



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Docente: Rildo Afonso de Almeida

Dispositivos Eletrônicos



1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

- Os semicondutores são uma classe especial de elementos cuja condutividade está entre a de um bom condutor e a de um isolante.
- Os três semicondutores mais frequentemente usados na construção de dispositivos eletrônicos são Ge (Germânio), Si (Silício) e GaAs (Arseneto de Gálio) .

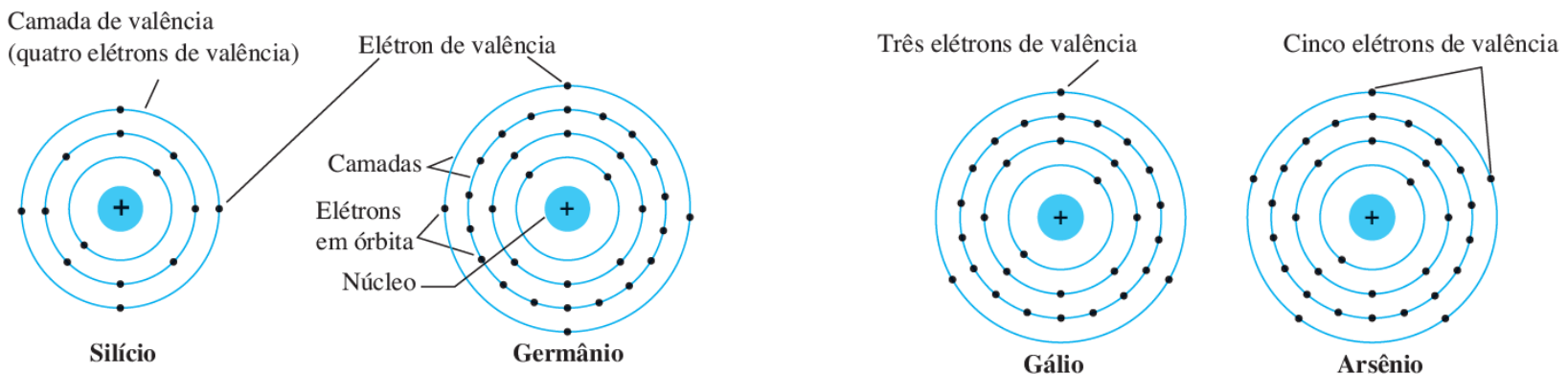
1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

- Nas primeiras décadas após a descoberta do diodo, em 1939, e do transistor, em 1947, usou-se quase exclusivamente o germânio, pois este era relativamente fácil de encontrar e estava disponível em quantidades razoavelmente grandes. Também era relativamente fácil de refinar até obter níveis muito elevados de pureza, um aspecto importante no processo de fabricação.
- Finalmente em 1954, o primeiro transistor de silício foi lançado, logo tornando-se o material semicondutor preferido. O silício é não só menos sensível à temperatura, como também um dos materiais mais abundantes da terra, eliminando qualquer preocupação quanto à sua disponibilidade.

1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

Ligações covalentes e materiais intrínsecos

Compreender plenamente por que Si, Ge e GaAs são os semicondutores preferenciais da indústria eletrônica requer algum conhecimento da estrutura atômica de cada um desses elementos e de como os átomos se ligam para formar uma estrutura cristalina. O silício tem 14 elétrons em órbita, o germânio tem 32, o gálio, 31, e o arsênio, 33 (o mesmo arsênio que é um agente químico extremamente venenoso).

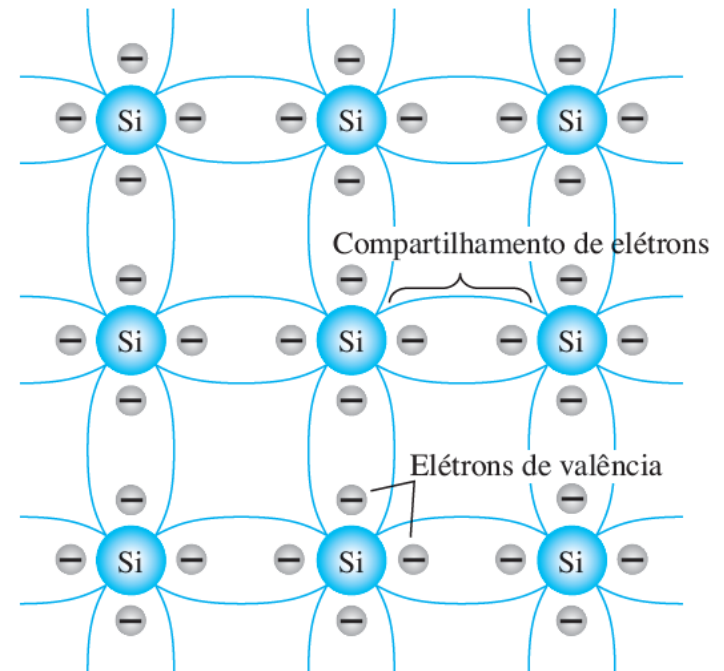


1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

Ligações covalentes e materiais intrínsecos

No germânio e no silício, há quatro elétrons na camada mais externa, chamados de *elétrons de valência*. O gálio tem três elétrons de valência e o arsênio, cinco. O termo *valência* é usado para indicar que o potencial (potencial de ionização) necessário para remover algum desses elétrons da estrutura atômica é significativamente menor do que o requerido para qualquer outro elétron na estrutura.

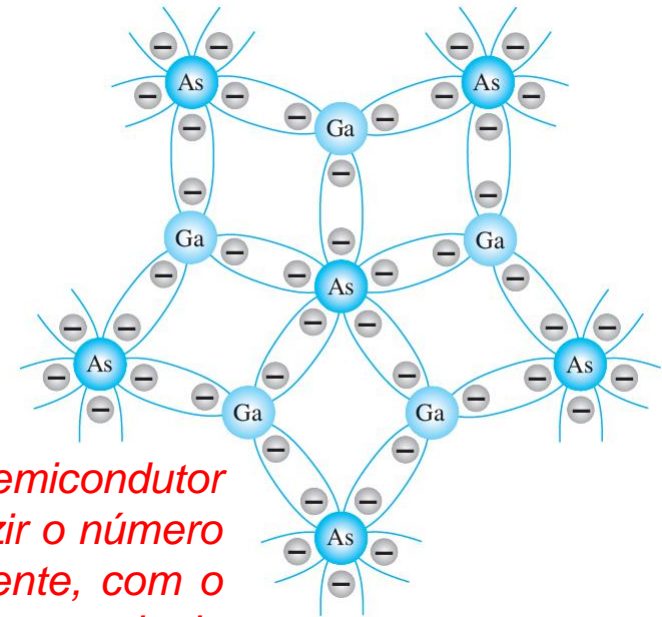
Em um cristal puro de silício ou germânio, os quatro elétrons de valência de um átomo formam um arranjo de ligação com quatro átomos adjacentes.



1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

Ligações covalentes e materiais intrínsecos

Como o GaAs é um semicondutor composto, existe compartilhamento entre os dois átomos diferentes. Cada átomo, de gálio ou arsênio, está rodeado por átomos do tipo complementar. Há, ainda, um compartilhamento de elétrons estruturalmente semelhante ao de Ge e Si, mas agora cinco elétrons são fornecidos pelo átomo As e três pelo Ga.



O termo intrínseco aplica-se a qualquer material semicondutor que tenha sido cuidadosamente refinado para reduzir o número de impurezas a um nível muito baixo essencialmente, com o grau máximo de pureza disponibilizado pela tecnologia moderna.



1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

Materiais dos tipos n e p

As características de um material semicondutor podem ser alteradas significativamente pela adição de átomos específicos de impureza ao material semicondutor relativamente puro. Tais impurezas, embora apenas adicionadas na proporção de uma parte em 10 milhões, podem alterar a estrutura de banda a ponto de modificar totalmente as propriedades elétricas do material.

Tanto os materiais do tipo n quanto os do tipo p são formados pela adição de um número predeterminado de átomos de impureza a uma base de silício.

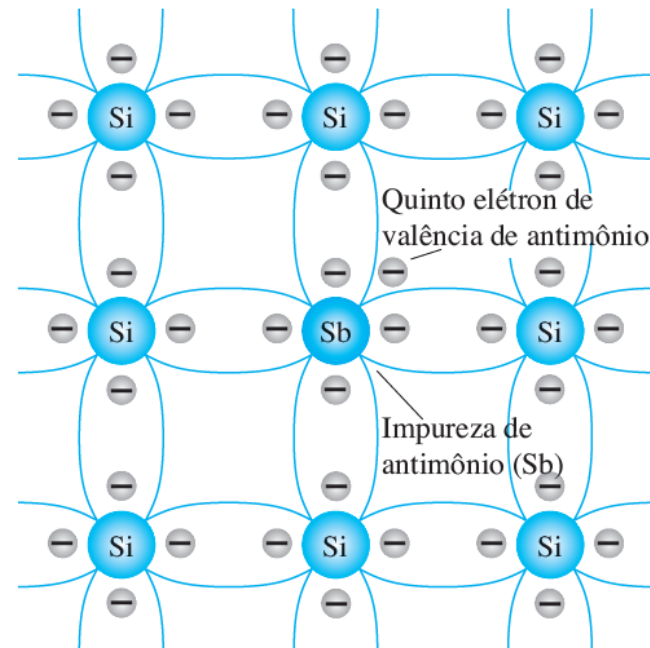
Um material semicondutor que tenha sido submetido ao processo de dopagem é chamado de material extrínseco.

1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

Material do tipo *n*

Um material do tipo *n* é criado pela introdução de elementos de impureza que têm *cinco* elétrons de valência (*pentavalentes*), tais como *antimônio*, *arsênio* e *fósforo*.

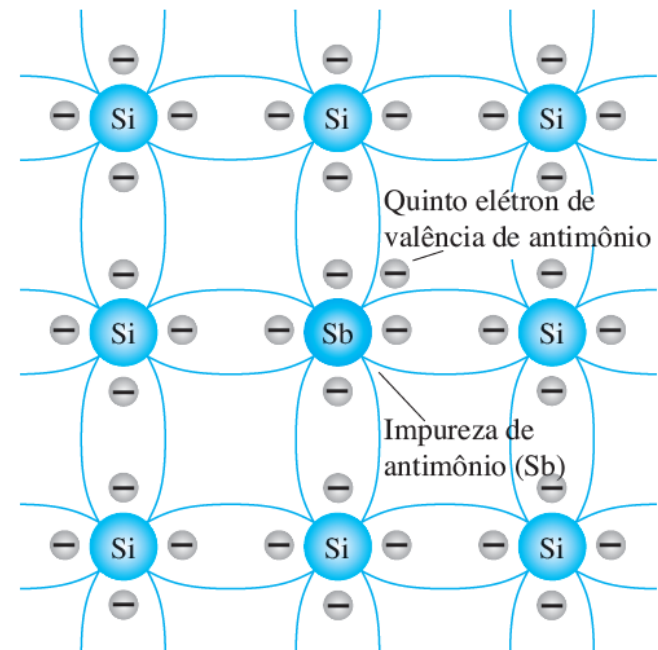
O efeito desses elementos utilizando antimônio como a impureza em uma base de silício é mostrado na figura abaixo.



1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

Material do tipo n

Note que as quatro ligações covalentes ainda estão presentes. Há, porém, um quinto elétron adicional devido ao átomo de impureza, o qual está *dissociado* de qualquer ligação covalente em especial. Esse elétron restante, fracamente ligado ao seu átomo de origem (antimônio), é relativamente livre para se mover dentro do recém-formado material do tipo *n*, uma vez que o átomo de impureza inserido doou um elétron relativamente “livre” para a estrutura:

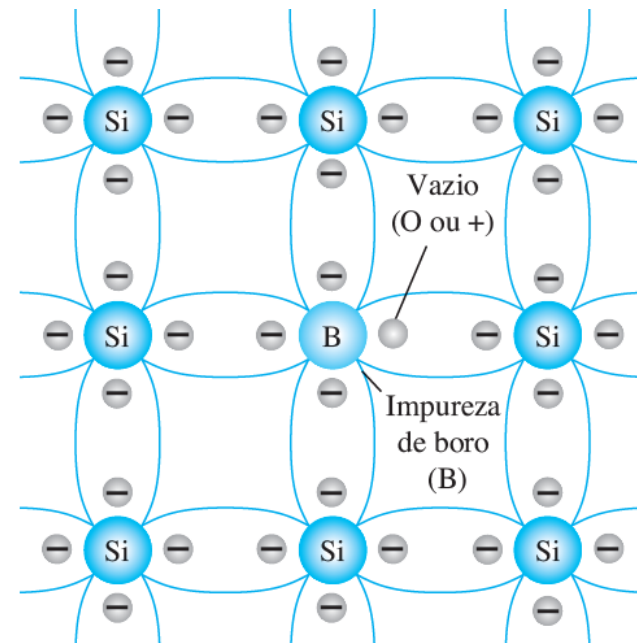


Impurezas difundidas com cinco elétrons de valência são chamadas de átomos doadores.

1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

Material do tipo p

O material do tipo p é formado pela dopagem de um cristal puro de germânio ou silício com átomos de impureza que possuem *três* elétrons de valência. Os elementos mais comumente utilizados para esse fim são *boro*, *gálio* e *índio*.

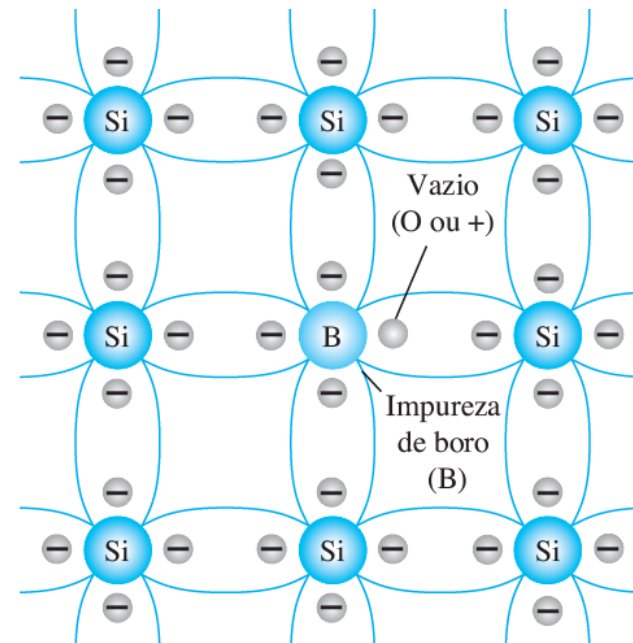


As impurezas difundidas com três elétrons de valência são chamadas de átomos aceitadores.

1 - Propriedades dos materiais semicondutores.

Material do tipo p

Note que agora o número de elétrons é insuficiente para completar as ligações covalentes e o espaço vazio resultante é chamado de *lacuna* e representado por um círculo pequeno ou um sinal positivo, indicando a ausência de uma carga negativa. Uma vez que a lacuna resultante *aceitará* prontamente um elétron livre.



1.1 – Junção pn

DIODOS

O diodo é um componente eletrônico de dois terminais, que conduz corrente elétrica preferivelmente em um só sentido, bloqueando a sua passagem no sentido oposto.





1.1 – Junção pn

DIODOS

Os diodos modernos são feitos de um cristal semicondutor, como o silício, ao qual são adicionadas impurezas, no intuito de criar uma região de portadores negativos (elétrons), chamada região "tipo-n", e uma região de portadores positivos (lacunas), denominada região "tipo-p".



1.1 – Junção pn

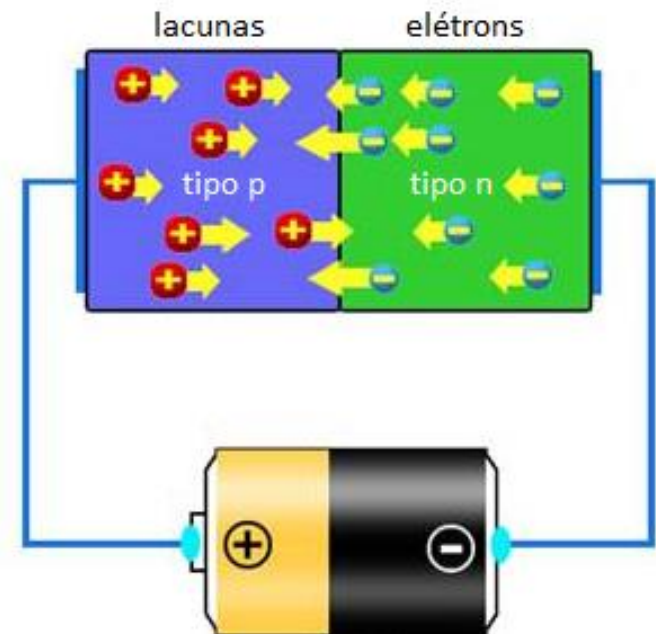
DIODOS

Os terminais do diodo são conectados a cada uma dessas regiões. No interior do cristal, a fronteira entre essas duas regiões é chamada de junção PN, sendo responsável pela característica unidirecional do componente.

1.1 – Junção pn

DIODOS

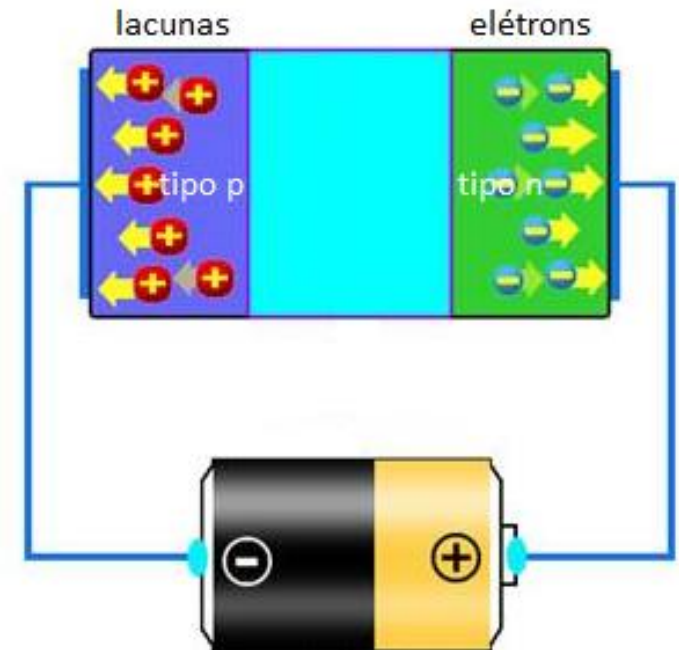
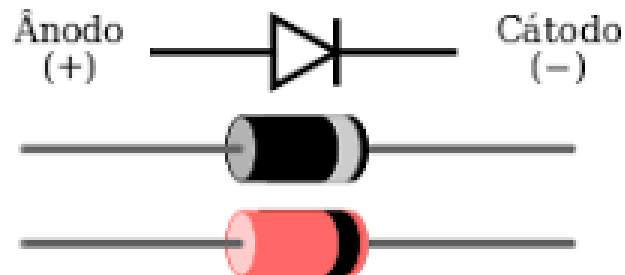
Utilizando uma explicação bastante simplificada, pode-se dizer que quando o diodo é polarizado de forma direta, isto é, quando uma tensão positiva é aplicada ao terminal conectado à região tipo-p (anodo) e uma tensão negativa é aplicada ao outro terminal (catodo), a barreira criada pela junção PN diminui, permitindo a passagem da corrente elétrica.



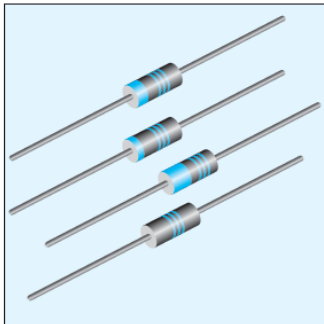
1.1 – Junção pn

DIODOS

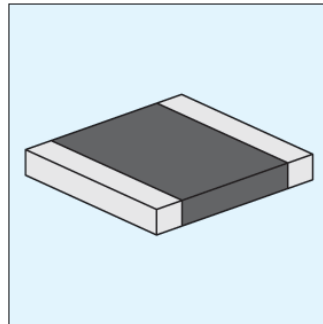
De forma contrária, quando o diodo é polarizado reversamente, a barreira aumenta, impedindo a passagem da corrente.



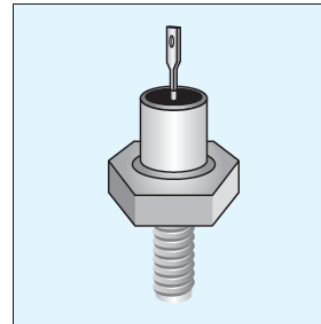
1.1 – Junção pn



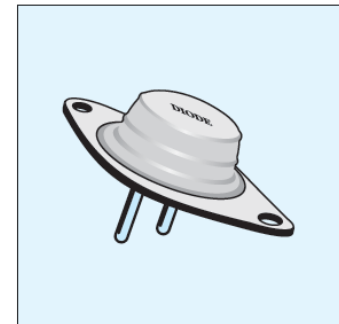
Diodo de uso geral



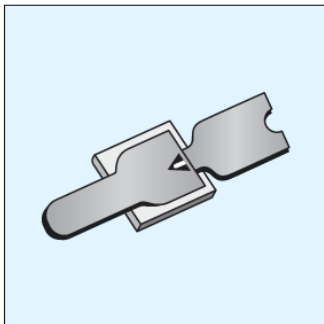
Diodo PIN de alta potência para montagem em superfície



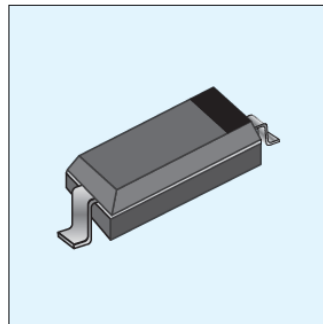
Diodo de potência (com rosca)



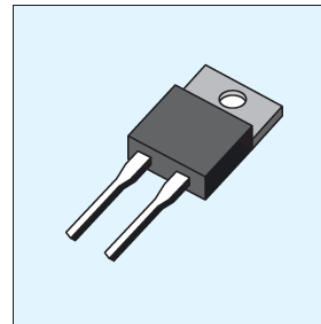
Diodo de potência (com tecnologia planar)



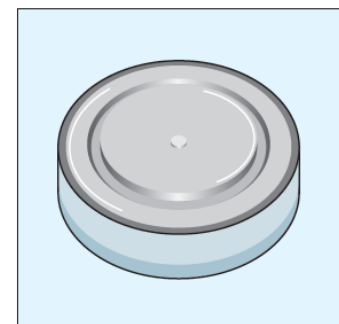
Diodo PIN (beam lead)



Diodo chip para montagem em superfície



Diodo de potência

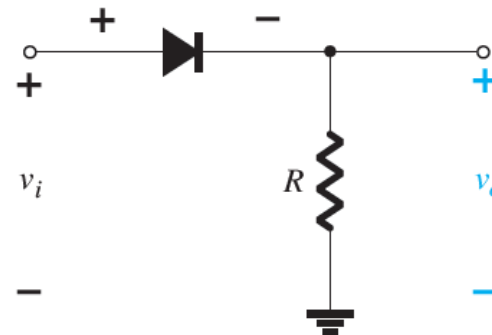
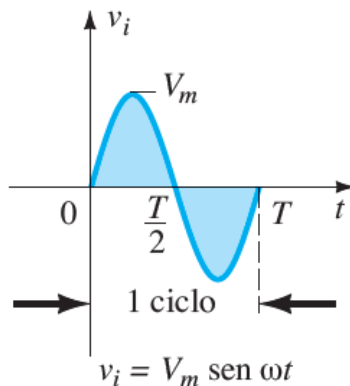


Diodo de potência (tipo disco)

1.2 – Circuitos retificadores – Meia onda

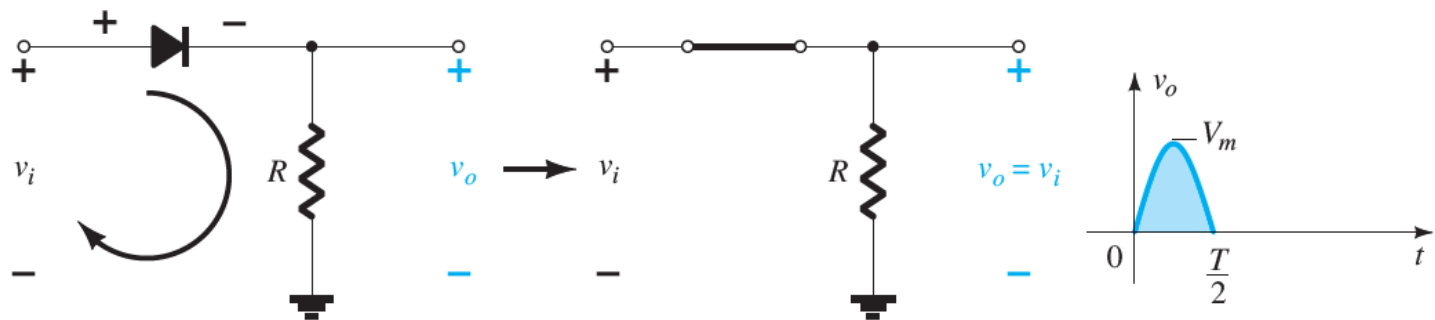
Quando empregado no processo de retificação, o diodo é denominado *retificador*.

O circuito abaixo, chamado de *retificador de meia-onda*, originará uma forma de onda v_o que possuirá um valor médio de uso particular no processo de conversão CA-CC.



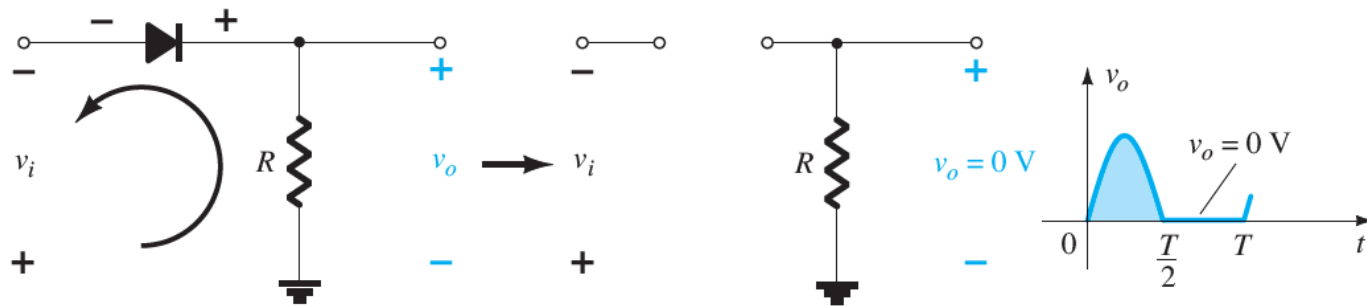
1.2 – Circuitos retificadores – Meia onda

Durante o intervalo $t = 0 \rightarrow T/2$, a polaridade da tensão aplicada v_i é tal que estabelece “pressão” no sentido indicado e liga o diodo com a polaridade que aparece acima dele.



1.2 – Circuitos retificadores – Meia onda

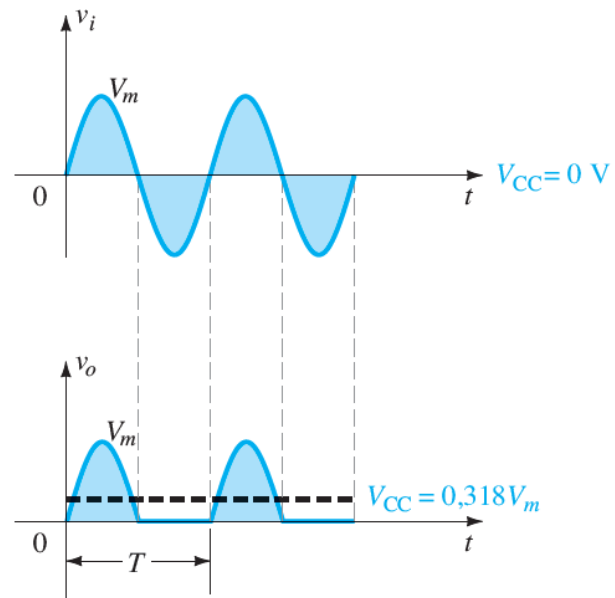
Para o período $T/2 \rightarrow T$, a polaridade da entrada v_i é mostrada abaixo, e a polaridade resultante através do diodo ideal produz um estado “desligado” com um circuito aberto equivalente.



1.2 – Circuitos retificadores – Meia onda

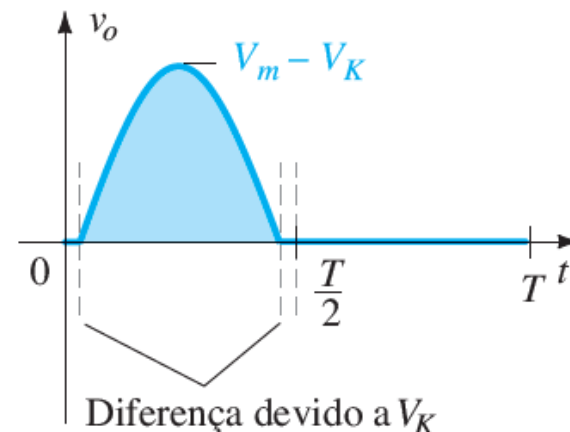
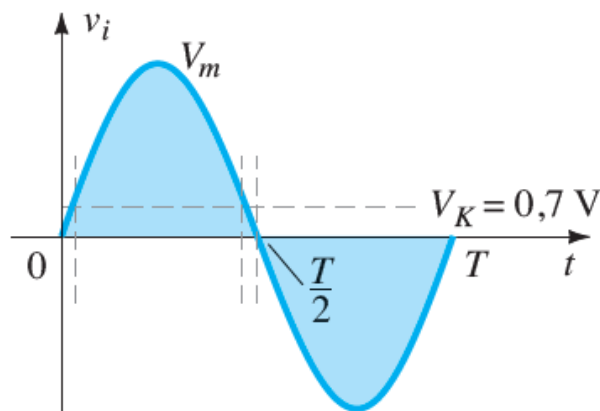
O sinal de saída v_o agora tem uma área resultante média acima do eixo sobre um período completo e um valor médio determinado por: $V_{CC} = 0,318 V_m$ meia-onda

O processo de remoção da metade do sinal de entrada para estabelecer um nível CC é apropriadamente denominado **retificação de meia-onda**.



1.2 – Circuitos retificadores – Meia onda

O efeito da utilização de um diodo de silício com $V_K = 0,7 \text{ V}$ está demonstrado abaixo para a região de polarização direta. O sinal aplicado deve ser agora, no mínimo, $0,7 \text{ V}$ para que o diodo possa entrar no estado “ligado”. Para valores de v_i menores do que $0,7\text{V}$, o diodo ainda é um circuito aberto e $v_o = 0 \text{ V}$.



1.2 – Circuitos retificadores – Meia onda

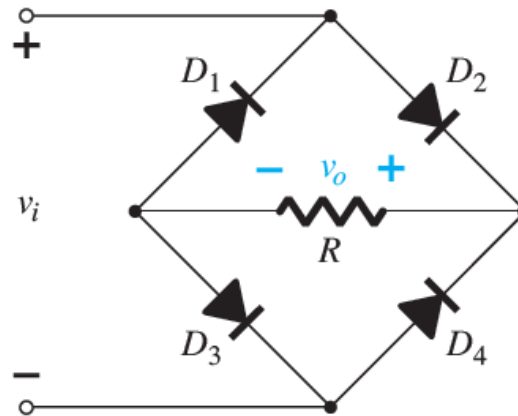
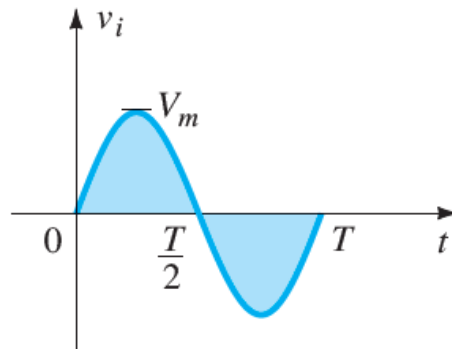
A tensão de pico inversa do diodo (PIV ou PRV — Peak Reverse Voltage) é de grande importância no projeto de sistemas de retificação. Lembre-se de que é a tensão máxima nominal do diodo que não deve ser ultrapassada na região de polarização reversa ou o diodo entrará na região de avalanche.

$$\text{PIV máxima} \cong V_m$$

retificador de meia onda

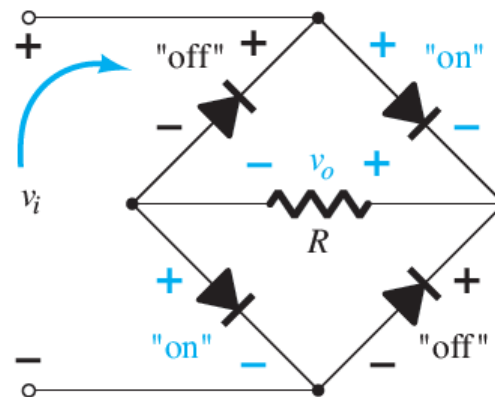
1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

O nível CC obtido a partir de uma entrada senoidal pode ser melhorado 100% utilizando-se um processo chamado de *retificação de onda completa*.



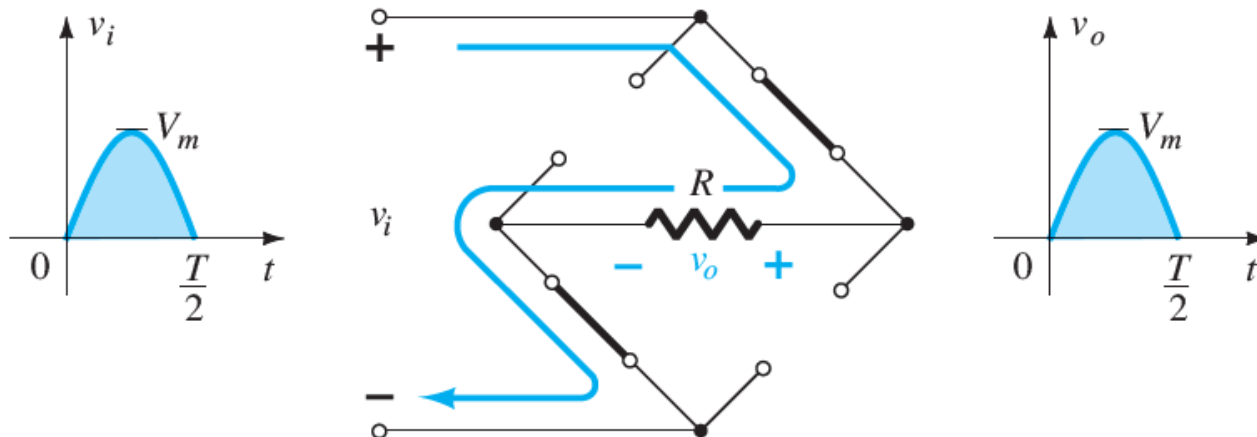
1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

Durante o período que vai de $t = 0$ até $T/2$, a polaridade da tensão de entrada é mostrada abaixo. As polaridades resultantes através dos diodos ideais também são mostradas, revelando que $D2$ e $D3$ estão conduzindo (“on”), enquanto $D1$ e $D4$ estão no estado “desligado” (“off”).



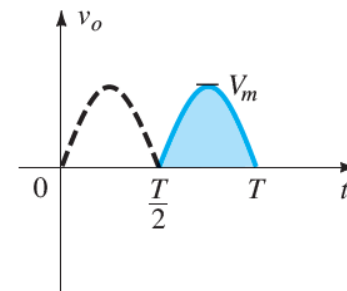
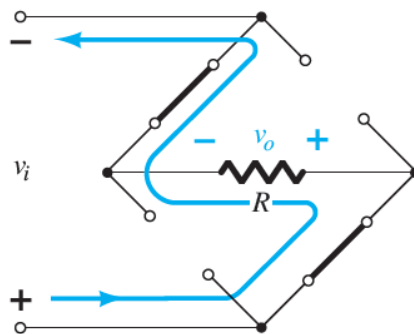
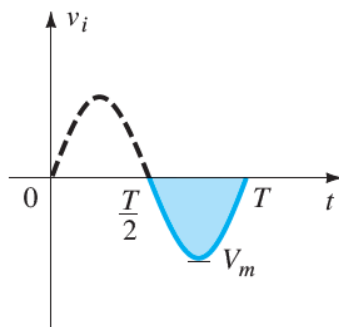
1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

O resultado é a configuração abaixo com a indicação da corrente e da polaridade através de R . Visto que os diodos são ideais, a tensão na carga é $v_o = v_i$, como mostra a figura.



1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

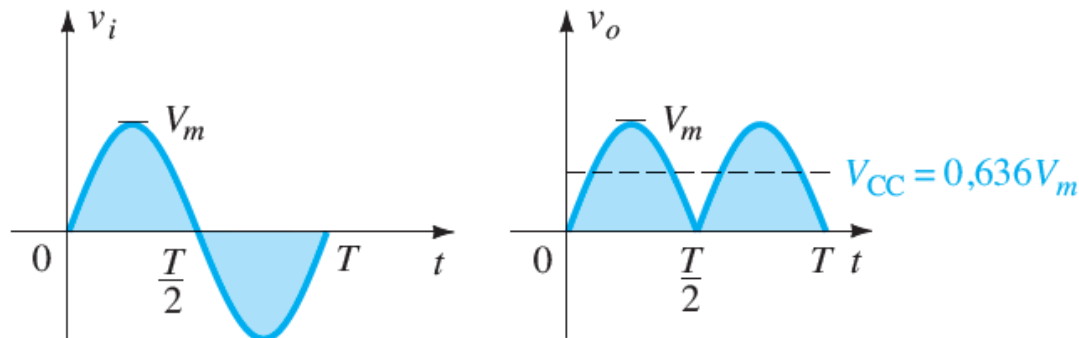
Para a região negativa da entrada, os diodos $D1$ e $D4$ estão conduzindo, resultando na configuração abaixo. O resultado importante é que a polaridade através do resistor de carga R é a mesma que aparece na Figura do slide anterior, estabelecendo um segundo pulso positivo, como mostrado a seguir.



1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

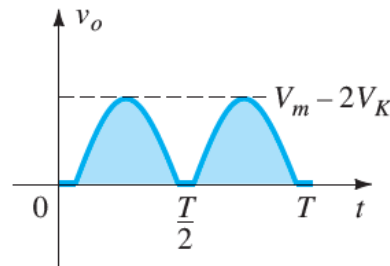
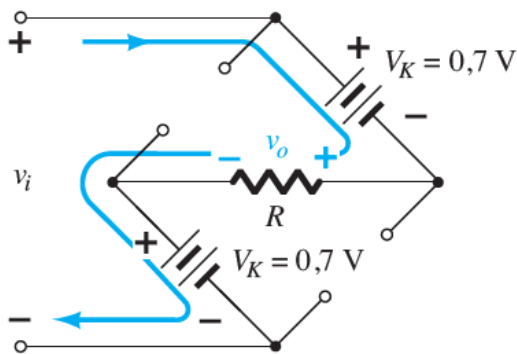
Ao longo de um ciclo completo, as tensões de entrada e saída aparecerão conforme mostrado abaixo. Uma vez que a área acima do eixo para um ciclo completo agora é o dobro da área obtida para um retificador de meia-onda, o valor CC também foi dobrado.

$$V_{CC} = 2(0,318 V_m)$$



1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

Se fossem empregados diodos de silício em vez de diodos ideais, como mostra a Figura abaixo, a aplicação da Lei das Tensões de Kirchhoff ao longo do caminho de condução resultaria em:



$$v_i - V_K - v_o - V_K = 0$$

$$v_o = v_i - 2V_K$$

O valor de pico da tensão de saída V_o é, portanto,

$$V_{o_{\text{máx}}} = V_m - 2V_K$$

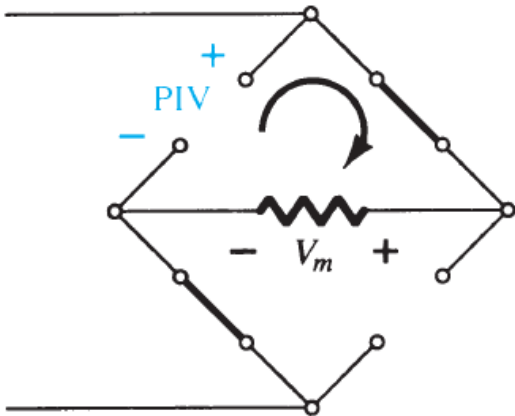
1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

Para situações em que $V_m \gg 2V_K$, pode-se aplicar a seguinte equação para o valor médio com um grau relativamente alto de precisão:

$$V_{CC} \cong 0,636(V_m - 2V_K)$$

1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

A PIV necessária para cada diodo (ideal) pode ser determinada a partir da Figura abaixo, obtida no pico da região positiva do sinal de entrada. Para a malha indicada, a tensão máxima através de R é V_m e a PIV máxima é definida por:



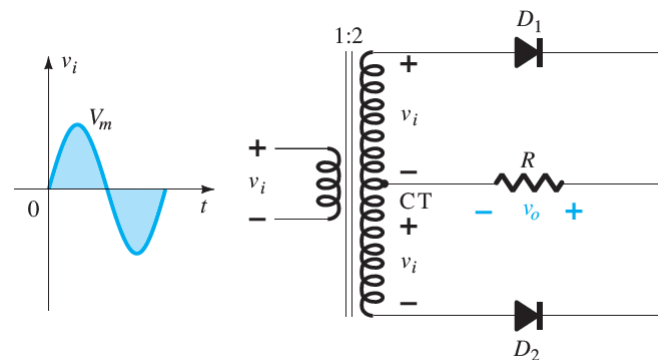
$$PIV \cong V_m$$

retificador de onda completa em ponte

1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

Transformador com derivação central

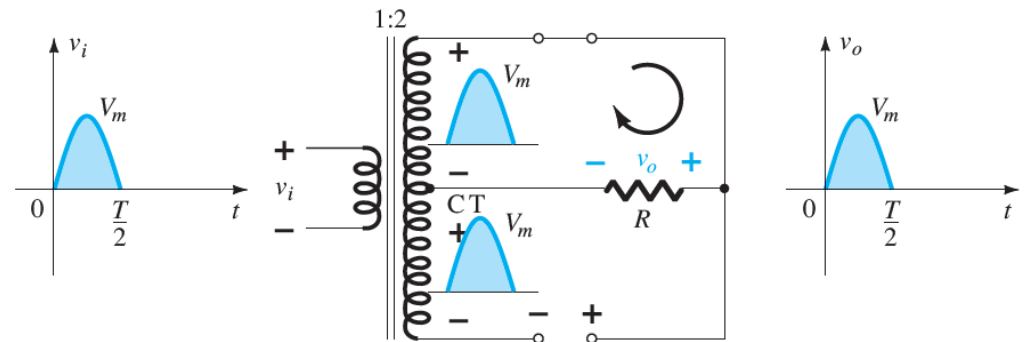
Um segundo retificador de onda completa bastante conhecido é mostrado na abaixo, que tem somente dois diodos, mas requer um transformador com derivação central (CT — *center-tapped*) para estabelecer o sinal de entrada em cada seção do secundário do transformador.



1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

Transformador com derivação central

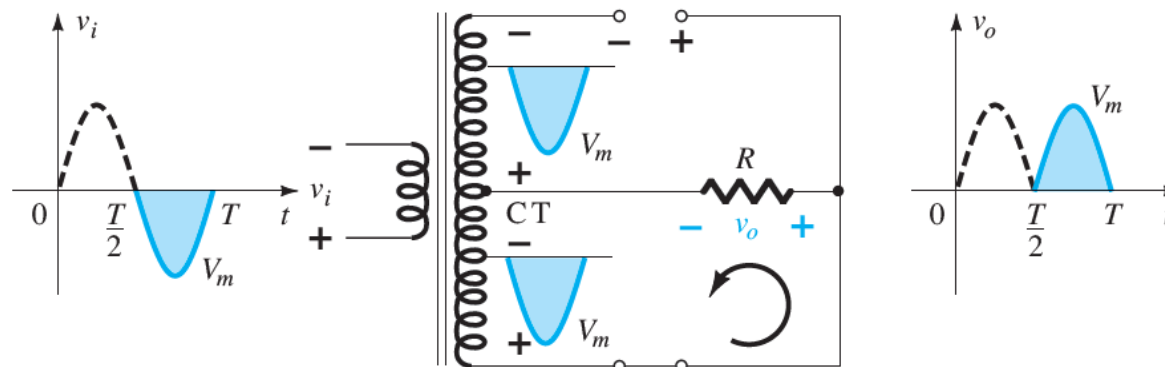
Durante a porção positiva de v_i aplicada ao primário do transformador, o circuito se comportará como mostra abaixo, com um pulso positivo através de cada seção do enrolamento secundário. $D1$ assume o curto-circuito equivalente e $D2$, o circuito aberto equivalente, conforme determinado pelas tensões no secundário e pelos sentidos das correntes resultantes. A tensão de saída aparece como ilustrado na Figura.



1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

Transformador com derivação central

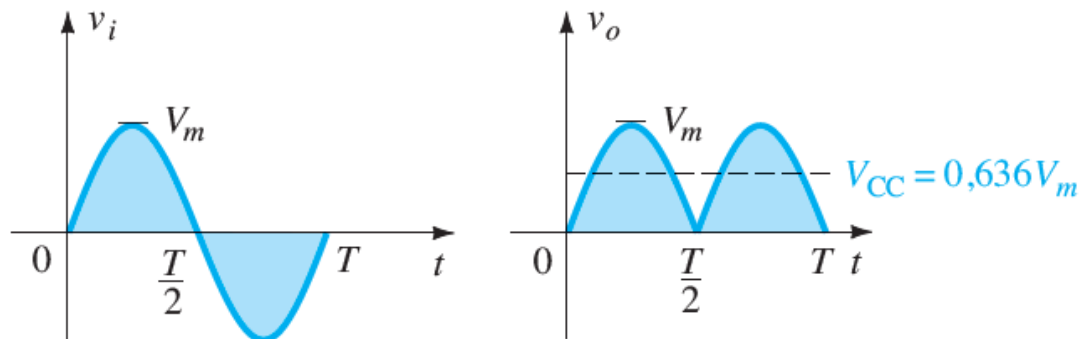
Durante a porção negativa da entrada, o circuito aparece como mostra a Figura abaixo, invertendo as funções dos diodos, mas com a mesma polaridade de tensão através do resistor de carga R .



1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

Transformador com derivação central

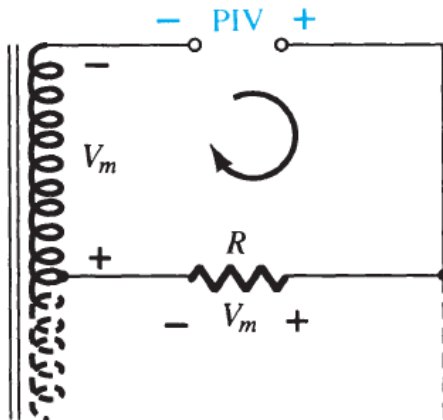
O efeito é a mesma forma de onda de saída que a exibida no retificador em ponte, com os mesmos níveis CC.



1.2 – Circuitos retificadores – Onda Completa

Transformador com derivação central

O circuito da Figura abaixo nos ajudará a determinar a PIV para cada diodo nesse retificador de onda completa. Aplicar tensão máxima no secundário (V_m), conforme estabelecido pela malha adjacente, resultará em:



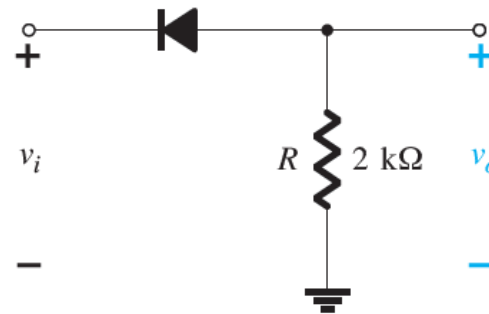
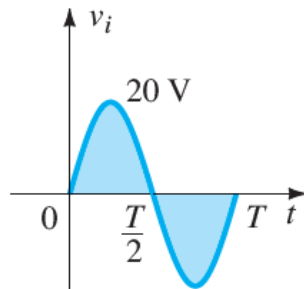
$$\begin{aligned} \text{PIV} &= V_{\text{secundário}} + V_R \\ &= V_m + V_m \end{aligned}$$

$$\text{PIV} \cong 2V_m$$

Transformador CT,
retificador de onda completa

1.2 – Circuitos retificadores – Exercício

1) Baseado na figura abaixo.



- Esboce a tensão de saída v_o e determine o valor CC de saída para o circuito.
- Repita o item (a) se o diodo ideal for substituído por um diodo de silício.
- Repita os itens (a) e (b) se V_m for aumentada para 200 V e compare as soluções utilizando as equações:

$$V_{CC} = 0,318 V_m$$

$$V_{CC} \cong 0,318(V_m - V_K)$$



Bibliografia Básica

- 1-SEDRA, A.S. &SMITH, C. **Microeletrônica**, 4ª ed, Makron Books,2005.
- 2-MILLMAN, J. & HALKAIS, C.C, **Eletrônica**, 2ª ed, vol ½, McGrawHill do Brasil, 1981.
- 3-RASHID, M. H. **Power Electronics: Circuits, Devices and Applications**, 2ª ed, Prentice-Hall International, 1988.



Bibliografia Complementar

- 1-MALVINO, Albert Paul. **Electronic Principles with Simulation CD**. McGraw-Hill Professional. 7ª edição. 2006.
- 2-BOYLESTAD, Robert ; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. Prentice Hall. 8a edição. , 2007.
- 3-MOHAN, N.; UNDERLAND, T. M. & ROBBINS, W.P **Power Electronics: Converters, Applications and Design**, 2ª ed, John Wiley and Sons, 1995.
- 4-RESENDE, S. M. **A física de materiais e dispositivos eletrônicos**, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil, 1996