

2

Capítulo

Componentes Semicondutores I

Meta deste capítulo

Revisar componentes semicondutores e apresentar características novas relacionadas à eletrônica de potência.

objetivos

- Revisar diodos semicondutores;
- Estudar diodos de potência;
- Testar diodos semicondutores;
- Introduzir ao estudo de tiristores;
- Identificar diferentes modelos de tiristores;
- Testar tiristores;
- Realizar ensaios com diodos e tiristores.

Pré-requisitos

Não há pré-requisitos para este capítulo.

Continuidade

O estudo continuará envolvendo componentes semicondutores aplicados à eletrônica de potência.

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2013 (revisado em março de 2020).

1 Introdução

O uso de semicondutores em eletrônica se confunde com a própria história desta área do conhecimento, tão importante são estes componentes para os equipamentos e suas funcionalidades.

Deste modo, diodos semicondutores já foram estudados em outras disciplinas, pois são componentes empregados com diversas finalidades, sejam como retificadores, conformadores de sinais, sinalização (no caso de LEDs e *displays*), regulação de tensão, proteção, dentre inúmeras outras.

A Figura 1 mostra um quadro comparativo de tecnologias de semicondutores em função da frequência de operação e de sua potência. Nota-se que os tiristores (SCR e GTO) estão em frequências mais baixas, mas operam em altas potências. Já os componentes a base de MOSFETs operam em potências menores, mas em altas frequências. Os diodos semicondutores podem ser construídos com diversas tecnologias, podendo assim serem utilizados em altas potências e altas frequências, conforme a situação demandar.

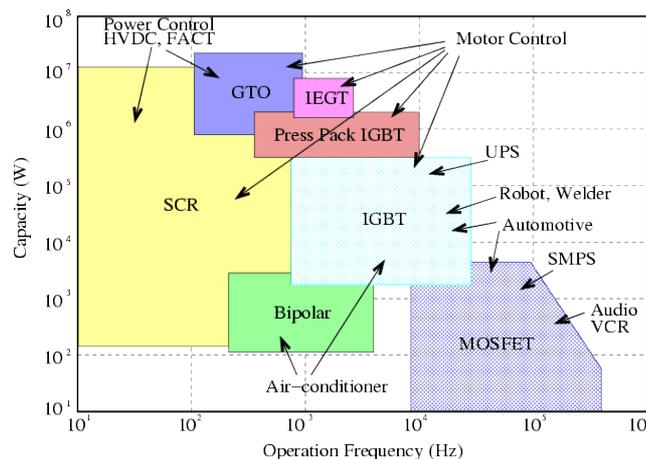


Figura 1 – Semicondutores para eletrônica de potência.

Fonte: <http://www.iue.tuwien.ac.at>. Acesso em: 14/08/2013.

Assim, neste capítulo se pretende fazer uma revisão de diodos semicondutores e introduzir aspectos novos, como os fenômenos de comutação associados aos diodos de potência.

Além disso, os componentes conhecidos como tiristores também serão estudados, visando suas aplicações nos conversores de corrente alternada para contínua, que serão objeto de estudo em capítulo posterior.

Em capítulo posterior serão estudados os transistores bipolares de junção (BJTs), MOSFETs e IGBTs para aplicações em eletrônica de potência.

2 Diodos Semicondutores

Este capítulo sobre diodos semicondutores está organizado de forma que o aluno relembre algumas características destes componentes, a seguir serão apresentados aspectos novos, seguidos de comentários sobre informações importantes de catálogo, além de uma explanação sobre as perdas e seu cálculo. São apresentadas informações sobre componentes comerciais, além dos testes para verificar se o diodo está em bom estado. Ainda, apresentam-se um roteiro de laboratório, exercícios resolvidos e propostos e simulações de circuitos com semicondutores.

2.1 Diodo Ideal e Diodo Real

O diodo ideal versus o diodo real é assunto abordado em todas as disciplinas introdutórias de cursos de eletrônica. De todo modo alguns aspectos básicos serão rememorados à guisa de reforço e introdução ao estudo de características relacionadas com eletrônica de potência.

O símbolo do diodo ideal é mostrado na Figura 2 onde nota-se seus dois terminais, o anodo e o catodo. Verifique que o autor denomina a tensão direta (V_D) de V_F e a corrente direta (I_D) de I_F . O índice “D” significa direta, enquanto “F” é do inglês *forward*.

Por sua vez, a curva de corrente direta versus tensão direta do diodo ideal é mostrada na Figura 3. O diodo ideal suporta qualquer valor de tensão reversa sem entrar em condução. A partir de uma tensão direta igual ou superior a zero o diodo entra em condução, tendo capacidade de conduzir qualquer corrente.

A queda de tensão que o diodo provoca devido a sua barreira de potencial é V_D ou V_F , sendo da ordem de 0,7 V. Em diodos de potência este valor pode ser superior, chegando a próximo de 2 V em alguns casos. A queda de tensão e resistência interna do diodo são mostradas na Figura 4.

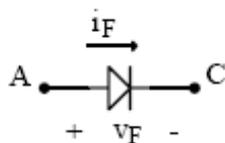


Figura 2 – Símbolo do diodo.

Fonte: (Barbi, 2005).

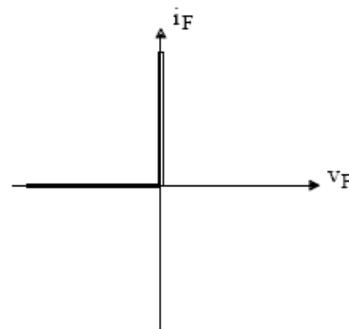


Figura 3 – Curva $I \times V$ do diodo ideal.

Fonte: (Barbi, 2005).

O diodo ideal é utilizado para fins de estudo e simulação, pois simplifica a análise do circuito. Na prática o diodo tem uma curva como mostrado na Figura 5. Nesta curva se mostra a queda de tensão direta que o diodo provoca quando está conduzindo ($V_{(TO)}$). É importante notar que este valor é um dos pontos da curva, pois para cada corrente que circula pelo diodo se tem um valor específico de queda de tensão. A inclinação da curva depende da resistência interna do diodo.

Na região reversa se tem o limite de tensão que o diodo pode bloquear sem entrar em condução reversa. Este limite é denominado de V_{RRM} , ou seja, tensão reversa repetitiva máxima. Este valor é muito importante e sempre deve-se evitar atingir este valor, do contrário pode ocorrer a destruição do diodo.

Como exemplo de parâmetros da curva característica de um diodo real, considere o modelo Diodo SKN20/08:

- $V_{RRM} = 800$ V;
- $V_{(TO)} = 0,85$ V;
- $r_T = 11$ m Ω ;
- $I_{Dmed} = 20$ A;
- $I_R = 0,15$ mA.

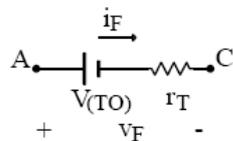


Figura 4 – Representação da queda de tensão do diodo real e sua resistência interna.

Fonte: (Barbi, 2005).

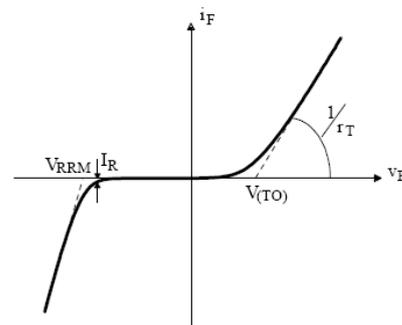


Figura 5 – Curva de corrente versus tensão do diodo real.

Fonte: (Barbi, 2005).

2.2 Comutação dos Diodos

A comutação de um diodo significa as etapas de entrada em condução e de bloqueio, ou seja, quando o semicondutor está abrindo ou fechando, pois em eletrônica de potência usa-se estes componentes sempre como chave.

Para que o diodo entre em condução, este deve estar diretamente polarizado. O diodo ideal entra em condução com qualquer valor positivo maior que zero aplicado diretamente sobre ele. Já no diodo real, a tensão direta deverá ser superior a tensão da barreira de potencial, que é sua tensão direta.

No entanto, um diodo apenas para de conduzir, isto é, bloqueia, quando a corrente que estiver passando por ele zerar. Então não se deve considerar que se for aplicada uma tensão reversa sobre o diodo isso implica em seu bloqueio. Ele somente cessará a condução quando a corrente do circuito, e que circula pelo mesmo, atingir o valor zero. Em circuitos resistivos é comum a tensão e corrente estarem em fase e se confundir o bloqueio com a passagem por zero da tensão (aplicação de tensão reversa); mas em circuitos indutivos isso não acontece, e mesmo submetido à tensão negativa (reversa) o diodo permanece conduzindo até a corrente chegar a zero.

Importante:

- Um diodo entra em condução quando estiver diretamente polarizado.
- O diodo bloqueia apenas quando a corrente que circula pelo mesmo atingir o valor zero.

Para estudar a comutação (entrada em condução e bloqueio) do diodo, será utilizado um circuito auxiliar, fictício, mostrado na Figura 6. Este circuito é formado por uma fonte (E), uma indutância parasita (das trilhas, dos fios, etc.) L_1 , um diodo D , uma chave S e um indutor de grande valor L . Este indutor de grande valor representa uma fonte de corrente, ou seja, a corrente I_L varia muito pouco nos instantes da comutação.

A entrada em condução do diodo ocorre toda vez que a chave S for aberta, ou seja, for comandada a bloquear. Neste caso, a corrente I_L que estava circulando pela chave começará a circular pelo diodo, pois este será diretamente polarizado pela tensão do indutor L . Esta entrada em condução ocorre de maneira convencional, sem nenhuma diferença em relação ao que foi estudado em outras disciplinas de eletrônica.

Por sua vez, no bloqueio o diodo apresenta fenômenos importantes, que merecem nossa atenção. Assim, considere que o diodo está conduzindo, como mostrado na Figura 7. Ao fechar a chave S , a corrente I_L , que estava circulando toda em roda-livre pelo diodo (I_F), iniciará sua passagem pelo interruptor (I_S). Idealmente, a corrente I_L cessaria de passar por D e passaria por S instantaneamente, isto é, em um tempo igual a zero. Na prática isso não acontece, pois todo semiconductor tem um atraso para entrar em condução ou bloquear. Este atraso depende da tecnologia dos semicondutores, sendo grande (alguns microssegundos) em alguns casos, e muito pequeno em outros (alguns nanosegundos).

Assim, para que a corrente que estava circulando pelo diodo seja transferida para o interruptor, leva-se algum tempo, fazendo com que a corrente caia lentamente no diodo. Esta variação da corrente é mostrada na Figura 9, entre os tempos de t_0 até t_1 .

Ao atingir o valor zero, a corrente no diodo torna-se negativa, mostrando algo atípico no estudo de semicondutores. Isso acontece, pois, a barreira de potencia estava com o valor da queda

de tensão direta do diodo. No entanto, quando este é levado ao bloqueio pelo fechamento da chave S, a barreira de potencial precisará ser reconfigurada, indo de V_F até a tensão reversa de operação, que neste circuito é E. Assim, para que a tensão no diodo varie de V_F até E, é necessária a circulação de uma corrente reversa (negativa), que aparece na Figura 8 como I_{RM} . Na Figura 9 esta corrente é representada pela parte hachurada, indo de t_1 até t_3 . Note que em t_3 a tensão reversa no diodo atingiu seu valor final E. No instante t_2 , a tensão no diodo é V_{pico} , maior que E, isso é devido a presença do indutor L_1 , pois enquanto a corrente estiver variando no mesmo, ocorrerá uma tensão induzida que aparecerá nos outros elementos do circuito.

O efeito da recuperação reversa pode ser prejudicial aos outros componentes do circuito, principalmente para a chave S. O pico de corrente na recuperação reversa depende das características construtivas do diodo e das condições do circuito (valor de L_1 , velocidade de entrada em condução da chave, corrente I_L , etc.). Para minimizar este efeito, existem diodos específicos, com recuperação suave ou de carbeto de silício (*silicone carbide*), que reduzem muito o pico de recuperação reversa, como pode ser observado na Figura 10.

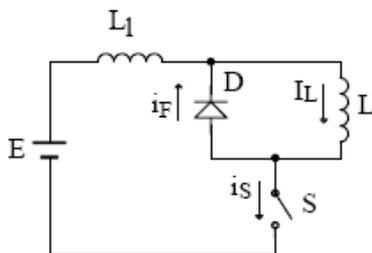


Figura 6 – Circuito para estudo da comutação.

Fonte: (Barbi, 2005).

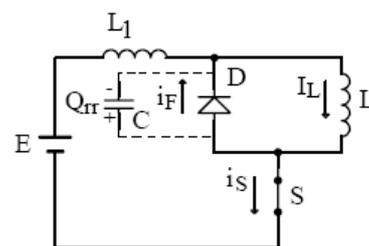


Figura 7 – Etapa de bloqueio de um diodo.

Fonte: (Barbi, 2005).

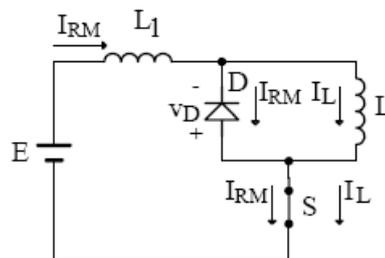


Figura 8 – Corrente de recuperação reversa no diodo.

Fonte: (Barbi, 2005).

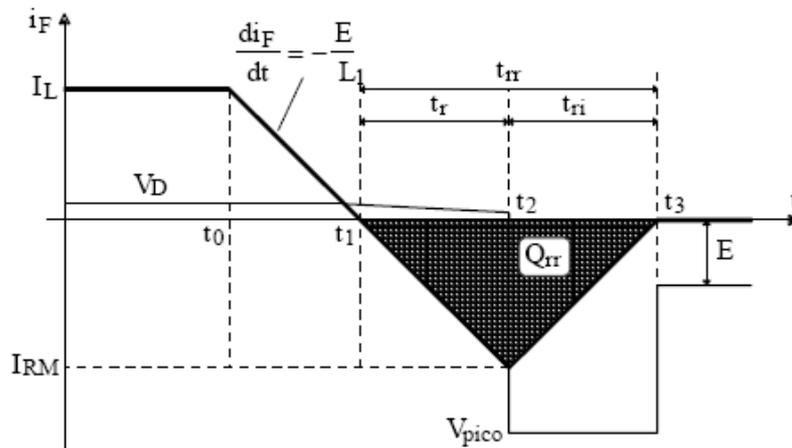


Figura 9 – Corrente no diodo durante seu bloqueio.

Fonte: (Barbi, 2005).

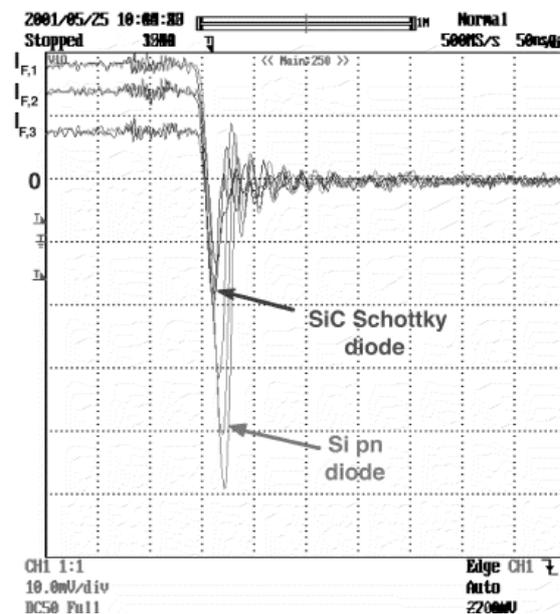


Figura 10 – Corrente de recuperação reversa em um diodo de carbeto de silício.

Fonte: http://powerelec.ece.utk.edu/pubs/pels_letters_SiC_june_2003.pdf. Acesso em: 20/08/2013.

Em termos práticos, a substituição de diodos convencionais, que teriam altos picos de corrente na recuperação reversa, por diodos de melhor qualidade (recuperação suave ou carbeto de silício), significa que se pode aumentar a frequência de operação do conversor e por conseguinte reduzir seu volume de magnéticos. Para diodos convencionais, o aumento da frequência piora a recuperação reversa, aumentando as perdas por comutação do componente.

Na Figura 11 mostra-se dois conversores, um deles utilizando diodos de silício (convencionais) e outro utilizando diodos de *silicon carbide*. O primeiro operou com uma frequência de 80 kHz, enquanto o segundo pôde ser operado com 200 kHz.

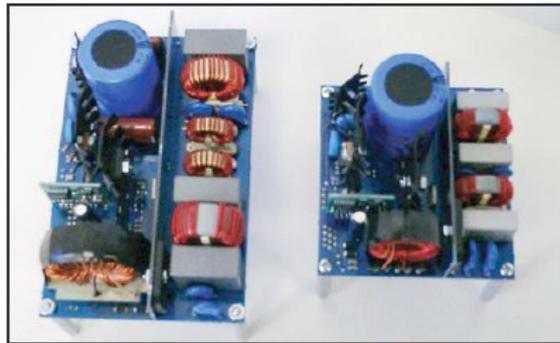


Figura 11 – Comparativo entre conversores utilizando diodos convencionais e de silicone carbide.

Fonte: http://www.cree.com/Products/pdf/Power_Article_1.pdf. Acesso em: 20/08/2013.

2.3 Perdas nos Diodos

Em um diodo semicondutor se tem dois tipos de perdas:

- Perdas por condução – ocorrem quando o diodo está conduzindo;
- Perdas por comutação – aparecem na entrada em condução e no bloqueio do diodo.

As perdas por comutação são de difícil determinação, pois dependem de diversas variáveis, como: tecnologia do diodo, indutâncias parasitas do circuito, ponto de operação do circuito, etc. Assim, sugere-se utilizar simuladores de circuitos eletrônicos, que tenham modelos de diodos reais, e a partir da simulação do circuito se obter a potência perdida na comutação do mesmo. Exemplos de simuladores para esse fim são: Orcad/Pspice (<http://www.cadence.com/orcad/>) e Multisim (<http://www.ni.com/multisim/pt/>).

Já as perdas por condução podem ser determinadas facilmente pela expressão:

$$P = V_{(TO)} \cdot I_{Dmed} + r_T \cdot I_{Def}^2.$$

Normalmente, para fins de simplificação, quando não se tem acesso pela folha de dados do componente (*datasheet*), ao valor da resistência interna do diodo, se determina a perda por condução por:

$$P = V_{(TO)} \cdot I_{Dmed}.$$

Lembre que $V_{(TO)}$ é a tensão direta V_D ou V_F , quando o diodo está conduzindo uma corrente média I_D ou I_F . A tensão direta pode ser obtida na folha de dados, enquanto a corrente direta é aquela do circuito onde o diodo está inserido, isto é, a corrente real que o diodo estará conduzindo.

2.4 Características Importantes de Diodos

As principais características de um diodo, para fins de projeto e escolha de modelo, são:

- Queda de tensão direta – V_F ou V_D ;
- Corrente média direta – $I_{D(AV)}$ ou $I_{F(AV)}$. AV significa média (*average*);
- Corrente máxima repetitiva – I_{DRM} ou I_{FRM} ;
- Corrente máxima não-repetitiva – I_{DSM} ou I_{FSM} ;
- Tensão repetitiva reversa máxima – V_{RRM} .
- Recuperação reversa – se o diodo é padrão, lento, suave, etc.

Como exemplo, estas características para um diodo da série 1N400X, serão:

- Queda de tensão direta – 1,1 V;
- Corrente média direta – 1 A;
- Corrente máxima não-repetitiva – 30 A;
- Tensão repetitiva reversa máxima – 50 até 1000 V.
- Recuperação reversa – diodo de uso geral, recuperação padrão.

Na Figura 12 mostram-se as informações da folha de dados do componente. Note que dependendo da aplicação do diodo, nem todas as principais informações são fornecidas. A Figura 13 mostra a curva I x V do diodo modelo 1N400X, da qual pode-se obter a queda de tensão real em função da corrente do circuito. Esta informação é importante para o cálculo das perdas no componente.

Considere agora um diodo modelo MUR160. Verifique, como exercício, na folha de dados deste diodo (http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MUR120-D.PDF), que suas principais características são:

- Queda de tensão direta – 1,05 V;
- Corrente média direta – 1 A;
- Corrente máxima não-repetitiva – 35 A;
- Tensão repetitiva reversa máxima – 160 V.
- Recuperação reversa – ultrarrápido com tempo de recuperação de 25 a 75 ns.

É importante ressaltar que alguns fabricantes, como no caso do modelo MUR160 da Onsemi, informam alguns valores para determinadas condições de testes. Assim, a queda de tensão direta poderia ser de 0,710 a 1,05 V para $T_J @ 150\text{ }^\circ\text{C}$, ou 0,875 a 1,25 V para $T_J @ 25\text{ }^\circ\text{C}$. No Brasil não se pode considerar temperaturas muito baixas, pois no verão a temperatura ambiente pode chegar próxima dos 40 °C em algumas localidades. Então a temperatura na junção será bem superior, devendo-se então considerá-la como 150 °C.



1N4001 - 1N4007
General Purpose Rectifiers



May 2009

Features

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



DO-41
COLOR BAND DENOTES CATHODE

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

Symbol	Parameter	Value							Units
		4001	4002	4003	4004	4005	4006	4007	
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current .375" lead length @ $T_A = 75^\circ\text{C}$	1.0							A
I_{FSM}	Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms Single Half-Sine-Wave	30							A
I^2t	Rating for Fusing ($t < 8.3\text{ms}$)	3.7							A^2sec
T_{STG}	Storage Temperature Range	-55 to +175							$^\circ\text{C}$
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to +175							$^\circ\text{C}$

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

Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Value	Units
P_D	Power Dissipation	3.0	W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	50	$^\circ\text{C}/\text{W}$

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

Symbol	Parameter	Value	Units	
V_F	Forward Voltage @ 1.0A	1.1	V	
I_{rr}	Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle $T_A = 75^\circ\text{C}$	30	μA	
I_R	Reverse Current @ Rated V_R	$T_A = 25^\circ\text{C}$	5.0	μA
		$T_A = 100^\circ\text{C}$	50	μA
C_T	Total Capacitance $V_R = 4.0\text{V}$, $f = 1.0\text{MHz}$	15	pF	

© 2009 Fairchild Semiconductor Corporation
1N4001 - 1N4007 Rev. C2 www.fairchildsemi.com

1N4001 - 1N4007 — General Purpose Rectifiers

Figura 12 – Características elétricas dos diodos da série 1N4001 até 1N4007.

Fonte: <https://www.fairchildsemi.com/ds/1N/1N4003.pdf>. Acesso em: 20/08/2013.

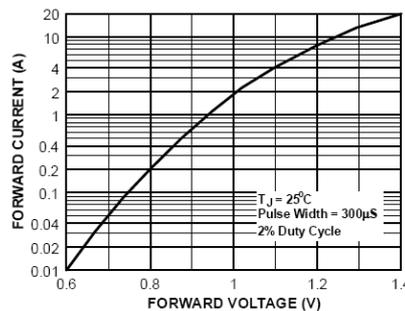


Figura 13 – Curva $I \times V$ para os diodos 1N4001 até 1N4007.

Fonte: <https://www.fairchildsemi.com/ds/1N/1N4003.pdf>. Acesso em: 20/08/2013.

2.5 Tipos de Diodos Comerciais

Os fabricantes costumam categorizar os componentes, facilitando a escolha pelo usuário e a comparação entre diferentes modelos. Assim, a Onsemi, por exemplo, classifica os diodos em:

- Recuperação padrão (*standard*) ou rápida (*fast*);
- Ultrarrápidos (*ultrafast*);
- Ultra suaves (*ultrasoft*);
- Sem recuperação reversa (*silicone carbide*).

Os primeiros são os diodos de uso geral, usados em diversas aplicações de eletrônica e nos retificadores, por exemplo. Já os ultrarrápidos são utilizados nos circuitos de alta frequência onde a recuperação reversa não é problemática. Quando for este o caso, deve-se utilizar diodos ultra suaves ou sem recuperação reversa. Haverá, contudo, uma diferença de preço entre as diversas tecnologias de diodos, o que deverá ser levado em conta na hora de sua escolha.

2.6 Testes de Diodos

O diodo deve ser testado com um multímetro apropriado, na escala específica para teste de diodos. O multímetro mostrado na Figura 14 tem uma escala específica para teste de diodos.

Ao medir um diodo com as ponteiros do multímetro conectadas de modo a polarizá-lo diretamente (ponteira vermelha no anodo e preta do catodo), está se obtendo a queda de tensão direta do componente. Então se aparecer no *display* o valor 0.469, isso significa que a tensão direta deste diodo, para a corrente que o multímetro está aplicando, é de 0,469 V.

Já na polarização reversa o multímetro irá indicar circuito aberto (OL em alguns modelos ou 1 em outros), significando que não se atingiu a tensão reversa do diodo, que normalmente é alta, bem acima da tensão de operação do instrumento.

Basicamente, o teste do diodo com multímetro pode resultar em:

- Diodo em bom estado – indicação de circuito aberto na região reversa e de tensão próxima de 0,7 V na região direta;
- Diodo em curto-circuito – indicação de 0 V nos dois sentidos de condução;
- Diodo aberto – indicação de circuito aberto nos dois sentidos de condução.

A Figura 15 mostra imagens do teste de um diodo com o multímetro na escala apropriada, resumindo o que foi acima exposto. Deve-se lembrar que o teste com o multímetro é apenas um indicativo do estado do componente, pois em condições reais de operação, o componente poderá apresentar comportamento diferente, inclusive provocando o mau funcionamento do circuito onde estará sendo empregado.



Figura 14 – Multímetro digital para teste de diodos.

Fonte: <https://www.minipa.com.br>. Acesso em: 20/08/2013.

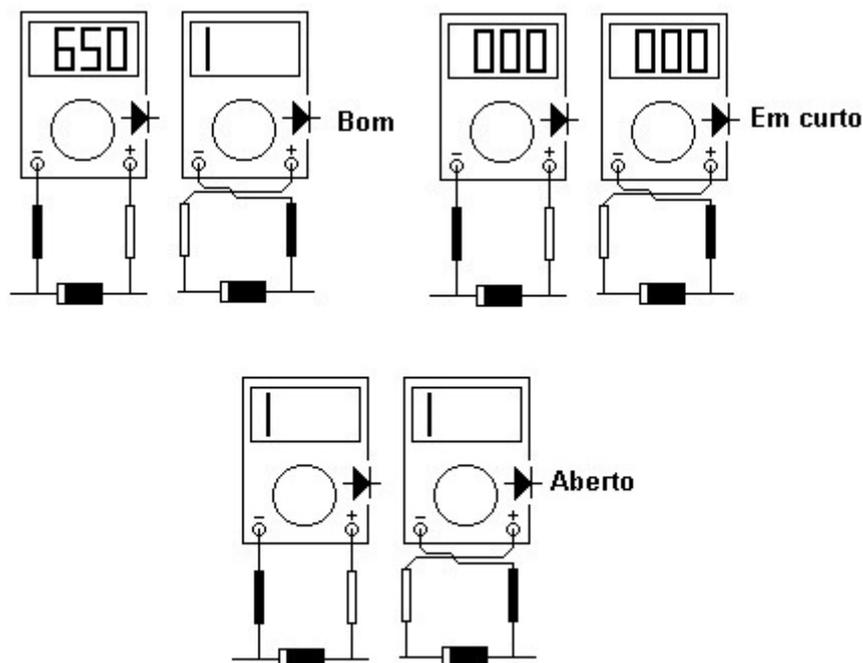


Figura 15 – Multímetro digital para teste de diodos.

Fonte: <https://burgoseletronica.net>. Acesso em: 20/08/2013.

3 Tiristores

Anteriormente, neste capítulo, foram revisados e apresentados aspectos novos relacionados aos diodos semicondutores, ou diodos de junção de silício. Estes componentes, apesar de serem semicondutores, não possuem terminal de controle, ou seja, o usuário não poderá determinar o momento da entrada em condução e do seu bloqueio. A comutação ocorre conforme o funcionamento do circuito, entrando em condução quando polarizado diretamente e bloqueando quando a corrente passar por zero.

A eletrônica de potência pretende realizar o controle do fluxo de potência entre dois

circuitos, e para tanto, em muitos casos faz-se necessário ter componentes que permitam determinar ativamente o estado de condução ou bloqueio. Assim, foram desenvolvidos os tiristores, que são uma família de semicondutores, formados por SCRs, TRIACs, DIACs, SIDACs, dentre outros. Alguns destes componentes possuem um terminal de controle, o que poderá permitir seu controle, seja para ligar, ou para desligar, dependendo do componente específico a ser utilizado.

Assim, nesta parte deste capítulo serão estudados os componentes da família dos tiristores, especificamente os SCRs e TRIACs. Inicialmente apresenta-se seu funcionamento ideal, seguido do funcionamento real. Posteriormente abordam-se características de comutação, perdas e aspectos práticos. Exercícios, simulações, além de roteiro de laboratório também são apresentados.

3.1 Tiristor Ideal e Tiristor Real

Assim como o diodo tem seu funcionamento descrito no modo ideal e no modo real, o tiristor também pode ser analisado sob estas duas condições. Inicialmente será estudado o retificador controlado de silício (SCR).

O símbolo do tiristor ideal é mostrado na Figura 16 onde nota-se seus três terminais, o anodo e o catodo (como no diodo) e o terminal de controle (gatilho ou *gate*). Verifique que o autor denomina a tensão direta de V_T e a corrente direta de I_T . O índice “T” significa tiristor. A corrente no gatilho é denominada de I_G .

A curva de corrente direta versus tensão direta do tiristor ideal é mostrada na Figura 17. O tiristor ideal suporta qualquer valor de tensão reversa sem entrar em condução. Do mesmo modo, sem a presença de corrente no gatilho, suportará qualquer tensão direta e não entrará em condução. Já na presença de corrente no gatilho, a partir de uma tensão direta igual ou superior a zero o tiristor entra em condução, tendo capacidade de conduzir qualquer corrente.

A queda de tensão que o tiristor provoca devido a sua barreira de potencial é V_T , sendo da ordem de 0,7 V ou mais. Em tiristores de potência este valor pode ser superior, chegando a próximo de 2 V ou mais em alguns casos. A queda de tensão e resistência interna do tiristor são mostradas na Figura 18.

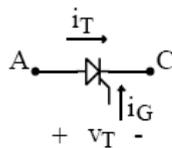


Figura 16 – Símbolo do tiristor.

Fonte: (Barbi, 2005).

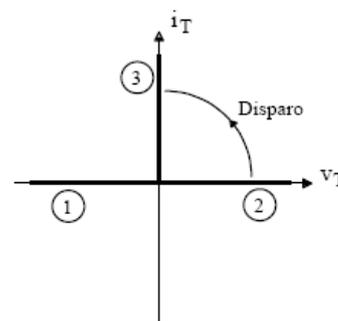


Figura 17 – Curva $I \times V$ do tiristor ideal.

Fonte: (Barbi, 2005).

O tiristor real tem uma curva como mostrado na Figura 19 onde nota-se que este componente possui três regiões de operação. A inclinação da curva depende da resistência interna do tiristor.

As três regiões de operação do tiristor são:

- Curva 1 – região de operação reversa sem corrente no gatilho. Assim como no caso do diodo, o tiristor suporta uma tensão reversa máxima denominada de V_{RM} ;
- Curva 2 – região de operação direta sem corrente no gatilho. De modo idêntico à região reversa, o tiristor pode ser submetido a uma tensão direta de valor V_{AKM} sem entrar em condução. Este valor geralmente é igual ao valor V_{RM} ;
- Curva 3 – região de operação direta com corrente de gatilho. Neste caso o tiristor se comporta idênticamente ao diodo na região direta, provocando uma queda de tensão direta V_T .

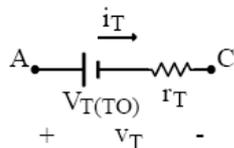


Figura 18 – Representação da queda de tensão do tiristor real e sua resistência interna.

Fonte: (Barbi, 2005).

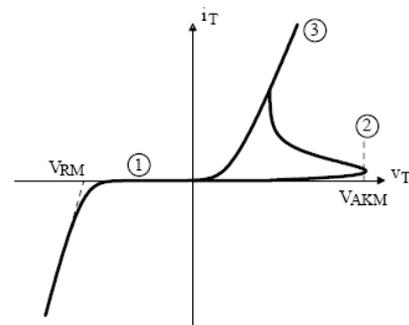


Figura 19 – Curva de corrente versus tensão do tiristor real.

Fonte: (Barbi, 2005).

O tiristor é um componente formado por junções PN, assim como também o diodo é denominado de diodo de junção PN. Lembre que existem outras tecnologias, como diodo de contato, etc. Na Figura 20 mostra-se o aspecto interno de um tiristor, onde nota-se a presença dos três terminais (A, C e G) e das três junções (J_1 , J_2 e J_3). Está representado ainda na figura a presença de uma fonte de tensão conectada entre anodo e catodo que provocará a circulação da corrente direta pelo tiristor, além de polarizá-lo diretamente.

O disparo do tiristor, ou seja, o efeito de fazê-lo conduzir, é provocado quando se aplica uma corrente no gatilho, que irá circular entre gatilho e catodo. Esta corrente é originada pela fonte V_g e limitada pelo resistor de gatilho R_g .

A entrada em condução do tiristor ocorre quando se aplica um sinal no gatilho e o tiristor estiver diretamente polarizado. Após entrar em condução, o sinal no gatilho poderá ser retirado, pois mesmo assim permanecerá conduzindo.

Na Figura 21 mostra-se um circuito equivalente (apenas para estudo) para auxiliar na

explicação da permanência em condução do tiristor mesmo sem sinal de gatilho. Observe-se que se for aplicada uma corrente no gatilho (I_G), esta corrente será a corrente de base do transistor T_2 (I_{B2}). Esta corrente fará com que o transistor T_2 conduza, provocando assim a circulação de corrente entre seu coletor e emissor ($I_{C2} = I_K$). Esta corrente de coletor (I_{C2}) irá circular pela base do transistor T_1 (I_{B1}) fazendo com que este entre em condução. T_1 conduzindo fará com que circule corrente entre seu emissor e coletor (I_{E1}) que por sua vez circulará pela base de T_2 , mantendo os dois transistores conduzindo.

Para que o tiristor cesse a condução deve-se anular sua corrente, o que pode ser feito de dois modos:

- Desligando a fonte – assim a corrente do circuito todo será zerada;
- Curto circuitando anodo e catodo – fazendo um curto-circuito entre anodo e catodo faz-se a corrente do circuito desviar do tiristor, zerando sua corrente e provocando seu bloqueio.

O bloqueio se dá de modo idêntico ao diodo, independente do gatilho, quando a corrente no tiristor atingir o valor zero. É comum se aplicar pulsos de disparo, ao invés de um sinal contínuo, pois assim se garante que na transição de algum dos sinais de gatilho (pulso) ocorra a entrada em condução.

Importante:

- Um tiristor entra em condução quando estiver diretamente polarizado e houver aplicação de corrente no gatilho.
- O tiristor bloqueia apenas quando a corrente que circula pelo mesmo atingir o valor zero, mesmo que a corrente de gatilho seja retirada antes disso.

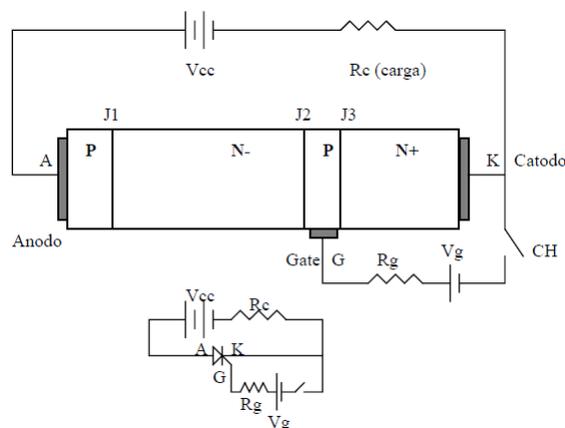


Figura 20 – Representação das junções do tiristor.

Fonte: (Pomilio, 2013).

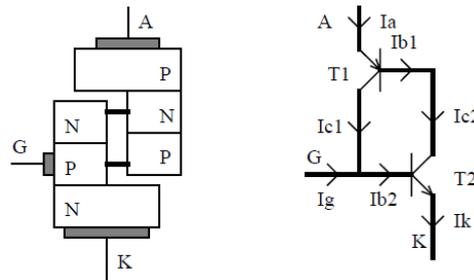


Figura 21 – Circuito equivalente para estudar o funcionamento do tiristor.

Fonte: (Pomilio, 2013).

3.2 Comutação dos Tiristores

A comutação de um tiristor ocorre de modo semelhante ao diodo. Na entrada em condução se tem a dependência da corrente de gatilho, como está mostrado na Figura 22. Nota-se que se a corrente de gatilho for zero, o tiristor somente entrará em condução se a tensão direta atingir o valor $V_{AKM} = V_{BO}$. Lembrando que geralmente V_{BO} será igual a V_{BR} . Estas tensões são denominadas de tensões de ruptura (*breakdown*). À medida que a corrente de gatilho aumenta, cada vez menor será a tensão direta necessária para provocar a entrada em condução do tiristor, até se chegar ao valor $V_{(TO)}$ que é idêntico na curva de um diodo.

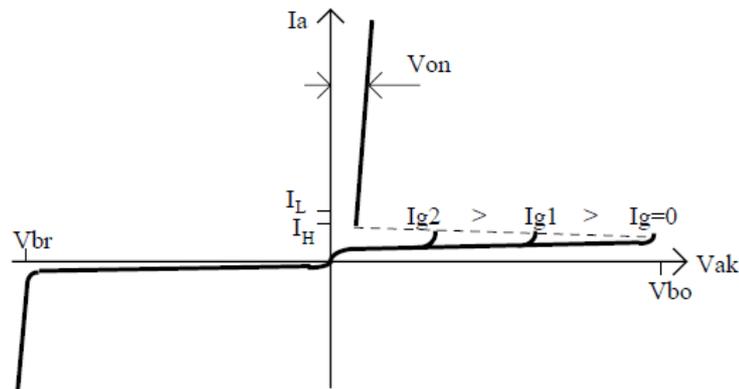


Figura 22 – Curva $I \times V$ de um tiristor e sua dependência da corrente de gatilho.

Fonte: (Barbi, 2005).

No bloqueio um tiristor apresenta o mesmo comportamento que um diodo, com recuperação reversa e tempo de comutação lento.

É comum se empregar circuitos de proteção para os tiristores, visando evitar entradas em condução intempestivas (indesejadas), como está mostrado na Figura 23. Geralmente o próprio fabricante do semiconductor, na folha de dados, apresenta valores típicos para os resistores e capacitores empregados nos circuitos de proteção. Estes circuitos atuam como filtros evitando que ruídos ou variações muito rápidas na tensão sobre o tiristor provoquem sua condução indesejada.

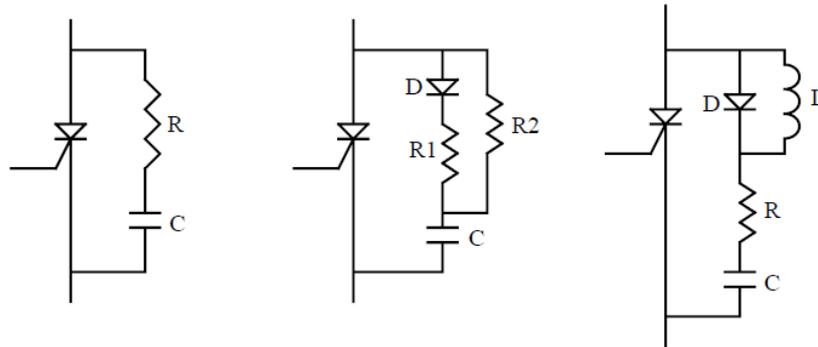


Figura 23 – Circuitos de proteção para o tiristor.

Fonte: (Barbi, 2005).

Na Figura 24 mostra-se curvas típicas para entrada em condução de um tiristor, onde nota-se o atraso provocado desde aplicação no sinal de gatilho (V_G) até sua total condução. O tempo para o componente entrar em condução é t_{on} . O atraso para entrar em condução é t_d (*delay time*) e o tempo para a tensão sobre o tiristor cair a zero é t_r (*rise time*).

Por sua vez, as curvas para o bloqueio do tiristor são mostradas na Figura 25 onde nota-se a presença da corrente de recuperação reversa do tiristor. O tempo t_q , durante o qual o tiristor fica se recuperando reversamente, é da ordem de 10 a 200 μs para tiristores de uso geral.

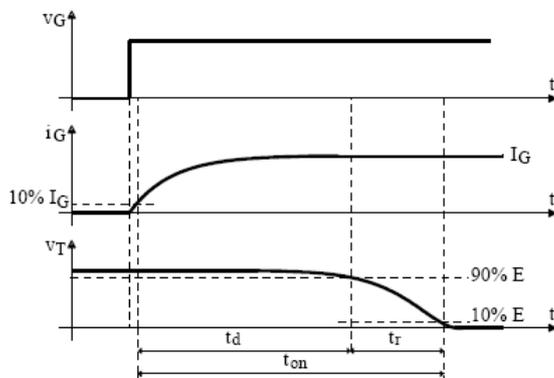


Figura 24 – Curvas de entrada em condução do tiristor.

Fonte: (Barbi, 2005).

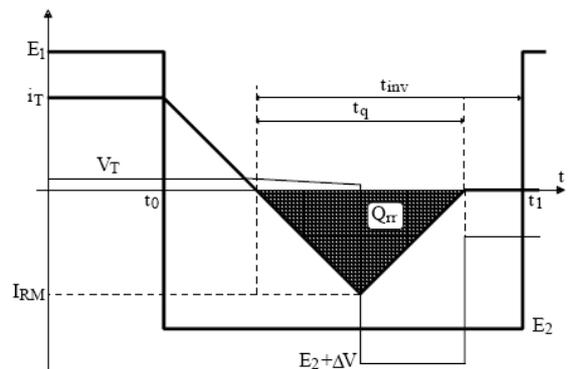


Figura 25 – Curvas de bloqueio do tiristor.

Fonte: (Barbi, 2005).

3.3 Perdas nos Tiristores

Em um tiristor, de modo idêntico aos diodos, se tem dois tipos de perdas: Perdas por condução – ocorrem quando o diodo está conduzindo; e Perdas por comutação – aparecem na entrada em condução e no bloqueio do diodo.

Considerar-se-á apenas as perdas por condução, que podem ser determinadas facilmente pela expressão:

$$P = V_{(TO)} \cdot I_{Tmed} + r_T \cdot I_{Tef}^2.$$

De forma simplificada:

$$P = V_{(TO)} \cdot I_{Tmed}.$$

Lembre que $V_{(TO)}$ é a tensão direta V_T , quando o tiristor está conduzindo uma corrente média I_T . A tensão direta pode ser obtida na folha de dados, enquanto a corrente direta é aquela do circuito onde o tiristor está inserido, isto é, a corrente real que o componente estará conduzindo.

3.4 Características Importantes de Tiristores

As principais características de um tiristor, para fins de projeto e escolha de modelo, são:

- Queda de tensão direta – V_T ;
- Corrente média direta – $I_{T(AV)}$. AV significa média (*average*);
- Corrente eficaz direta – $I_{T(RMS)}$;
- Corrente máxima repetitiva – I_{TRM} ;
- Corrente máxima não-repetitiva – I_{TSM} ;
- Tensão repetitiva reversa máxima – V_{DRM} .
- Tensão de gatilho máxima reversa - V_{RGM} ;
- Corrente de gatilho para disparo – I_{GT} ;
- Corrente máxima de gatilho – I_{GM} ;

Como exemplo, estas características para um tiristor da série BT151, serão:

- Queda de tensão direta – 1,75 V;
- Corrente média direta – 7,5 A;
- Corrente eficaz direta – 12 A;
- Corrente máxima não-repetitiva – 132 A;
- Tensão repetitiva reversa máxima – 800 V;
- Tensão de gatilho máxima reversa – 5 V;
- Corrente de gatilho para disparo – 15 mA;
- Corrente máxima de gatilho – 2 A.

Na Figura 26 mostra-se o encapsulamento típico de um tiristor, neste caso do modelo BT141 da NXP. É importante ressaltar que o terminal do anodo (A) está conectado ao dissipador, ou seja, é considerado um terminal vivo. Assim, como normalmente os tiristores são utilizados em circuitos de alta tensão (220 V ou mais), é preciso cuidado para o isolamento adequado do

componente com o restante dos componentes do circuito, além de se cuidar com o isolamento do gabinete do equipamento.

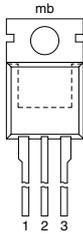
Pin	Symbol	Description	Simplified outline	Graphic symbol
1	K	cathode		
2	A	anode		
3	G	gate		
mb	mb	anode		

Figura 26 – Características de encapsulamento do BT151.

Fonte: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BT151-800R.pdf. Acesso em: 20/08/2013.

3.5 Tipos de Tiristores Comerciais

Os fabricantes costumam categorizar os componentes, facilitando a escolha pelo usuário e a comparação entre diferentes modelos. Assim, a Onsemi, por exemplo, classifica os tiristores em:

- SCR;
- TRIAC;
- SIDAC;
- Outros componentes para proteção, etc.

Os primeiros são os tiristores estudados até aqui, isto é, os retificadores controlados de silício, semelhantes ao diodo com o terminal de controle (gatilho).

O TRIAC (tríodo para corrente alternada, do inglês *Triode for Alternating Current*) é um tiristor para corrente alternada, capaz de conduzir nos dois sentidos (semiciclo positivo e negativo) e com apenas um terminal de controle.

Pode-se obter um componente com funcionamento similar associando dois tiristores do tipo SCR, um para o semiciclo positivo e outro para o semiciclo negativo, como está mostrado na Figura 27. Já o TRIAC é mostrado na Figura 28.

O DIAC (diodo para corrente alternada, do inglês *Diode for Alternate Current*) é um tiristor sem gatilho, ou seja, é um SCR sem o *gate*. Assim, este componente tem a curva $I \times V$ mostrada na Figura 31. É utilizado em circuitos de disparo de tiristores. Seu símbolo é mostrado na Figura 29.

Por sua vez, o SIDAC (diodo de silício para corrente alternada, do inglês *Silicon Diode for Alternating Current*) é um tiristor utilizado para proteção em circuitos de entrada de equipamentos eletrônicos, pois entra em condução assim que a tensão (direta ou reversa) atingir

determinado valor. Tem comportamento semelhante ao varistor.

Existem ainda outros modelos de tiristores que não serão abordados aqui, como por exemplo o QUADRAC, que possui um TRIAC e um DIAC no mesmo encapsulamento.

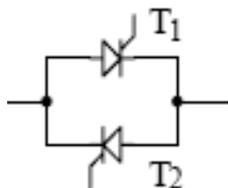


Figura 27 – TRIAC com dois SCRs.

Fonte: (Barbi, 2005).

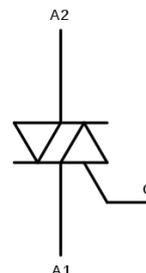


Figura 28 – Tiristor do tipo TRIAC.

Fonte: <http://wikipedia.org>. Acessado em 20/08/2013.

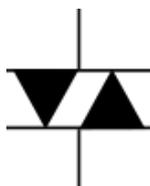


Figura 29 – Tiristor do tipo DIAC.

Fonte: <http://wikipedia.org>. Acessado em 20/08/2013.



Figura 30 – Tiristor do tipo SIDAC.

Fonte: <http://wikipedia.org>. Acessado em 20/08/2013.

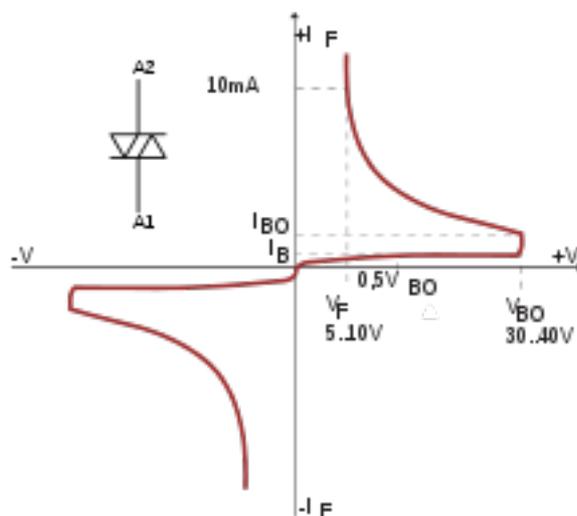


Figura 31 – Curva $I \times V$ do DIAC.

Fonte: <http://wikipedia.org>. Acessado em 20/08/2013.

3.6 Testes de Tiristores

Para realizar o teste de tiristores procede-se de modo semelhante ao realizado com diodos. No entanto, agora se tem o terminal de gatilho, o que implica que para o tiristor conduzir é necessário aplicar uma corrente de gatilho.

O teste pode indicar:

- Tiristor em bom estado – indicação de circuito aberto na região reversa e de tensão próxima de 0,7 V na região direta, quando aplicado sinal de disparo no gatilho;
- Tiristor em curto-circuito – indicação de 0 V nos dois sentidos de condução;
- Tiristor aberto – indicação de circuito aberto nos dois sentidos de condução.

A Figura 32 mostra imagens do teste de um tiristor do tipo SCR com o multímetro na escala apropriada, resumindo o que foi acima exposto. Veja que na figura foi utilizada a escala de resistência de um multímetro analógico. Na falta deste, utilize um multímetro digital na escala de teste de diodos.

Deve-se lembrar que o teste com o multímetro é apenas um indicativo do estado do componente, pois em condições reais de operação, o componente poderá apresentar comportamento diferente, inclusive provocando o mau funcionamento do circuito onde estará sendo empregado.

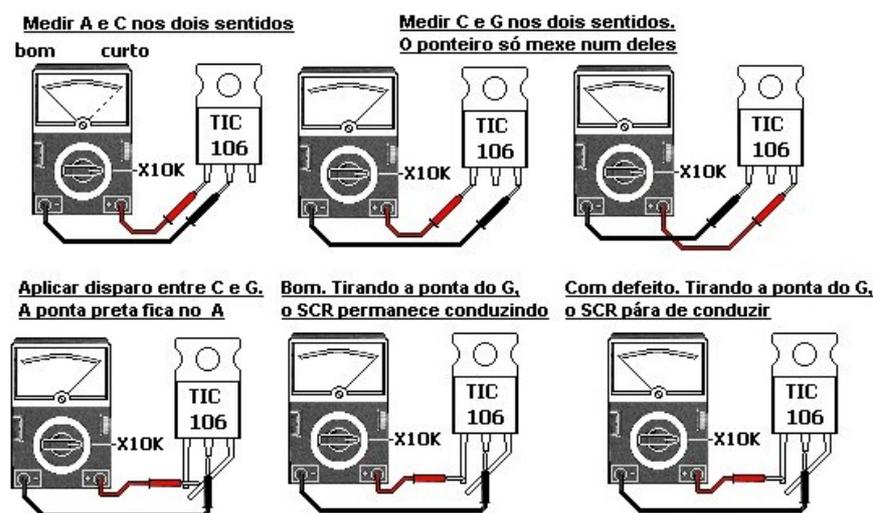


Figura 32 – Multímetro digital para teste de tiristores.

Fonte: <https://burgoseletronica.net>. Acesso em: 20/08/2013.

3.7 Acionamento de Tiristores

Os tiristores que apresentam terminal de disparo (gatilho) necessitam de um circuito para seu correto acionamento. Em outras palavras, um circuito de baixa tensão e corrente deverá

proporcionar o sinal com valor e duração adequada para que o tiristor entre em condução quando for desejado.

Ao utilizar tiristores em circuitos de corrente contínua e/ou de baixa tensão, o sinal de comando (V_G) poderá ser gerado no próprio circuito. Já em outros casos, por exemplo quando se utilizam altas tensões (220 V ou mais), corrente alternada, ou se deseja isolamento entre o circuito de potência e o circuito de controle, pode ser necessário implementar uma etapa específica para o acionamento dos tiristores.

Na Figura 33 mostra-se um circuito típico para acionamento de TRIACs e controle por ângulo de fase da tensão na carga. Estes conversores (ca-ca) serão estudados em capítulos posteriores desta apostila. Nestes circuitos é necessário fazer o sincronismo com a tensão da rede, para que se dispare o tiristor no ângulo desejado, a partir de zero graus (passagem por zero da senóide da rede). Assim, o resistor de 1,5 M Ω realiza esta função no circuito da Figura 33. Note que o circuito integrado (TCA785 - <http://www.infineon.com/>) necessita de uma tensão contínua de 15 V para funcionar.

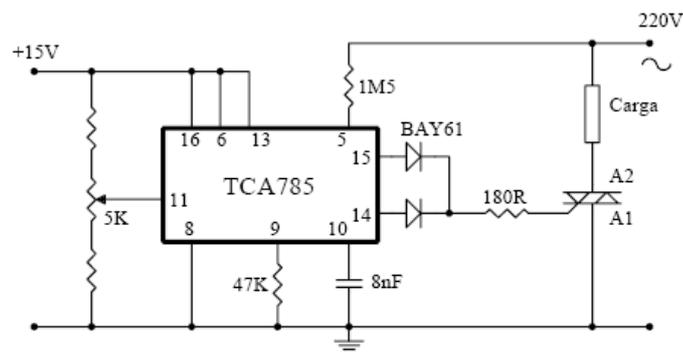


Figura 33 – Circuito típico para acionamento de tiristores.

Fonte: (Barbi, 2005).

Atualmente é muito comum o uso de optoacopladores para se ter isolamento entre o estágio de potência (TRIAC e rede de energia elétrica) e o estágio de controle, muitas vezes um microcontrolador ou microprocessador. Assim, na Figura 34, mostra-se um circuito exemplo, com um optoacoplador sendo acionado por um transistor. Na saída do optoacoplador se tem a conexão de uma fonte de tensão alternada e um resistor série. Quando for aplicada uma tensão na entrada (*input*) que leve o transistor à condução, este fará circular corrente pelo LED do optoacoplador, fazendo com que o DIAC em sua saída conduza, fazendo assim com que circule corrente entre os terminais 4 e 6 do circuito integrado. O optoacoplador é o modelo MOC3011 da Texas Instruments.

Na Figura 35 mostra-se o circuito completo, sugerido pelo fabricante na folha de dados do optoacoplador, para o caso de acionamento de cargas resistivas. Note que neste caso não é necessário empregar circuito de proteção para o tiristor.

Já quando se aciona cargas com característica indutiva, é necessário inserir um circuito de

proteção, alterando o circuito no gatilho do tiristor, conforme sugerido pela Figura 36.

Além disso, é muito importante cuidar com a conexão do tiristor, para que a corrente de gatilho entre neste terminal e saia no catodo (para o SCR) ou para o terminal A1 (para TRIAC) mostrado na Figura 28. Isso pode ser observado na Figura 37 onde se mostra a identificação dos terminais, a pinagem e o aspecto real do TRIAC da série BT137 da NXP.

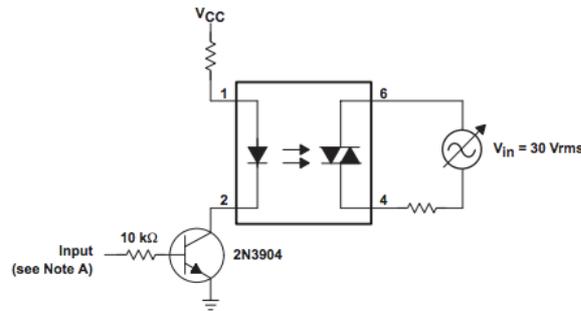


Figura 34 – Optoacoplador para acionamento de tiristores.

Fonte: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/moc3011.pdf>. Acesso em: 20/08/2013.

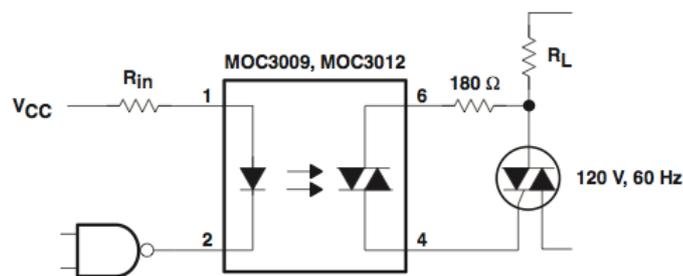


Figura 35 – Circuito com optoacoplador MOC3011 – Cargas resistivas.

Fonte: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/moc3011.pdf>. Acesso em: 20/08/2013.

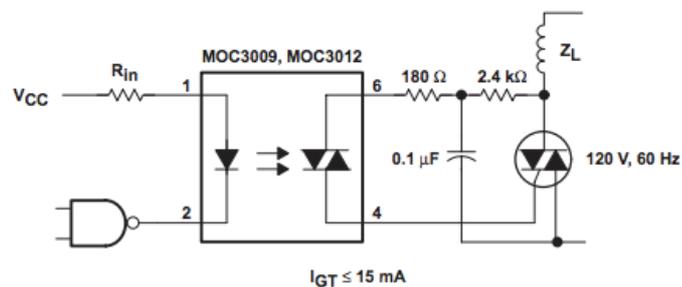


Figura 36 – Circuito com optoacoplador MOC3011 – Cargas indutivas.

Fonte: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/moc3011.pdf>. Acesso em: 20/08/2013.

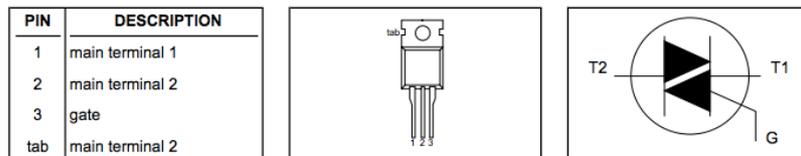


Figura 37 – Identificação dos terminais do TRIAC.

Fonte: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BT137_SERIES.pdf. Acesso em: 20/08/2013.

4 Encapsulamento de Diodos e Tiristores

Assim como com os demais semicondutores, para os diodos se tem os mais diversos encapsulamentos, desde modelos em SMD (tecnologia de montagem em superfície, do inglês *surface-mount technology*) até módulos e modelos na forma de disco.

Na Figura 38 mostram-se alguns tiristores, onde nota-se a variedade de modelos disponíveis, dependendo da corrente e tensão para a qual foram projetados. Os encapsulamentos mais comuns para diodos e tiristores são aqueles apresentados na Figura 39.



Figura 38 – Encapsulamentos de diodos e tiristores.

Fonte: <http://www.chtechnology.com>. Acesso em: 20/08/2013.

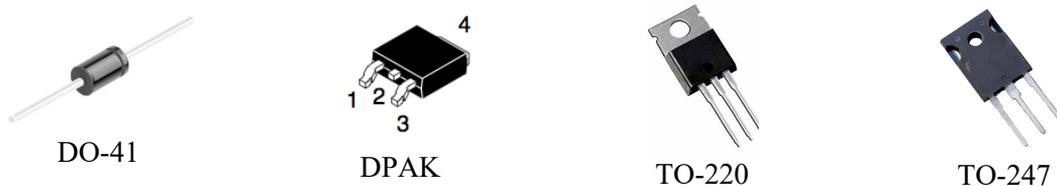


Figura 39 – Encapsulamentos mais comuns de diodos e tiristores.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Seja o circuito da Figura 40, considerando que a tensão da fonte é de 5 V, o resistor de 100 Ω e os diodos (D_1 e D_2) sejam 1N4003, determine:

- A corrente do circuito;
- As perdas de condução em cada diodo;
- A perda no resistor R_1 ;
- A potência fornecida pela fonte.

Neste caso precisa-se consultar a folha de dados do diodo 1N4003 para estimar sua queda de tensão direta, que será:

$$V_{D1} = V_{D2} = 1,1V .$$

A tensão sobre o resistor série será:

$$V_{R1} = V_i - V_{D1} - V_{D2} ;$$

$$V_{R1} = 5 - 1,1 - 1,1 = 2,8V .$$

Portanto, a corrente do circuito será:

$$I_{R1} = \frac{V_{R1}}{R_1} = \frac{2,8}{100} = 28mA .$$

Assim, a potência nos diversos elementos será:

$$P_{D1} = P_{D2} = V_{D1} \cdot I_{D1} = V_{D1} \cdot I_{R1} = 1,1 \cdot 28m = 30,8mW ;$$

$$P_{R1} = V_{R1} \cdot R_1 = 2,8 \cdot 28m = 78,4mW ;$$

$$P_i = P_{R1} + P_{D1} + P_{D2} = 78,4m + 30,8m + 30,8m = 140mW .$$

ER 02) Seja o circuito da Figura 44, considerando que a tensão da fonte é de 12 V. Os resistores são: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$ e $R_3 = 15 \Omega$. O LED é de potência, com tensão direta de 2 V e corrente direta de 600 mA. As informações do tiristor TIC106 são fornecidas na folha de dados, a ser consultada pela internet.

- A corrente do circuito;
- A potência dissipada pelo tiristor;
- A perda no resistor R_3 ;

- A potência fornecida pela fonte;
- O rendimento do circuito.

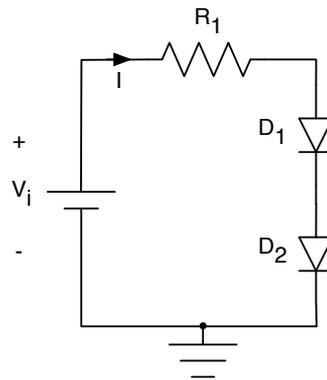


Figura 40 – Circuito para exercício resolvido 01.

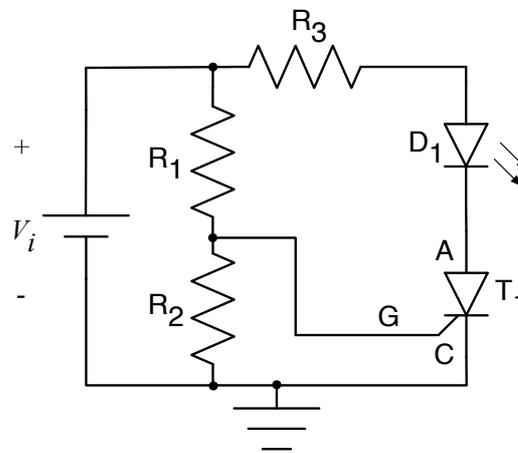


Figura 41 – Circuito para exercício resolvido 02.

Inicialmente deve-se verificar se o tiristor está em condução. Assim, determina-se a corrente de gatilho fazendo o equivalente de Thévenin:

$$V_{TH} = \frac{V_i \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{12 \cdot 4,7k}{10k + 4,7k} \approx 3,8V;$$

$$R_{TH} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10k \cdot 4,7k}{10k + 4,7k} \approx 3,2k\Omega.$$

Portanto, a corrente no gatilho será:

$$I_G = \frac{V_{TH} - V_G}{R_{TH}} = \frac{3,8 - 0,6}{3,2k} = 1mA.$$

Pela folha de dados do componente verifica-se que sua corrente de disparo no gatilho é de 200 μ A. Portanto o tiristor estará conduzindo.

Pode-se então determinar a tensão sobre o resistor R_3 :

$$V_{R3} = V_i - V_{D1} - V_{T1};$$

$$V_{R3} = 12 - 2 - 1,7 = 8,3V .$$

Portanto, a corrente do circuito será:

$$I_{R3} = \frac{V_{R3}}{R_1} = \frac{8,3}{15} \approx 553mA .$$

Assim, a potência nos diversos elementos será:

$$P_{T1} = V_{T1} \cdot I_{T1} = V_{T1} \cdot I_{R3} = 1,7 \cdot 553m = 940,1mW ;$$

$$P_{D1} = V_{D1} \cdot I_{D1} = V_{D1} \cdot I_{R3} = 2 \cdot 553m = 1.106mW ;$$

$$P_{R3} = V_{R3} \cdot I_{R3} = 8,3 \cdot 553m = 4.589,9mW ;$$

$$P_i = P_{R3} + P_{D1} + P_{T1} = 4.589,9m + 1.106m + 940,1m = 6.636mW .$$

Finalmente, o rendimento do circuito será:

$$\eta = \frac{P_{D1}}{P_i} = \frac{1.106m}{6.636m} = 0,17 \text{ ou } 17\% .$$

Note que o rendimento encontrado é muito baixo, indicando que seria um circuito inviável de ser implementado na prática. Claro, este circuito é apenas didático, para fins de estudo de tiristores, por isso não pode ser considerado um projeto para resultar em um produto eletrônico.

ER 03) Determine a queda de tensão direta para o diodo 1N5401, quando estiver conduzindo uma corrente de 1 A.

Precisa-se da curva do diodo 1N5401, conforme mostrado na Figura 42. A seguir, de forma aproximada, se determina que a tensão direta para a corrente de 1 A é 0,75 V.

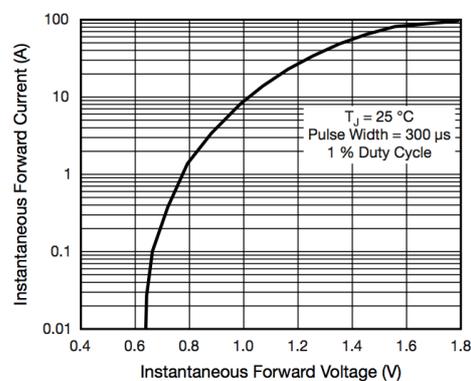


Figura 42 – Curva $I \times V$ do diodo 1N5401.

Exercícios Propostos

EP 01) Seja o circuito da Figura 43, considerando que a tensão da fonte é de 12 V. O resistor R_1 tem resistência de 10Ω . O diodo é o 1N5400. Com base nas informações da folha de dados do fabricante, determine:

- A corrente do circuito;
- A potência dissipada pelo diodo;
- A perda no resistor R_1 ;
- A potência fornecida pela fonte.

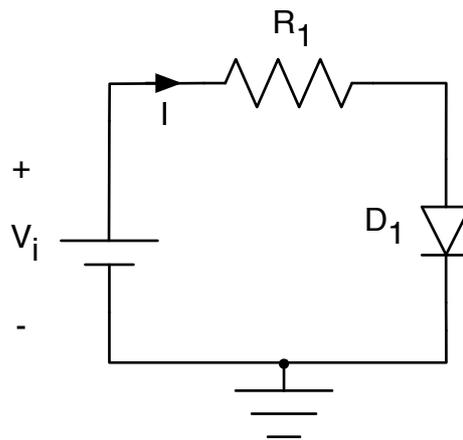


Figura 43 – Circuito para exercício proposto 01.

EP 02) Considerando as condições de operação do diodo do EP 01, responda:

- O diodo suporta a corrente do circuito;
- A tensão reversa do diodo está adequada aos níveis do circuito.

EP 03) Determine as perdas por condução para um diodo de silício, operando nas seguintes condições:

- Corrente média: 5 A;
- Queda de tensão direta: 1,2 V.

EP 04) Determine as perdas por condução para um diodo de silício, operando nas seguintes condições:

- Corrente média: 1 A;
- Queda de tensão direta: 0,8 V.

EP 05) Explique como ocorre a entrada em condução de um diodo. Ocorre algum fenômeno atípico?

EP 06) Explique como ocorre o bloqueio de um diodo. Ocorre algum fenômeno atípico?

EP 07) Em termos de comutação, qual a diferença de um tiristor para um diodo?

EP 08) O que é recuperação reversa?

EP 09) Comente sobre as principais características de um diodo que devem ser observadas para sua escolha.

EP 10) Os diodos de potência podem ser utilizados em altas frequências (acima de 100 kHz)?

EP 11) Os tiristores operam em altas ou baixas frequências?

EP 12) Comente sobre as diferenças entre um diodo real de um diodo ideal?

EP 13) Comente sobre as diferenças entre um tiristor real de um tiristor ideal?

EP 14) É correto afirmar que um diodo bloqueia quando estiver reversamente polarizado?

EP 15) O que é V_{RRM} ?

EP 16) Qual a principal característica dos diodos de carbeto de silício (*silicon carbide*)?

EP 17) O que é a corrente máxima não-repetitiva de um diodo?

EP 18) Explique como fazer o teste de um diodo com multímetro?

EP 19) Tiristores podem ser testados com o multímetro? Explique.

EP 20) Comente sobre 3 diferentes tipos de tiristores?

EP 21) Considere o circuito da Figura 41, e que a tensão da fonte seja de 24 V. Os resistores são: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$ e $R_3 = 15 \Omega$. O LED é de potência, com tensão direta de 2 V e corrente direta de 600 mA. As informações do tiristor TIC106 são fornecidas na folha de dados, a ser consultada pela internet.

- A corrente do circuito;
- A potência dissipada pelo tiristor;
- A perda no resistor R_3 ;
- A potência fornecida pela fonte;
- O rendimento do circuito.

EP 22) Repita o exercício EP 21 considerando que R_2 seja de 1 k Ω .

EP 23) Repita o exercício EP 21 considerando que R_3 seja de 10 Ω .

EP 24) Qual a queda de tensão direta do diodo 1N5404 quando submetido a uma corrente de 3 A?

EP 25) Qual a tensão entre anodo e catodo do tiristor BT151?

EP 26) Quais as formas de bloquear um tiristor?

EP 27) O que é um DIAC?

EP 28) Qual a diferença entre o SCR e o TRIAC?

6 Pré-Laboratório

6.1 Introdução

Esta atividade tem por objetivo preparar o estudante para a aula de laboratório, mais especificamente realizando simulações referentes aos circuitos que serão implementados.

Assim, objetiva-se:

- Simular circuitos de eletrônica de potência;
- Antecipar os estudos referentes aos assuntos abordados na aula de laboratório;
- Entender o funcionamento de circuitos com eletrônica de potência;
- Analisar os resultados obtidos e concluir a respeito.

As simulações serão realizadas com os simuladores Psim (<http://powersimtech.com/>) e Multisim (<http://www.ni.com/multisim/pt/>).

6.2 Simulação de Circuito com Diodos

As simulações realizadas nesta atividade referem-se aos circuitos apresentados na Figura 47. Inicialmente simule o diodo operando na região direta e com o Psim, conforme mostrado na Figura 44, considerando-o como sendo ideal e com queda de tensão de 1,05 V. Não esqueça de especificar no simular esta queda de tensão.

Anote os valores obtidos na Tabela 1. A seguir altere o circuito, deixando o diodo reversamente polarizado e anote os valores na Tabela 2. Note que os valores para a fonte ajustada em 3 V já são fornecidos, visando a conferência com o resultado obtido pelo aluno.

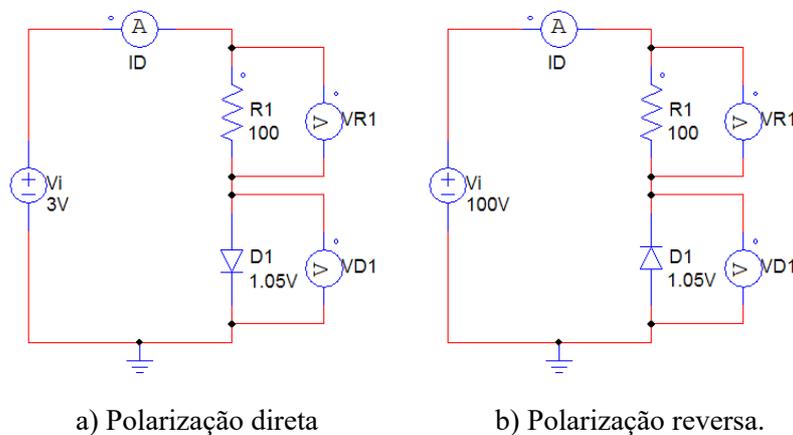


Figura 44 – Circuito de simulação com diodos no Psim.

Os valores obtidos podem ser arredondados, pois em alguns casos representariam números extensos para serem representados.

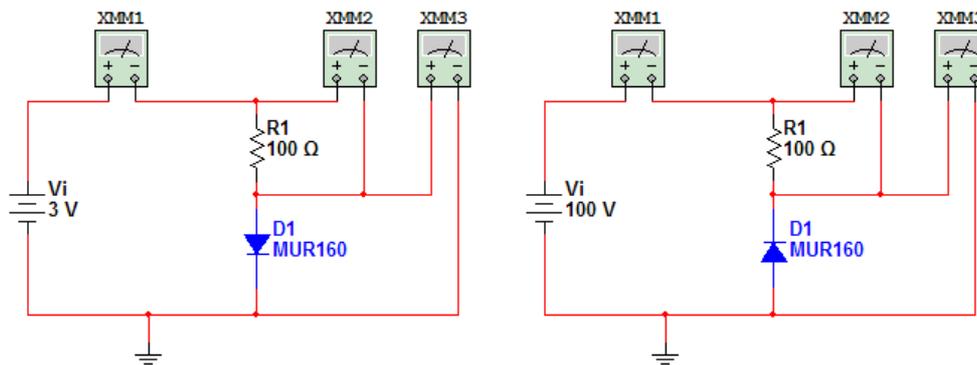
Tabela 1 – Valores de tensão e corrente na região direta.

Tensão na fonte [V]	Tensão no diodo [V]		Tensão no resistor [V]		Corrente no diodo [mA]	
	Psim	Multisim	Psim	Multisim	Psim	Multisim
0,0						
0,5						
1,0						
1,5						
2,0						
2,5						
3,0	1,05	669,795m	1,95	2,33	19,5	23,303
3,5						
4,0						
4,5						
5,0						

Tabela 2 – Valores de tensão e corrente na região reversa.

Tensão na fonte [V]	Tensão no diodo [V]		Tensão no resistor [V]		Corrente no diodo [mA]	
	Psim	Multisim	Psim	Multisim	Psim	Multisim
0,0						
50,0						
100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
500,0						
1000,0						

A seguir, realize a mesma simulação com o software Multisim. Os multímetros são para medir a corrente do circuito e tensão nos elementos.



a) Polarização direta

b) Polarização reversa.

Figura 45 – Circuito de simulação com diodos no Multisim.

Explique por que os valores encontrados com Multisim diferem daqueles obtidos com Psim.

6.3 Simulação de Circuito com Tiristores

A simulação do circuito com tiristor (SCR), conforme mostrado na Figura 49, será simulado apenas com o Multisim, visto que este *software* permite visualizar o LED ligado ou desligado. Assim, implemente no Multisim o circuito mostrado na Figura 46. Note que para medir a tensão sobre o tiristor (D_1) foi utilizado um recurso muito interessante, que por meio de uma ponteira (*Probe 1*) inserida ao circuito, permite obter tensões e correntes naquele ponto.

Além disso, note que na versão do Multisim utilizada (Multisim Student Edition 11.0.2) não há modelo para o tiristor BT151, substituindo-se então o mesmo pelo tiristor 2N1599. Note que a chave S_1 serve para disparar (acionar) o tiristor, enquanto a chave S_2 fará seu bloqueio, desviando sua corrente e forçando a parar de conduzir.

Observe também que ao pressionar o interruptor S_1 , o tiristor entra em condução, permanecendo assim mesmo que o botão seja solto.

Os tiristores possuem uma corrente mínima para permanecerem conduzindo, chamada de corrente de manutenção (I_H – *Holding current*). No caso do modelo 2N1599, esta corrente é de aproximadamente 5 mA. Verifique que alterando o resistor R_1 para 1 k Ω a corrente no LED será reduzida para menos do que 5 mA. Neste caso, ao pressionar o interruptor S_1 o tiristor entra em condução, mas quando o mesmo for solto, deixará de conduzir.

Verifique para qual corrente no tiristor este deixa de conduzir após a retirada do sinal de comando. Anote este valor:

$$I_H = \underline{\hspace{2cm}}$$

Anote também a tensão sobre o tiristor, ou seja, sua queda de tensão direta:

$$V_T = \underline{\hspace{2cm}}$$

Calcule a potência dissipada sobre o tiristor.

$$P_T = \underline{\hspace{2cm}}$$

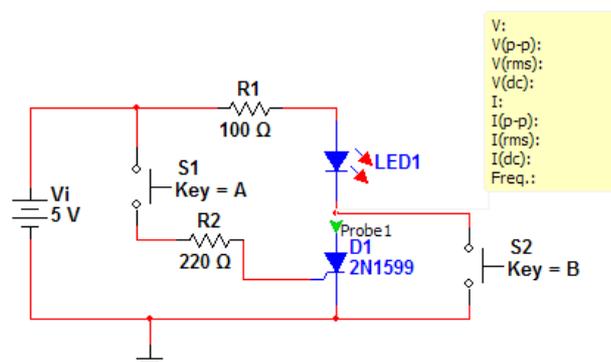


Figura 46 – Circuito de simulação com tiristor no Multisim.

7 Laboratório

7.1 Introdução

Esta atividade de laboratório tem por objetivo exercitar o conteúdo estudado nesta aula (capítulo), especificamente sobre semicondutores de potência (diodos e tiristores).

Em síntese, objetiva-se:

- Testar semicondutores de potência;
- Implementar circuitos de disparo de tiristores e transistores;
- Levantar a curva de corrente versus tensão de diodos;
- Entender o funcionamento de semicondutores de potência;
- Analisar os resultados obtidos e concluir a respeito.

7.2 Diodos Semicondutores

Obtenha na internet a folha de dados do diodo MUR160.

A seguir, verifique se o diodo está em boas condições, utilizando o multímetro. Meça a tensão direta do mesmo:

$$V_D = \underline{\hspace{2cm}}.$$

Levante a curva de corrente versus tensão, tanto na região direta como na região reversa do diodo, anotando os valores nas Tabela 3 e Tabela 4. Utilize como referência o circuito da Figura 47. O diodo utilizado no circuito é o MUR160 e o resistor é de 100 Ω .

Tabela 3 – Valores de tensão e corrente na região direta.

Tensão na fonte [V]	Tensão no diodo [V]	Tensão no resistor [V]	Corrente calculada no diodo [mA]
0,0			
0,5			
1,0			
1,5			
2,0			
2,5			
3,0			
3,5			
4,0			
4,5			
5,0			

Tabela 4 – Valores de tensão e corrente na região reversa.

Tensão na fonte [V]	Tensão no diodo [V]	Tensão no resistor [V]	Corrente calculada no diodo [mA]
0,0			
15,0			
30,0			

Desenhe a curva característica do diodo na Figura 48. Utilize os dados das Tabela 3 e Tabela 4 e extrapole os pontos para obter uma melhor visualização da curva.

Determine a máxima perda em condução do diodo.

A tensão direta do diodo de potência é maior ou menor do que de um diodo de sinal?

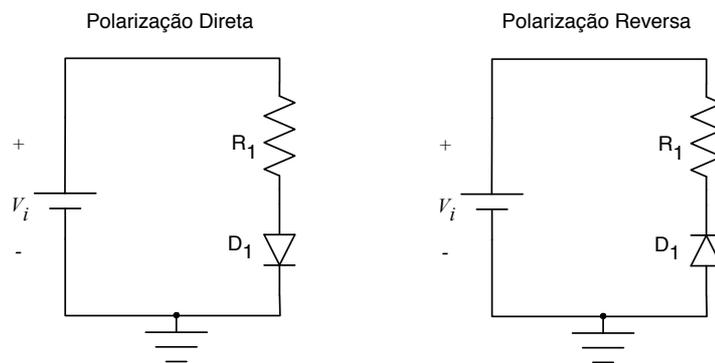


Figura 47 – Circuito de polarização do diodo semicondutor.

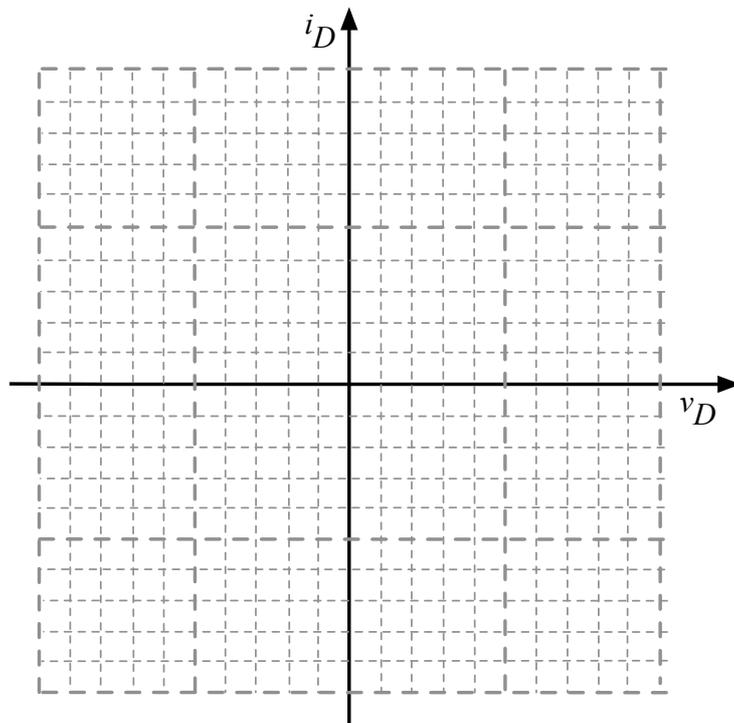


Figura 48 – Curva característica do diodo de potência.

7.3 Tiristores

Obtenha na internet a folha de dados do SCR BT151.

A seguir, verifique se o diodo está em boas condições, utilizando o multímetro.

Implemente o circuito mostrado na Figura 49 e provoque o disparo e bloqueio do SCR conforme orientações do professor. Para disparar o tiristor, conecte através de um condutor (fiozinho) o resistor R_2 ao terminal de gatilho do SCR. Já para bloquear o tiristor, inicialmente desligue a fonte de alimentação, em seguida religue o circuito e verifique que o mesmo deixou de conduzir. A outra possibilidade é curto-circuito através de um condutor, conforme indicado na figura, o terminal de anodo com o terminal de catodo do SCR.

Os elementos do circuito da Figura 49 são:

- $V_i = 5\text{ V}$;
- $R_1 = 100\ \Omega$;
- $R_2 = 220\ \Omega$;
- $D_1 = \text{LED comum}$;
- $T_1 = \text{BT151}$.

Comprove que o tiristor permanece em condução mesmo após se retirar o pulso de disparo.

Meça a tensão entre anodo e catodo do tiristor quando o mesmo estiver conduzindo:

$V_T = \underline{\hspace{2cm}}$.

Quais as duas formas de bloquear um tiristor que foram testadas?

Determine a máxima perda em condução do tiristor.

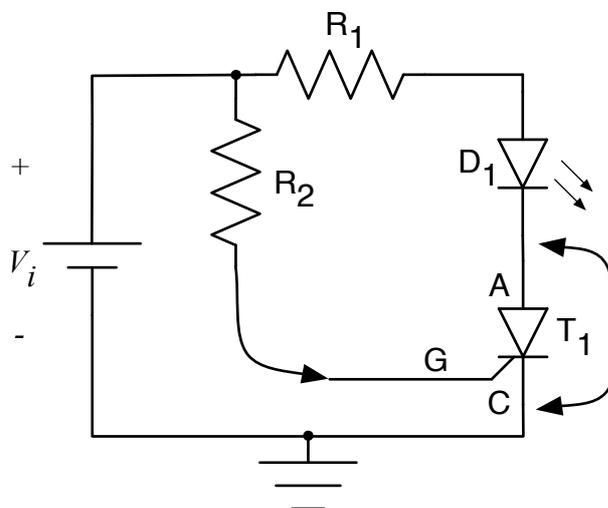


Figura 49 – Circuito para teste de tiristores (SCR).

8 Referências

- [1] BARBI, I. Eletrônica de potência. Florianópolis: Edição do Autor, 2005.
- [2] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- [3] MELLO, J. L. A. Projetos de fontes chaveadas. São Paulo: Érica, 1987.
- [4] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wilwy, 2003.
- [5] PRESSMAN, A. I. Switching Power Supply Design. New York: McGraw Hill, 1998.
- [6] BARBI, Ivo. Projeto de Fontes Chaveadas. 2ª Edição Revisada, Florianópolis, 2006.
- [7] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [8] POMILIO, J. A. Notas de aula de Eletrônica de Potência – Graduação. São Paulo, SP – UNICAMP, 2013.