

SEMICONDUCTORES

CONDUÇÃO NO ESTADO SÓLIDO

A JUNÇÃO PN - RETIFICADORES

Os semicondutores sem qualquer sombra de dúvida revolucionaram a tecnologia dos circuitos eletrônicos, por se tratarem de dispositivos de pequenas dimensões aliadas a uma operação eficiente e confiável.

Os diodos e os transistores bipolares são os dispositivos semicondutores mais conhecidos e utilizados. O transistor foi inventado em 1.948 por J. Bardeen e W. H. Brattain da *Bell Telephone Laboratories*.

O nome transistor é derivado de *transferência de resistência*, indicando assim um dispositivo de estado sólido.

Os elementos germânio e silício são os mais utilizados na fabricação de diodos e transistores.

DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

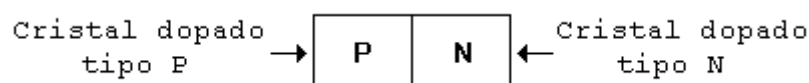
O semicondutor é um material que possui uma resistência entre um condutor e um isolante. A principal característica de um semicondutor é a sua estrutura atômica, que permite uma condução maior, mediante a adição de impurezas.

A adição de elementos de impureza em uma estrutura pura de germânio ou silício denomina-se *dopagem*.

A finalidade da dopagem é aumentar a quantidade de cargas livres (positivas ou negativas), que podem mover-se mediante uma tensão externa.

Quando o número de elétrons livres (cargas negativas) é aumentado, o semicondutor é do tipo negativo ou tipo N; diminuindo o número de elétrons livres o semicondutor torna-se do tipo P. Desta forma no semicondutor dopado do tipo N prevalecem as cargas negativas, enquanto que no tipo P prevalecem as cargas positivas.

Quando os dois tipos são unidos, o resultado é uma junção PN ou NP.



Uma junção PN é na realidade um *diodo semicondutor*, que tem como característica principal conduzir corrente em uma única direção.

CARACTERÍSTICAS DO SEMICONDUTOR

As principais características do semicondutor puro (sem dopagem) são:

- resistência maior do que os condutores metálicos, porém menor do que isolantes;
- coeficiente negativo, isto é, a resistência diminui com o aumento da temperatura;
- a valência dos átomos que constituem esses semicondutores é ± 4 ; isto significa que a última camada desses átomos possui 4 elétrons.

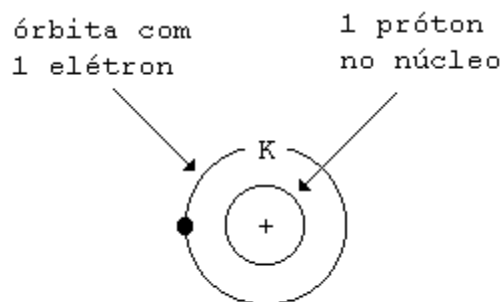
ELÉTRONS E PRÓTONS NO ÁTOMO

Embora existam várias maneiras de agrupamento dos elétrons e prótons em um átomo, existe uma combinação específica que resulta em um arranjo estável do mesmo, isto é, cada tipo de combinação estável de elétrons e prótons determina o tipo de átomo.

Os átomos possuem um núcleo composto por prótons (com carga positiva) e nêutrons (sem carga), prevalecendo então no núcleo carga positiva e, elétrons nas órbitas (carga negativa), formando assim um arranjo eletricamente estável por possuírem uma quantidade de prótons no núcleo igual ao número de elétrons nas órbitas. A quantidade de prótons no núcleo e elétrons nas órbitas é denominada número atômico (NA); a quantidade de prótons no núcleo é igual a quantidade de elétrons nas órbitas.

As órbitas são anéis concêntricos ao redor do núcleo nos quais estão os elétrons em um movimento semelhante ao do sistema solar, no qual os planetas giram em torno do sol e em torno de si mesmos. O movimento de rotação de um elétron é denominado *spin*.

Por exemplo, o átomo de hidrogênio cujo arranjo é mostrado abaixo possui em sua estrutura um elétron e um próton.



ÁTOMO DE HIDROGÊNIO

O átomo de hidrogênio possui NA (número atômico) igual a 1, isto é, possui apenas um elétron na órbita K e um próton no núcleo.

O núcleo tende a atrair o único elétron enquanto que o elétron tende a vencer a força de atração do núcleo. Como essas forças são mecanicamente balanceadas, o elétron permanece em sua órbita ao redor do núcleo. O próton e o núcleo possuem

carga elementar igual ($1,6 \times 10^{-19}$ C), porém a massa do núcleo é cerca de 1.840 vezes maior do que a massa do elétron.

Os átomos podem ter várias órbitas ou camadas (no máximo sete), nas quais estão distribuídos os elétrons. Estas camadas são identificadas pelas letras K, L, M, N, O, P e Q. Cada órbita possui um número máximo de elétrons, determinando assim as características do elemento.

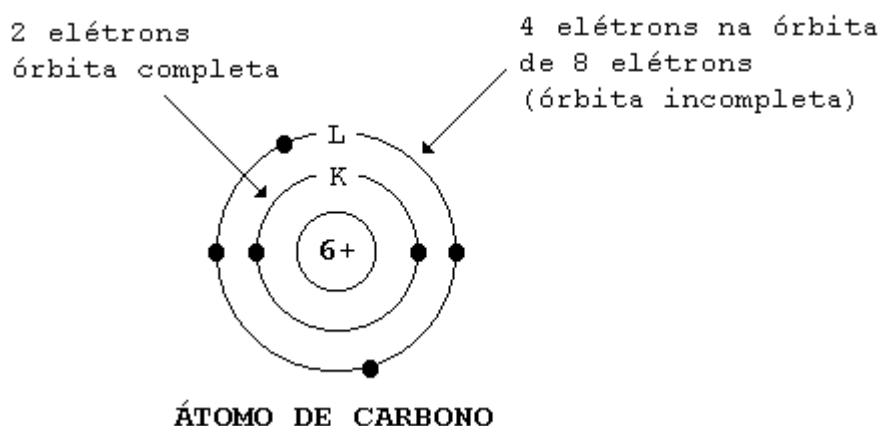
A tabela abaixo mostra as órbitas de um átomo e a quantidade máxima de elétrons por órbita.

ÓRBITA OU CAMADA	Nº MÁXIMO DE ELÉTRONS
K	2
L	8
M	8 ou 18
N	8, 18 ou 32
O	8 ou 18
P	8 ou 18
Q	8

É de especial importância a quantidade de elétrons na órbita ou camada mais distante do núcleo.

A camada externa¹ requer 8 elétrons para a estabilidade do átomo, exceto quando o mesmo possui apenas uma órbita a qual tem no máximo 2 elétrons.

O átomo de carbono, cuja configuração é mostrada abaixo possui 6 elétrons, e, portanto $NA = 6$.



Observa-se que na última camada existem apenas 4 elétrons, a qual pode ter no máximo 8 elétrons estando, portanto, incompleta.

¹ A camada externa recebe também o nome de valência

Quando vários átomos de carbono são agrupados, tendem a entrar em covalência, compartilhando os elétrons de sua última camada.

Desta forma em uma ligação covalente cada átomo de carbono enxerga na última camada 8 elétrons, o que constitui uma configuração estável.

Átomos com 8 elétrons na última camada apresentam uma configuração estável, isto é, não tendem a doar e nem receber elétrons a não ser em condições especiais como calor, luz, campo elétrico, etc.

RESUMINDO:

Átomos estáveis: são átomos com a última camada saturada;

Átomos quimicamente ativos: são átomos que não possuem a última camada saturada;

Elétrons de valência: são os elétrons da última camada ou órbita de um átomo;

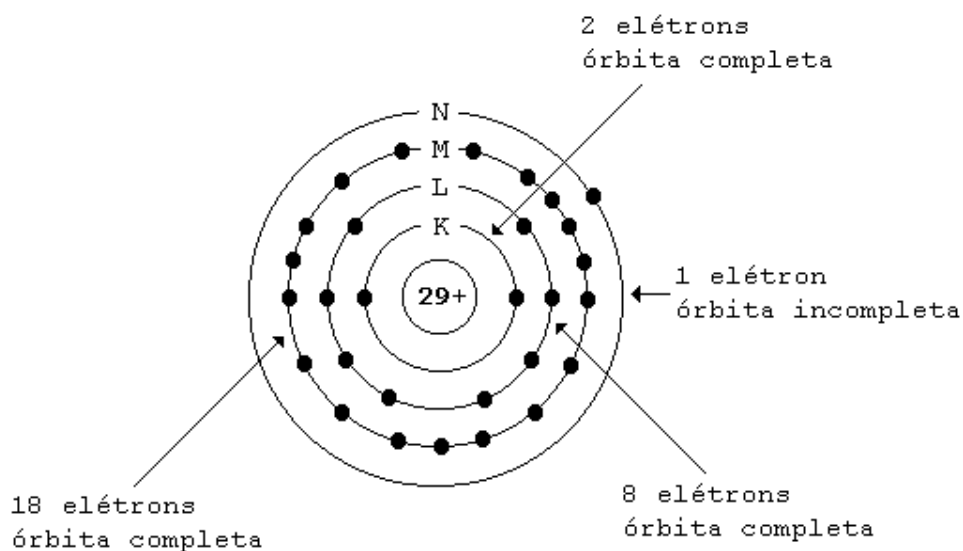
Elétrons livres: são os elétrons que participam da corrente eletrônica.

CONDUTORES, ISOLANTES E SEMICONDUTORES

Quando os elétrons podem mover-se facilmente de átomo para átomo em um material, este é denominado condutor. Em geral os metais são bons condutores, sendo a prata o melhor vindo em seguida o cobre.

A estrutura atômica dos condutores permite que os elétrons da última camada movimentem-se facilmente com um mínimo de oposição.

O cobre, cuja estrutura é mostrada abaixo é um excelente condutor, pois possui na última camada apenas 1 elétron, o qual pode movimentar-se com muita facilidade. Em virtude disto, este elétron recebe o nome de *elétron livre*.



ÁTOMO DE COBRE (Cu)

Em geral os bons condutores possuem apenas 1 elétron na última órbita ou camada de valência.

Os materiais cujos átomos tendem a permanecer em suas camadas de valência são denominados *isolantes* porque não podem conduzir corrente elétrica com facilidade.

No entanto, os isolantes são capazes de armazenar eletricidade melhor do que os condutores.

Materiais como mica, vidro, borracha, papel, etc. são também denominados *dielétricos*, muito utilizados na fabricação de capacitores.

Desta forma, os isolantes são muito úteis quando se deseja bloquear a passagem de corrente.

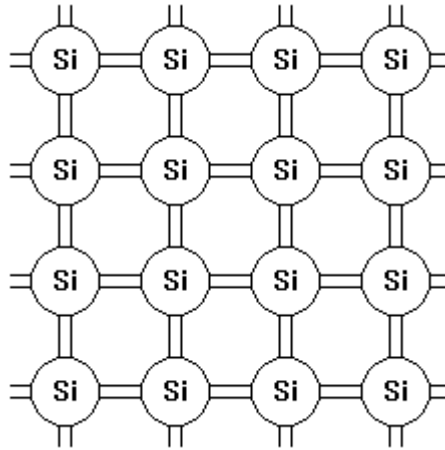
O semicondutor é um elemento que conduz menos do que os metais condutores porém muito mais do que os isolantes (carbono, germânio e silício são os semicondutores mais conhecidos).

A tabela a seguir mostra alguns tipos de condutores e semicondutores.

GRUPO	ELEMENTO	SÍMBOLO	Nº ATÔMICO	ELÉTRON DE VALÊNCIA
Metais condutores, em ordem de condutância	Prata	Ag	47	+1
	Cobre	Cu	29	+1
	Ouro	Au	79	+1
	Alumínio	Al	13	+3
	Ferro	Fe	26	+2
Semicondutores	Carbono	C	6	±4
	Silício	Si	14	±4
	Germânio	Ge	32	±4
Gases ativos	Hidrogênio	H	1	±1
	Oxigênio	O	8	-2
Gases inertes	Hélio	He	2	0
	Neon	Ne	10	0

ESTRUTURA DO CRISTAL

A figura a seguir ilustra um bloco de silício onde seus átomos estão ligados em covalência de tal forma a formar uma treliça cristalina pura, compartilhando seus elétrons de valência.



Cada átomo de silício dentro da estrutura cristalina enxerga 8 elétrons na camada de valência caracterizando assim uma configuração estável.

A estrutura acima ilustrada recebe o nome de cristal intrínseco pois não possui qualquer tipo de dopagem. Um cristal intrínseco tende a se comportar como um isolante em baixas temperaturas.

CORRENTE INTRÍNSECA

Quando um cristal intrínseco de germânio ou silício não sofre influências externas como luz e calor por exemplo, os elétrons de seus átomos tendem a permanecer em suas órbitas com suas ligações covalentes, pois neste caso não há nenhum meio de romper essas ligações e portanto, não há elétrons livres para estabelecer corrente eletrônica.

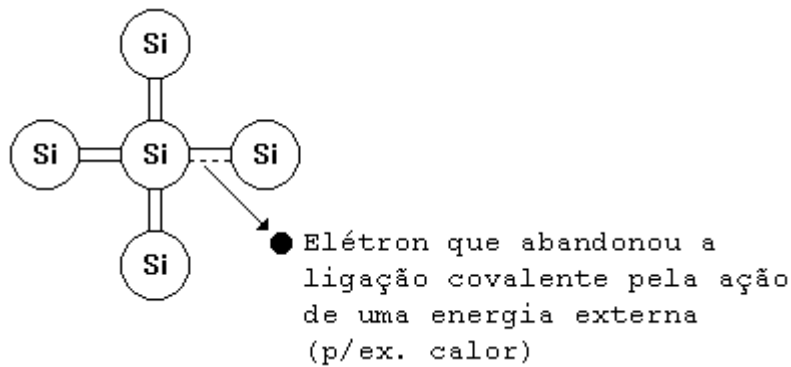
Particularmente em baixas temperaturas as ligações covalentes permanecem intactas e o cristal tende a comportar-se como um isolante.

Em temperaturas mais elevadas (como por exemplo uma fonte de calor externa), há energia térmica suficiente para fazer com que o cristal liberte alguns elétrons de suas ligações covalentes, que podem movimentar-se aleatoriamente dentro do cristal.

Ligações covalentes também podem ser quebradas pela ação de um campo elétrico proveniente de uma diferença de potencial.

Quando uma ligação covalente é quebrada fica com deficiência de um elétron e portanto o átomo assume a condição de íon positivo, uma vez que a quantidade de elétrons passa a ser menor do que o número de prótons no núcleo.

Isto equivale dizer que quando o elétron deixa o átomo este adquire carga positiva.



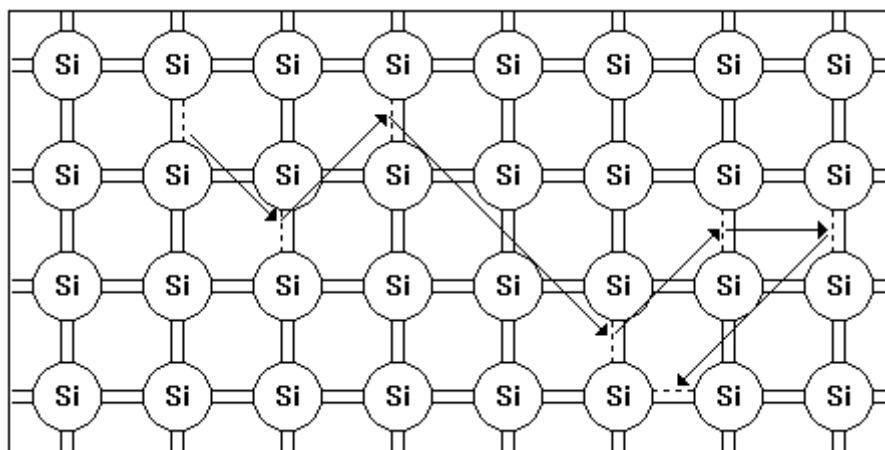
Para cada elétron que deixa o átomo origina-se uma lacuna, logo, o número de elétrons e lacunas está equilibrado dentro da estrutura atômica de um material semiconductor puro.

A quantidade de elétrons e lacunas que se forma dentro da estrutura do material depende da quantidade de energia aplicada (mais calor, mais ligações covalentes quebradas).

Os elétrons percorrem a estrutura até se alojarem nas lacunas, onde pode deduzir-se que as lacunas percorrem a estrutura de forma análoga aos elétrons, porém em sentido contrário. Neste caso o movimento de elétrons e lacunas recebe o nome de corrente intrínseca.

Portanto, a corrente intrínseca ocorre em virtude da quebra de ligações covalentes em uma estrutura cristalina, proveniente de fontes externas de energia.

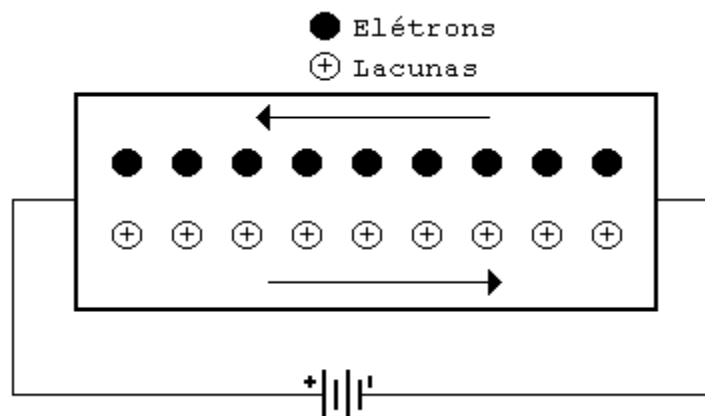
A figura a seguir mostra o movimento aleatório da corrente eletrônica em uma estrutura cristalina intrínseca submetida a uma fonte externa de energia.



Na estrutura acima foram quebradas sete ligações covalentes (representadas pelas linhas hachuriadas) de forma que dentro da estrutura existem sete elétrons livres e sete lacunas.

As setas representam o movimento dos elétrons que conforme se pode observar, não tem direção definida.

No entanto, ao aplicar-se nos extremos do cristal uma tensão (p/ex. uma bateria), os elétrons dirigem-se ao polo positivo enquanto que as lacunas movimentam-se em sentido contrário, conforme ilustra a figura abaixo:



Quando a fonte externa de energia sobre a estrutura for removida, as ligações covalentes tendem a restabelecer-se cessando também a corrente.

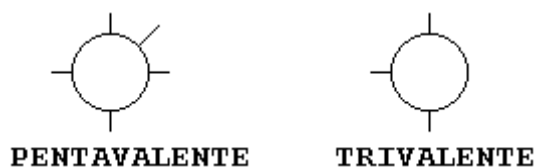
DOPAGEM DE UM CRISTAL INTRÍNSECO

O processo de dopagem em um cristal intrínseco cria no mesmo cargas livres (elétrons ou lacunas), dependendo do tipo de impureza usada no processo; após a dopagem o cristal intrínseco recebe o nome de cristal extrínseco.

No processo de dopagem são utilizadas impurezas do tipo trivalente e pentavalente.

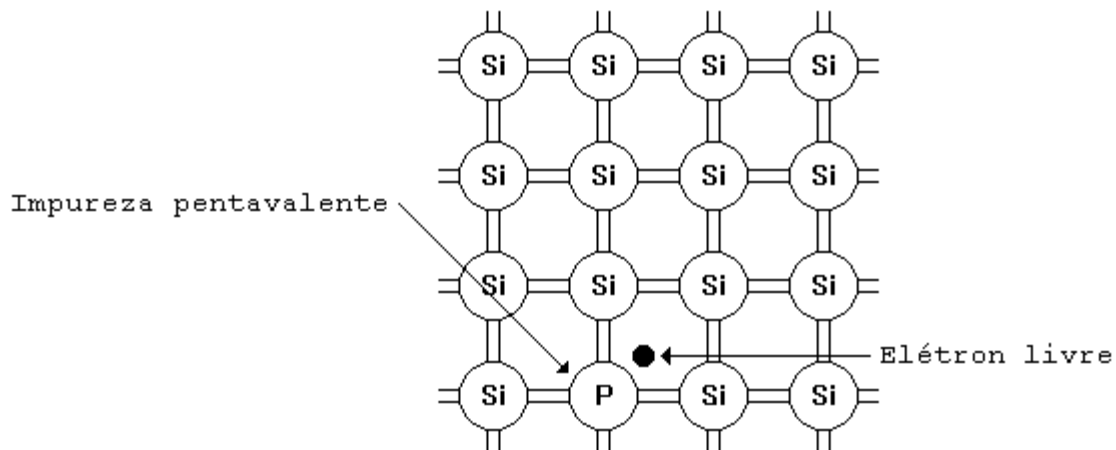
As impurezas trivalentes possuem 3 elétrons de valência e as pentavalentes 5 elétrons de valência.

A figura a seguir ilustra uma forma comum de representar impurezas trivalentes e pentavalentes.



FORMAÇÃO DO CRISTAL N

Quando uma impureza pentavalente é adicionada a um cristal intrínseco de silício, ao se combinarem com os átomos do cristal haverá o excesso do 5º elétron que ficará no seu lugar simplesmente pela força de atração do núcleo do átomo da impureza, isto é, este elétron poderá ser deslocado com facilidade, recebendo então o nome de elétrons livre.



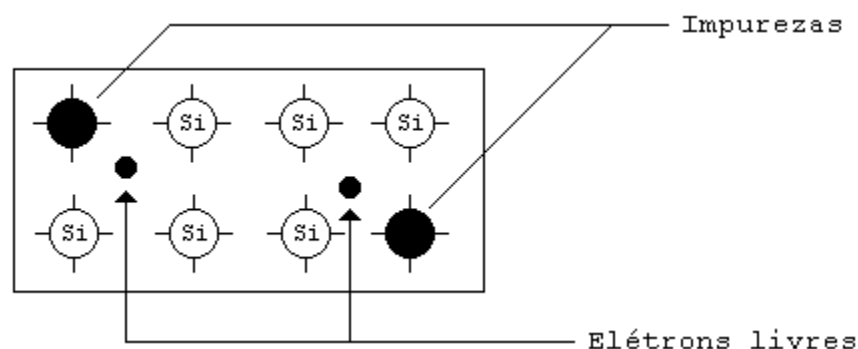
As impurezas pentavalentes criam uma fonte de elétrons livres, sendo portanto, denominadas impurezas doadoras.

"N" refere-se ao fato de haver condução no cristal através de elétrons, que possuem carga negativa.

A tabela abaixo mostra alguns tipos de impurezas pentavalentes usadas na fabricação de semicondutores.

Elemento	Símbolo	Nº atômico	Valência
Antimônio	Sb	51	5
Arsênio	As	33	5
Fósforo	P	15	5

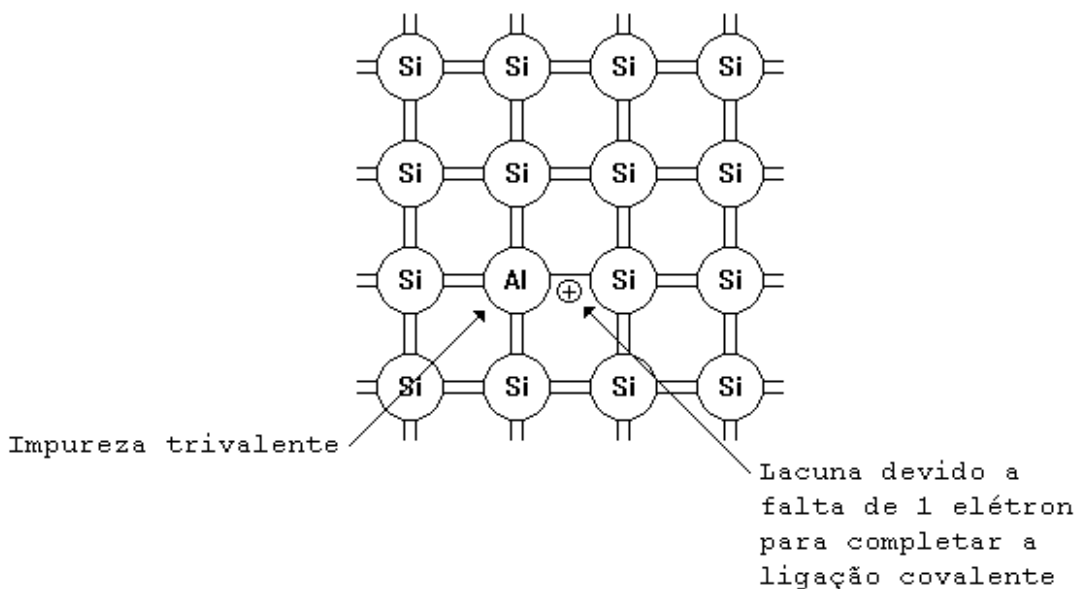
Analisando a figura abaixo, deduz-se que o número de elétrons livres é igual ao número de impurezas pentavalentes adicionadas a um cristal intrínseco.



FORMAÇÃO DO CRISTAL P

Quando uma impureza trivalente é adicionada a um cristal intrínseco de silício, ao se combinar com os átomos do cristal haverá a falta de um elétron para completar os 8 elétrons de valência, isto é, a falta desse elétron equivale a uma carga positiva livre.

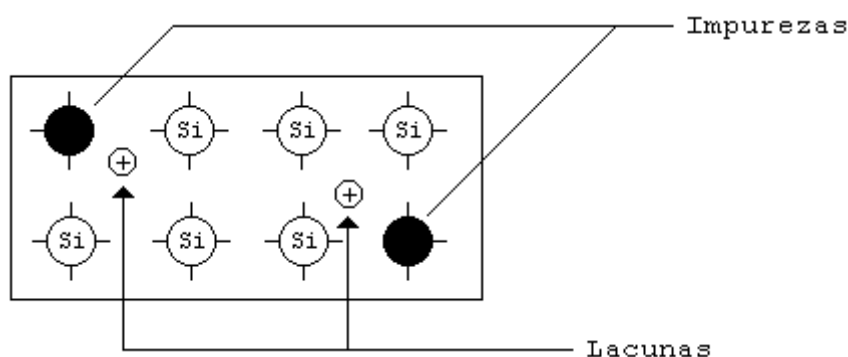
"P" refere-se ao fato de haver condução no cristal através de lacunas, as quais possuem carga positiva.



A tabela a seguir mostra alguns tipos de impurezas trivalentes (denominadas aceitadoras) utilizadas na fabricação de semicondutores.

Elemento	Símbolo	Nº atômico	Valência
Alumínio	Al	13	3
Boro	B	5	3
Gálio	Ga	31	3
Índio	In	49	3

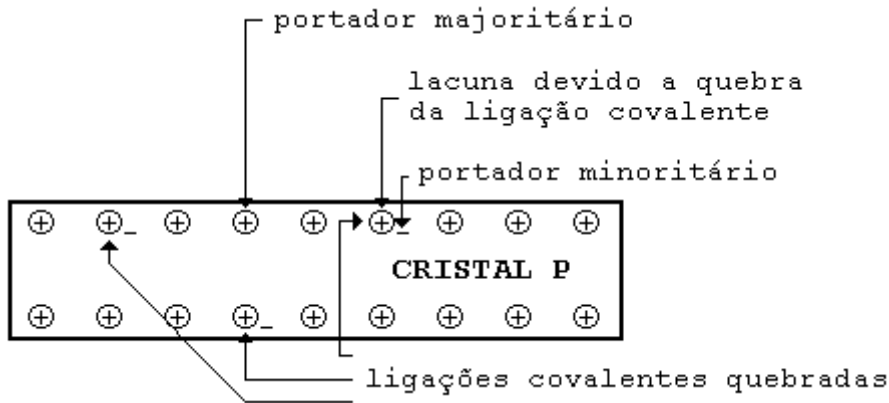
A figura abaixo mostra que o número de lacunas criadas em um cristal intrínseco corresponde a quantidade de impurezas trivalentes adicionadas ao mesmo.



PORTADORES MAJORITÁRIOS E MINORITÁRIOS

Em um cristal dopado os portadores majoritários ocorrem devido a adição de impurezas, enquanto que os portadores minoritários são provenientes da quebra das ligações covalentes, principalmente quando ocorre elevação da temperatura.

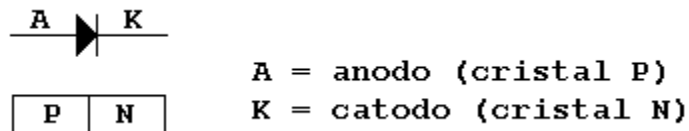
TIPO DE CRISTAL	PORTADORES MAJORITÁRIOS	PORTADORES MINORITÁRIOS
P	lacunas	elétrons
N	elétrons	lacunas



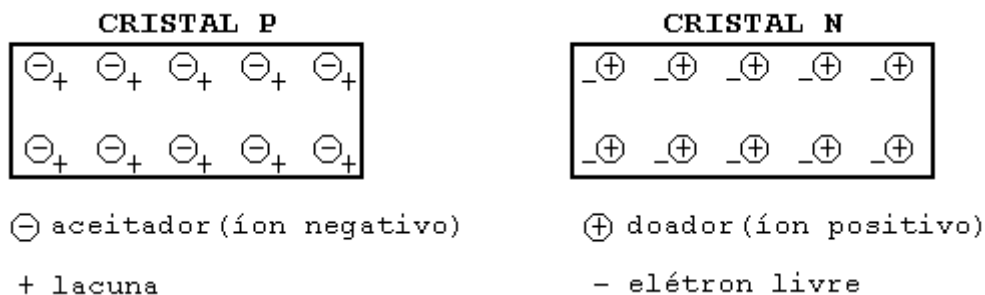
O aumento da temperatura provoca a quebra de mais ligações covalentes, aumentando a quantidade de portadores minoritários cujo fluxo é contrário ao dos portadores majoritários, que neste caso irá interferir no fluxo dos portadores majoritários.

JUNÇÃO PN - DIODO DE JUNÇÃO

Ao se combinar um cristal do tipo P com um cristal do tipo N obtém-se um diodo.



Para entender como é formado um diodo de junção, consideremos os cristais N e P conforme ilustra a figura abaixo:



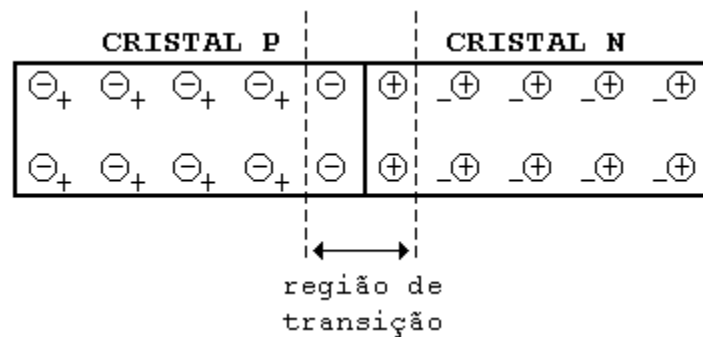
No átomo aceitador foi adicionado um elétron da união vizinha, formando então um íon negativo. O íon negativo deixa uma lacuna.

Do átomo doador foi retirado o 5º elétron, tornando-o um íon positivo. O elétron retirado é excedente (livre).

Ao se juntar os dois cristais, a primeira impressão é de que os elétrons livres do cristal N tendem a combinar-se com as lacunas do cristal P, porém tal não ocorre.

Quando os elétrons do cristal N tentam atravessar a junção, são repelidos pelos íons negativos (aceitadores) do cristal P; da mesma forma as lacunas do cristal P são repelidas pelos íons positivos (dadores) do cristal N.

Porém, os elétrons e lacunas nas proximidades da junção combinam-se.

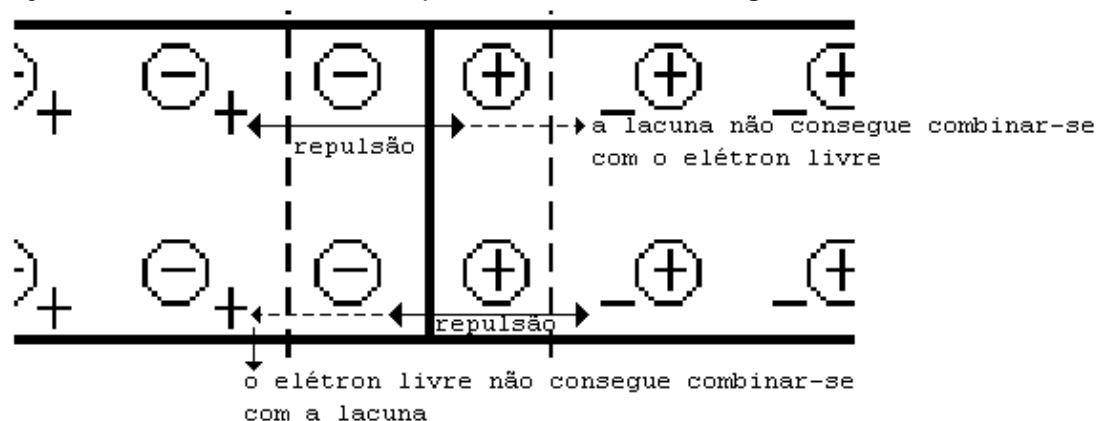


Nas proximidades da junção o cristal P adquire uma pequena carga negativa, pois as lacunas combinam-se com os elétrons livres do cristal N; ao mesmo tempo o cristal N adquire nas proximidades da junção uma pequena carga positiva pela perda dos elétrons livres que se combinaram com as lacunas do cristal P.

Forma-se então nas proximidades da junção uma região de transição, também conhecida como região de barreira de potencial. Em inglês é muito utilizada a expressão *depletion region* (região de depleção).

É conveniente salientar que essa combinação ocorre somente nas proximidades da junção. Elétrons e lacunas mais distantes não se combinam pois sofrem a força de repulsão das cargas positivas na junção do cristal N e das cargas negativas na junção do cristal P, conforme dito anteriormente.

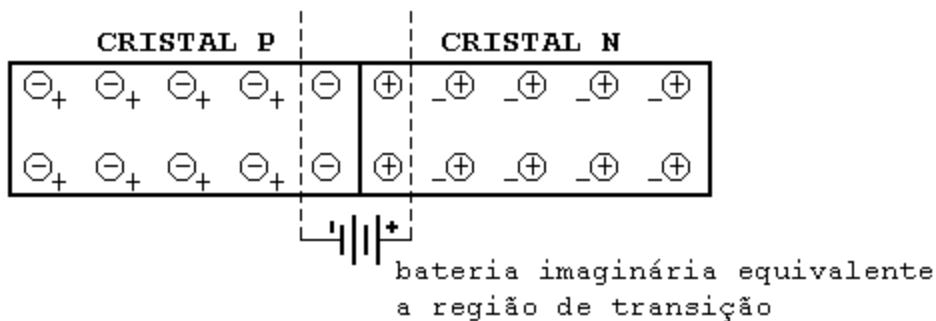
Veja como isso ocorre na ampliação mostrada a seguir.



Para que elétrons e lacunas se combinem é necessário vencer a força de repulsão das cargas opostas dentro da região de transição.

Nas proximidades da junção, ou mais especificamente na região de transição ocorre a difusão dos portadores de um lado para outro da junção (isto pode ocorrer devido a uma energia térmica) e, esse movimento recebe o nome de corrente de difusão.

Isto resulta em uma *ddp* (diferença de potencial) que pode ser representada por uma pequena bateria imaginária, conforme ilustra a figura a seguir.



Isto significa que uma lacuna do cristal P poderá combinar-se com um elétron do cristal N depois de vencida essa tensão ou essa barreira de potencial.

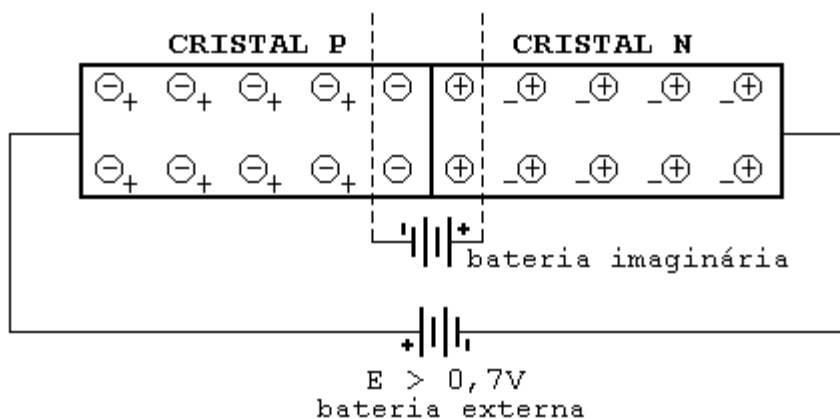
A bateria imaginária é usada somente para representar os efeitos internos, uma vez que esse potencial não se pode medir quando o diodo está fora do circuito.

Quando o diodo faz parte de um circuito, esse potencial (barreira de potencial) pode ser verificado através de medições indiretas.

Para os diodos de silício essa tensão varia de 0,55V a 0,7V e para os diodos de germânio varia de 0,15 a 0,3V.

Costuma-se adotar os valores típicos de 0,7V para diodos de silício e 0,3V para os diodos de germânio, salvo especificação em contrário.

Desta forma, para que haja a recombinação dos demais portadores é necessária uma tensão externa que vença a barreira de potencial.

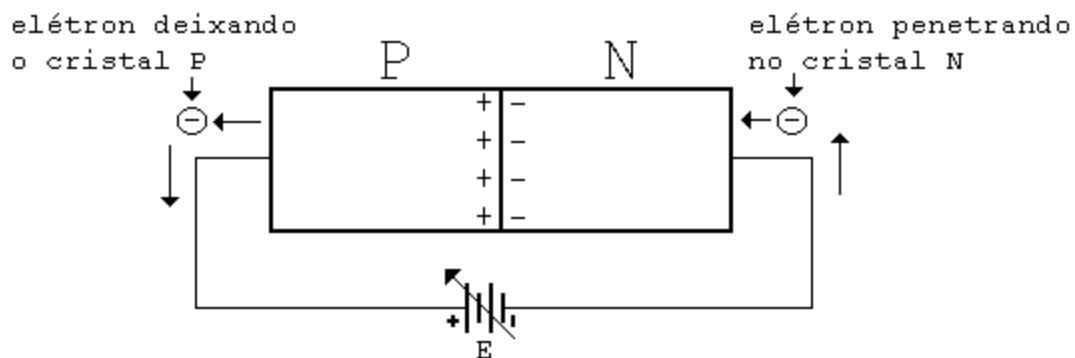


É fácil deduzir-se pela figura acima, que as lacunas e os elétrons são impelidos até a junção pelos polos positivo e negativo da bateria externa respectivamente. Vencida a barreira de potencial, ocorre a combinação entre lacunas e elétrons.

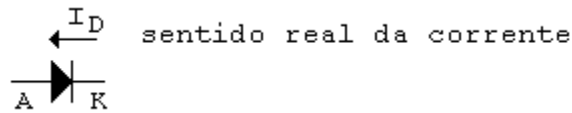
POLARIZAÇÃO DIRETA DA JUNÇÃO PN (DIODO)

Para produzir um fluxo de corrente através de um diodo, a mesmo deve ser polarizado diretamente, isto é, a barreira de potencial deve ser neutralizada.

Polarizar diretamente um diodo significa tornar o anodo mais positivo do que o catodo, ou seja, aplica-se uma tensão negativa no catodo e uma tensão positiva no anodo, conforme ilustra a figura a seguir.

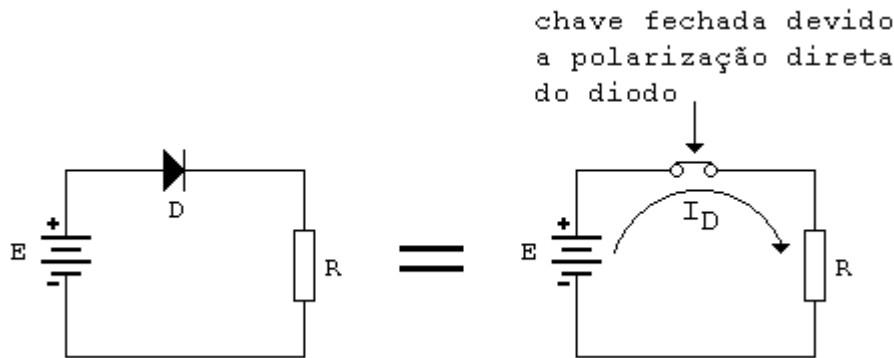


- os elétrons livres do cristal N são impelidos à junção pelo polo negativo da bateria;
- as lacunas do cristal P são impelidos à junção pelo polo positivo da bateria;
- na junção ocorre então a combinação dos portadores;
- para cada lacuna do cristal P que se combinar com um elétron do cristal N, um elétron de uma união das proximidades do terminal positivo da bateria deixa o cristal e penetra no polo positivo da bateria, originando uma lacuna que também é impelida à junção;
- simultaneamente um novo elétron penetra no cristal N através do terminal negativo da bateria e se difunde até a junção; como resultado, a região de transição torna-se significativamente mais estreita;
- com o aumento da tensão externa é gradualmente vencida a barreira de potencial e a corrente aumenta; uma vez vencida a barreira de potencial a corrente aumenta bruscamente;
- essa corrente é denominada corrente direta (I_D) e seu sentido é do cristal N para o cristal P (sentido real), ou seja, do catodo para o anodo.



Na polarização direta a resistência interna do diodo (junção) assume um valor extremamente baixo e o diodo comporta-se como uma chave eletrônica fechada. A figura a seguir ilustra um diodo diretamente polarizado e seu respectivo circuito equivalente.

Observe que no circuito equivalente foi considerado o sentido convencional para a corrente.



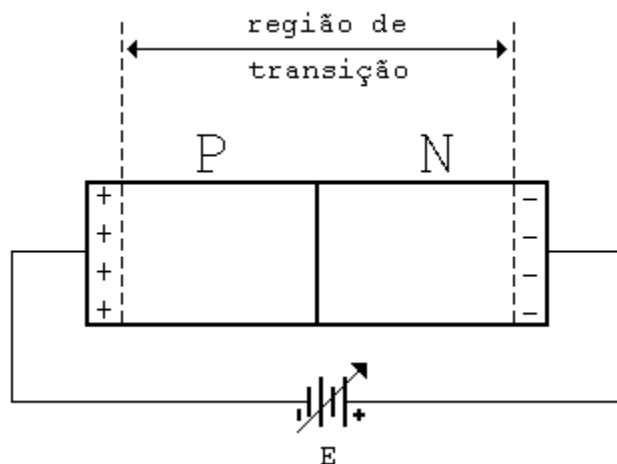
POLARIZAÇÃO REVERSA DA JUNÇÃO PN (DIODO)

A polarização reversa consiste em tornar o anodo mais negativo do que o catodo ou o catodo mais positivo do que o anodo, o que equivale a aplicar uma tensão negativa no anodo e uma tensão positiva no catodo.

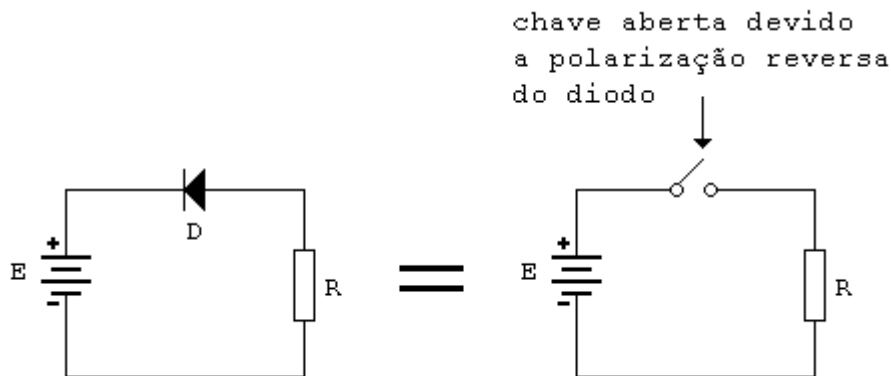
Na polarização reversa ocorre justamente o contrário da polarização direta.

Os elétrons e as lacunas afastam-se da junção provocando um aumento significativo da região de transição.

Desta forma não ocorre a combinação entre elétrons e lacunas e portanto, não circula corrente pelo diodo.



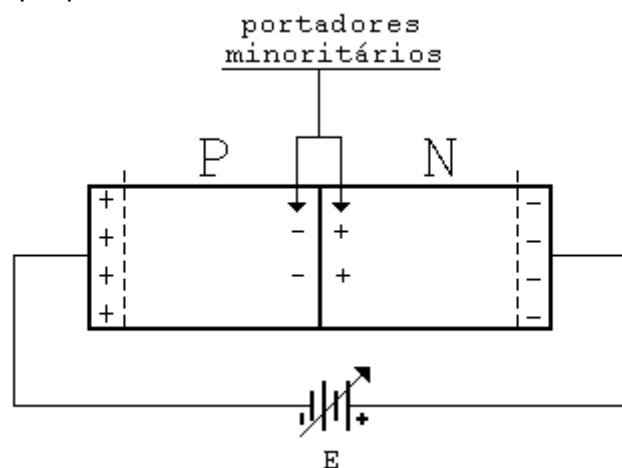
Na polarização reversa a resistência interna do diodo assume valores elevadíssimos e o mesmo comporta-se como uma chave eletrônica aberta. A figura abaixo ilustra um diodo polarizado reversamente e seu respectivo circuito equivalente. Observe que não circula corrente pelo circuito.



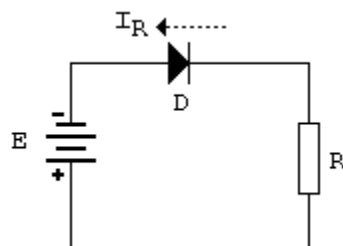
Teoricamente nenhuma corrente deveria circular pelo circuito. No entanto, uma corrente muito pequena (da ordem de alguns microampères pode ser observada).

Isto pode ser explicado facilmente: alguns elétrons e lacunas dos cristais P e N respectivamente que devem sua existência graças a energia térmica (quebra de ligações covalentes) são impelidos à junção pois são repelidos pela bateria (*os elétrons do cristal P são repelidos pelo polo negativo da bateria e as lacunas do cristal N são repelidas pelo polo positivo da bateria*).

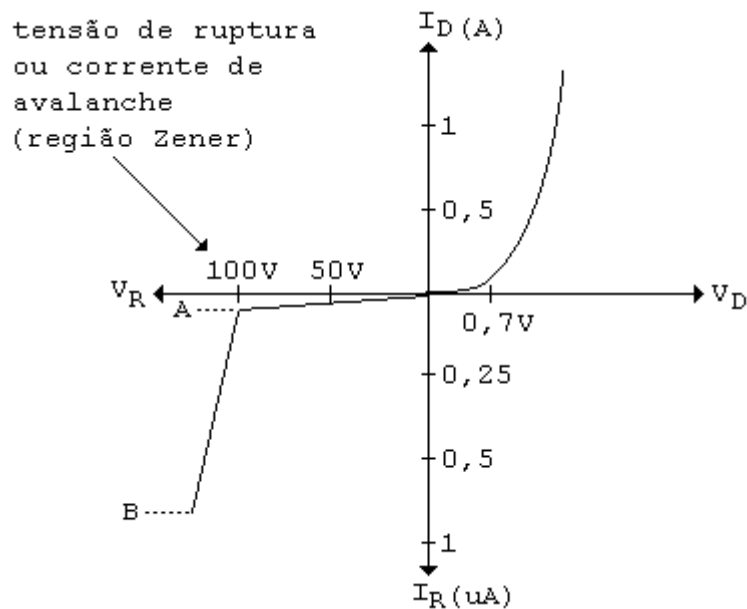
Neste caso haverá a combinação dos portadores minoritários, constituindo uma corrente reversa muito pequena, também conhecida como corrente de fuga.



Com o aumento da temperatura a corrente reversa (I_R) ou de fuga aumenta, interferindo na corrente direta do diodo.



CURVA CARACTERÍSTICA DE UM DIODO DE JUNÇÃO DE SILÍCIO



I_D = corrente direta
 I_R = corrente reversa
 V_D = tensão direta
 V_R = tensão reversa

Observa-se na curva acima que a partir de 0,7V a corrente direta sobe bruscamente, sendo limitada pela resistência externa do circuito.

Se a tensão reversa for muito elevada a corrente reversa sobe a um valor bastante elevado, sendo esse valor denominado corrente de avalanche.

Note-se que a corrente de avalanche pode variar numa faixa de valores bastante ampla (pontos A e B) com uma variação muito pequena da tensão reversa.

Esse fenômeno é denominado efeito Zener.

Quando é atingida a região de ruptura a corrente reversa aumenta bruscamente e danifica o diodo a menos que, tenha uma construção especial que permita sua utilização nessa região (região Zener).

Portanto, em sua operação normal o diodo não deve atingir a região Zener.

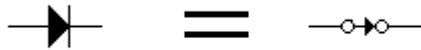
Os fabricantes especificam a máxima tensão reversa antes de atingir a região Zener, desta forma, a tensão reversa máxima permitida para um determinado diodo é menor do que a tensão Zener.

APROXIMAÇÕES DO DIODO

Na análise de circuitos com diodos, podemos levar em conta três aproximações:

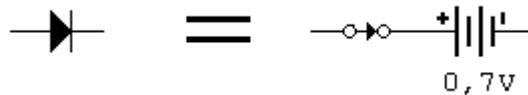
1ª APROXIMAÇÃO - DIODO IDEAL

$$V_D = 0V$$



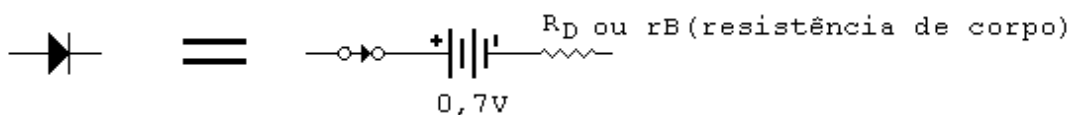
2ª APROXIMAÇÃO

$$V_D = 0,7V$$



3ª APROXIMAÇÃO - DIODO REAL

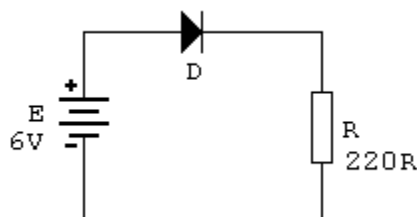
$$V_D = 0,7V + V_{rB}$$
$$V_D = 0,7V + I_D \cdot r_B$$



Geralmente utiliza-se a segunda aproximação na análise de circuitos com diodos.

Exemplo:

No circuito a seguir, calcule a corrente e a potência no resistor.



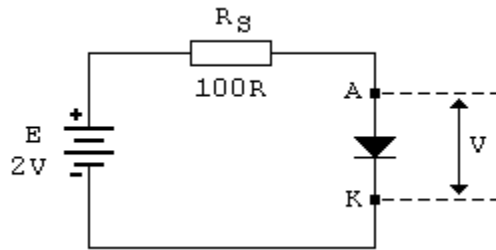
Solução:

$$I = \frac{V - V_d}{R} = \frac{6 - 0,7}{220} = 24,1\text{mA} \rightarrow P_R = 220 \cdot 24,1\text{mA}^2 = 127,78\text{mW}$$

RETA DE CARGA

A reta de carga é um método gráfico através do qual se pode determinar o ponto de operação de um diodo (tensão e corrente).

Tomemos como exemplo o circuito abaixo:



R_S = resistor limitador de corrente
(com R_S maior, menor será a corrente no diodo)

Desta forma, R_S mantém I_D dentro das especificações do diodo.

$$\text{Equação básica: } I = \frac{E - V}{R_S}$$

Para traçar a reta de carga de um diodo, devemos levar em conta dois pontos: saturação e corte.

CONDIÇÃO 1 - SATURAÇÃO

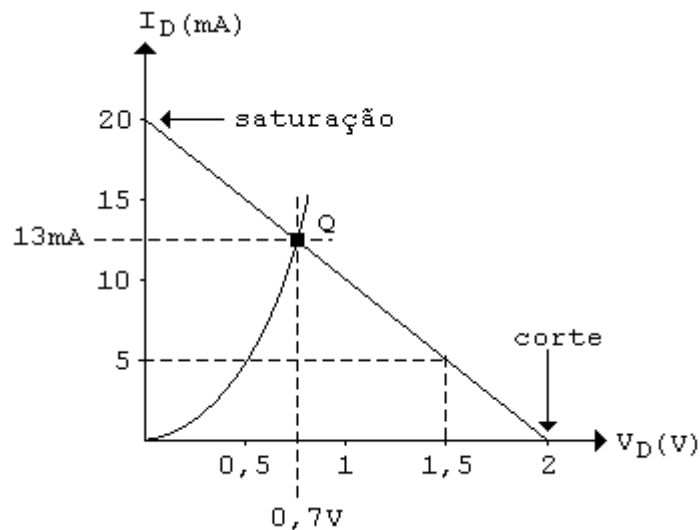
$$V = 0$$

$$I = \frac{2 - 0}{100} = 20\text{mA}$$

CONDIÇÃO 2 - CORTE

$$V = 2V$$

$$I = \frac{2 - 2}{100} = 0$$



Desta forma foram determinados os dois pontos necessários para traçar a reta de carga:

ponto 1: $I = 20\text{mA}$; $V = 0$ (saturação)

Na saturação considera-se o diodo em curto e portanto, a tensão nos seus extremos será igual a zero.

ponto 2: $I = 0$; $V = 2\text{V}$ (corte)

No corte considera-se o diodo aberto; desta forma não circulará corrente pelo circuito. A tensão entre os pontos A e K será 2V.

A intersecção entre a reta de carga e a curva do diodo nos fornece o ponto de operação do diodo, também denominado ponto Q (quiescente).

Analisando o gráfico do nosso exemplo, verificamos que a corrente de operação do diodo é de 13mA e a tensão é 0,7V.

→ Qual será a tensão no diodo para uma corrente de 5mA?

Analisando o gráfico verificamos que essa tensão é de 1,5V.

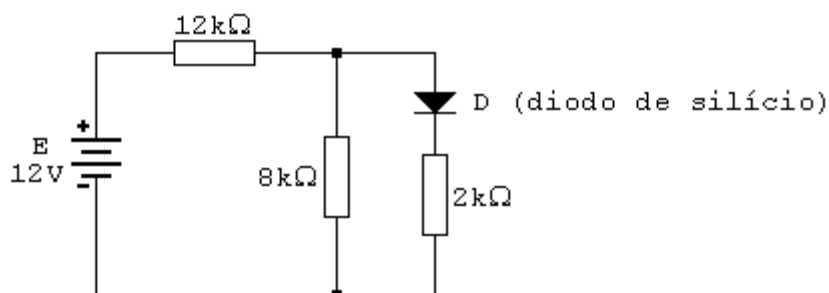
Comprovando:

aplicando LKT → $V = E - V_{RS}$, onde $V_{RS} = R_S \cdot I$

logo: $V = 2 - (100 \cdot 0,005) = 2 - 0,5 = 1,5\text{V}$

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Utilizando a 2ª aproximação, calcule a corrente no resistor de 2kΩ no circuito a seguir.



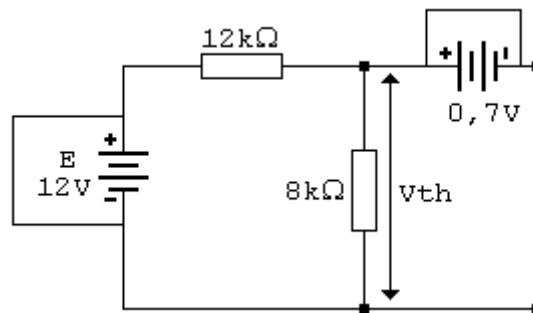
Aplicando Thévenin:

1 - Remove-se o resistor de 2kΩ e cortocircuita-se as fontes;

Observe que por tratar-se da 2ª aproximação foi considerada a barreira de potencial de 0,7V no diodo.

2 - Calcula-se R_{th} ;

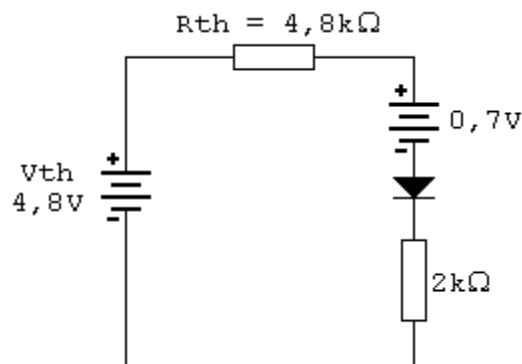
3 - Calcula-se V_{th} .



$$R_{th} = \frac{12 \times 8}{12 + 8} = 4,8k\Omega$$

$$V_{th} = \frac{12 \times 8}{12 + 8} = 4,8V$$

O circuito equivalente Thévenin é mostrado abaixo.



$$\begin{aligned} V_{th} - (4,8k\Omega \cdot I) - 0,7V - (2k\Omega \cdot I) &= 0 \\ 4,8V - 0,7V &= (4,8k\Omega + 2k\Omega) \cdot I \\ 4,1V &= 6,8k\Omega \cdot I \end{aligned}$$

$$I = \frac{4,1V}{6,8k\Omega} = 602,9\mu A$$

RESISTÊNCIA CC DO DIODO

R_{CC} (resistência para corrente contínua) de um diodo, é a razão entre a tensão total no diodo e a corrente que circula pelo mesmo.

Existem duas maneiras de medir essa resistência: direta e inversa.

Tomemos como exemplo o diodo 1N8146, em que foram obtidos três valores de tensão e corrente, para cálculo da resistência direta, (R_D) conforme ilustra a tabela a seguir:

V_D	0,65V	0,75V	0,85V
-------	-------	-------	-------

I_D	8mA	18mA	30mA
Medidas	1 ^a	2 ^a	3 ^a

Calculando a resistência direta para cada medida:

$$1^a \text{ medida: } R_D = \frac{0,65V}{8mA} = 81,25\Omega$$

$$2^a \text{ medida: } R_D = \frac{0,75V}{18mA} = 41,67\Omega$$

$$3^a \text{ medida: } R_D = \frac{0,85V}{30mA} = 28,3\Omega$$

Conclusão:

À medida que a corrente aumenta a R_{CC} diminui.

Para o mesmo diodo tomemos como exemplo três medidas para o cálculo da resistência reversa (R_R), conforme ilustra a figura abaixo. Para esse diodo a tensão de ruptura é 150V.

Tensão inversa (V_R)	25V	50V	100V
Corrente inversa (I_R)	30nA	65nA	4μA
Medidas	1 ^a	2 ^a	3 ^a

Calculando a resistência reversa para cada medida:

$$1^a \text{ medida: } R_R = \frac{25V}{30nA} = 833M\Omega$$

$$2^a \text{ medida: } R_R = \frac{50V}{65nA} = 769M\Omega$$

$$3^a \text{ medida: } R_R = \frac{100V}{4\mu A} = 25M\Omega$$

Conclusão:

Ao se aproximar da tensão de ruptura a R_{CC} diminui

EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA

Através da equação abaixo podemos calcular a corrente direta que circula pela junção de um diodo, em função de uma corrente reversa dada e em função da temperatura:

$$I = I_o \cdot \left(e^{\frac{V}{\eta \cdot V_T}} - 1 \right)$$

I = corrente direta

I_o = corrente reversa ou de fuga

$$\eta = \begin{cases} \text{Ge} = 1 \\ \text{Si} = 2 \end{cases}$$

$$V_T = \frac{T(K)}{11600} \quad \rightarrow \quad T(K) = \text{temperatura em kelvin} = (273 + \text{°C})$$

V = tensão direta (V_D)

e = constante = 2,718

A fórmula a seguir também poderá ser usada:

$$I = I_s \cdot \left(e^{\frac{KV}{T(K)}} - 1 \right)$$

I_s = corrente reversa de saturação ou de fuga

$$K = 11600 / \eta, \text{ onde } \eta \begin{cases} \text{Ge} = 1 \\ \text{Si} = 2 \end{cases}$$

$$T(K) = 273 + ^\circ\text{C}$$

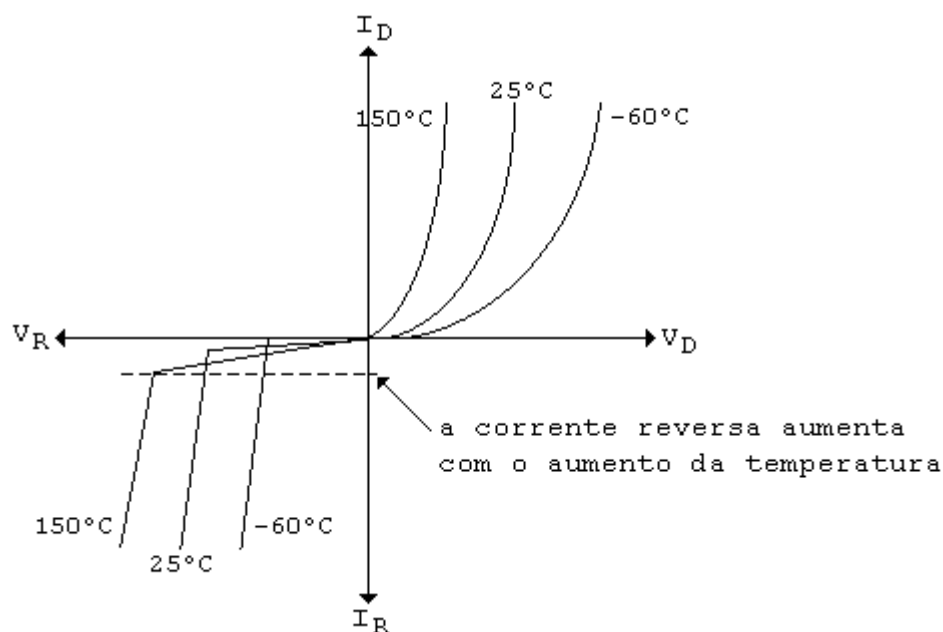
$$V = V_D$$

e = constante = 2,718

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

A temperatura é um dos fatores que mais influenciam no funcionamento de um diodo; com o aumento da temperatura a tensão direta (V_D) diminui e a corrente reversa (I_R) aumenta.

Isto pode ser observado na figura abaixo.



Para minimizar os efeitos da temperatura utilizam-se dissipadores de calor principalmente em diodos para potências $\geq 5W$.

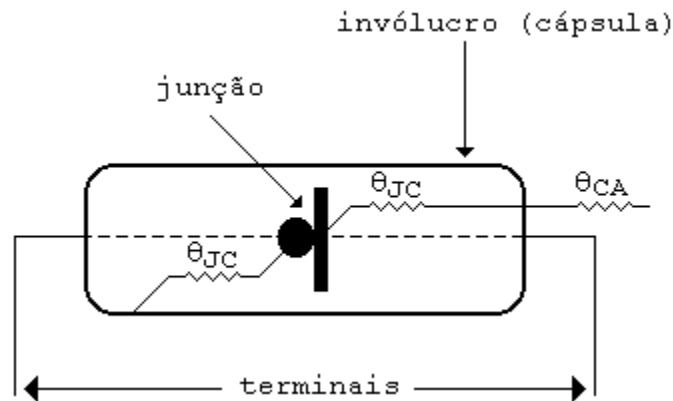
Alguns parâmetros devem ser levados em conta no dimensionamento dos dissipadores de calor.

Tais parâmetros referem-se a resistência térmica entre o invólucro e a junção e entre o invólucro e o meio ambiente, assim definidos:

$$\theta_{JC} = \text{resistência térmica entre a junção e o invólucro}$$

$$\theta_{CA} = \text{resistência térmica entre o invólucro e o meio ambiente (ar)}$$

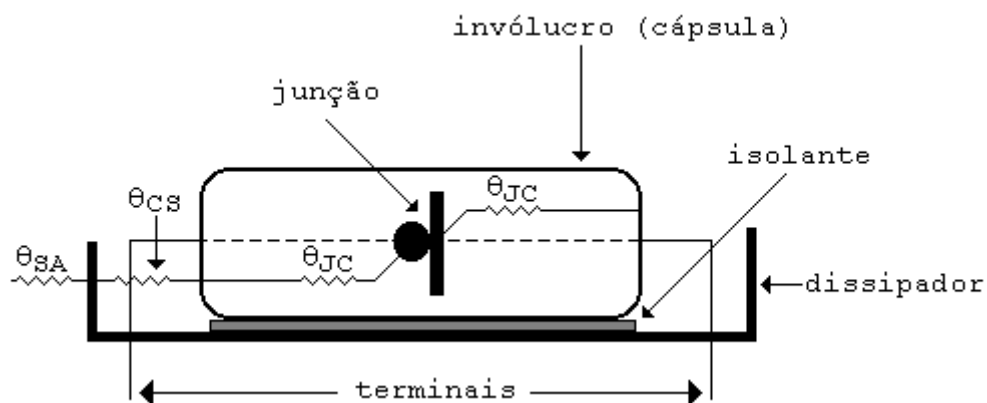
A figura abaixo ilustra uma forma prática de representar esses parâmetros.



Quando um dissipador é acrescentado devem ser levados em conta outros parâmetros:

$$\theta_{CS} = \text{resistência térmica entre o invólucro e o dissipador}$$

$$\theta_{SA} = \text{resistência térmica entre o dissipador e o ambiente (ar)}$$



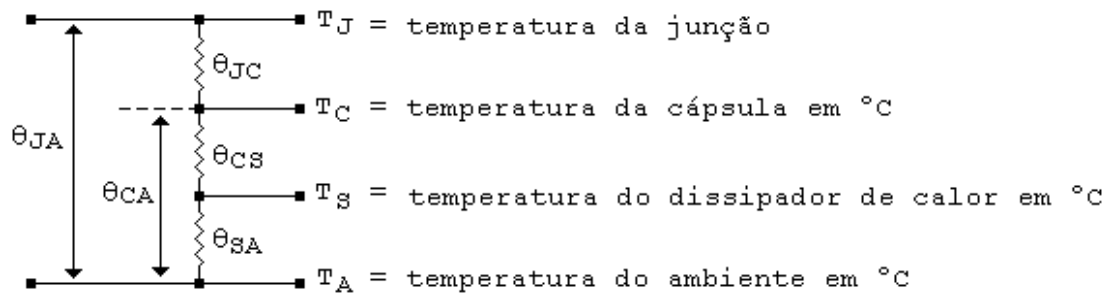
A unidade de medida da resistência térmica (θ) é $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ (graus celsius por watt).

A resistência térmica total (θ_{JA}) pode ser então calculada com ou sem dissipador de calor:

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA} \text{ (com dissipador)}$$

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CA} \text{ (sem dissipador)}$$

O circuito equivalente para representar as resistências térmicas acima mencionadas é mostrado a seguir:



Para evitar danos ao diodo, a temperatura da junção (T_J) nunca deve ser ultrapassada.

$$T_J = (P_D \cdot \theta_{JA}) + T_A, \text{ em } ^\circ\text{C}$$

$$T_J = P_D (\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}) + T_A, \text{ em } ^\circ\text{C}$$

EXEMPLO 1: Determinar se a temperatura da junção de um diodo semiconductor está sendo excedida nas seguintes condições de operação:

$$\begin{aligned}
 P_D &= 20\text{W} \\
 T_A &= 25^\circ\text{C} \\
 T_{J\text{max}} &= 150^\circ\text{C} \\
 \theta_{JC} &= 2^\circ\text{C/W} \\
 \theta_{CS} &= 0,5^\circ\text{C/W} \\
 \theta_{SA} &= 2,5^\circ\text{C/W}
 \end{aligned}$$

Solução:

$$\begin{aligned}
 T_J &= P_D \cdot (\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}) + T_A \\
 T_J &= 20 \cdot (2 + 0,5 + 2,5) + 25 \\
 T_J &= 100 + 25 = 125^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Resposta: 125°C

Operação segura pois não ultrapassa a $T_{J\text{max}}$ de 150°C especificada pelo fabricante.

EXEMPLO 2: Determine a corrente que circula pela junção de um diodo de silício na temperatura de 40°C, sabendo-se que sua corrente reversa é de 1nA.

Solução:

Utilizando a fórmula:
$$I = I_o \cdot \left(e^{\frac{V}{\eta \cdot VT}} - 1 \right)$$

$$V = 0,7\text{V}$$

$$\eta = 2$$

$$VT = \frac{T(\text{K})}{11600} = \frac{273 + 40}{11600} = 0,027$$

$$I = 1 \times 10^{-9} \left(2,718^{\frac{0,7}{2(0,027)}} - 1 \right) = 1 \times 10^{-9} \left(2,718^{0,054} - 1 \right)$$

$$I = 1 \times 10^{-9} (2,718^{12,963} - 1) = 425,77\mu\text{A} \cong 426\mu\text{A}$$

Podemos também utilizar a fórmula: $I = I_s \cdot \left(e^{\frac{KV}{T(K)}} - 1 \right)$

$$V = 0,7$$

$$\eta = 2$$

$$K = \frac{11600}{2} = 5800$$

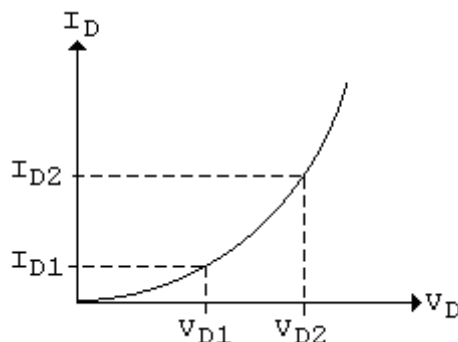
$$T(K) = 273 + 40 = 313$$

$$I = 1 \times 10^{-9} \left(2,718^{\frac{5800 \cdot 0,7}{313}} - 1 \right) = 1 \times 10^{-9} (2,718^{12,971} - 1)$$

$$I = 429,19\mu\text{A} \cong 429\mu\text{A}$$

RESISTÊNCIA MÉDIA (R_m)

Se dispusermos de dois valores de V_D podemos calcular a resistência média do diodo. Normalmente isto ocorre quando um sinal AC de grande magnitude for aplicado ao diodo fazendo com que os valores de V_D fluem, conforme sugere a figura abaixo.



A resistência média pode ser calculada pela fórmula:

$$R_m = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

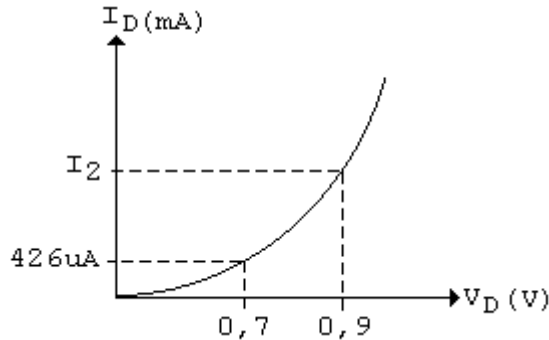
$$\Delta V_D = V_{D2} - V_{D1}$$

$$\Delta I_D = I_{D2} - I_{D1}$$

EXEMPLO 3: Considerando os mesmos dados do exemplo 2, calcule a resistência média do diodo supondo uma $V_D = 0,9V$.

Solução:

Aproveitaremos os valores calculados para $V_D = 0,7V$.



Calculando I_2 :

$$I_2 = 1 \times 10^{-9} \left(2,718^{\frac{0,9}{0,054}} - 1 \right) = 1 \times 10^{-9} (2,718^{16,667} - 1)$$

$$I_2 = 17,28 \text{ mA}$$

$$R_m = \frac{0,9 - 0,7}{(17,28 - 0,426) \cdot 10^{-3}} = \frac{0,2}{16,854 \cdot 10^{-3}} = 11,867 \Omega$$

RETIFICAÇÃO - PRINCÍPIOS BÁSICOS

Retificar encerra a ideia de converter uma tensão alternada em tensão contínua.

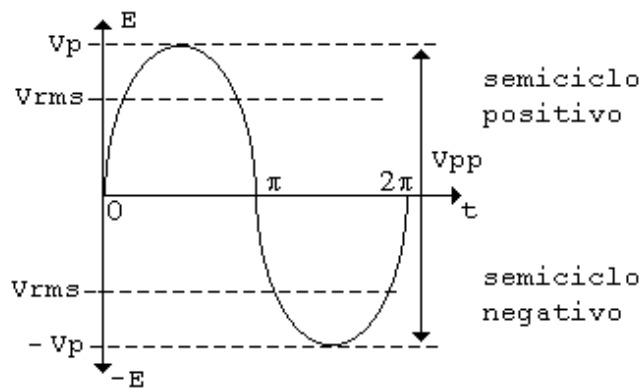
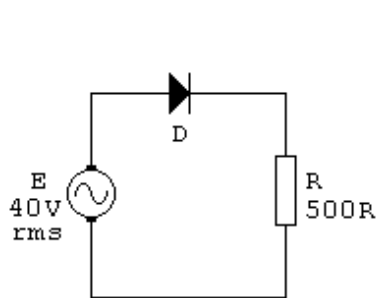
No processo de retificação deve-se levar em conta as características de chaveamento eletrônico do diodo, ou seja, conduz corrente em apenas um sentido (quando diretamente polarizado).

RETIFICAÇÃO DE $\frac{1}{2}$ ONDA

Tomemos como exemplo o circuito a seguir, destinado a retificar uma tensão alternada.

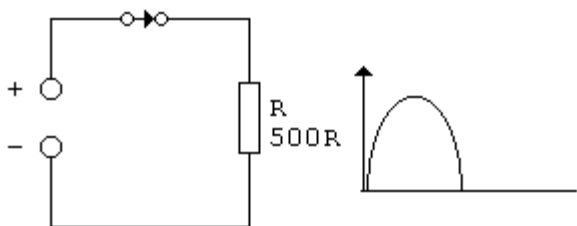
A tensão a ser retificada é de 40Vrms, ou 40Vef.

Como sabemos a corrente alternada tem a propriedade de mudar de polaridade periodicamente, segundo uma determinada frequência.



Deduz-se então que durante o semiciclo positivo o diodo estará polarizado diretamente, atuando como uma chave eletrônica fechada e durante o semiciclo negativo, por estar reversamente polarizado atuará como uma chave eletrônica aberta, conforme mostra os circuitos equivalentes a seguir.

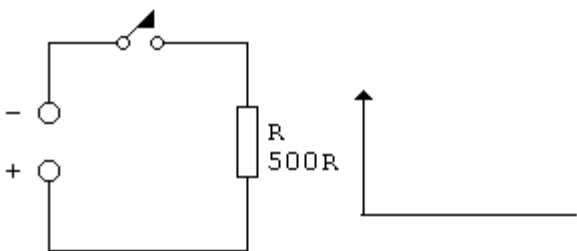
SEMICICLO POSITIVO



Como o diodo comporta-se como uma chave eletrônica fechada, somente circulará corrente pela carga durante o semiciclo positivo.

Logo, aparecerá na carga a tensão correspondente ao semiciclo positivo.

SEMICICLO NEGATIVO

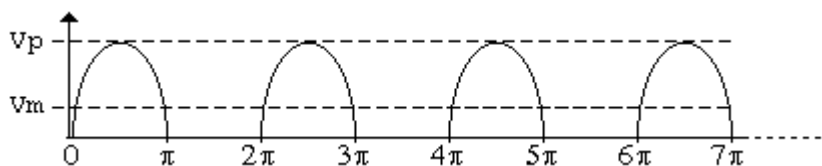


Como o diodo comporta-se como uma chave eletrônica aberta, não circulará corrente pela carga.

Logo, não aparecerá nenhuma corrente na carga.

Desta forma, circulará corrente na carga somente durante os semiciclos positivos, caracterizando assim a retificação de 1/2 onda.

Ao se ligar nos extremos da carga um osciloscópio, será visualizada uma tensão cuja forma de onda é mostrada na figura abaixo.



A tensão na carga é contínua pulsante e o valor medido dessa tensão é denominado *valor retificado médio* (V_m ou V_{dc}), que pode ser calculado pela fórmula:

$$V_m \text{ ou } V_{dc} = (V_p - V_D) \cdot 0,318$$

onde:

V_p = valor de pico da tensão ou valor máximo da tensão (V_{max})

$V_m = V_{dc}$ = valor retificado médio

V_D = queda de tensão direta no diodo (0,55 a 0,7V)

0,318 = constante = $1/\pi$

Podemos calcular o valor médio retificado pela fórmula:

$$V_m \text{ ou } V_{dc} = \frac{V_p \text{ ou } V_{max}}{\pi} \quad (\text{ para } V_D = 0, \text{ diodo ideal})$$

EXEMPLO: Um retificador de ½ onda deve retificar uma tensão de 40Vrms para alimentar uma carga de 500Ω. Determine:

- valor retificado médio na a carga;
- corrente na carga;
- valor máximo da tensão na carga.

Solução:

- deveremos calcular o valor máximo da tensão (V_p ou V_{max}):

$$\begin{aligned} V_p &= V_{rms} \cdot 1,41 \\ V_p &= 40 \cdot 1,41 = 56,4V \end{aligned}$$

calculando o valor retificado médio na carga:

$$\begin{aligned} V_m &= (V_p - V_D) \cdot 0,318 \\ V_m &= (56,4 - 0,7) \cdot 0,318 = 17,71V \end{aligned}$$

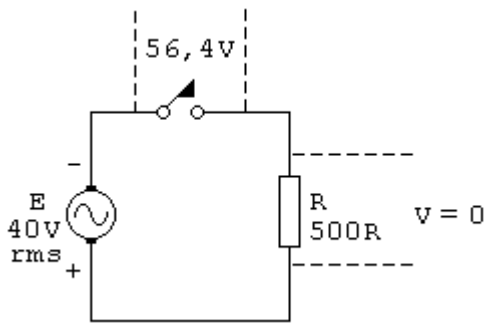
- a corrente na carga será a corrente média:

$$I_m \text{ ou } I_{dc} = \frac{17,71V}{500\Omega} = 35,42mA$$

- o valor máximo da tensão na carga: $V_p - V_D = 56,4 - 0,7 = 55,4V$

TENSÃO DE TRABALHO DO DIODO:

Na retificação de ½ onda a tensão de trabalho do diodo é a própria tensão de pico da tensão a ser retificada, na condição de polarização reversa, conforme ilustra a figura abaixo.



A tensão de trabalho do diodo é normalmente definida como tensão inversa de pico (TIP)

Como o diodo está reversamente polarizado, comporta-se como uma chave aberta e nos seus extremos estará presente o valor de pico da tensão a ser retificada, que no caso é: $40 \cdot 1,41 = 56,4V$.

Como não circula corrente pelo circuito, a tensão nos extremos de R será zero.

CAPACIDADE DE CORRENTE DIRETA:

Deve ser pelo menos igual a corrente média através do mesmo.

$$I_m \text{ ou } I_{dc} = \frac{V_m \text{ ou } V_{dc}}{R}$$

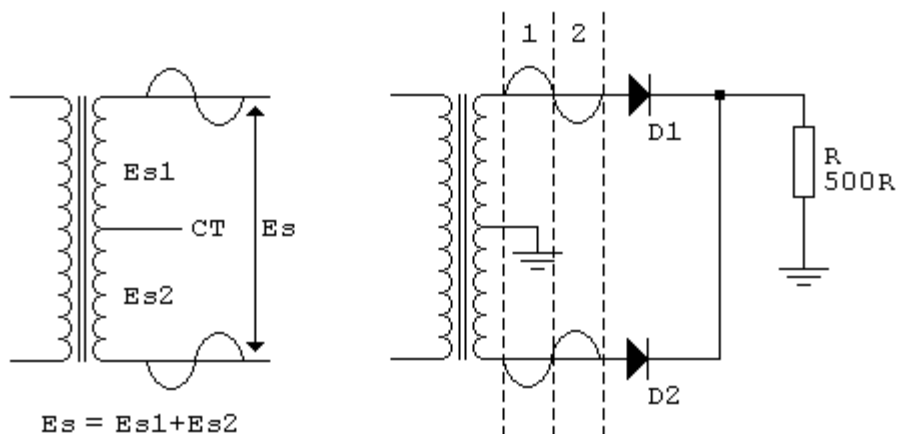
CORRENTE DE PICO ATRAVÉS DO DIODO (I_p):

Deve ser menor do que a corrente de pico especificada pelo fabricante.

$$I_p = \frac{V_p \text{ ou } V_{max}}{R}$$

RETIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA (COM PONTO DE NEUTRO)

Na retificação de onda completa com ponto de neutro, deve-se utilizar um transformador com secundário dotado de tomada central (CT, do inglês *center tap*), de forma a fornecer duas tensões de amplitudes iguais porém defasadas 180° entre si.



As tensões E_{s1} e E_{s2} são medidas a partir do CT (referencial). A tensão total do secundário (E_s) é a soma das mesmas.

No instante 1 o diodo D1 estará diretamente polarizado e conduzindo, enquanto que D2 estará cortado e não conduzindo; no instante 2 ocorre o contrário, ou seja, D1 estará cortado e D2 estará conduzindo.

A tensão retificada média na carga pode ser calculada pela fórmula:

$$V_m \text{ ou } V_{dc} = (V_p - V_D) \cdot 0,637$$

onde:

V_p = valor de pico da tensão ou valor máximo da tensão (V_{max})

$V_m = V_{dc}$ = valor retificado médio

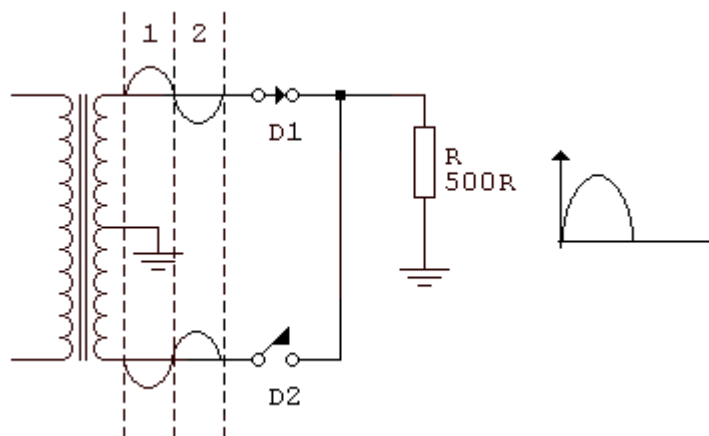
V_D = queda de tensão direta no diodo (0,55 a 0,7V)

0,637 = constante = $2/\pi$

Podemos também calcular o valor médio retificado pela fórmula:

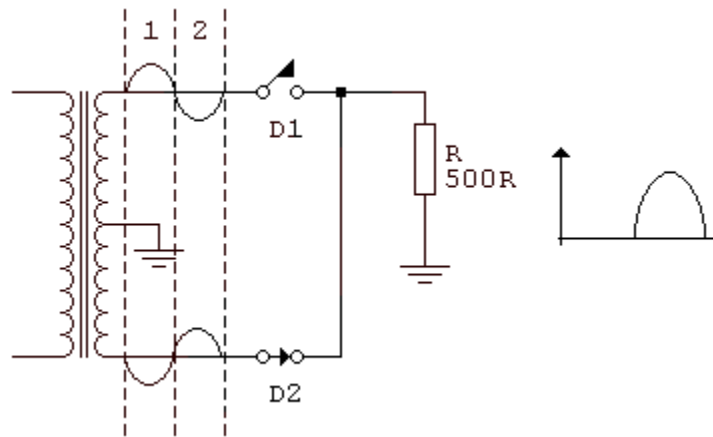
$$V_m \text{ ou } V_{dc} = \frac{2V_p \text{ ou } 2V_{max}}{\pi} \quad (\text{para diodo ideal, onde } V_D = 0)$$

Circuito equivalente no instante 1



Na carga aparecerá uma tensão (semicírculo) devido a condução de D1, por estar diretamente polarizado.

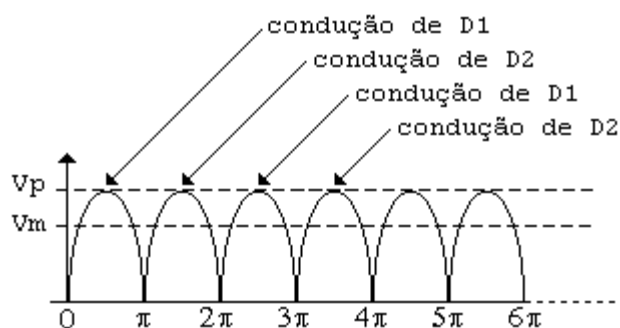
Circuito equivalente no instante 2



No instante 2 estará presente na carga uma tensão (semiciclo) devido a condução de D2.

Desta forma, circulará corrente na carga durante os semiciclos positivos e negativos, caracterizando assim a retificação de onda completa.

Ao se ligar nos extremos da carga um osciloscópio, será visualizada uma tensão cuja forma de onda é mostrada na figura a seguir.



TENSÃO DE TRABALHO DOS DIODOS:

Na retificação de onda completa a tensão de trabalho V_{Dc} de cada diodo (TIP) equivale a duas vezes o valor de pico da tensão a ser retificada. Portanto:

$$TIP = 2V_p$$

CAPACIDADE DE CORRENTE DIRETA:

Deve ser pelo menos igual a corrente média através do mesmo. Como cada diodo opera como um retificador de $\frac{1}{2}$ onda teremos:

$$I_m \text{ ou } I_{dc} = \frac{V_m \text{ ou } V_{dc}}{2R}$$

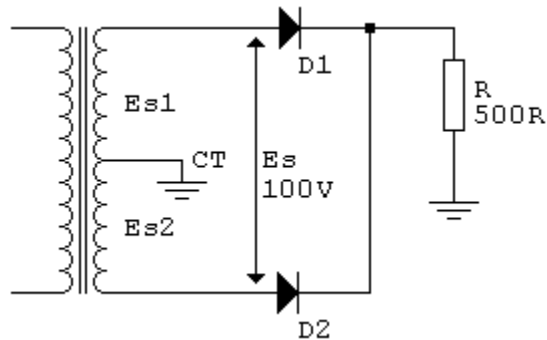
CORRENTE DE PICO ATRAVÉS DO DIODO (I_p):

Deve ser menor do que a corrente de pico especificada pelo fabricante. Como cada diodo opera como um retificador de $\frac{1}{2}$ onda teremos:

$$I_p = \frac{V_p \text{ ou } V_{\max}}{R}$$

EXEMPLO: Dado o circuito abaixo, calcule:

- tensão média na carga;
- corrente média na carga;
- tensão de pico na carga;
- tensão de trabalho nos diodos;
- corrente de pico nos diodos.



Solução:

- a) tensão média na carga:

$$\text{como } E_s = 100\text{V, teremos: } E_{s1} = E_{s2} = \frac{E_s}{2} = 50\text{V}$$

$$V_m = (V_p - V_D) \cdot 0,637$$

$$V_p = V_{ef} \cdot 1,41 = 70,5\text{V}$$

$$V_m = (70,5 - 0,7) \cdot 0,637$$

$$V_m = 69,8 \cdot 0,637 = 44,46\text{V}$$

- b) corrente média na carga:

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{44,46\text{V}}{500\Omega} = 88,92\text{mA}$$

- c) tensão de pico na carga:

$$TIP = 2V_p = 2 \cdot 69,8 = 139,6\text{V}$$

- d) tensão de trabalho dos diodos:

cada diodo deve suportar no mínimo uma tensão reversa da ordem de 140V

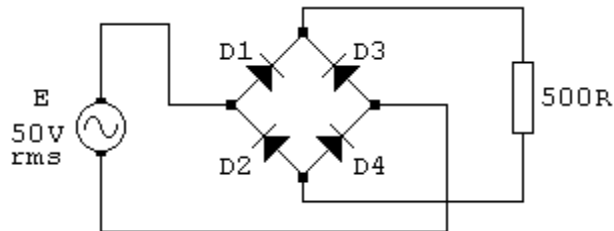
- e) corrente de pico nos diodos:

$$I_p = \frac{V_p}{500\Omega} = \frac{69,8\text{V}}{500} = 139,6\text{mA}$$

RETIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA EM PONTE

A grande vantagem da retificação de onda completa em ponte deve-se ao fato de não ser necessário utilizar dois sinais de amplitudes iguais defasados 180° entre si; isto significa que se pode obter uma retificação de onda completa a partir da rede domiciliar.

O circuito básico é mostrado na figura abaixo.



A análise do funcionamento de um retificador de onda completa, baseia-se como nos casos anteriores, no chaveamento eletrônico dos diodos.

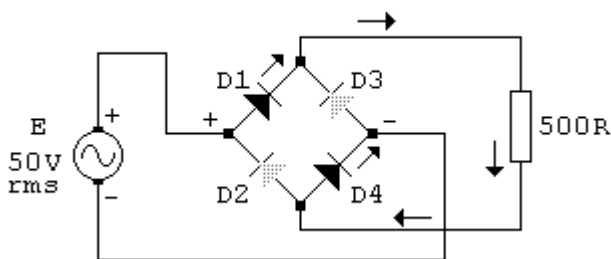
Devem ser levados em consideração os semiciclos positivo e negativo da tensão alternada a ser retificada.

Durante o semiciclo positivo os diodos D1 e D4 estarão conduzindo por estarem diretamente polarizados, enquanto que D2 e D3 estarão cortados.

Durante o semiciclo negativo os diodos D2 e D3 estarão conduzindo e D1 e D4 estarão cortados.

Veja nas figuras abaixo as ilustrações do que foi dito acima, para uma melhor compreensão.

SEMICICLO POSITIVO

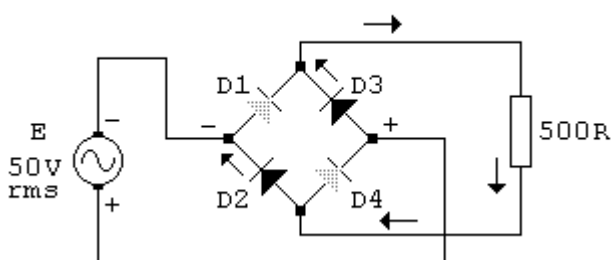


D1 e D4 conduzindo; D2 e D3 cortados. Observa-se que os diodos D1 e D4 ficam em série com a carga.

$$\text{Então } V_D = V_{D1} + V_{D4}$$

$$\text{TIP} = V_p$$

SEMICICLO NEGATIVO

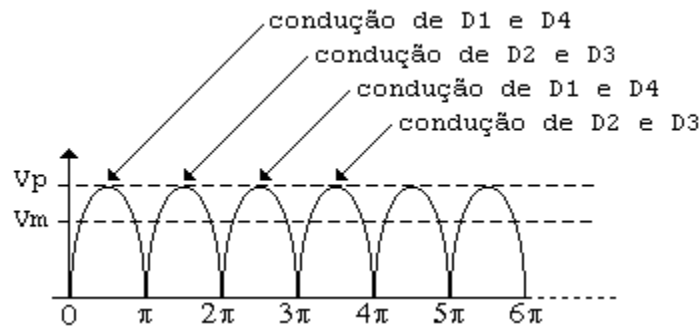


D2 e D3 conduzindo; D1 e D4 cortados. Neste caso, os diodos D2 e D3 estão em série com a carga.

$$\text{Então } V_D = V_{D2} + V_{D3}$$

$$\text{TIP} = V_p$$

A forma da tensão na carga é mostrada abaixo.



O valor retificado médio na carga pode ser calculado pela fórmula:

$$V_m \text{ ou } V_{dc} = (V_p - 2V_D) \cdot 0,637$$

EXEMPLO: Calcule a tensão e potência médias em uma carga de 500Ω , em um retificador de onda completa em ponte, cuja tensão de entrada é $50V_{rms}$.

Solução:

valor de pico da tensão a ser retificada: $50 \cdot 1,41 = 70,5V$

$$V_m = (70,5 - 1,4) \cdot 0,637 = 44,02V$$

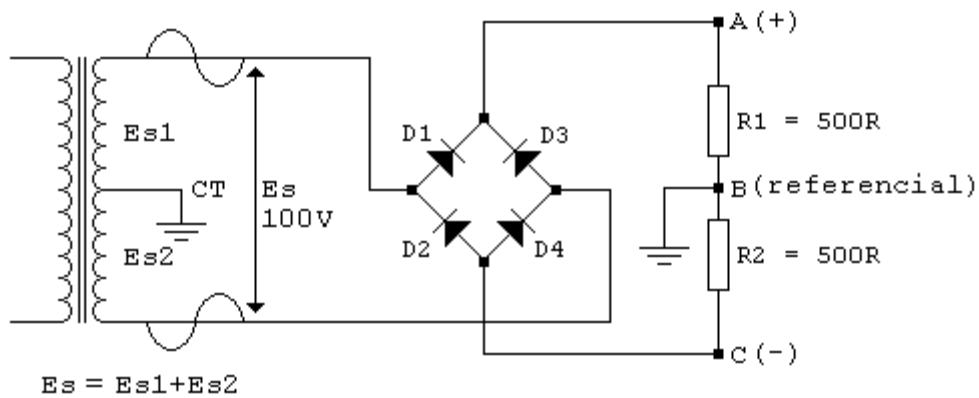
$$P_m (\text{carga}) = 44,02^2 / 500 = 3,88W$$

RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA SIMÉTRICO

O retificador de onda completa simétrico fornece duas tensões retificadas simétricas com polaridades opostas, sendo muito útil quando se deseja projetar retificadores para alimentação de amplificadores operacionais que na sua maioria necessitam de tensões positivas e negativas.

Para a obtenção de um retificador simétrico necessita-se de um transformador com secundário dotado de ponto neutro (CT).

Seu circuito básico é mostrado na figura abaixo.

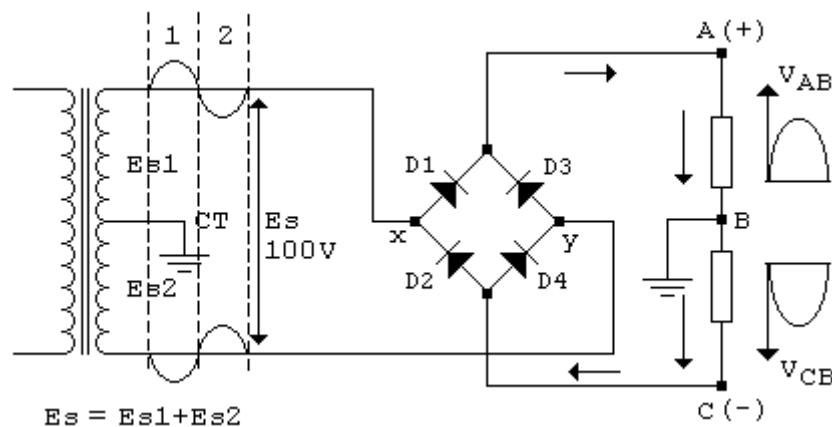


A análise de seu funcionamento é similar a do retificador de onda completa em ponte.

Note que o ponto B é o referencial e está ligado ao CT.

Com isto a tensão de saída terá polaridades opostas a partir desse referencial.

Veja a figura abaixo.



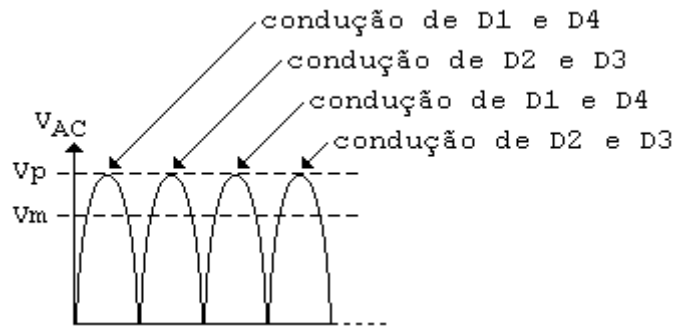
No instante 1, o ponto x torna-se positivo e o ponto y negativo. Isto fará os diodos D1 e D4 conduzirem enquanto que D2 e D3 estarão cortados.

No instante 2, o ponto x torna-se negativo e o ponto y positivo.

Isto fará D2 e D3 conduzir enquanto D1 e D4 estarão cortados.

Como resultado, em cada carga aparecerá uma tensão retificada de onda completa de amplitudes iguais porém com polaridades opostas, devido ao referencial representado pelo ponto B, o qual está interligado ao CT.

Entre os pontos A e C será medida uma tensão que é a soma das tensões entre os pontos A - B e B -C.



Observe na figura acima que entre os pontos A e C a tensão é positiva, visto que o ponto A é mais positivo do que o ponto C; evidentemente, esta tensão estaria invertida se fosse tomada entre os pontos C e A.

A tensão retificada média na carga pode ser calculada pela fórmula:

$$V_m \text{ ou } V_{dc} = \frac{[(E_s \cdot 1,41) - 2V_D] \cdot 0,637}{2}$$

ou

$$V_m \text{ ou } V_{dc} = [(E_{s1} \cdot 1,41) - V_D] \cdot 0,637$$

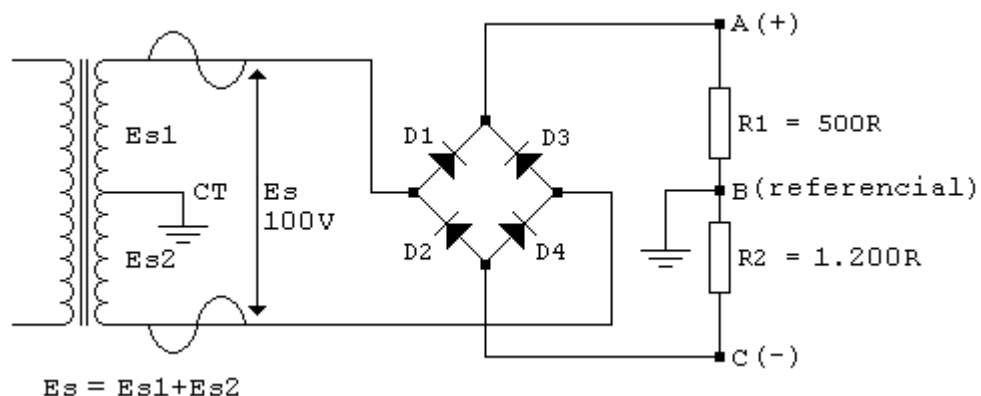
ou ainda

$$V_m \text{ ou } V_{dc} = [(E_{s2} \cdot 1,41) - V_D] \cdot 0,637$$

É importante lembrar que a simetria das tensões na saída do retificador será obtida somente se as tensões no secundário E_{s1} e E_{s2} forem iguais, mesmo que as correntes não o sejam.

EXEMPLO:

Para o circuito abaixo, calcule a tensão e a corrente médias em cada uma das cargas.



Solução:

tensão retificada média nas cargas:

$$\begin{aligned}V_m &= [(50 \cdot 1,41) - V_D] \cdot 0,637 \\V_m &= [(50 \cdot 1,41) - 0,7] \cdot 0,637 \\V_m &= 44,46V\end{aligned}$$

teremos: $\begin{cases} \text{em R1} & +44,46V \\ \text{em R2} & -44,46V \end{cases}$

corrente média nas cargas:

$$I_{m_{R1}} = \frac{44,46V}{500\Omega} = 88,92mA$$

$$I_{m_{R2}} = \frac{44,46V}{1,2k\Omega} = 37,05mA$$

FORMULÁRIO AUXILIAR:

Cálculo de potência:

$$\rightarrow P = E \cdot I$$

$$\rightarrow P = \frac{E^2}{R} \quad \rightarrow E = \sqrt{P \cdot R}$$

$$\rightarrow P = R \cdot I^2 \quad \rightarrow I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

Cálculo do valor de pico ou valor máximo de uma tensão:

$$V_p \text{ ou } V_{max} = V_{ef} \cdot 1,41$$

OBS: $V_{ef} = \text{valor eficaz} = V_{rms}$

Cálculo do valor de pico a pico de uma tensão (V_{pp}):

$$V_{pp} = 2V_p \text{ ou}$$

$$V_{pp} = V_{ef} \cdot 2,82$$

Cálculo do valor eficaz de uma tensão:

$$V_{ef} = V_p \cdot 0,707$$

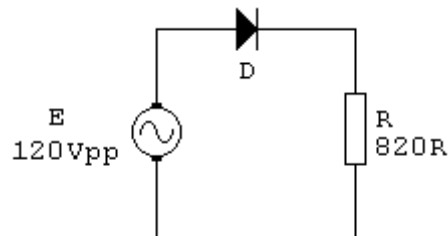
Cálculo do valor instantâneo de uma tensão senoidal:

$$V_{inst} = V_p \cdot \text{sen}\theta$$

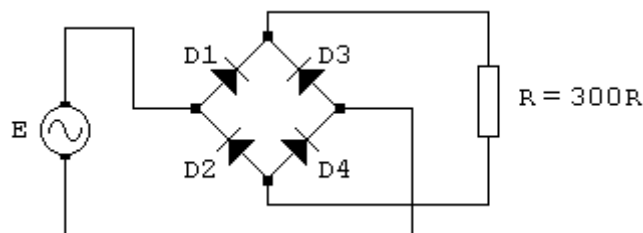
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

1 - No circuito abaixo, calcule:

- tensão retificada média na carga;
- corrente média na carga;
- potência na carga.

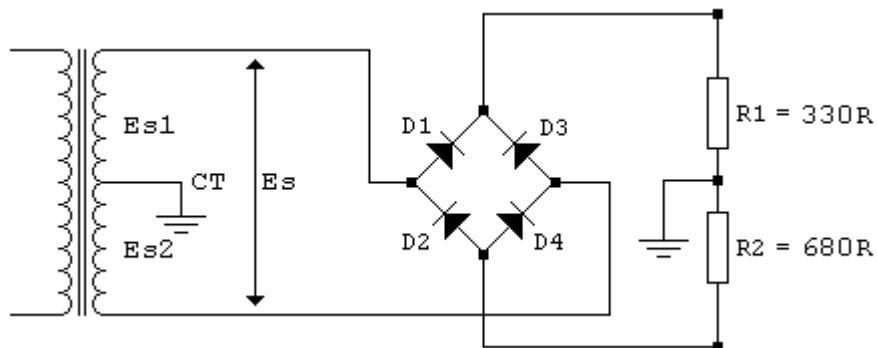


2 - No circuito abaixo sabe-se que o valor instantâneo de tensão em 60° é 186V. Calcule o valor retificado médio na carga.



3 - No circuito abaixo, sabe-se que a tensão $E_s = 225V$. Calcule:

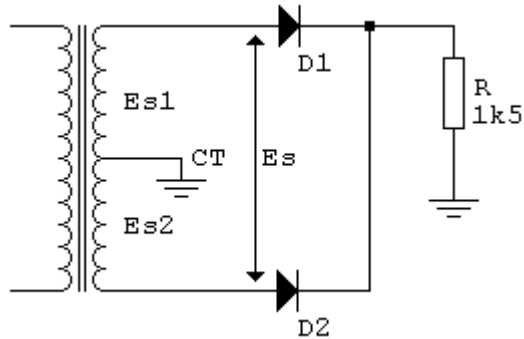
- tensão retificada média nas cargas;
- corrente nas cargas;
- potência nas cargas;
- qual deve ser a tensão de trabalho (TIP) dos diodos.



4 - Para o exercício acima desenhe em papel milimetrado A4 a forma de onda das tensões em cada carga, em escala, especificando os valores máximos e retificados médios para cada uma delas.

5 - No circuito a seguir, sabe-se que a tensão $E_s = 116V$. Calcule:

- a) a tensão retificada média na carga;
- b) a corrente na carga;
- c) a potência na carga;
- d) qual será a tensão média na carga se o diodo D1 abrir?



BIBLIOGRAFIA:

Basic Electronics - Bernard Grobb - Editora McGraw-Hill Kogakusha - Japan
Electronic Circuits - Donald L. Schilling, Charles Belove - Editora McGraw-Hill - International Editions - Singapore
Eletrônica - Albert Paul Malvino - Editora McGraw-Hill - SP