

IFSC

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

JOINVILLE - SC

ELETRÔNICA GERAL I

DIODOS E TRANSISTORES

Nivaldo T. Schiefler Jr.

Versão 1.0

Este material foi elaborado para ser usado como material de apoio, pois o seu conteúdo é restrito a algumas aplicações. Para um estudo mais aprofundado devem ser consultadas as literaturas comentadas no início das aulas e presente no cronograma entregue.

ÍNDICE

<u>1 Semicondutores.....</u>	.5
<u>1.1 Tipo n e tipo p.....</u>	6
<u>2 Diodos.....</u>	11
<u>2.1 Díodo sem polarização.....</u>	12
<u>2.2 Díodo com polarização reversa.....</u>	13
<u>2.3 Díodo com polarização direta.....</u>	15
<u>2.4 Curva característica do díodo.....</u>	16
<u>2.5 Circuito equivalente do díodo.....</u>	17
<u>3 Circuitos com diodos.....</u>	19
<u>3.1 Aplicação em corrente contínua.....</u>	21
<u>3.1.1 Exemplo 1.....</u>	22
<u>3.1.2 Exemplo 2.....</u>	23
<u>3.1.3 Exercícios propostos.....</u>	26
<u>3.2 Aplicação em corrente alternada.....</u>	27
<u>3.2.1 Circuito de meia onda.....</u>	27
<u>3.2.2 Circuito de onda completa – circuito em ponte.....</u>	30
<u>3.2.3 Circuito de onda completa – Transformador de TAP central.....</u>	31
<u>3.2.4 Circuito de meia onda com filtro.....</u>	33
<u>3.3 Grampeadores.....</u>	35
<u>3.3.1 Exemplo 1.....</u>	37
<u>3.3.2 Exercícios propostos.....</u>	38
<u>3.4 Díodo Zener.....</u>	41
<u>3.4.1 Exemplo 1.....</u>	45
<u>3.4.2 Exemplo 2.....</u>	46
<u>3.4.3 Exercícios propostos.....</u>	47
<u>4 Transistores Bipolares</u>	49
<u>4.1 Princípio de funcionamento.....</u>	50
<u>4.2 Polarização DC do BJT.....</u>	54
<u>4.2.1 Região de operação Linear.....</u>	55
<u>4.2.2 Região de operação de corte.....</u>	55
<u>4.2.3 Região de operação saturação.....</u>	55

<u>4.3 Exemplo de circuito com transistor.....</u>	<u>56</u>
<u> 4.3.1 Exemplo 1.....</u>	<u>58</u>
<u>4.4 Análise por reta de carga.....</u>	<u>59</u>
<u>4.5 Polarização por divisão de tensão.....</u>	<u>61</u>
<u>4.6 Transistor como chave.....</u>	<u>63</u>
<u>4.7 Exemplos.....</u>	<u>64</u>
<u> 4.7.1 Exemplo 1.....</u>	<u>64</u>
<u>4.8 Exercícios propostos.....</u>	<u>67</u>

1 Semicondutores

Assim como existem materiais condutores e materiais isolantes, existe um tipo de material que é um meio termo entre esses dois primeiros. Esse material é o semicondutor. O semicondutor, portanto, possui um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e um condutor. Na Figura 1.1, há uma representação entre os tipos de materiais em relação a sua condutividade.

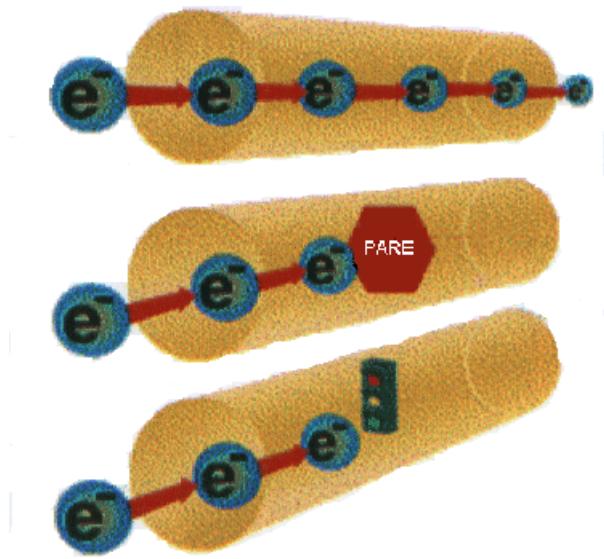


Figura 1.1 – Comparação entre os materiais condutores.

Pela Figura 1.1, nota-se que há uma condução de elétrons no seguimento superior, caracterizando um elemento condutor de elétrons. Já a figura central há um impedimento da passagem de elétrons, caracterizando um isolante. O ultimo elemento se caracteriza pela passagem ou não de elétrons, este elemento é considerado um semicondutor. Logo um semicondutor permite a passagem de corrente em certos momentos e estes certos momento é que permitiram que a eletrônica evoluísse a altos níveis tecnológicos.

Os materiais semicondutores mais usados na indústria eletrônica são o Germânio (Ge) e o Silício (Si), apesar do Silício predominar a produção atualmente. Seu comportamento se deve à sua ligação química, chamada ligação covalente (por compartilhar elétrons). Na Figura 1.2, há uma ilustração da estrutura bidimensional para este elemento.

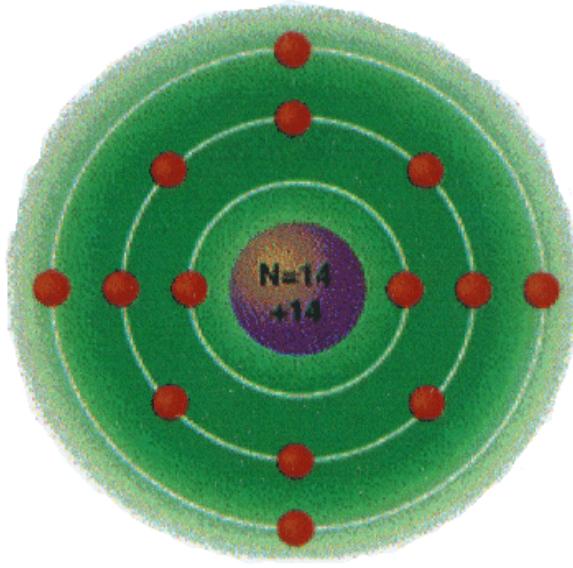


Figura 1.2 – Estrutura do átomo de silício.

Cada átomo do silício se liga a quatro átomos vizinhos através da ligação covalente, ou seja, pares de elétrons (da última camada de valência ou seja a última camada do Si) são compartilhados entre dois átomos. Os elétrons das camadas internas giram em torno do núcleo.

Um fato importante é que tanto o germânio bem como o silício, apresentam exatamente o mesmo tipo de estrutura que o diamante, variando apenas a dimensão.

1.1 Tipo n e tipo p

Da forma como foram apresentados nas figuras anteriores, em temperatura ambiente e completamente puro, o Si e o Ge são isolantes, ou seja, não conduzem corrente elétrica. Existem duas formas de aumentar a condutibilidade desses materiais. Uma delas é aumentando a sua temperatura. Conforme ilustrado na Figura 1.3.

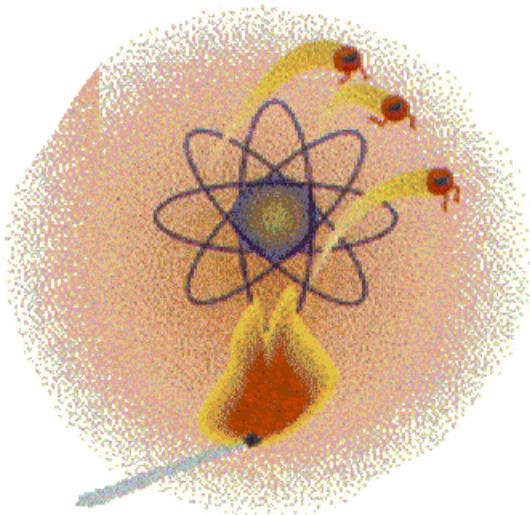


Figura 1.3 – Movimentos dos elétrons no átomo de silício com aquecimento.

Quanto maior a temperatura do semicondutor mais os elétrons da ultima camada (elétrons livres que podem ser compartilhados) se destacam de sua ligação e se tornam elétrons livres.

Outra forma de aumentar a condutibilidade do material semicondutor é introduzindo impurezas em sua estrutura química, tornando então, um semicondutor contaminado (também chamado de dopagem). Essas impurezas, são inseridas de forma uniforme pelo material e em quantidade controlada (um para um milhão, por exemplo) esse semicondutor apresentará novas características. A Figura 1.4, demonstra como um outro elemento se encaixa na estrutura de silício.

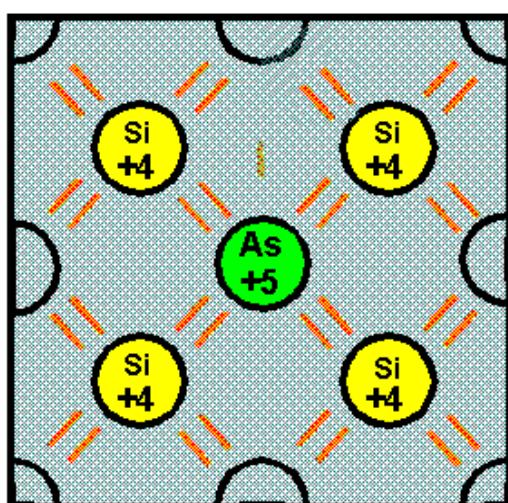


Figura 1.4 – Estrutura de silício com dopagem.

Por exemplo, se for utilizado o arsênio, conforme a Figura 1.4, como impureza, e com ele contaminarmos o silício, haverá então, no silício alguns átomos de arsênio espalhados pelo silício.

Como o arsênio é pentavalente, ou seja, tem cinco elétrons livre na camada de valência, tende a estabelecer cinco ligações com átomos vizinhos. Mas apenas quatro de seus elétrons são compartilhados com os átomos de silício, o quinto elétron ficará livre pelo material servindo, de transportador de carga negativa, notar que na Figura 1.4, há um elétrons livre. Preparado dessa forma o semicondutor é denominado de tipo n (negativo) e os átomos dos materiais que fornecem os elétrons de condução, no caso o arsênio, são denominados de elétrons doadores. Na Figura 1.5, pode-se notar ao fundo o átomo de silício com quatro (4) elétrons na camada de valência e mais a frente o átomo de arsênio com cinco (5) elétrons na camada de valência.

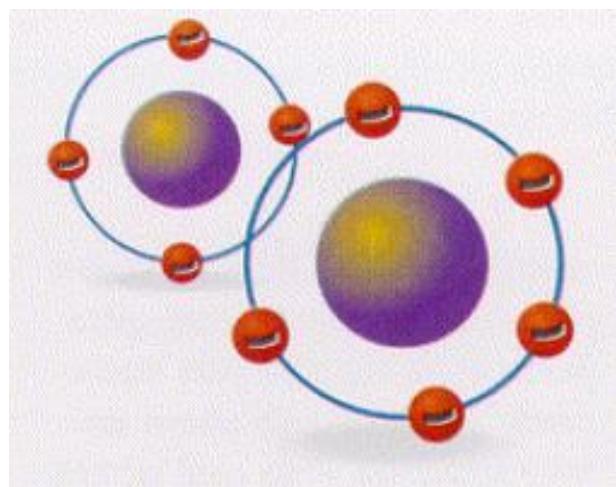


Figura 1.5 – Material tipo N.

Mesmo após a contaminação, o semicondutor permanece eletricamente neutro, pois o número de prótons carregados positivamente no núcleo ainda é igual ao número de elétrons livres, e carregados negativamente na estrutura.

Se, ao invés de se usar um material pentavalente na contaminação, usarmos um material trivalente (com três elétrons de valência), uma lacuna (neste caso uma lacuna se chama de buraco) será criada, pois agora há um número insuficiente de elétrons para completar as ligações covalentes da rede formada. A esse material semicondutor com impureza trivalente dá-se o nome de material tipo p (positivo) e seus transportadores de carga são lacunas. O

boro é um exemplo de material trivalente e é muito usado para esse fim. A Figura 1.6 ilustra este tipo de ligação.

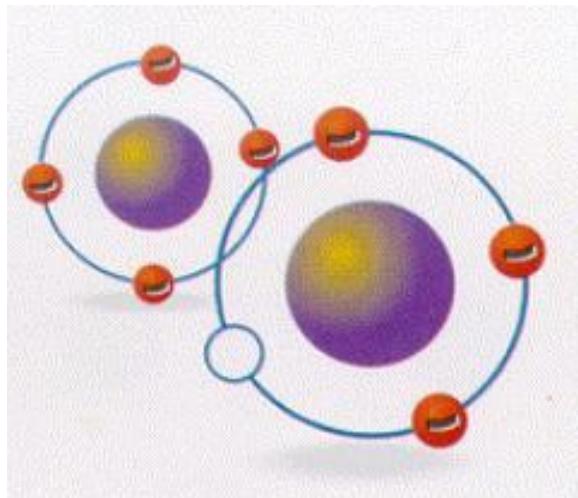


Figura 1.6 – Estrutura do material tipo P.

As impurezas com três elétrons de valência são chamadas átomos aceitadores. Da mesma forma que o material tipo n, esse é eletronicamente neutro.

Quando um elétron se move para um lado preenchendo uma lacuna, forma-se uma lacuna no lugar onde esse elétron estava, podendo-se considerar que a lacuna moveu-se para o lado oposto do elétron. Este movimento é possível, quando o um elétron adquire energia cinética suficiente para quebrar uma ligação covalente e seguir para um buraco. Na Figura 1.7, onde se pode notar o movimento de elétrons e buraco.

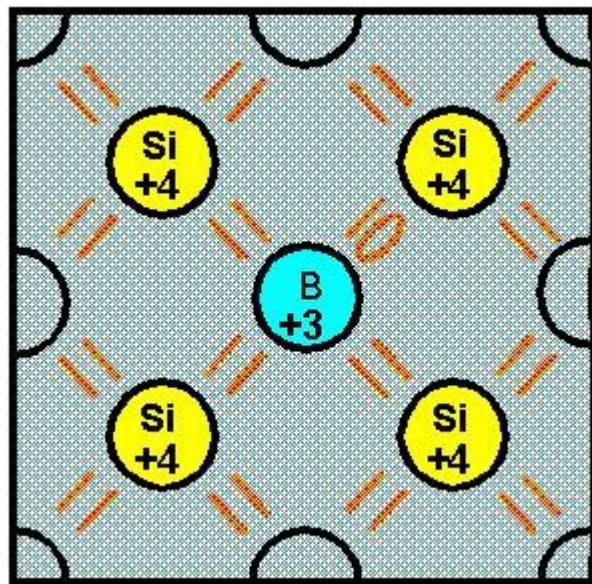


Figura 1.7 – Fluxo de elétrons em uma estrutura impura.

2 Diodos

Um diodo é um dispositivo passivo, porém *não linear*. O diodo é composto por uma junção de semicondutores com dopagem tipo *p* e *n* (*junção pn*), sendo que esta junção permite mais facilmente a passagem de portadores de carga em um sentido que em outro. O diodo de um modo geral, é um dispositivo, que quando *em polarização direta* permite a passagem de corrente, e em polarização *reversa* impede a passagem de corrente. Pela Figura 2.1, se verifica o desenho característico de um diodo.

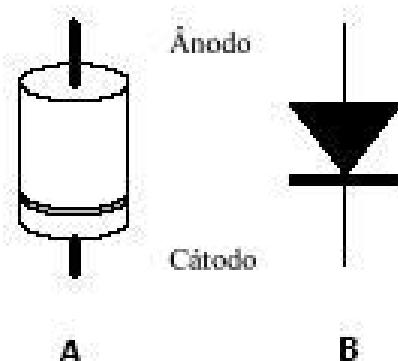


Figura 2.1 – Simbologia de um diodo.

Na Figura 2.1, o item A refere-se a elemento diodo ou seja ao componente real e o item B, refere-se a simbologia elétrica do elemento. Esta simbologia é usada em qualquer sistema de simulador e esquema eletrônicos.

Pela junção dos materiais dopados tipo *n* e *p*, conforme visto na Figura 2.2, há o aparecimento do diodo semicondutor.



Figura 2.2 – Junção do elemento tipo *n* e *p*.

Com a junção dos dois tipos de elementos, os elétrons e buracos na região de junção se combinam, fazendo uma região de equilíbrio, pois houve uma troca de ligações. A Figura 2.3 está ilustrando esta situação.

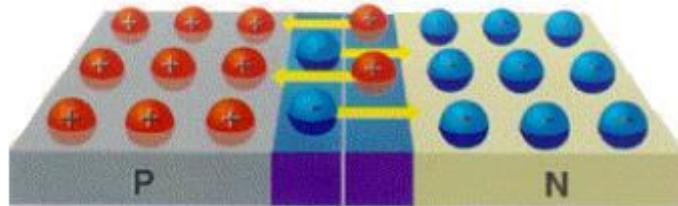


Figura 2.3 – Junção dos dois materiais.

Com esta junção, há o aparecimento de uma região de equilíbrio, que se chama região de depleção. Neste caso conforme a Figura 2.3, o diodo é um elemento de dois terminais com uma região de equilíbrio na junção. Este tipo de estrutura quando aplicada a uma tensão entre os terminais (neste caso uma tensão chamada de V_D) leva o elemento diodo a operar em três possibilidades:

- ✓ Nenhuma polarização.
- ✓ Polarização direta.
- ✓ Polarização reversa.

Cada tipo de situação resulta um tipo de operação do elemento diodo. Com estes três tipos de operação é possível projetar circuitos para operações específicas.

2.1 Diodo sem polarização

Quando não se aplica uma tensão entre os terminais do diodo, não haverá fluxo de carga entre o lado de dopagem p e o lado n. Desta maneira não haverá uma corrente resultante circulando. Pela Figura 2.4, há uma representação desta situação.

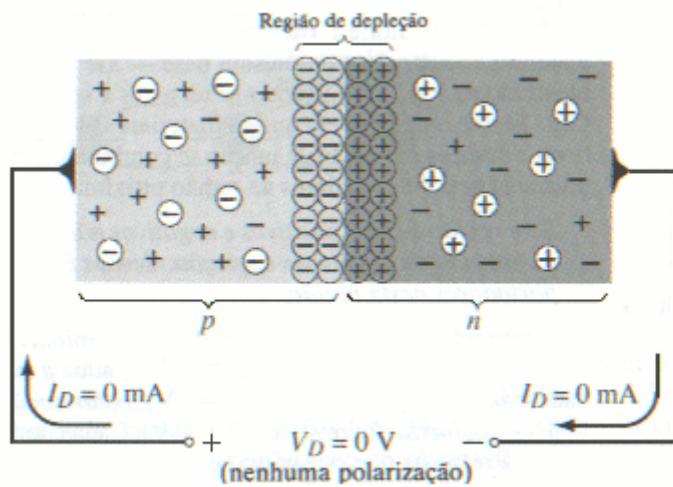


Figura 2.4 – Díodo sem polarização.

Pela Figura 2.5, há uma representação de um diodo, sem polarização, onde não há a ocorrência de fluxo de elétrons e desta maneira a inexistência da passagem de corrente elétrica.

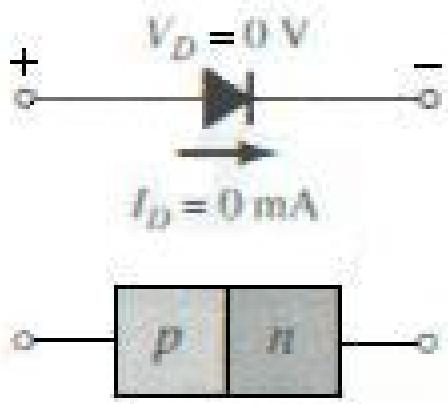


Figura 2.5 – Simbologia do diodo sem polarização.

2.2 Díodo com polarização reversa

Se for aplicado um potencial de grande amplitude, for aplicado entre os terminais do diodo e este potencial for aplicado nos terminais contrário do diodo, haverá uma polarização chamada reversa.

Pela Figura 2.6, nota-se que quando aplicado um potencial contrário aos terminais anodo e catodo do diodo, há um aparecimento de um corrente de saturação I_s .

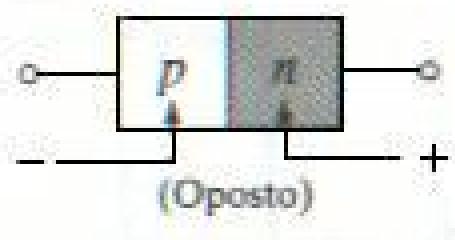
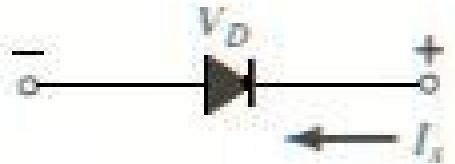


Figura 2.6 – Representação do diodo com polarização reversa.

Quando é aplicada uma tensão contraria a polaridade normal do diodo, há um aumento da região de depleção e não permitindo a passagem de corrente elétrica (Figura 2.7).



Figura 2.7 – Aumento da região de depleção.

A corrente de saturação que aparece, pela polarização reversa é geralmente na ordem de *nanoampéres*. O nome saturação vem porque esta

corrente tem o seu valor alcançado de maneira muito rápida e o aumento de tensão entre os terminais não faz esta corrente aumentar. Este tipo de corrente poderá ser visto em futuro gráfico a ser mostrado.

2.3 Díodo com polarização direta

Quando se aplica um potencial entre os terminais anodo e catodo do diodo, há uma situação chamada de polarização direta. Pela Figura 2.8, pode-se ver claramente quando esta situação é possível.

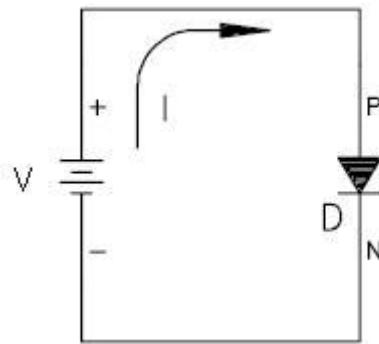


Figura 2.8 – Polarização direta.

A aplicação de um certo potencial entre os terminais do diodo, força a troca de elétrons e buracos de um material tipo n e tipo p. Esta troca de elétrons provoca uma diminuição da região de depleção, esta situação pode ser vista na Figura 2.9.

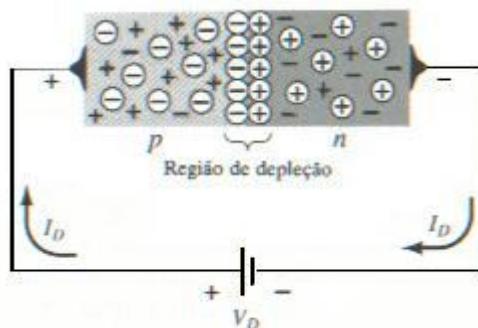


Figura 2.9 – Estrutura da polarização direta.

2.4 Curva característica do diodo

Pela Figura 2.10 há uma representação das curvas características entre o diodo de silício e germânio.

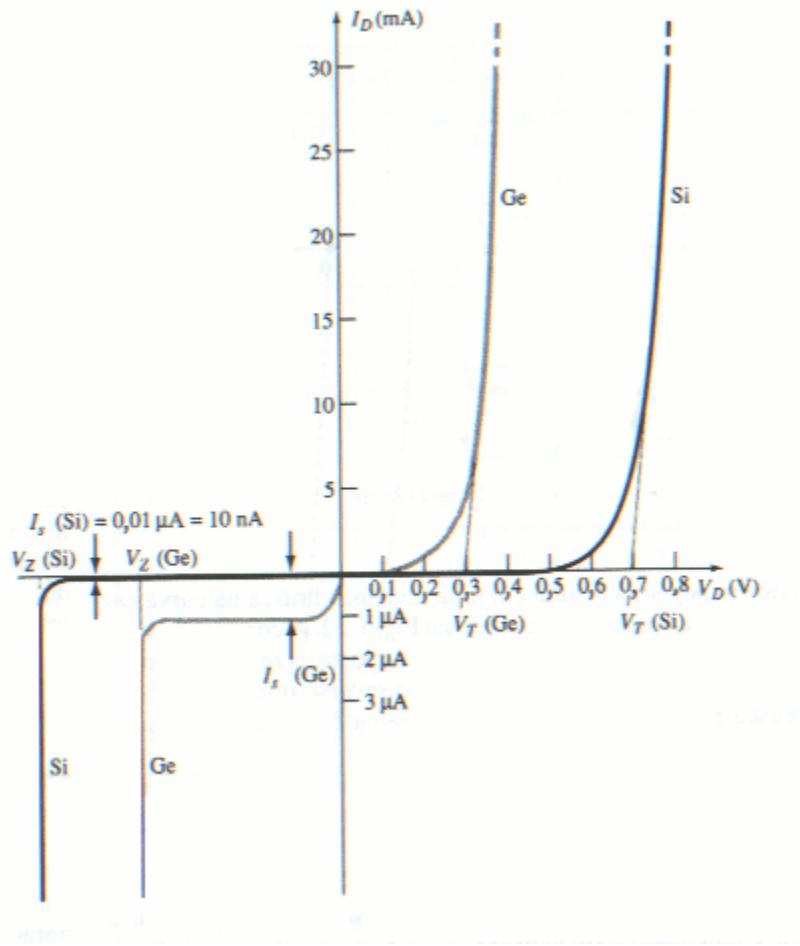


Figura 2.10 – Curva característica do diodo de silício e germânio.

Pela figura, nota-se que para o diodo há um valor da tensão gerado pela região de depleção. Este valor é de aproximadamente 0,7 volts e para o germânio é de 0,3 volts. Nota-se que para valores abaixo de 0,7 há uma pequena passagem de corrente e quando este valor é ultrapassado há uma passagem de níveis elevados de corrente elétrica.

É possível ver também que no lado esquerdo do gráfico, há a parcela da corrente de saturação para quando ocorrer a polarização reversa. Esta parcela é na ordem de *nanoampér*. Nota-se também que existe uma tensão V_Z , chamada de tensão zener. Esta situação é a máxima tensão possível que

poder ser colocada reversamente. Se for aplicada uma tensão maior que o permitido, haverá uma condução reversa que poderá danificar tanto o diodo, bem como o circuito associado.

2.5 Circuito equivalente do diodo

Como visto na curva característica, o diodo começa a conduzir a partir de um determinado potencial, que no caso do diodo de silício era de 0,7V. Nota-se pela curva que tem um comportamento de uma exponencial crescente. Desta forma pode-se aproximar o diodo a um circuito equivalente.

O modelo linear é representado por uma associação de uma fonte de tensão constante V_T que corresponde a tensão de condução do diodo (0,7V). Associado em série uma resistência r_{av} , que dá o comportamento de inclinação da curva e mais o diodo ideal que corresponde à condução em um só sentido. Este tipo de modelo linear é ilustrado na Figura 2.11.



Figura 2.11 – Modelo linear.

Quando se pensa em um circuito como um todo, ou seja, o diodo e o restante total de um circuito, pode-se desprezar a resistência r_{av} Figura 2.12.

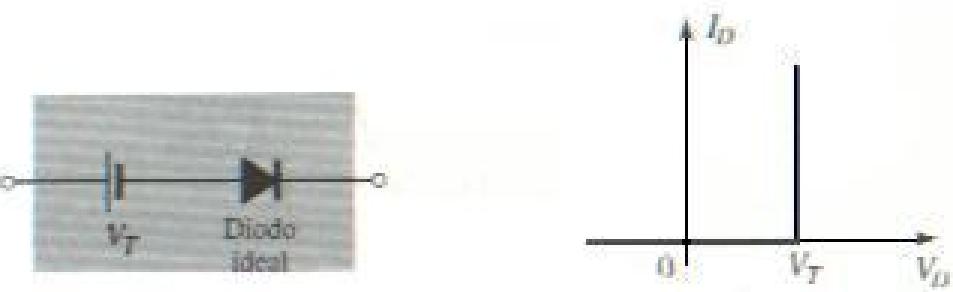


Figura 2.12 – Modelo simplificado.

Esta situação é possível porque está resistência é muito menor que todo o circuito e pode ser desprezada. Desta forma o circuito fica com uma fonte em série com o diodo ideal.

Para uma análise mais simples e rápida, pode-se aproximar para um modelo ideal, conforme visto pela figura 2.13. Note-se que quando a tensão aplicada for maior que zero, haverá condução de corrente elétrica.

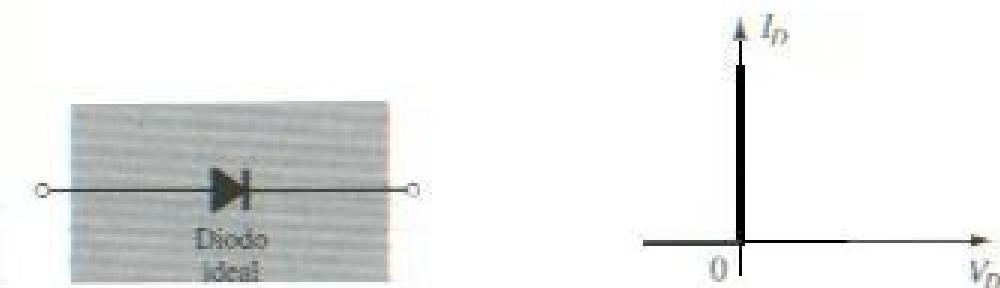


Figura 2.13 – Modelo ideal.

3 Circuitos com diodos

Antes de começar a fazer um estudo de como o diodo interfere no comportamento do circuito, vale a pena fazer uma revisão geral considerando o diodo ideal. Pela Figura 3.1, há uma visão geral do comportamento do circuito com diodo.

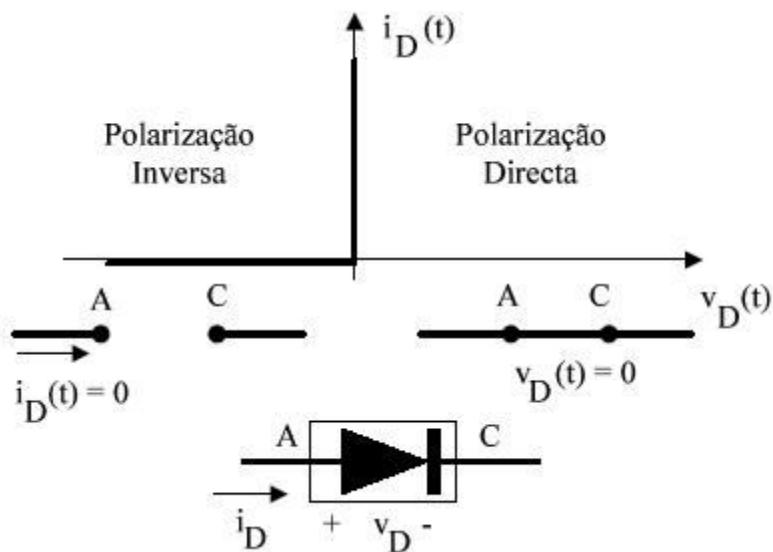


Figura 3.1 – Operação do diodo ideal.

Conforme visto nos itens 2.1 a 2.3, o diodo tem três situações de operação. Pelo gráfico nota-se:

- ✓ Quando for aplicada uma tensão menor que zero, o diodo se comporta como um circuito aberto. Logo em circuito aberto a corrente que passa pelo diodo será zero.
- ✓ Quando for aplicada uma tensão igual a zero ou superior, o circuito se comporta como um curto circuito, com isso o diodo começa a conduzir corrente.

Analizando um circuito mais simples com um diodo ideal e mais um resistor em série, quando submetido a uma fonte de tensão. Pela Figura 3.2, pode ver como é este tipo de aplicação.

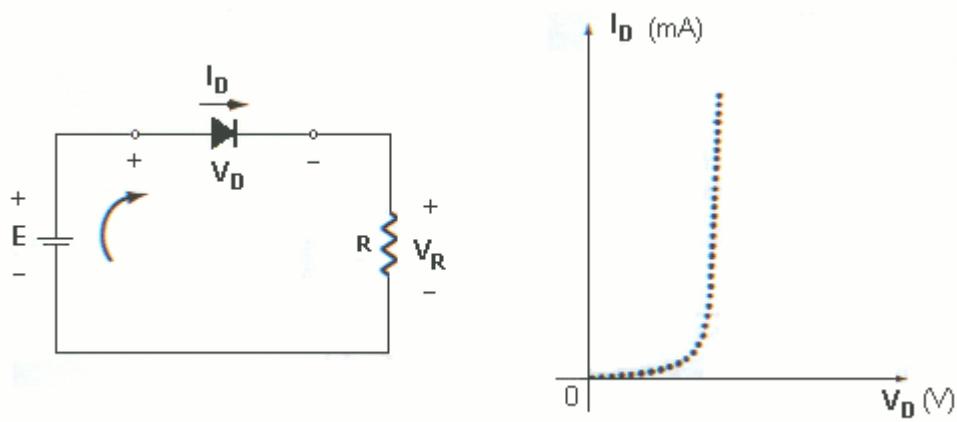


Figura 3.2 – Diodo em série com um resistor.

Fazendo uma análise do circuito tem-se:

$$E = V_D + I_D R \quad \text{equação 3.1}$$

Considerando um diodo ideal onde $V_D = 0$ tem-se a equação 3.2.

$$E = 0 + I_D R \quad \text{equação 3.2}$$

$$E = I_D R \quad \text{equação 3.3}$$

O gráfico Figura 3.2, mostra o comportamento da equação 3.1, onde é considerado a tensão criada pela região de depleção do diodo. Onde a corrente é dada pela equação 3.4.

$$I_D = \frac{E - V_D}{R} \quad \text{equação 3.4}$$

3.1 Aplicação em corrente contínua

Para um circuito conforme a Figura 3.3, e utilizando o modelo aproximado, ou seja, considerando a tensão do diodo de 0,7V. Tirando a equação do circuito têm-se dois pontos de queda de tensão.

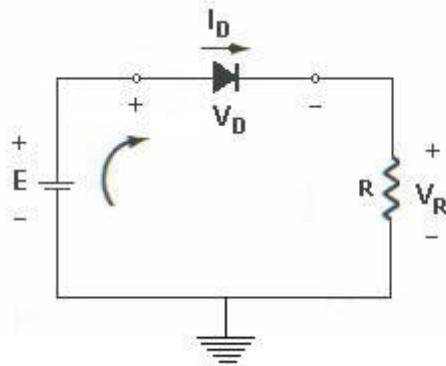


Figura 3.3 – Circuito com fonte DC.

$$E = V_D + V_R \quad \text{equação 3.5}$$

Onde V_R é a queda de tensão do resistor.

$$E = V_D + I_D R \quad \text{equação 3.6}$$

Analizando agora o circuito da Figura 3.4, onde é considerada uma tensão do diodo de 0,7V, pode-se ter uma equação conforme a equação 3.7.

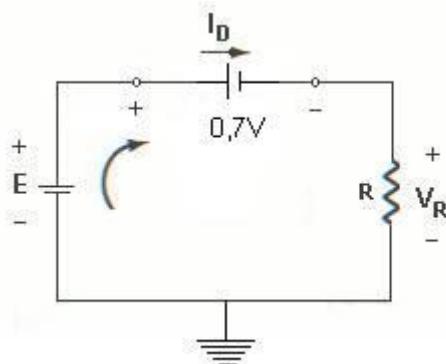


Figura 3.4 – Circuito considerando a tensão do diodo.

$$E = 0,7 + I_D R \quad \text{equação 3.7}$$

Se a tensão aplicada no circuito for menor que 0,7, o circuito terá um comportamento de circuito aberto. Esta situação pode ser vista pela ilustração da Figura 3.5.

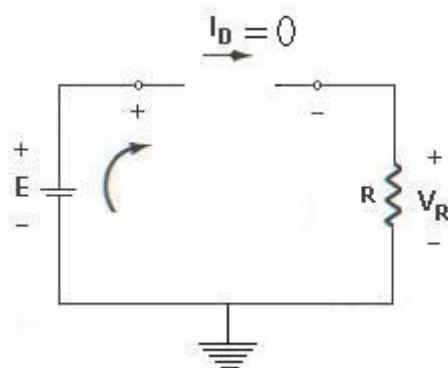


Figura 3.5 – Circuito com tensão menor que 0,7 volts.

Neste caso a queda de tensão no resistor R será de 0V. Pela equação 3.8, pode-se provar esta situação.

$$V_R = I_D R \quad \text{equação 3.8}$$

Como a corrente é zero, a tensão será nula.

3.1.1 Exemplo 1

Para o circuito da Figura 3.6, determine V_D , V_R , I_D e I_R . Considere uma fonte E de 8,0 volts.

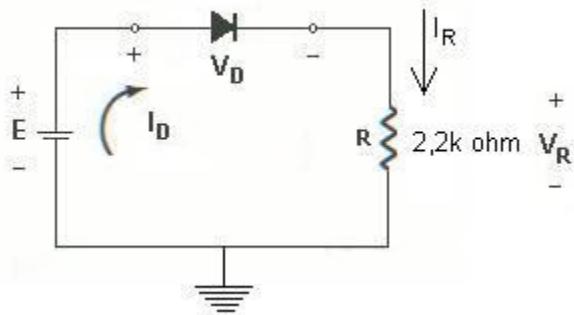


Figura 3.6 – Circuito série.

Solução:

- ✓ A tensão V_D é igual da tensão do diodo, ou seja, $V_D = 0,7V$
- ✓ A tensão no resistor R é dada pela equação 3.10.

$$V_R = E - V_D \quad \text{equação 3.9}$$

$$V_R = 8 - 0,7 = 7,3V \quad \text{equação 3.10}$$

- ✓ O valor da corrente do diodo e do resistor é mesmo, pois este é um circuito série.

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} \quad \text{equação 3.11}$$

$$I_D = I_R = \frac{7,3}{2,2k} = 3,32mA \quad \text{equação 3.12}$$

3.1.2 Exemplo 2

Considere o mesmo circuito da Figura 3.7, mas com uma fonte E com um valor de 0,5V. Determine V_R , I_D , I_R e V_D .

Analizando o circuito, nota-se que a barreira de tensão do diodo é de 0,7 volts e como a fonte é de 0,5V, não haverá condução de corrente.

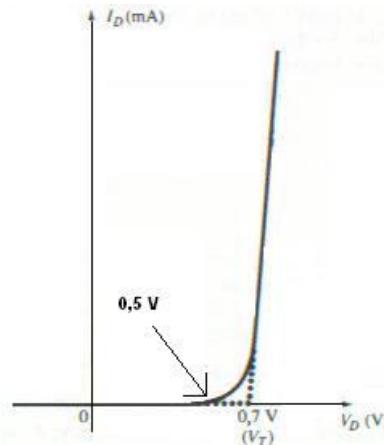


Figura 3.7 – Gráfico do circuito com fonte menor que tensão do diodo.

Conforme a Figura 3.7, vê-se que a tensão da fonte é inferior a tensão do diodo. Neste caso o circuito se comporta com fosse um circuito aberto. Figura 3.8.

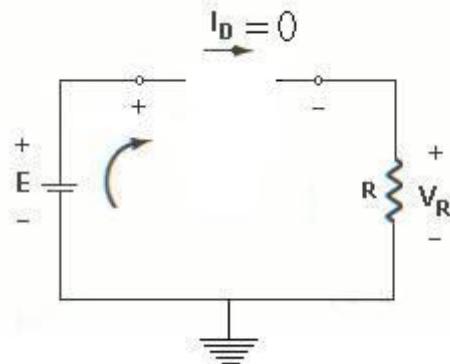


Figura 3.8 – Circuito equivalente do exemplo 2.

Neste caso, as correntes I_D e I_R , são zero amperes e a tensão no diodo é a mesma que a da fonte. Esta situação é fácil comprovar, pelas equações 3.13 e 3.14.

$$I_D = 0A$$

$$V_R = I_D R = 0 \cdot 2,2k = 0V \quad \text{equação 3.13}$$

$$E = V_D + V_R = 0,5 = V_D + 0 \quad \text{equação 3.14}$$

Resultando:

$$V_D = 0,5V$$

3.1.3 Exercícios propostos

1. Para o circuito da Figura 3.9, analise o comportamento e determine V_o , P_D e I_D . Considere $V_D = 0,7V$.

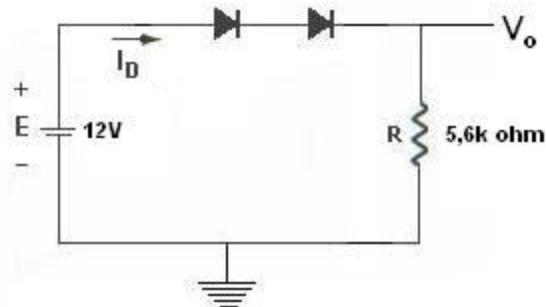


Figura 3.9 – Circuito proposto 1.

2. Determine V_o , V_{D2} , P_{D1} , P_{D2} e I_D do circuito da Figura 3.10. Considere as tensões dos diodos $V_D = 0,7V$.

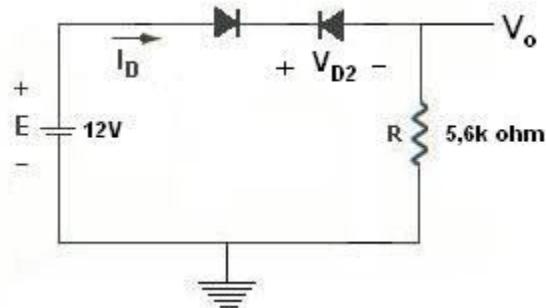


Figura 3.10 – Circuito proposto 2.

3. Analise o circuito da Figura 3.11 e determine I , V_A , V_R e V_o .

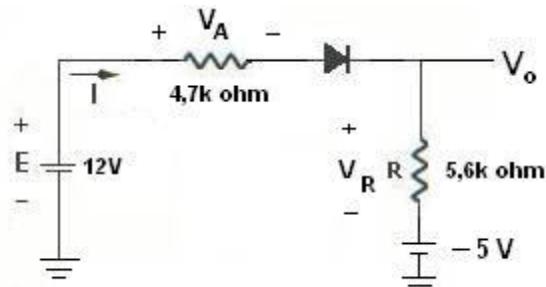


Figura 3.11 – Circuito proposto 3.

3.2 Aplicação em corrente alternada

Até agora foi estudado o comportamento do diodo em corrente contínua em algumas configurações. Para começar um estudo, será estudado um circuito mais básico e muito importante para o entendimento de um eliminador de pilha, ou seja, quando se usa um carregador de bateria de um telefone celular, o usuário não tem a mínima ideia de que se trata este carregador e como este é construído.

3.2.1 Circuito de meia onda

Para entender como um sinal senoidal pode ser convertido em corrente contínua, deve-se estudar os circuitos mais básicos e este circuito é o circuito retificador de meia onda (Figura 3.12).

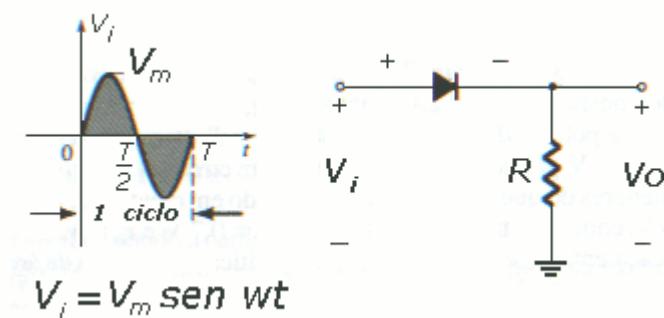


Figura 3.12 – Circuito retificador de meia onda.

Pela Figura 3.12, nota-se que para um sinal de entrada senoidal de amplitude V_m , ou seja, valor de pico do sinal a tensão V_o terá um valor. Para saber este valor, um estudo do comportamento do sinal sobre o circuito deve ser feito.

Considerando um diodo ideal, a corrente circula pelo circuito no sentido positivo. Analisando a Figura 3.13, pode-se ter uma idéia do comportamento do circuito.

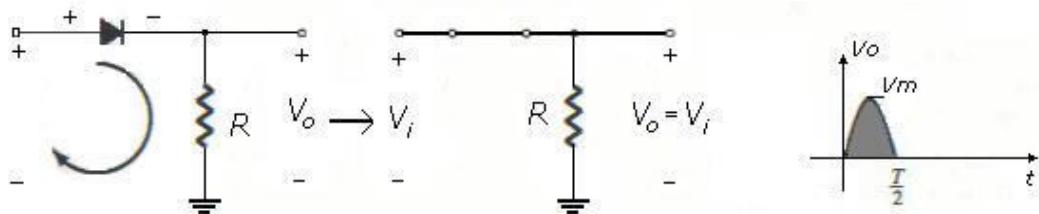


Figura 3.13 – Ciclo positivo do sinal.

Pela Figura 3.13, pode-se notar que no sentido positivo da fonte (ciclo positivo do sinal) o diodo neste caso considerado ideal, o diodo é substituído como um curto circuito.

Agora analisando o ciclo negativo da fonte pela Figura 3.14, tem-se a conclusão que o diodo é substituído por um circuito aberto.

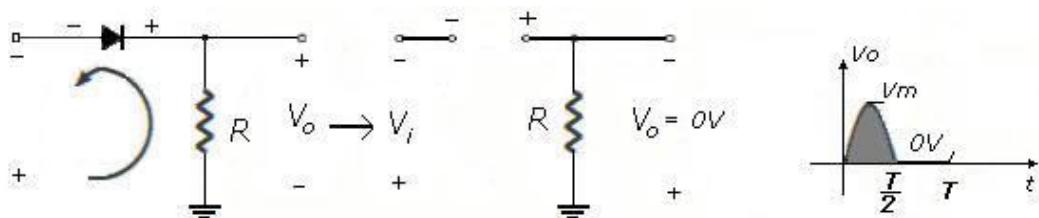


Figura 3.14 – Ciclo negativo do sinal.

Pela Figura 3.14, pode-se ver que a forma de onde aplicado pela fonte sobre o resistor (carga) é um sinal de meia onda. Calculando o valor médio da tensão sobre a carga tem-se a seguinte

$$V_{o_Medio} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\pi} V_m \operatorname{sen}(wt) dt + \int_{\pi}^{2\pi} 0 dt \right)$$

Resolvendo:

$$V_{o_medio} = 0.318 \cdot V_m \quad \text{equação 3.15}$$

Se for considerado a tensão do diodo de 0,7v a equação 3.15 fica:

$$V_{o \text{ médio}} = 0.318 \cdot (V_m - V_d)$$

equação 3.16

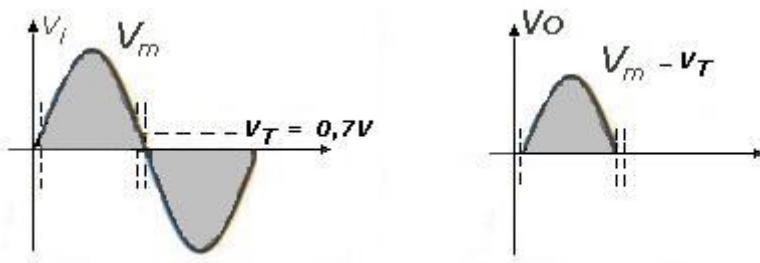


Figura 3.15 – Sinal de saída com V_D .

Pela Figura 3.14, calculando a tensão reversa máxima aplicada pelo circuito no diodo é dado pela equação 3.17.

$$T_{RM} = V_m$$

equação 3.17

O valor máximo suportado pelo diodo é dado pelo manual do fabricante.

Para o circuito da Figura 3.16, esboce a forma de onda na carga e o valor da tensão média. Considerando 0,7v no diodo.

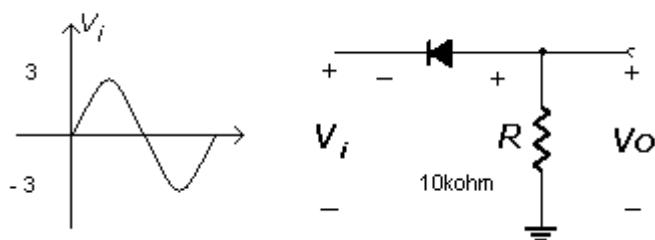


Figura 3.16 – Circuito de meia onda.

$$V_{L_Medio} = 0,318 \cdot 3 = 0,954v$$

Como o circuito se comporta como um curto no ciclo positivo. A forma de onda na carga é dada pela Figura 3.17.

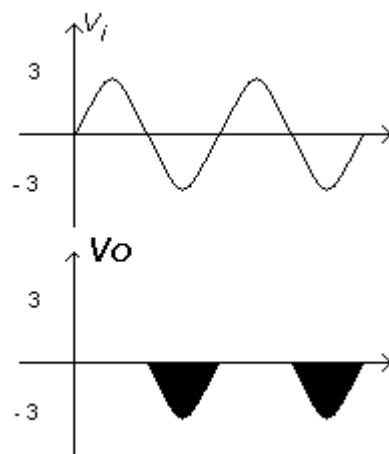


Figura 3.17 – Forma de onda na carga.

3.2.2 Circuito de onda completa – circuito em ponte

Outro retificador muito usado é o retificador em ponte. Este tipo de estrutura é usado por não necessitar de um transformador com um tap central e a tensão aplicada no diodo é apenas o valor da fonte. A Figura 3.18, ilustra este tipo de circuito.

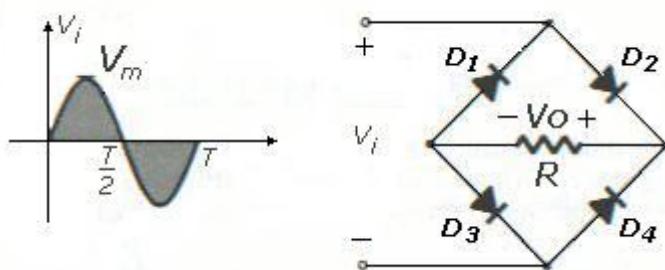


Figura 3.18 – Circuito de onda completa em ponte.

Analizando o sentido positivo da fonte, os diodos 1 e 4 ficam abertos e os diodos 2 e 3 se comportam como um curto. A Figura 3.19, mostra o comportamento do sentido positivo.

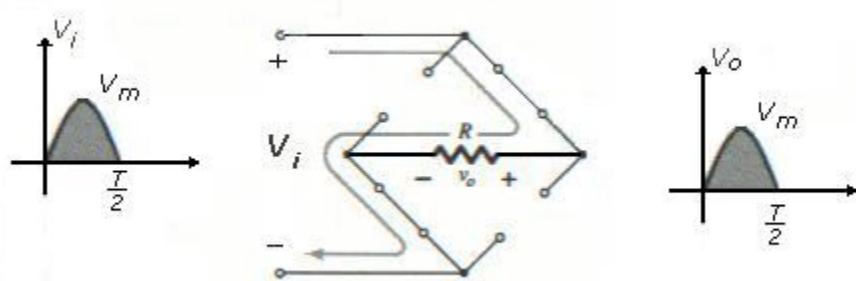


Figura 3.19 – Circuito de onda completa no sentido positivo da fonte.

A Figura 3.20, mostra o comportamento do sentido negativo da fonte.

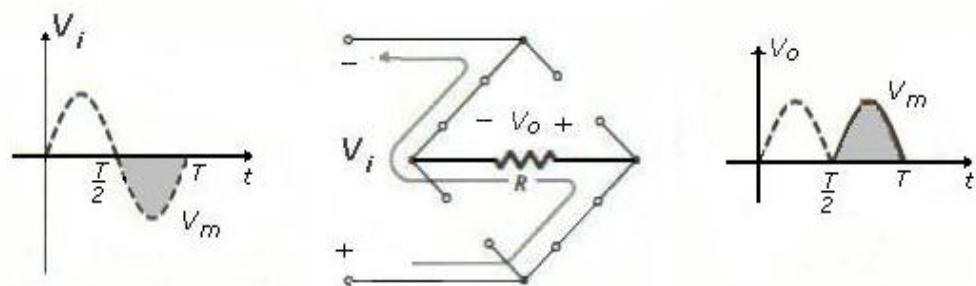


Figura 3.20 – Circuito de onda completa no sentido negativo da fonte.

Como resultado, a forma de onda na carga é ilustrada na Figura 3.21.

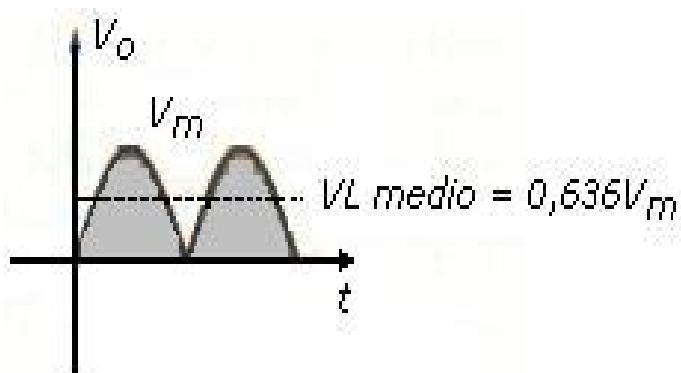


Figura 3.21 – Forma de onda na carga.

3.2.3 Circuito de onda completa – Transformador de TAP central

Já um tipo de estrutura com um transformador com o tap central é ilustrado na Figura 3.22.

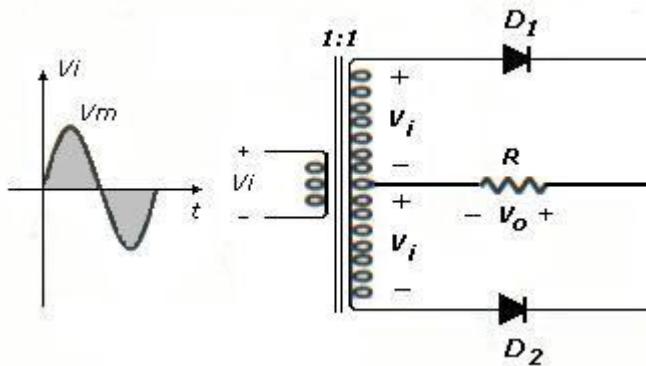


Figura 3.22 – Retificador de onda completa com tap central.

A Figura 3.23, ilustra o comportamento no sentido positivo da fonte, onde o diodo 1 se comporta como um curto e o diodo 2 um circuito aberto.

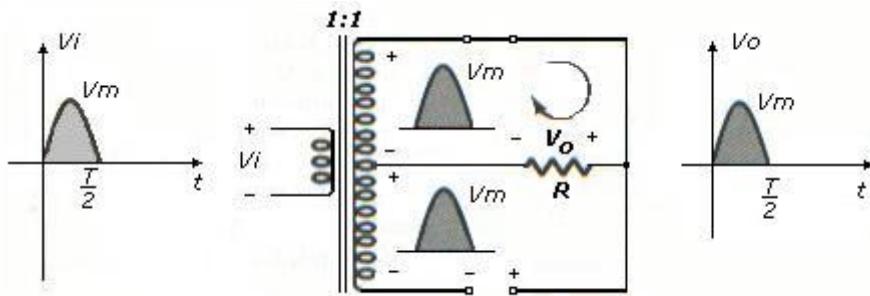


Figura 3.23 – Retificador de onda completa com tap central, sentido positivo.

Neste caso a tensão aplicada no diodo é de duas vezes o valor do secundário.

Analizando o sentido negativo da fonte (Figura 3.24), o diodo 1 agora abre e o diodo 2 vira um curto. Já a tensão aplicado no diodo 2 é de duas vezes a tensão do secundário.

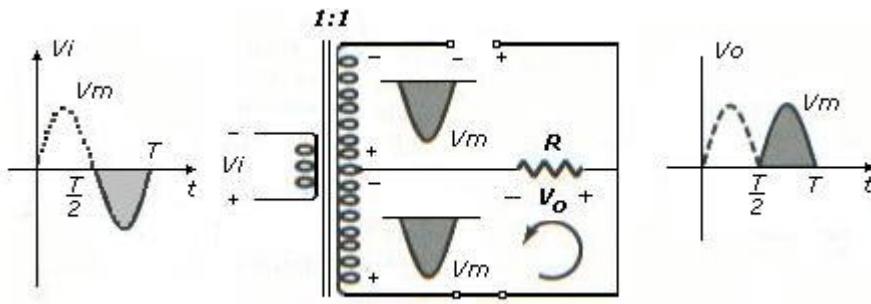


Figura 3.24 – Retificador de onda completa com tap central, sentido negativo.

Calculando o valor médio tem-se:

$$V_{0_medio} = 2 \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m \operatorname{sen}(wt) dt \quad \text{equação 3.18}$$

$$V_{0_medio} = 0,636V_m \quad \text{equação 3.19}$$

3.2.4 Circuito de meia onda com filtro

Analizando o circuito da Figura 3.25, se nota que quando o diodo conduz, o capacitor se carrega até o valor de pico da fonte.

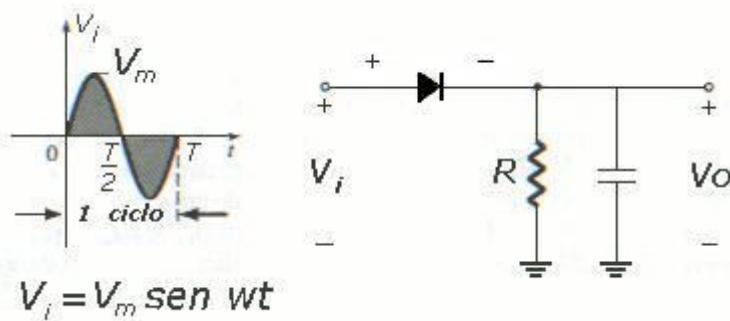


Figura 3.25 – Retificador de meia onda com filtro.

Já no sentido negativo o capacitor descarregue pela resistência. A Figura 3.26 mostra a forma de onda final na carga.

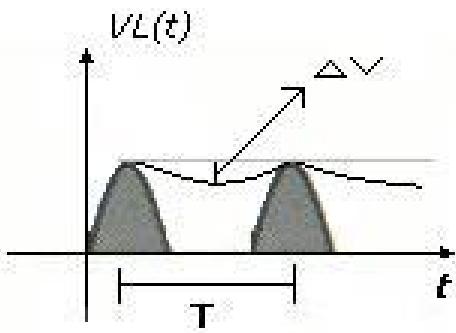


Figura 3.26 – Forma de onda na carda do retificador de meia onda com filtro.

Há um aparecimento de um ΔV e este depende da constante de tempo do circuito ($\tau = RC$). As equações para este tipo de estrutura são:

$$V_{L_medio} = V_p - \frac{\Delta V}{2} \quad \text{equação 3.20}$$

$$I_L = \frac{V_p}{R_L} \quad \text{equação 3.21}$$

$$\Delta V = \frac{I_L T}{C} \quad \text{equação 3.22}$$

$$\Delta q = \frac{\Delta q}{C} \quad \text{equação 3.23}$$

$$\Delta q = I_L T \quad \text{equação 3.24}$$

Para circuito com filtro com onda completa basta trocar a equação 3.25 e o valor médio na carga é dado pela mesma equação 3.20.

$$\Delta q = \frac{\Delta q}{2C} \quad \text{equação 3.25}$$

3.3 Grampeadores

O circuito grampeador (Figura 3.27), de uma forma geral, grampeia um valor de tensão quando aplicado a um circuito com uma determinada configuração. (Diodo ideal)

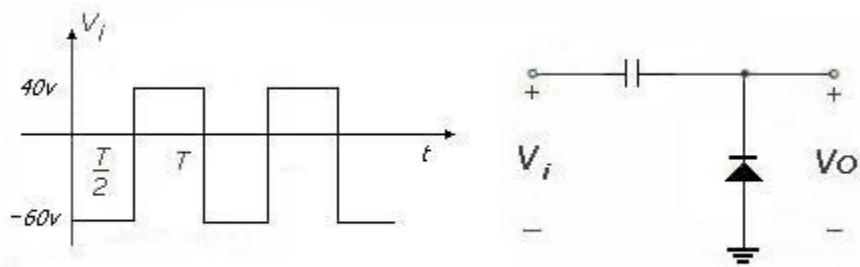


Figura 3.27 – Circuito grampeador.

Analizando (Figura 3.28) o sentido positivo do sinal de entrada.

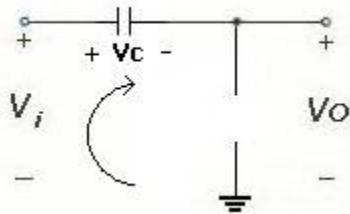


Figura 3.28 – Circuito grampeador, sentido positivo – diodo aberto.

$$V_C + V_0 = V_i$$

$$V_0 = V_i - V_C$$

Analizando (Figura 3.28) o sentido negativo do sinal de entrada.

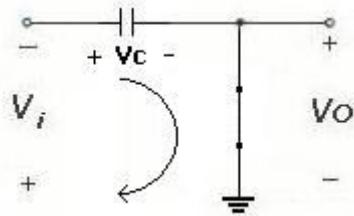


Figura 3.29 – Circuito grampeador, sentido negativo – diodo como curto.

$$V_c + V_i = 0$$

$$V_c = -V_i = -60V$$

$$V_o = 0V$$

✓ Para $V_i = 40V$ a tensão em $V_o = 100V$

✓ Para $V_i = -60V$ a tensão em $V_o = 0V$

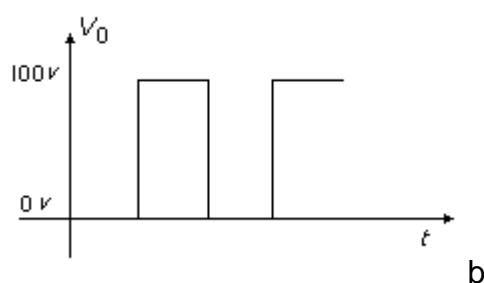
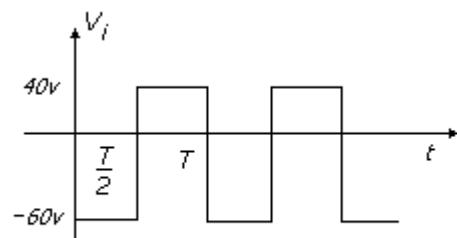


Figura 3.30 – Circuito grampeador, forma de onda na carga.

3.3.1 Exemplo 1

Considere diodo ideal.

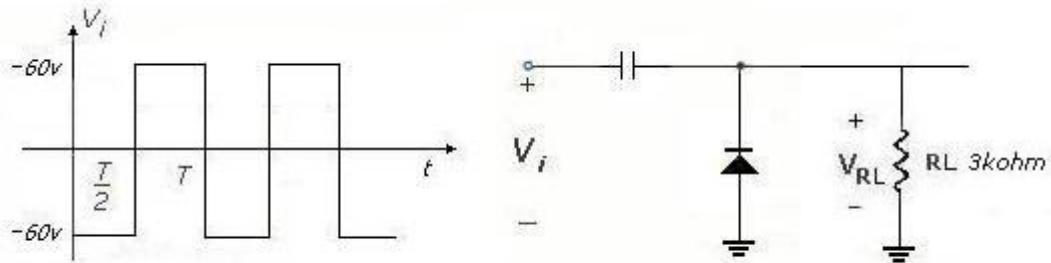


Figura 3.31 – Circuito grampeador.

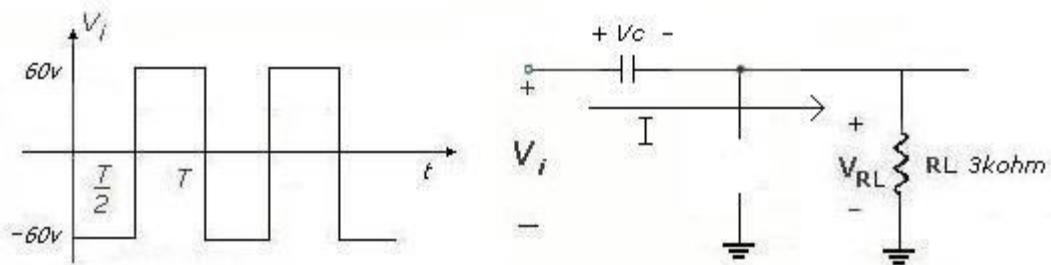


Figura 3.32 – Circuito grampeador com sentido positivo.

$$-V_i + V_C + V_{RL}$$

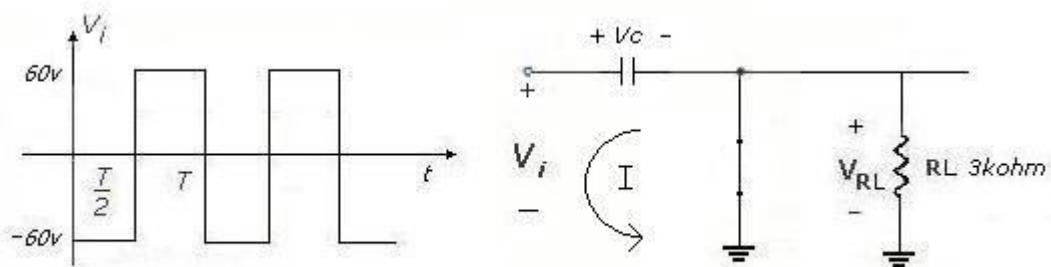


Figura 3.33 – Circuito grampeador com sentido negativo.

$$V_i - V_C = 0$$

$$V_C = V_i = -60$$

✓ $V_i = 60$

$$V_{RL} = V_i - V_C = 60 - (-60) = 120V$$

✓ $V_i = -60$

$$V_{RL} = 0V$$

Pode-se notar que no sentido negativo a tensão na carga é a mesma que está em cima do diodo e como este é um curto a tensão é zero.

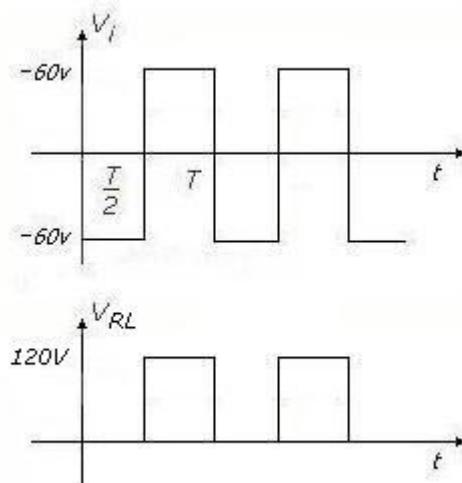


Figura 3.34 – Circuito grampeador – forma de onda na carga.

3.3.2 Exercícios propostos

1 - Analise o circuito da Figura 3.31 e esboce a forma de onda em V_0 com os valores apropriados.

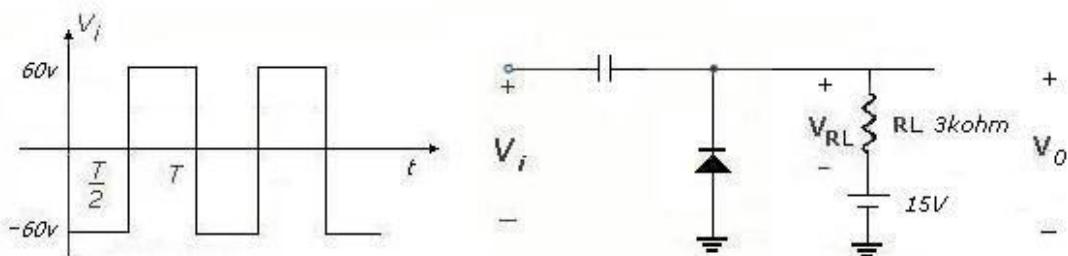


Figura 3.35 – Circuito grampeador.

2 – Esboce a forma de onda em R_L e em V_0 para o circuito da Figura 3.32.

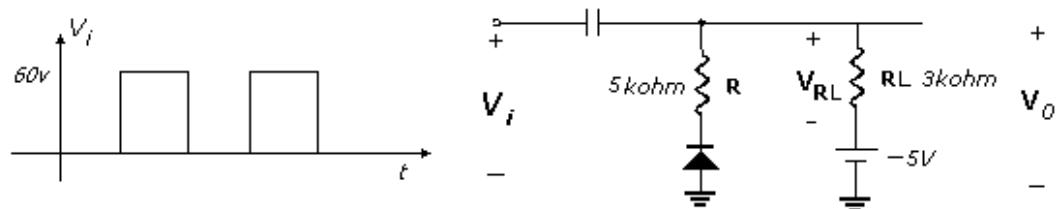
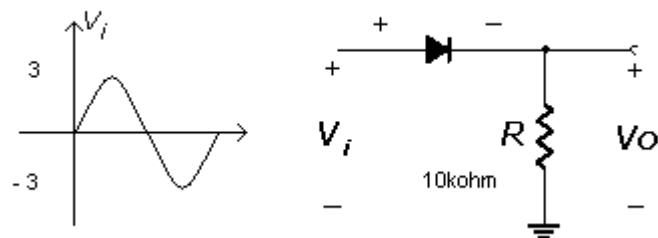
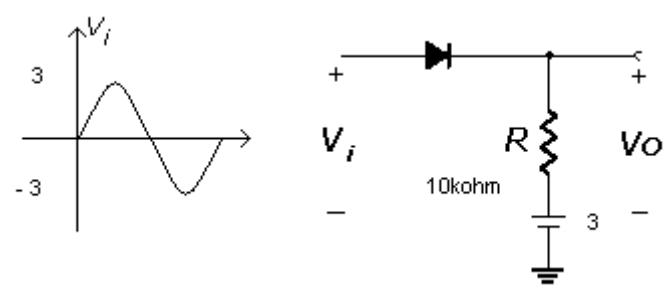


Figura 3.36 – Circuito grampeador.

3 – Calcule a tensão média na carga para o circuito da figura a seguir.



4 – Calcule a tensão média na carga e esboce a forma de onda na carga para o circuito da figura a seguir.



3.4 Diodo Zener

O Diodo zener opera diferente do diodo normal e tem várias possibilidades de utilização. A Figura 3.33, pode-se ver o funcionamento do diodo zener e sua representação com um circuito equivalente.

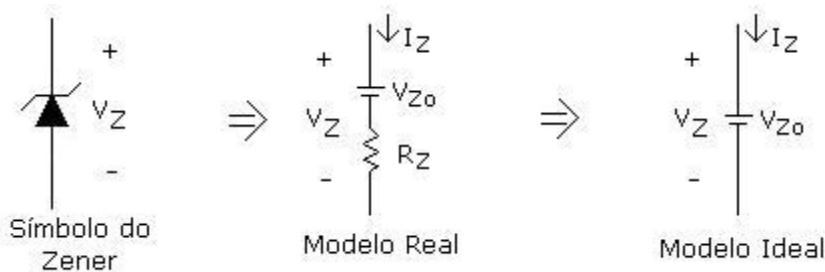


Figura 3.33 – Diodo Zener.

Quando se aplica uma tensão sobre o zener e esta tensão é maior que a tensão de zener ou diodo se comporta como se fosse uma fonte constante com um valor V_{zo} . Pela Figura 3.34, pode-se visualizar este comportamento.

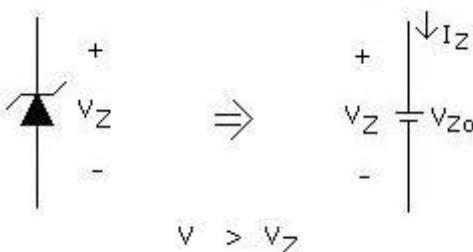


Figura 3.34 – Diodo Zener - Ligado.

Quando uma tensão aplicada é superior a tensão de zener, se diz que o diodo zener está ligado.

Quando se aplica uma tensão maior que zero e menor que a tensão de zener se diz que o diodo zener está desligado (Figura 3.35). Neste caso conforme a Figura 3.35, o diodo se comporta como um circuito aberto.

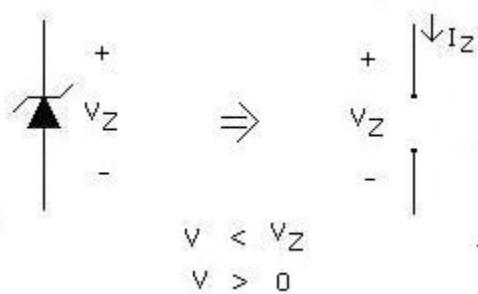


Figura 3.35 – Diodo Zener - Desligado.

Analizando a Figura 3.36, quando é aplicado uma tensão menor que zero, o diodo se comporta como se fosse um diodo com tensão $V_D = 0,7v$. esta fonte seria oposta a tensão V_Z .

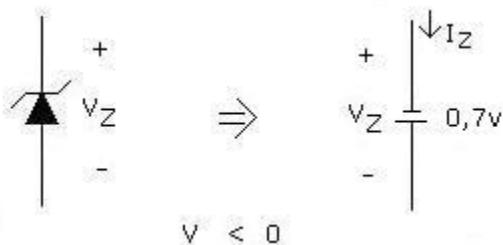


Figura 3.36 – Diodo Zener – Tensão reversa.

O circuito a seguir mostra uma aplicação com um diodo zener (A figura 3.37). Antes de tudo, para uma primeira analise, se deve calcular sem a existência do zener a tensão aplicada sobre o resistor R_L .

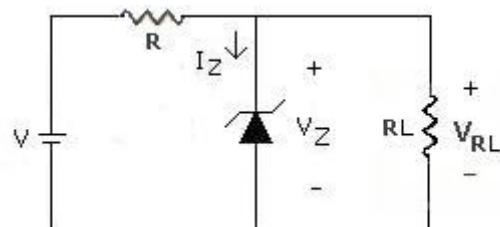


Figura 3.37 – Circuito com Diodo Zener.

$$V_{RL} = V \frac{R_L}{R + R_L}$$

Com o calculo da tensão sobre o resistor, basta verificar o funcionamento do zener no circuito. Na Figura 3.38, mostra quando a tensão calculada é maior que o valor V_z .

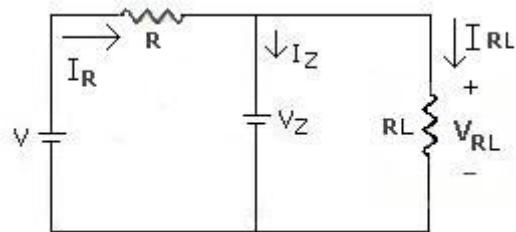


Figura 3.38 – Circuito com Diodo Zener ligado.

$$V_{RL} = V_z$$

$$I_R = I_Z + I_{RL}$$

$$I_{RL} = \frac{V_{RL}}{R_L}$$

$$I_R = \frac{V_I - V_{RL}}{R}$$

$$P_z = V_z I_z$$

Quando a tensão calculada sobre o diodo zener é maior que zero e menor que a tensão de zener, o circuito fica conforme a Figura 3.39.

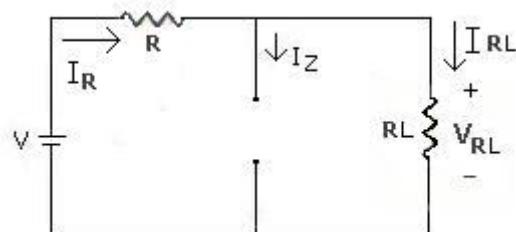


Figura 3.39 – Circuito com Diodo Zener desligado.

$$V_{RL} = V \frac{R_L}{R + R_L}$$

$$I_Z = 0A \quad P_Z = 0W$$

$$I_R = I_{RL} = \frac{V}{R + R_L}$$

Outra possibilidade é quando uma tensão menor que zero é aplicada sobre o zener. Neste caso o zener se comporta como se fosse um diodo normal e com uma fonte de 0,7v. A Figura 3.40, ilustra esta situação.

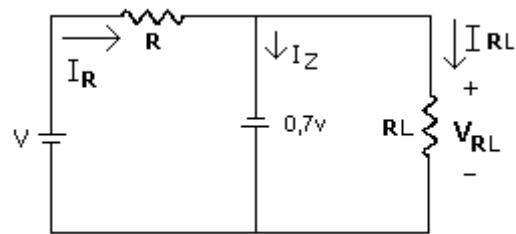


Figura 3.40 – Circuito com Diodo Zener desligado.

$$V_{RL} = -0,7v$$

$$I_R = I_Z + I_{RL}$$

$$I_{RL} = \frac{V_{RL}}{R_L}$$

$$I_R = \frac{V_I - V_{RL}}{R}$$

$$P_Z = V_Z I_Z$$

3.4.1 Exemplo 1

Analizando a Figura 3.41, se pode ter uma idéia do comportamento do diodo zener no circuito. Primeiro se calcula a queda de tensão sobre o diodo zener.

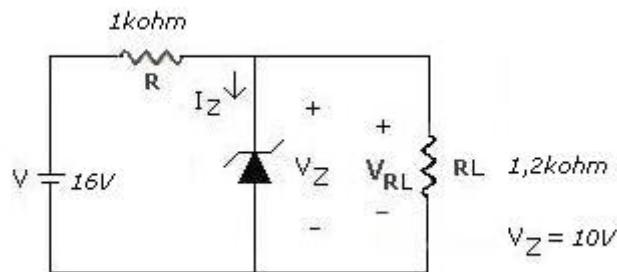


Figura 3.41 – Circuito exemplo.

$$V_{RL} = 16 \frac{1,2k}{1k + 1,2k} = 8,73v$$

Neste caso a tensão de zener é 10v e o calculado foi 8,73. Esta tensão é menor que V_z e o circuito se comporta conforme a Figura 3.42.

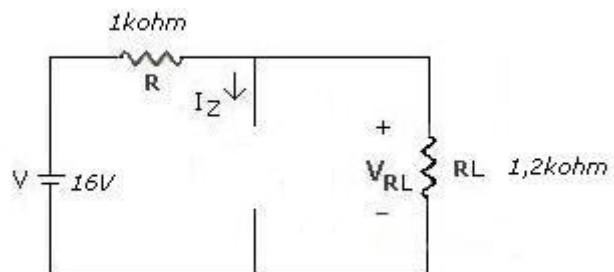


Figura 3.42 – Circuito exemplo resolução.

$$I_z = 0A \quad P_z = 0w$$

$$I_R = I_{RL} = \frac{16}{1k + 1,2k} = 7,22mA$$

3.4.2 Exemplo 2

Fazendo o mesmo exercício 1, mas com o valor da resistência R de 200Ω . Pela Figura 3.43, pode-se fazer uma análise.

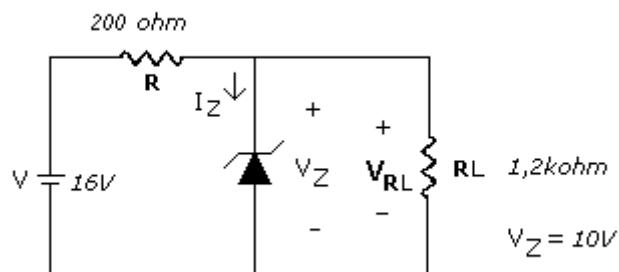


Figura 3.43 – Circuito exemplo 2.

Calculado a queda de tensão em R_L :

$$V_{RL} = 16 \frac{1,2k}{200 + 1,2k} = 11,29v$$

como a tensão é maior que a tensão de zener (10v), o circuito fica conforme a Figura 3.44.

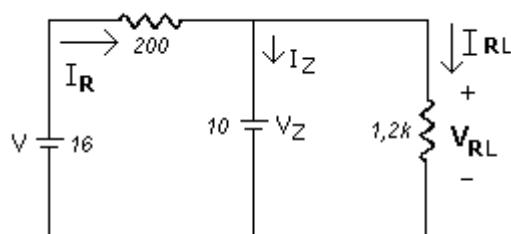


Figura 3.43 – Circuito exemplo resolução.

$$V_{RL} = 10v$$

$$I_R = I_Z + I_{RL}$$

$$I_{RL} = \frac{10}{1,2k} = 8,33mA$$

$$I_R = \frac{16 - 10}{200} = 30mA$$

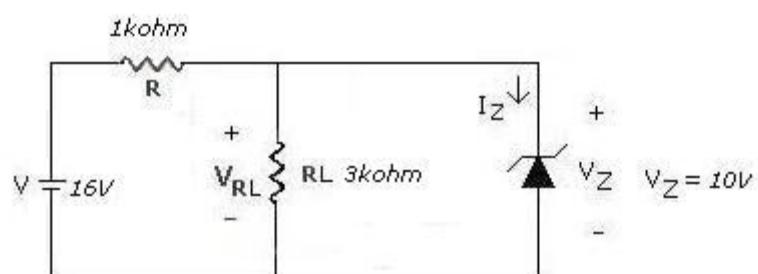
$$I_Z = I_R - I_{RL} = 30mA - 8,33mA = 21,66mA$$

$$P_Z = 10 \cdot 21,66mA = 216,66mW$$

3.4.3 Exercícios propostos

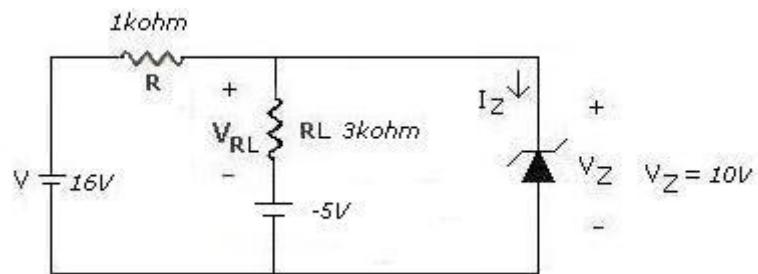
1 - Calcule para o circuito a seguir os seguintes dados:

- ✓ V_L, V_R, I_Z e P_Z .



2 - Calcule para o circuito a seguir os seguintes dados:

- ✓ V_L , V_R , I_Z e P_Z .



4 Transistores Bipolares

Os transistores bipolares (BJT's) são dispositivos que possuem três terminais onde um sinal de baixa potência aplicada entre dois terminais, permite controlar dispositivos de alta potencia. Basicamente um transistor é a junção de uniões PN (a mesma junção dos diodos), capazes de controlar a passagem de uma corrente. Podem ser de dois tipos, de acordo com as uniões: PNP ou NPN. Pela Figura 4.1, ilustra a concepção de um transistor de tipo PNP.

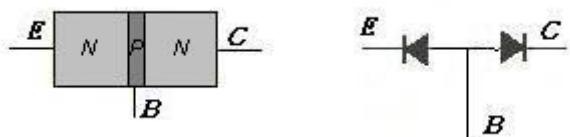


Figura 4.1 – Estrutura de um transistor PNP.

Já pela Figura 4.2, se tem uma noção de a configuração do tipo NPN.

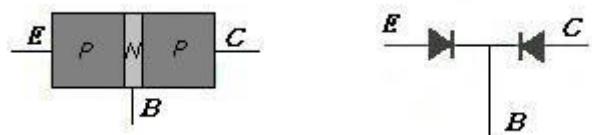


Figura 4.2 - Estrutura de um transistor NPN.

Como foi visto nas Figura 4.1 e 4.2, os transistores podem ser de dois tipos e cada tipo tem um funcionamento e uma simbologia adota. A Figura 4.3, ilustra as simbologias usadas para este tipo de dispositivos.



Figura 4.3 – Símbolos dos transistores bipolares NPN e PNP.

Outra notação importante é que nas Figuras 4.1 e 4.2, estão dispostos a representação na forma de diodos associados e desta forma se pode fazer um estudo no comportamento sobre o fluxo de carga e como se comporta uma

corrente elétrica, quando da aplicação de um potencial entre os terminais de um transistor.

A Figura 4.3, mostra além de uma simbologia, uma notação algébrica dos terminais e esta notação é:

- ✓ $B \rightarrow$ Base
- ✓ $C \rightarrow$ Coletor
- ✓ $E \rightarrow$ Emissor

4.1 Princípio de funcionamento

Para entender como é o comportamento do fluxo de elétrons destes dispositivos, há a necessidade de se entender como funciona. Para um melhor entendimento se tomou o transistor do tipo NPN (Figura 4.4).

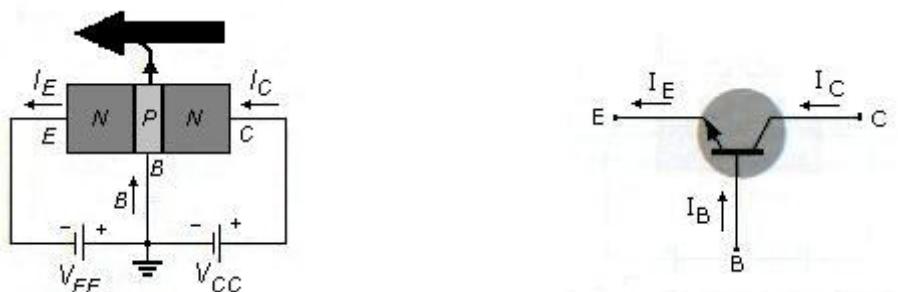


Figura 4.4 – Transistor do tipo NPN.

A base é a parte que controla a passagem de corrente; quando a base está energizada, há uma passagem de corrente do coletor para o emissor, quando não ha sinal na base, não existe essa condução. A base esquematicamente é o centro do transistor. O coletor é uma das extremidades do transistor: é nele que "entra" a corrente a ser controlada ou seja é nesta conexão onde os dispositivos a serem controlados são acoplados.

A relação existente entre o coletor e a base é um parâmetro ou propriedade do transistor conhecido como β (*beta* ou *hfe*) e é diferente para cada modelo do mesmo.

O emissor é outra extremidade, por onde sai a corrente que foi controlada.

Algumas características que se deve observar nos transistores:

- ✓ A voltagem máxima entre base e coletor.
- ✓ Potência máxima dissipável (no caso do seu uso para controle de potência)
- ✓ A freqüência máxima.

Para o funcionamento do transistor tipo NPN, deve-se analisar a Figura 4.5,

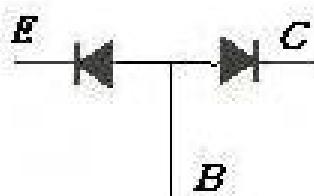


Figura 4.5 – Representação do transistor NPN com diodos.

Desta forma se for aplicado um potencial entre os terminais B e E e este potencial for maior que 0,7 volts, esta junção BE é dita com polarização direta. Já na outra junção se for aplicado um potencial entre BC e este potencial for contrário a junção ou seja para um potencial V_{BC} menor que zero, haverá um fluxo contrário de elétrons e este fenômeno é dito que a junção está polarizada reversamente. Na Figura 4.6, pode-se observar o fluxo de corrente para entrada de condução dos transistores NPN.

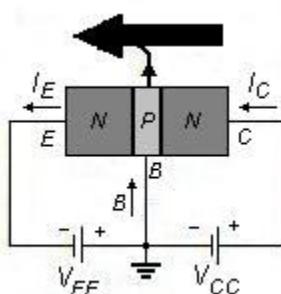


Figura 4.6 – Sentido das correntes do transistor NPN.

Pela Figura 4.6, pode-se ver claramente o sentido da corrente fluindo pelo circuito e desta forma ter a primeira equação das correntes resultantes. A Equação 4.1, mostra as correntes envolvidas nos transistor NPN, aplicando a lei das correntes em um ponto.

$$I_E = I_C + I_B \quad \text{equação 4.1}$$

Pela mesma Figura 4.6, se for colocado o transistor a um traçador de curva, pode-se observar os valores das correntes e tensões em certos pontos e além disto saber em qual região está operando o transistor. Desta forma a Figura 4.7, ilustra quando um transistor dito base comum, (Base aterrada ver figura 4.6) está submetido a uma traçador de curva.

Analizando a Figura 4.7, pode-se claramente observar que duas correntes são praticamente iguais e estas correntes estão descritas pela equação 4.2.

$$I_E = I_C \quad \text{equação 4.2}$$

Vale a pena salienta que, a junção base emissor, se comporta como fosse um diodo com uma queda de tensão de 0,7 volts. Desta forma se obtém outra equação, conforme a equação 4.3.

$$V_{BE} = 0,7V \quad \text{Equação 4.3}$$

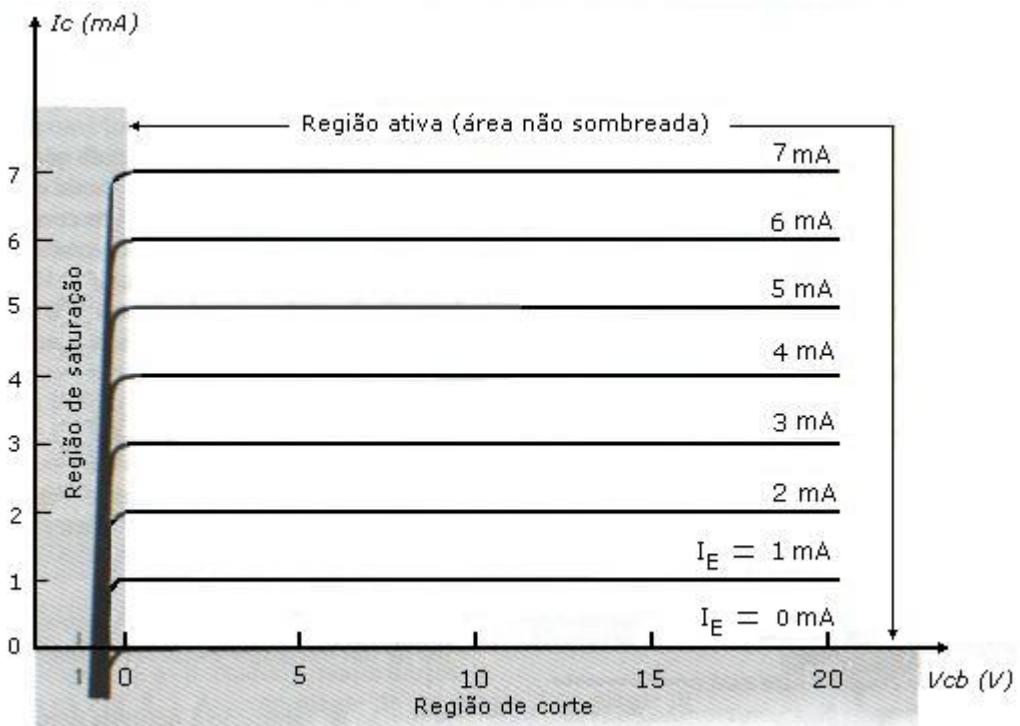


Figura 4.7 – Curva característica para um transistor NPN base comum.

A Corrente de base é a que colocar o transistor operando em uma determinada região de operação. A partir desta corrente e o β do transistor, se pode chegar as seguintes relações nas equações 4.4 e 4.5.

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad \text{Equação 4.4}$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B \quad \text{Equação 4.5}$$

Pela Figura 4.7, pode-se ver que há três regiões de operação para um transistor. Estas regiões são:

- ✓ Região Ativa
- ✓ Região de Corte
- ✓ Região de Saturação

Basta agora estudar o ponto de operação de um transistor e descobrir onde está operando um transistor. Este tipo de estudo depende do tipo de estrutura na qual foi colocado o transistor.

4.2 Polarização DC do BJT

A polarização dc é onde se coloca o transistor para operar. O transistor pode operar como chave, como amplificado, como inversor de sinal, etc. Desta maneira quando se projeta um circuito usando um transistor é necessário se ter em mente onde será aplicado e depois configurar o transistor a operar em uma região condizente com o que foi requerido.

Analizando a Figura 4.8, pode-se notar que os pontos A, B, C e D estão em regiões de operações diferentes.

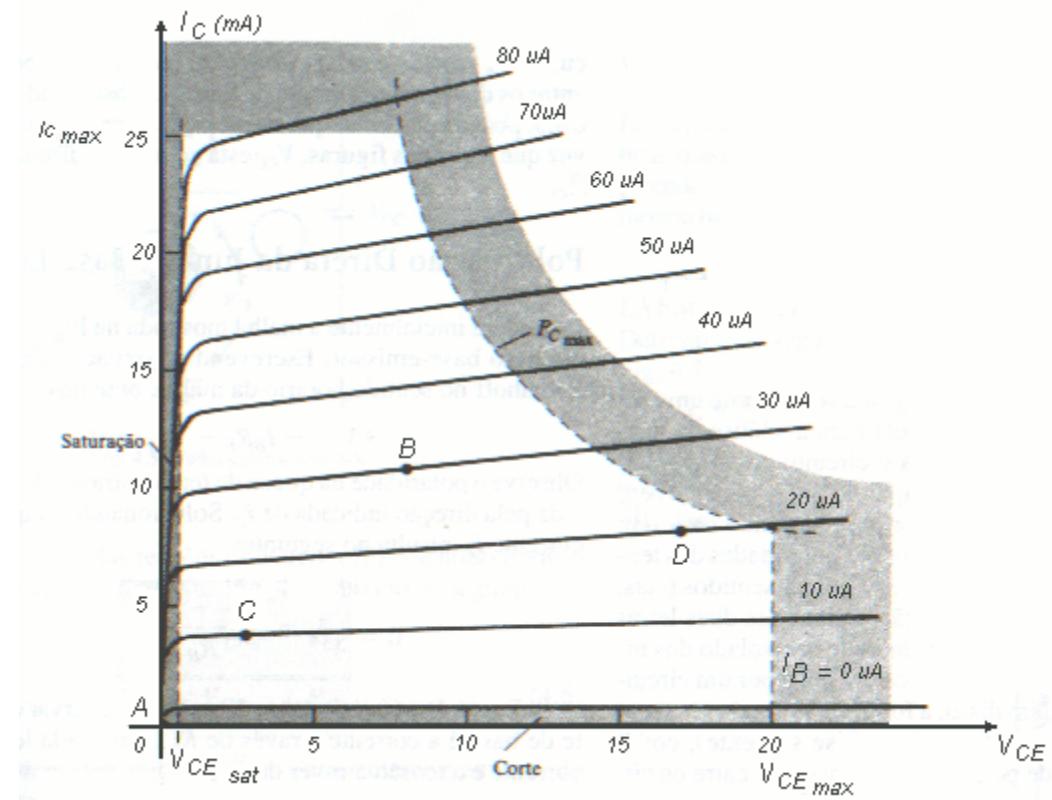


Figura 4.8 – Curva característica de um transistor com pontos de operação.

4.2.1 Região de operação Linear

Pelo gráfico apresentado na Figura 4.8, pode-se dizer que os pontos B, C e D estão na região linear. Para operar nesta região é necessário polarizar o transistor da seguinte maneira:

- ✓ A junção base - emissor deve estar polarizada diretamente.
- ✓ A junção base - coletor deve estar polarizada reversamente.

Esta região de operação é quando se quer o transistor operando como amplificador.

4.2.2 Região de operação de corte

O ponto C da Figura 4.8, está mais perto da região de corte, do que os outros pontos, mas continua no limite entre as três regiões e dependendo do que da forma que for polarizado este ponto pode ir para corte.

- ✓ A junção base - emissor deve estar polarizada reversamente.

4.2.3 Região de operação saturação

O ponto A está mais para região de saturação, pois não há uma aplicação de tensão nos terminais do transistor.

- ✓ A junção base - emissor deve estar polarizada diretamente.
- ✓ A junção base - coletor deve estar polarizada diretamente.

4.3 Exemplo de circuito com transistor

Com as bases anterior, basta agora aplicar as regras de circuitos e equacionar cada circuito com transistor para enquadrar em um tipo de região de operação. Analisando o circuito da Figura 4.9, onde tem um circuito completo com resistor de base e resistor de coletor, um levantamento dos parâmetros de polarização dará a possibilidade de se chegar a uma região de operação.

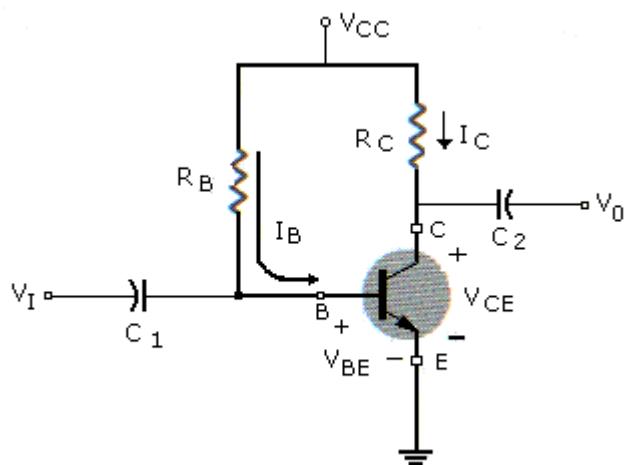


Figura 4.9 – Circuito do exemplo 1.

Na Figura 4.9, pode-se notar que há um sinal alternado de entrada, mas agora neste momento se deve ter em mente que para um transistor operar, se deve primeiro polarizar para depois ver a resposta externa aplicada. Os capacitores C_1 e C_2 são chamados de capacitores de acoplamento. Estes capacitores fazem com que o sinal de entrada não interfira na polarização do transistor e desta forma não mude a região de operação.

Para análise dc os capacitores se abrem e desta forma o circuito resultante fica conforme a Figura 4.10.

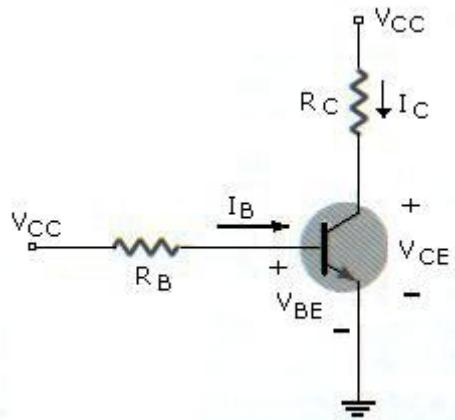


Figura 4.10 – Circuito resultante para análise em dc.

Fazendo uma análise de circuitos, pode-se obter algumas equações que permitirá determinar a região de operação. Estas equações estão descritas a seguir.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad \text{Equação 4.6}$$

Lembrando que:

$$I_C = \beta I_B$$

tem-se que:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad \text{Equação 4.7}$$

Lembrando também que:

$$V_{CE} = V_C - V_E \text{ e } V_{BE} = V_B - V_e$$

No circuito a tensão em $V_E = 0$, logo

$$V_{CE} = V_C \text{ e } V_{BE} = V_B$$

4.3.1 Exemplo 1

Calcule I_B , I_C , V_{CE} , V_B , V_C e V_{BC} para os seguintes dados do circuito da Figura 4.10:

- ✓ $R_B = 240\text{k}\Omega$
- ✓ $R_C = 2,2\text{k}\Omega$
- ✓ $V_{CC} = 12\text{V}$
- ✓ $\beta = 50$

Solução:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0,7}{240k} = 47,08\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \cdot 47,08\mu A = 2,35mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 12 - 2,35m \cdot 2,2k = 6,83V$$

$$V_B = V_{BE} = 0,7V$$

$$V_C = V_{CE} = 6,83V$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = 0,7 - 6,83 = -6,13V$$

Considerando que V_{BE} foi polarizado diretamente e calculando V_{BC} , chegou-se que este ponto estava polarizado reversamente. Com isso este transistor está operando na região linear.

4.4 Análise por reta de carga

Com um valor de β é possível determinar um ponto “Q” resultante na curva característica de um transistor qualquer. Para determinar este ponto de operação deve-se calcular alguns parâmetros e com estes se determina um ponto de operação.

O ponto de operação é o mesmo visto na Figura 4.8, com o qual se tem uma noção de como se comportará o transistor.

Para se determinar o ponto deve-se fazer os seguintes passos:

- ✓ Fazer $I_c = 0A$
- ✓ Fazer $V_{CE} = 0V$

Analizando a Figura 4.11 e seguindo os passos anteriores se pode determinar os pontos de uma reta.

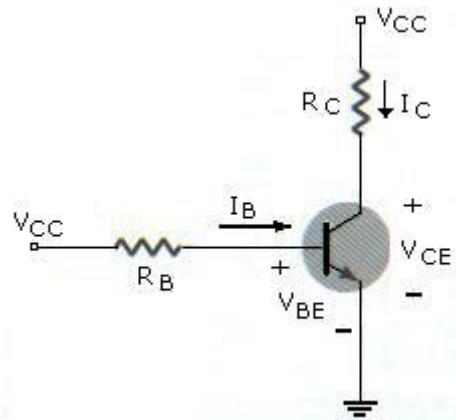


Figura 4.11 – Circuito para Analise por reta de carga.

- ✓ Fazendo $I_c = 0A$

Neste caso o valor de V_{CE} segundo a Figura 4.11, é V_{CC} .

$$V_{CE} = V_{CC}$$

- ✓ Fazendo $V_{CE} = 0A$

Tirando a equação para este dado:

$$R_C \cdot I_C + V_{CE} - V_{CC} = 0$$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

Com base no que foi calculado, pode-se saber de uma maneira mais rápida onde ficará polarizado o transistor. Pela Figura 4.12, que ilustra esta situação se nota a reta de carga.

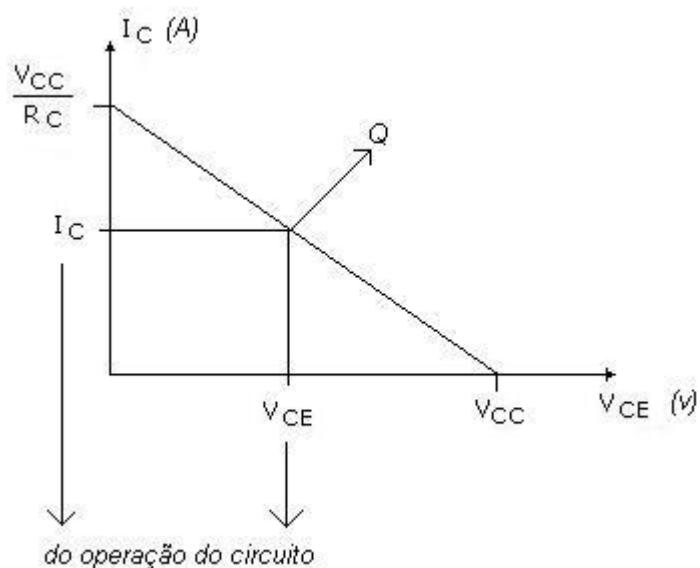


Figura 4.12 – Circuito para Analise por reta de carga.

Os pontos máximos da reta dão a orientação da reta e os pontos de operação o local de operação. Desta forma se pode visualizar se o transistor está na região de corte, saturação ou linear.

Pegando os dados do exemplo 1 e analisando a reta de carga tem-se:

- ✓ $I_C = 0A$

$$V_{CE} = V_{CC} = 12V$$

✓ $V_{CE} = 0V$

$$I_C = V_{CC} / R_C = 12 / 2,2k = 5,45mA$$

Calculando a corrente do coletor e a tensão entre o coletor - emissor:

$$I_C = \beta I_B = 50 \cdot 47,08\mu = 2,35mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 12 - 2,35m \cdot 2,2k = 6,83V$$

Com base nestes dados é possível esboçar a reta de carga. A Figura 4.13, ilustra esta situação.

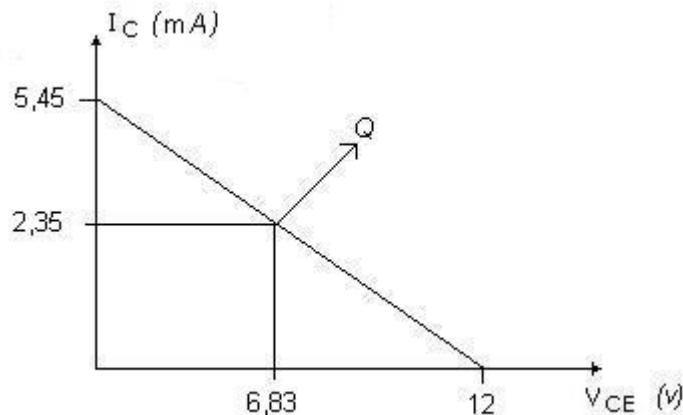


Figura 4.13 – Reta de carga do exemplo 1.

4.5 Polarização por divisão de tensão

A polarização por divisor de tensão, é a mais estável em relação a variação de temperatura. Este tipo de configuração apresentado na Figura 4.14, é muito utilizado com transistor amplificador.

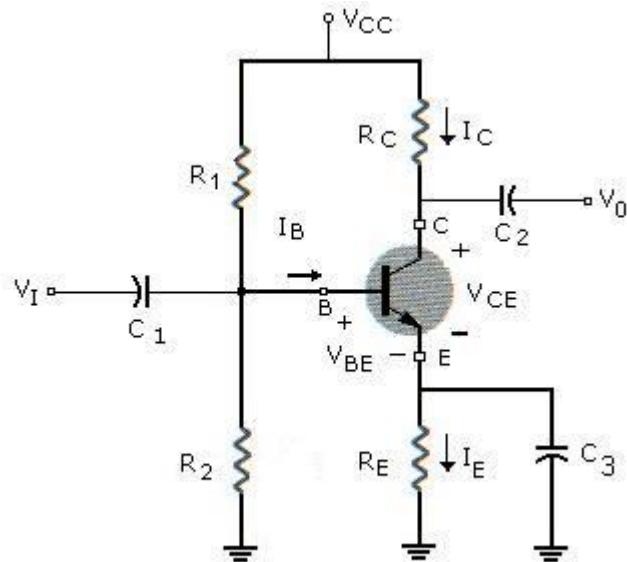


Figura 4.14 – Circuito com polarização por divisor de tensão.

Fazendo uma analise DC, fica conforme a Figura 4.15.

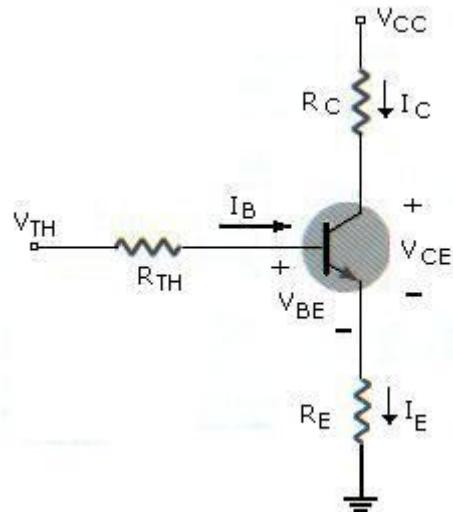


Figura 4.15 – Circuito com polarização DC.

As equações se tornam desta maneira similares com as anteriores, bastando agora só os equivalentes de Thévenin..

$$V_{TH} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

4.6 Transistor como chave

Um transistor que pode operar em duas regiões, corte e saturação pode ter um funcionamento de uma chave. A Figura 4.16 ilustra como um transistor pode funcionar nestas regiões de operações.

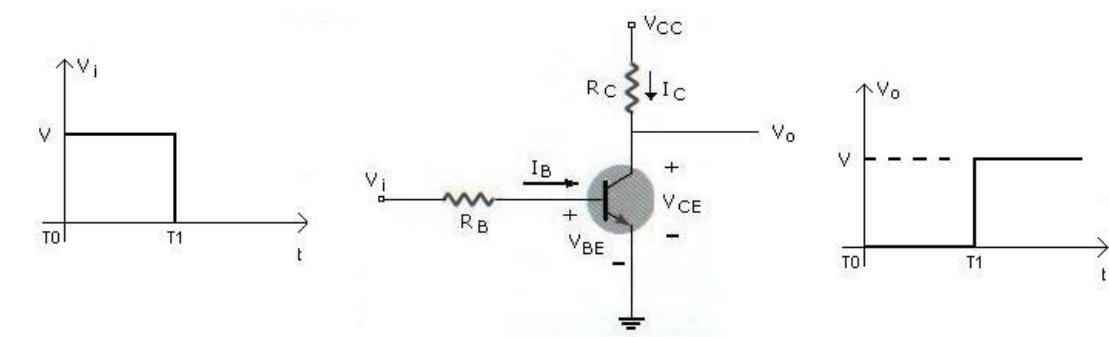


Figura 4.16 – Transistor operando como chave.

Conforme a Figura 4.16, quando V_i for maior do que V_{BE} a tensão V_o é zero (transistor ligado e operando na região saturada) e quando V_i for menor do que V_{BE} a tensão V_o é V (transistor desligado e operando na região de corte).

$$V_i > V_{BE}$$

$$V_o = 0V$$

$$I_C = V_{CC} / R_C$$

$$V_i < V_{BE}$$

$$V_o = V$$

$$I_C = 0A$$

Como regra, pode se colocar R_B dez vezes maior que R_C .

4.7 Exemplos

4.7.1 Exemplo 1

Analise o circuito da Figura 4.17 e determine todos os parâmetros de polarização. Considere os seguintes valores:

- ✓ $R_B = 430\text{k}\Omega$
- ✓ $R_C = 2\text{k}\Omega$
- ✓ $R_E = 1\text{k}\Omega$
- ✓ $V_{CC} = 20\text{V}$
- ✓ $\beta = 50$

Os capacitores 1 a 3 são os capacitores de acoplamento e na analise DC os capacitores ficam abertos.

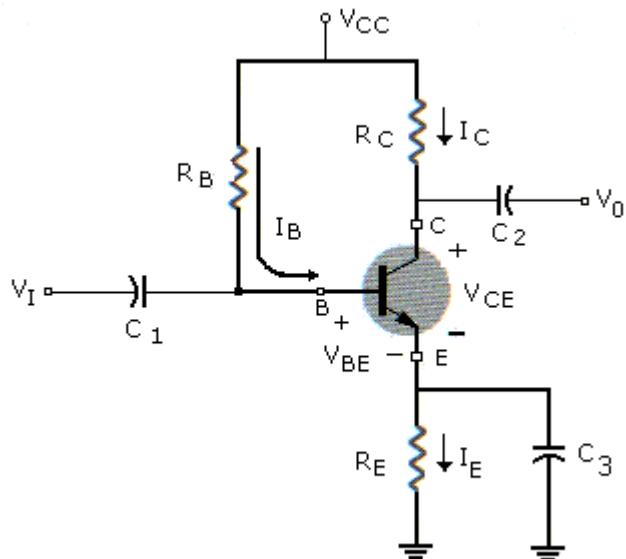


Figura 4.17 – circuito do exemplo 2.

Fazendo a analise DC do circuito da Figura 4.14, se obtém o seguinte circuito resultante da Figura 4.18.

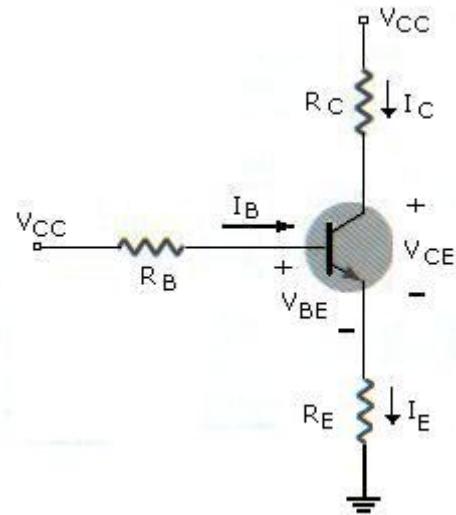


Figura 4.18 – Circuito resultante para análise em dc.

Pela Figura 4.19, pode-se visualizar os pontos onde serão calculados os dados.

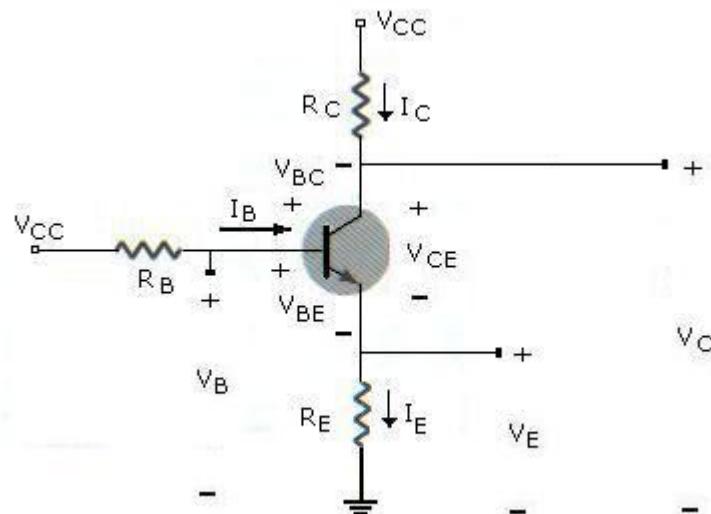


Figura 4.19 – Pontos de tensão do circuito.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta + 1)} = \frac{12 - 0,7}{(430k + 1k \cdot 51)} = 40,1\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \cdot 40,1\mu A = 2,01mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 20 - 2,01m \cdot 2k = 13,97V$$

$$V_C = V_{cc} - R_C I_C = 20 - 2k \cdot 2,01m = 15,98V$$

$$V_E = V_C - V_{CE} = 15,98 - 13,97 = 2,01V$$

$$V_B = V_{BE} + V_E = 0,7 + 2,01 = 2,71V$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = 2,71 - 15,98 = -13,27V$$

Analizando pela reta de carga tem-se o seguinte gráfico ilustrado pela Figura 4.20.

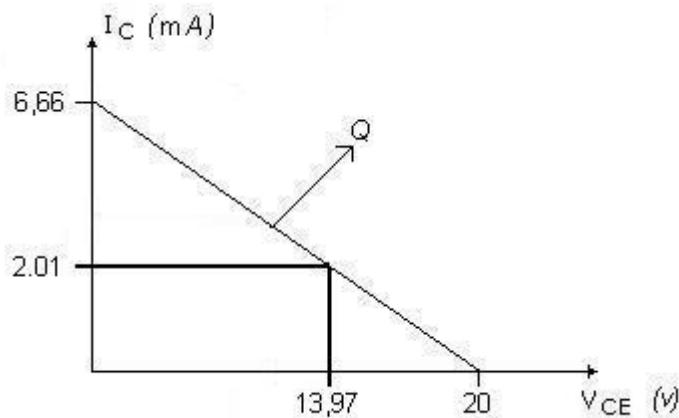
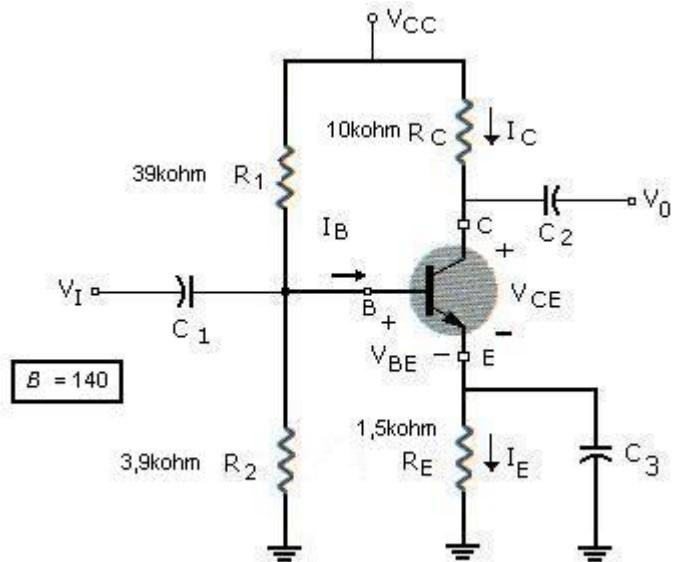


Figura 4.20 – reta de carga.

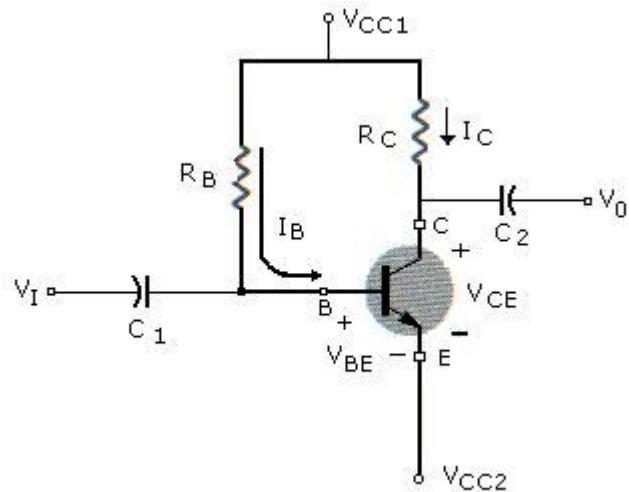
Pela Figura 4.19, nota-se que o ponto de operação é linear, mas está mais próximo da região de corte e se houver uma alteração do beta devido a temperatura por exemplo, o circuito poderá sair da região de operação linear.

4.8 Exercícios propostos

1 – Determine V_C , V_B , V_E , I_B , I_C , I_E , V_{CE} , V_{BC} e o ponto de operação.



2 – Determine V_C , V_B , V_E , I_B , I_C , I_E , V_{CE} , V_{BC} e o ponto de operação pela reta de carga.



3 – Determine V_C , V_B , V_E , I_B , I_C , I_E , V_{CE} , V_{BC} e pela reta de carga o ponto de operação.

