

Laboratório de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – 2017/02

Experiência N° 03: Circuitos com diodos

I - Objetivos

O objetivo deste experimento é o estudo das propriedades de diodos como elementos não-lineares de circuitos. Em particular, serão estudados os diodos 1N4007 e o diodo Zener BZX75C2V4 ou equivalente.

Maiores informações acerca destes componentes podem ser encontradas em:

- Datasheet do diodo 1N4007: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/1N/1N4007.pdf>
- Rego, Carlos Alberto. **Diodos**. Apostila sobre o funcionamento de diodos para o curso de Eletrônica da Universidade Lusíada de V. N. de Famalicão, em Portugal. Disponível em: <http://docentes.fam.ulusiada.pt/~d1095/Cap2_Elec_0607.pdf>
- ON Semiconductor. **TVS/Zener Theory and Design Considerations**. Apostila com informações detalhadas de diodos Zener. 127 páginas. 2005. Disponível em: <http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/HBD854-D.PDF>

II – Preparação para o laboratório

Sugestão de leitura prévia: Para responder às perguntas propostas, consulte o capítulo do livro texto referente a diodos.

Pré-relatório - INDIVIDUAL

Este roteiro começa com um resumo da teoria necessária para o entendimento do funcionamento do diodo. Para informações mais detalhadas, sugere-se fortemente consulta ao livro texto, ou a qualquer livro de eletrônica que trate de diodos de junção e diodos Zener disponíveis na Biblioteca Central.

O pré-relatório consistirá na resposta a perguntas propostas ao longo do texto. Suas respostas serão baseadas na leitura do livro texto, do resumo fornecido e de outras fontes que encontrarem, mas não devem ser diretamente copiadas de nenhuma fonte. Isso é considerado plágio e é muito sério. Leia este post na página do curso de Laboratório de Circuitos 1:

<https://sites.google.com/site/labcircuito1unb/classroom-news/introducaoteoricacuidadocomplagio>

As perguntas serão feitas ao longo do texto, para facilitar a leitura e compreensão. Este resumo foi preparado com base no texto e figuras do capítulo 3 do livro de Sedra e Smith de Microeletrônica, listado no plano de ensino do curso.

Os diodos são dispositivos semi-condutores não-lineares que funcionam como *retificadores*, permitindo a passagem de corrente no circuito em apenas uma direção. A figura 1 mostra o símbolo de um diodo.

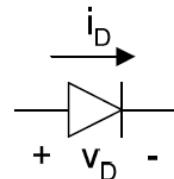
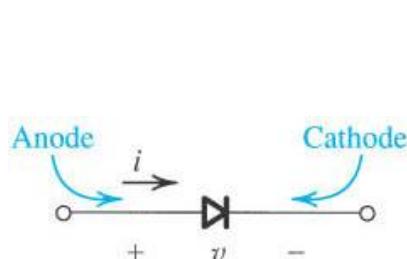


Figura 1: Símbolo de um diodo.

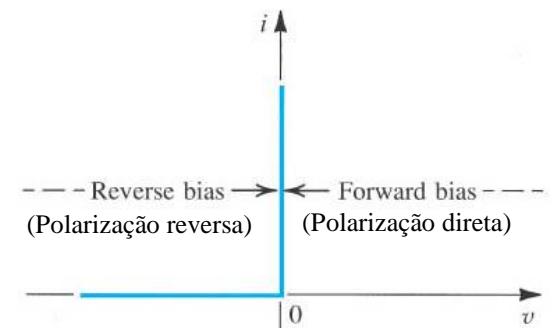
O terminal do diodo ligado à polaridade positiva da tensão indicada é chamada de anodo, enquanto que o terminal ligado à polaridade negativa da tensão indicada é chamada de catodo. Observe que o símbolo do diodo lembra uma seta, apontando no sentido da condução de corrente. O diodo só conduz corrente elétrica quando a tensão $v_D > 0$. Em outras palavras, quando a tensão aplicada ao anodo é maior do que a tensão no catodo ($v_D > 0$), o diodo encontra-se *diretamente polarizado*, e a corrente fluirá pelo diodo do anodo ao catodo. Caso contrário, se $v_D < 0$, o diodo encontra-se *reversamente polarizado*. Em um diodo ideal, não haveria a passagem de corrente nestas condições. Em um diodo real, existe uma corrente reversa muito pequena mesmo com o diodo reversamente polarizado. A figura 2 mostra a característica $i-v$ de um diodo ideal. Observe que para tensões negativas aplicadas ao diodo não há passagem de corrente. Essa condição é mostrada pelo circuito equivalente mostrado na figura 2(c). Por outro lado, para tensões positivas, o diodo ideal comporta-se como um curto-círcuito, conforme ilustrado no circuito equivalente da figura 2(d).

A figura 3 mostra um circuito retificador simples e sua análise utilizando o modelo ideal do diodo.

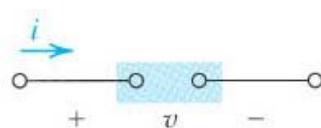
1. (1,0 pt) Com base nos circuitos equivalentes das figuras 3(c) e 3(d), esboce a forma de onda da tensão de saída $v_0(t) \times t$, para ao menos um período da onda de entrada, no eixo disponível na **figura 3(e)**, com base no modelo do diodo ideal.



(a)

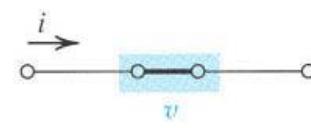


(b)



$$v < 0 \Rightarrow i = 0$$

(c)

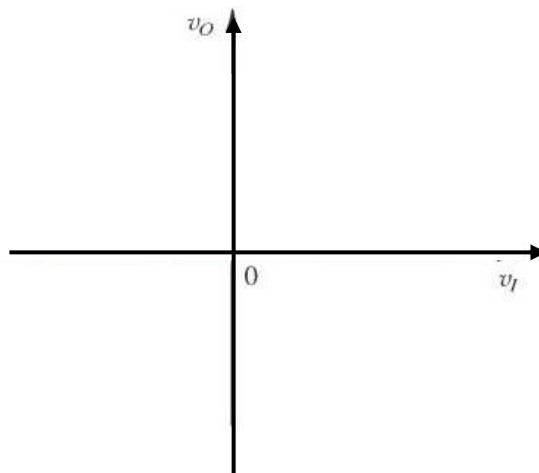


$$i > 0 \Rightarrow v = 0$$

(d)

Figura 2: O diodo ideal: (a) símbolo de um diodo como elemento de circuito; (b) característica $i-v$; (c) circuito equivalente na polarização reversa; (d) circuito equivalente na polarização direta.

2. (1,0 pt) Determine a *característica de transferência* $v_O \times v_I$ do circuito da figura 3(a), para valores de $v_I \geq 0$ e $v_I < 0$ no eixo fornecido abaixo. Lembre-se de considerar o modelo de diodo ideal.



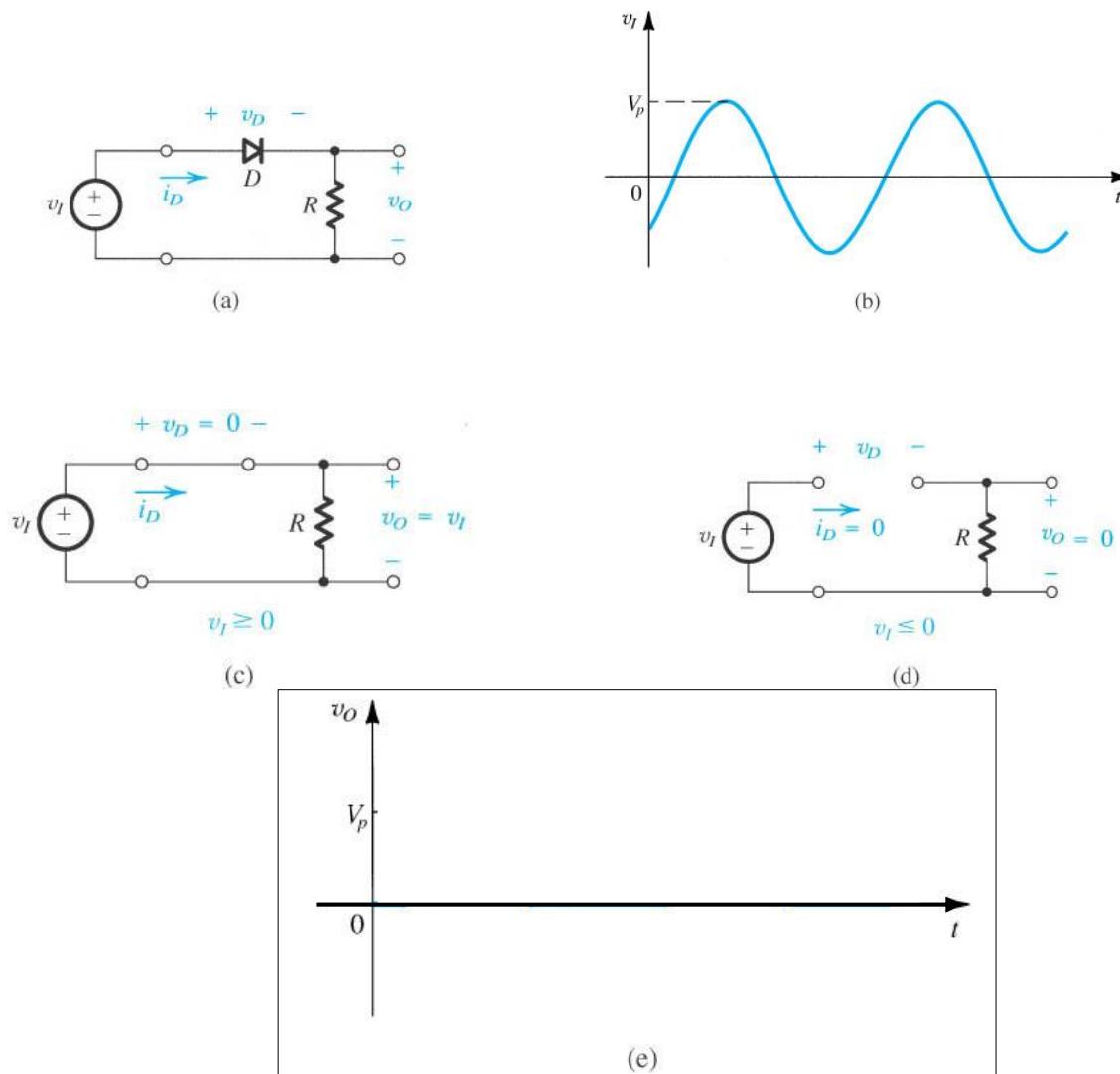


Figura 3: (a) O circuito retificador. (b) Forma de onda da entrada, $v_I(t)$. (c) Circuito equivalente quando $v_I \geq 0$. (d) Circuito equivalente quando $v_I < 0$. (e) Forma de onda da saída, a ser preenchido por vocês.

A característica $i-v$ de um diodo real, no entanto, tem a forma mostrada na figura 4. A figura 5 mostra uma característica $i-v$ típica de um diodo de silício, com algumas regiões com escala expandida e outras com escala comprimida de modo a mostrar melhor os detalhes de operação do diodo. A mudança de escala resultou em uma aparente descontinuidade na origem. Observe que a operação do diodo é não-linear e depende da tensão v aplicada entre seus terminais. A figura 5 mostra três regiões distintas de operação.

Na **região de polarização direta** ($v > 0$), o diodo precisa ter uma tensão $v \geq V_D > 0$ para que haja a passagem de corrente pelo elemento. Observe na figura 5 que a corrente é desprezível para v menor que cerca de 0,5 V. Essa tensão é chamada de tensão limiar de condução ou tensão de corte. Para uma “condução plena”, a queda de tensão no diodo de silício se restringe a uma pequena faixa entre 0,6 e 0,8 V, aproximadamente. Isso dá origem a um “modelo” simplificado do diodo real, mais realista do que o modelo do diodo ideal mostrado na figura 2, em que é suposto que a queda de tensão em um diodo em condução

(diretamente polarizado) é de aproximadamente 0,7 V. A corrente que passa pelo diodo para uma tensão de polarização direta de 0,7 V depende do tipo de diodo utilizado e do circuito ao qual o diodo pertence. Na região direta, a relação de i - v é rigorosamente aproximada por

$$i = I_s (e^{v/nV_T} - 1) \quad (\text{Eq. 1})$$

3. (1,0 pt) Consulte o seu livro texto e explique de modo resumido o nome e significado das variáveis (a) I_s ; (b) n ; (c) V_T , (d) v ; (e) i da equação 1.

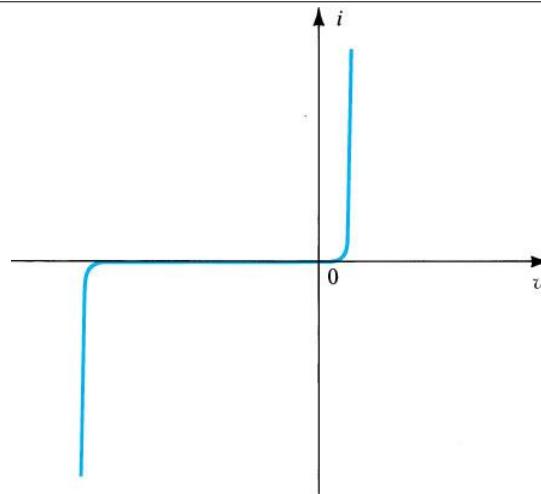


Figura 4: A característica i - v de um diodo de junção de silício.

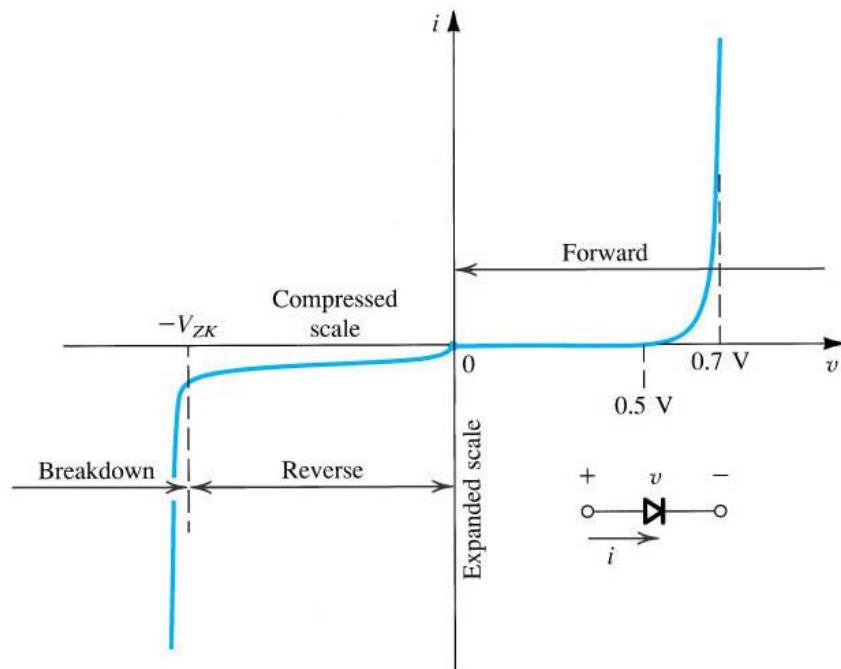


Figura 5: A relação i - v de um diodo de silício com algumas escalas expandidas e outras comprimidas a fim de revelar certos detalhes.

Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Gleba A, Avenida L3 Norte, CEP 70.910-900, Brasília - DF
Caixa postal 4386, fone +55 61 3307 2300, fone/fax +55 61 3273 8893, ftd@unb.br, www.ft.unb.br

4. (0,5 pt) Consulte no datasheet do diodo 1N4007, que será utilizado no laboratório, o valor da tensão de polarização direta (*forward voltage*) deste diodo (não é de 0,7 V como o exemplo da figura 5!).

Observe que, na região de polarização direta, a curva tem de fato uma forma exponencial.

Na **região de polarização reversa**, determinada por $v < 0$, o termo exponencial da Eq. 1 torna-se desprezivelmente pequeno comparado com a unidade, e a corrente no diodo torna-se $i = -I_S$, ou seja, para este modelo a corrente na direção reversa é constante e igual a I_S . Em diodos reais, a corrente reversa, ainda que bem menor do que a corrente direta, é consideravelmente maior que I_S e aumenta com o aumento da tensão reversa, como pode ser observado na figura 5.

A terceira região de operação do diodo é a **região de ruptura**. Este região é obtida quando a tensão reversa excede um valor limiar específico para o diodo particular sendo utilizado. Um diodo retificador como o 1N4007 costuma ser utilizado em circuitos que não operam na região de ruptura, apenas nas regiões de polarização direta e reversa.

Com base nesta característica i - v do diodo real, para a análise de circuitos com diodos, apesar da relação exponencial da equação 1 ser um modelo preciso para operação na região direta, sua natureza não-linear complica a análise de circuitos com diodos. A análise pode ser significativamente simplificada se for encontrada uma relação linear, mesmo que por partes, para descrever a operação do diodo nas diferentes regiões de operação. A figura 6 mostra alguns modelos de segmentos lineares utilizados para a análise analítica (“na mão”) de circuitos com diodos em sua região de polarização direta. Nesta análise simplificada, para a polarização reversa, o diodo é modelado por um circuito aberto.

A figura 6(b) é chamada de *modelo de queda de tensão constante*, onde o diodo real é substituído, quando polarizado diretamente, por uma fonte de tensão constante de 0,7 V (neste exemplo; este valor deve ser sempre obtido diretamente do datasheet do diodo que se está utilizando) e, quando polarizado reversamente, por um circuito aberto.

5. (1,0 pt) Considerando-se o modelo de queda de tensão constante (o valor da tensão de polarização direta deve ser obtido do datasheet do diodo 1N4007), analise o circuito da Figura 1(a) da **Parte Experimental** e obtenha as curvas características $v_s(t) \times v(t)$ (um gráfico com os eixos semelhantes ao da figura 3(e), com $v_s(t)$ no eixo vertical e $v(t)$ no eixo horizontal).
6. (1,0 pt) Considerando-se o modelo de queda de tensão constante (o valor da tensão de polarização direta deve ser obtido do datasheet do diodo 1N4007), analise o circuito da Figura 1(b) da **Parte Experimental** e obtenha as curvas características $v_s(t) \times v(t)$.

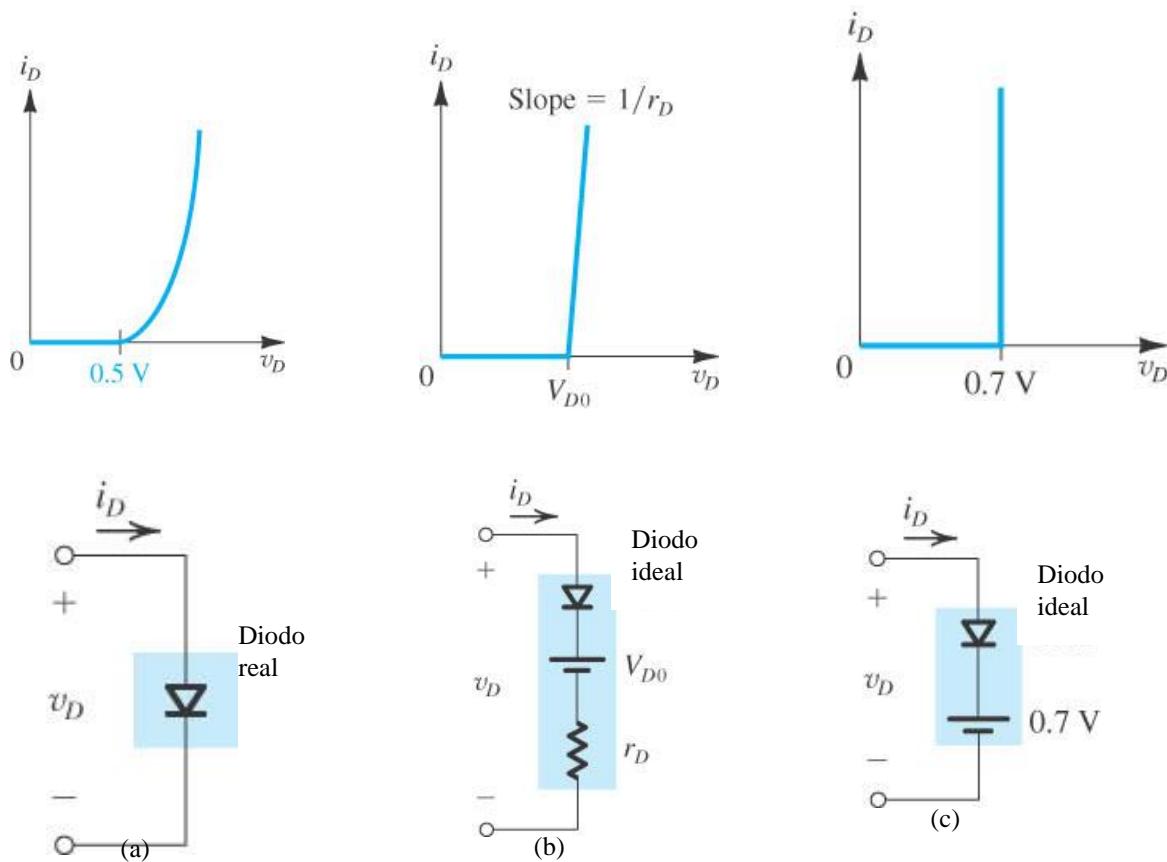


Figura 6: Modelos para a região de polarização direta de um diodo de silício

Enquanto que em diodos retificadores como o 1N4007 a região de ruptura costuma ser evitada (observe que os modelos equivalentes mostrados na figura 6 nem consideram esta região de operação), outros diodos são fabricados para operarem preferencialmente na região de ruptura. Um exemplo de um diodo deste tipo é o diodo Zener. A figura 7 mostra o símbolo utilizado para o diodo Zener em circuitos.

Neste caso, a tensão de limiar reversa V_{Z0} costuma ter um valor bem menor do que no caso do diodo 1N4007. No caso do diodo Zener a ser utilizado no laboratório (BZX75C2V4 ou equivalente), a tensão de ruptura é de 2,4 V (lembre-se que este é o valor da tensão na região de polarização reversa; na região de polarização direta, este diodo comporta-se de modo semelhante ao diodo 1N4007).

A figura 8 mostra a característica $i-v$ do diodo Zener com detalhes da região de ruptura. Observe que nesta região, para pequenas variações de tensão reversa em torno do valor de V_{Z0} , há uma grande variação no valor da corrente I_Z que passa pelo diodo. Em outras palavras, o diodo Zener, quando polarizado reversamente, como ilustrado na figura 7, mantém entre seus terminais uma tensão praticamente constante, mesmo para grandes variações em sua corrente reserva. Nas aplicações normais dos diodos Zener, a corrente

circula entrando pelo catodo, ou seja, o catodo é positivo em relação ao anodo; portanto, I_Z e V_Z na figura 7 são valores positivos.

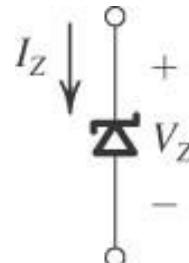


Figura 7: Símbolo utilizado para o diodo Zener em circuitos

7. (1,0 pt) Considerando-se o modelo de queda de tensão constante, analise o circuito da Figura 1(c) da **Parte Experimental** e obtenha as curvas características $v_s(t) \times v(t)$ (um gráfico com os eixos semelhantes ao da figura 3(e), com $v_s(t)$ no eixo vertical e $v(t)$ no eixo horizontal). Neste exercício, considere uma tensão de polarização reversa $V_Z = 2,4$ V e uma tensão de polarização direta $V_D = 1,0$ V.
8. (1,0 pt) Considerando-se o modelo de queda de tensão constante, analise o circuito da Figura 1(d) da **Parte Experimental** e obtenha as curvas características $v_s(t) \times v(t)$ (um gráfico com os eixos semelhantes ao da figura 3(e), com $v_s(t)$ no eixo vertical e $v(t)$ no eixo horizontal). Neste exercício, considere uma tensão de polarização reversa $V_Z = 2,4$ V e uma tensão de polarização direta $V_D = 1,0$ V.

(Dica: Esses circuitos são resolvidos em diversos livros texto. Consulte o seu livro texto para auxiliá-lo a resolver estes questões. Não se esqueça de citar o livro consultado no item “referências bibliográficas”, ao final do pré-relatório.

Responda a pergunta 9 com base no texto “Ética na Pesquisa Científica e Tecnológica - Palestra na Semana de Iniciação Científica – COLTEC-UFMG”, do Prof. Eduardo F. Barbosa, que pode ser obtido a partir do link disponível em <https://sites.google.com/site/labcircuitos1unb/classroom-news/introducaoteoricacuidadocomplagio>. **Leia a palestra na íntegra.**

9. (1,0 pts) O que é plágio e porque é considerado tão sério? Qual a diferença entre citar uma fonte bibliográfica e copiar de uma fonte? Baseie sua resposta com base na leitura indicada acima.

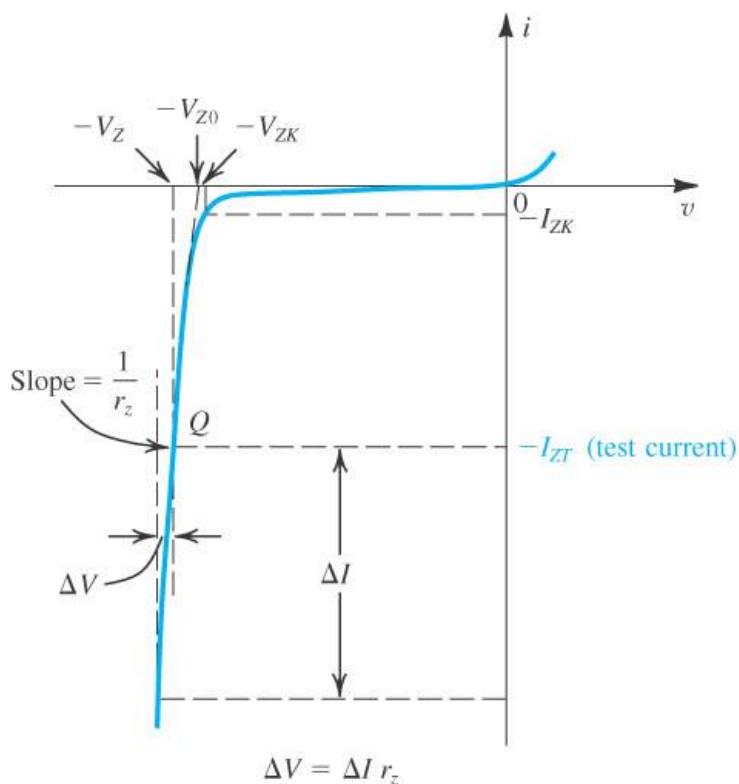


Figura 8: A característica i-v de um diodo Zener com a região de ruptura mostrada com mais detalhes

Nos pré-relatórios, é esperado que vocês sempre citem as bibliografias consultadas, mesmo se forem fontes da internet. Resumos das normas da ABNT para citações bibliográficas e outras seções de trabalhos técnicos podem ser encontrado em diferentes locais, como:

- http://www.seufuturonapratica.com.br/portal/fileadmin/user_upload/MANUAL_PARA_CITACOES_BIBLIOGRAFICAS.pdf
- http://dgi.unifesp.br/sites/comunicacao/pdf/entreteses/guia_biblio.pdf;
- <http://www.bce.unb.br/abnt-colecao/> - Coleção de normas da ABNT disponibilizadas pela BCE;
- <http://www.bce.unb.br/normas-bibliograficas/> - Normas bibliográficas disponibilizadas pela BCE, segundo normas da ABNT e os padrões Vancouver, Harvard e APA. Contém também orientações sobre estrutura de trabalhos acadêmicos, que pode ser útil para o seu Trabalho de Conclusão de Curso.

10. (1,0 pt) O que significa ABNT? O que são normas técnicas?
11. (0,5 pt) Inclua as referências bibliográficas utilizadas para responder as perguntas acima, incluindo o livro texto, e quaisquer outras fontes utilizadas, incluindo outros livros consultados e fontes pesquisadas na internet, sempre seguindo as normas da ABNT. A biblioteca possui as normas impressas para consulta.

Lembrem-se: o pré-relatório é indivudual. Questões respondidas “em grupo” terão sua pontuação devidamente descontadas.

As respostas a estas perguntas devem ser enviadas ao professor de laboratório por email, em arquivo **pdf**, com nome, matrícula, data, e título do experimento, com o enunciado das perguntas, além de suas respostas, até as 23:59 do dia imediatamente anterior ao primeiro dia deste experimento.

Pré-relatórios não recebidos até este prazo não serão considerados.

Laboratório de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos
Experiência N° 03: Circuitos com diodos - 2017/02

Turma: _____ Data: _____

Alunos: _____ Matrícula: _____
 _____ Matrícula: _____
 _____ Matrícula: _____

III - Procedimento Experimental

Material necessário

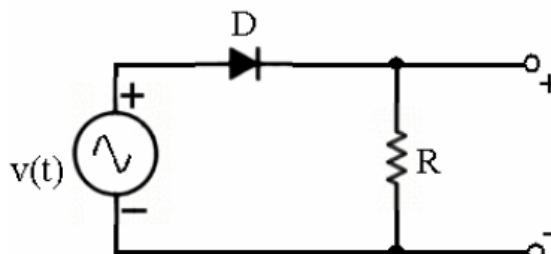
2 diodos 1N4007

2 diodos Zener BZX75C2V4 ou equivalente

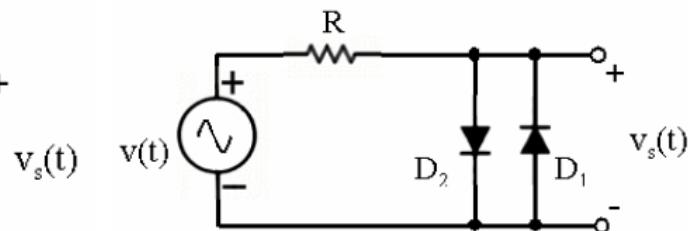
1 resistor 1 kΩ / 0,25W

Equipamentos: osciloscópio de dois canais, gerador de sinais

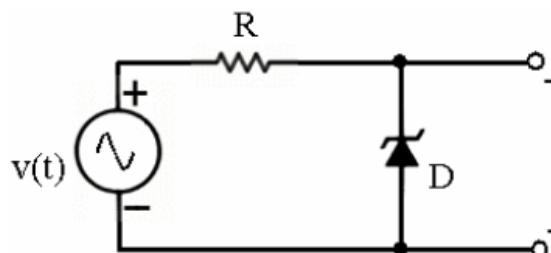
Experiências



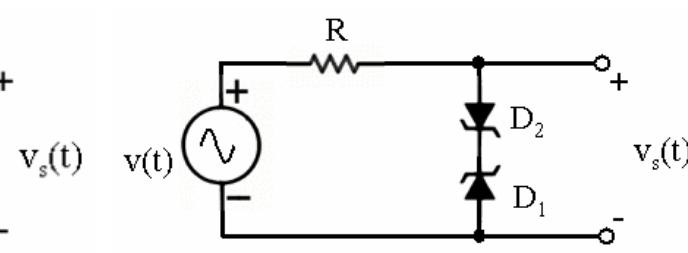
(a) $R = 1 \text{ k}\Omega / 0,25 \text{ W}$, $D = 1\text{N}4007$



(b) $R = 1 \text{ k}\Omega / 0,25 \text{ W}$, $D_1 = D_2 = 1\text{N}4007$



(c) $R = 1 \text{ k}\Omega / 0,25 \text{ W}$, $D = \text{BZX}75\text{C}2\text{V}4$



(d) $R = 1 \text{ k}\Omega / 0,25 \text{ W}$, $D_1 = D_2 = \text{BZX}75\text{C}2\text{V}4$

Figura 1. Circuitos usando diodos.

Experiência 1 (1,0 pt). Monte o circuito da Figura 1(a), com $v(t) = 10\text{sen}(120\pi t)$ sendo obtido por um gerador de funções. Capture as curvas de $v(t)$ e $v_s(t)$ do osciloscópio, indicando claramente os intervalos no tempo para os quais o(s) diodo(s) se encontra(m) em polarização direta, polarização reversa e em ruptura. Inclua as figuras em seu relatório.

Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Gleba A, Avenida L3 Norte, CEP 70.910-900, Brasília - DF
Caixa postal 4386, fone +55 61 3307 2300, fone/fax +55 61 3273 8893, ftd@unb.br, www.ft.unb.br

Experiência 2 (1,0 pt). Considere os mesmos procedimentos e questionamentos da Experiência 1, mas usando o circuito da Figura 1(b). Inclua as figuras em seu relatório.

Experiência 3 (1,0 pt). Considere os mesmos procedimentos e questionamentos da Experiência 1, mas usando o circuito da Figura 1(c). Inclua as figuras em seu relatório.

Experiência 4 (1,0 pt). Considere os mesmos procedimentos e questionamentos da Experiência 1, mas usando o circuito da Figura 1(d).

Questões experimentais e discussão

Questão 1. Utilize as curvas obtidas nas Experiências 1 a 4 para esboçar de forma sobreposta a resposta esperada para um diodo ideal. Indique no gráfico quais são os elementos do comportamento real de um diodo que provocam as diferenças observadas.

Explique as semelhanças e diferenças observadas entre os resultados obtidos experimentalmente nas experiências 1 a 4 em relação ao que foi previsto nas questões teóricas 5 a 8, respectivamente.

(1,0 pt para cada resultado experimental vs. resultado teoricamente previsto; total = 4,0 pts).

Questão 2. O circuito da figura 1(a) do Procedimento Experimental, onde a tensão no resistor é considerado a saída do circuito, costuma ser chamado de *circuito retificador*, enquanto que, se a saída do mesmo circuito fosse a tensão no diodo, o circuito seria chamado de um *circuito limitador*.

Determine a característica de transferência em cada caso, com a saída no eixo vertical e a entrada no eixo horizontal. Com base nestes curvas, explique por que um circuito é chamado de retificador, enquanto que o outro é chamado de limitador.

(1,0 pt para cada característica, com a explicação solicitada; total = 2,0 pts)

Que outros circuitos montados em laboratório podem ser considerados circuitos limitadores? Explique sucintamente sua resposta.

(+ 0,5 pt)

Utilize folhas avulsas para as curvas e explicações solicitadas, com as respostas a cada questão devidamente numeradas e na ordem em que foram feitas. Lembre-se de colocar o nome e a matrícula de cada componente do grupo, além da turma, tanto nestas folhas como nas folhas avulsas.