

ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Apresentação

Esta apostila nasceu de uma necessidade que se tinha de explicar e aplicar eletrônica industrial em uma linguagem simples, sem ir ao encontro de extensas deduções matemáticas utilizando cálculos complexos, não estou falando que não utilizaremos cálculos, mas cálculos básicos, afinal este é um livro técnico para técnicos.

O objetivo aqui exposto, não foi criar um livro de romance sobre eletrônica, mas um livro que contenha o princípio de funcionamento dos assuntos abordados, e até alguns experimentos para saciar a vontade de técnicos e estudantes de por em prática, implementando assim os seus sonhos de construir um mundo melhor.

Isac Zilli Rodrigues

O primeiro passo em direção ao sucesso é o conhecimento.

Nicola Tesla

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 – Introdução | 4 |
| 2 - Aplicações de eletrônica de potencia | 5 |
| 3 - Diodo | 6 |
| 4 - Transistor BJT | 11 |
| 5 - Transistor FET..... | 14 |
| 7 - Tiristor | 17 |
| 7.1 - Tiristor SCR | 18 |
| 7.2 - Tiristor TRIAC..... | 21 |
| 8 - Diac | 24 |
| 9 - Retificadores a tiristor | 25 |
| 11 - Soft-Starter | 30 |
| 12 - Inversores | 31 |
| 13 - Dissipadores | 33 |
| Apêndice A | 37 |
| Laboratório 1 | 38 |
| Laboratório 2 | 41 |
| Laboratório 3 | 43 |
| Laboratório 4 | 44 |
| Laboratório 5 | 46 |
| Laboratório 6 | 47 |
| Laboratório 7 | 48 |
| Apendice B | 49 |
| Código de resistores..... | 49 |
| Capacitores cerâmicos | 50 |
| Apêndice C | 53 |
| Osciloscópio | 53 |

1 – Introdução

A Eletrônica Industrial é uma das áreas mais novas da Eletrônica. Associa conhecimentos em diversas áreas como controle, instrumentação, circuitos elétricos e diversas outras.

O estudo desta área possui uma importância fundamental, pois através dos experimentos é possível visualizar e compreender, consolidando então conceitos que já foram estudados até então teoricamente.

Através dos dispositivos semicondutores de potência associados à circuitos eletrônicos discreto, torna-se possível acionar e controlar diversos tipos de cargas industriais. Como veremos no decorrer do livro.

Nesta abordagem consideremos que o estudante já tem uma iniciação ao estudo da eletrônica para que sejam mais proveitosas as páginas que se sucedem.

2 - Aplicações de eletrônica de potencia

- Controle e acionamentos de máquinas elétricas
- Controladores industriais
- Combina: Potência, Eletrônica e Controle
- Aplicação de eletrônica de estado sólido para controle e conversão de energia elétrica
- Baseia-se no chaveamento dos semicondutores de potencia
- Utiliza semicondutores de potencia e microeletrônica
- Controle de sistemas de aquecimento
- Controle de luminosidade
- Fontes de alimentação

Principais interruptores em eletrônica de potencia

- Diodos de potencia
- Transistores de potencia (BPT, IGBT)
- MOSFETs de potencia
- Tiristores (SCR, TRIAC, DIAC)

3 - Diodo

Há vários diodos desenvolvidos especificamente para suportar as demandas de alta potência e alta temperatura de algumas aplicações. O emprego mais frequente de diodos de potência ocorre no processo de retificação. A maioria dos diodos de potência é a base de silício, devido às altas correntes e temperaturas. Para que flua uma corrente elevada, a área da junção deve ser maior, reduzindo, assim, a resistência do diodo. Se essa resistência direta fosse muito grande, as perdas I^2R seriam excessivas.

As altas temperaturas resultantes do fluxo denso de corrente exigem, na maioria dos casos, que sejam utilizados dissipadores de calor para escoar o calor do elemento.

Retificador monofásico de meia onda com carga resistiva

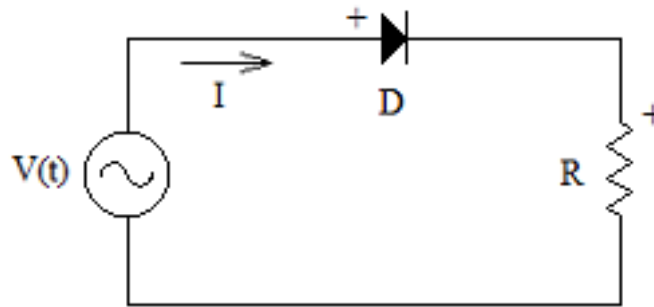


Figura 1

Formas de ondas:

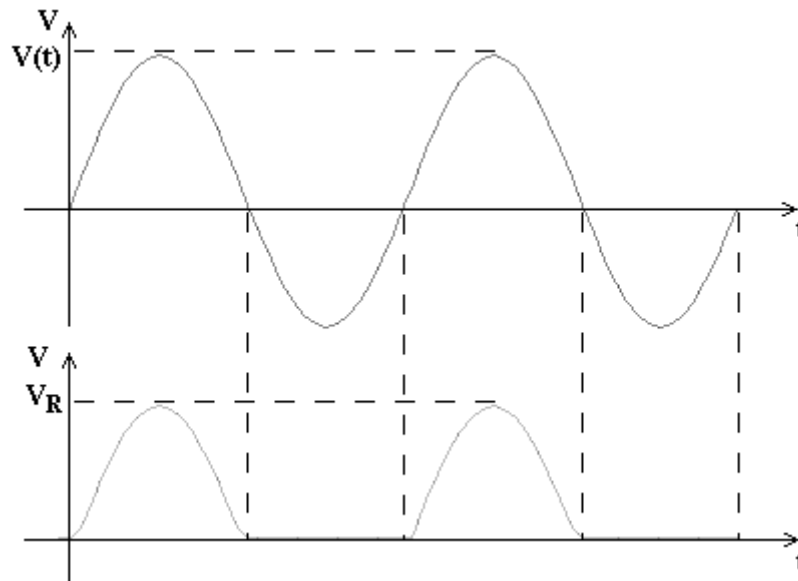


Figura 2

Retificador monofásico de onda completa com ponto médio e em ponte

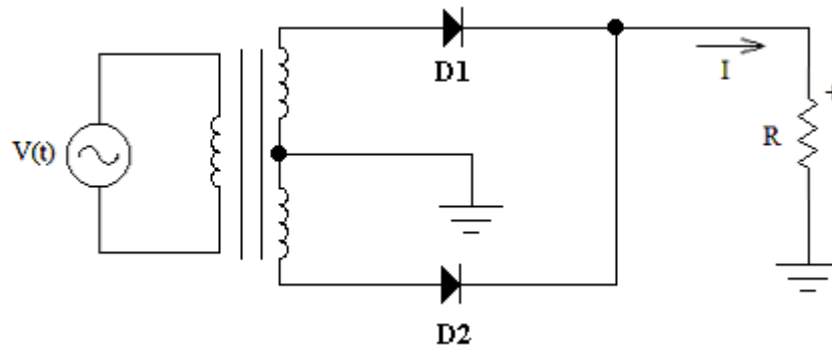


Figura 3 Ponto médio

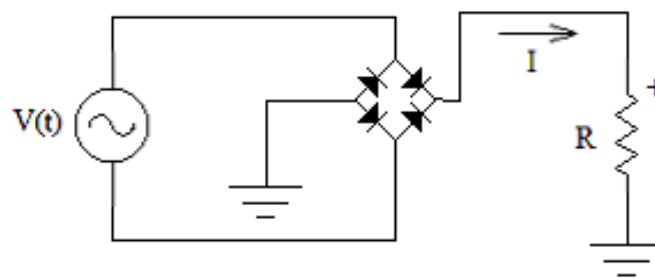


Figura 4 Ponte

A forma de onda para o circuito de ponte médio

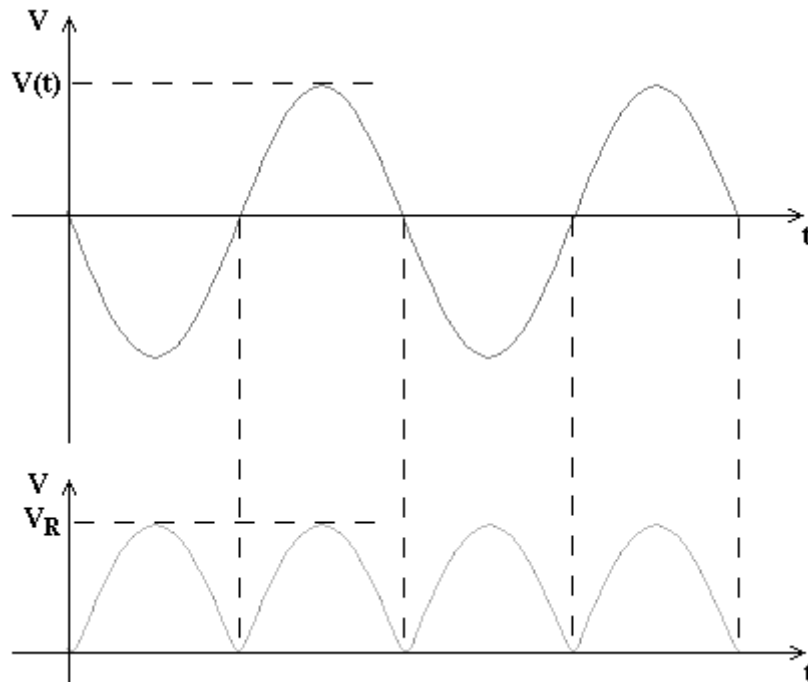


Figura 5

As formas de onda de tensão e corrente são idênticas as do retificador de ponto médio

Vantagens de retificador de onda completa em relação ao de meia-onda:

- A tensão média na carga é duas vezes maior
- A corrente de carga apresenta menor distorção harmônica

Retificador trifásico com ponto médio

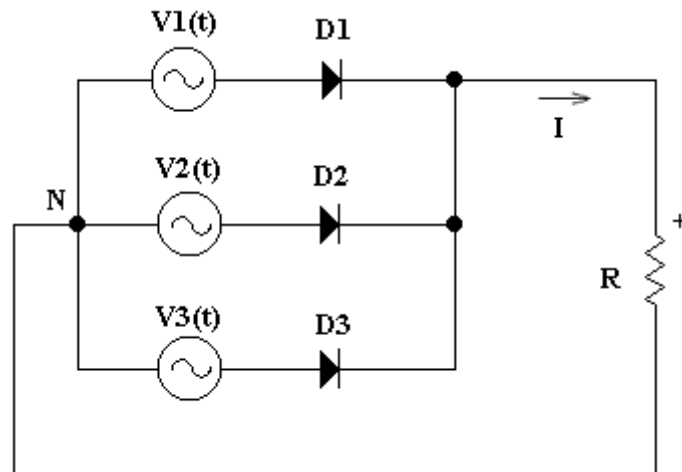


Figura 6

As harmônicas desconsideradas

O valor médio da tensão é:

$$V_{\text{med}} = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \sqrt{2} V_o \text{sen}(\omega t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{2\pi} V_o \cong 1,17 V_o$$

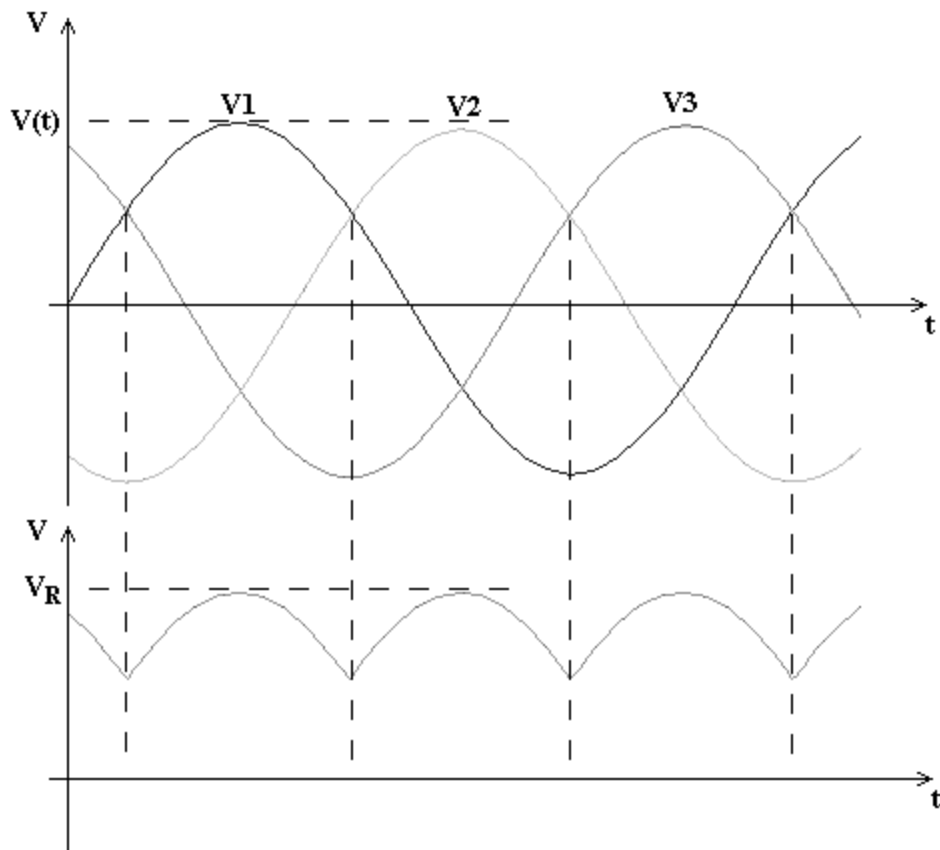


Figura 7

Retificador trifásico de onda completa ponte de Graetz

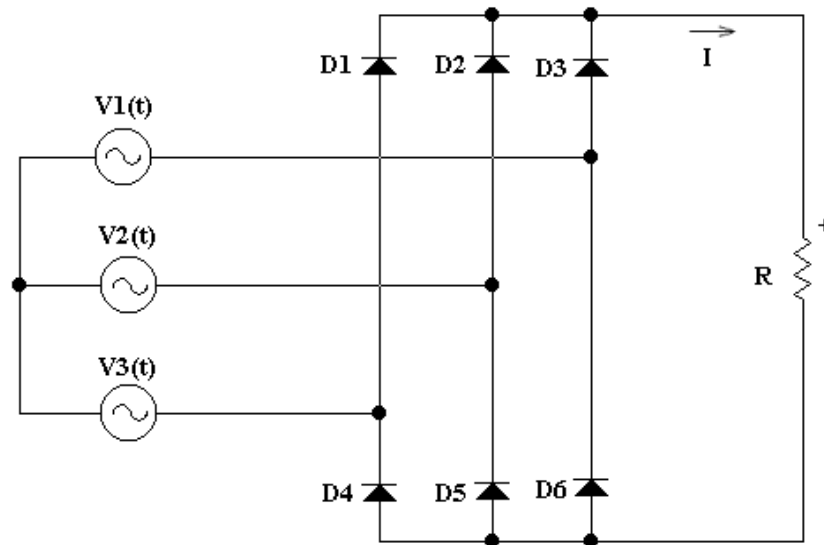


Figura 8

O valor médio da tensão é:

$$V_{\text{med}} = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{3} \sqrt{2} V_0 \cos(\omega t) d(\omega t) \cong 2,34 V_0$$

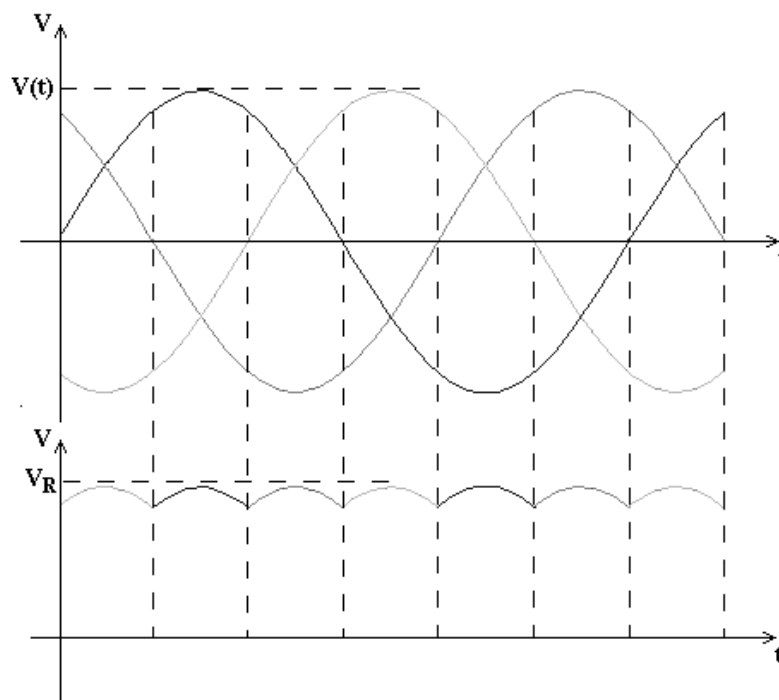


Figura 9

- Cada diodo conduz durante um intervalo igual a 120°
- Existe sempre dois diodos em condução, um no grupo positivo e outro no grupo negativo do conversor
- Ocorre uma comutação a cada 60°

Associações em série e em paralelo

Um conjunto de diodos do mesmo tipo associados em série apresenta uma capacidade de corrente direta igual a capacidade de cada unidade. A tensão máxima reversa, entretanto, será a soma das tensões máximas reversas individuais. É importante que os diodos sejam do mesmo tipo, ou haverá uma distribuição irregular da tensão entre eles, causando a ruptura em um valor inferior a esta soma.

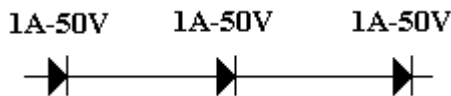


Figura 10 Permanece a mesma I e somam-se V

A montagem de diodos em paralelo costuma ser problemática, e deve ser substituída por um único diodo com maior capacidade de corrente sempre que possível. Nos diodos associados em paralelo, a tendência será de que aquele com a menor barreira de tensão comecem a conduzir primeiro, assumindo a maior parte (senão toda) a corrente do circuito. Portanto, não é suficiente que os diodos sejam do mesmo tipo, e preciso que resistores de baixo valor, montados conforme a figura abaixo contrabalance esta tendência, permitindo uma divisão quase igual de corrente. O valor destes resistores deve ser tal que provoque uma queda de tensão de cerca de 0,5V para a corrente máxima do diodo associado. Ou seja, para diodos de 1A, será necessária uma resistência de aproximada 0,5Ω. Note que, além dos 0,7V perdidos na barreira de tensão do diodo, outros 0,5V serão perdidos no resistor, com uma dissipação de calor igual a 0,5 vezes a corrente.

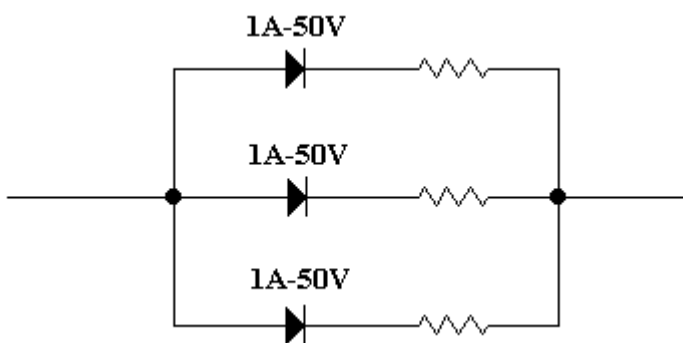


Figura 11 Permanece a mesma V e somam-se as I

Relembrando:

| Tipo | 1N4001 | 1N4002 | 1N4003 | 1N4004 | 1N4005 | 1N4006 | 1N4007 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tensão de pico reversa (V) | 50 | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
| Tensão RMS reversa (V) | 35 | 70 | 140 | 280 | 420 | 560 | 700 |
| Corrente de saída (A) | 1 | | | | | | |

Temos também:

| Tipo | 1N4012 | 1N4014 | 1N3970 | 1N3927 | 1N1189 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tensão de pico reversa (V) | 700 | 900 | 600 | 2500 | 500 |
| Corrente de saída (A) | 12 | 12 | 50 | 10 | 35 |

Este são apenas alguns diodos de potência

4 - Transistor BJT

Os transistores bipolar de potência representaram um importante passo no desenvolvimento de componentes de média potência, atingindo tensões de bloqueio da ordem de 1000V, conduzindo correntes de 500A. Embora estes valores não permitam sua aplicação direta, estes dispositivos são a base para uma série de outros conversores para condicionamento de energia elétrica.

Transistores do tipo NPN, os elétrons são atraídos do emissor pelo potencial positivo da base, tendo em mente a corrente real de elétrons, J_1 se transforma num diodo diretamente polarizado. Esta camada central é suficientemente fina para que a maior parte dos portadores tenha energia cinética suficiente para atravessá-la, chegando à região de transição de J_2 , sendo então, atraídos pelo potencial positivo do coletor.

A figura abaixo mostra uma estrutura típica de um transistor bipolar de potência. As bordas arredondadas da região de emissor permitem uma homogeneização do campo elétrico, necessária à manutenção de ligeiras polarizações reversas entre base e emissor. O TBP não sustenta tensão no sentido oposto porque a alta dopagem do emissor provoca a ruptura de J_1 em baixas tensões (5 a 20V).

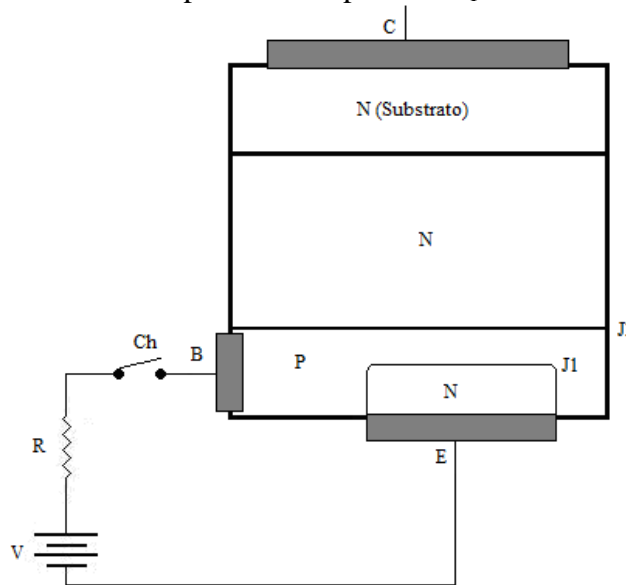


Figura 12 Estrutura básica de um transistor de potência

O controle de V_{BE} determina a corrente de base, I_B que, por sua vez, se relaciona com I_C pelo ganho de corrente do dispositivo. Para suportar tensões elevadas, existe uma camada intermediária do coletor, com baixa dopagem, a qual define a tensão de bloqueio do componente.

Porem uma das principais limitações dos transistores bipolares de potência é o baixo valor do ganho de corrente β (muitas vezes inferior a 10) com isto muitas vezes são utilizados estes transistores na região de saturação e bloqueio ou como chave.

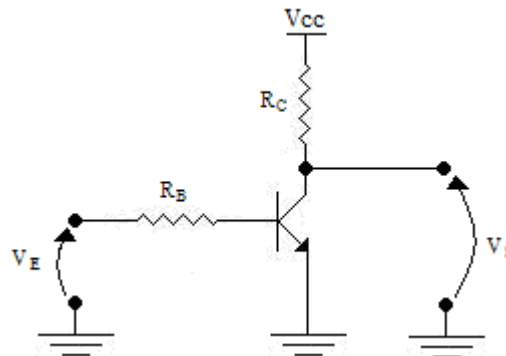


Figura 13

Para que o transistor opere como chave aberta, é necessário que a tensão de entrada V_E seja menor que V_{BE} de condução. E para que o transistor opere como chave fechada, é preciso que a tensão de entrada V_E seja maior que V_{BE} de condução.

Vamos a um exemplo:

Para dimensionarmos R_B e R_C , vamos utilizar a análise das malhas:

Entrada: $V_{RB} = V_{CC} - V_{BE}$

Saída: $V_{RC} = V_{CC} - V_{CE}$

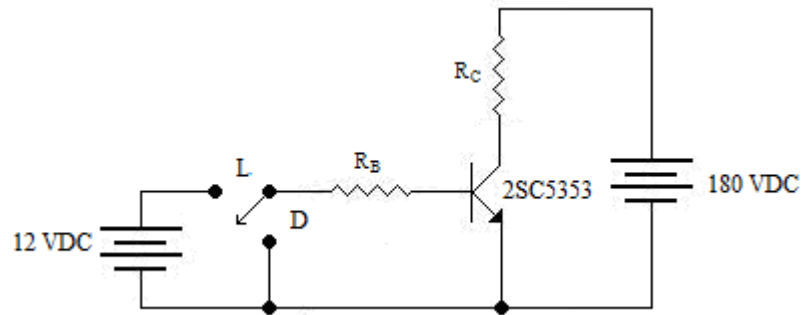


Figura 14

Parâmetros do 2SC5353

$V_{BEsat} = 1,3V$

$V_{CEsat} = 1V$

$\beta_{sat} = 10$

O R_C é como se fosse a carga a ser controlada, então para dimensionarmos os resistores de polarização temos que definir uma carga, concluímos então que teremos que calcular na verdade só o R_B já que foi definido que carga teremos que controlar.

O R_C definido foi de 800Ω .

Malha de saída:

$V_{RC} = V_{CC} - V_{CEsat}$

$V_{RC} = 180 - 1 \therefore V_{RC} = 179V$

$I_{RC} = I_C$

$I_C = \frac{V_{RC}}{R_C} \therefore I_C = 223,7mA$

Potencia de R_C

$P_{RC} = R_C \cdot I_{Csat}^2 \therefore 800 \times (223,7 \times 10^{-3})^2$

$P_{RC} = 40W$

Podemos então substituir o resistor por uma lâmpada de 40W/180V.

Malha de entrada:

$V_{RB} = V_{CC} - V_{BE}$

$V_{RB} = 12 - 1,3 \therefore V_{RB} = 10,7V$

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

$I_B = \frac{223,7 \times 10^{-3}}{10} \therefore I_B = 22,37mA$

$R_B = \frac{V_{RB}}{I_B} \therefore R_B = \frac{10,7}{22,73 \times 10^{-3}}$

$R_B = 478,3\Omega$ Valor comercial $R_B = 470 \Omega$

Potencia de R_B

$P_{RB} = R_B \cdot I_{Bsat}^2$

$P_{RB} = 470 \times (22,73 \times 10^{-3})^2$

$P_{RB} = 235,2mW \quad (1/4W)$

Estes cálculos são para o interruptor na posição ligado, quando o interruptor passa para a posição desligado, a entrada é aterrada ($V_E < V_{BE}$) causando o corte do transistor conseqüentemente a lâmpada irá apagar.

O uso preferencial de TBP tipo NPN se deve às menores perdas em relação aos PNP, o que ocorre por causa da maior mobilidade dos elétrons em relação às lacunas, reduzindo, principalmente, os tempos de comutação do componente, em outras palavras, os transistores do tipo NPN são mais rápidos do que os do tipo PNP.

Conexão Darlington

Como já mencionado transistores de potência geralmente têm ganhos menores e precisam correntes altas na base para a plena condução. O transistor do exemplo anterior pode exigir 1A para controlar uma corrente de 3A. Para solucionar este problema, existe um arranjo que é chamado de Darlington esta configuração consiste em conectar dois transistores do mesmo tipo de maneira que o ganho de corrente de um transistor β_1 e o do outro β_2 então o ganho de corrente do arranjo será igual a $\beta_D = \beta_1 \times \beta_2$. Outra característica desta configuração é conseguir uma alta impedância de entrada. Normalmente este tipo de ligação é feito em um único encapsulamento. Neste caso, o valor de ganho é muito grande, e uma corrente bem pequena na base já leva o transistor ao estado de plena condução. O ônus por esta sensibilidade de corrente baixa de base é o fato de que a tensão V_{BEDE} é maior que em um transistor normal pois temos que polarizar em vez de um mas dois diodos para que comece a ocorrer a condução.

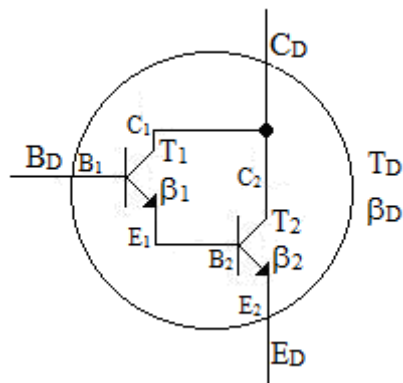


Figura 15 Conexão Darlington.

5 - Transistor FET

O surgimento do MOSFET representou um grande avanço tecnológico por ser de fabricação muito simples ter uma alta impedância de entrada e baixo ruído, proporcionar integração em larga escala, isto é, por ter tamanho reduzido cerca de 20 vezes menos que o transistor bipolar, permitindo assim que um grande numero de transistores sejam produzidos em um mesmo circuito integrado.

O MOSFET de potencia é um semiconductor com capacidade de controle de corrente, por meio de tensão aplicada entre os terminais gate e source, a exemplo do TBP o transistor FET pode trabalhar com tensões também elevadas na ordem dos 1000V, e correntes em torno de 200A, mas sua principal vantagem é por ser acionado por tensão a sua arquitetura disponibiliza uma elevada velocidade de chaveamento, tornando-o indicado para as aplicações de frequência elevada (centenas de kHz).

Para $V_{GS} < 0$ os elétrons do canal n são repelidos aumentando assim a camada de depleção próxima da camada óxido. Assim, há uma diminuição na área do canal n (estrangulamento), sendo estabelecida uma alta resistência R_{DS} . Deste modo, não há circulação de corrente I_{DS} . Para I_{DS} igual a zero, a tensão V_{GS} é chamada de tensão de estrangulamento (pinch-off) V_P . Para $V_{GS} > 0$ o canal n torna-se largo, reduzindo drasticamente a resistência R_{DS} sendo assim, estabelecida a corrente I_{DS} . O MOSFET com canal p tem a s polaridades das tensões e correntes invertidas.

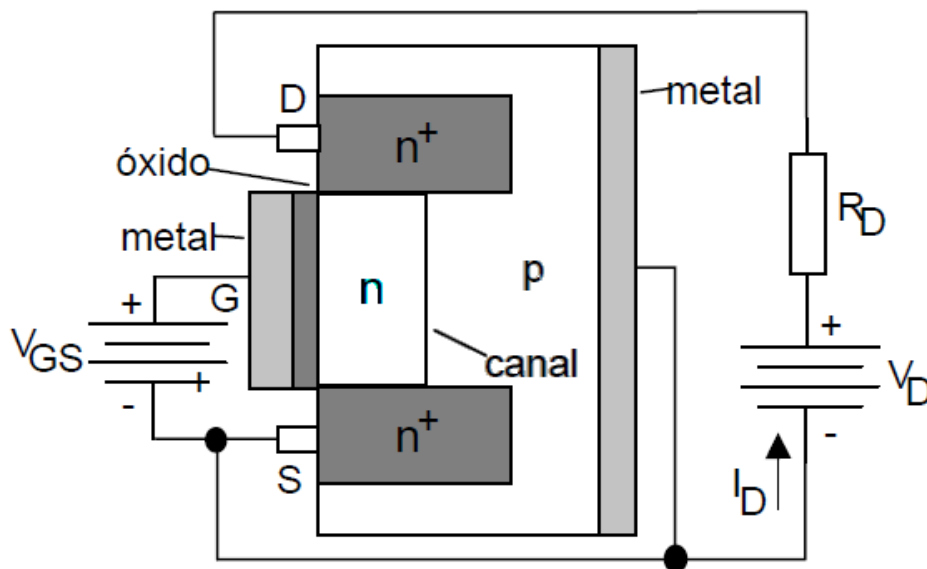


Figura 16

Estrutura básica de transistor MOSFET.

Uma pequena corrente de gate é necessária apenas para carregar e descarregar as capacitâncias de entrada do transistor desta forma o melhor modo de polarização de um FET é empregando uma fonte de baixa impedância de saída, já que temos na estrutura do gate uma capacitância parasita gate-fonte C_{GS} que é inerente ao componente, desta forma não existe meios de minimizá-lo.

Estes transistores, em geral, são de canal N por apresentarem menores perdas e maior velocidade de comutação, devido à maior mobilidade dos elétrons em relação às lacunas.

Abaixo temos um exemplo de polarização de gate de baixa impedância, também terá que utilizar fonte de pulsos de baixa impedância, como foi dito antes.

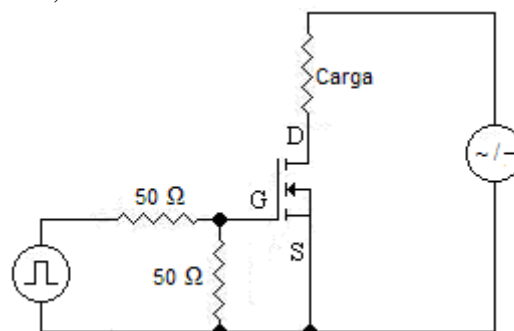


Figura 17

Outra forma de obter um circuito de disparo é o demonstrado abaixo, porem é importante notar nesta situação que estamos atrelados a transistores bipolares, não sendo aconselhável a altas freqüências, ou pelo menos dar uma olhada no datasheet dos transistores que serão utilizados, com atenção a freqüência máxima de trabalho.

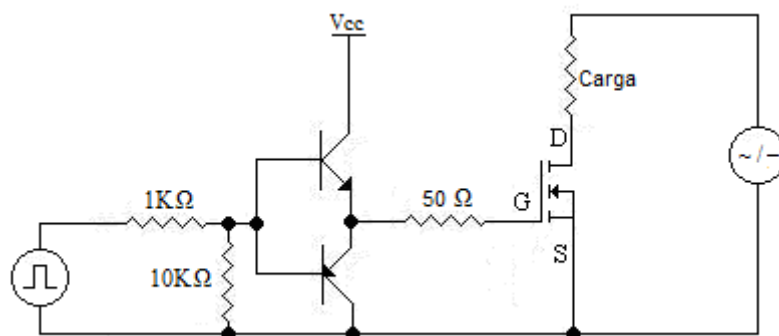


Figura 18

Este circuito nada mais é do que um gate driver que pode se fazer com componentes discretos ou com auxilio de CIs fabricados especialmente para isto, a saída pode ser para um MOSFET ou para vários deles. Isto é mais fácil de verificar em IGBTs que será estudado em seguida.

6 – Transistor IGBT

O IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) alia a facilidade de acionamento dos MOSFET com as pequenas perdas em condução dos TBP. Sua velocidade de chaveamento é superior à dos transistores bipolares. Os limites atuais de tensão e corrente em dispositivos únicos estão em torno de 2kV e 1000A, o que indica que tal componente pode ser utilizado em aplicações de potência.

O controle de componente é análogo ao do MOSFET, ou seja, pela aplicação de uma polarização entre gate e emissor. Também para o IGBT o acionamento é feito por tensão.

O IGBT possui uma corrente máxima que não deve ser ultrapassada, se isso ocorrer, não se consegue cortar o IGBT retirando a tensão do Gate. A corrente fluirá pelo dreno sem controle, e isso poderá danificar o componente. Esse fato é conhecido por LatchUp.

Princípio de funcionamento

A estrutura do IGBT é similar à do MOSFET, mas com a inclusão de uma camada P+ que forma o coletor do IGBT, como mostrado na figura abaixo.

Em termos simplificados pode-se analisar o IGBT como um MOSFET no qual a região N- tem sua condutividade modulada pela injeção de portadores minoritários (lacunas), a partir da região P+, uma vez que J1 está diretamente polarizada. Esta maior condutividade produz uma menor queda de tensão em comparação a um MOSFET similar.

A máxima tensão suportável é determinada pela junção J2 (polarização direta) e por J1 (polarização reversa). Como J1 divide 2 regiões muito dopadas, conclui-se que um IGBT não suporta tensões elevadas quando polarizado reversamente.

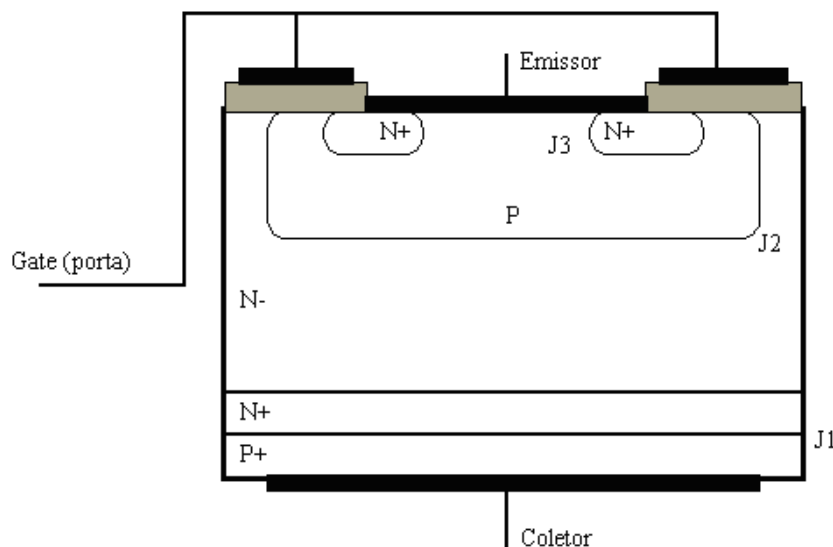


Figura 19 Estrutura básica de IGBT.

A entrada em condução é similar ao MOSFET, sendo um pouco mais lenta a queda da tensão V_{ce} , uma vez que isto depende da chegada dos portadores vindos da região P+.

Para o desligamento, no entanto, tais portadores devem ser retirados. Nos TBPs isto se dá pela drenagem dos portadores via base, o que não é possível nos IGBTs, devido ao acionamento isolado. A solução encontrada foi a inclusão de uma camada N+, na qual a taxa de recombinação é bastante mais elevada do que na região N-. Desta forma, as lacunas presentes em N+ recombinam-se com muita rapidez, fazendo com que, por difusão, as lacunas existentes na região N- refluem, apressando a extinção da carga acumulada na região N-, possibilitando o restabelecimento da barreira de potencial e o bloqueio do componente.

7 - Tiristor

O tiristor e o SCR são facilmente confundidos pois estão relacionados ao mesmo componente. Tiristor é o nome de uma família de componentes da qual o SCR faz parte. O SCR é um diodo controlado, muito utilizado em equipamentos de controle industrial que iremos ver detalhadamente mais tarde.

Funcionamento de uma forma geral

O tiristor é um dispositivo semicondutor de quatro camadas, de estrutura PNPN, com três junções PN. Tem três terminais: Anodo, Catodo e Gatilho. Os terminais anodo e catodo quando polarizados diretamente, só começam a conduzir se receber um comando no terminal gatilho. Uma vez conduzindo ele se comportara como um diodo em condução e não há controle sobre o dispositivo.

Desligamento

A corrente de anodo é conservada abaixo da corrente de manutenção por um tempo suficiente grande, de forma que todos os portadores em excesso nas quatro camadas sejam eliminados ou recombinados.

Alguns tópicos que devem ser levado em consideração em projeto de circuitos de controle de gatilho

- 1- O sinal de gatilho deve ser retirado após o disparo do tiristor. Um sinal contínuo aumentaria a perda de potencia na junção do gatilho.
- 2- Enquanto o tiristor estiver reversamente polarizado, não devera haver sinal de gatilho. De outra forma o tiristor poderia falhar devido a um aumento de corrente de fuga.
- 3- A largura do pulso de gatilho I_G tem que ser maior que o tempo necessário para a corrente do anodo crescer até o valor da corrente de manutenção I_H . Na prática, a largura do pulso no tiristor T_{ON} .

Tipos de Tiristores

Tiristor de controle de fase SCR

Tiristor triodo bidirecional TRIAC

Tiristor de desligamento pelo gatilho, GTO;

Tiristor de condução reversa, RCT;

Tiristor de indução estática, SITH;

Tiristor de desligamento auxiliado pelo gatilho, GATT;

Retificador controlado de silício, controlado por luz, LASCR;

Tiristores controlados por MOS, MCTs

Conversão e o controle de grandes quantidades de potencia em sistemas CC e CA, utilizando apenas uma pequena potencia para controle, pois, apresenta chaveamento rápido, pequeno porte e altos valores de corrente e tensão.

Algumas exemplos de aplicações

- Controle de reles e motores
- Fontes de tensão regulada
- Inversores CC-CA
- Controle de iluminação

7.1 - Tiristor SCR

Símbolo

O SCR é um dispositivo semiconductor de quatro camadas, de estrutura *PNPN*, com três junções *PN*. Ele tem três terminais: anodo, catodo e gatilho como é visto na figura abaixo.

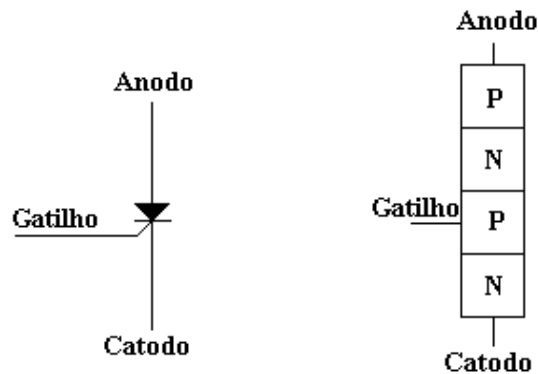
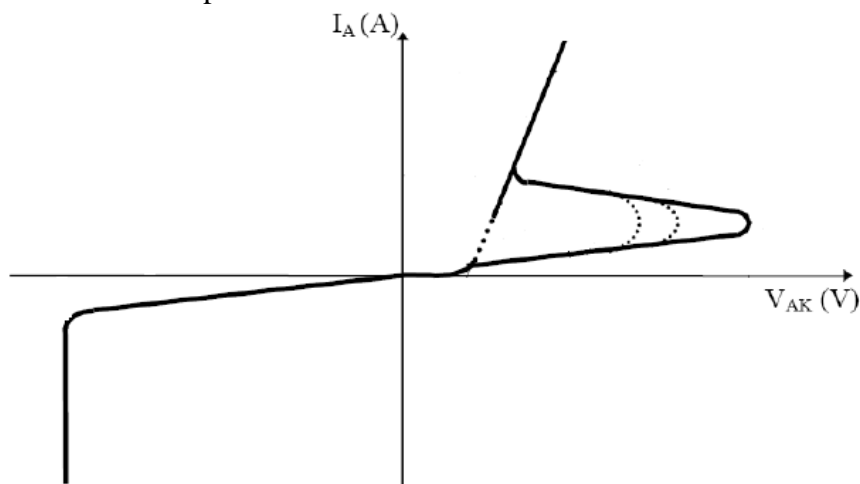


Figura 20

O SCR, tal como um diodo, só conduz corrente no sentido do anodo para o catodo, mas apenas quando lhe aplicamos um sinal de tensão no terminal chamado gatilho, este método de disparo é o mais utilizado para se disparar o SCR. Mas existem outras formas de disparo, normalmente indesejado e em alguns casos podem destruir o componente.



Disparo por sobretensão: Quando o SCR está polarizado diretamente e aumenta-se a tensão V_{AK} , J_1 e J_3 estão polarizados diretamente, mas J_2 está reversamente polarizado veja a figura acima. Com o aumento de V_{AK} , os portadores são acelerados na junção J_2 , podendo atingir uma energia tão grande que provocarão o fenômeno avalanche. Esse fenômeno faz com que muitos elétrons choquem-se e saiam das orbitas dos átomos da rede. Estando disponíveis para a condução, esses elétrons permitem que a corrente de anodo cresça. Aumentando a corrente de anodo, estabelece-se a realimentação entre os terminais, mantendo o SCR disparado. Este tipo de disparo é chamado de Tensão de Breakover (V_{BO}).

Disparo por variação de tensão (dv/dt): Para que um capacitor armazene carga elétrica é necessário haver uma variação de tensão (Δv) no capacitor em um intervalo de tempo (Δt), é necessário que circule ainda uma corrente i pelo capacitor, quando estas variações são muito pequenas a expressão que relaciona estas grandezas é apresentada abaixo.

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

Em um SCR polarizado diretamente, J_2 está reversamente polarizado. Nesta junção, existe carga armazenada: íons positivos de um lado e íons negativos do outro. Isto é como um capacitor carregado. Assim não havendo pulso no gatilho, fechando-se S_1 a capacitância de J_2 fará com que circule uma corrente de gatilho. Como esta variação é muito grande, a corrente resultante será muito grande. Essa

corrente poderá ser suficiente para estabelecer o processo de realimentação, fazendo com que o componente entre em condução.

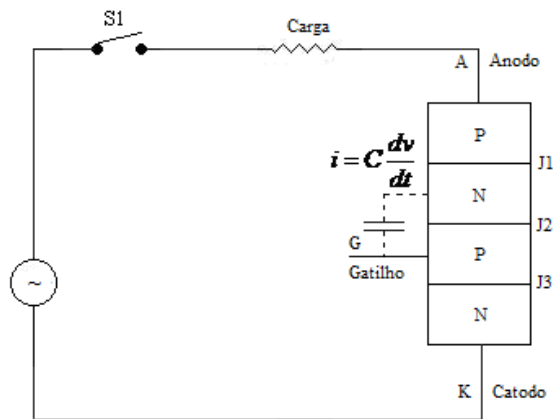


Figura 21

Esse disparo, normalmente indesejado, pode ser evitado pela ação de um circuito de proteção chamado snubber, esse circuito é formado por um resistor em serie com um capacitor, colocados em paralelo com o SCR.

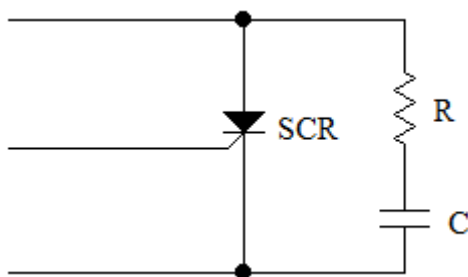


Figura 22 Circuito snubber colocado em paralelo com o SCR

Os métodos de comutação ou de bloqueio de um SCR, significa cortar a corrente que ele conduz e impedir que ele retorne a condução. A comutação estará completa, quando a corrente no sentido direto for anulada e a reaplicação de tensão direta, entre os terminais catodo e anodo, não provocarem o retorno do estado de condução.

A comutação natural ocorre quando se reduz a corrente de anodo a um valor abaixo de I_H , chamada corrente de manutenção (holding current), o SCR é bloqueado. Este bloqueio pode ser visto melhor na figura abaixo. Com S2 aberto mesmo com S1 fechado, o SCR está bloqueado, pois não há corrente no gatilho. Fechando S2, pelo R circula uma corrente de gatilho, que é suficiente para disparar o SCR. Abrindo então S1 a corrente na lâmpada anula-se e o SCR bloqueia. Outro modo de obter a comutação natural seria trocar a fonte de tensão continua por uma tensão alternada porem o SCR conduziria somente no semi-ciclo positivo, não havendo fluxo de corrente no semi-ciclo negativo.

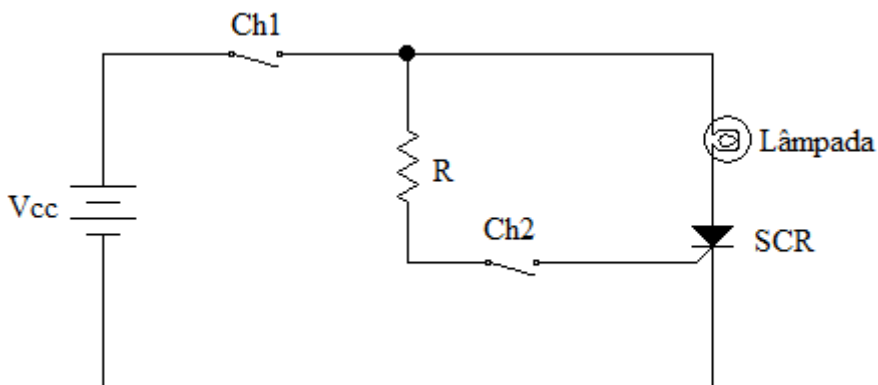


Figura 23 Método mais utilizado

Há também um outro método chamado comutação forçada mais usual em circuitos CC, a técnica consiste em desviar a corrente por um caminho de menor impedância, a corrente que passa pelo SCR irá cair abaixo de I_H , provocando o bloqueio. Como podemos ver no circuito abaixo.

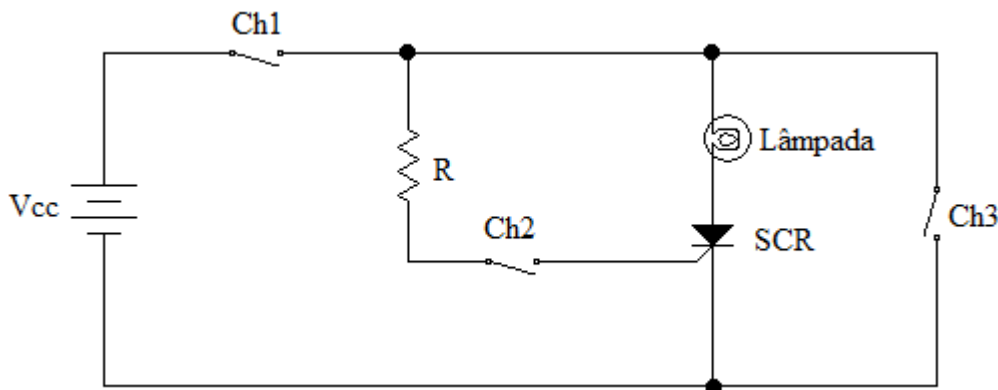


Figura 24

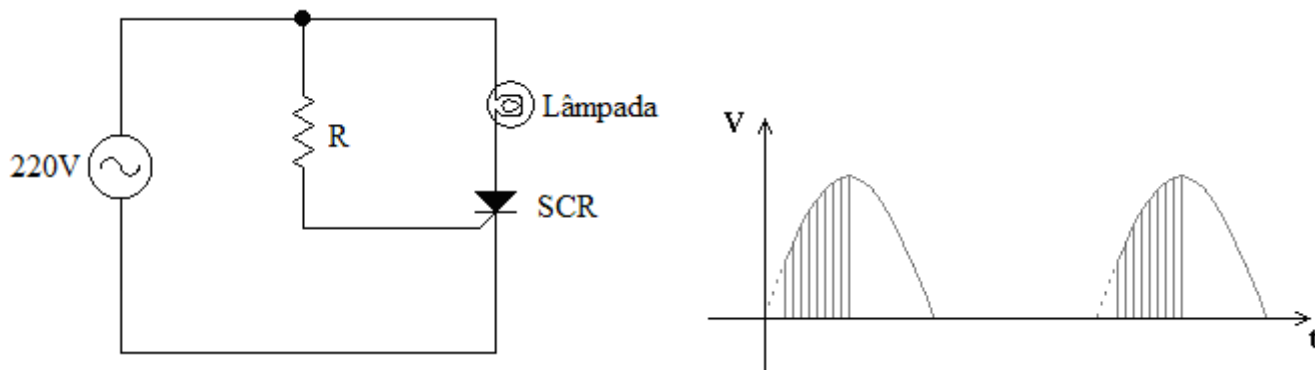
Com todas as chaves abertas, o SCR está bloqueado e a lâmpada está apagada. Fechando-se a CH1, o circuito da lâmpada e do SCR estará energizado. Como não há corrente no gatilho, o SCR continuará bloqueado a lâmpada apagada.

Quando S2 fechar, circulará pelo resistor uma corrente suficiente para alimentar o gatilho do SCR, que disparará e acenderá a lâmpada. Com a lâmpada acesa, S2 pode se novamente aberta, sem que o SCR bloqueie e a lâmpada se apague.

Agora fechando S3, naturalmente a lâmpada não se apagará, pois a chave curto-circuitará o SCR ficando a lâmpada alimentada diretamente pela tensão da fonte. Como o SCR real não é um curto-circuito, toda a corrente da lâmpada irá passar por S3 e a corrente do SCR cairá à zero, o SCR então irá bloquear.

Com o SCR bloqueado, abrindo-se a chave S3, a lâmpada apagará. Assim, só será outra vez acessa se S2, for novamente fechada, provocando a corrente de gatilho no SCR.

Mas também pode-se utilizar o SCR em tensão alternada não só em tensão contínua, abaixo temos um exemplo de circuito com sua forma de onda.



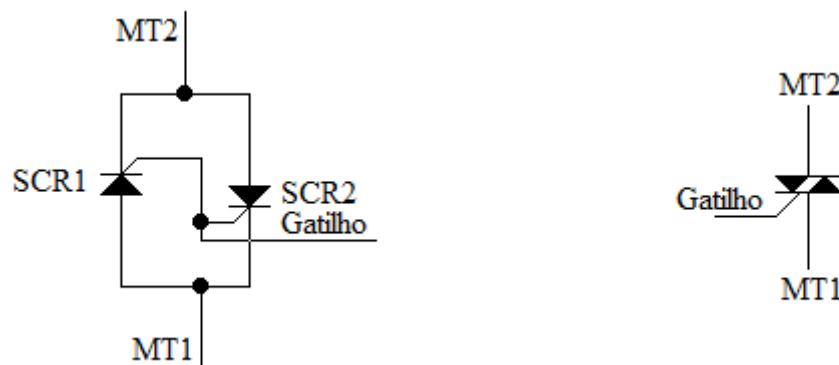
7.2 - Tiristor TRIAC

Símbolo

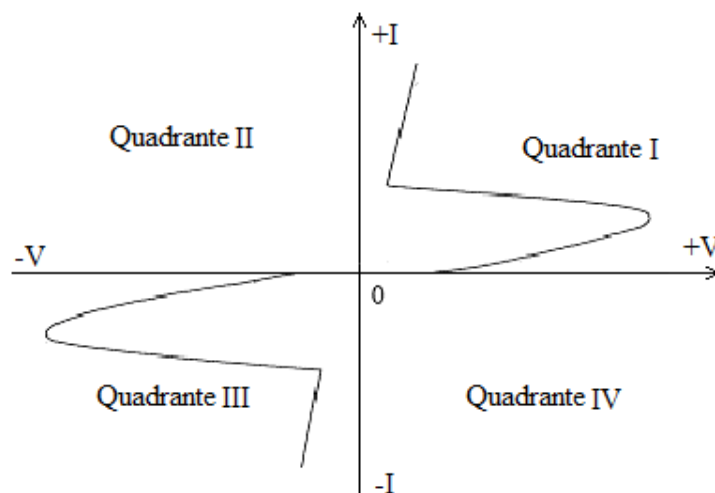
O Triac é um dispositivo de 5 camadas, tendo 2 caminhos P-N-P-N em ambos os sentidos entre o *MT1* e *MT2* e podendo conduzir nos dois sentidos, como nos mostra claramente o seu símbolo. Eletricamente o Triac equivale a ligação de dois SCRs em antiparalelo e os terminais de gatilho ligados juntos.

O Triac pode ser levado a condução pela aplicação de uma corrente positiva ou negativa no gatilho, embora seja mais sensível a aplicação de uma corrente positiva, quando *MT2* é positivo e de uma corrente negativa quando *MT1* é positivo.

Um TRIAC pode conduzir em ambos os sentidos e é normalmente utilizado em controle de fase CA. Ele pode ser considerado como dois SCR conectados em antiparalelo com uma conexão de gatilho comum, como mostrado na figura abaixo.

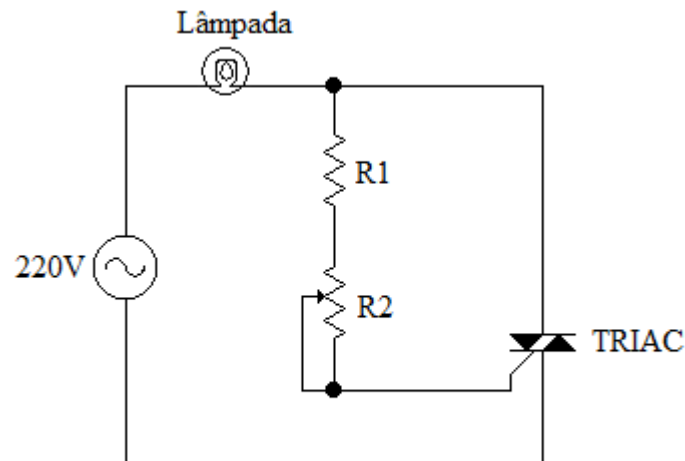


Como o TRIAC é um dispositivo bidirecional, seus terminais não podem ser designados como catodo e anodo. Se o terminal *MT2* for positivo em relação ao terminal *MT1*, o TRIAC pode ser disparado pela aplicação de um sinal positivo entre os terminais de gatilho *G* e *MT1*. Se o terminal *MT2* for negativo em relação a *MT1*, ele pode ser disparado pela aplicação de um sinal negativo entre o gatilho *G* e *MT1*. Não é necessário que se tenham ambas as polaridades do sinal de gatilho, pois um TRIAC pode ser disparado com um sinal tanto positivo quanto negativo. Na prática as sensibilidades variam de um quadrante para outro e os triacs normalmente são operados no I quadrante (tensão e correntes de gatilho positivas) ou no quadrante III (tensões e correntes de gatilho negativas) como é visto na curva característica abaixo.

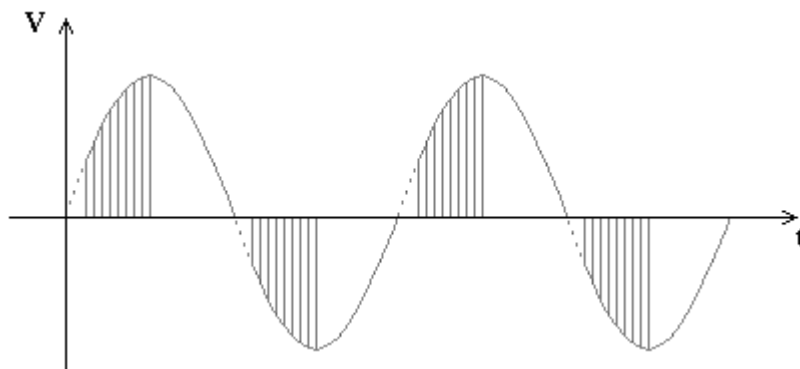


- Quadrante I; *V_{MT2}* positivo e *I_G* positivo.
- Quadrante II; *V_{MT2}* negativo e *I_G* positivo.
- Quadrante III; *V_{MT2}* negativo e *I_G* negativo.
- Quadrante IV; *V_{MT2}* positivo e *I_G* negativo.

Então pode-se dizer que o triac pode fazer o controle de fase em uma carga como no circuito abaixo.

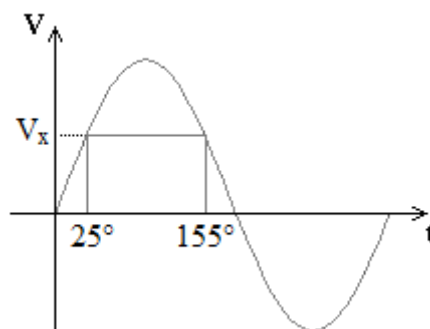


Variando o potenciômetro R2 podemos disparar o triac em vários ângulos da onda como demonstra o gráfico abaixo.

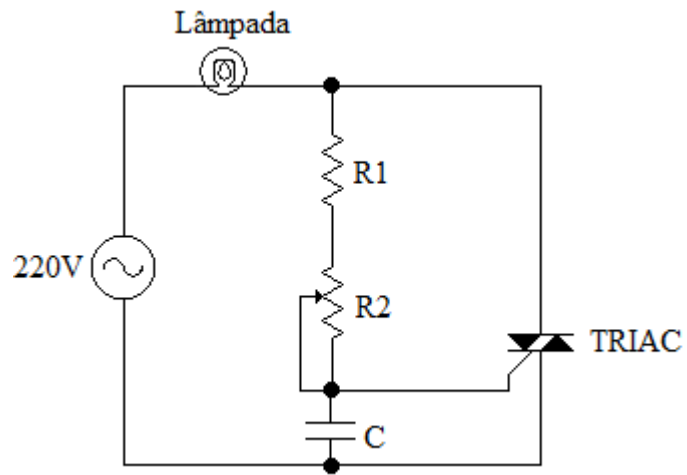


Porem com este circuito é impossível efetuar disparos além dos 90° em cada semi-ciclo, por exemplo, se desejarmos disparar em 25° que a tensão instantânea é de V_x , e o potenciômetro está ajustado com este valor de tensão de rede, se utilizar o mesmo raciocínio para disparar em 155° a tensão instantânea será a mesma, conseqüentemente terá a mesmo ajuste do potenciômetro, que e irá disparar em 25° e não em 155° .

A figura abaixo ajuda esclarecer este raciocínio.



Então para resolvermos a limitação no ângulo de disparo menor ou igual a 90° é associarmos com os resistores já existentes um capacitor como no circuito abaixo, formando então uma rede defasadora.



O valor desta defasagem é dada pela equação $\tau = (R_1 + R_2) \cdot C$. Variando R_2 , consegue-se variar o ângulo de disparo do Triac. Porém como o capacitor nem sempre se carrega a partir de uma tensão fixa não se tem uma regularidade no disparo.

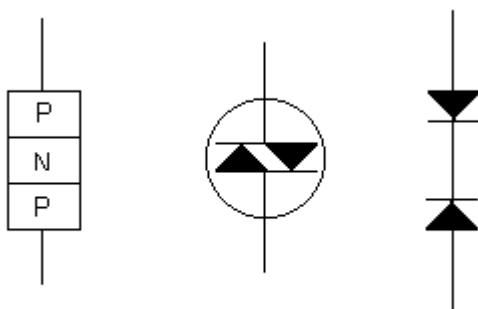
Para resolvermos este problema estudaremos o Diac na sequência.

8 - Diac

Os diacs são diodos de disparo bidirecional, composto por três camadas (PNP) com a simples função de disparar tiristores. Sua construção assemelha-se a de um transistor bipolar, porém difere na dopagem do cristal N.

Seu funcionamento é simples: Para passar do estado de bloqueio para o estado de condução, é preciso ultrapassar a tensão de ruptura (V_R), rompendo assim, a junção polarizada inversamente, podendo a corrente fluir em ambos sentidos.

Para voltar ao estado de bloqueio, basta remover a tensão por alguns instantes. Os diacs servem para controlar o disparo de triacs quando uma tensão de referência chegar a certo valor.

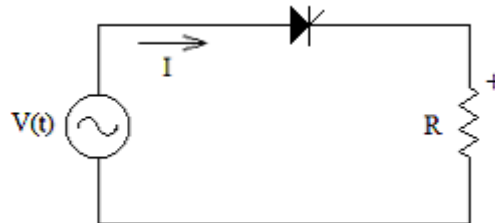


9 - Retificadores a tiristor

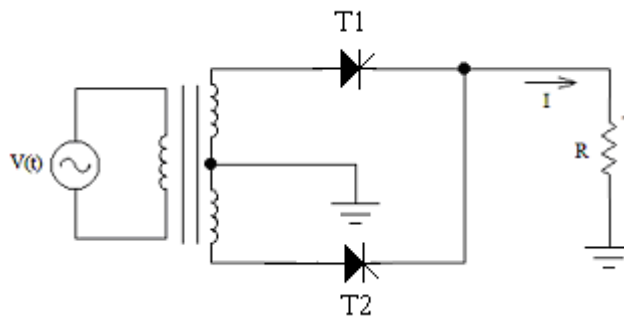
A estrutura básica de retificadores controlado consiste na mesma metodologia vista anteriormente com diodos, porem com esta estrutura somente os semiciclos positivos da fonte de alimentação, serão aplicados na carga quando os SCRs forem disparados. Já os semiciclos negativos são omitidos, como já estudado anteriormente. Agora temos um circuito de controle dos gatilhos dos SCRs mais requintado podendo fazer o controle entre 0° a 180° .

Vamos dar exemplos de montagem dos circuitos para que seja melhor entendido

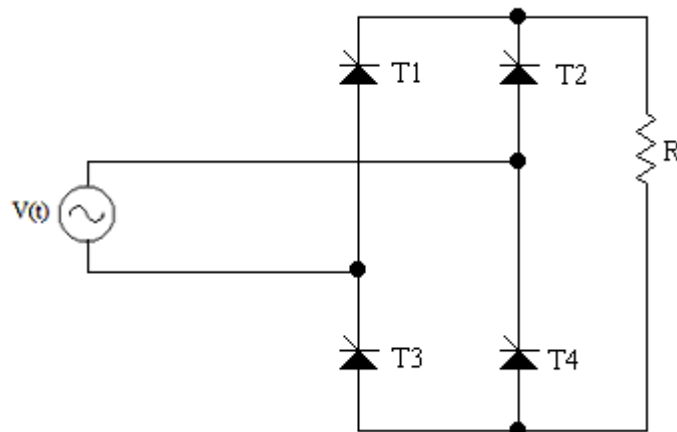
Retificador monofásico de meia onda



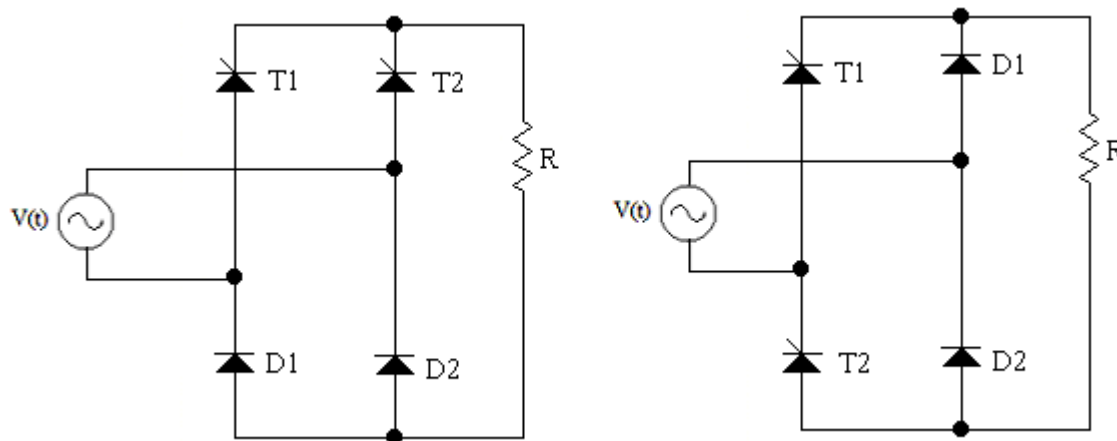
Retificador monofásico de onda completa com ponto médio



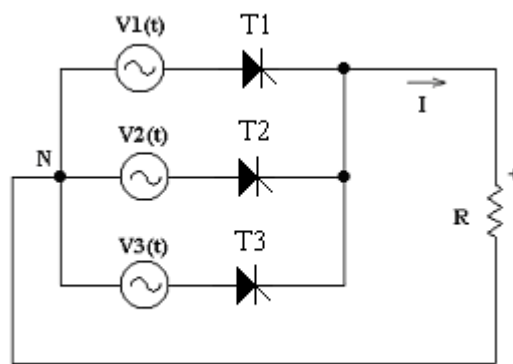
Retificador monofásico em ponte completa



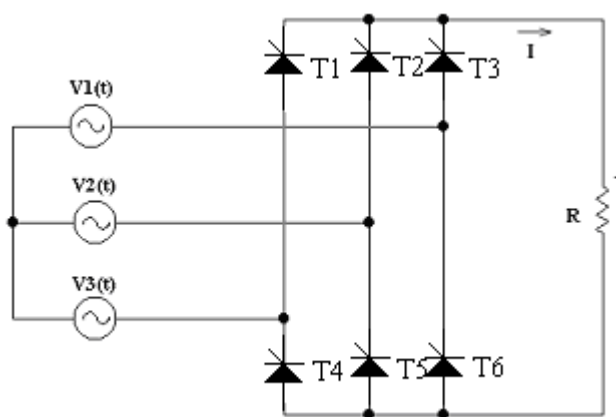
Retificador semi-controlado ou em ponte mista



Retificador trifásico de meia onda

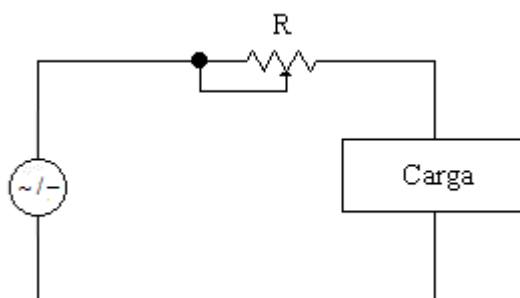


Retificador trifásico de onda completa (Ponte de Graetz)



10 - PWM

Para começarmos o estudo do PWM, que vem do inglês *Pulse Width Modulation*, ou seja, modulação por largura de pulso, temos que ter alguns pré-requisitos em mente. Uma maneira tradicional de se controlar a potência de uma carga é através de um potenciômetro ou reostato em série com a carga, conforme mostra a figura abaixo, este tipo de controle é denominada linear.

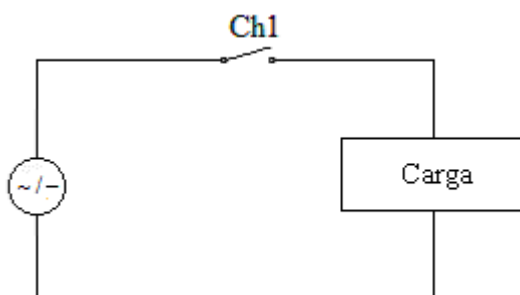


Variando-se a resistência do potenciômetro pode-se modificar a corrente na carga e, portanto, a potência aplicada a ela.

A grande desvantagem deste tipo de controle, é que a queda de tensão multiplicada pela corrente no R em série representa uma potência na forma de calor. Conforme o ajuste deste, o controle passa a dissipar mais potência que a carga.

O R tem de ser capaz de dissipar esta potência, sendo assim o seu tamanho físico cresce proporcionalmente com a sua potência, tornando-se caro. Embora este controle seja até intuitivo porém não é muito inteligente, no que diz respeito de desperdício de energia.

Consideremos então o mesmo circuito, só trocamos o controle, como podemos ver no desenho abaixo.



Consideremos ainda que esta chave tem uma ação muito rápida. Quando o interruptor está aberto não há corrente na carga e a potência aplicada é nula. No instante em que o interruptor é fechado, a carga recebe a tensão total da fonte e a potência aplicada é máxima.

Então para termos uma potência de 50%, a ideia é deixarmos um tempo x com a chave ligada e o mesmo tempo com a chave desligada. Isso significa que, em média, teremos metade do tempo com corrente e metade do tempo sem corrente, concluindo que a potência ficará em 50%.

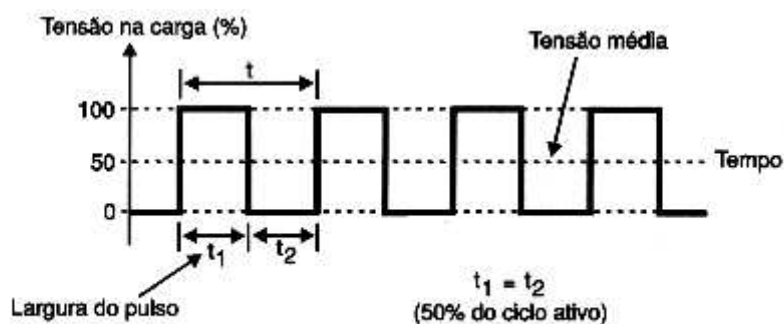


Fig. 4 - Abrindo e fechando em tempos controlados variamos a tensão média.

A potência média e, portanto, a própria tensão média aplicada à carga é neste caso 50% da tensão de entrada.

Veja que o interruptor fechado pode definir uma largura de pulso pelo tempo em que ele fica nesta condição, e um intervalo entre pulsos pelo tempo em que ele fica aberto. Os dois tempos juntos definem o período e, portanto, uma frequência de controle.

A relação entre o tempo em que temos o pulso e a duração de um ciclo completo de operação do interruptor nos define ainda o ciclo ativo, conforme é mostrado na figura 5.

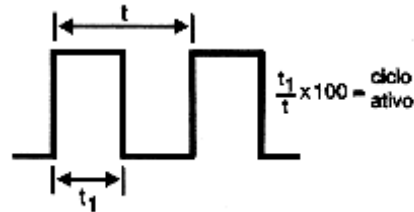


Fig. 5 - Definindo o ciclo ativo.

Variando-se a largura do pulso e também o intervalo de modo a termos ciclos ativos diferentes, podemos controlar a potência média aplicada a uma carga. Assim, quando a largura do pulso varia de zero até o máximo, a potência também varia na mesma proporção, conforme está indicado na figura 6.

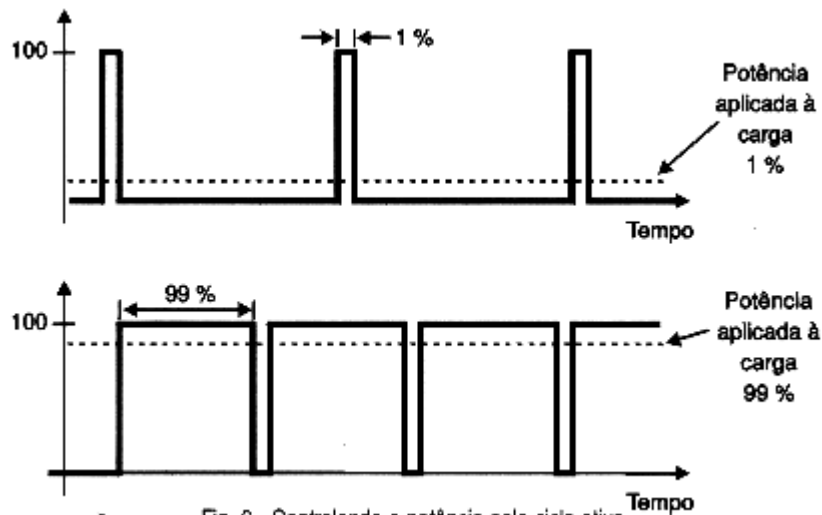


Fig. 6 - Controlando a potência pelo ciclo ativo.

Este princípio é usado justamente no controle PWM: modulamos (variemos) a largura do pulso de modo a controlar o ciclo ativo do sinal aplicado a uma carga e, com isso, a potência aplicada a ela.

Na prática, substituímos o interruptor por algum dispositivo de estado sólido que possa abrir e fechar o circuito rapidamente como, por exemplo, um transistor bipolar, um FET de potência, um IGBT ou até mesmo um SCR.

A este dispositivo é então ligado um oscilador que possa ter seu ciclo ativo controlado numa grande faixa de valores. Na prática, é difícil chegar à duração zero do pulso e à 100%, já que isso implicaria na parada do oscilador, mas podemos chegar bem perto disso.

Na operação de um controle por PWM existem diversas vantagens a serem consideradas e alguns pontos para os quais o projetista deve ficar atento para não jogar fora estas vantagens.

Na condição de aberto, nenhuma corrente circula pelo dispositivo de controle e, portanto, sua dissipação é nula. Na condição de fechado, teoricamente, se ele apresenta uma resistência nula, a queda de tensão é nula, e ele não dissipa também nenhuma potência.

Isso significa que, na teoria, os controles PWM não dissipam potência alguma e, portanto, consistem em soluções ideais para este tipo de aplicação.

Na prática, entretanto, isso não ocorre. Em primeiro lugar, os dispositivos usados no controle não são capazes de abrir e fechar o circuito num tempo infinitamente pequeno. Eles precisam de um tempo para mudar de estado e, neste intervalo de tempo, sua resistência sobe de um valor muito pequeno até infinito e vice-versa, numa curva de comutação semelhante a mostrada na figura 10.

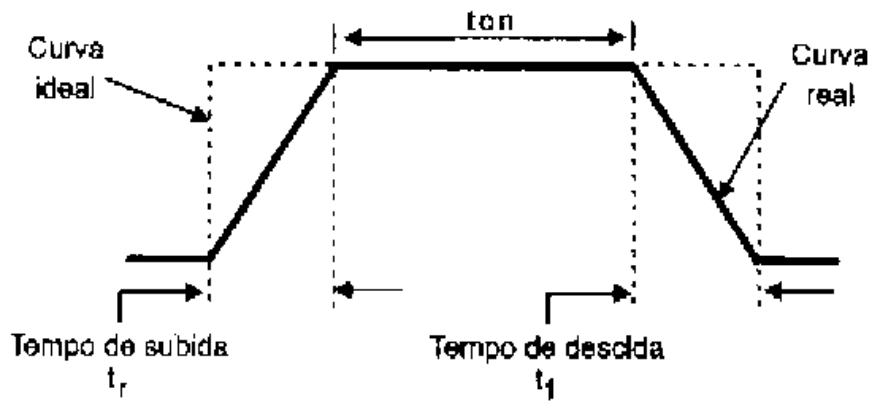


Fig. 10 - Nos intervalos t_r e t_f , o dispositivo gera calor em boa quantidade.

Neste intervalo de tempo a queda de tensão e a corrente através do dispositivo não são nulas, e uma boa quantidade de calor poderá ser gerada conforme a carga controlada. Dependendo da frequência de controle e da resposta do dispositivo usado, uma boa quantidade de calor poderá ser gerada neste processo de comutação.

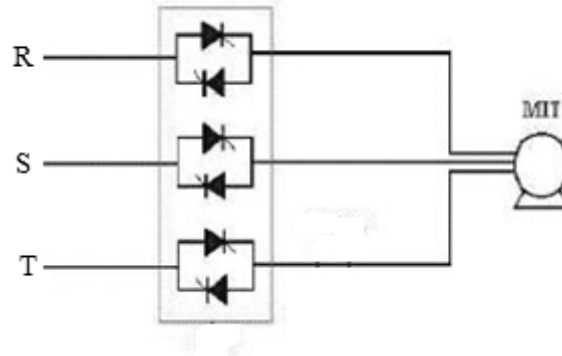
Entretanto, mesmo com este problema, a potência gerada num controle PWM ainda é muito menor do que num circuito de controle linear equivalente. Transistores de comutação rápidos, FETs de potência, e outros componentes de chaveamento podem ser suficientemente rápidos para permitir que projetos de controles de potências elevadas sejam implementados sem a necessidade de grandes dissipadores de calor ou que tenham problemas de perdas de energia por geração de calor que possam ser preocupantes.

O segundo problema que poderá surgir vem justamente do fato de que os transistores de efeito de campo ou bipolares usados em comutação não se comportam como resistências nulas, quando saturados. Os transistores bipolares podem apresentar uma queda de tensão de até alguns volts quando saturados, o mesmo ocorrendo com os FETs.

11 - Soft-Starter

Soft start é um dispositivo eletrônico composto de pontes tiristorizadas a fim de controlar a corrente de partida de motores de corrente alternada trifásicos, o controle da tensão reduzida é feita ajustando-se o ângulo de disparo de um par de SCRs dispostos em antiparalelo em cada fase do motor. A medida que a tensão vai aumentando a corrente aumenta para acelerar a carga de uma maneira suave e sem degraus. Seu uso é comum em bombas centrífugas, ventiladores, e motores de elevada potência cuja aplicação não exija a variação de velocidade.

A vantagem desta técnica sobre as alternativas de custo baixo é a possibilidade de ajustarmos o torque do motor as necessidades de torque da carga.



12 - Inversores

Introdução

A obtenção de uma tensão alternada a partir de uma fonte CC é muitas vezes necessária para a alimentação de diversas cargas.

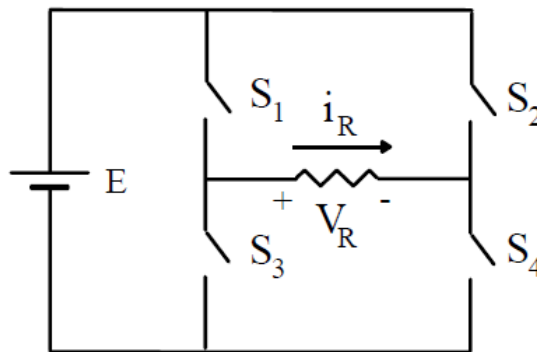
Os conversores que realizam a transformação CC-CA são chamados de inversores. Como exemplos de aplicações pode-se citar o controle de velocidade de motores de corrente alternada, fontes de alimentação ininterrupta (no-break) entre varias outras aplicações.

Qualquer sistema no qual o fornecimento da energia elétrica não pode ser interrompido deve prever uma fonte de emergência para supri-lo. Quando a potência instalada é muito grande tem-se, em geral, um sistema de acionamento imediato, alimentado a partir de baterias, e um sistema motor-gerador que, por necessitar de alguns minutos para estar em condições ideais de operação, não pode ser usado de imediato. Tal arranjo é usado, por exemplo, em centrais telefônicas, hospitais, etc.

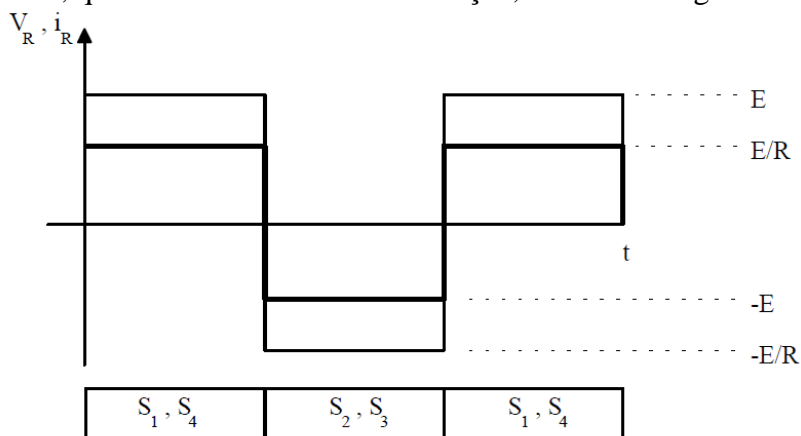
Topologias Básicas

Inversor Monofásico em Ponte

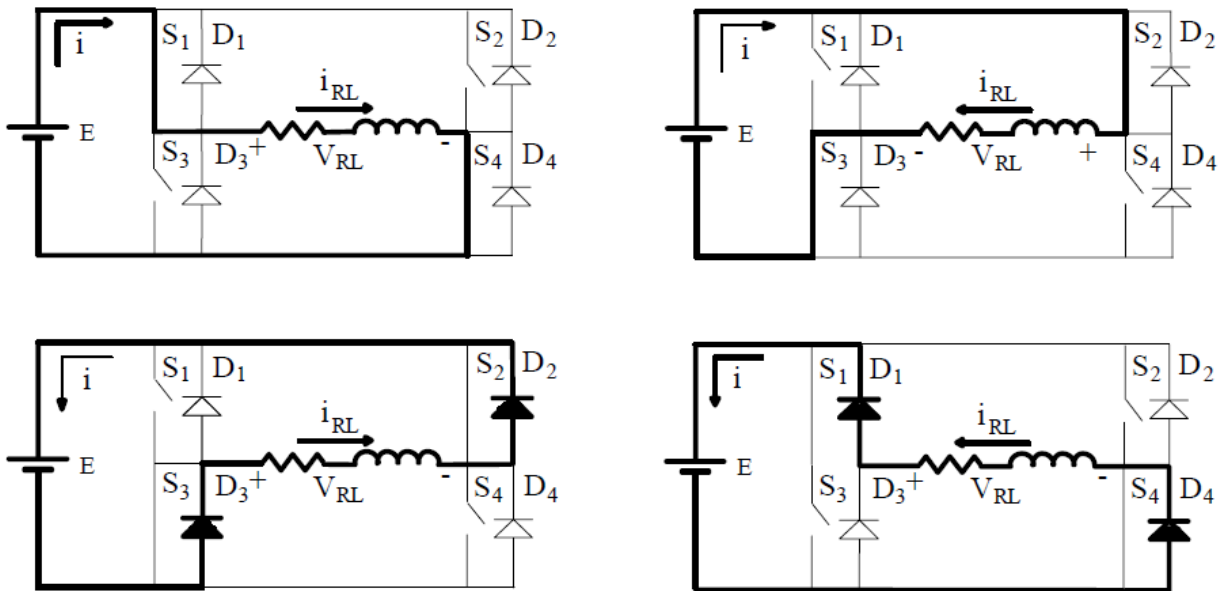
A estrutura do inversor monofásico em ponte alimentando carga resistiva, está representado na Figura abaixo.



As formas de onda de interesse são apresentadas na figura abaixo. Com S_1 e S_4 em condução, a tensão na carga é igual a E , quando S_2 e S_3 estão em condução, ela torna-se igual a $-E$.



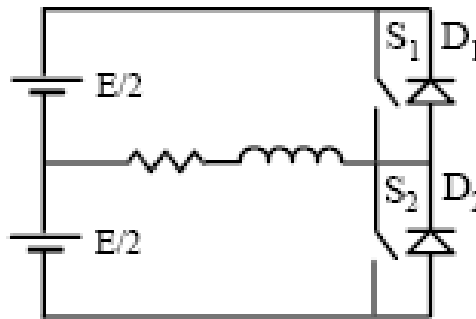
Quando a carga for indutiva, devem ser adicionados a estrutura do circuito mostrado acima os diodos de circulação D_1, D_2, D_3 e D_4 , como indica a figura abaixo. Observe que com carga indutiva a fonte E deve ser reversível em corrente.



Etapas de funcionamento do inversor em ponte alimentando carga indutiva.

Inversor Monofásico em Ponto Médio

Este circuito representado na figura abaixo, emprega apenas um braço, sendo desse modo mais simples de ser comandado que o inversor em ponte, porém a sua desvantagem é a tensão de saída ser a metade.

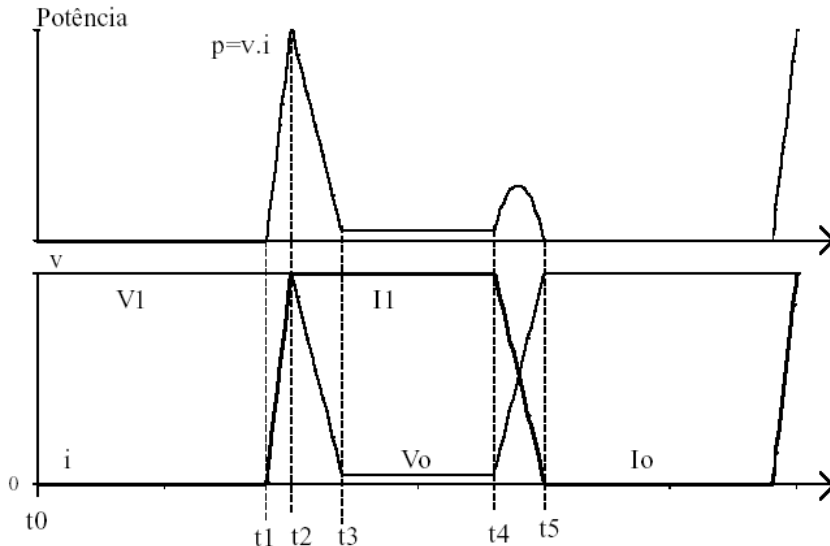


Inversor Monofásico em Ponte.

13 - Dissipadores

A circulação de corrente elétrica por qualquer elemento provoca uma dissipação de potência igual ao produto do quadrado da corrente pela resistência do circuito. O objetivo é estabelecer critérios para o dimensionamento de sistemas de dissipação do calor produzido por componentes eletrônicos, especialmente semicondutores de potência (diodos, transistores, tiristores, etc.), buscando a proteção de tais componentes, tendo como meta fundamental a elevada confiabilidade dos equipamentos nos quais os dispositivos são empregados. Deve-se buscar redução de volume, peso e custos.

Cálculo da Potência Dissipada



O cálculo da potência dissipada deve ser feito, via de regra, pelo produto da tensão pela corrente sobre o dispositivo em questão.

Comportamento em regime permanente: potência média

Nos dispositivos semicondutores de potência o calor decorrente do efeito Joule é produzido na pastilha semicondutora, fluindo daí para ambientes mais frios, como o encapsulamento do dispositivo e o ambiente. Este fluxo de calor depende de fatores como o gradiente de temperatura e as características térmicas dos meios e materiais envolvidos.

Define-se a grandeza “**resistência térmica**” como uma medida da dificuldade do fluxo de calor entre 2 meios:

ΔT : diferença de temperatura entre regiões de transferência de calor

P: potência média dissipada

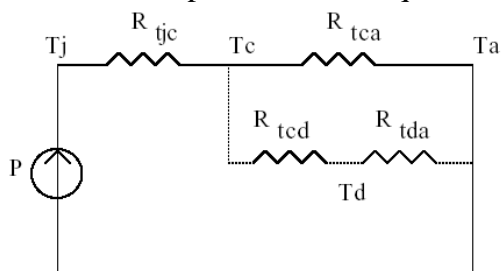
h: coeficiente de transferência de calor

A: área envolvida na transferência de calor

$$R_t = \frac{\Delta T}{P} = \frac{1}{(h \cdot A)}$$

ANALOGIA COM CIRCUITO ELÉTRICO

Em geral, se faz uma analogia com um circuito elétrico, sendo a potência média representada por uma **fonte de corrente**. As temperaturas nos ambientes indicados (junção, cápsula, ambiente) são análogas às **tensões** nos respectivos nós, enquanto as resistências térmicas são as próprias **resistências** do modelo.



- Tj=Temperatura da junção;
- Rtjc=Resistência térmica entre junção e encapsulamento;
- Tc=temperatura do encapsulamento;
- Rtca=Resist. Term. Entre encapsulamento e ambiente;
- Rtcd=Resist. Entre encapsulament e dissipador;
- Rtda=Resist. Térmica entre dissipador e ambiente;

Partindo do análogo elétrico chegamos a seguinte equação típica:

$$T_j = T_a + P \cdot (R_{tjc} + R_{tca})$$

Exemplo 1:

$$P = 20 \text{ W}$$

$$R_{tjc} = 2^\circ\text{C/W}$$

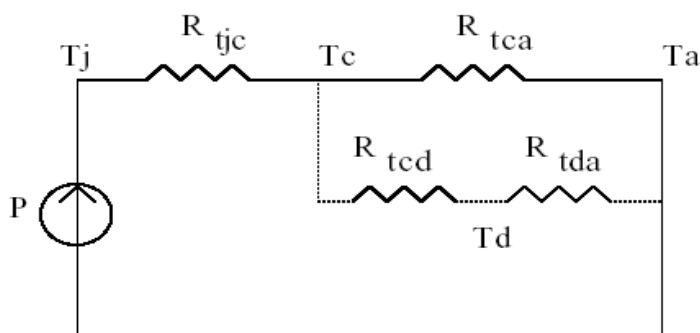
$$R_{tca} = 10^\circ\text{C/W}$$

$$T_a = 40^\circ\text{C}$$

$$T_{j\text{max}} = 120^\circ\text{C}$$

$$T_c = T_a + P \cdot R_{tca} = 240^\circ\text{C}$$

$$T_j = T_c + P \cdot R_{tjc} = 280^\circ\text{C}$$



Dissipadores de calor

Considerando que não seja possível reduzir a potência média dissipada, a alternativa para a proteção do semicondutor é colocar um dispositivo de baixa resistência térmica entre o encapsulamento e o ambiente. A este elemento colocado junto ao encapsulamento se diz **“dissipador de calor”**.

Características dos dissipadores

As principais características estão relacionadas com:

dimensões e, especialmente à sua superfície de contato com o ambiente.

Em geral estes dispositivos são construídos em alumínio dada sua boa condutividade térmica (condição indispensável), baixo custo e peso. A figura mostra perfis típicos de dissipadores. A utilização de grande número de aletas é para aumentar a área de troca de calor. A resistência térmica para uma placa plana quadrada pode ser **aproximadamente dada por:**

$$R_{tda} = \frac{3,3}{4\sqrt{\lambda W}} \cdot C_f + 650 \cdot \frac{C_f}{A}$$

λ : condutância térmica (a 77o C) [W/(oC.cm)]

W: espessura do dissipador [mm]

A: área do dissipador [cm²]

Cf: fator de correção devido à posição e tipo de superfície

Na tabela abaixo são dados alguns valores para os coeficientes da fórmula:

| Material | (W/°C.cm) |
|------------------|-----------|
| Alumínio | 2,08 |
| Cobre | 3,85 |
| Latão | 1,1 |
| Aço | 0,46 |
| Mica | 0,006 |
| Óxido de berílio | 2,10 |

| | corpo brilhante | corpo negro |
|---------------------|-----------------|-------------|
| Montagem vertical | 0,85 | 0,43 |
| Montagem horizontal | 1,00 | 0,50 |

O fator **Cf** varia com a posição do dissipador, sendo preferível uma montagem vertical à horizontal por criar um efeito “chaminé”. Dissipadores pretos são melhores irradiadores de calor que aqueles com superfície brilhante.

Comportamento em regime transitório: potência de pico

Quando a potência dissipada no semiconductor consiste de pulsos de potência é preciso verificar a proteção do componente em relação aos picos de dissipação. Durante a ocorrência do pico de potência ocorre a elevação da temperatura da junção embora não ocorra variação nas temperaturas do encapsulamento e do dissipador (que dependem da potência média) devido à maior capacidade térmica da cápsula e especialmente do dissipador.

Tal capacidade térmica relaciona-se com o tipo de material utilizado e seu volume. Na analogia elétrica utilizada anteriormente ela se comporta como uma capacitância. O cálculo da temperatura da junção em tal regime transitório é feito utilizando uma grandeza chamada “impedância térmica” **Ztjc**, que leva em consideração a capacidade térmica da junção.

Exemplo 2:

$$R_{tjc} = 2^\circ \text{C/W}$$

$$R_{tca} = 5^\circ \text{C/W}$$

$$R_{tcd} = 2^\circ \text{C/W}$$

$$R_{tda} = 3^\circ \text{C/W}$$

$$Z_{tjc} = 0,05^\circ \text{C/W}$$

$$T_{j\max} = 150^\circ \text{C}$$

$$T_a = 40^\circ \text{C}$$

$$P = 20\text{W}$$

$$P_p = 1000\text{W}$$

$$T_j = T_a + P \cdot \left[R_{tjc} + \frac{R_{tca} \cdot (R_{tcd} + R_{tda})}{R_{tca} + R_{tcd} + R_{tda}} \right]$$

$$T_j = 130 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (o componente está protegido em relação à potência média)}$$

$$T_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_j = T_c + P_p \cdot Z_{tjc} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$$

Cálculo dos Dissipadores

- A temperatura de trabalho da junção deve ser 20% a 30% menor que seu valor máximo, para permitir a proteção do componente sem super-dimensionar o dissipador.

- Para ambientes nos quais não se faça um controle rígido da temperatura deve-se usar uma temperatura ambiente de 40°C

- Caso o dissipador fique dentro de algum bastidor ou caixa na qual a temperatura possa se elevar acima dos 40°C deve-se considerar sempre a máxima temperatura do ar com o qual o dissipador troca calor. É conveniente, à falta de maiores informações utilizar o valor de 40°C e verificar após a entrada em operação do protótipo a verdadeira temperatura ambiente.

- Deve-se verificar a necessidade do uso de isoladores (mica, teflon ou mylar) e não desconsiderar suas resistências térmicas.

- O emprego de pastas térmicas é sempre recomendado e se deve considerar também sua resistência térmica.

Exemplo 3:

$$R_{tjc} = 1^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

$$R_{tca} = 35^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

$$R_{tcd} = 0,7^{\circ}\text{C}/\text{W} \text{ (isolador e pasta)}$$

$$Z_{tjc} = 0,01^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

$$P = 20\text{W}$$

$$P_p = 5 \text{ kW}$$

$$T_{j\text{max}} = 150^{\circ}\text{C}$$

$$T_a = 40^{\circ}\text{C}$$

b) No transitório:

$$T_{c_{\text{max}}} = T_j - Z_{tjc} \cdot P_p$$

$$T_{c_{\text{max}}} = 70^{\circ}\text{C}$$

$$T_{c_{\text{max}}} = T_a + R_{teq} \cdot P$$

$$R_{teq} = 1,5^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

$$R_{tda} = 0,86^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

a) Cálculo em regime permanente

$$T_j = 0,8 \cdot T_{j\text{max}} = 120^{\circ}\text{C}$$

$$T_j = T_a + P \cdot (R_{tjc} + R_{teq})$$

$$R_{teq} = 3^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

$$R_{teq} = \frac{R_{tca} \cdot (R_{tcd} + R_{tda})}{R_{tca} + R_{tcd} + R_{tda}}$$

$$R_{tda_{\text{max}}} = 2,58^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Apêndice A

Laboratório 1

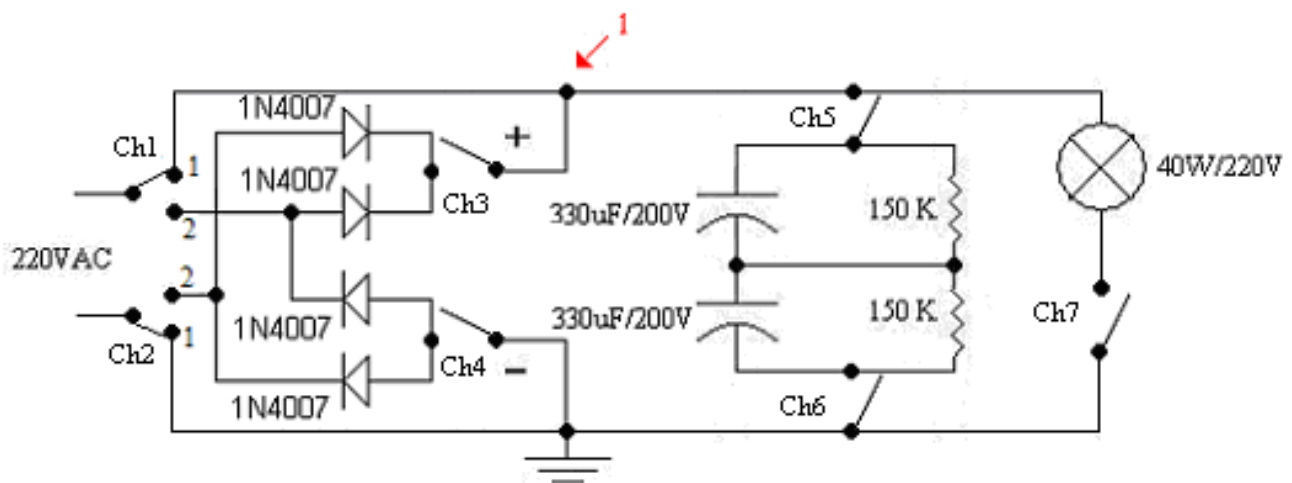
Diodo

Ache os componentes em sucatas e monte o circuito abaixo em placa de circuito impresso corroída.

Lista de material:

- 4 Diodos 1N4007
- 2 Capacitores 330uF/200V
- 2 Resistores 150K 1/8W
- 1 Suporte p/ lâmpada
- 1 Lâmpada 40W/220V
- 1 Conector p/ placa de 2 bornes
- 6 Chaves HH
- 1 Rabicho com plugue
- Placa p/ circuito impresso virgem (fibra, fenolite, perfurada)
- Caneta retro projetor ou esmalte p/ unhas
- Palha de aço ou acetona e pedaço de pano
- Solução de percloroeto de ferro
- Estanho em fio

Obs.: Colocar o seu nome no lado do cobre a caneta ou esmalte antes da corrosão.



Montado na placa o circuito acima e testado fazer os seguintes exercícios:

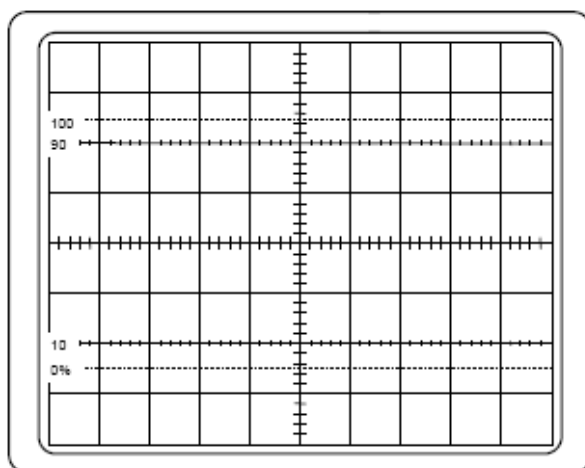
1 – Com o interruptor Ch7 ligado, os interruptores Ch3, Ch4, Ch5 e Ch6 desligados e os interruptores Ch1 e Ch2 na posição 1 faça a seguinte medida: meça com o osciloscópio colocando a garra jacaré onde aparece o GND e o pinça no ponto 1, de forma que apareça somente o semi-ciclo positivo na tela, também reproduza abaixo a forma de onda encontrada e registre onde a posição do zero.

O aparelho ajustado da seguinte forma:

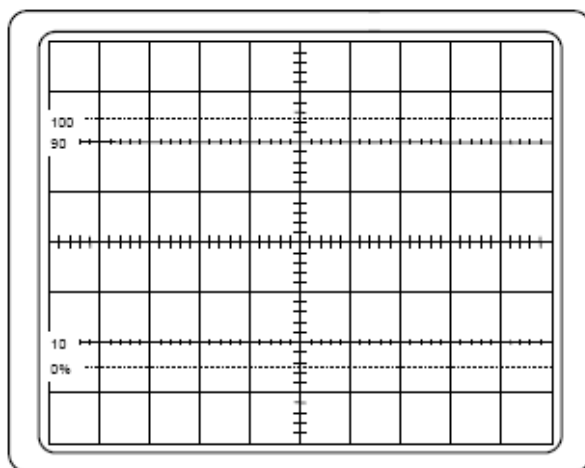
O botão de tempo/divisão em 5mS

O botão tensão/divisão ajustado em 5V

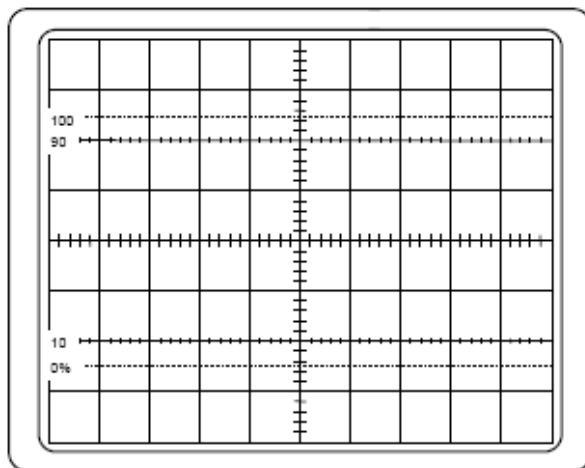
A ponteira ajustada em X10



2 – Permanecendo o interruptor Ch7 ligado, Ch5 e Ch6 desligados, porém Ch1 e Ch2 na posição 2 e Ch3 e Ch4 ligados faça novamente a medida e reproduza na tela abaixo a forma de onda.



3 - Permanecendo o interruptor Ch7 ligado, Ch3, Ch4, Ch5 e Ch6 agora ligados, e Ch1 e Ch2 na posição 2 faça novamente a medida e reproduza na tela abaixo a forma de onda.



4 – O que aconteceu com a potência (brilho) da lâmpada ? Com circuito configurado como no exercício 1 e exercício 3 (aumentou ou diminuiu) Porque ocorreu isto?

5 – Qual é a nova potência da lâmpada? Provar por meio de cálculos.

6 – Por fim, com o circuito configurado como no exercício 3 coloque uma lâmpada de maior potência e visualize o ripple novamente com o osciloscópio, explique o que ocorreu?

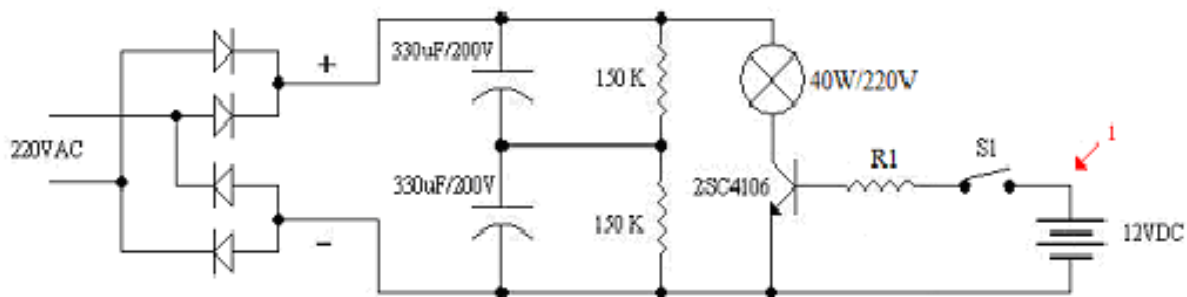
Laboratório 2

TRANSISTOR BIPOLAR (BJT)

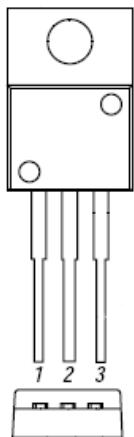
Os transistores de potência apresentam características de chaveamento controlado. Os transistores, utilizados como elementos de chaveamento, operam na região de saturação, apresentando uma baixa queda de tensão de condução ($V_{CE}=0V$) ($V_{BE}=1,3V$).

Este laboratório tem o objetivo de fazer um retificador e filtro diretamente da rede alternada com componentes retirados de fontes chaveadas de computadores, após o estágio de retificação e filtro, faremos funcionar uma lâmpada incandescente de 220 volts corrente alternada, em corrente contínua com o auxílio de um transistor de potencia, também retirado das mesmas fontes.

Calcule o R1 e monte o circuito e após responda as questões.



Alguns transistores encontrados em fontes chaveadas de computador.



Pinos:

- 1 – Base
- 2 – Coletor
- 3 – Emissor

| Transistor | VCE (V) | Ic (A) | β |
|-----------------|------------|----------|----------|
| MJE13007 | 400 | 8 | 5 |
| 2SC4106 | 400 | 7 | 10 |
| 2SC5027 | 800 | 3 | 8 |
| 2SC5353 | 800 | 3 | 15 |
| 2SC2335 | 400 | 7 | 10 |
| 2SC4242 | 400 | 7 | 10 |
| 2SC5763 | 400 | 7 | 10 |

1 – Escolha o transistor e faça o calculo para descobrir R1 e depois monte o circuito.

Transistor escolhido: _____

2 – Meça a corrente no ponto 1 e compare com o calculado. Faça as observações necessárias.

| Corrente no ponto (1) | |
|------------------------------|--|
| Calculado | |
| Medido | |

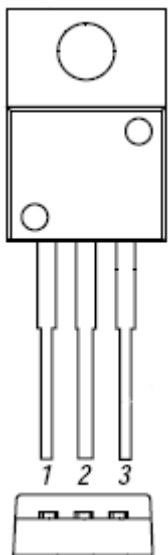
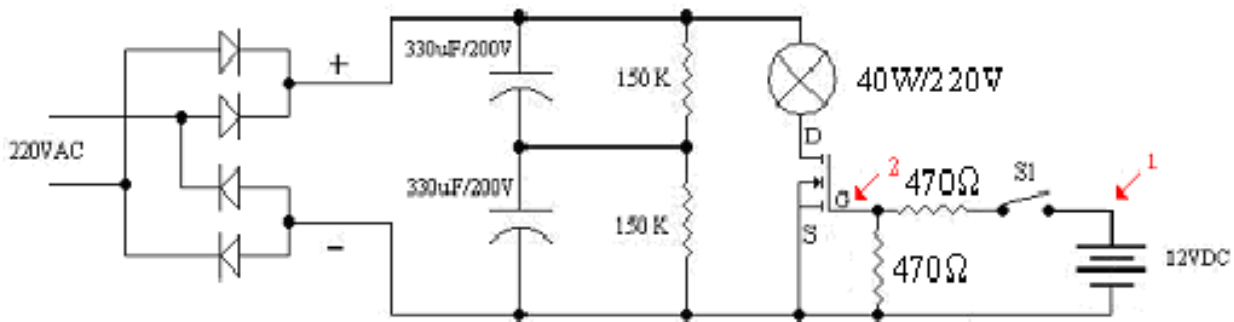
3 – Por que existem os resistores em paralelo com os capacitores?

Laboratório 3

TRANSISTOR EFEITO DE CAMPO (FET)

O transistor de potência MOSFET é um dispositivo de tensão controlada e, necessita apenas de tensão no gatilho. A velocidade de chaveamento é muito alta (nanosegundos). MOSFET's de potência são utilizados em conversores de baixa potência e alta frequência. Estes transistores apresentam problemas de descargas eletrostáticas, necessitando de cuidados especiais.

Este experimento tem como objetivo mostrar o funcionamento de Mosfets em uma aplicação pratica, para tanto montaremos o circuito abaixo.



Pinagem:

- 1 – GATE
- 2 – DRAIN
- 3 – SOURCE

Alguns transistores encontrados no comércio.

| Transistor | Tensão Vds(V) | Corrente Id (A) |
|------------|---------------|-----------------|
| IRF840 | 500 | 8,5 |
| IRF740 | 400 | 10 |

1 – Meça a corrente no ponto 1. Corrente no ponto 1: _____

No ponto 2 coloque 1° o multímetro antes de ligar o circuito.

Meça a corrente no ponto 2. Corrente no ponto 2: _____

Por que isto ocorre?

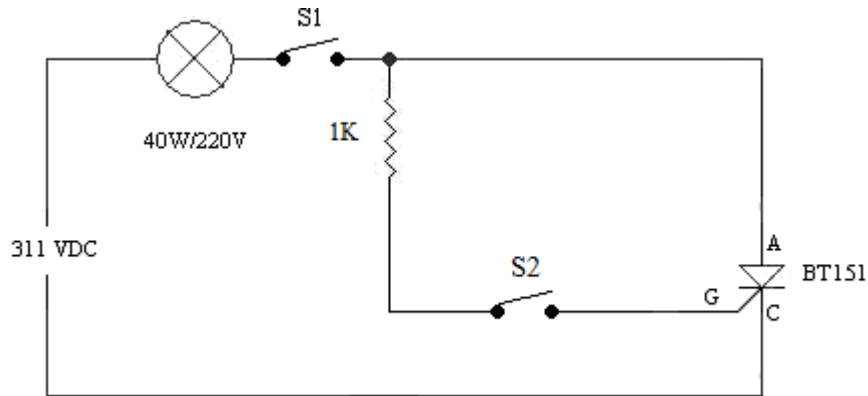
2 – Calcule a corrente que passa entre os resistores? E compare com os valores medidos e faça as observações necessárias.

Laboratório 4

SCR E TRIAC

Este laboratório tem o objetivo de comprovar o funcionamento do componente SCR e TRIAC e diferenciá-los.

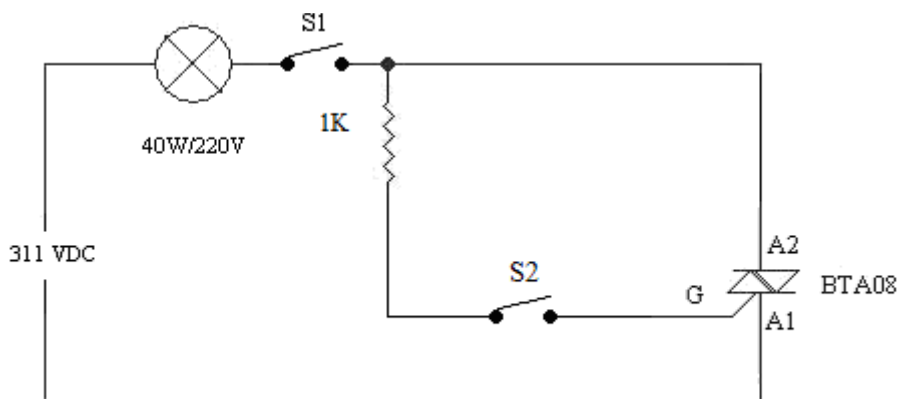
1



A - Primeiramente ligue a chave 1, mantendo a chave 2 desligada, o que ocorre?

B – Mantendo ligada a chave 1 ligue a chave 2 por um breve intervalo de tempo e desligue-a. O que acontece? Justifique sua resposta.

2



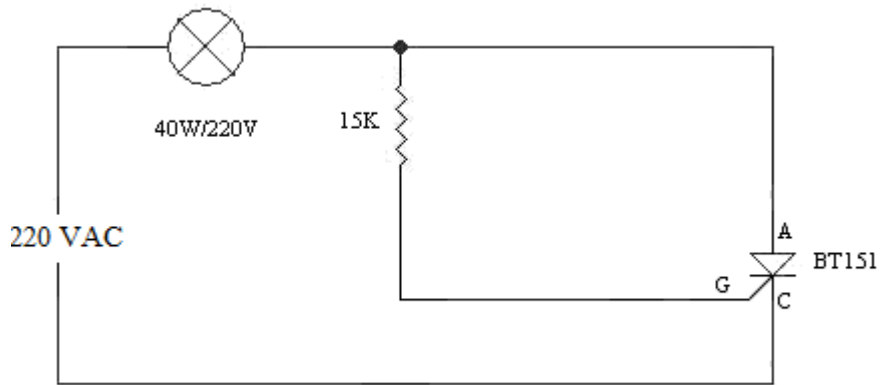
C – Faça a mesma seqüência usada nas questões A e B.

Seqüência da questão A? _____

Seqüência da questão B? _____

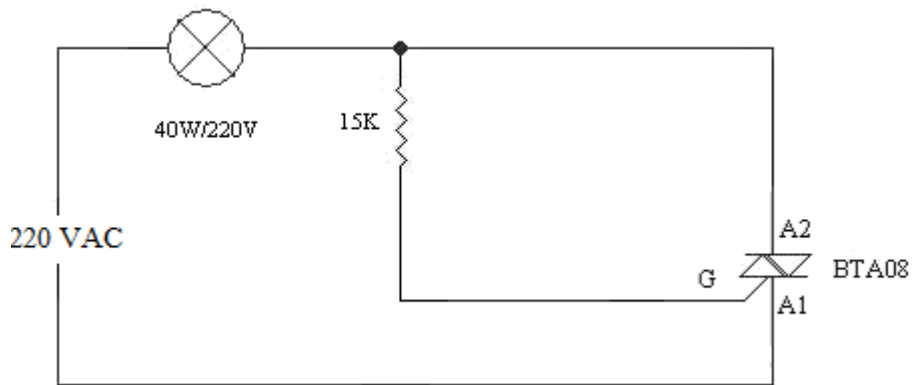
D - Faça as considerações comparando os circuitos 1 e 2:

3

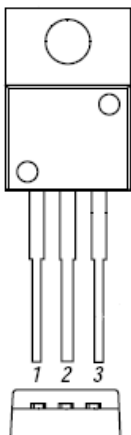


E – Faça um comentário sobre a omissão das chaves?

4



F - Comente os circuitos 3 e 4 há alguma diferença no brilho da lâmpada?



Pinos do SCR e BTA

- 1 – Catodo **A2**
- 2 – Anodo **A1**
- 3 – Gatilho

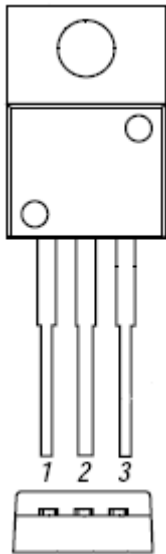
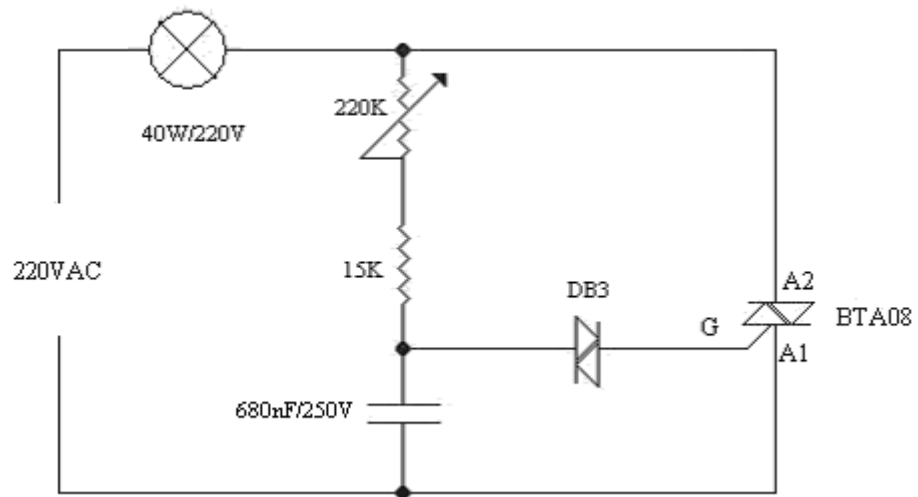
Alguns SCRs encontrados no comércio

| Tiristor | Tensão Vds(V) | Corrente Id (A) |
|----------|---------------|-----------------|
| BT151 | 500 | 8,5 |
| TIC106 | 400 | 10 |

Laboratório 5

DIAC E TRIAC

O objetivo é montar o circuito abaixo, e visualizar com o osciloscópio a forma de onda em cima da carga, no nosso caso a lâmpada, enquanto varia o potenciômetro.



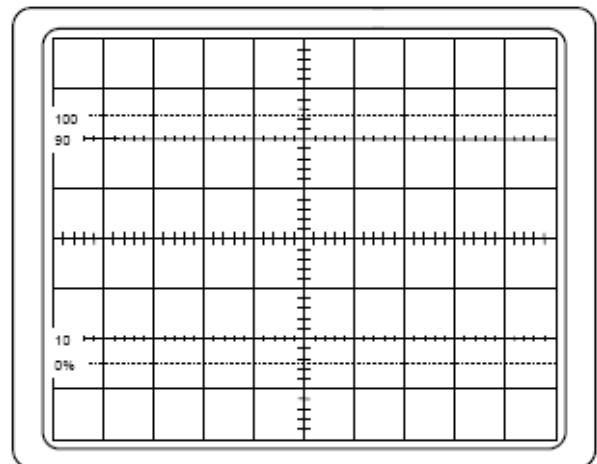
Pinagem

- 1 – A1
- 2 – A2
- 3 – G

Alguns triacs encontrado no comércio:

- BTA08 – 8A
- BTA26 – 26A
- MAC224 – 40A
- TIC226 – 8A

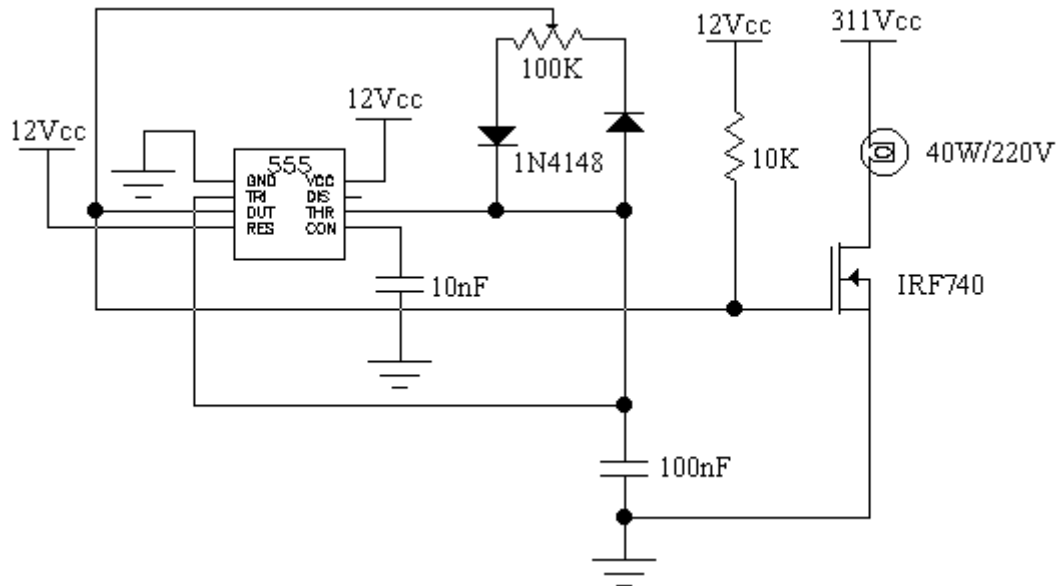
Coloque a ponteira em cima da carga e deixe o potenciômetro no meio do curso e reproduza na tela abaixo. Registre o ajuste que foi feito no osciloscópio para aparecer o meio ciclo superior na tela.



Laboratório 6

PWM

Este circuito é simples com o famoso CI 555, para gerar o sinal PWM. Controlando uma carga que conseguimos observar o está acontecendo.



1 – Qual a frequência gerada do sinal PWM?

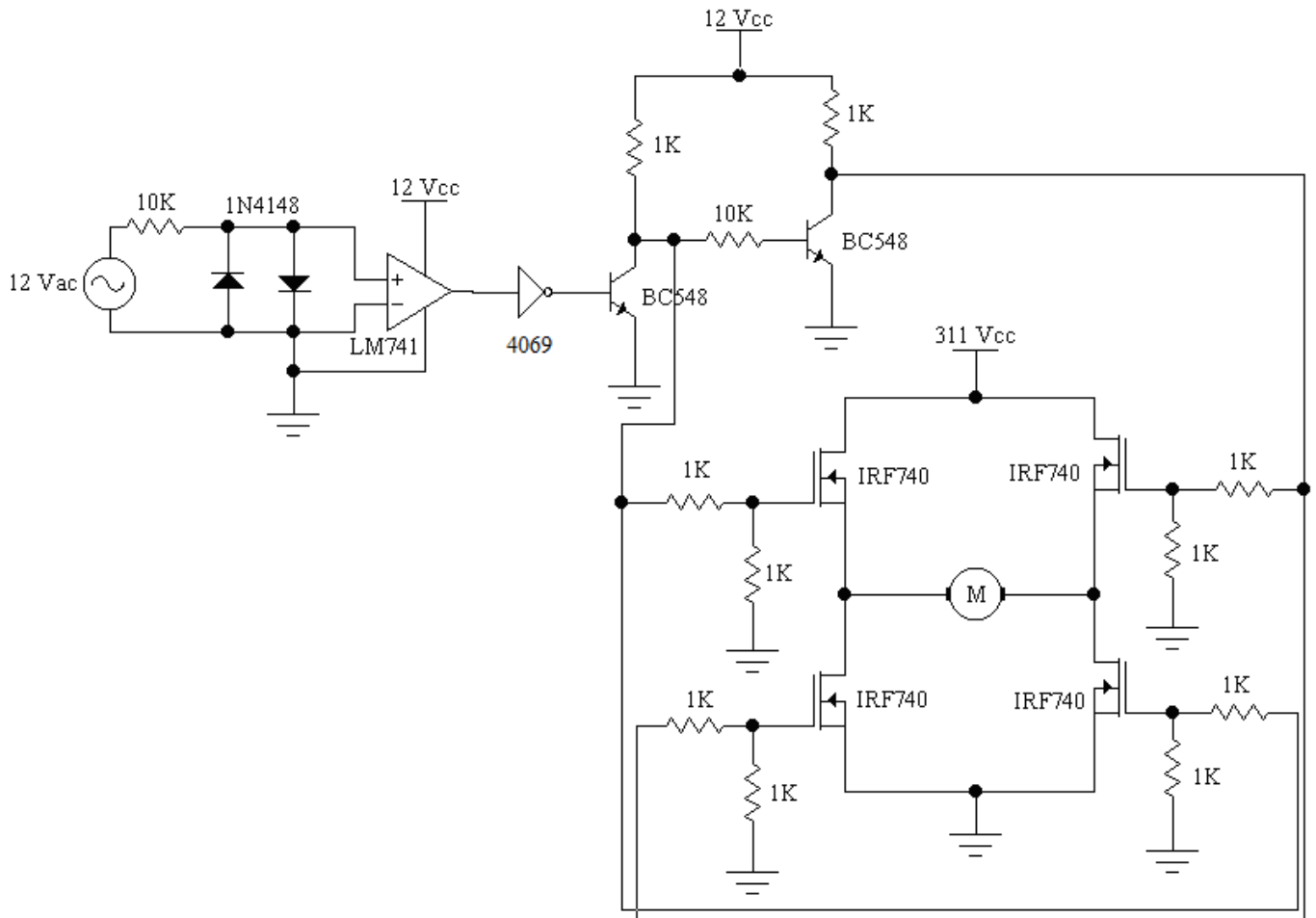
2 – O que acontece com a lâmpada quando varia o potenciômetro?

3 – Trocando o capacitor de 100nF por um de 10nF qual será a nova frequência?

Laboratório 7

INVERSOR

Este circuito é o conceito básico do princípio de funcionamento de um inversor, que é capaz de gerar uma tensão alternada a partir de uma tensão contínua.



1 – O motor está girando?

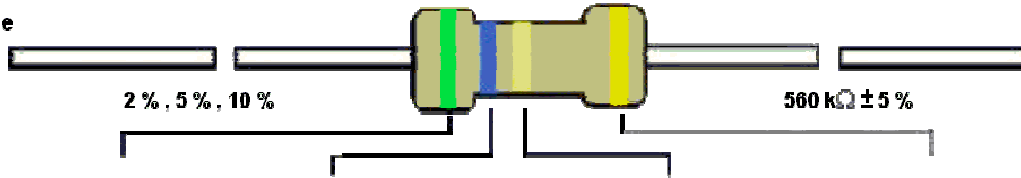
2 – Caso afirmativo na primeira pergunta, coloque a ponteira do osciloscópio em um dos terminais do motor e a garra jacaré no terra, e meça a frequência.

3 – O que está acontecendo com o motor, em suas características físicas? Mudou a velocidade, está aquecendo, está trepidando, etc.

Apendice B

Código de resistores

4 Band - Code



| COR | 1ª BANDA | 2ª BANDA | 3ª BANDA | MULTIPLICADOR | TOLERANCIA | |
|----------|----------|----------|----------|---------------|------------|-----|
| PRETO | 0 | 0 | 0 | 1Ω | | |
| MARROM | 1 | 1 | 1 | 10Ω | ±1% | (F) |
| VERMELHO | 2 | 2 | 2 | 100Ω | ±2% | (G) |
| LARANJA | 3 | 3 | 3 | 1KΩ | | |
| AMARELO | 4 | 4 | 4 | 10KΩ | | |
| VERDE | 5 | 5 | 5 | 100KΩ | ±0,5% | (D) |
| AZUL | 6 | 6 | 6 | 1MΩ | ±0,25% | (C) |
| VIOLETA | 7 | 7 | 7 | 10MΩ | ±0,1% | (B) |
| CINZA | 8 | 8 | 8 | | ±0,05% | |
| BRANCO | 9 | 9 | 9 | | | |
| DOURADO | | | | 0,1 | ±5% | (J) |
| PRATEADO | | | | 0,01 | ±10% | (K) |

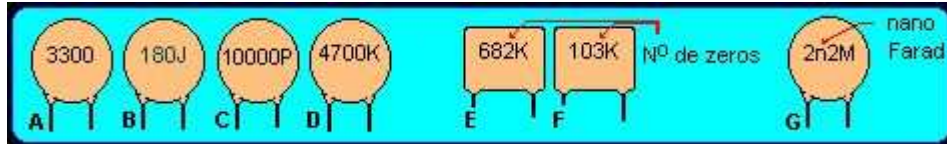
5 Band - Code



Capacitores cerâmicos



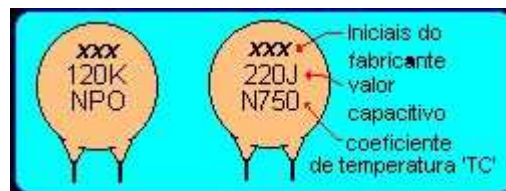
O valor do capacitor, "B", é de 3300 pF (**picofarad** = 10^{-12} F) ou 3,3 nF (**nanofarad** = 10^{-9} F) ou 0,0033 μ F (**microfarad** = 10^{-6} F). No capacitor "A", devemos acrescentar mais 4 zeros após os dois primeiros algarismos. O valor do capacitor, que se lê 104, é de 100000 pF ou 100 nF ou 0,1 μ F.



O aparecimento de uma **letra maiúscula ao lado dos números. Esta letra refere-se a tolerância do capacitor**, ou seja, o quanto que o capacitor pode variar de seu valor em uma temperatura padrão de 25° C. A letra "J" significa que este capacitor pode variar até $\pm 5\%$ de seu valor, a letra "K" = $\pm 10\%$ ou "M" = $\pm 20\%$. Segue na tabela abaixo, os códigos de tolerâncias de capacitância.

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

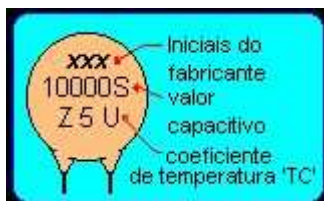
O **coeficiente de temperatura "TC"**, que define a variação da capacitância dentro de uma determinada faixa de temperatura. O "TC" é normalmente expresso em % ou ppm/ $^{\circ}$ C (partes por milhão / $^{\circ}$ C). **É usado uma seqüência de letras ou letras e números para representar os coeficientes.** Observe o desenho abaixo.



Na tabela abaixo estão mais alguns coeficientes de temperatura e as tolerâncias que são muito utilizadas por diversos fabricantes de capacitores.

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

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

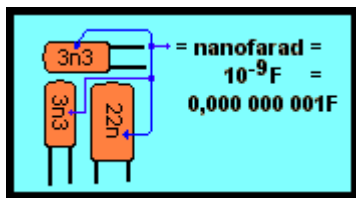


Os coeficientes são também representados exibindo seqüências de letras e números, como por exemplo: X7R, Y5F e Z5U. Para um capacitor Z5U, a faixa de operação é de +10°C que significa "Temperatura Mínima", seguido de +85°C que significa "Temperatura Máxima" e uma variação "Máxima de capacitância", dentro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

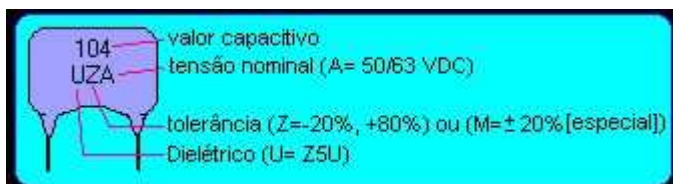
Veja as três tabelas abaixo para compreender este exemplo e entender outros coeficientes.

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

Capacitores de filme plástico



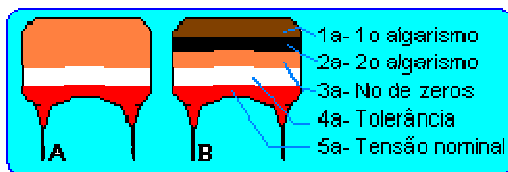
O desenho ao lado, mostra capacitores que tem os seus valores, impressos em nanofarad (nF) = 10^{-9} F. Quando aparece no capacitor uma letra "n" minúscula, como um dos tipos apresentados ao lado por exemplo: 3n3, significa que este capacitor é de 3,3nF. No exemplo, o "n" minúsculo é colocado ao meio dos números, apenas para economizar uma vírgula e evitar erro de interpretação de seu valor.



Capacitores de Cerâmica Multicamada.

Capacitores de Poliéster Metalizado usando código de cores

A tabela abaixo, mostra como interpretar o código de cores dos capacitores abaixo. No capacitor "A", as 3 primeiras cores são, laranja, laranja e laranja, correspondem a 33000, equivalendo a 33 nF. A cor branca, logo adiante, é referente a $\pm 10\%$ de tolerância. E o vermelho, representa a tensão nominal, que é de 250 volts.



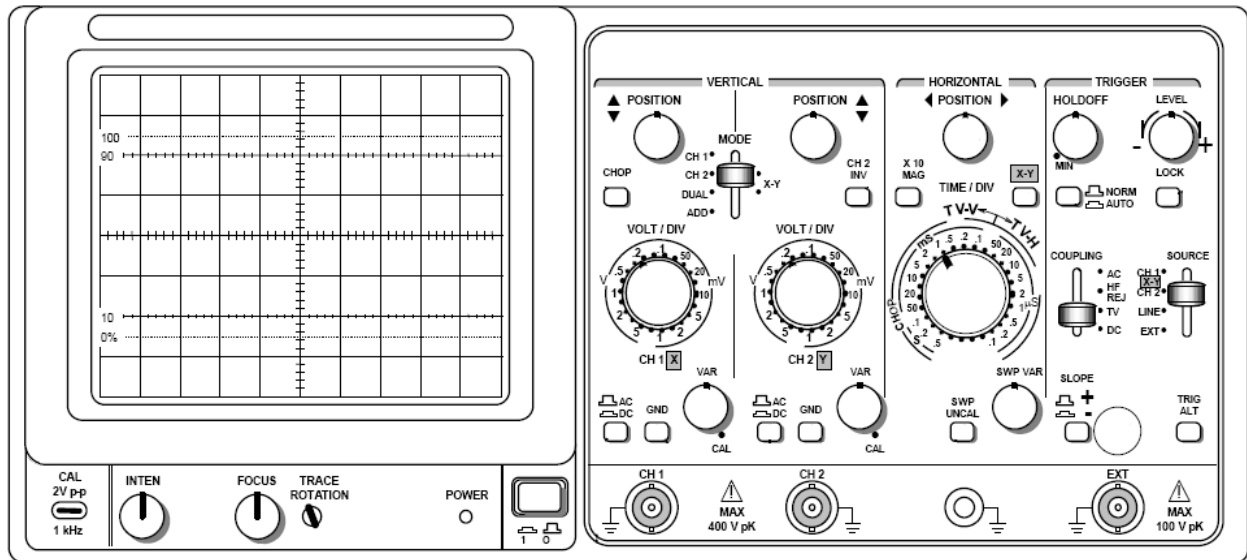
| | 1ª Algarismo | 2ª Algarismo | 3ª N° de zeros | 4ª Tolerância | 5ª Tensão |
|----------|--------------|--------------|----------------|---------------|-----------|
| PRETO | 0 | 0 | - | $\pm 20\%$ | - |
| MARROM | 1 | 1 | 0 | - | - |
| VERMELHO | 2 | 2 | 00 | - | 250V |
| LARANJA | 3 | 3 | 000 | - | - |
| AMARELO | 4 | 4 | 0000 | - | 400V |
| VERDE | 5 | 5 | 00000 | - | - |
| AZUL | 6 | 6 | - | - | 630V |
| VIOLETA | 7 | 7 | - | - | - |
| CINZA | 8 | 8 | - | - | - |
| BRANCO | 9 | 9 | - | $\pm 10\%$ | - |

Apêndice C

Osciloscópio

Geralmente os osciloscópios têm os controles e entradas que podem ser divididos em cinco grupos:

- 1 – Controle da fonte de alimentação
- 2 – Controles de ajuste do traço ou ponto na tela
- 3 – Controles e entrada de atuação vertical
- 4 – Controles e entrada de atuação horizontal
- 5 – Controles de entrada de sincronismo



1 - CONTROLE DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

1.1 - INTERRUPTOR

Sua função é interromper ou estabelecer a corrente no primário do transformador de fora. Sua atuação, normalmente, é acompanhada por uma lâmpada piloto que serve de aviso visual sobre a situação do circuito (ligado ou desligado).

Normalmente, este interruptor se encontra acoplado junto do potenciômetro de controle de brilho.

1.2 - COMUTADOR DE TENSÃO

Sua função é selecionar a tensão de funcionamento do osciloscópio (127/ 220V). Permite utilizar o instrumento sem a necessidade de recorrer a um transformador abaixador ou elevador de tensão (geralmente o acesso deste comutador é visto na parte de traz do aparelho).

2 - CONTROLES DE AJUSTE DO TRAÇO OU PONTO NA TELA

2.1 - BRILHO OU LUMINOSIDADE

É o controle que ajusta a luminosidade do ponto ou do traço. O controle do brilho é feito por meio de um potenciômetro, situado no circuito da grade de controle do TRC, mediante o qual se regula o potencial desta grade (deve-se evitar o uso de brilho excessivo sob pena de se danificar a tela).

2.2 - FOCO

É o controle que ajusta a nitidez do ponto ou traço luminoso. O ajuste do foco é conseguido mediante a regulagem de um potenciômetro que regula a polarização do eletrodo de enfoque. O foco deve ser ajustado de forma a se obter um traço fino e nítido na tela (estes ajustes de brilho e de foco são ajustes básicos que devem ser feitos sempre que se for usar o osciloscópio).

2.3 - ILUMINAÇÃO DA RETÍCULA

Permite que se ilumine o quadriculado ou as divisões na tela.

3 - CONTROLES E ENTRADA DE ATUAÇÃO VERTICAL

3.1 - ENTRADA DE SINAL VERTICAL

Nesta entrada é conectada a ponta de prova do osciloscópio. As variações de tensão aplicadas nesta entrada aparecem sob forma de figura na tela.

3.2 - CHAVE DE SELEÇÃO DE MODO DE ENTRADA (CA-CC)

Esta chave é selecionada de acordo com o tipo de forma de onda a ser observada. Em alguns osciloscópios esta chave possui três posições (CA-0-CC ou AC-GND-DC). Esta posição adicional é usada para a realização de ajustes do traço do osciloscópio em algumas situações. Por exemplo: quando se deseja Uma referência na tela.

3.3 - CHAVE SELETORA DE GANHO (V/Div)

Esta chave permite que se "aumente" ou que se "diminua" a amplitude de projeção na tela do osciloscópio (altura da imagem).

3.4 - POSIÇÃO VERTICAL

Permite movimentar a imagem para cima ou para baixo na tela. A movimentação não interfere na forma da figura projetada na tela.

4 - CONTROLES DE ATUAÇÃO HORIZONTAL

4.1 - CHAVE SELETORA DE BASE DE TEMPO

É o controle que permite variar o tempo de deslocamento horizontal do ponto na tela. Através deste controle é possível reduzir ou ampliar horizontalmente na tela a figura nela projetada.

Em alguns osciloscópios esta chave seletora tem uma posição identificada como EXT (externa) o que possibilita que o deslocamento horizontal pode ser controlado por circuito externo ao osciloscópio, através de uma entrada específica. Quando a posição externa é selecionada não há formação do traço na tela, obtendo-se apenas um ponto.

4.2 - POSIÇÃO HORIZONTAL

É o ajuste que permite controlar horizontalmente a forma de onda na tela. Girando o controle de posição horizontal para a direita o traço move-se horizontalmente para a direita e vice-versa. Assim como o controle de posição vertical, o controle de posição horizontal não interfere na forma da figura projetada na tela.

5 - CONTROLES E ENTRADA DE SINCRONISMO (TRIGGER)

São controles que se destinam a fixar a imagem na tela. Estes controles são utilizados principalmente na *observação de sinais alternados*.

Os controles de sincronismo são:

Chave seletora de fonte de sincronismo

Chave de modo de sincronismo

Controle de nível de sincronismo

5.1 - CHAVE SELETORA DE FONTE DE SINCRONISMO

Seleciona onde será tomada o sinal de sincronismo para fixar a imagem na tela do osciloscópio.

Normalmente, esta chave possui três posições, pelo menos:

POSIÇÃO CH1: O sincronismo é controlado pelo sinal aplicado ao canal 1.

POSIÇÃO REDE: Realiza o sincronismo com base na frequência da rede de alimentação do osciloscópio (60Hz). Nesta posição consegue-se facilmente sincronizar na tela sinais aplicados na entrada vertical que sejam obtidos a partir da rede elétrica.

POSIÇÃO EXTERNO: Na posição externo o sincronismo da figura é obtido à partir de outro equipamento externo conectado ao osciloscópio. O sinal que controla o sincronismo na posição externo é aplicado a entrada de sincronismo.

5.2 - CHAVE DE MODO DE SINCRONISMO

Normalmente esta chave tem duas ou três posições:

AUTO: Nesta posição o osciloscópio realiza o sincronismo automaticamente, com base no sinal selecionado pela chave seletora de fonte de sincronismo.

NORMAL +: O sincronismo é positivo, ajustado manualmente pelo controle de nível de sincronismo (TRIGGER), de modo que o primeiro pico que apareça na tela seja o positivo.

NORMAL -: O sincronismo é negativo, também ajustado manualmente, entretanto, o primeiro pico a aparecer é o negativo.

5.3 - CONTROLE DE NÍVEL DE SINCRONISMO (TRIGGER)

É um controle manual que permite o ajuste do sincronismo quando não se consegue um sincronismo automático. Tem atuação nas posições **NORMAL +** e **NORMAL -**.

OBSERVAÇÃO: Para se realizar leituras é necessário sincronizar a figura na tela.

II - ENTRADA E CONTROLE DO OSCILOSCÓPIO DUPLO TRAÇO

O osciloscópio de duplo traço possui alguns controles que são comuns aos dois traços e outros que são individuais. Os controles de brilho, foco, base de tempo e de posição horizontal, são controles que são comuns aos dois traços.

Basicamente, os controles individuais situam-se:

nas entradas e controles do vertical:

nos controles e entrada de sincronismo.

ENTRADAS E CONTROLES DO VERTICAL

Para que se possa observar dois sinais simultaneamente, é necessário que se aplique uma tensão em cada uma das entradas verticais.

O osciloscópio duplo traço dispõe de dois grupos de controles verticais:

Um grupo para o canal A ou canal 1 (CH1):

Um grupo para o canal B ou canal 2 (CH2):

Cada grupo controla um dos sinais na tela (amplitude, posição vertical, etc). Geralmente são iguais. Cada canal dispõe de:

Entrada Vertical:

Chave Seletora CA-O-CC:

Chave Seletora de ganho vertical (D/Div):

Posição vertical.

Um osciloscópio de duplo traço pode ainda ser utilizado como sendo um osciloscópio de traço simples.

Uma chave seletora permite que se possa selecionar cada canal individualmente ou os dois simultaneamente. Esta chave possui pelo menos três posições:

CH1;

CH2;
DUAL.

Na posição CH1 aparecerá apenas a imagem na tela que estiver sendo aplicada na entrada vertical do canal 1.

Na posição CH2 aparecerá apenas a imagem na tela que estiver sendo aplicada na entrada vertical do canal 2.

Na posição DUAL aparecem as duas imagens.

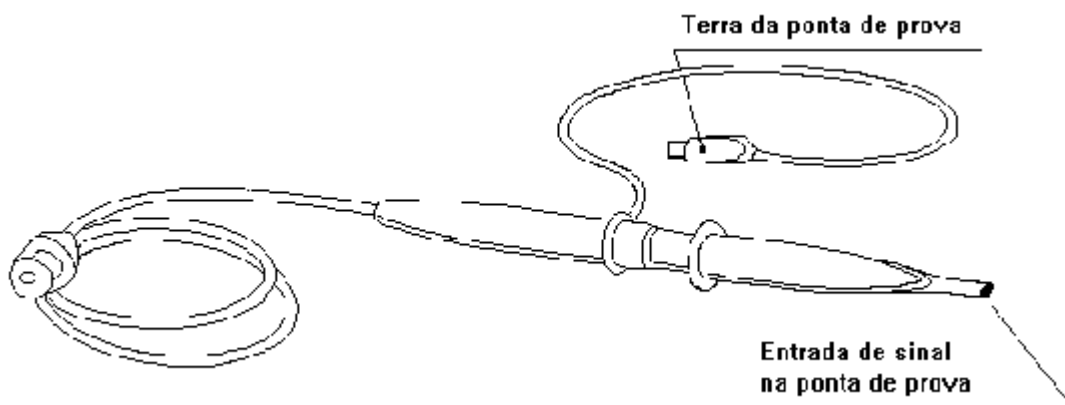
Em osciloscópios mais sofisticados, esta chave pode possuir mais posições de modo a permitir outras alternativas de uso.

CONTROLES DE SINCRONISMO

Realizam as mesmas funções do osciloscópio traço simples que é a de fixar a imagem na tela. O que diferencia é o fato de que na chave seletora de fonte existe uma posição adicional de modo a poder sincronizar a figura.

PONTAS DE PROVA

As pontas de prova são utilizadas para interligar o osciloscópio aos pontos de medida.



Uma das extremidades da ponta de prova é conectada a uma das entradas do osciloscópio através de um conector e a extremidade livre serve para conexão aos pontos de medida.

A extremidade livre possui uma garra jacaré, denominada de terra da ponta de prova, que deve ser conectada ao terra do circuito e uma ponta de entrada de sinal, que deve ser conectada no ponto que se deseja medir.

Existem dois tipos de ponta de prova:

- ponta de prova 1:1;
- ponta de prova 10:1.

A ponta de prova 1:1 se caracteriza por aplicar à entrada do osciloscópio a mesma tensão ou forma de onda que é aplicada a ponta de medição.

A ponta de prova 10:1 entrega ao osciloscópio apenas a décima parte da tensão aplicada a ponta de medição. As pontas de prova 10:1 permitem que o osciloscópio consiga observar tensões dez vezes maior que a sua capacidade. Por exemplo: Um osciloscópio que permite a leitura de tensões de 50V com ponta de prova 1:1, com ponta de prova 10:1 poderá medir tensões de até 500V (10x50V). Existem pontas de prova que dispõem de um botão onde se pode selecionar 10:1 ou 1:1.

Obs: Quando não se tem total certeza da grandeza da tensão envolvida é aconselhável iniciar a medição com o posição 10:1.

Bibliografia

1. Dispositivos semicondutores : tiristores; controle de potência em CC e CA / 1996 - ALMEIDA, José Luiz Antunes de. São Paulo: Érica, 1996. 150 p.
2. Dispositivos semicondutores : diodos e transistores / 1996 MARQUES, Angelo Eduardo B.; CHOUERI JÚNIOR, Salomão; CRUZ, Eduardo Cesar Alves. São Paulo: Érica, 1996. 389 p.
3. Análise e projeto de fontes chaveadas MELLO, Luiz Fernando P. de. São Paulo: Érica, 1996. 487 p.
4. Eletrônica de potência : circuitos, dispositivos e aplicações / 1999 RASHID, Muhammad H.. São Paulo: Makron Books, 1999. 828 p.
5. Eletrônica de potência / 1994 - PALMA, Guilherme Rebouças da. São Paulo: Érica, 1994. 259 p.
6. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos - 8. ed. / 2004 - BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis; CAMARGO, José Bueno de; NASCIMENTO, José Lucimar do; PERTENCE JUNIOR, Antonio (Coord.). São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 672 p.
7. Rodrigues, Isac Zilli., Notas de aula da disciplina de Eletrônica II do Curso de Engenharia Elétrica da UPF, Passo Fundo, RS, 2000.
8. Ghirardello Ariovaldo Apostila sobre Modulação PWM. Colégio Politec
9. Electronics Workbench. Versão 5.12
10. LabcenterElectronics 1989-2008. Release 7.5 SP3