais características dos capacitores; e para cada tipo de capacitor, mostrar os materiais utilizados e os processos de fabricação.

### 2. CAPACITORES

Capacitores ou condensadores são elementos elétricos capazes de armazenar carga elétrica e, conseqüentemente, energia potencial elétrica. Podem ser esféricos, cilíndricos ou planos, constituindo-se de dois condutores denominados armaduras que, ao serem eletrizados, num processo de indução total, armazenam cargas elétricas de mesmo valor absoluto, porém de sinais contrários.

Os formatos típicos consistem em dois eletrodos ou placas que armazenam cargas opostas. Estas duas placas são condutoras e são separadas por um isolante ou por um dielétrico. A carga é armazenada na superfície das placas, no limite com o dielétrico. Devido ao fato de cada placa armazenar cargas iguais, porém opostas, a carga *total* no dispositivo é sempre zero.

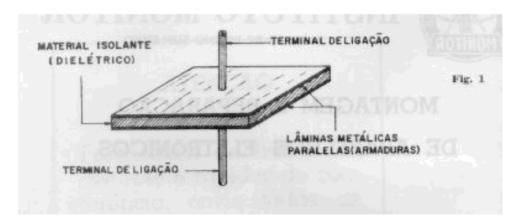


FIGURA 1 – Construção básica de um capacitor

Capacitores são freqüentemente classificados de acordo com o material usados como dielétrico. Os seguintes tipos de dielétricos são usados:

- Cerâmica (valores baixos até cerca de 1 μF)
- Poliestireno (geralmente na escala de picofarads)
- Poliéster (de aproximadamente 1 nF até 1000000 μF)
- Polipropileno(baixa perda. alta tensão, resistente a variações)
- Tântalo (compacto, dispositivo de baixa tensão, de até 100  $\mu F$  aproximadamente)
- Eletrolítico(de alta potência, compacto mas com muita perda, na escala de 1  $\mu$ F a 1000  $\mu$ F).

**TABELA 1** – Tipos de capacitores e algumas se suas características

				Faixa de
Tipo	Dielétrico	Armadura	Fixa de Valor	Tensão
		Folhas de		
Papel	Papel Parafinado	alumínio	1ηF - 10μF	150 - 1000 V
		Folhas de		
Mica	Folhas de Mica	alumínio	1ρF - 22ηF	200 - 5000 V
		Folhas de		
Styroflex	Tiras de Poliéster	alumínio	4,7ρF - 22ηF	25 - 630 V
		Folhas de		
Folha de poliéster	Folhas de Poliéster	alumínio	1ηF - 1μF	100 - 1000 V
		Alumínio		
Poliéster metalizado	Folhas de Poliéster	Depositado	10ηF - 2,2μF	63 - 1000 V
Policarbonato	Folhas de	Alumínio		
Metalizado	Policarbonato	Depositado	10ηF - 2,2μF	63 - 1000 V
		Prata		
Cerâmico Tipo 1	Disco Cerâmico	depositada	0,5ρF - 330ρF	63 - 1000 V
	Disco de Titanato de	Prata		
Cerâmico Tipo 2	Bário	depositada	100ρF - 470ρF	15 - 1000 V
		Folhas de	0,47ρF -	
Eletrolítico de alumínio	Óxido de Alumínio	alumínio	220000µF	4 - 500 V
		Tântalo		
eletrolítico de Tântalo	Óxido de Tântalo	metalizado	2,2µF - 220µF	3 - 100 V

O capacitor tem inúmeras aplicações na eletrônica, podendo servir para armazenar energia elétrica, carregando-se e descarregando-se muitas vezes por segundo. Na eletrônica, para pequenas variações da diferença de potencial, o capacitor pode fornecer ou absorver cargas elétricas, pode ainda gerar campos elétricos de diferentes intensidades ou muito intensos em pequenos volumes.

A propriedade que estes dispositivos têm de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo eletrostático é chamada de capacitância ou capacidade (C) e é medida pelo quociente da quantidade de carga (Q) armazenada pela diferença de potencial ou *tensão* (V) que existe entre as placas:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), um capacitor tem a capacitância de um farad (F) quando um coulomb de carga causa uma diferença de potencial de um volt (V) entre as placas.

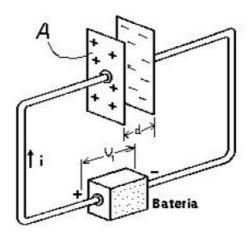


FIGURA 2 – Esquema básico de um capacitor de placas planas paralelas

A capacitância de um capacitor é uma constante característica do componente, assim, ela vai depender de certos fatores próprios do capacitor. A área das armaduras, por exemplo, influi na capacitância, que é tanto maior quanto maior for o valor desta área. Em outras palavras, a capacitância C é proporcional à área A de cada armadura.

A espessura do dielétrico é um outro fator que influi na capacitância. Verificase que quanto menor for a distância d entre as armaduras maior será a capacitância C do componente. Este fato também é utilizado nos capacitores modernos, nos quais se usam dielétricos de grande poder de isolamento, com espessura bastante reduzida, de modo a obter grande capacitância.

A capacitância de um capacitor de placas paralelas constituído de dois eletrodos planos idênticos de área *A* separados à distância constante *d* é aproximadamente igual a:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

onde

- C é a capacitância em farads
- ε<sub>0</sub> é a permissividade eletrostática do vácuo ou espaço livre
- $\epsilon_r$  é a constante dielétrica ou permissividade relativa do isolante utilizado.

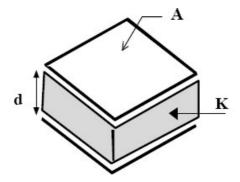


FIGURA 3 – Parâmetro utilizados para cálculo da capacitância

A presença das cargas elétricas armazenadas nas placas induz (eletrização por indução) cargas no dielétrico causando a sua polarização. Estas cargas induzidas e a conseqüente polarização do dielétrico determinam a chamada "permissividade elétrica ε". Cada material dielétrico tem seu próprio valor de permissividade, que nos dá uma noção da sua capacidade de se polarizar.

Uma medida mais prática e mais conhecida é a chamada permissividade relativa ou constante dielétrica, conhecida como K ou  $\epsilon_r$ . A constante dielétrica é a relação entre a permissividade do dielétrico do material em uso e a permissividade do vácuo.

**TABELA 2** – Constante dielétrica para diversos materiais.

	Constante	T
Material	Dielétrica K	K Usual
Vácuo	1	1
Ar	1,0001	1
Água	78	78
Óxido de Alumínio	7 a 8	
Cerâmica	≥10	
Vidro	4 a 10	8
Vidro Pyrex	4,5	4,5
Mica	6 a 8	6
Papel	2 a 5	3,5
Pertinax	5	5
Policarbonato (MKC ou MAC)	3	3
Poliéster (MKT)	3,0 a 3,2	
Polipropileno (MKP)	2,1 a 2,3	
Poliestireno (MKS)	2,5	2,5
Porcelana	4 a 8	6,5
Óxido de Tântalo	11	11
Teflon	2,0 a 2,1	
Baquelite	4,8	4,8

Outras propriedades importantes dos capacitores, além de sua capacitância, são a máxima tensão de trabalho e a quantidade de energia perdida no dielétrico.

#### 3.TIPOS DE CAPACITORES UTILIZADOS ATUALMENTE

## 3.1 CAPACITORES DE DISCO CERÂMICO

Os Capacitores de Disco Cerâmico são capacitores cujo dielétrico é feito de material cerâmico. O emprego deste tipo de componente varia dos circuitos de alta freqüência, com modelos compensados termicamente e com baixa tolerância, aos de baixa freqüência, como capacitores de acoplamento e de filtro. Além dos tubulares, podem ser encontrados capacitores na forma de disco e de placa quebrada ou retangular.

A fabricação desses capacitores começa com o pó da cerâmica que é colocado numa prensa e comprimido em forma de pastilhas(dielétrico do futuro capacitor). Após, as pastilhas são introduzidas num forno para tratamento térmico, sendo rigorosamente inspecionadas na saída do mesmo.

Depois da fabricação da pastilha, coloca-se prata vaporizada nas duas faces da mesma, que formarão as placas do capacitor.

A soldagem dos terminais, realizada sobre a camada de prata, vem após os discos sofrerem um banho desengordurante para limpeza.

A próxima etapa é a impregnação com resina para proteção e isolamento, sendo, após, realizado em uma estufa um processo de endurecimento da resina impregnada.

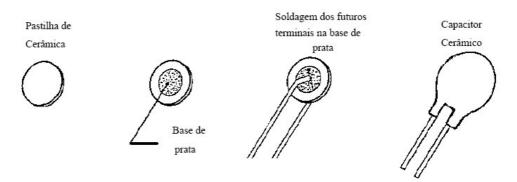


FIGURA 4 – Etapas do processo de fabricação dos capacitores de disco cerâmico

Os capacitores cerâmicos apresentam:

- Indutância parasitária praticamente nula
- Fator de potência nulo
- Alta constante dielétrica
- Capacitâncias entre frações de pF a 1 nF
- Ideais para circuitos sintonizadores.



FIGURA 5 – Capacitores de disco cerâmico

### 3.2 CAPACITORES CERÂMICOS MULTICAMADAS

Os capacitores cerâmicos multicamadas são construídos a partir da superposição de finas camadas de material dielétrico cerâmico com metal depositado sobre suas superfícies formando uma espécie de "sanduíche". Daí a denominação de multicamadas.

As camadas metálicas individuais são conectadas umas às outras através de uma terminação metálica onde são soldados os terminais do capacitor.

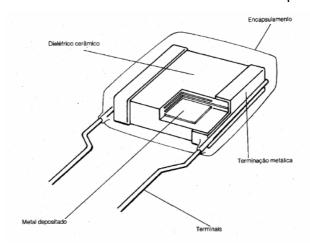


FIGURA 6 – Estrutura de um capacitor cerâmico multicamadas



FIGURA 7- Capacitor multicamadas

Estes capacitores apresentam baixas perdas, capacitância estável, alta resistência de isolação e alta capacitância em pequenas dimensões. Suas outras características são semelhantes a dos outros capacitores cerâmicos.

### 3.3 CAPACITORES ELETROLÍTICOS

São aqueles que, com as mesmas dimensões, atingem maiores capacitâncias. São formados por uma tira metal recoberta por uma camada de óxido que atua como um dielétrico; sobre a camada de óxido é colocada uma tira de papel impregnado com um líquido condutor chamado eletrólito, ao qual se sobrepõe uma segunda lâmina de alumínio em contato elétrico com o papel.

Os capacitores eletrolíticos são utilizados em circuitos em que ocorrem tensões contínuas, sobrepostas a tensões alternadas menores.

## 3.3.1 CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO

Basicamente, todo capacitor é constituído de duas armaduras com um dielétrico entre estas. A principal diferença entre os capacitores eletrolíticos para os demais capacitores reside no fato de que um dos eletrodos - o cátodo - é constituído de um fluído condutor - o eletrólito - e não somente uma armadura metálica. O outro eletrodo, o ânodo, é constituído de uma folha de alumínio em cuja superfície é formada, por processo eletroquímico, uma camada de óxido de alumínio servindo como dielétrico.

A preferência por capacitores eletrolíticos deve-se à sua alta capacitância específica (grandes valores de capacitância em volume relativamente reduzido) apresentando capacitâncias na ordem de MICROFARADS. Como nos outros capacitores, sua capacitância é diretamente proporcional à área das placas e inversamente proporcional a distância entre ambas. Nos capacitores eletrolíticos esta distância é determinada pela espessura da camada de óxido formada sobre a folha de anodo.

O óxido de alumínio (K≈10) apresenta, sobre os outros dielétricos, não somente a vantagem de poder ser obtido em filmes de muito menor espessura, mas também a propriedade de **s**uportar altas tensões elétricas. Mesmo em capacitores de tensão mais elevada, teremos, no máximo, um afastamento entre armaduras de 0,7 mm, donde se esclarece em parte sua alta capacitância específica ( a espessura mínima de um dielétrico como o papel, por exemplo, é de 6 a 8 mm).

Outro fator é o aumento da superfície dos eletrodos resultante da cauterização eletroquímica que torna a folha de alumínio rugosa. Uma vez que o catodo do capacitor eletrolítico é constituído por eletrólito, este preenche idealmente as reentrância da folha de ânodo, como indica a figura 8.

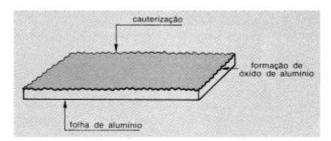


FIGURA 8 – Construção do capacitor eletrolítico bobinado

As principais desvantagens deste tipo de componente são a sua elevada tolerância (chegando a 100 % maior que o valor nominal, e 10 % no sentido negativo) e o fato de ser altamente influenciado pela temperatura tanto na capacitância como na resistência de perda.

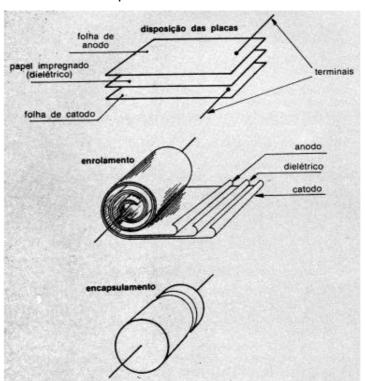


FIGURA 9 – Estrutura de um capacitor eletrolítico de alumínio

O método de construção dos capacitores eletrolíticos difere fundamentalmente dos demais capacitores. Tem-se, nesses capacitores, os seguintes elementos:

- Primeira armadura: é uma folha fina de alumínio, constituindo-se no "terminal positivo" do capacitor.
- Dielétrico: é uma camada finíssima de óxido de alumínio, depositada sobre a primeira armadura. Esta camada de óxido é criada por um tratamento eletroquímico chamado oxidação anódica, aplicado na folha da primeira armadura.
- Segunda armadura: é um líquido condutor de corrente elétrica (eletrólito), que entra em contato com a superfície oxidada da primeira armadura. Para melhorar o contato, é usada uma folha de papel poroso embebida com o eletrólito e uma segunda folha de alumínio, sem tratamento eletroquímico, chamada de "folha de catodo". Tem-se assim o "terminal negativo" do capacitor eletrolítico.

O "sanduíche" assim formado é enrolado e colocado no interior de uma "caneca" de alumínio, vedada por uma espécie de tampão de borracha. A "caneca" faz contato com o eletrólito, sendo portanto eletricamente ligada ao terminal negativo do capacitor. Um fio metálico atravessa o tampão de borracha e faz contato com a folha de alumínio da primeira armadura. Tem-se assim a construção chamada axial.

Dispõe-se também de capacitores eletrolíticos com terminais unilaterais, chamada montagem radial. Neste caso, apesar de ambos os terminais atravessarem o tampão de borracha, também tem-se a "caneca" metálica fazendo contato com o eletrólito e portanto eletricamente ligada ao terminal negativo.

Para elevar ainda mais a capacitância dos capacitores eletrolíticos, a folha de alumínio da primeira armadura recebe um tratamento eletroquímico prévio de decapagem ou corrosão, antes da oxidação. Como resultado, obtém-se uma superfície rugosa, com área de contato efetiva muito maior do que se teria com folhas lisas. Como a segunda armadora é um fluido, ele se adapta perfeitamente à superfície áspera da primeira armadura.

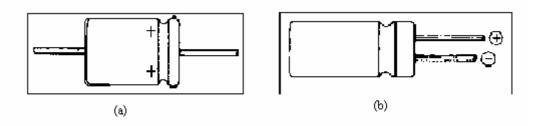


FIGURA 10 – (a) Capacitor eletrolítico com terminais axiais (b) Capacitor eletrolítico com terminais radiais

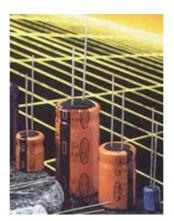


FIGURA 11 – Capacitores eletrolíticos de alumínio

O capacitor eletrolítico de alumínio, só funciona convenientemente quando ligamos o pólo positivo ao ânodo e o pólo negativo ao cátodo. Se fizermos a ligação de maneira contrária, inicia-se um processo eletrolítico que depositará uma camada de óxido sobre a folha de cátodo. Durante este processo ocorre a geração interna de calor e gás que pode destruir (até explodir) o capacitor.

Existem também capacitores eletrolíticos não-polarizados, os bipolares. Nestes, em lugar da folha de cátodo normalmente usada, utiliza-se uma segunda folha de ânodo, formada nas mesmas condições da primeira, Uma construção deste tipo permite tanto o funcionamento sob tensão CC, em qualquer polaridade, como também com tensões alternadas.

O capacitor eletrolítico bipolar necessita de até o dobro do volume de um polarizado de mesma capacitância e tensão, pois o valor da capacitância é igual a metade das capacitâncias parciais.

## 3.3.2 CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE TÂNTALO

Os capacitores eletrolíticos de tântalo assemelham-se aos capacitores de alumínio, mas, mesmo alcançando as mesmas capacitâncias, são de tamanho menor. Utilizam o Óxido de Tântalo como isolante e também são polarizados devido à existência do eletrólito.

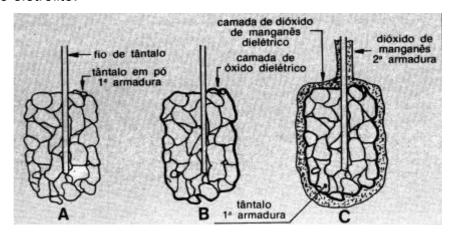


FIGURA 12 – Aspectos construtivos de um capacitor de tântalo

Os capacitores de óxido de tântalo são designados especificamente para aplicações em circuito impresso e que requeiram baixa corrente de fuga e baixo fator de perdas. Oferecem ainda:

- Longa vida operacional;
- -Grande compacticidade (alta capacitância em volume relativamente reduzido);
  - Elevada estabilidade dos parâmetros elétricos.

Seu emprego é aconselhável sobretudo como capacitor de acoplamento para estágios de baixas freqüências, graças ao seu baixo nível de ruído, muito inferior ao do capacitor de alumínio. Além do tipo tubular, é encontrado também em forma de 'gota'.

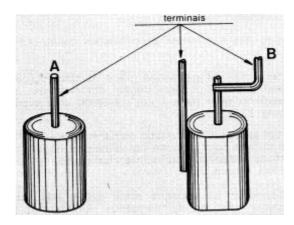


FIGURA 13- Formação básica do capacitor de tântalo



FIGURA 14 - Capacitores de Tântalo

### 3.3.3 CAPACITORES ELETROLÍTICOS LÍQUIDOS

Capacitor que consiste de um eletrodo de metal imerso em uma solução eletrolítica. O eletrodo e a solução são as duas placas do capacitor, enquanto que uma película de óxido que se forma no eletrodo é o dielétrico. A película de dielétrico é formada pelo escoamento da corrente do eletrólito para o eletrodo.



FIGURA 15 – Estrutura de um capacitor eletrolítico líquido

## 3.4 CAPACITORES DE FILME PLÁSTICO

Os capacitores de filme plástico se caracterizam por apresentarem como dielétrico uma lâmina de material plástico (poliéster, polipropileno, poliestireno, policarbonato). Sua capacitância é da ordem de nanofarads.

Suas principais características são baixíssimas perdas no dielétrico, alta resistência de isolação, estabilidade da capacitância, baixa porosidade e consequente resistência à umidade.

Podemos classifica-los também em:

Tipo Não Metalizado: Possuem dielétrico de filme plástico e armaduras de folhas de alumínio. O conjunto armaduras mais o dielétrico pode ser bobinado ou então sanfonado, conforme a opção construtiva..O capacitor de filme plástico não metalizado não é auto-regenerativo, mas apresenta melhores características de corrente máxima admitida.

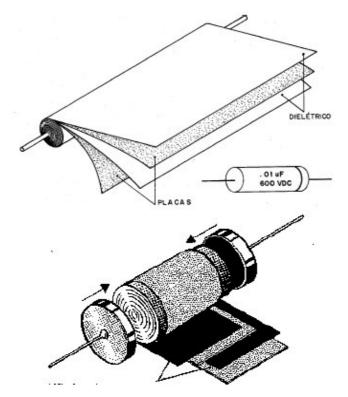


FIGURA 16 - Estrutura construtiva do capacitor de filme plástico não metalizado bobinado

Tipo Metalizado: Têm como característica marcante a propriedade de autoregeneração. O dielétrico desses capacitores consiste de filmes de plástico em cuja superfície é depositada, por processo de vaporização, uma fina camada de alumínio, deixando-o metalizado. Na fabricação do capacitor pode-se bobinar ou dispor o conjunto armaduras-mais-dielétrico em camadas (em sanfona). Através da

contactação das superfícies laterais dos capacitores com metal vaporizado, obtémse bom contato entre as armaduras e os terminais, assegurando baixa indutância e baixas perdas. No caso de aplicação de uma sobretensão que perfure o dielétrico a camada de alumínio existente ao redor do furo é submetida a elevada temperatura, transformando-se em óxido de alumínio (isolante) desfazendo-se então o curtocircuito. Este fenômeno é conhecido como auto-regeneração.

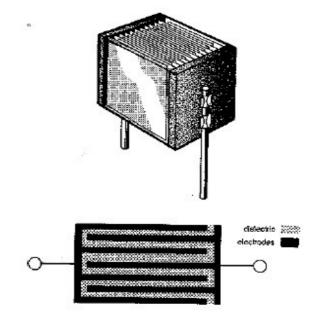


FIGURA 17 - Estrutura construtiva do capacitor de filme plástico metalizado sanfonado

### 3.4.1 CAPACITORES STYROFLEX

É o primeiro capacitor a utilizar o plástico como dielétrico, neste caso o poliestireno. Este material apresenta a constante dielétrica mais baixa entre os plásticos e não sofre influência das freqüências altas. Neste tipo de capacitor são enroladas folhas de poliestireno entre folhas de alumínio.

As principais vantagens deste tipo de capacitor são: o reduzido fator de perda, alta precisão, tolerância baixa (em torno de 0,25 %), tensões de trabalho entre 30 e 600 V.

#### 3.4.2 CAPACITORES DE POLIPROPILENO

O polipropileno é um plástico com propriedades análogas ao polietileno, e apresenta resistência ao calor, aos solventes orgânicos e a radiação. O modo de fabricação é o utilizado no capacitor de poliestireno.

Estes componentes são ideais para aplicação em circuitos de filtros ou ressonantes.

É capaz de trabalhar com níveis de corrente maiores que aqueles suportados pelo capacitor de poliéster. As cores e a forma de identificação do componente costumam ser as mesmas utilizadas no capacitor de poliéster.



FIGURA 18 – Capacitores Stiroflex

### 3.4.3 CAPACITORES DE POLIÉSTER

É formado internamente por uma tirinha de poliéster enrolada com duas tirinhas de papel metálico. O capacitor de poliéster possui capacitância mediana, desde alguns nF até alguns uF. Apresenta capacidade de operar em freqüências elevadas, porém com baixa capacidade de corrente. Em geral apresenta dimensões relativamente pequenas.

Estes componentes foram criados para substituir os capacitores de papel, tendo como principais vantagens sobre os constituídos de papel: maior resistência mecânica, não é um material higroscópico, suporta ampla margem de temperatura (-50 °C a 150 °C) com grande rigidez dielétrica.

Por apresentar variações de sua capacitância com a freqüência, não são recomendados para aplicação em dispositivos que operem em freqüências superiores a MHz.



FIGURA 19 – Capacitor de Poliéster

#### 3.5 CAPACITORES DE MICA

Estes tipos de capacitores são fabricados alternando-se películas de mica (silicato de alumínio) com folhas de alumínio. Esses capacitores têm boa estabilidade por que o seu coeficiente de temperatura é pequeno. Tem também excelentes características de freqüência, sendo usados em circuitos ressonantes e filtros de alta freqüência. Como tem boa isolação, sendo ideais para circuitos de alta tensão. Suas capacitâncias variam de 5pF a 100 nF, apresentando elevada precisão.



FIGURA 20 – Capacitores de Mica

### 3.6 CAPACITORES DE PAPEL

São fabricados enrolando-se uma ou mais folhas de papel entre folhas metálicas. Todo o conjunto é envolvido em resina termoplástica. Esse tipo de componente é barato e é aplicado em usos gerais.

Capacitores de filtro com dielétrico de papel são volumosos e seu valor é em geral limitado a menos do que 10 m F. Eles não são polarizados e podem suportar altas tensões. Não há fuga apreciável de corrente através de um destes capacitores.

Para melhorar as características o papel pode ser impregnado com óleo, o que ocasiona:

- Aumento da rigidez dielétrica.
- Aumento da margem de temperatura de aplicação do capacitor.
- Aplicação de altas tensões.

## 3.7 CAPACITORES VARIÁVEIS

Capacitores variáveis são aqueles que permitem que o seu valor de capacitância seja variado dentro de uma determinada faixa de valores.

Geralmente são construídos com dielétrico de ar ou de filme plástico e sua capacitância pode ser variada por meio de um eixo ou parafuso, no qual estão montadas as placas ou grupos de placas móveis. Um outro grupo de placas é fixo e é montado sobre um material isolante, o corpo ou chassi do componente.

O grupo de placas móveis que constitui o capacitor variável é formado por placas metálicas em forma de segmentos, unidas a um eixo central de movimento rotativo ou a um parafuso de aperto que permitem, em ambos os casos, variar a posição ou distância entre as placas móveis e fixas. Variando a distância entre as placas ou a área superposta das placas, variamos a capacitância.

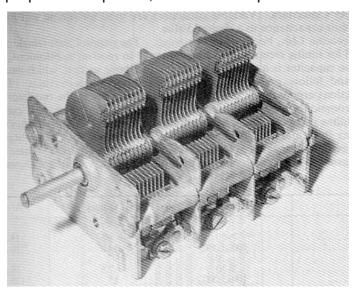


FIGURA 21 – Capacitor Variável

#### 3.7.1 TRIMMERS

Os capacitores variáveis do tipo "trimmer" são constituídos geralmente por 2 placas metálicas, separadas por uma lâmina de mica, dispostos de tal forma que é possível variar-se a separação entre ambas mediante a pressão exercida entre elas por um parafuso. Desta forma pode-se ajustar a sua capacitância.

São normalmente utilizados em rádios portáteis e em diversos dispositivos eletrônicos. Tem capacitâncias máximas em torno de 500 pF. São utilizados principalmente para o ajuste do valor correto da capacitância total de um circuito.

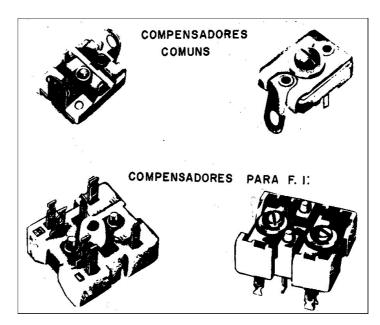


FIGURA 22 - Aspectos construtivos dos capacitores tipo "trimmer".



FIGURA 23 - "Trimmers"

### 4. FUTURO DOS CAPACITORES

### 4.1 NANOCAPACITORES ELETROSTÁTICOS

Pesquisadores da Universidade de Maryland, nos Estados Unidos, desenvolveram uma nova tecnologia para armazenar energia elétrica que, em alguns casos, chega a ser 10 vezes mais eficiente dos que as melhores alternativas disponíveis hoje.

O professor Sang Bok Lee e sua equipe criou milhões de nanoestruturas idênticas com formatos ajustados para a melhor eficiência na transferência de elétrons das grandes áreas superficiais onde eles são armazenados.

# 4.1.1COMBINAÇÕES ÚNICAS DE MATERIAIS

Os materiais sempre se comportam segundo as leis básicas da natureza. O que os pesquisadores fizeram foi explorar combinações pouco usuais desses comportamentos para construir as suas nanoestruturas.

"Esses dispositivos exploram combinações únicas de materiais, processos e estruturas para otimizar combinações de potência e densidade de energia que, tomadas em conjunto, representam uma promessa real para a construção da próxima de geração da tecnologia de armazenamento de eletricidade e de todo um novo setor da indústria de tecnologia," diz o professor Gary Rubloff, outro participante da pesquisa.

### 4.1.2 TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os dispositivos de armazenamento de eletricidade atualmente disponíveis podem ser ordenados em três categorias. O primeiro grupo é o das baterias, onde se destacam as baterias de íons de lítio, com grande capacidade de armazenamento, mas com pequena capacidade para receber energia (recarregar) e liberar energia (liberar correntes elevadas).

A segunda categoria é a dos capacitores eletroquímicos (EECs), mais conhecidos como supercapacitores, que também funcionam com base nos princípios eletroquímicos, com altas capacidades de potência, recarregando rapidamente e liberando muita energia, ao custo de uma capacidade reduzida de armazenamento.

Na última categoria estão os capacitores eletrostáticos (ESCs), que operam por meios unicamente físicos, armazenando cargas na superfície de dois condutores. Isto os torna capazes de liberar altas potência e recarregar rapidamente, mas ao custo de uma baixa densidade energética.

Os novos dispositivos agora desenvolvidos enquadram-se nesta última categoria. Como foram construídos com as mais modernas ferramentas da nanotecnologia, eles estão sendo chamados de nanocapacitores eletrostáticos.

O ganho foi justamente naquele que é o elo fraco desse tipo de dispositivo: a densidade energética. Os nanocapacitores eletrostáticos chegam a ser 10 vezes mais eficientes do que os dispositivos desse tipo disponíveis atualmente.

Esse aumento de eficiência os coloca em pé de igualdade com os capacitores eletroquímicos, inscrevendo um novo candidato na briga pela próxima geração de dispositivos de armazenamento de energia.

### 4.1.3VEÍCULOS ELÉTRICOS E PAINÉIS SOLARES

Outra vantagem dos nanocapacitores é que eles podem ser produzidos na forma de finíssimos painéis, que podem ser empilhados para formar sistema de armazenamento de maior capacidade - para uso em veículos elétricos, por exemplo - ou serem integrados em painéis solares - compondo um sistema completo de captura e armazenamento de energia limpa que independe das condições meteorológicas.

### 4.2 MEMÓRIA NÃO-VOLÁTIL DE CERÂMICA

Um grupo de cientistas alemães e coreanos, trabalhando conjuntamente, desenvolveu uma nova técnica para a fabricação de memórias de computadores de altíssima densidade e capaz de manter as informações mesmo na ausência de energia.

## **4.2.1 MEMÓRIA DE NANOCAPACITORES**

Utilizando uma máscara com furos microscópicos, os pesquisadores construíram capacitores de platina e titanato-zirconato de chumbo (PZT) com uma densidade de 27 bilhões de bits por centímetro quadrado - o recorde mundial para esse tipo de material.

O armazenamento em nanocapacitores é fácil de ser controlado e tem a vantagem de ser não-volátil porque o PZT é ferroelétrico. É possível controlar cada nanocapacitor individualmente mesmo quando eles estão separados apenas 60 nanômetros uns dos outros.

### 4.2.2 MÁSCARA COM NANOFUROS

E o sistema de máscara com nanofuros é uma solução muito simples em comparação com as técnicas de fabricação de outros tipos de memória. A máscara é feita de óxido de alumínio, por meio da qual os nanocapacitores de PZT são construídos sobre uma camada de platina. A seguir, a platina é "recortada" por litografia para fazer os contatos de cada individual célula de memória.

#### 4.3 SUPER-CAPACITORES DE NANOTUBOS DE CARBONO

Supercapacitores são dispositivos de armazenamento de energia elétrica capazes de liberar uma quantidade enorme de energia num curto período de tempo. Eles têm larga aplicação na indústria, em processos onde são exigidos pulsos elétricos rápidos mas muitíssimo intensos.

Agora engenheiros da Universidade UC Davis, Estados Unidos, desenvolveram um novo tipo de super-capacitor que exigirá um novo superlativo para designá-lo: construído à base de nanotubos de carbono, ele é capaz de liberar uma quantidade ainda maior de energia.

O professor Ning Pan, e seus estudantes Chunsheng Du e Jeff Yeh, conseguiram desenvolver um método para depositar os nanotubos de carbono sobre folhas de níquel, mantendo-os perfeitamente alinhados e muito próximos uns dos outros. Devido ao seu diminuto tamanho, os nanotubos fornecem uma gigantesca área superficial, na qual a energia pode ser armazenada e depois liberada.

Os novos super-capacitores podem armazenar energia numa densidade de 30 kilowatts por quilo (kW/kg), comparado com 4 kW/kg dos mais avançados capacitores hoje disponíveis comercialmente. Segundo Pan, outros pesquisadores já haviam descrito supercapacitores com capacidades de até 20 kW/kg.

### 4.4 CAPACITOR COM DIELÉTRICO DE TITANATO DE BÁRIO

Agora, cientistas da Universidade Georgia Tech, Estados Unidos, conseguiram um avanço que, sozinho, deverá dobrar a eficiência dos capacitores. Trata-se de uma nova técnica para a criação de filmes de titanato de bário (BaTiO3), um material com excelentes propriedades dielétricas.

### 4.4.1 DIELÉTRICOS

O titanato de bário chama a atenção dos pesquisadores há muito tempo. Mas, até agora, não se conhecia uma técnica que permitisse dispersá-lo sobre um substrato de polímero para se criar uma película que pudesse ser inserida entre os eletrodos dos capacitores.

Utilizando ácidos fosfônicos orgânicos adaptados, os cientistas conseguiram encapsular e modificar a superfície das nanopartículas de titanato de bário, o que permitiu sua dispersão uniforme sobre a matriz de polímero.

"Nossa equipe desenvolveu nanocompósitos que têm uma incrível combinação de alta constante dielétrica e alta resistência à interrupção dielétrica," explica o professor Joseph W. Perry. "Para capacitores e aplicações correlatas, a quantidade de energia que você pode armazenar em um material está relacionada a esses dois fatores."

## 4.4.2 ENCAPSULAMENTO DE NANOPARTÍCULAS

Além do melhoramento dos capacitores, a pesquisa está gerando grande interesse devido ao método que foi utilizado pelos cientistas. A técnica de encapsulamento das nanopartículas poderá ter aplicações em outras áreas, para a sintetização de outros materiais compósitos em nanoescala.

"Além dos capacitores, há muitas áreas nas quais os materiais dielétricos são importantes, como os transistores de efeito de campo (FET), telas e outros equipamentos eletrônicos," diz Perry. "Com nosso material, nós disponibilizamos uma camada de alto dielétrico que poderá ser incorporada nesses tipos de aplicação."

### 5. CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível concluir que o capacitor é um dispositivo extremamente útil na engenharia, principalmente nas áreas elétricas e eletrônicas.

Os diversos tipos de capacitores variam de suas formas de fabricação e materiais utilizados. Cada material fornece uma característica diferente ao capacitor, existindo assim diversos modelos de capacitores com funções e características diferentes. Conhecer um pouco desses materiais e suas particularidades é extremamente importante para uma maior compreensão dos capacitores e para analisar qual tipo deve ser utilizado em cada caso específico.

### 6. REFERÊNCIAS

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa VILLAÇA, Marco Valério Miorim. **Capacitores.** 3. ed. Florianópolis: CEFET, 2000.

RESPOSTA técnica. Disponível em: <a href="http://www.sbrt.ibict.br">http://www.sbrt.ibict.br</a> Acesso em: 6 jun. 2008.

MEHL, Evaldo L.M. **Capacitores Eletrolíticos de Alumínio:**Alguns cuidados e considerações práticas. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads>. Acesso em: 8 jun. 2008

CAPACITORES. Disponível em <a href="https://www.lps.usp.br/lps/arquivos/conteudo/grad/dwnld/Capacitores.ppt">www.lps.usp.br/lps/arquivos/conteudo/grad/dwnld/Capacitores.ppt</a>. Acesso em: 27 jun. 2009.

NOVAS TECNOLOGIAS. Disponível em <WWW.inivacaotecnologia.com.br>. Acesso em: 27 jun 2009.

## **CAPACITOR DE TÂNTALO**

## Diego Raphael de Oliveira

# 1. INTRODUÇÃO

Esse trabalho tem por objetivo principal a descrição do capacitor de tântalo e o material do qual é feito. Descrevem-se também os capacitores de um modo geral, para o entendimento de sua funcionalidade e características principais em um circuito elétrico.

#### 2. CAPACITORES

Para um bom entendimento do assunto, daremos uma descrição do que é um capacitor e suas características principais.

Capacitores são elementos elétricos capazes de armazenar carga elétrica e, consequentemente, energia potencial elétrica.

Podem ser esféricos, cilíndricos e planos, constituindo-se de dois condutores denominados armaduras que, ao serem eletrizados, num processo de indução total, armazenam cargas elétricas de mesmo valor absolto, porém sinais contrários.

O capacitor tem inúmeras aplicações na eletrônica, podendo servir para armazenar energia elétrica, carregando-se e descarregando-se muitas vezes por segundo. Na eletrônica, para pequenas variações da diferença de potencial, o capacitor pode fornecer ou absorver cargas elétricas, pode ainda gerar campos elétricos de diferentes intensidades ou muito intensos em pequenos volumes.

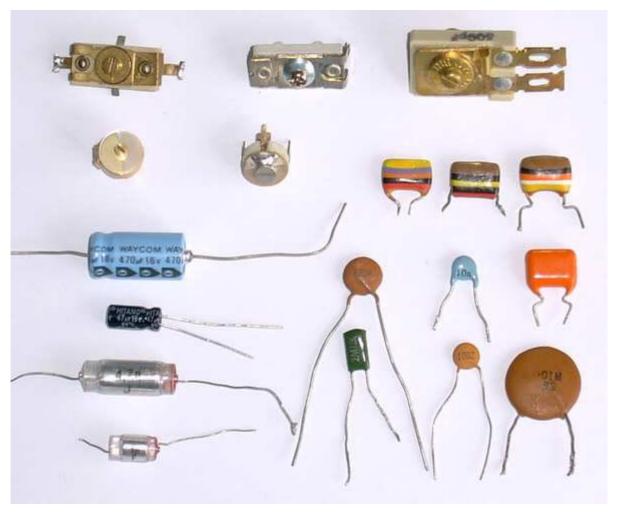


FIGURA 1 - Capacitores

### 2.1 HISTÓRIA

A Jarra de Leyden, primeira forma de capacitor, fora inventada na Universidade de Leiden, na Holanda. Era uma jarra de vidro coberta com metal. A cobertura interna era conectada a uma vareta que saia da jarra e terminava numa bola de metal.

### 2.2 VISÃO GERAL

Os formatos típicos consistem em dois eletrodos ou placas que armazenam cargas opostas. Estas duas placas são condutoras e são separadas por um isolante ou por um dielétrico. A carga é armazenada na superfície das placas, no limite com o dielétrico. Devido ao fato de cada carga armazenar cargas iguais, porém opostas, a carga total no dispositivo é sempre zero.

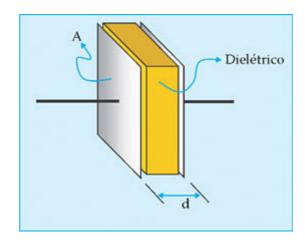


FIGURA 2 – Modelo esquemático de um capacitor de placas paralelas

### 2.3 CAPACITÂNCIA

A carga elétrica armazenada em um capacitor é diretamente proporcional à diferença de potencial elétrico ao qual foi submetido.

Assim sendo, definimos capacidade eletrostática C de uma capacidade como a razão entre o valor absoluto da carga elétrica Q que foi movimentada de uma armadura para outra e a ddp U nos seus terminais.

Essa carga elétrica corresponde à carga de sua armadura positiva.

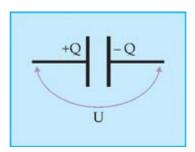


FIGURA 3 - Diferença de potencial nos terminais de um capacitor

$$C = \frac{Q}{U}$$

A capacidade eletrostática de um capacitor depende da forma e dimensões de suas armaduras e do dielétrico entre as mesmas.

A unidade de capacitância no SI é o farad (F).

A capacitância de um capacitor de placas paralelas constituído de dois eletrodos planos idênticos de área A separados à distância constante d (ver figura 2) é aproximadamente igual a:

$$C = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

#### Onde

- -C é a capacitância em farads
- - $\varepsilon_{\scriptscriptstyle o}$  é a permissividade eletrostática do vácuo ou espaço livre
- $-\varepsilon_r$  é a constante dielétrica ou permissividade relativa do isolante utilizado.

#### 2.4 ENERGIA ARMAZENADA

A energia armazenada (J) em um capacitor é igual ao trabalho feito para carregá-lo. Considere um capacitor com capacitância C, uma carga +q em uma placa e -q na outra (ver figura 3). Movendo um pequeno elemento de carga dq de uma placa para a outra contra a diferença de potencial V=q/C necessita de um trabalho dw:

$$dW = \frac{q}{C} dq$$

Nós podemos descobrir a energia armazenada integrando essa equação. Começando com um capacitor descarregado (q=0) e movendo carga de uma placa para a outra até que as placas tenham carga +Q e -Q, necessita de um trabalho W.

$$W_{carregando} = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 = E_{armazenada}$$

### 2.5 TIPOS DE CAPACITOR

Capacitores comercialmente disponíveis são especificados pelo dielétrico utilizado e pela forma como ele é construído (fixo ou variável). Na prática quando o capacitor é submetido a um campo elétrico circula uma pequena corrente pelo dielétrico, conhecida como corrente de fuga. Esta corrente é geralmente muito pequena que pode ser considerada desprezível.

#### 2.5.1 CAPACITOR DE CERÂMICA

Consiste de um tubo ou disco de cerâmica de constante dielétrica na faixa de 10 a 10.000. Uma fina camada de prata é aplicada a cada lado do dielétrico. Este tipo de capacitor é caracterizado por baixas perdas, pequeno tamanho e uma conhecida característica de variação de capacitância com a temperatura.

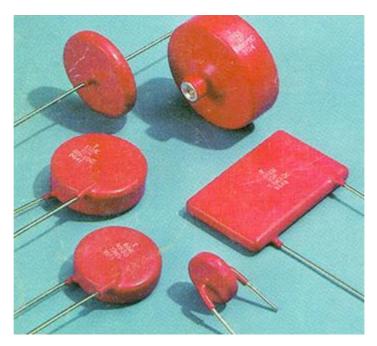


FIGURA 4 – Capacitores cerâmicos

### 2.5.2 CAPACITOR DE PAPEL

Consiste em folhas de alumínio e papel kraft (normalmente impregnado com graxa ou resina) enroladas e moldadas formando uma peça compacta. Os capacitores de papel são disponíveis na faixa de 0,0005  $\mu F$  a aproximadamente 2  $\mu F$ .



FIGURA 5 – Capacitores de papel

### 2.5.3 CAPACITOR DE FILME PLÁSTICO

Bastante similar ao capacitor de papel, na sua forma construtiva. Dielétricos de filme plástico, com poliéster e polietileno, separam folhas metálicas usadas como placas. O capacitor é enrolado e encapsulado em plástico ou metal.



FIGURA 6 – Capacitores de filme plástico

### 2.5.4 CAPACITOR DE MICA

Consiste de um conjunto de placas dielétricas de mica alternadas por folhas metálicas condutoras. O conjunto é então encapsulado em um molde de resina fenólica.

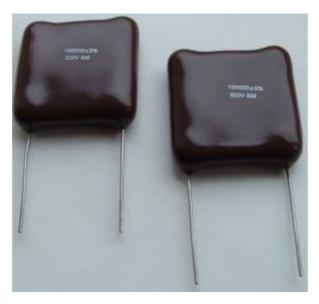


FIGURA 7 – Capacitores de mica

## 2.5.5 CAPACITOR DE VIDRO

Caracterizado por camadas alternadas de folhas de alumínio e tiras de vidro, agrupadas até que seja obtida a estrutura do capacitor desejado. A construção é então fundida em um bloco monolítico com a mesma composição do vidro usado como dielétrico.



FIGURA 8 - Capacitor de vidro

### 2.5.6 CAPACITOR ELETROLÍTICO

Consiste de duas placas separadas por um eletrólito e um dielétrico. Este tipo possui altos valores de capacitância, na faixa de 1  $\mu$ F até milhares de  $\mu$ F. As correntes de fuga são geralmente maiores que aos demais tipos de capacitores.

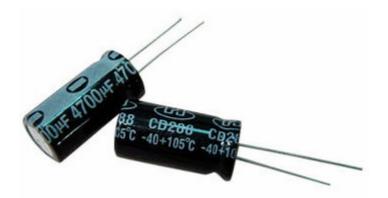


FIGURA 9 – Capacitores eletrolíticos de alumínio

#### 2.5.7 CAPACITORES DE TÂNTALO

Este capacitor e as características do material que é feito é a base do trabalho e será apresentado separadamente.

Os capacitores variáveis geralmente utilizam o ar como dielétrico e possuem um conjunto de placas móveis que se encaixam num conjunto de placas fixas. Outro tipo de capacitor variável é o *trimmer* ou *padder*, formado por duas ou mais placas separadas por um dielétrico de mica. Um parafuso é montado de forma que ao apertá-lo, as placas são comprimidas contra o dielétrico reduzindo sua espessura e, consequentemente, aumentando a capacitância.



FIGURA 10 - Trimmers

# 2.6 CÓDIGOS DE CAPACITORES

Capacitores cerâmicos: os capacitores cerâmicos apresentam impressos no próprio corpo, um conjunto de 3 algarismos e uma letra. Para se obter o valor do capacitor, os 2 primeiros algarismos, representam os 2 primeiros dígitos do valor do capacitor e o terceiro algarismo representa o número de zeros à direita, a letra representa a tolerância do capacitor. É usado também nos capacitores de tântalo.

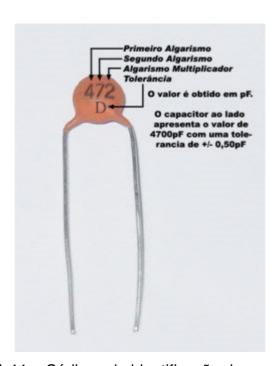


FIGURA 11 – Códigos de identificação dos capacitores

## 2.6.1 CAPACITORES DE POLIÉSTER

Para a identificação dos valores do capacitor de poliéster é usado um conjunto de 5 faixas coloridas, 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.



FIGURA 12 – Capacitor de poliéster e tabela de identificação

### 3. CAPACITORES DE TÂNTALO

São capacitores eletrolíticos que usam um material chamado tântalo para os eletrodos. Grandes valores de capacitância similares ao de alumínio podem ser obtidos Capacitores de tântalo são superiores ao de alumínio, no que se refere à temperatura e à freqüência de operação. Usualmente o símbolo + é usado para indicar o pólo positivo. São usados em circuitos que precisam que o valor da capacitância seja constante com a temperatura e a freqüência.

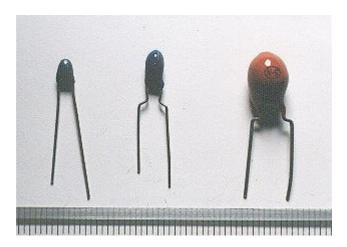


FIGURA 14 – capacitores de tântalo

O dielétrico utilizado é o óxido de tântalo  $(Ta_2O_5)$ , que reduz a dimensão destes capacitores em relação aos outros eletrolíticos. Apresentam baixas tolerâncias (20%) e tem máxima operação de 120 V, mas são muito caros.

Seu emprego é aconselhável sobretudo como capacitor de acoplamento para estágios de baixas freqüências, graças ao seu baixo nível de ruído. Também é indicado para aplicações que demandem armazenagem de cargas de alta energia. Além do tipo tubular, é encontrado também na forma de "gota".

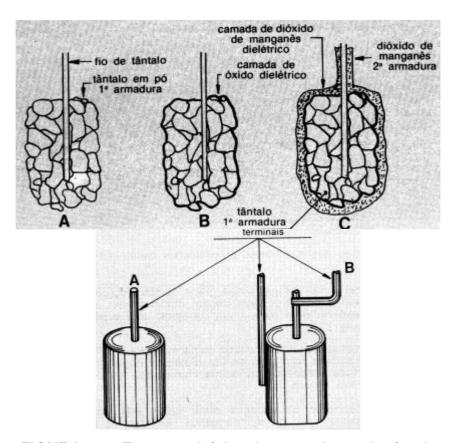


FIGURA 15 – Formação básica dos capacitores de tântalo

A seguir será estudada substância tântalo e o seu óxido, usado como dielétrico no capacitor.

## **4 TÂNTALO**

#### 4.1 História

O tântalo (do grego "Tântalo", pai de Níobe na mitologia grega) foi descoberto em 1802 por Anders G. Ekeberg em minerais provenientes da Suécia e da Finlândia e isolado em 1820 Jons Berzelius. Até 1844 muitos químicos acreditavam que o nióbio e o tântalo eram os mesmos elementos. Os pesquisadores Rowe e Jean Charles Galissard de Marignac demonstraram que os ácidos nióbico e o tantálico eram compostos diferentes. Posteriormente os investigadores puderam isolar somente o metal impuro, e o primeiro metal dúctil relativamente puro foi produzido por Werner von Bolton em 1903. Em 1922, um engenheiro de uma usina de Chicago conseguiu obter industrialmente o tântalo com 99,9% de pureza. Os filamentos feitos com o metal tântalo eram usados em lâmpadas incandescentes até serem substituídos pelo tungstênio.



FIGURA 16 – Anders G. Ekeberg



FIGURA 17 - Jons Berzelius



FIGURA 18 – Werner von Bolton

Seu nome é derivado do caráter Tântalo (filho de Zeus e pai de Níobe, da mitologia grega) que, por desagradar aos deuses, foi condenado a ficar eternamente com fome e sede mergulhado de joelhos com água até o pescoço, sob uma árvore carregada de frutos. Quando se dobrava para beber, a água drenava e, quando levantava as mãos para apanhar frutos, os galhos se moviam para fora de seu alcance. Esta similaridade com o comportamento não reativo do tântalo – estar entre reagentes e não se afetado por eles - foi a origem do seu nome.

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

O tântalo é um elemento químico de número atômico 73 (73 prótons e 73 elétrons), símbolo Ta com massa atômica 181 u que se situa no grupo 5 da classificação periódica dos elementos. Trata-se de um metal de transição raro, azul grisáceo, duro, pesado, muito dúctil, bom condutor de calor e eletricidade, apresenta brilho metálico e resiste muito bem à corrosão. Na temperatura ambiente o tântalo encontra-se no estado sólido. Apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado. Possui um raio atômico de 0,1430 nm.

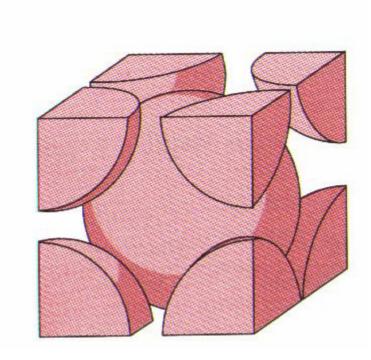


FIGURA 19 - Estrutura ccc



FIGURA 20 - Posição do tântalo na tabela periódica



FIGURA 21 - Tântalo

É encontrado no mineral tantalita. Fisiologicamente inerte, de modo que, entre suas varias aplicações, pode ser empregado para a fabricação de instrumentos cirúrgicos e em implantes.

Em temperaturas abaixo de 150 ℃, é quase completamente imune ao ataque químico. Somente é atacado pelo ácido fluorídrico. Tem um ponto de fusão apenas menor que o do tungstênio e o rênio. Tem a maior capacitância por volume entre todas as substâncias. Assemelha-se ao nióbio, podendo ser encontrados nos minerais columbita-tantalita.

A tabela 1 relaciona as principais características do tântalo.

**TABELA 1** – Características do Tântalo

Grandeza	Valor	Unidade
Massa específica do		
sólido	16650	kg/m <sup>3</sup>
Ponto de fusão	3017	°C
Calor de fusão	36	kJ/mol
Ponto de ebulição	5458	℃
Calor de vaporização	735	kJ/mol
Temperatura crítica	s/ dado	℃
Eletronegatividade	1,5	Pauling
Estados de oxidação	+5	-
Resistividade elétrica	13	$10^{-8}  \Omega  \text{m}$
Condutividade térmica	57,5	W/(m°C)
Calor específico	140	J/(kg℃)
Coeficiente de expansão		
térmica	0,63	10 <sup>-5</sup> (1/°C)
Coeficiente de Poisson	0,34	-
Módulo de elasticidade	186	GPa
Velocidade do som	3400	m/s
Estrutura cristalina	cúbica de corpo centrado	-

# 4.3 APLICAÇÕES

O principal uso do tântalo é como óxido, um material dielétrico, para a produção de componentes eletrônicos, principalmente capacitor, que são muito pequenos em relação a sua capacidade. Por causa desta vantagem do tamanho e do peso, os principais usos para os capacitores de tântalo incluem telefones, pagers, computadores pessoais e eletrônicos automotivos.

Também é usado para produzir uma série de ligas que possuem altos pontos de fusão, alta resistência e boa ductilidade. O tântalo de carbono, um tipo de carbeto muito duro, é usado para produzir ferramentas de cortes, furadeiras e máquinas trefiladoras. O tântalo em superligas é usado para produzir componentes de motores de jatos, equipamento para processos químicos, peças de mísseis e reatores nucleares. Filamentos de tântalo são usados para evaporação de outros metais como o alumínio.

Por ser não-irritante e totalmente imune à ação dos fluidos corporais, é usado extensivamente para produzir equipamentos e implantes cirúrgicos em medicina e odontologia. O óxido de tântalo é usado para elevar o índice de refração de vidros especiais para lentes de câmera. O metal também é usado para produzir peças eletrolíticas de fornalhas de vácuo.

#### 4.4 OCORRÊNCIA

Ocorre principalmente no mineral tantalita ((Fe, Mn)Ta<sub>2</sub>O<sub>6</sub>), euxenita e outros minerais como a samarskita e a fergunosita. A tantalita é encontrada na maior parte misturada a columbita. Na crosta terrestre, o tântalo participa com 8 ppm (parte por milhão) em peso.

Minérios de tântalo são encontrados na Austrália, Brasil, Canadá, Congo, Moçambique, Nigéria, Portugal e Tailândia.

O tântalo quase sempre é encontrado em minerais associado nióbio. Diversas etapas complicadas estão envolvidas na separação destes dois elementos. Comercialmente a produção de tântalo pode seguir um dos diversos métodos:

- eletrólise do fluortantalato de potássio fundido;
- redução do fluortantalato de potássio com sódio;
- reagindo o carboneto de tântalo com o óxido de tântalo;
- como subproduto da extração do estanho.

534

4.5 COMPOSTOS

Um dos compostos importantes é o pentóxido de tântalo (Ta2O5) que por ser

um material dielétrico é usado para a fabricação de capacitores utilizados em

equipamentos eletrônicos e, em vidros especiais para a fabricação de lentes devido

ao alto índice de refração.

4.6 PRECAUÇÕES

Compostos que contêm tântalo raramente são encontrados, e o metal

normalmente não causa problemas quando manuseado em laboratório, entretanto

deve ser considerado como altamente tóxico. Há alguma evidência que os

compostos de tântalo podem causar tumores, e a poeira do metal é explosiva.

5. CONCLUSÃO

No desenvolvimento do trabalho puderam-se ver as características principais

dos capacitores de um modo geral. No capacitor de tântalo observamos a função do

metal neste, diminuindo seu tamanho, podendo ser usado em aparelhos eletrônicos

de pequenos tamanhos. Foi abordado também o elemento tântalo e suas

características mais importantes que influenciam diretamente no capacitor do

mesmo.

6. REFERÊNCIAS

Capacitores. Disponível em: http://www.fisica-

potierj.pro.br/poligrafos/capacitores.htm

Capacitor. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Capacitor

Tipos de capacitor. Disponível em:

http://www.dsee.fee.unicamp.br/~sato/ET515/node16.html

Capacitores. Disponível em:

http://www.eletronica24h.com.br/Curso%20CA/aparte1/aulas/capacitores.html

BOYLESTAD, L. Robert. Introdução à análise de circuitos elétricos. Tradução de José Lucimar do Nascimento. Revisão técnica de Antônio Pertence Júnior. 10. ed.

São Paulo: Pearson 2006

### TIRISTOR SCR: RETIFICADOR CONTROLADO DE SILICIO

### Fernando Winter Filho

## 1. INTRODUÇÃO

O tiristor é um dispositivo multicamada biestável, composto de quatro ou mais junções, que permitem o chaveamento do estado de corte para estado de condução e vice-versa. Como exemplo, podemos citar o SCR e o TRIAC.

Um tiristor é funcionalmente diferente de um diodo porque mesmo quando o dispositivo está diretamente polarizado ele não irá conduzir enquanto não ocorrer um pulso na porta. Ao invés de precisar de um sinal continuamente na porta (como nos TBJs e MOSFETs), os tiristores são ligados por um pulso. Para os SCRs, o sinal de controle é um pulso de corrente, tiristores DB-GTO usam um pulso de tensão e os LASCRs um pulso de luz. Uma vez ligado, o tiristor continua ligado enquanto o dispositivo estiver diretamente polarizado.

Os SCRs (Silicon Controlled Rectifier) são dispositivos semicondutores cuja condição de sentido direto é comandável através da aplicação de um determinado sinal ao eletrodo de controle (Gate). A condução, uma vez iniciada se mantém, mesmo na ausencia do sinal de comando, até que a corrente que o atravessa caia abaixo de um determinado valor, chamado corrente de operação. Em sentido inverso, o SCR comporta-se como um diodo normal. Os SCR's são empregados em corrente alternada como retificadores, e quando utilizados em corrente contínua comportam-se como chaves. O SCR é apenas um tipo de tiristor, mas devido ao seu disseminado uso na indústria, muitas vezes os termos tiristor e SCR são confundidos. Os TRIACs são dispositivos semicondutores comumente utilizados em comutação de corrente alternada.

### 2. TIRISTOR SCR - RETIFICADOR CONTROLADO DE SILICIO

### 2.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

O Tiristor SCR (Silicon Controlled Rectifier) foi desenvolvido por um grupo de engenheiros do Bell Telephone Laboratory (EUA) em 1957. É o mais conhecido e aplicado dos Tiristores existentes.

Tiristor é o nome genérico dado à família dos componentes compostos por quatro camadas semicondutoras (PNPN).

Os Tiristores SCR's funcionam analogamente a um diodo, porém possuem um terceiro terminal conhecido como Gatilho (*Gate* ou Porta). Este terminal é responsável pelo controle da condução (disparo). Em condições normais de operação, para um SCR conduzir, além de polarizado adequadamente (tensão positiva no Ânodo), deve receber um sinal de corrente no gatilho, geralmente um pulso.

A principal aplicação que os SCR têm é a conversão e o controle de grandes quantidades de potência em sistemas CC e CA, utilizando apenas uma pequena potência para o controle. Isso se deve à sua ação de chaveamento rápido, ao seu pequeno porte e aos altos valores nominais de corrente e tensão em que podem operar.

Algumas características dos SCR's:

- São chaves estáticas bi-estáveis, ou seja, trabalham em dois estados: não condução e condução, com a possibilidade de controle.
- Em muitas aplicações podem ser considerados chaves ideais, mas há limitações e características na prática.
- São compostos por 4 camadas semicondutoras (P-N-P-N), três junções (P-N) e 3 terminais (Ânodo, Cátodo e Gatilho).
- São semicondutores de silício. O uso do silício foi utilizado devido a sua alta capacidade de potência e capacidade de suportar altas temperaturas.
  - Apresentam alta velocidade de comutação e elevada vida útil;
- Possuem resistência elétrica variável com a temperatura, portanto, dependem da potência que estiverem conduzindo.
- São aplicados em controles de relés, fontes de tensão reguladas, controles de motores, *Choppers* (variadores de tensão CC), Inversores CC-CA, Cicloconversores (variadores de freqüência), carregadores de baterias, circuitos de proteção, controles de iluminação e de aquecedores e controles de fase, entre outras.

A figura 1 apresenta a simbologia utilizada e as camadas, junções e terminais, enquanto a figura 2 apresenta um tipo de estrutura construtiva para as camadas de um SCR. A figura 3 mostra a aparência do encapsulamento tipo TO de um SCR

muito utilizado, já acoplado a um dissipador de calor. A figura 4 mostra alguns SCR de alta potência com encapsulamento tipo rosca e tipo disco.

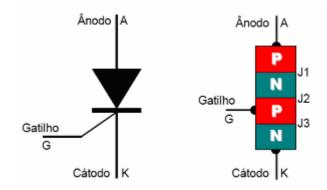


FIGURA 1 - SRC: simbologia, camadas e junções

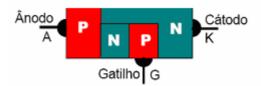


FIGURA 2 – Um tipo estrutura interna das camadas de um SRC

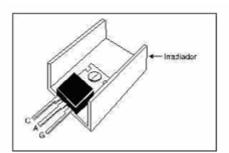


FIGURA 3 – Encapsulamento tipo TO para SRC, com dissipador de calor



Figura 1.4 – SCR com encapsulamentos tipo rosca e tipo disco para altas potências [ref. 3]

**FIGURA 4** – SCR com encapsulamento tipo rosca e tipo disco para altas potências

### 2.2 SCR IDEAL

Um SCR ideal se comportaria com uma chave ideal, ou seja, enquanto não recebesse um sinal de corrente no gatilho, seria capaz de bloquear tensões de valor infinito, tanto com polarização direta como reversa. Bloqueado, o SCR ideal não conduziria qualquer valor de corrente. Tal característica é representada pelas retas 1 e 2 na Figura 5.

Quando disparado, ou seja, quando comandado por uma corrente de gatilho IGK, o SCR ideal se comportaria como um diodo ideal, como podemos observar nas retas 1 e 3. Nesta condição, o SCR ideal seria capaz de bloquear tensões reversas infinitas e conduzir, quando diretamente polarizado, correntes infinitas sem queda de tensão e perdas de energia por Efeito Joule.

Assim como para os diodos, tais características seriam ideais e não se obtêm na prática. Os SCR reais têm, portanto, limitações de bloqueio de tensão direta e reversa e apresentam fuga de corrente quando bloqueados. Quando habilitados têm limitações de condução de corrente, pois apresentam uma pequena resistência à circulação de corrente e queda de tensão na barreira de potencial das junções que

provocam perdas de energia por Efeito Joule e conseqüente aquecimento do componente.

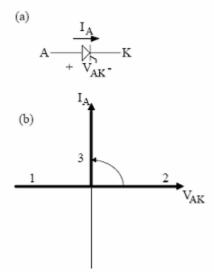
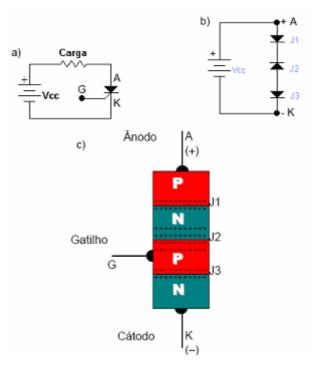


FIGURA 5 – (a) polarização direta (b) características estáticas de um SRC ideal

## 2.3 POLARIZAÇÃO DIRETA

A figura 6 apresenta um circuito de polarização direta de um SCR onde podemos verificar:

- Tensão do Ânodo positiva em relação ao Cátodo
- J1 e J3 polarizadas diretamente
- J2 polarizada reversamente: apresenta maior barreira de potencial
- Flui pequena Corrente de Fuga Direta de Ânodo para Cátodo, IF (Forward Current).
  - Bloqueio Direto DESLIGADO

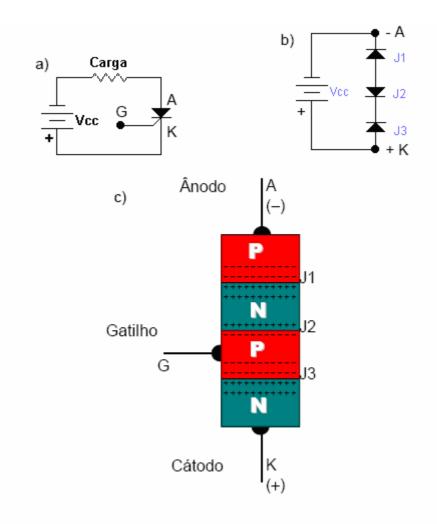


**FIGURA 6** – (a) SCR bloqueado em polarização direta; (b) analogia com diodos; (c) polarização nas junções.

## 2.4 POLARIZAÇÃO REVERSA

A figura 7 apresenta um circuito de polarização direta de um SCR onde podemos verificar:

- Tensão de Cátodo positiva em relação ao Ânodo.
- J2 diretamente polarizada
- J1 e J3 reversamente polarizadas: apresentam maiores barreiras de potencial.
- Flui pequena Corrente de Fuga Reversa de Cátodo para Ânodo, IR (*Reverse Current*).
  - Bloqueio Reverso DESLIGADO.



**FIGURA 7** – (a) SCR bloqueado em polarização reversa; (b) analogia com diodos; (c) efeito da polarização reversa nas junções.

### 2.5 MODOS DE DISPARO DE UM SCR

Um SCR é disparado (entra em condução) quando aumenta a Corrente de Ânodo IA, através de uma das seguintes maneiras.

### 2.5.1 CORRENTE DE GATILHO IGK

É o procedimento normal de disparo do SCR. Quando estiver polarizado diretamente, a injeção de um sinal de corrente de gatilho para o cátodo (IG ou IGK), geralmente na forma de um pulso, leva o SCR ao estado de condução. A medida que aumenta a corrente de gatilho para cátodo, a tensão de bloqueio direta diminui até que o SCR passa ao estado de condução.

A Figura 8 apresenta um circuito para disparo do SCR. Enquanto diretamente polarizado o SCR só começa a conduzir se receber um comando através de um

sinal de corrente (geralmente um pulso) em seu terminal de gatilho (*Gate* ou Porta). Esse pulso polariza diretamente o "segundo diodo formado pelas camada N e P" e possibilita a condução. Enquanto tivermos corrente entre ânodo e cátodo o SCR continua conduzindo, sendo ele cortado (bloqueado) somente quando a mesma for praticamente extinta. Nesta condição, as barreiras de potencial formam-se novamente e o SCR precisará de um novo sinal de corrente no gatilho para voltar ao estado de condução.

Polarizado reversamente o SCR funciona como um diodo, bloqueando a passagem de corrente, mesmo quando efetuado um pulso em seu Gatilho.

A característica gatilho-cátodo de um SCR se assemelha a uma junção PN, variando, portanto, de acordo com a temperatura e características individuais do componente, um exemplo de curva de disparo pode ser encontrado no anexo deste documento.

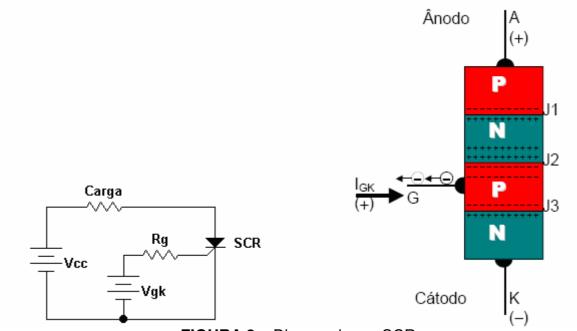


FIGURA 8 - Disparo de um SCR

Como entre o gatilho e o cátodo há uma junção PN, temos uma tensão de aproximadamente 0,7V. Desta forma, analisando o circuito da figura 9. podemos determinar os requisitos para o circuito de disparo do SCR.

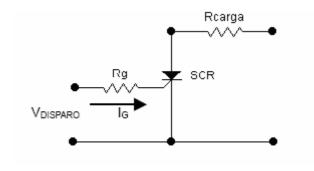


FIGURA 9 – circuito para disparo do SCR

Assim, a tensão VDISPARO necessária para proporcionar a corrente de disparo IG através da resistência limitadora RG pode ser dada por:

Um SCR pode disparar por ruído de corrente no gatilho. Para evitar estes disparos indesejáveis devemos utilizar um resistor RGK entre o gatilho e o cátodo que desviará parte do ruído, como indica a figura 10. Em alguns tipos de SCR, a resistência RGK já vem internamente no componente para diminuir sua sensibilidade.

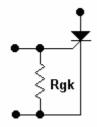


FIGURA 10 – Resistência para evitar disparos por ruídos no gatilho

# 2.5.2 CORRENTE DE RETENÇÃO E CORRENTE DE MANUTENÇÃO

Para entrar em condução o SCR deve conduzir uma corrente suficiente, cujo valor mínimo recebe o nome de Corrente de Retenção IL (*Latching Current*). O SCR não entrará em condução se a Corrente de Gatilho IGK for suprimida antes que a

Corrente de Ânodo IA atinja o valor da Corrente de Retenção IL.

Uma vez retirada a corrente de gatilho, a mínima Corrente de Ânodo IA para manter o SCR em condução é chamada Corrente de Manutenção IH (*Holding Current*). Se a Corrente de Ânodo for menor que a Corrente de Manutenção, as barreiras de potencial formam-se novamente e o SCR entrará em Bloqueio.

A Corrente de Retenção é maior que a Corrente de Manutenção (IL > IH). O valor de IL é em geral de duas a três vezes a corrente de manutenção IH. Ambas diminuem com o aumento da temperatura e vice-versa.

É por este motivo que dizemos que o SCR é uma Chave de Retenção (ou Travamento) porque uma vez em condução, permanece neste estado enquanto a Corrente de Ânodo IA for maior que a Corrente de Manutenção (IA > IH), mesmo sem corrente no gatilho (IGK).

### 2.6 SOBRETEMPERATURA

O aumento brusco da temperatura aumenta o número de pares elétronslacunas no semicondutor provocando maior corrente de fuga, o que pode levar o SCR ao estado de condução. O disparo por aumento de temperatura deve ser evitado.

### 2.7 SOBRETENSÃO

Se a tensão direta ânodo-cátodo VAK for maior que o valor da tensão de ruptura direta máxima VDRM (VBO), fluirá uma corrente de fuga suficiente para levar o SCR ao estado de condução.

Isto acontece porque o aumento da tensão VAK em polarização direta acelera os portadores de carga na junção J2 que está reversamente polarizada, podendo atingir energia suficiente para provocar a avalanche e disparar o SCR. Este fenômeno faz com que muitos elétrons choquem-se e saiam das órbitas dos átomos do semicondutor ficando disponíveis para condução e permitindo o aumento da corrente de fuga no SCR e levando-o ao estado de condução.

O disparo por sobretensão direta diminui a vida útil do componente e, portanto, deve ser evitado.

A aplicação de uma sobretensão reversa, ou seja, uma tensão ânodo-cátodo maior que o valor da tensão de ruptura reversa máxima (VRRM ou VBR) danificará o componente.

## 2.8 LUZ OU RADIAÇÃO

Se for permitida a penetração de energia luminosa (luz) ou radiante (fótons, raios gama, nêutrons, prótons, elétrons ou raios X) nas junções do semicondutor, haverá maior combinação de pares elétrons-lacunas, provocando maior corrente de

fuga, o que pode levar o SCR ao estado de condução. É o caso do SCR ativado por luz, chamado foto-SCR ou LASCR (*Light-Activated Silicon Controlled Rectifier*).

## 2.9 CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DO SCR

Existem limites de tensão e corrente que um SCR pode suportar. Tais limites constituem as características estáticas reais como mostra a Figura 8.1. As curvas 1 e 2 apresentam as características para o SCR no estado de bloqueio, enquanto as curvas 1 e 3 mostram as características para o SCR com Corrente de Gatilho IGK, para ambas as polarizações. Podemos, então, verificar na Figura 11, que a curva característica de um SCR real apresenta três regiões distintas:

- Bloqueio em Polarização Reversa curva 1
- Bloqueio em Polarização Direta curva 2
- Condução em Polarização Direta curva 3

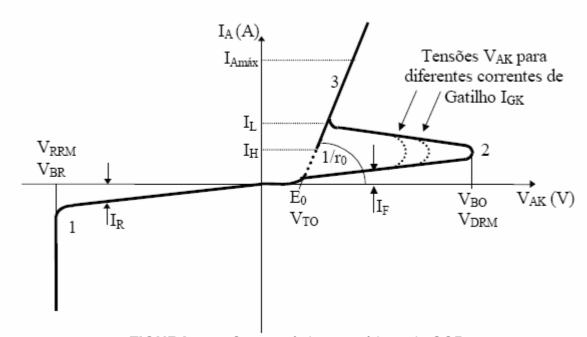


FIGURA 11 - Características estáticas do SCR

### 3. SEMICONDUTORES EXTRINSECOS

Normalmente, amostras de Si e Ge apresentam condutividades muito mais elevadas daquelas citadas anteriormente. Isto ocorre porque os semicondutores têm condutividades extremamente sensíveis à presença de impurezas. Duas amostras de um mesmo material semicondutor, com graus de impurezas diferentes entre

porcentagens tão mínimas que nem possam ser detectadas por análise química convencional, podem apresentar condutividades centenas de vezes diferentes entre si. Por este motivo, a tecnologia de semicondutores è muito crítica no que se refere à medida e ao controle das concentrações de impurezas.

## 3.1 SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS TIPO N

Considere por exemplo, uma amostra de Silício contendo um átomo de Fósforo. O Fósforo tem cinco elétrons de valência enquanto que o Silício tem quatro. Na figura 7 (a), o elétron extra está presente independentemente dos pares de elétrons que servem como ligação entre átomos vizinhos. Este elétron pode transportar uma carga no sentido do eletrodo positivo (b). Alternativamente na figura 7 (c) o elétron extra – o qual não pode residir na banda de valência anteriormente preenchida – fica localizado proximamente ao topo da descontinuidade de energia. Desta posição – denominada nível *doador Ed* – o elétron extra pode ser ativado facilmente afim de alcançar a banda de condução. Independentemente do modelo usado, figura 7 (b) ou 7 (c), podemos ver que átomos do Grupo V (N, P, As e Sb) da classificação periódica, podem fornecer transportadores de carga negativos, ou tipo –*n*, a semicondutores.

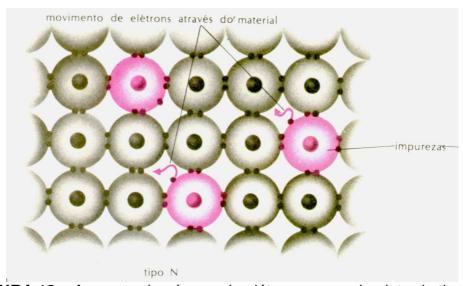


FIGURA 12 – Aumento do número de elétrons no semicndutordo tipo n

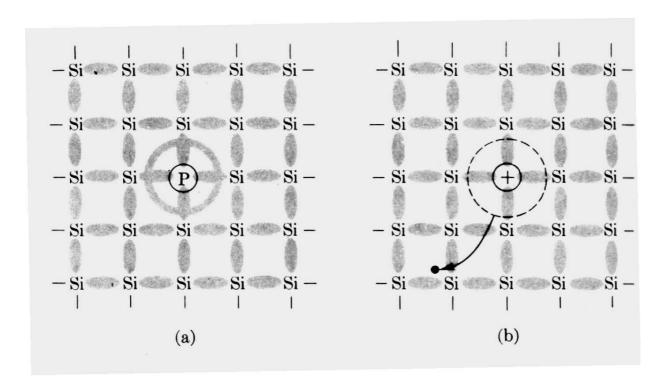


FIGURA 13 – contaminante do tipo n no semicondutor de silício

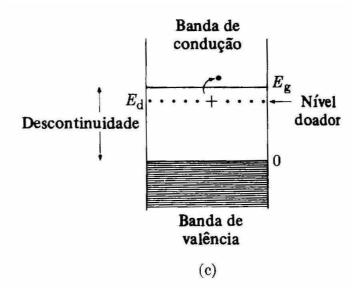


FIGURA 14 – Redução do gap de energia devido aos contaminantes

Suponhamos também que em um cristal de Germânio haja impurezas com valência 5 por exemplo o Sb (Antimônio) .Como no caso do Silício apresentado acima somente 4 dos 5 elétrons de valência do átomo de impureza podem participar da ligação. O 5º elétron, excluído da ligação, uma vez que a estrutura está saturada quimicamente, é atraído pela região positivamente carregada do átomo de impureza, permanecendo numa órbita própria. (este elétron pode transportar carga

no sentido do eletrodo positivo). Este elétron possui energia de ligação muito menor que a dos elétrons instalados nas órbitas de valência podendo ser facilmente excitado por energia térmica para a banda de condução. Estas impurezas são chamadas doadoras.

No diagrama de energias da figura acima, pode observa-se que este 5º elétron fica localizado próximo do topo da descontinuidade de energia (toda vez que não pode residir na banda de valência totalmente preenchida), desta posição denominada *nível doador – Ed*, o elétron extra pode ser ativado facilmente a fim de alcançar a banda de condução. O nível doador está situado a uma certa distância energética abaixo da banda de condução. Desta forma, é necessária uma quantidade de energia pequena, Eg – Eg, para transferir o elétron do seu nível orbital para a banda de condução. Conseqüentemente, semicondutores deste tipo têm centenas de vezes mais elétrons na banda de condução provenientes das impurezas que elétrons do Germânio oriundos da banda de valência. Neste caso, sua condutividade se deve mais à presença de impurezas que ao processo intrínseco de ativação térmica.

Como há uma predominância de elétrons em relação às lacunas, diz-se que os portadores majoritários são negativos.

No momento que o material tipo n é ativado termicamente, o elétron que não está efetivamente participando da ligação covalente se liberta, o Sb fica com carga positiva (ionizado). Com o cristal contendo íons, teremos assim, elétrons livres e íons.

Quando aplicamos uma tensão num cristal do tipo n, os elétrons livres presentes no estado vão permitir o fluxo de elétrons – corrente elétrica. Os íons não podem mover-se pois estão presos ao cristal, mas eventualmente pode ocorrer que um dos elétrons venha ocupar sua posição inicial no átomo de Sb – anulando o íon positivo. O efeito que aparece, é de os íons estarem se deslocando dentro da estrutura cristalina no sentido oposto ao do fluxo de elétrons.

Esse deslocamento de íons na realidade é imperceptível. Lembre-se que as impurezas são adicionadas na proporção 1:10 a 20 milhões de átomos de Ge ou Si.

### 3.2 SEMICONDUTORES TIPO-P

Os elementos do Grupo III (B, AI, Ga e In) têm somente três elétrons de valência. Quando tais elementos são adicionados ao Silício como impurezas, resultam buracos eletrônicos. Como mostrado nas Figuras 8 (a) e (b), cada átomo de Alumínio pode receber um elétron. No processo, uma carga positiva se move no sentido do eletrodo negativo. Usando um modelo de banda [ figura 8 (c)], notamos que a diferença de energia para os elétrons se moverem da banda de valência ao *nível receptor, Er*, é muito menor que a descontinuidade de energia total. Portanto, os elétrons são mais efetivamente ativados no âmbito das posições receptoras do que no âmbito da banda de condução. Os buracos eletrônicos que permanecem na banda de valência são aproveitáveis como transportadores positivos para semicondução tipo-*p*.

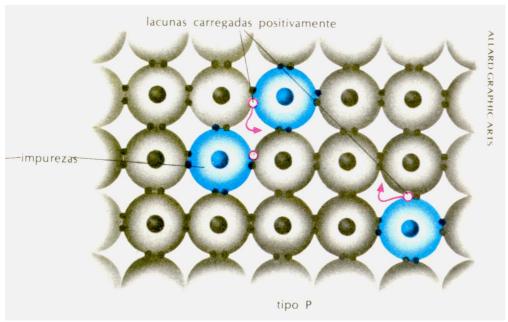


FIGURA 15 – Aumento do número de lacunas no semicndutordo tipo p

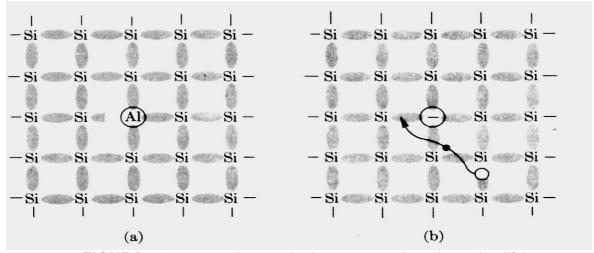


FIGURA 16 – contaminante do tipo p no semicondutor de silício

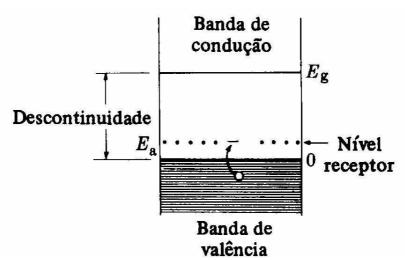


FIGURA 17 – Redução do gap de energia devido aos contaminantes

Consideremos agora que uma impureza que substitui o átomo de Germânio ou Silício seja trivalente – B, novamente, uma das ligações covalentes do Ge ficará com falta de um elétron. Essa ausência de um elétron também se comporta como uma lacuna porém, neste caso, essa lacuna não se encontra na banda de valência já que um elétron dessa banda precisa receber uma certa energia para ocupar esse estado (o átomo de Boro rejeita um elétron nas suas vizinhanças). Deste modo, as lacunas provenientes das impurezas ocupam níveis de energia acima da banda de valência, na banda proibida. Essa lacuna atua como carga positiva, atraindo

qualquer elétron que esteja perto, para completar sua ligação. Essas impurezas – B – são chamadas receptoras. O elétron de Si ou Ge que não forma ligação covalente com a impureza, estará preso ao núcleo apenas pela atração iônica, e com uma pequena quantidade de energia térmica poderá se libertar e circular pela estrutura. Sempre que um elétron se liberta, deixará uma lacuna, na banda de valência que poderá participar do processo de condução na presença de um campo. Usamos de novo o modelo de bandas esquematizado acima.

Materiais com impurezas desse tipo, e que, possuem muito mais lacunas provenientes das impurezas, que lacunas causadas pela ativação de elétrons que saltaram a região de energia proibida, são semicondutores extrínsecos tipo-p. Neste caso, onde existe uma predominância de lacunas na banda de valência sobre os elétrons de banda de condução, diz-se que os portadores majoritários são positivos e a impureza é denominada receptora.

### 3.3 PROPRIEDADES DE DOIS SEMICONDUTORES DOPADOS

**TABELA 1** – características dos semicondutores extrínsecos

THE ELECTION OF THE PROPERTY O		
Material original	Silício	Silício
Dopante	Fósforo	Alumínio
Tipo de Dopante	Doador	Aceitador
Tipo de Semicondutor	Tipo n	Tipo p
Valência do Dopante	5	3
Lacuna de energia do Dopante	45 meV	57 meV
Portadores majoritários	Buracos	Elétrons
Portadores minoritários	Elétrons	Buracos
Carga do íon dopante	+e	-e

A tabela 2 apresenta alguns elementos utilizados como impurezas (dopadores) no Ge e Si e suas energias de ionização em eV.

Elemento dopante	Tipo	Ge
В	р	0,0104
Al	р	0,0102
Ga	р	0,0108
In	р	0,0112
P	n	0,012
As	n	0,0127
Sb	n	0,0096

**TABELA 2** – Energia de ionização dos semicondutores dopados

A concentração de impurezas em semicondutores intrínsecos é normalmente, menor que 1 ppm. Os extrínsecos contem de 100 a 1000 ppm. As impurezas da tabela 3 são as mais utilizadas por produzirem níveis energéticos suficientemente próximos da banda de condução e de valência, respectivamente produzindo concentrações de portadores significativas à temperatura ambiente.

Metais de transição como o Fé, Ni, Co, Cu, quando agregados ao Ge e Si produzem níveis profundos distantes das bordas das bandas. Imperfeições nos cristais podem originar níveis de energia na banda proibida, mas esses níveis funcionam normalmente como armadilhas (traps), aprisionando os portadores, elétrons ou lacunas, e assim baixa condutividade.

Lembre-se que o processo intrínseco está sempre presente nos semicondutores. Nos tipos n e p, à temperatura ambiente, este processo é superado pela ação de doadores e receptores da produção de portadores livres para efeito de condutividade. Devemos lembrar que esses processos são dinâmicos. Em um tipo n, os elétrons estão continuamente sendo ativados fornecendo elétrons para a banda de condução. Outros elétrons, com intensidade menor estão sendo ativados, oriundos da banda de valência. Cada um desses processos tem seu equilíbrio separado, correspondendo a uma dada temperatura a uma população estatisticamente estável de eletros na banda de condução e lacunas na banda de valência.

### 4. CONCLUSÃO

Os primeiros dispositivos à base de materiais semicondutores foram fabricados no século XIX. Porém, só a partir da invenção do transístor, em 1947, é

que a Física dos Semicondutores se desenvolveu de tal modo que estes materiais são atualmente componentes indispensáveis em inúmeras indústrias e na nossa vida quotidiana. A sua tecnologia atingiu um nível de perfeição tal que se consegue atualmente controlar a presença de um átomo de impureza num conjunto de 1010 átomos nativos num cristal de silício. Também se tornou possível produzir cristais semicondutores com dimensões na escala de nanômetros, cujas propriedades prometem aplicações revolucionárias como, por exemplo, a computação quântica.

## **5.REFERÊNCIAS**

- [1] VILLAÇA, M.V.M. e RANGEL, P.R.T.; "Eletrônica de Potência", Volumes 1 e 2, apostila, CEFET/SC, Florianópolis, 199x.
- [2] RASHID, M.H.; "Eletrônica de Potência Circuitos, Dispositivos e Aplicações", Makron Books, São Paulo, 1999.
- [3] AEGIS SEMICONDUTORES; Página oficial do fabricante na Internet: http://www.aegis.com.br
- [4] ALMEIDA, J.L.A.; "Dispositivos Semicondutores: Tiristores Controle de Potência em CC e CA", Coleção Estude e Use, Série Eletrônica Analógica, Editora Érica, São Paulo, 1996.
- [5] AHMED, A.; "Eletrônica de Potência", Prentice Hall, São Paulo, 2000.
- [6] ANDRADE, E.A.; "Eletrônica Industrial Análise de Dispositivos e suas Aplicações', 1a edição, Editora CEFET/BA, Salvador, 1996.
- [7] DIAZ, NORA, "Apostila semicondutores" 1ª edição.