



Centro Federal de Educação

Tecnológica de Santa Catarina

Gerência Educacional de Eletrotécnica

CEFET/SC

ELETRÔNICA INDUSTRIAL

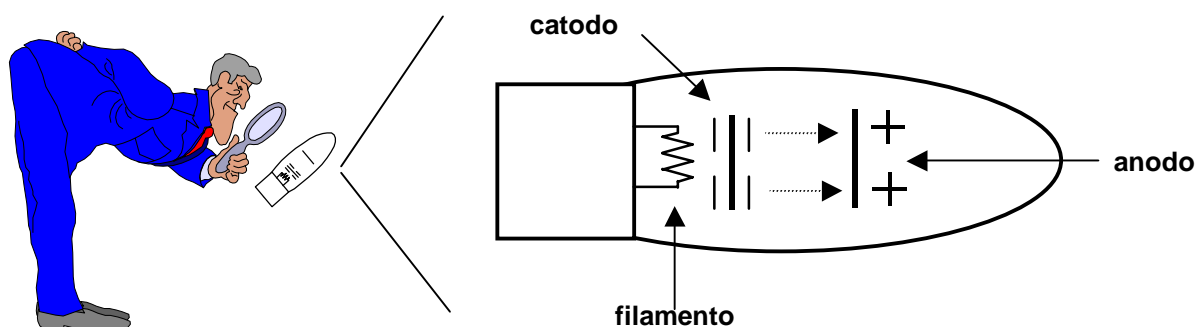
CURSO TÉCNICO DE ELETROTÉCNICA

Florianópolis, 2003

1. ELETRÔNICA: BREVE HISTÓRICO

No início do século, com o surgimento da válvula eletrônica, houve um grande avanço na produção de equipamentos e dispositivos fabricados com a finalidade de executar muitas tarefas úteis para a época. Rádios, telégrafos, telefonia e até mesmo a televisão tiveram seu desenvolvimento por causa das válvulas. Você deve estar se perguntando:

O que é uma válvula eletrônica? Observe a figura abaixo.



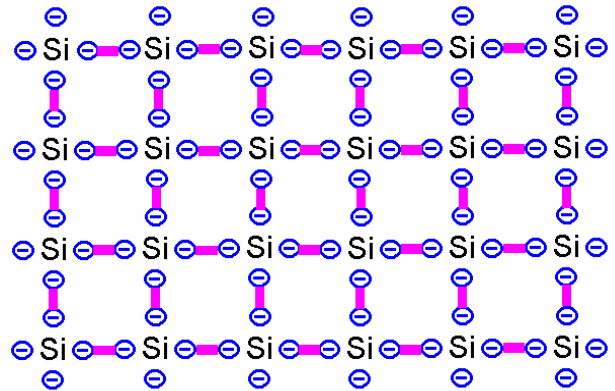
Uma válvula é um dispositivo composto por duas placas metálicas encapsuladas em vidro evacuado. Dentro desse bulbo de vidro, também há um filamento que, conectado a uma bateria, aquece uma das placas, o **catodo**, gerando um fluxo de elétrons que tende a se deslocar em direção à segunda placa, polarizada positivamente, chamada **anodo**. Quando invertemos a polarização da placa, cessa o fluxo de elétrons, ou seja, cessa a corrente elétrica dentro do tubo. Podemos concluir, a partir disso, que **é possível fazer circular a corrente em um único sentido** dentro de uma válvula diodo.

2. SEMICONDUTORES

Semicondutores são materiais sólidos ou líquidos, capazes de mudar com certa “facilidade” de sua condição de isolante para a de condutor, isto é, podem sofrer grandes alterações em sua condutividade.

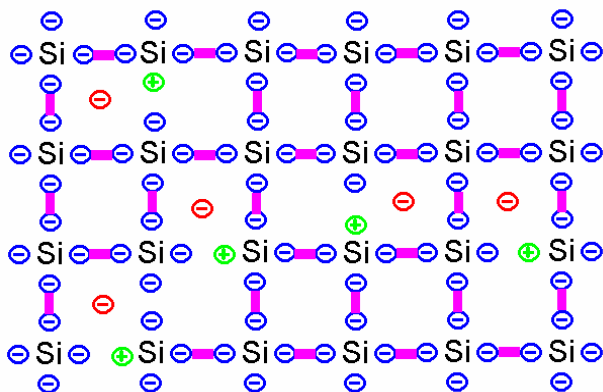
2.1. Condutividade elétrica

É a capacidade de conduzir corrente elétrica sob aplicação de uma tensão, tem uma das mais amplas faixas de valores que qualquer outra propriedade física da matéria. Metais como cobre, prata e alumínio são excelentes condutores, mas isolantes como diamante e vidro são condutores muito pobres. Em baixas temperaturas, semicondutores puros se comportam como isolantes. Sob temperaturas mais altas ou luz ou com a adição de impurezas, porém, pode ser aumentada dramaticamente a condutividade de semicondutores podendo ser alcançados níveis que se aproximam dos metais. As propriedades físicas de semicondutores são estudadas em física do estado sólido.



2.2. Elétrons de condução e lacunas

Os semicondutores comuns são fabricados a partir de elementos químicos (semimetais) como silício, germânio e selênio; além de combinações como: arseneto de gálio, seleneto de zinco e telureto de chumbo. O aumento da condutividade com a temperatura, luminosidade ou impurezas surge de um



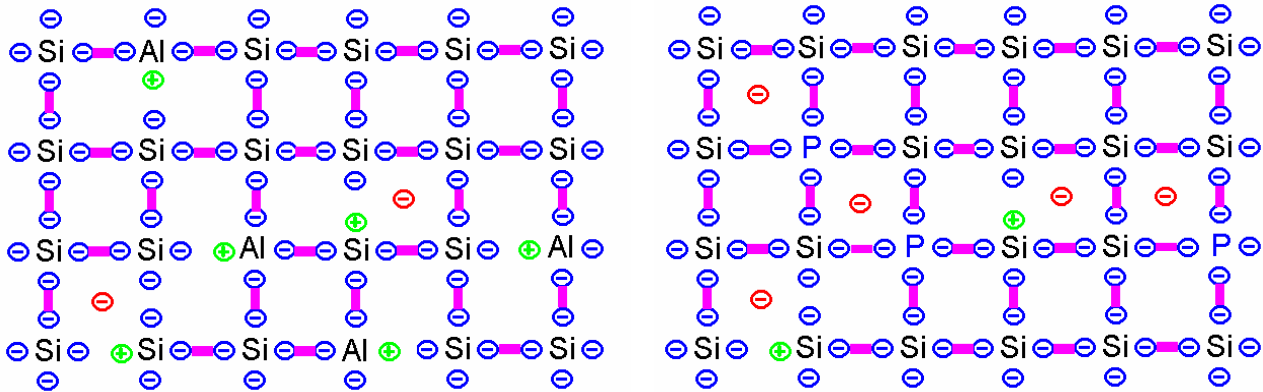
aumento no número de elétrons de condução que são os portadores da corrente elétrica. Em um semicondutor puro, ou intrínseco (inerente), como o silício, os elétrons de valência, ou elétrons exteriores de um átomo (última camada), formam pares e são compartilhados entre átomos vizinhos formando ligações covalentes que mantêm coesa a estrutura do cristal. Estes elétrons de valência não são livres para produzir corrente elétrica. Para produzir elétrons de condução, temperatura ou luz é usada para excitar os elétrons de valência para fora de suas ligações, deixando-os livres para produzir

corrente. A deficiência de elétrons, ou “lacunas”, surgem no lugar de onde saíram os elétrons excitados, o que faz com que outros elétrons livres ou de valência possam vir a completar aquele par na ligação covalente. Diz-se que as lacunas são os "portadores positivos" de eletricidade. Esta é a origem física do aumento na condutividade elétrica de semicondutores com a temperatura. Devido à dupla possibilidade de condução de corrente, por elétrons livres e por lacunas, a condutividade pode aumentar expressivamente nestes cristais.

2.3. Dopagem

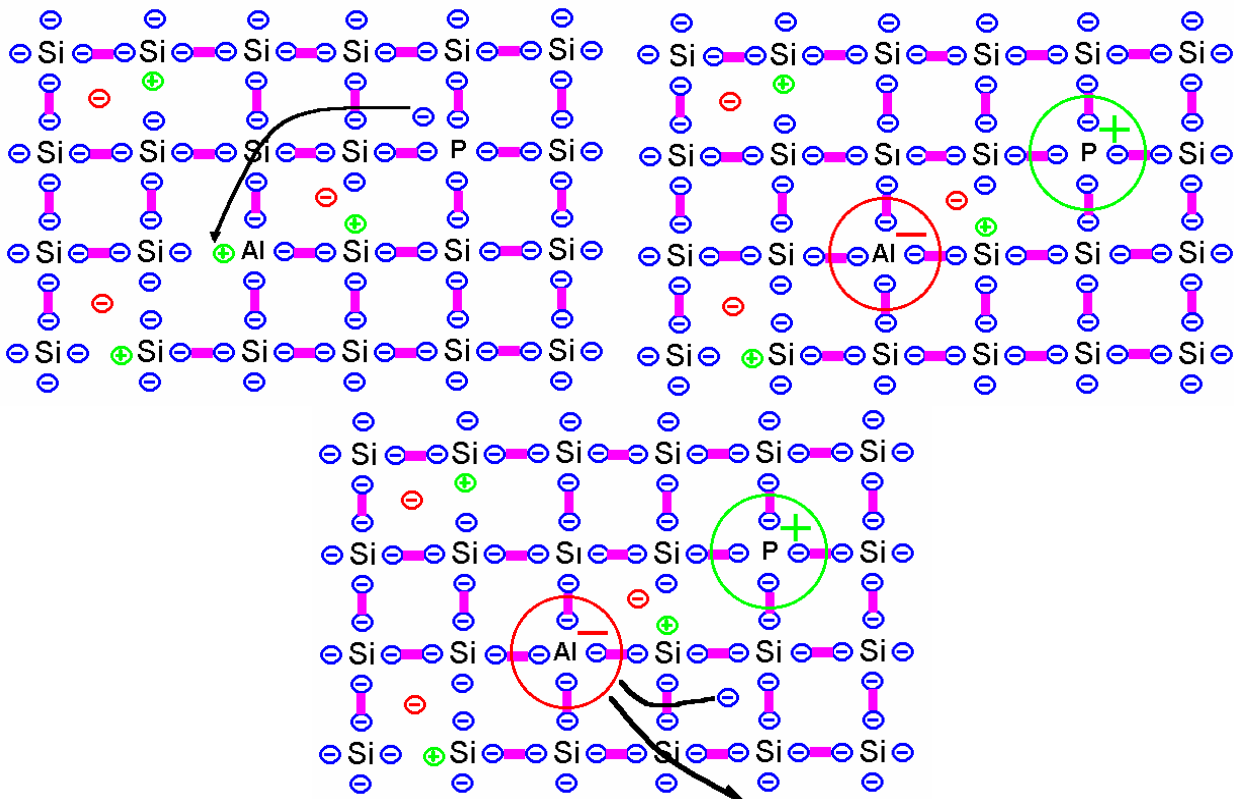
Outro método para produzir portadores de carga elétrica livres é adicionar impurezas, ou “dopar”, ao semicondutor. A diferença no número de elétrons de valência entre o material dopante (doadores ou aceitadores de elétrons), e o cristal intrínseco, dá lugar a semicondutores extrínsecos (artificiais) dopados negativamente (tipo negativo ou *n*) ou positivamente (tipo positivo ou *p*). Cada átomo de silício possui quatro elétrons de

valência. São necessários dois elétrons de átomos distintos para formar uma ligação covalente. No semiconductor de silício tipo *n*, átomos como o fósforo (P) com cinco elétrons de valência, substituem átomos de silício e provêm elétrons extras. Como sobram elétrons (carga negativa), o semiconductor é do tipo *n*. No semiconductor de silício tipo *p*, átomos com três elétrons de valência, como o alumínio (Al), produzem uma deficiência de elétrons, ou uma lacuna que age como um portador de carga positiva. Os elétrons extras e as lacunas podem produzir corrente elétrica. Acrescente-se que quando um elétron ocupa a órbita de uma lacuna, devolve a energia cinética que possui, desaparecendo duas cargas livres (o elétron e a lacuna). A este processo chama-se recombinação.



2.4. Junção pn

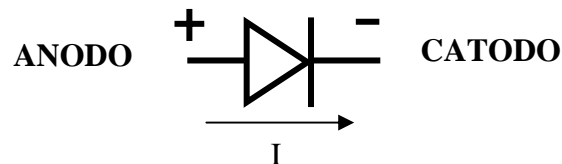
Quando regiões de semiconductor do tipo p e tipo n são adjacentes dentro de um mesmo cristal, forma-se um diodo semiconductor. A região de contato é chamada “junção *pn*”. Um diodo é um dispositivo de dois terminais que tem uma condutância baixa à corrente elétrica em uma direção mas uma alta condutância elétrica na outra direção.



As propriedades de condutância da junção *pn* dependem da polaridade e valor da tensão sobre o dispositivo. Séries de junções pn são usadas para fazer transistores e outros dispositivos semicondutores como: células fotoelétricas, tiristores, laser, retificadores, e etc.

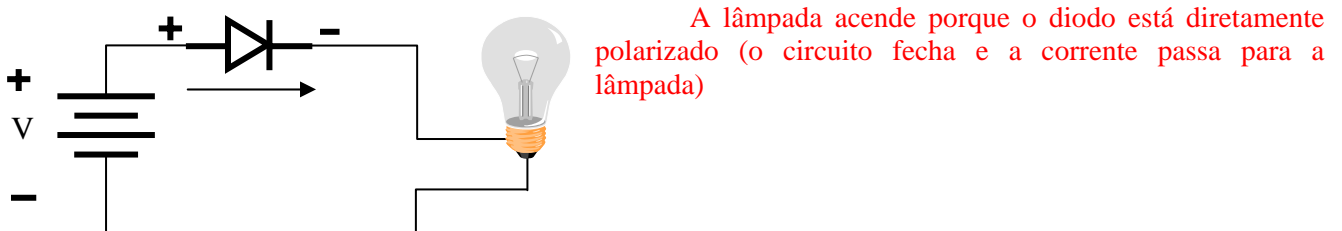
3. DIODO SEMICONDUTOR

O Diodo semicondutor é um elemento que tem a função de deixar passar a corrente em um sentido (para um lado) e não deixar passar a corrente em sentido contrário. Esse componente é muito utilizado em circuitos que precisam transformar corrente alternada em corrente contínua, como se verá na tarefa que envolve retificadores de tensão.



Como exemplo, podemos analisar o funcionamento do circuito abaixo e que utiliza um diodo entre a lâmpada e a fonte de tensão.

1ª Situação: Diodo polarizado diretamente

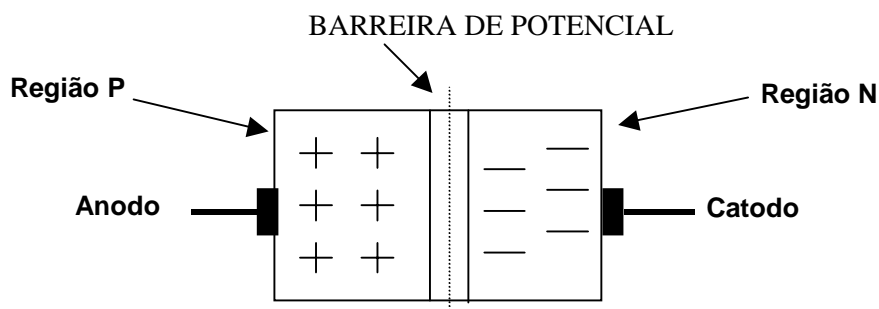


2ª Situação: Diodo polarizado reversamente



3.1. Como é construído um diodo?

A função básica do diodo semicondutor é deixar passar a corrente elétrica em um sentido e não deixar passar no sentido inverso. A construção é feita usando um material semicondutor, o qual permite que sua capacidade de condução seja alterada pela adição de impurezas (negativas ou positivas). Em um dos lados são adicionadas cargas positivas e no outro, negativas, separadas por uma barreira que não permite que elas se recombinem. Para que haja a circulação de corrente, é necessário que se aplique a ele uma polarização adequada. Como você observou no experimento, a corrente só passa pelo diodo quando o terminal do **ANODO** está ligado ao pólo positivo da bateria e o **CATODO** ligado ao pólo negativo.

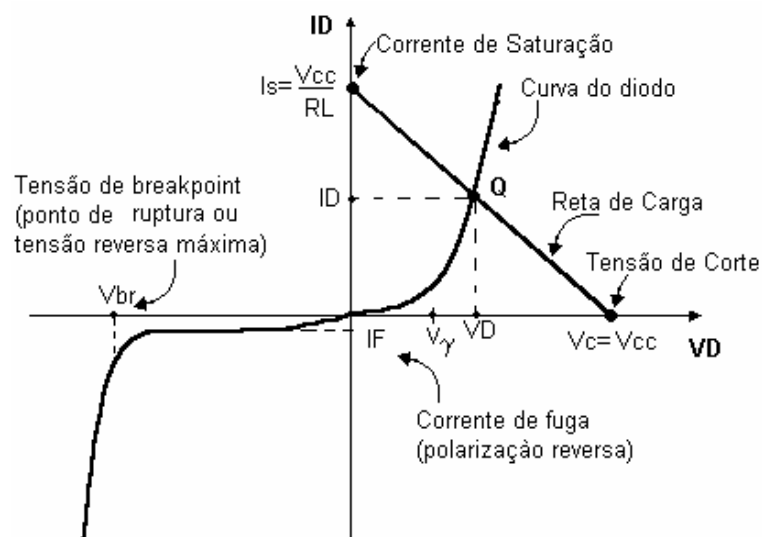


3.2. Principais especificações do diodo

Os diodos disponíveis no mercado possuem especificações que se referem à sua capacidade de corrente direta, tensão reversa, frequência de operação, potência máxima e podem identificados nas folhas de dados dos componentes da seguinte forma:

GRANDEZA	Simbologia / unidade	Ex: Diodo 1N4001
Corrente Direta Máxima	I_{DM} (A)	1A
Corrente de Fuga (inversa)	I_F (A)	$10\mu A$
Tensão de Pico inversa (reversa)	V_{Br} (V)	50V
Potência Máxima	P_{DM} (W)	1W

3.3. A Curva do diodo e a Reta de Carga



I_D – Corrente no diodo
 V_D – Tensão no diodo
 I_S – Corrente de saturação (corrente máxima no diodo considerando-o como um “curto”).
 Q – Ponto quiescente ou ponto de trabalho.
 V_C – Tensão de corte (tensão no diodo para corrente nula).
 V_{CC} – Tensão da fonte.
 R_L – Resistência da carga.
 I_F – Corrente de fuga (com o diodo na polarização reversa).

O gráfico acima mostra a curva característica de um diodo. Quando V_D e I_D são positivos temos o comportamento do diodo na polarização direta. Quando V_D e I_D são negativos temos o diodo na polarização reversa.

Na polarização reversa temos uma pequena corrente de fuga (I_F - $10\mu A$ para o diodo 1N4001) e o ponto de quebra (V_{BR} - 50V para o diodo 1N4001) ou seja, a máxima tensão reversa que o diodo suporta.

Na polarização direta observamos o V_Y (aproximadamente 0,7V para os diodos de silício e 0,3V para os diodos de germânio). A inclinação desta curva significa uma resistência que o diodo apresenta quando polarizado diretamente, isto é: aumenta a tensão V_D com o aumento da corrente que passa por ele.

Este gráfico apresenta também o traçado de uma reta de carga. Qual a sua utilidade? De posse da curva de um determinado diodo podemos determinar o seu ponto de trabalho (Q – ponto quiescente). Desta forma podemos determinar a reta de carga da seguinte forma:

Primeiro: Determina-se a tensão de corte $V_C = V_{CC}$ e $I_S = \text{Zero}$ (na prática é a tensão da fonte).

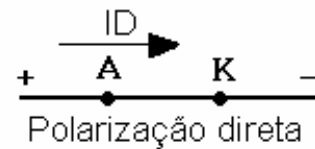
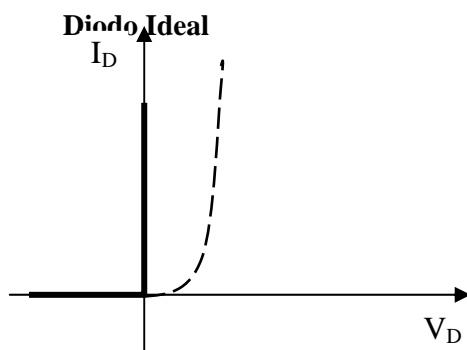
Segundo: Determina-se a corrente de saturação considerando que o diodo é um curto $I_S = V_{CC}/R_L$ e $V_D = \text{Zero}$.

Terceiro: Unindo-se os dois pontos acima, encontra-se o ponto quiescente (Q) no encontro com a curva característica do diodo.

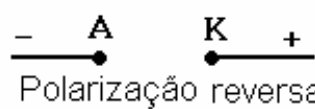
Quarto: O ponto Q fornece a tensão e a corrente no diodo (V_D e I_D). Com estes dois pontos podemos determinar a potência dissipada pelo diodo ($P_D = V_D \times I_D$). De posse destes dados podemos escolher o diodo para o circuito comparando os valores calculados com as especificações técnicas do componente.

3.4. Modelos do Diodo

3.4.1.

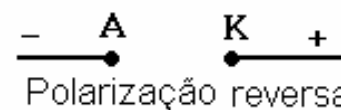
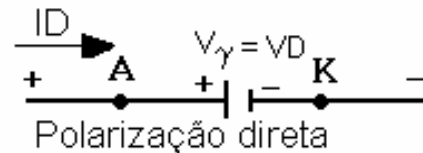
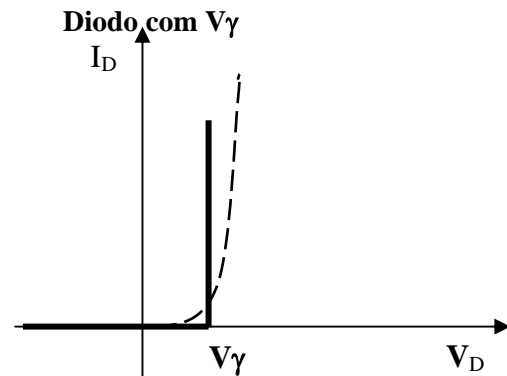


Aqui ele é um curto circuito.



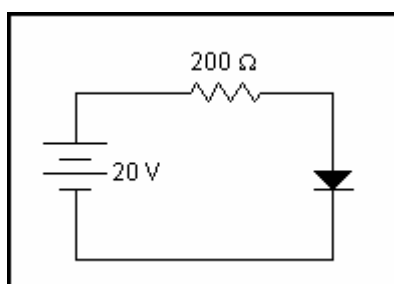
Aqui ele é um circuito aberto.

3.4.2.



3.4.3. Exemplo - 1

Calcule a corrente no diodo de silício do circuito a seguir:



Considerando o modelo 1
Diodo ideal...

$$I_D = \frac{20}{200} = 100 \text{ mA}$$

A potência no diodo é zero.

Considerando o modelo 2 –

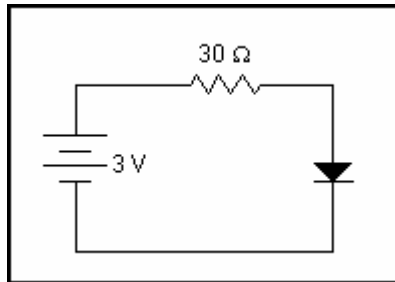
Diodo com $V_\gamma = 0,7V$ – diodo de silício

$$I_D = \frac{20 - 0,7}{200} = 96,5 \text{ mA}$$

A potência no diodo é: $P_D = V_D \times I_D = 67,6 \text{ mW}$

3.4.4. Exemplo - 2

Calcule a corrente no diodo de silício do circuito a seguir:



Considerando o modelo 1

Diodo ideal.

$$I_D = \frac{3}{30} = 100 \text{ mA}$$

A potência no diodo é zero.

Considerando o modelo 2

Diodo com $V_\gamma = 0,7V$ – diodo de silício

$$I_D = \frac{3 - 0,7}{30} = 76,7 \text{ mA}$$

A potência no diodo é: $P_D = V_D \times I_D = 53,7 \text{ mW}$

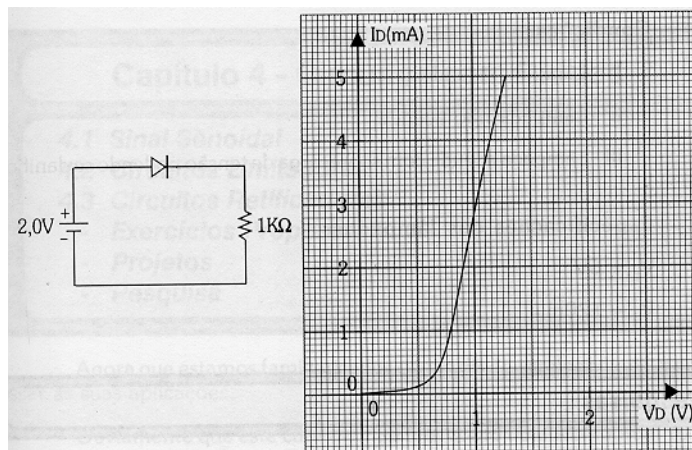
OBSERVAÇÕES:

Há uma diferença entre as considerações feitas para o cálculo da potência dissipada no diodo. Isto está relacionado com as tensões aplicadas no diodo.

Logo, quando não for especificado, fica por conta do “bom senso” adotar o primeiro ou o segundo modelo. Normalmente para tensões muito baixas, o 0,7V do diodo faz diferença ... como no cálculo de uma fonte de 3V, por exemplo, onde V_D representa mais de 20%.

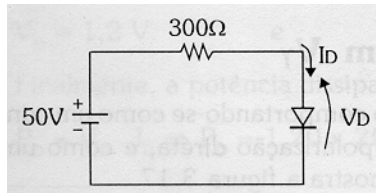
1) Qual é a potência dissipada num diodo de silício com polarização direta, se a tensão do diodo for de 0,7 V e a corrente de 100 mA?

2) Determinar a reta de carga, o ponto quiescente (Q) e a potência dissipada pelo diodo no circuito a seguir, dada a sua curva característica.



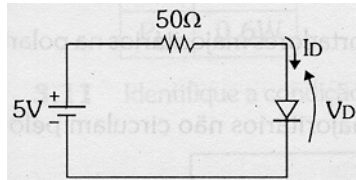
3) Para os circuitos a seguir, utilizando-se os três modelos de diodos, calcular o valor das correntes nos diodos (I_D) e analisar os resultados obtidos.

Circuito 1:



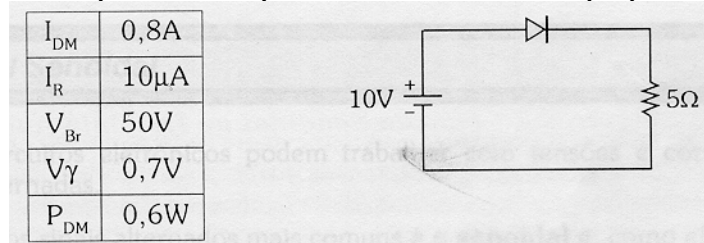
Especificações do diodo: $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$ e $R_D = 10 \Omega$

Circuito 2:



Especificações do diodo: $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$ e $R_D = 10 \Omega$

4) O circuito abaixo apresenta um problema. Identificá-lo e propor uma solução.



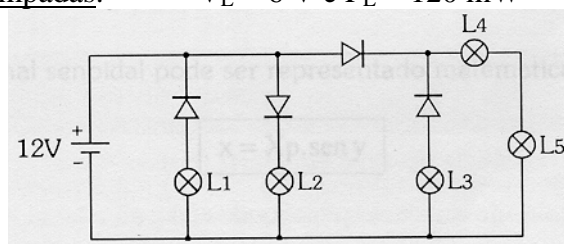
5) Identificar a condição das lâmpadas no circuito abaixo, de acordo com a seguinte convenção:

I - lâmpada acende;

II - lâmpada não acende;

III - lâmpada acende com sobrecarga de tensão, podendo danificar-se.

Especificações das lâmpadas: $V_L = 6 \text{ V}$ e $P_L = 120 \text{ mW}$



6) Esboçar a curva característica de um diodo de silício com $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$ e $V_{BR} = 50 \text{ V}$. Explicar com suas palavras cada parte do gráfico.

7) Para o circuito da Figura 1, calcular a corrente e a potência dissipada pelo diodo. Considerar o modelo do diodo com V_γ .

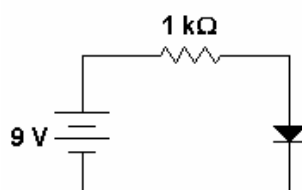


FIGURA 1

- 8) Qual o valor da tensão reversa sobre o diodo, no circuito da Figura 2?

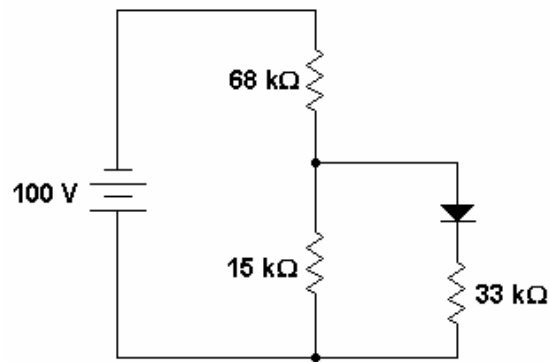


FIGURA 2

- 9) Aqui estão alguns diodos e suas especificações de tensão de ruptura (V_{BR}) e corrente máxima (I_{DM}):

Diodo	V_{BR} (V)	I_{DM} (A)
1N914	75	0,2
1N4001	50	1,0
1N1185	120	35,0

- 10) Qual desses diodos rompe-se, quando utilizado no circuito da Figura 3?

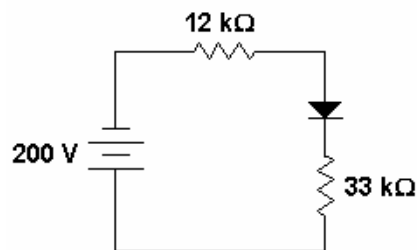


FIGURA 3

- 11) Quais os diodos relacionados no exercício anterior, que podem ser utilizados no circuito da Figura 4?

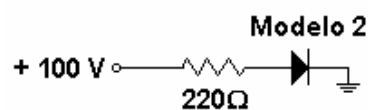


FIGURA 4

- 12) No circuito da Figura 5, $V_D = 5$ V. O diodo está aberto ou em curto ?

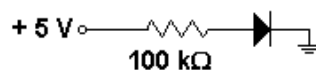


FIGURA 5

- 13) No circuito da Figura 6, a resistência R está em curto. Qual será a tensão sobre o diodo? O que acontecerá ao diodo?

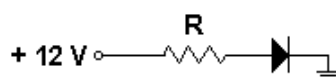


FIGURA 6

14) O que há de errado com o circuito da Figura 7?

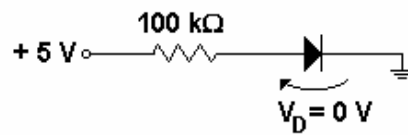


FIGURA 7

15) Para o circuito da Figura 10, calcular a corrente de saturação, a tensão de corte e o ponto Q, dado a curva característica do diodo. Qual o valor da potência dissipada pelo diodo?

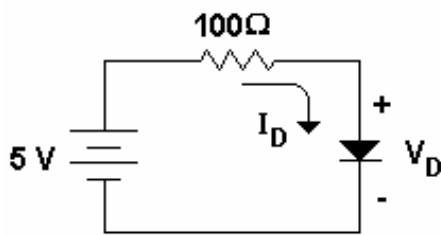
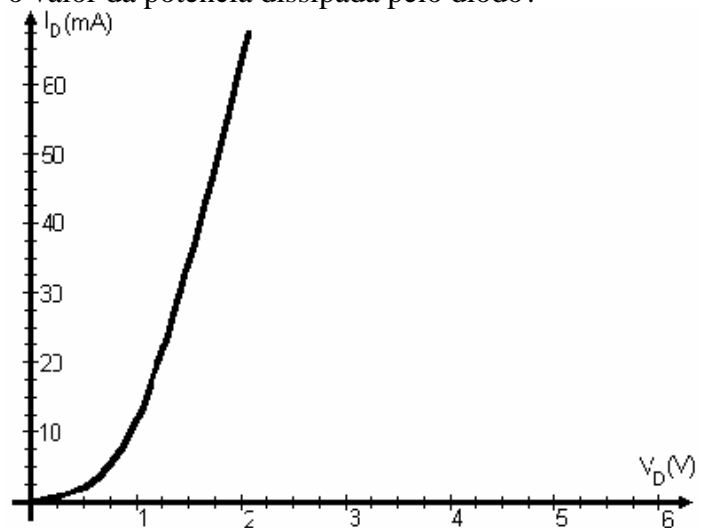


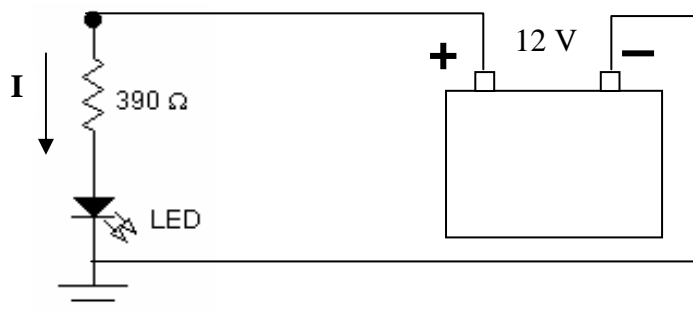
FIGURA 10



4. DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)

O diodo emissor de luz (LED) é um tipo de diodo que funciona da mesma forma que os diodos comuns, com a diferença de que o LED, quando polarizado diretamente, emite luz. Os LED's são muito utilizados em circuito de sinalização, e podem ter sua luminosidade controlada pela corrente que circula por ele. Sua tensão de funcionamento varia entre 1,2 e 2,5 V. Existem LED's que trabalham emitindo radiação infravermelha (invisível) e são muito utilizados em circuitos de alarme contra roubo ou leitores de código de barras em cartões de plástico. O circuito abaixo mostra como podemos montar um circuito adequado para polarizar um diodo. Podemos testar um LED simplesmente usando um multímetro analógico na escala de menor resistência e aplicando as ponteiros do instrumento ao componente para verificar se o mesmo acende. Existem aparelhos que possuem uma função específica para teste de diodos.

A figura abaixo mostra como podemos ligar um LED a uma bateria através de um resistor de $390\ \Omega$ para que este apresente uma luminosidade adequada.

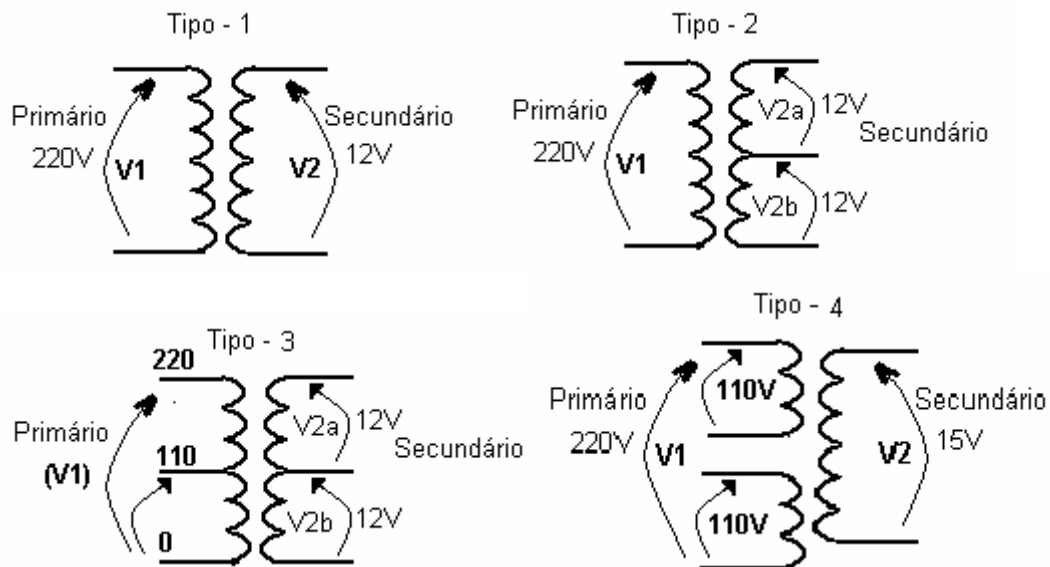


5. CIRCUITOS RETIFICADORES

A finalidade dos circuitos retificadores é converter tensão alternada em tensão contínua (num único sentido). Para isso utilizamos também os transformadores que podem abaixar ou elevar a tensão alternada (transformadores abaixadores e transformadores elevadores).

5.1. Tipos de transformadores

O primário ou o secundário pode ser constituído de enrolamento único ou múltiplo. Para o nosso estudo vamos considerar alguns exemplos de transformadores:



5.1.1. Especificações resumidas de um transformador

Exemplo 1. 110+110 V / 16+16V - 8VA. É um transformador com dois enrolamentos no primário (tipo 4); o secundário também com dois enrolamentos (tipo 2 ou tipo 3) com derivação central ou Center-Tap que fornece 16V eficazes em cada enrolamento e uma corrente de 250mA em cada enrolamento (total de 500mA - 8VA). Os valores fornecidos são todos valores eficazes. A forma de onda é senoidal.

Exemplo 2. 0 - 110 - 220V / 15V - 15 VA. É um transformador que possui o primário com derivação central (tipo 3) e o secundário com enrolamento único (tipo 1 ou tipo 4) e fornece 1A.

O primário e o secundário do transformador estão assim relacionados (isto sem levar em conta as perdas... um transformador ideal):

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{e} \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{onde: } V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2$$

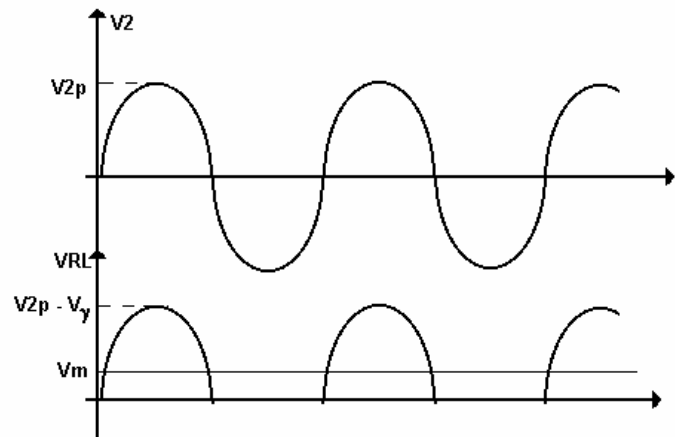
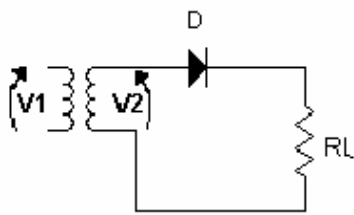
onde: N_1 = número de espiras do primário

N_2 = número de espiras do secundário

I_1 = corrente no primário

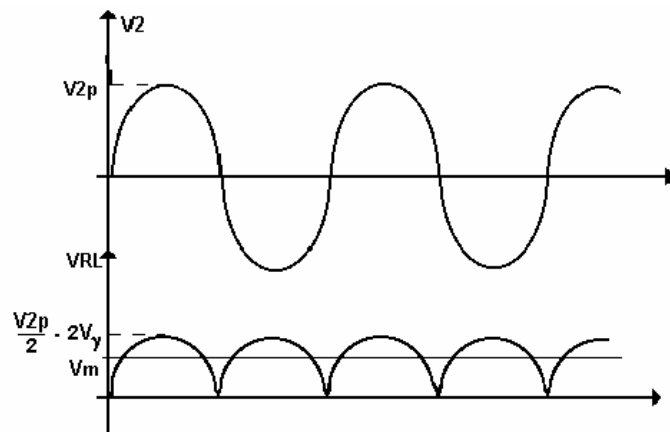
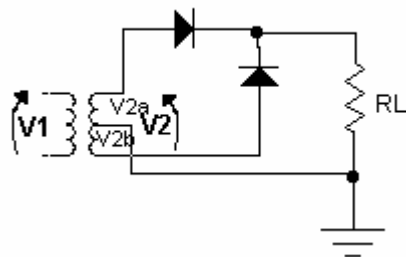
I_2 = corrente no secundário

5.2. Retificadores de Meia-Onda

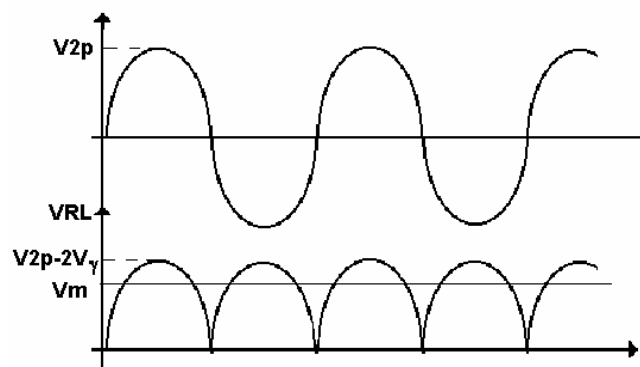
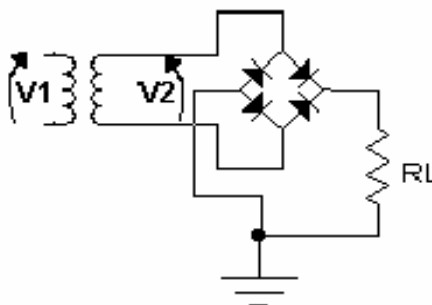


5.3. Retificadores de Onda Completa

5.3.1. Transformador com derivação central



5.3.2. Retificador em ponte para transformador com enrolamento único no secundário



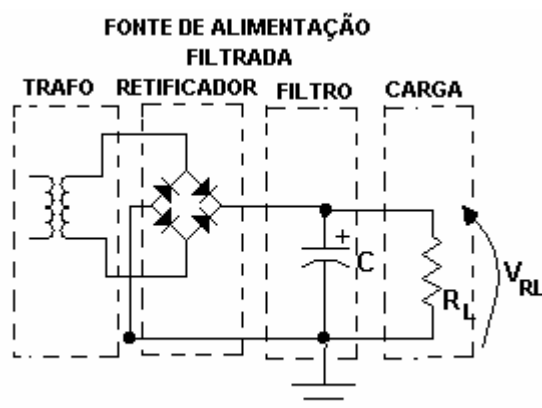
RESUMINDO: Retificadores Ideais (considerando diodos ideais).

GRANDEZAS	MEIA ONDA	ONDA COMPLETA (Transf. c/ deriv. central)	EM PONTE (Transf. sem deriv. central)
Número de diodos	1	2	4
Tensão de pico de saída	V_{2p}	$0,5V_{2p}$	V_{2p}
Tensão de pico inversa	V_{2p}	V_{2p}	V_{2p}
Frequência de ondulação	F_{ENT}	$2F_{ENT}$	$2F_{ENT}$
Corrente média no diodo	I_{carga}	$0,5I_{carga}$	$0,5I_{carga}$
Tensão média de saída	$\frac{V_{saida(pico)}}{\pi}$	$\frac{2 \times V_{saida(pico)}}{\pi}$	$\frac{2 \times V_{saida(pico)}}{\pi}$
Tensão média de saída	$\frac{\sqrt{2} \times V_{2eficaz}}{\pi}$	$\frac{2 \times \sqrt{2} \times V_{2eficaz}}{\pi}$	$\frac{2 \times \sqrt{2} \times V_{2eficaz}}{\pi}$

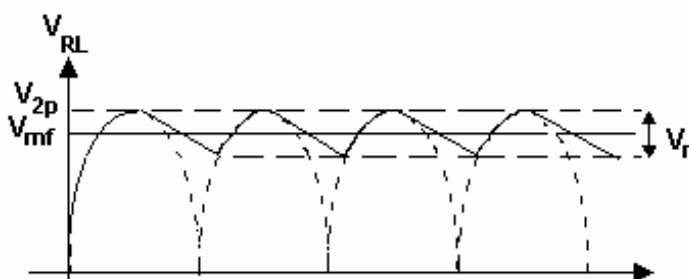
6. FILTRO CAPACITIVO

Depois que o sinal é retificado, a tensão produzida na saída é contínua, porém pulsante, inadequada para alimentar circuitos que exijam uma tensão contínua constante. Para obtermos uma tensão mais estável, usamos um capacitor na saída em paralelo com a carga. A tensão sobre a carga, com a presença do capacitor em paralelo, se tornará "quase contínua" porque o capacitor se carrega até o valor máximo da tensão retificada e tende a permanecer com esse valor. Pode-se observar com o auxílio do Osciloscópio.

A finalidade do filtro capacitivo é tornar a tensão de saída mais próxima possível de uma tensão contínua e constante. Este tipo de fonte é aplicada em equipamentos que admitem pequenas variações na tensão de alimentação. Estas variações recebem o nome de tensão de ondulação ou ripple.



O gráfico abaixo mostra que a tensão de saída varia desde o valor de pico até um valor mínimo. Enquanto esta tensão está aumentando o capacitor é carregado. Dependendo do valor do capacitor e também do valor carga (R_L) o capacitor descarrega com maior ou menor rapidez. Se a rapidez da descarga for maior, a inclinação da reta de descida será maior. Com isso chega-se a um valor mínimo mais distante do valor de pico. Logo a ripple será também maior. Fazendo uma aproximação podemos dizer que a tensão de saída (V_{mf}) está no ponto médio entre o valor máximo (de pico) e o valor mínimo.



Forma de onda da tensão filtrada

V_{RL} Tensão de saída da fonte filtrada ou tensão na carga

V_{2p} Tensão no secundário do trafo ou na saída do filtro considerando o diodo ideal

V_{mf} Tensão média fornecida pela fonte

V_r Tensão de ripple ou tensão de ondulação

A tensão de ripple está assim relacionada: $V_r = \frac{V_{mf}}{f \times R_L \times C}$ onde:

V_r = tensão de ripple

V_{mf} = tensão de saída da fonte (média)

f = frequência de entrada (freq. da rede)

C = capacitância

Logo, quanto maior for a constante de descarga do capacitor ($R \times C$) menor será a tensão de ripple. Com isso podemos perceber que aumentando a resistência de carga (diminuindo a corrente) ou aumentando o capacitor ou ambos, diminuimos a tensão de ripple (diferença entre o valor máximo e mínimo). Como a tensão de saída é o valor de pico menos a metade do ripple, concluímos que a tensão de saída da fonte aumenta.

RESUMINDO: Retificadores Ideais (considerando diodos ideais) com filtros (com capacitor):

GRANDEZAS	MEIA ONDA	ONDA COMPLETA (Transf. c/ deriv. central)	EM PONTE (Transf. sem deriv. central)
Número de diodos	1	2	4
Tensão de pico de saída	V_{2p}	$0,5V_{2p}$	V_{2p}
Tensão de pico inversa	$2V_{2p}$	V_{2p}	V_{2p}
Frequência de ondulação	F_{ENT}	$2F_{ENT}$	$2F_{ENT}$
Corrente média no diodo	I_{carga}	$0,5I_{carga}$	$0,5I_{carga}$
Tensão média de saída	V_{2p}	$0,5V_{2p}$	V_{2p}
Tensão média de saída	$\sqrt{2} \times V_{2eficaz}$	$\frac{\sqrt{2} \times V_{2eficaz}}{2}$	$\sqrt{2} \times V_{2eficaz}$

Deste modo você tem elementos suficientes para calcular e implementar uma fonte filtrada.

EXEMPLOS:

Basicamente temos dois tipos de problemas para ilustrar o assunto “fonte filtrada”.

Exemplo 1. Tenho um transformador e quero montar uma fonte filtrada com ele. O trafo que possuo é de 110+110V / 12 + 12V – 10VA. Logo, o trafo disponível possui enrolamento com derivação central e pode fornecer 416mA em cada enrolamento de 12 V (isto significa fornecer 24V / 416mA ou 12V/ 832mA).

Escolha do retificador:

Para um transformador com derivação central vamos escolher um retificador de onda completa (melhor aproveitamento do trafo) com 2 diodos.

• **Especificações dos diodos**

A tensão máxima na saída do retificador será : $V_p = V_{2eficaz} \times \sqrt{2} \times -V_\gamma = 16,3V$

Especificações dos diodos: Tensão reversa maior que $2 \times V_2 \times \sqrt{2} = 33,9V$

Os diodos devem suportar uma corrente maior que 416mA

• **Especificando o capacitor**

Adotando como tensão de ripple 1 Volt e frequência da rede 60Hz teremos tensão máxima de 16,3 V e tensão mínima de 15,3V e portanto a tensão média será de 15,8V, para isso o capacitor deverá ter capacitância igual a 6.933 µF.

A tensão suportada pelo capacitor deverá ser maior que 16,3V. A carga terá uma resistência igual a 18,4Ω

Exemplo 2. Quero projetar uma fonte filtrada para fornecer uma corrente de 2 Ampères a 20 V. A tensão de ripple máxima adotada será de 5%. A tensão máxima será de 20,5 V e a mínima de 19,5 V.

Neste caso tenho as especificações da carga e vou dimensionar o trafo e os outros componentes.

• **Especificando o transformador**

Vamos escolher um transformador com secundário único (sem derivação central). Poderíamos escolher outro tipo transformador. De acordo com o transformador escolhido temos que utilizar um retificador em ponte (4 diodos). A resistência da carga (R_L) será de 10Ω.

Para que a tensão na carga seja 20V, a tensão de pico na saída do transformador será de: $20,5 + 2 \times V_\gamma = 21,9V$. Logo, a tensão eficaz no secundário do transformador será 15,5V.

Considerando a rede local, este transformador deverá ter o primário para 220V e o secundário para 15,5V / 40VA.

A relação de espiras é de 14,2 (V_1/V_2)

- **Especificando os diodos**

A corrente suportada pelo diodo deverá ser maior que 1,3 A ($40VA/15,3/2$).

A tensão reversa (breakpoint) deve ser maior que 21,9V.

- **Especificando o capacitor**

Considerando a corrente na carga 2 A; frequência da rede 120Hz; obtemos 16.666 μF e tensão maior que 21,9V

- **Desenhe o esquema elétrico** da fonte indicando as especificações dos componentes e as tensões nos principais pontos.

7. Especificações do Diodo Zener

1) V_γ - Tensão de condução na polarização direta, onde $V_D \geq V_\gamma$

2) V_Z - Tensão Zener (dada pelo fabricante). Como V_Z sofre uma pequena variação em função de I_Z , o fabricante fornece um valor obtido por uma corrente de teste I_{ZT} .

3) I_{ZM} - Corrente Zener máxima

4) I_{zm} ou I_{ZK} - Corrente Zener mínima. Caso não seja dado o valor de I_{ZK} considera-se I_{zm} como sendo 10% de I_{ZM} ou seja:

$$I_{zm} = 0,1 \cdot I_{ZM}$$

5) P_{ZM} - Potência Zener máxima. O diodo Zener dissipa esta potência quando sua corrente atinge o valor I_{ZM} , ou seja:

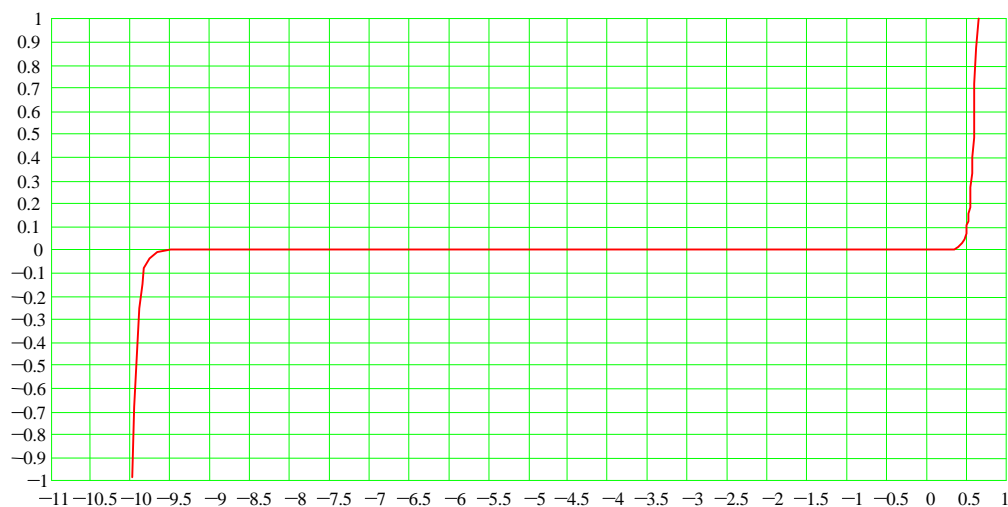
$$P_{ZM} = V_Z \cdot I_{ZM}$$

6) R_Z - Resistência Zener. Esta resistência reflete a pequena variação de V_Z em função de I_Z e pode ser calculada por:

$$R_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z}$$

EXEMPLO: Diodo 1N961 - especificações dadas pelo fabricante

Corrente zener máxima	I_{ZM}	32 mA
Corrente zener mínima	I_{zm}	0,25 mA
Tensão Zener	V_Z	10 V
Resistência Zener	R_Z	8,5 Ω
Potência máxima	P_{DM}	350 mW

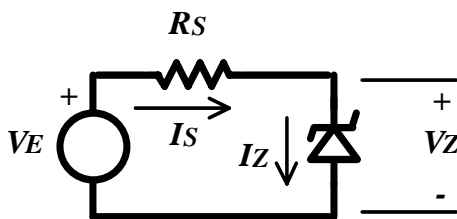


8. Diodo Zener como Regulador de Tensão

8.1. Introdução

Como vimos anteriormente, o Diodo Zener tem uma peculiaridade interessante: enquanto ele está operando na Região Zener (inversamente polarizado) sua tensão é praticamente constante (não varia mais do que 5%) para grandes variações de corrente (às vezes, mais de 100x) que por ele circula. No entanto, para se conseguir esta condição, existe um valor mínimo de corrente que garanta a presença da Tensão Zener sobre o diodo, já definida como I_{Zmin} . Por outro lado, o Diodo Zener também tem um limite máximo de corrente para que ele não queime, chamada de I_{ZMAX} .

Vejam, então, como garantir que um Diodo Zener opere dentro dos limites de corrente estabelecidos pelo fabricante e com isso usá-lo na sua principal função: um bom regulador de tensão. Observe a figura do circuito eletrônico e as equações a seguir.



$$I_S = I_Z$$

$$V_E = R_S \cdot I_S + V_Z$$

O resistor R_S é colocado para limitar a corrente que passa no Diodo Zener ($I_S = I_Z$) e, ao mesmo tempo, apresentar a diferença de tensão que existir entre V_E e V_Z . Se a corrente I_Z possui valores mínimos e máximos para que o Diodo Zener opere satisfatoriamente, o resistor R_S deverá ser escolhido entre um valor mínimo e um máximo para garantir que a corrente I_Z esteja dentro da faixa permitida. Vejamos os cálculos:

$$R_S = \frac{V_E - V_Z}{I_Z} \Rightarrow \begin{aligned} R_{Smin} &= \frac{V_E - V_Z}{I_{Zmax}} \\ R_{Smax} &= \frac{V_E - V_Z}{I_{Zmin}} \end{aligned}$$

Note que para o cálculo do valor máximo de R_S , utilizamos o valor mínimo de corrente I_Z , e vice-versa.

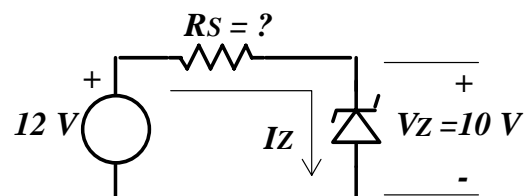
Somente a partir do cálculo dos valores para R_S (mínimo e máximo) poderemos escolher um valor comercial adequado para ser utilizado no circuito.

EXEMPLO: Calcule os limites do resistor R_S colocado para limitar a corrente do Diodo Zener 1N961

Corrente zener máxima	I_{ZM}	30 mA
Corrente zener mínima	I_{Zm}	0,25 mA
Tensão Zener	V_Z	10 V
Potência máxima	P_{DM}	320 mW

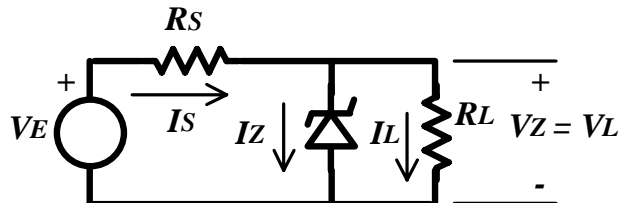
$$R_{Smin} = \frac{12 - 10}{30mA} = 66,6\Omega \quad R_{SMax} = \frac{12 - 10}{0,25mA} = 8.000\Omega$$

$$VALORES COMERCIAIS = 68 \Omega < R_S < 6K8 \Omega \text{ (sempre ENTRE os valores encontrados)}$$



8.2. Regulador de tensão para carga e fonte fixas

O que ocorre quando colocamos uma carga para ser alimentada por esta fonte de tensão? Pela figura abaixo, verificamos que a corrente I_S deve se dividir em duas: I_Z e I_L . Logo, devemos alterar nossa forma de cálculo do resistor R_S , pois a corrente que passa nele é diferente da corrente que passa no Diodo Zener ($I_S \neq I_Z$). O cálculo de R_S deve levar em conta que a divisão de corrente deve ser feita de forma a garantir que o Diodo Zener sempre receba sua corrente I_Z dentro dos limites estabelecidos.



$$I_S = I_Z + I_L$$

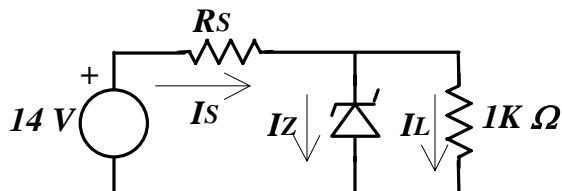
$$V_E = R_S \cdot I_S + V_Z$$

Note que a equação de tensão não se alterou, apenas a equação de corrente, pois I_S é agora a soma da corrente que circula nos dois ramos. A função do resistor R_S continua a mesma, controlar a corrente que a fonte fornece ao circuito, além de “receber” a diferença de tensão existente entre V_E e V_Z . A alteração em relação ao cálculo anterior dos valores limites de R_S é que agora devemos levar em conta o valor de I_L , além de I_Z . Vejamos como ficam os cálculos:

$$R_S = \frac{V_E - V_Z}{I_Z + I_L} \Rightarrow \begin{aligned} R_{Smin} &= \frac{V_E - V_Z}{I_{Zmax} + I_L} \\ R_{Smax} &= \frac{V_E - V_Z}{I_{Zmin} + I_L} \end{aligned}$$

Note que para o cálculo do valor máximo de R_S , utilizamos o valor mínimo de corrente I_Z , e vice-versa.

EXEMPLO: Calcular os limites do resistor R_S que deve ser colocado para garantir a corrente exigida pela carga e pelo Diodo Zener especificado abaixo:



Corrente zener máxima	I_{ZM}	60 mA
Corrente zener mínima	I_{Zm}	0,5 mA
Tensão Zener	V_Z	6,2 V
Potência máxima	P_{DM}	350 mW

$$I_L = \frac{6,2V}{1K\Omega} = 6,2mA \quad R_{Smin} = \frac{14 - 6,2V}{60 + 6,2mA} = 117\Omega \quad R_{SMax} = \frac{14 - 6,2V}{0,5 + 6,2mA} = 1.164\Omega$$

VALORES COMERCIAIS = $120\Omega < R_S < 1K\Omega$ (sempre ENTRE os valores encontrados)

9. TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR (BJT)

9.1. Introdução

DIODO \Rightarrow chave: aberta/fechada \Rightarrow não há controle da corrente

O princípio do transistor é *controlar a corrente*. Ele é montado numa estrutura de cristais semicondutores, de modo a formar duas camadas de cristais do mesmo tipo intercaladas por uma camada de cristal do tipo oposto, que controla a passagem de corrente entre as outras duas, Figura 6.1.

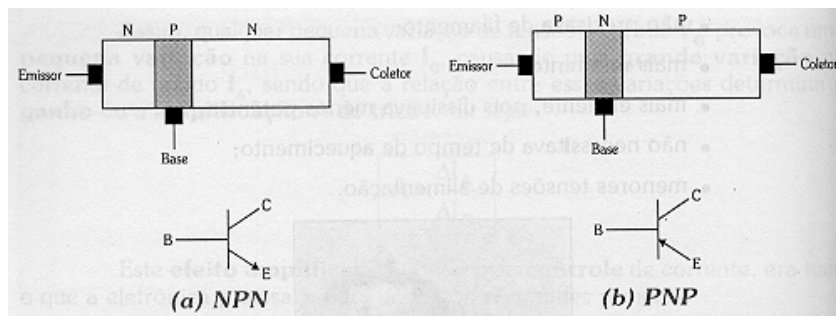


FIGURA 6.1 – Aspectos construtivos e símbolos dos transistores bipolares

Cada uma das camadas, Figura 6.2, recebe um nome em relação a sua função na operação do transistor:

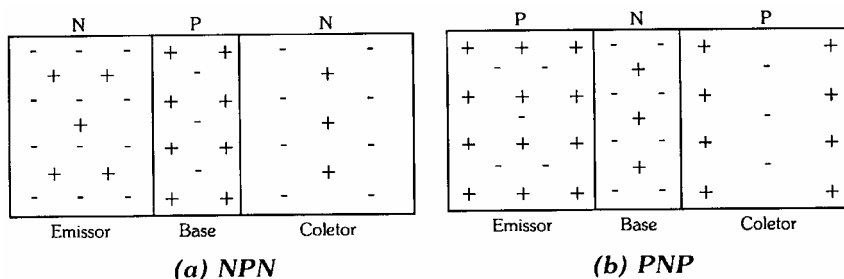


FIGURA 6.2 – Portadores nos transistores bipolares

- Base (B):** dopagem média e muito fina. Assim, a maioria dos portadores lançados do emissor para a base, conseguem atravessá-la dirigindo-se ao coletor;
- Coletor (C):** levemente dopado, coleta (recolhe) os portadores que vêm da base. Ele é muito maior que as outras camadas, pois é nele que se dissipa a maior parte da potência gerada pelos circuitos transistorizados;
- Emissor (E):** fortemente dopado, tem por função emitir portadores de carga para a base (e^- no transistor NPN e lacunas no PNP).

9.2. Barreiras de potencial

Da mesma forma que na junção PN dos diodos, nas duas junções J_1 e J_2 dos transistores, Figura 6.3, surgem devido à recombinação dos portadores barreiras de potencial, cujos valores a 25°C são $V_\gamma = 0,7\text{ V}$ para semicondutores de silício e $V_\gamma = 0,3\text{ V}$ para semicondutores de germânio.

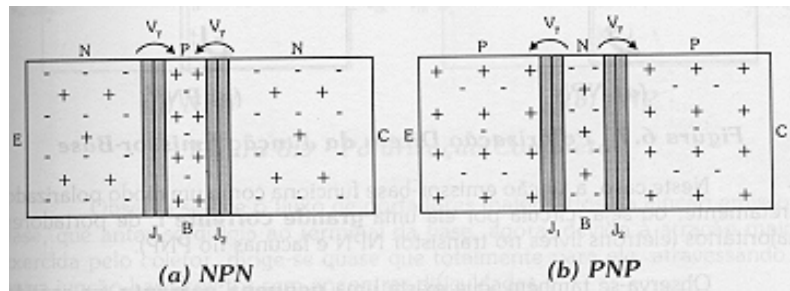


FIGURA 6.3 – Barreiras de potencial nos transistores bipolares

9.3. Princípio do transistor

O comportamento básico dos transistores nos circuitos eletrônicos é fazer o *controle da passagem de corrente entre o emissor e o coletor, através da base*. Isto é conseguido, polarizando-se adequadamente suas junções.

9.3.1. Polarização direta da junção E – B

A junção E – B funciona como um diodo quando polarizada diretamente, ou seja, por ela circula uma *elevada corrente* (I_B) de portadores majoritários (e^-), Figura 6.4. Existe uma *pequena corrente* (*corrente de fuga*) em sentido contrário, devido aos portadores minoritários.

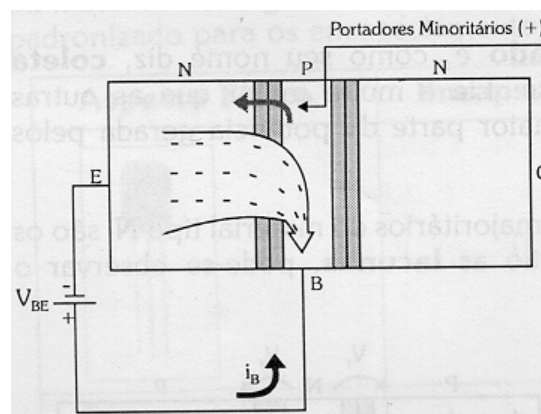


FIGURA 6.4 – Polarização direta da junção E – B

9.3.2. Polarização reversa da junção B – C

Polarizando-se reversamente a junção C – B a barreira de potencial aumenta, diminuindo o fluxo de corrente de portadores majoritários, Figura 6.5. Os portadores minoritários atravessam a barreira de potencial com facilidade no sentido contrário, produzindo uma corrente reversa desprezível.

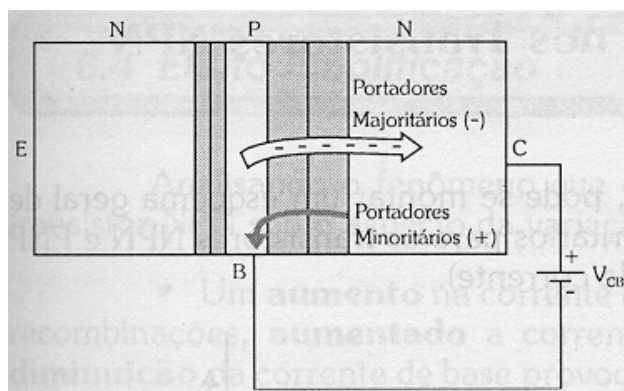


FIGURA 6.5 – Polarização reversa da junção B – C

9.3.3. Polarização completa

Polarizando-se diretamente a junção E – B e reversamente a junção B – C, o fluxo de e^- livres na primeira, que antes dirigia-se ao terminal da base, agora, devido a maior atração exercida pelo coletor, dirige-se quase que totalmente para ele, atravessando a outra junção sem encontrar dificuldades, Figura 6.6.

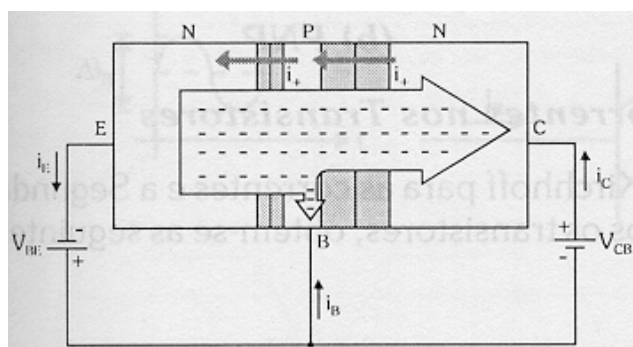


FIGURA 6.6 – Polarização completa do transistor bipolar

Como a base é mais fina e menos dopada, os portadores do emissor saturam a base através de recombinações. Assim, uma pequena parte dos portadores saem pela base e a maioria sai pelo coletor.

9.3.4. Tensões e correntes nos transistores NPN e PNP

Da Figura 6.7, tem-se que: \Rightarrow NPN: $I_E = I_C + I_B$ e $V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$;

\Rightarrow PNP: $I_E = I_C + I_B$ e $V_{EC} = V_{EB} + V_{BC}$.

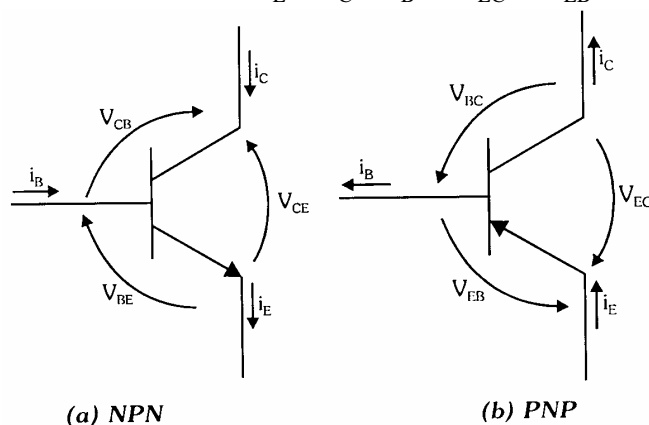


FIGURA 6.7 – Tensões e correntes nos transistores bipolares

As correntes de portadores minoritários, por serem muito menores que as correntes de portadores majoritários, serão sempre desprezadas.

9.3.5. Efeito de amplificação

Aumentado-se a corrente I_B aumenta o número de recombinações, aumentando-se a corrente I_C , pois I_B *controla* a corrente entre o emissor e o coletor.

Como $I_B \ll I_C$, uma pequena variação em I_B (Δi_B), Figura 6.8, provoca uma grande variação em I_C (Δi_C). Portanto, verifica-se que Δi_C é um reflexo *amplificado* de Δi_B .

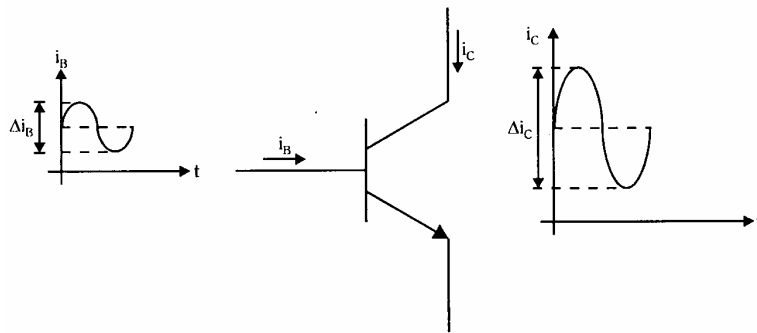


FIGURA 6.8 – Efeito de amplificação no transistor NPN

Como o transistor possibilita a amplificação de um sinal, ele é chamado de componente *ativo*.

O efeito de amplificação do transistor é chamado de *ganho de corrente* (β), sendo expresso pela equação:

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

9.3.6. Configurações básicas

Base Comum	
Emissor Comum	
Coletor Comum	

9.4. Principais características

Característica de entrada: relação entre a *corrente* e a *tensão de entrada*, para vários valores constantes da *tensão de saída*.

Característica de saída: relação entre a *corrente* e a *tensão de saída*, para vários valores constantes da *corrente de entrada*.

Estas características, em forma de curva, permitem o cálculo dos resistores de polarização.

9.5. Configuração emissor comum (EC)

É a configuração mais utilizada em circuitos transistorizados, Figura 6.9. Por isso, os diversos parâmetros dos transistores fornecidos pelos manuais técnicos, têm como referência esta configuração.

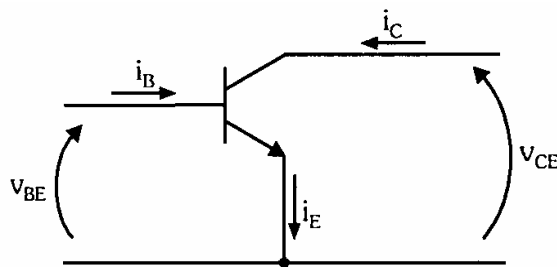


FIGURA 6.9 – Configuração emissor comum (EC)

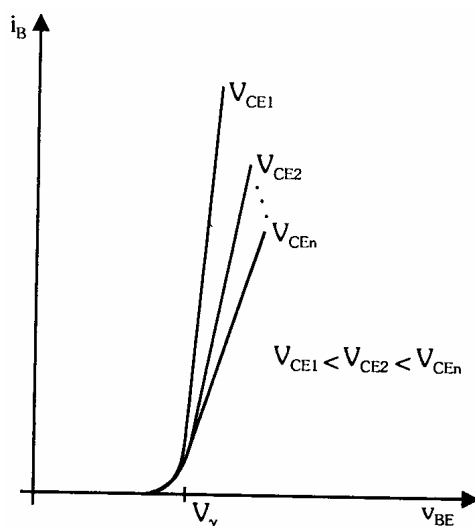
Para esta configuração, tem que:

Base (B): entrada de corrente;

Coletor (C): saída de corrente;

Emissor (E): terminal comum às tensões de entrada e saída.

Curva característica de entrada



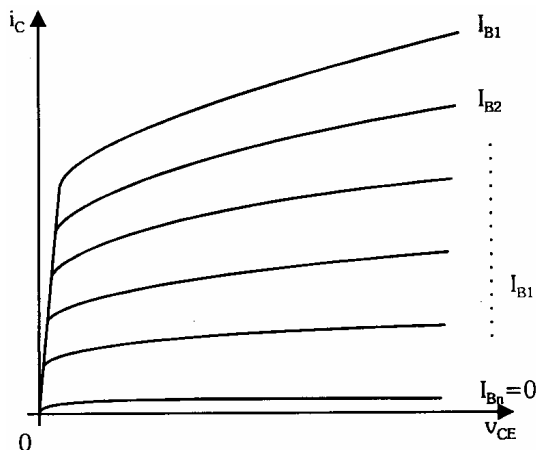
$$V_{CE} = \text{constante} \therefore \Delta V_{BE} \rightarrow \Delta I_B ;$$

* característica de base;

* controla-se I_B , variando-se V_{BE} .

FIGURA 6.10 – Curva característica de entrada EC

Curva característica de saída



$$I_B = \text{constante} \therefore \Delta V_{CE} \rightarrow \Delta I_C ;$$

* característica de saída ou de coletor;

* regiões:

⇒ corte: $I_C \approx 0$;

⇒ saturação: $V_{CE} \approx 0$;

⇒ ativa: região entre o corte e a saturação (I_B é linear).

FIGURA 6.11 – Curva característica de saída EC

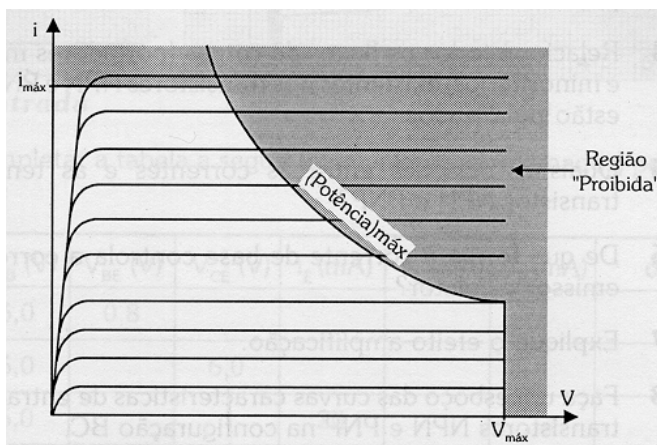
Ganho de Corrente

$$h_{FE} = \beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Como $I_C \gg I_B$, $\beta \gg 1$. Logo, o transistor na configuração EC, funciona como um *amplificador de corrente*.

Como a inclinação da curva característica de saída varia para cada valor de I_B , o ganho de corrente *não é constante*. Os valores típicos de β são de 50 a 900.

9.6. Limites dos transistores



⇒ tensão máxima de coletor: V_{CEmax} ;

⇒ corrente máxima de coletor: I_{Cmax} ;

⇒ potência máxima de coletor: P_{Cmax} ;

⇒ para EC: $P_{Cmax} = V_{CEmax} \times I_{Cmax}$;

⇒ tensão de ruptura da junções (BV):

BV_{CBO} = tensão de ruptura entre C e B, com E aberto;

BV_{CEO} = tensão de ruptura entre C e E, com B aberto;

BV_{CES} = tensão de ruptura entre C e E, com B em curto.

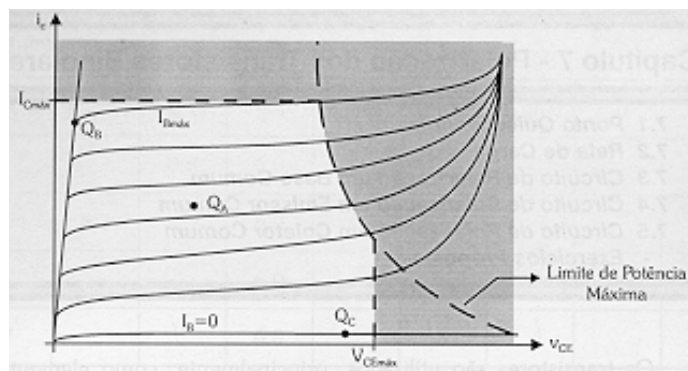
FIGURA 6.12 – Limites do transistor bipolar

9.7. Polarização dos transistores bipolares

As principais aplicações dos transistores são na amplificação de sinais e como chave. Para tanto, o transistor deve estar polarizado.

9.7.1. Ponto quiescente (Q)

Polarizar um transistor é *fixá-lo num ponto de operação em corrente contínua*, que esteja dentro de sua região de operação. A polarização também é chamada de *polarização DC*, pois fixa através de resistores externos, valores de correntes e tensões contínuas no transistor. O ponto de trabalho do transistor é chamado de *ponto de operação estática* ou *ponto quiescente (Q)*. A escolha do ponto Q é feita em função da aplicação do transistor (regiões de *corte*, *saturação* ou *ativa*).



QA: região ativa (grandes variações em I_B , I_C e V_{CE});

QB: região de saturação ($V_{CE} \approx 0$);

QC: região de corte ($I_C \approx 0$).

FIGURA 6.13 – Regiões de trabalho do transistor bipolar

9.7.2. Reta de carga

A reta de carga, Figura 6.14, é o lugar geométrico de todos os pontos quiescentes possíveis, para uma determinada polarização e depende da configuração adotada.. Para determiná-la, necessita-se de apenas *dois* pontos de operação conhecidos.

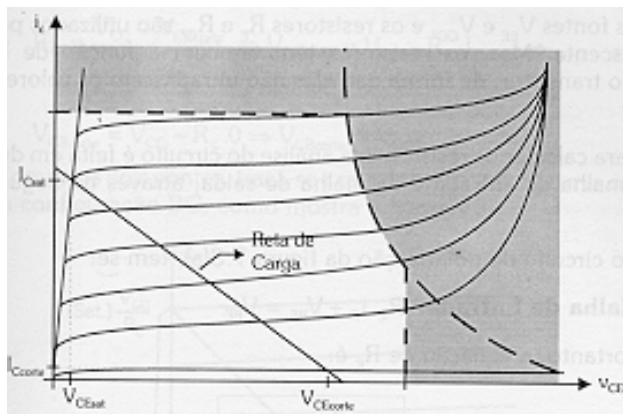
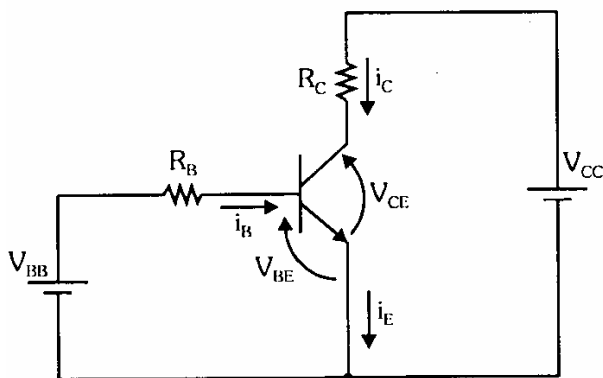


FIGURA 6.14 – Reta de carga do transistor bipolar

9.7.3. Circuitos de polarização EC



Para que transistor trabalhe na região ativa:

- ✱ junção E – B: polarizada diretamente;
- ✱ junção B – C: polarizada reversamente.

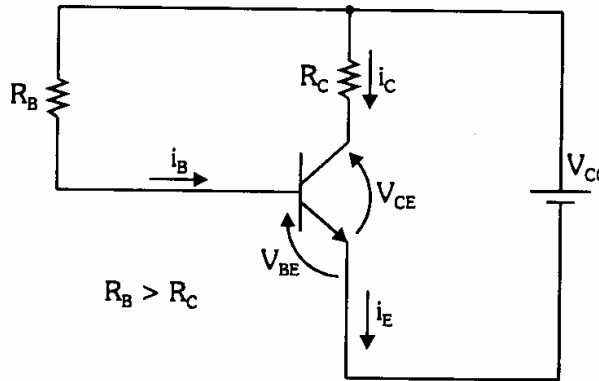
Para tanto, utilizam-se duas fontes de alimentação e resistores para limitar as correntes e fixar o ponto Q do circuito.

FIGURA 6.15 – Circuito de polarização EC

Malha de entrada: $-V_{BB} + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0 \rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \therefore I_C = \beta \cdot I_B$

Malha de saída: $-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$

9.7.4. Circuito de polarização EC com corrente de base constante



* $R_B > R_C$ para garantir a polarização direta da junção E – B e reversa da junção B – C;

* elimina-se a fonte de alimentação $V_{BB} \rightarrow$ simplificação.

FIGURA 6.16 – Circuito de polarização EC com corrente de base constante

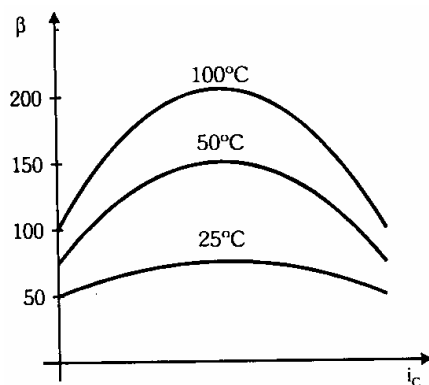
Malha de entrada: $-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0 \rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \therefore I_C = \beta \cdot I_B$

Malha de saída: $-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$

9.8. Influência da temperatura no comportamento dos transistores

O material semicondutor é sensível à temperatura, ou seja, com o aumento da temperatura ocorre a geração de novos portadores.

Nos transistores, a variação de temperatura (ΔT) altera o ganho de corrente (β), a tensão base-emissor (V_{BE}) e a corrente de fuga (I_F).



* a variação de V_{BE} com a temperatura é desprezível;

* a I_F e o β podem apresentar variações acentuadas;

* $\Delta T \rightarrow \Delta \beta \rightarrow$ grande variação em I_C , sem variação em $I_B \therefore$ circuito instável.

FIGURA 6.17 – Influência da temperatura no transistor bipolar

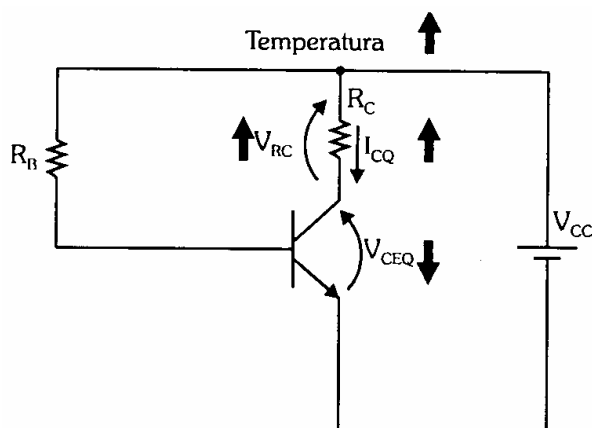


FIGURA 6.18 – Variação do ponto Q em função da temperatura

✱ o ponto Q do circuito ao lado, deve fixar os valores de I_{CQ} e V_{CEQ} ;

✱ na malha de saída um aumento na temperatura, provoca um aumento de I_{CQ} e da queda de tensão em R_C (V_{RC}). Como V_{CC} = constante, esse aumento de V_{RC} tem de ser compensado pela diminuição de V_{CEQ} . A diminuição de V_{CEQ} provoca novo aumento de I_{CQ} , gerando uma realimentação positiva que provoca a instabilidade do circuito;

✱ solução: realimentação negativa, ou seja, colocar em série com o emissor um resistor R_E .

9.8.1. Circuito de polarização EC com corrente de emissor constante

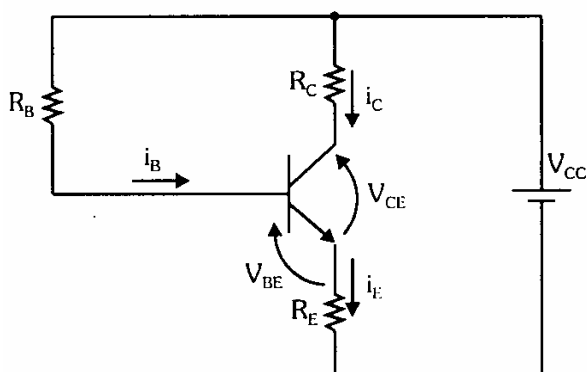


FIGURA 6.19 – Circuito de polarização EC com corrente de emissor contante

✱ aumentando a temperatura, aumenta I_C , I_E , V_{RC} e V_{RE} , diminuindo V_{CEQ} → realimentação positiva → instabilidade;

✱ com o aumento de V_{RE} , diminui V_{RB} ($V_{BE} \approx$ constante);

✱ com a diminuição de V_{RB} , diminui I_{BQ} . Assim, I_{CQ} diminui compensando seu aumento inicial;

✱ o aumento de V_{RE} gera uma realimentação negativa, que garante a estabilidade do circuito e do ponto Q.

Como a realimentação negativa faz I_{CQ} voltar ao seu valor original, o mesmo acontece com I_{EQ} que mantém-se constante. Por isso, esse circuito de polarização é conhecido por *polarização EC com corrente de emissor constante*.

Malha de entrada:

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E = 0 \rightarrow I_E = I_C + I_B = \beta \cdot I_B + I_B = (\beta + 1) \cdot I_B$$

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot (\beta + 1) \cdot I_B = 0 \rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E} \quad \therefore I_C = \beta \cdot I_B$$

Malha de saída:

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

$$\text{como: } \beta \gg 1 \rightarrow I_C \approx I_E \quad \therefore V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

9.8.2. Circuito de polarização EC com divisor de tensão na base

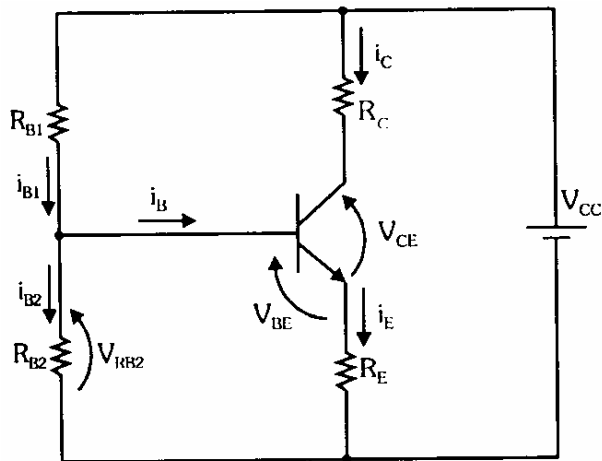


FIGURA 6.20 – Circuito de polarização EC com divisor de tensão na base

✱ este circuito é uma outra forma de solucionar o problema da instabilidade;

✱ o circuito é projetado para fixar o valor da tensão no resistor R_{B2} (V_{RB2});

✱ $V_{RB2} = V_{BE} + V_{RE} \rightarrow$ fixado o valor de V_{RB2} , como $V_{BE} \approx$ constante, V_{RE} também permanece constante. Assim, garante-se a estabilidade de I_{EQ} e I_{CQ} , independente da variação de β ;

Malha de entrada: $\beta \gg 1 \rightarrow I_B \approx 0 \quad \therefore V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$

$$-V_B + V_{BE} + V_{RE} = 0 \quad \therefore V_{RE} = V_B - V_{BE}$$

$$\text{mas: } V_{RE} = V_E = R_E \cdot I_E \quad \therefore I_E = \frac{V_{RE}}{R_E}$$

$$\text{como: } \beta \gg 1 \rightarrow I_C \approx I_E$$

Malha de saída:

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

$$\text{como: } \beta \gg 1 \rightarrow I_C \approx I_E \quad \therefore V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

Determinação da Reta de Carga

(a) Ponto de saturação: $V_{CEsat} = 0$

Malha de saída: $V_{CC} = V_{CEsat} + (R_C + R_E) \cdot I_{Csat} \quad \therefore I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$

(b) Ponto de corte: $I_{Ccorte} = I_{Ecorte} = 0$

Malha de saída: $V_{CC} = V_{CEcorte} + (R_C + R_E) \cdot I_{Ccorte} \quad \therefore V_{CEcorte} = V_{CC}$

A reta de carga do circuito de polarização EC com divisor de tensão na base, é apresentada na Figura 6.21.

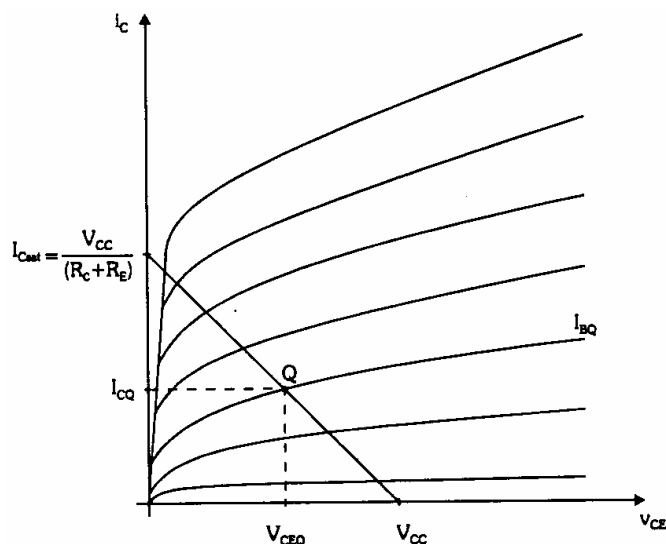
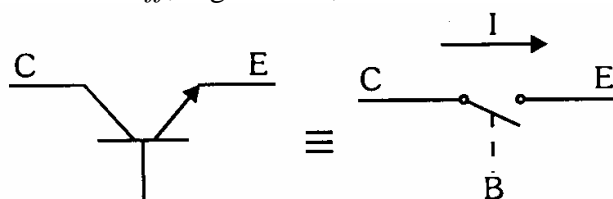


FIGURA 6.21 – Reta de carga do circuito de polarização EC com divisor de tensão na base

9.9. Transistor como chave

O transistor operando na região de saturação e de corte funciona como uma *chave*, ou seja, como um elemento de *controle on – off*, Figura 6.22, conduzindo corrente ou não.



Transistor

FIGURA 6.22 – Analogia transistor bipolar – chave

Para que o transistor comporte-se como uma chave, utiliza-se o circuito de polarização EC com corrente de base constante com duas fontes de alimentação, Figura 6.23.

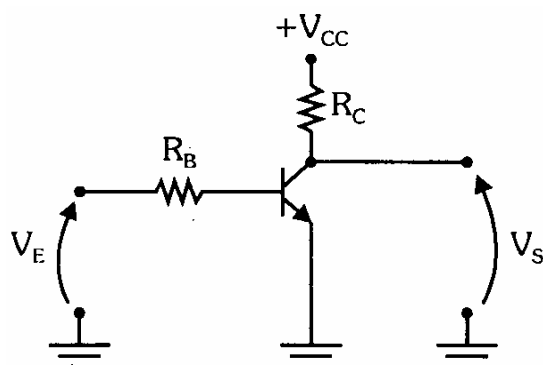


FIGURA 6.23 – Circuito de polarização para o transistor bipolar operando como chave

Para que o transistor trabalhe na região de corte (Q_1), figura 6.24:

$$V_E < V_{BE} \rightarrow I_{C\text{corte}} \approx 0 \therefore V_S = V_{CE\text{corte}} = V_{CC} \rightarrow \text{chave aberta}$$

Para que o transistor trabalhe na região de saturação (Q_2) Figura 6.13:

$$V_E > V_{BE} \rightarrow I_C = I_{Csat} \quad \therefore V_S \approx 0 \rightarrow \text{chave fechada}$$

Malha de entrada: $-V_E + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0 \rightarrow I_B = \frac{V_E - V_{BE}}{R_B} \quad \therefore I_C = \beta \cdot I_B$

Malha de saída: $-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$

O corte do transistor depende apenas da tensão V_E , então, para a determinação do ponto de saturação tem-se que:

$$I_{Bsat} = \frac{V_E - V_{BE}}{R_B} \quad \therefore I_{Csat} = \beta \cdot I_{Bsat} \quad \text{e} \quad V_{CEsat} = V_{CC} - R_C \cdot I_{Csat}$$

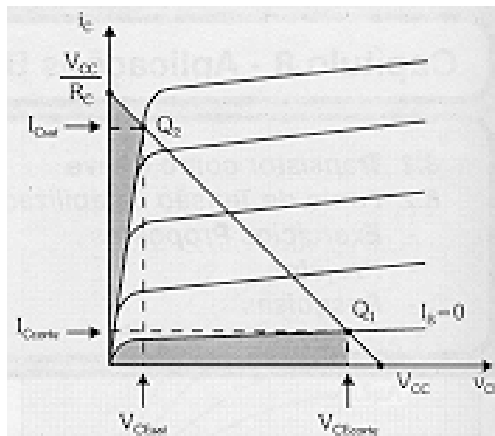


FIGURA 6.24 – Reta de carga para o transistor bipolar operando como chave

9.10. Reguladores Série

Pode-se usar um transistor na configuração coletor comum, para melhorar o desempenho de um regulador zener, Figura 6.25. A tensão zener é a tensão na base do transistor, de modo que a tensão de saída é expressa por:

$$V_S = V_Z - V_{BE}$$

Esta tensão de saída é fixa. Se a tensão de entrada variar, a tensão zener permanecerá aproximadamente constante e, também, a tensão de saída. Assim, o circuito funciona como um regulador de tensão.

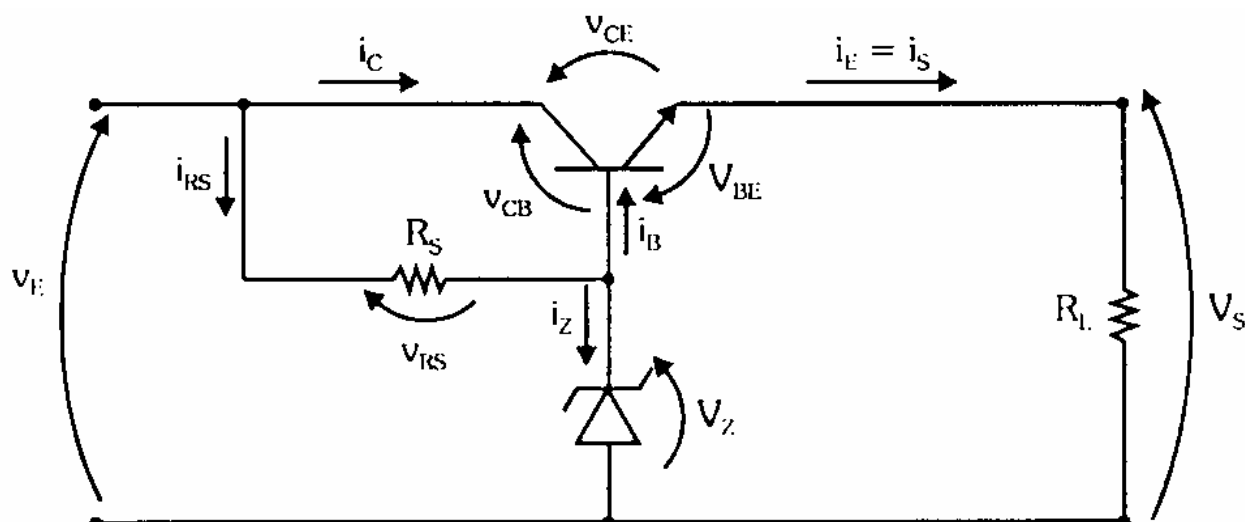


FIGURA 6.25 – Regulador série

A vantagem deste regulador sobre o regulador zener comum, visto no capítulo 5, é que como a corrente através de R_S é dada por:

$$I_{RS} = I_Z + I_B \quad \text{mas:} \quad I_B = \frac{I_{RL}}{\beta}$$

Esta corrente de base é muito menor que a corrente de carga, podendo-se utilizar um diodo zener com menor capacidade de corrente do que aquele do regulador zener comum.

Para projetar um regulador série, deve-se considerar a potência dissipada no transistor que é dada por:

$$P_D = V_{CE} \cdot I_C \quad \text{onde:} \quad \begin{aligned} V_{CE} &= V_E - V_S \\ I_C &\approx I_E \end{aligned}$$

Como os terminais C – E do transistor estão em série com a carga, a corrente de carga deve passar através do transistor, que é chamado de *transistor de passagem*. Devido a sua simplicidade, os reguladores série são amplamente empregados.

A principal desvantagem de um regulador série, é a potência dissipada no transistor de passagem. Desde que a corrente de carga não seja muito grande, o transistor de passagem não aquece demais. Mas, quando a corrente de carga é muito elevada, o transistor de passagem tem que dissipar uma boa quantidade de potência, aumentando a temperatura interna do equipamento. Em alguns casos, pode ser necessário um ventilador para diminuir o calor.

9.11. Exercícios

Determinar as seguintes quantidades para a configuração da figura 1: I_B , I_C , V_{CE} , V_B e V_C .

Resp.: $I_B = 47,08 \mu A$ - $I_C = 2,35 mA$ - $V_{CE} = 6,83 V$ - $V_B = 0,7 V$ - $V_C = 6,83 V$

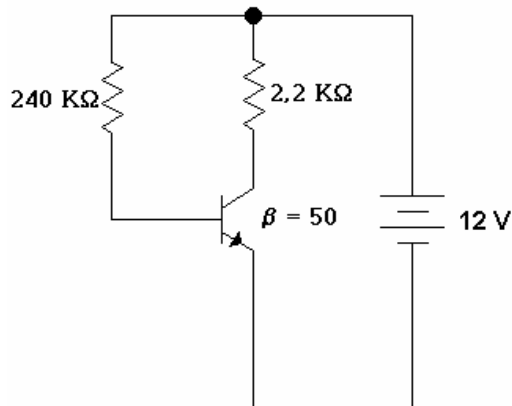


Figura 1

Para o circuito da figura 2, determinar: I_B , I_C , I_E , V_{CE} , V_B , V_C e V_E .

Resp.: $I_B = 40,1 \mu A$ - $I_C = I_E = 2,01 mA$ - $V_{CE} = 13,97 V$ - $V_B = 2,71 V$ - $V_C = 15,98 V$ - $V_E = 2,01 V$

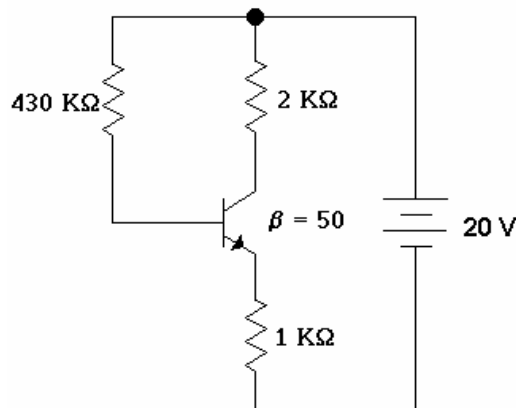


Figura 2

Determinar o ponto Quiescente (Q) e a reta de carga para a configuração da figura 3.

Resp.: $V_{CEQ} = 12,22 V$ - $I_{CQ} = 0,85 mA$ - $I_{Csat} = 1,91 mA$ - $V_{CEcorte} = 22 V$

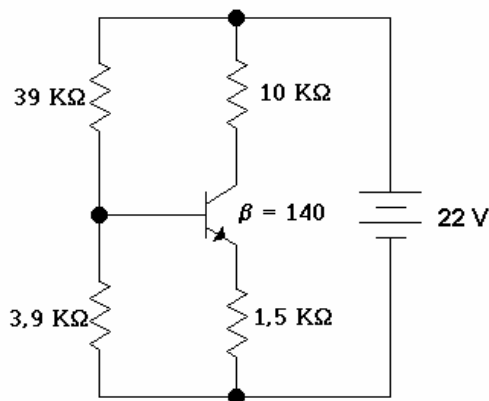


Figura 3

Determinar V_C e V_B para o circuito da figura 4.

Resp.: $V_C = -4,48 \text{ V}$ – $V_B = -8,3 \text{ V}$

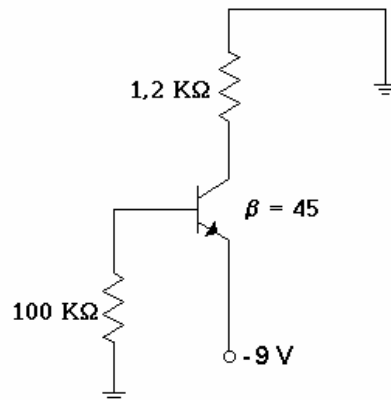


Figura 4

Determinar V_C e V_B para o circuito da figura 5.

Resp.: $V_C = 8,53 \text{ V}$ – $V_B = -11,59 \text{ V}$

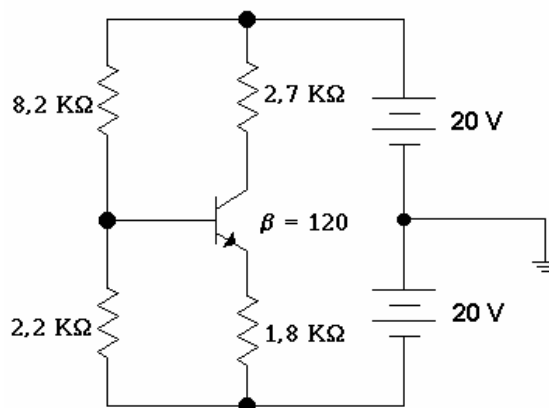


Figura 5

Para o circuito da figura 6, determinar: I_C , R_C , R_B e V_{CE} .

Resp.: $I_C = 3,2 \text{ mA}$ – $R_C = 1,87 \text{ k}\Omega$ – $R_B = 282,5 \text{ k}\Omega$ – $V_{CE} = 6 \text{ V}$

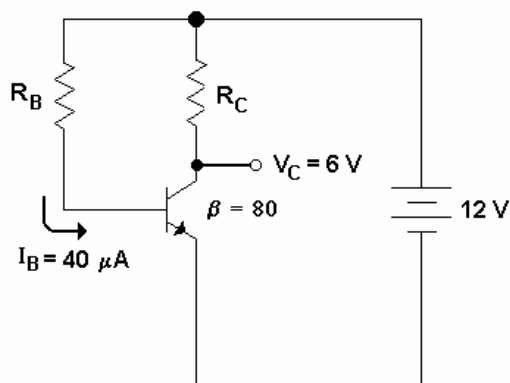


Figura 6

Para o circuito da figura 7, determinar: I_C , V_{CC} , β e R_B .

Resp.: $I_C = 3,98 \text{ mA}$ - $V_{CC} = 15,96 \text{ V}$ - $\beta = 199$ - $R_B = 763 \text{ k}\Omega$

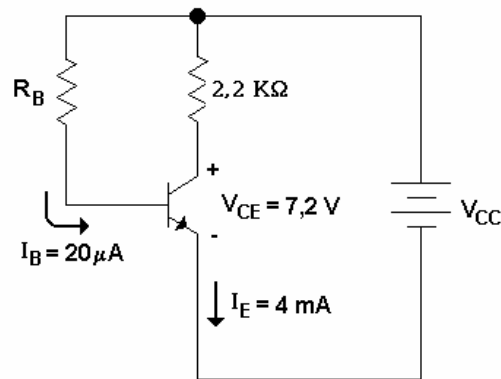


Figura 7

Para o circuito da figura 8, determinar: I_{BQ} , I_{CQ} , V_{CEQ} , V_C , V_B e V_E .

Resp.: $I_{BQ} = 29,24 \mu\text{A}$ - $I_{CQ} = 2,92 \text{ mA}$ - $V_{CEQ} = 8,59 \text{ V}$ - $V_C = 12,99 \text{ V}$ - $V_B = 5,08 \text{ V}$ - $V_E = 4,38 \text{ V}$

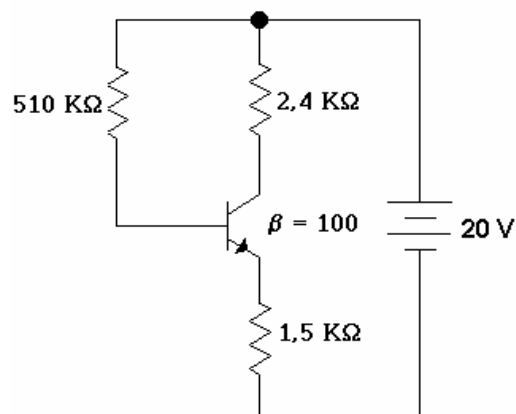


Figura 8

Para o circuito da figura 9, determinar: R_C , R_E , R_B , V_{CE} e V_B .

Resp.: $R_C = 4,7 \text{ k}\Omega$ - $R_E = 1,2 \text{ k}\Omega$ - $R_B = 356 \text{ k}\Omega$ - $V_{CE} = 0,2 \text{ V}$ - $V_B = 3,1 \text{ V}$

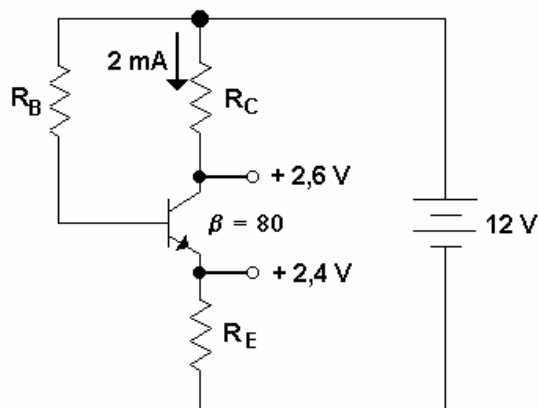


Figura 9

Para o circuito da figura 10, determinar: I_{BQ} , I_{CQ} , V_{CEQ} , V_C , V_B e V_E .

Resp.: $I_{BQ} = 24,78 \mu A$ - $I_{CQ} = 1,98 mA$ - $V_{CEQ} = 6,9 V$ - $V_C = 8,28 V$ - $V_B = 2,05 V$ - $V_E = 1,35 V$

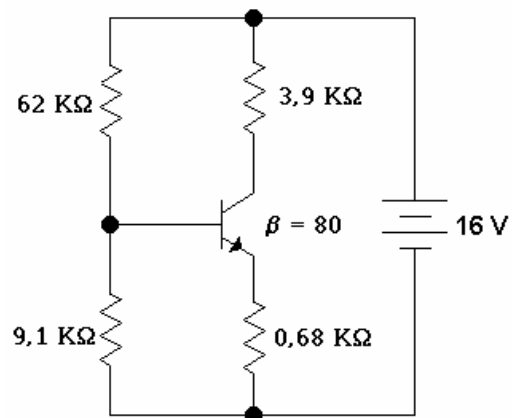


Figura 10