

MANUAL DO ALUNO

DISCIPLINA ELETRICIDADE E ELETRÓNICA

Módulos 5 e 6

República Democrática de Timor-Leste
Ministério da Educação



FICHA TÉCNICA

TÍTULO

MANUAL DO ALUNO - DISCIPLINA DE ELETRICIDADE E ELETRÓNICA
Módulos 5 a 6

AUTOR

JORGE FLÁVIO

COLABORAÇÃO DAS EQUIPAS TÉCNICAS TIMORENSES DA DISCIPLINA
XXXXXXX

COLABORAÇÃO TÉCNICA NA REVISÃO
XXXXXXXXXX

DESIGN E PAGINAÇÃO
UNDESIGN - JOAO PAULO VILHENA
EVOLUA.PT

IMPRESSÃO E ACABAMENTO
XXXXXX

ISBN
XXX - XXX - X - XXXXX - X

TIRAGEM
XXXXXXX EXEMPLARES

COORDENAÇÃO GERAL DO PROJETO
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO DE TIMOR-LESTE
2014



Índice

Semicondutores	7
Apresentação.....	8
Introdução	8
Objetivos de aprendizagem	8
Âmbito de conteúdos	9
Semicondutores	10
Introdução	10
Introdução histórica do aparecimento dos semicondutores	10
Materiais semicondutores	11
O átomo de silício	13
O átomo de Germânio	13
Semicondutores do tipo P e N.....	17
Junção PN como Díodo Semicondutor	19
Curva Caraterística do Díodo	21
Polarização do díodo	22
Polarização direta	22
Polarização Inversa	23
Circuitos equivalentes do díodo.....	24
Circuitos Retificadores	26
Tensão Senoidal.....	26
Transformador	27
Valor eficaz	28
Circuito Retificador de Meia-Onda	28
Especificações do díodo.....	30
Circuito Retificador de Onda Completa	32
Especificações do díodo.....	34
Comparação entre as frequências dos circuitos retificadores	35
Circuitos Retificadores com Filtro.....	37
Circuito Retificador de Meia-Onda com Filtro Capacitivo.....	37
Especificações do díodo.....	38

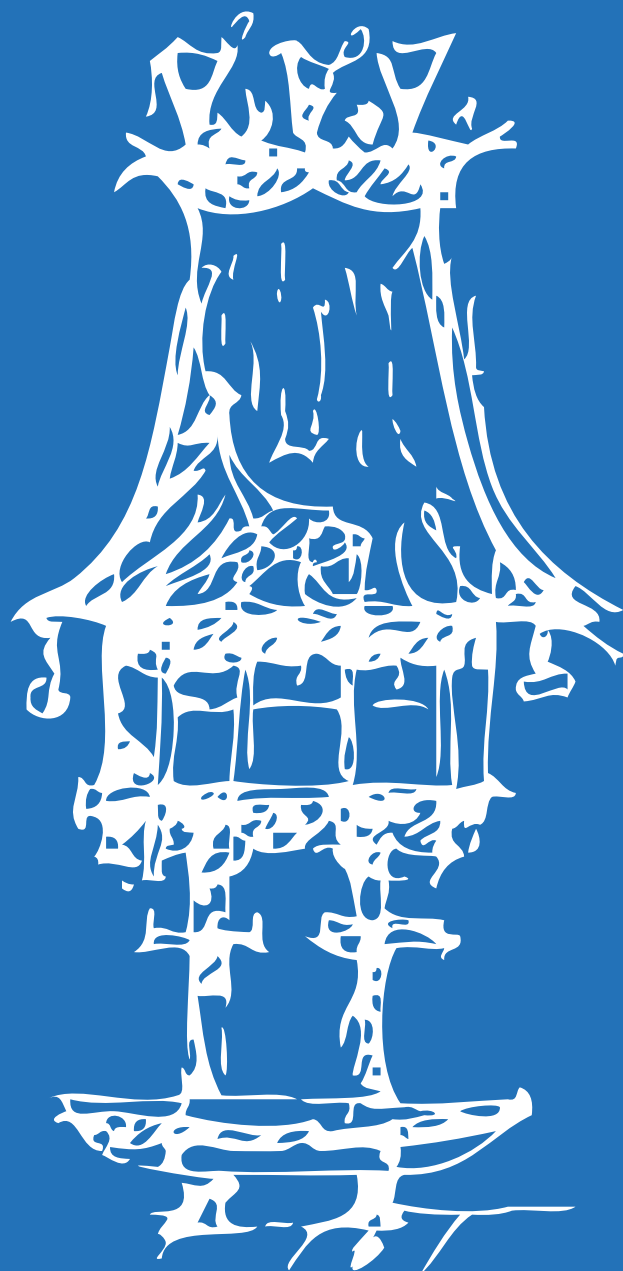


Circuito Retificador de Onda Completa com Derivação Central e Filtro	40
Capacitivo	40
Especificações do díodo.....	41
Circuitos Limitadores	43
Análise do circuito limitador positivo	43
Análise do Circuito limitador positivo polarizado	44
Outros circuitos limitadores	44
Díodo de Zener	48
Corrente máxima do díodo zener	50
Corrente mínima do zener.....	50
Limitador de tensão com zener	50
Díodo Emissor De Luz (LED)	53
Circuito básico	54
Trabalhos Práticos Propostos	59
Bibliografia	66
Transístor Bipolar	69
Apresentação.....	70
Introdução	70
Objetivos de aprendizagem	70
Âmbito de conteúdos	71
Transístores Bipolares.....	72
Introdução	72
Construção do transístor	74
Operação do Transístor.....	75
Configurações do Transístor.....	78
Configuração Base-Comum (BC).....	78
Alfa (α)	83
Polarização.....	84
Configuração Emissor-Comum (EC)	85
Beta (β)	89
Polarização.....	96
Configuração Coletor-Comum (CC).....	96



Limites de Operação	99
Curvas Características do Transistor.....	102
Zona de Corte	104
Zona de Saturação	105
Zona Ativa	105
Reta de Carga	106
Polarização do Transistor	110
Polarização Fixa	110
Polarização Direta da Juncão Base-Emissor	112
Malha Coletor-Emissor	113
Polarização por Divisor de Tensão	115
Análise Exata.....	117
Análise Aproximada	120
Polarização por Realimentação da Base	122
Malha Base-Emissor	123
Malha Coletor-Emissor	125
Influência da temperatura na polarização	127
Transistor como Amplificador	128
Exercícios Resolvidos	129
Trabalhos Práticos Propostos	134
Ficha de trabalho	136
Bibliografia	141







Semicondutores

Módulo 5

Apresentação

Este módulo tem carácter teórico-prático, por isso deverá decorrer em parte em ambiente laboratorial de forma a permitir aos alunos verificarem e comprovarem as características, o funcionamento e aplicações dos diversos tipos de semicondutores.

Esta disciplina tem como intenção tornar o aluno apto a compreender a linguagem e as técnicas utilizadas, possibilitando assim um melhor aproveitamento na sequência dos estudos desta e das outras disciplinas técnicas e também na comunicação adequada com os profissionais da área.

Introdução

A abordagem deste módulo de Semicondutores leva-nos a uma melhor compreensão dos vários tipos de aparelhos, que incorporam circuitos que utilizam estas características, existentes no mercado assim como a melhor escolha deste tipo de equipamentos para que se ajuste às crescentes evoluções disponíveis pelas diversas marcas.

Este módulo requer um conhecimento básico de matemática, física e análise de circuitos eletrónicos básicos.

Objetivos de aprendizagem

- Descrever as características dos semicondutores.
- Distinguir semicondutores tipo P e tipo N.
- Explicar as características da junção “PN”.
- Efetuar cálculo para a polarização de díodos.
- Realizar montagens com díodos e proceder à análise dos circuitos.
- Descrever as aplicações dos semicondutores atendendo às suas principais características.
- Explicar os tipos de circuitos usados na retificação e as suas características.
- Dimensionar uma fonte de alimentação de corrente contínua simples.
- Conhecer os díodos Zener quanto à sua constituição, características e aplicações.
- Conhecer os díodos para aplicações especiais quanto às suas características e aplicações.



Âmbito de conteúdos

- Materiais semicondutores.
- Condução no silício e germânio.
- Semicondutores do tipo P e do tipo N.
- Díodos semicondutores.
- Junção PN.
- Polarização direta e inversa.
- Circuito equivalente de um díodo.
- Retificação de meia onda e onda completa.
- Filtragem.
- Dimensionamento de uma fonte de alimentação C.C. com filtragem por condensador.
- Circuitos multiplicadores e limitadores de tensão.
- Díodos de Zener.
- Díodos para aplicações especiais.



Semicondutores

Introdução

Este módulo estuda o processo da condução em materiais e junções semicondutoras.

Começa por fazer um estudo dos materiais semicondutores, do processo de condução no germânio e no silício e dos materiais dopados de tipo n e de tipo p. E então introduzida a junção PN e respetivos processos de polarização.

Após esta introdução é apresentada a retificação e a filtragem, como uma forma de transformação ca/cc.

São também estudados neste módulo outros tipos de díodos semicondutores para aplicações específicas. O díodo zener é apresentado como componentes base e essencial para fazer a estabilização de tensões contínuas.

Dispositivos optoelectrónicos os semicondutores com uma junção são também estudados, nomeadamente os LEDs (díodos emissores de luz) e os foto díodos.

Em suma, neste capítulo é feito um estudo dos dispositivos semicondutores de uma junção mais importantes.

Introdução histórica do aparecimento dos semicondutores

A partir dos três componentes básicos (resistências, capacidades e indutâncias) surge a necessidade de novos dispositivos para o controlo da corrente elétrica, e assim se descobrem as propriedades dos semicondutores em meados do século XIX (1833 e 1839, por Faraday e Becquerel), não existindo utilização prática até ao século XX, depois da Segunda Guerra Mundial (1948, nos laboratórios da Bell Telephone).

Em princípio, estes elementos adquirem uma série de vantagens em relação a seus precursores (válvulas ou tubos a vácuo) no tratamento de sinais: espaços menores, maior resistência mecânica e maior tempo de funcionamento. Ao mesmo tempo, apresentam os inconvenientes de serem mais sensíveis às variações de temperatura e não conseguem potências muito elevadas. Por contíguas investigações, os semicondutores têm vindo a ampliar o seu campo de aplicação em relação às válvulas, até ao ponto em que, na eletrónica atual, tomaram-se imprescindíveis e substituem as válvulas quase por completo.



Materiais semicondutores

Um dos triunfos das teorias cinéticas e atômicas é a sua capacidade de dar conta de quase todas as propriedades físicas da matéria, explicando, por exemplo, por que alguns materiais são bons condutores de calor, enquanto outros não o são. Existe uma classe intermediária de substâncias, chamadas semicondutores, que possuem um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e um condutor. Desta forma, são melhores condutores do que os isolantes de eletricidade, mas não tão bons condutores como o cobre. Tais materiais mostram-se extremamente úteis para a eletrônica.

Em comparação com os metais e com os isolantes, as propriedades elétricas dos semicondutores são afetadas por variação de temperatura, exposição à luz e acréscimos de impurezas.

Um semicondutor puro como o elemento silício apresenta uma condutividade elétrica bastante limitada, porém se pequenas quantidades de impurezas forem incorporadas à sua estrutura cristalina, as suas propriedades elétricas alteram-se significativamente. O material pode passar, por exemplo, a conduzir eletricidade num único sentido, da forma como age um diodo.

A adição de uma outra impureza confere-lhe a propriedade de conduzir eletricidade apenas no outro sentido.

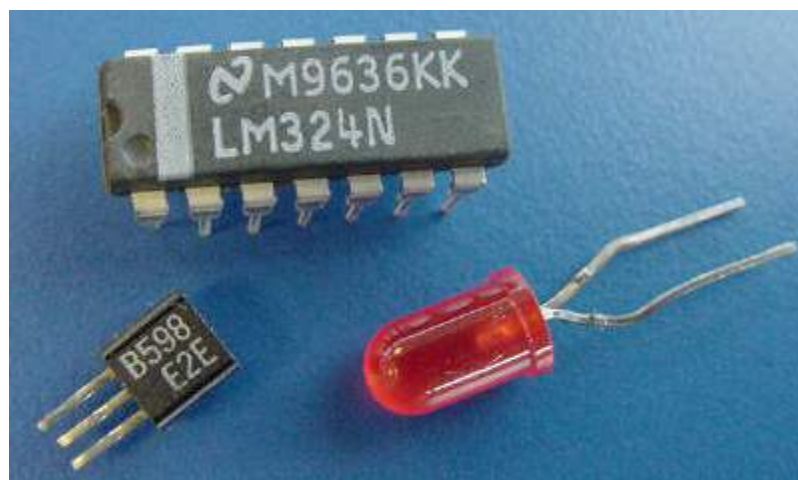


Fig. 1: Exemplo de Semicondutores



Para um melhor entendimento sobre os materiais semicondutores, vamos fazer uma revisão sobre a estrutura atômica.

Um átomo é formado por elétrons que giram em redor de um núcleo composto por prótons e neutrões. Os elétrons giram em órbitas ou níveis bem-definidos, conhecidos com K, L, M, N, O, P e Q, que representa o modelo atômico de Bohr, como mostra a Figura 2.

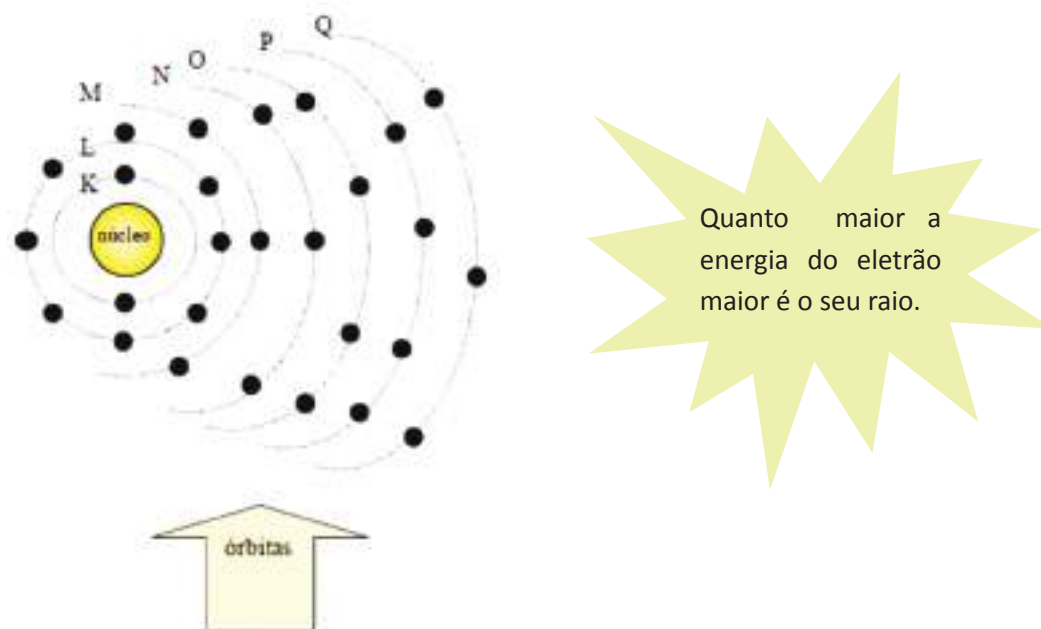


Fig. 2: Estrutura do átomo

A última órbita de um átomo define a sua valência, ou seja, a quantidade de elétrons desta órbita que se pode libertar do átomo através da adição de energia externa (calor, luz ou outro tipo de radiação) ou se ligar a outro átomo através de ligações covalentes (partilha de elétrons da camada de valência com os elétrons da camada de valência de outro átomo).

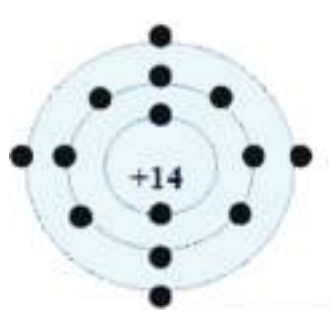
Os materiais semicondutores apresentam 4 elétrons na sua camada de valência (tetravalentes). Não sendo classificados como bons isolantes, nem como bons condutores.

Os semicondutores mais utilizados são o silício e o germânio.



O átomo de silício

O átomo de silício contém 14 prótons e 14 elétrons distribuídos como indicado na Figura 3.



1ª Órbita - 2 Elétrons

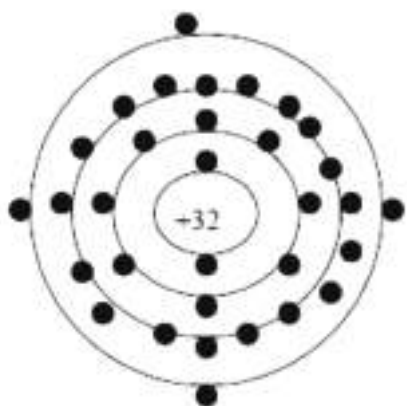
2ª Órbita - 8 Elétrons

3ª Órbita - 4 Elétrons

Fig. 3: Átomo de Silício

O átomo de Germânio

O átomo de germânio contém 32 prótons e 32 elétrons assim distribuídos:



1ª Órbita - 2 Elétrons

2ª Órbita - 8 Elétrons

3ª Órbita - 18 Elétrons

4ª Órbita - 4 Elétrons

Fig. 4: Átomo de Germânio

Devido aos átomos de silício e de germânio serem tetravalentes, ou seja, possuir quatro elétrons na última camada, para conseguir a configuração de gás nobre necessitam de mais 4 elétrons para a sua estabilidade.

Quando se tem vários átomos de silício, cada átomo partilha 4 elétrons com os seus átomos vizinhos através da ligação covalente formando uma estrutura molecular forte.



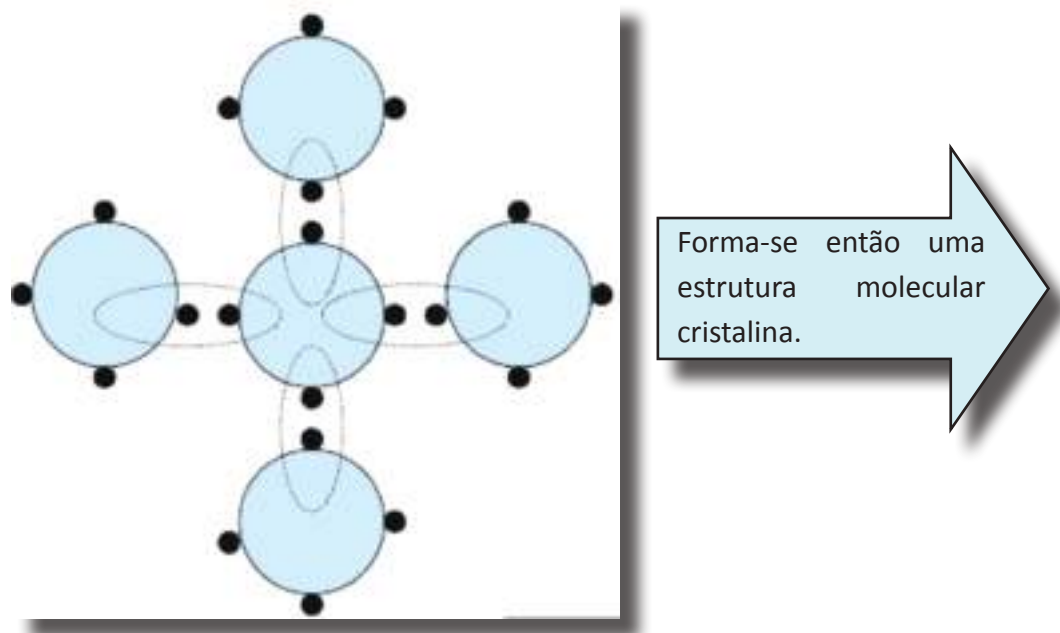


Fig. 5: Ligação dos átomos de silício

Uma estrutura cristalina é caracterizada quando os átomos ficam bem organizados, ou seja, numa forma bem definida. Se a forma fosse desorganizada seria chamada estrutura amorfa.

Quando o cristal de silício é colocado numa temperatura superior ao zero absoluto (273°C), alguns eletrões da camada de valência tornam-se eletrões livres, ou seja, passam para a camada de condução, sendo capazes de se movimentar pelo material. São estes eletrões livres que, sob a ação de um campo elétrico, formam a corrente elétrica.

O eletrão ao tornar-se livre deixa no lugar um buraco (lacuna). Na temperatura ambiente um cristal puro, ou seja, formado apenas por um tipo de átomo, ocorre a formação de eletrões livres e lacunas, porém a quantidade de eletrões livres é igual ao número de lacunas, por isso, a neutralidade deste cristal mantém-se. (O número de cargas positivas é igual ao número de cargas negativas).

Num cristal formado por germânio na temperatura ambiente a quantidade de eletrões livres e lacunas são maiores do que no cristal de silício.

Vale salientar que a formação de eletrões livres é chamada de geração, e quando se tem um cristal puro, ele é chamado de semicondutor intrínseco.

Num semicondutor intrínseco, como existem eletrões livres e lacunas formadas pela energia térmica, os eletrões livres se movem aleatoriamente através do cristal, que ocasionalmente ocupa uma lacuna (sendo atraído pela lacuna). Quando isto ocorre



temos o que é chamado de recombinação. A recombinação é o fenômeno que ocorre quando elétrons livres ocupam a lacuna, neste caso, o desaparecimento da carga negativa é acompanhado pelo desaparecimento da carga positiva. A neutralidade do cristal, deste modo é mantida.

O tempo entre a geração e a recombinação é chamado de tempo de vida.

Num semiconductor com o aumento da temperatura temos uma diminuição da sua resistividade, dizemos que estes materiais possuem coeficiente negativo de temperatura, ou seja, qualquer aumento de temperatura corresponde a uma diminuição da sua resistência.

Sendo, portanto, diferente do comportamento elétrico dos metais comuns, uma vez que com o aumento da temperatura a corrente terá maior dificuldade de passar, já que o número de elétrons livres é bastante elevado e qualquer aumento da temperatura não causará a libertação de muitos elétrons a mais, mas contribuirá de modo acentuado para um aumento da agitação térmica dos átomos.

Nos metais com o aumento da temperatura a resistência aumenta. Os metais têm, portanto, coeficiente positivo de temperatura.

Exercício:

1. Complete

- a. Os semicondutores mais utilizados e mais comuns são o _____ e o _____.
- b. O átomo de silício contém _____ elétrons. Com _____ elétrons na camada de valência.
- c. O átomo de germânio contém _____ elétrons. Com _____ elétrons na camada de valência.
- d. Os átomos de silício e de germânio por serem _____, precisam de mais _____ elétrons para conseguir a configuração de gás nobre.
- e. Cada átomo partilha _____ elétrons com seus átomos vizinhos através da ligação _____.
- f. Na temperatura ambiente, alguns elétrons da camada de valência tornam-se _____.
- g. A formação de elétrons livres é chamada _____.



- h. A ocupação de um eletrão livre na lacuna é chamada _____.
- i. O tempo entre a geração e recombinação é chamado _____.



Semicondutores do tipo P e N

Num semicondutor podem-se acrescentar impurezas para se obter excesso de elétrons livres ou excesso de lacunas.

O silício e o germânio são tetravalentes, isto é possuem 4 elétrons na camada de valência. Quando substâncias pentavalentes (possuem 5 elétrons na camada de valência), são adicionadas ao cristal puro, a configuração de gás nobre não é obtida, como se observa na Figura 6.

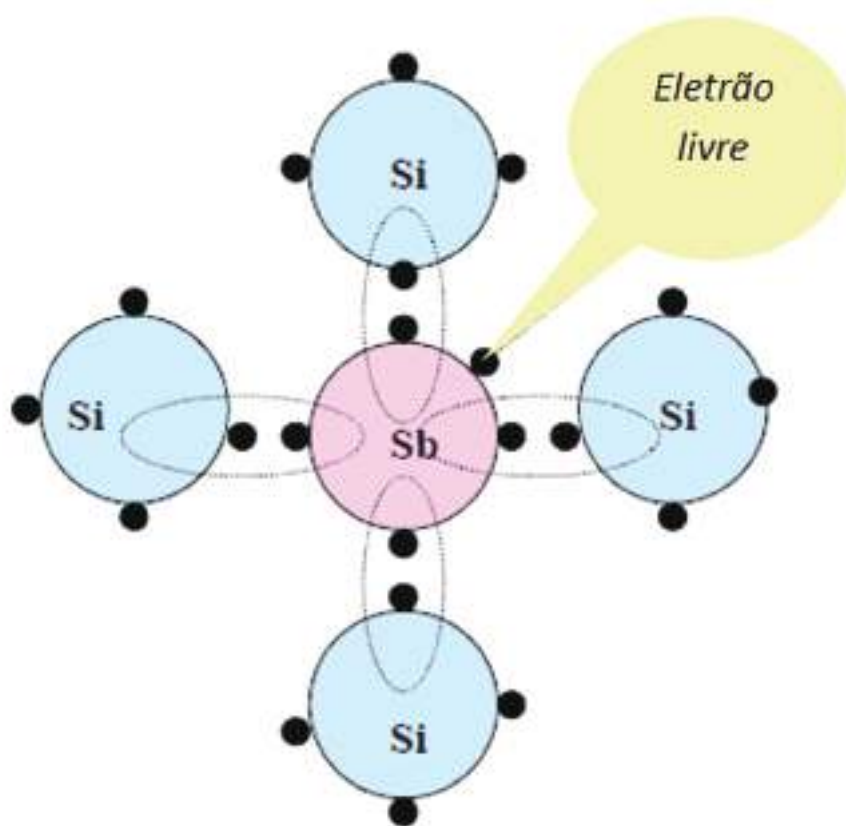


Fig. 6: Estrutura de Silício dopada com Antimônio (Sb)

A cada átomo pentavalente que é adicionado, sobra um elétron, pois apenas 4 elétrons se ligam ao átomo de silício, pois o silício possui 4 elétrons e só precisa de mais 4 elétrons para conseguir a configuração de gás nobre.

Nesse semicondutor temos o chamado material tipo N, pois em toda a sua estrutura, a quantidade de elétrons livres é superior à quantidade de lacunas, como indica a Figura 7.



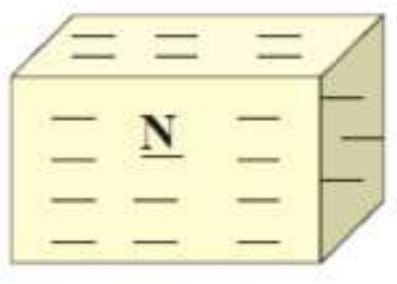


Fig. 7: Material tipo N

Como a quantidade de elétrons livres é maior do que a quantidade de lacunas, os elétrons livres são chamados portadores majoritários e as lacunas portadoras minoritárias.

Se, no entanto, acrescentarmos impurezas trivalentes, para que ocorra a estabilidade, irá faltar um elétron, ou seja, sobra uma lacuna, como mostra a Figura 8. Temos a formação de um material tipo P, onde as lacunas são os portadores majoritários e os elétrons livres portadores minoritários.

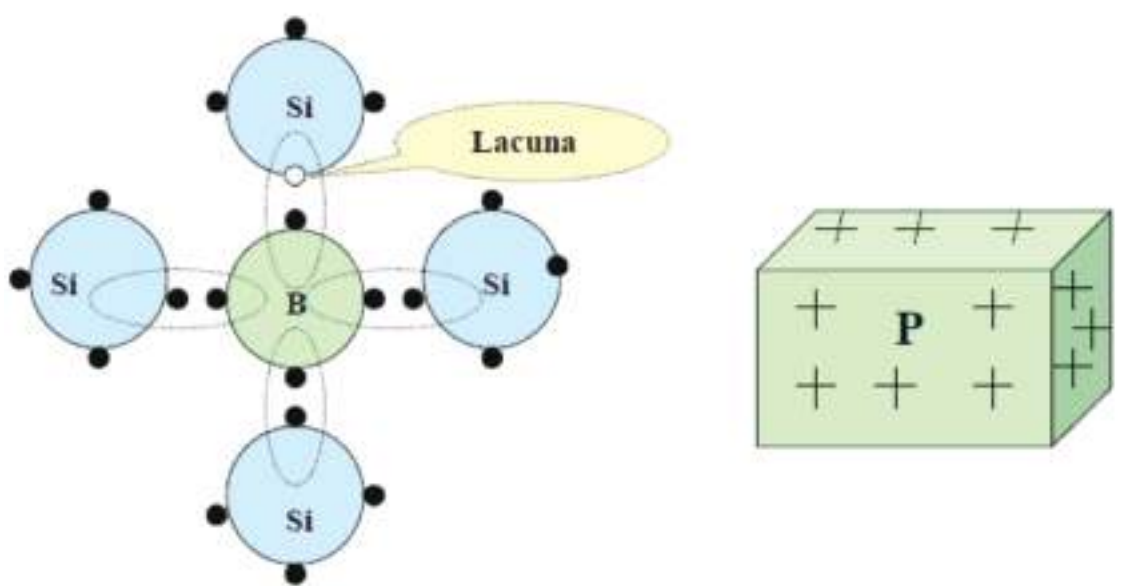


Fig. 8: (a) Estrutura de Silício dopada com Boro (B);
(b) Material tipo P correspondente



Junção PN como Díodo Semicondutor

Ao unir um semicondutor tipo P com um semicondutor tipo N, temos a formação do componente eletrônico chamado díodo, como mostra a Figura 9. Componente este que será de grande importância para a construção de fontes de alimentação e muitas outras aplicações posteriormente discutidas.

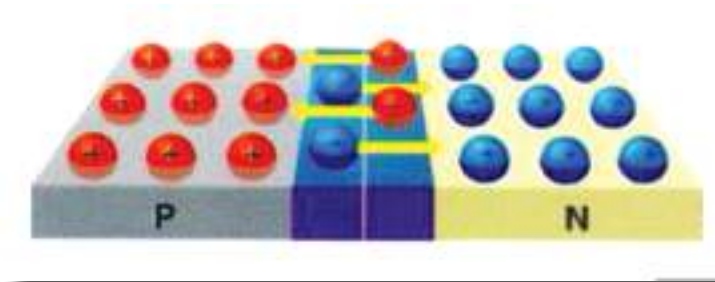


Fig. 9: Díodo formado pela junção dos materiais tipo P e tipo N

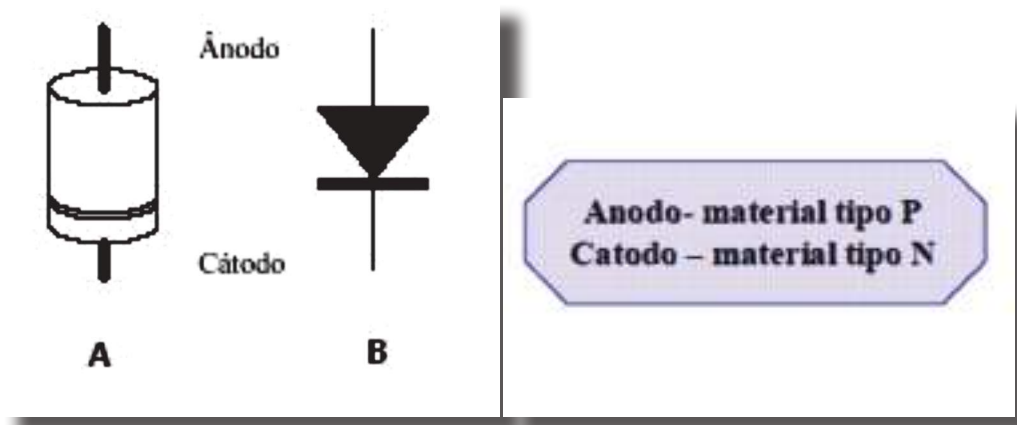
Na junção PN os elétrons livres do material tipo N são atraídos pelas lacunas do material tipo P. Então alguns elétrons passam do material tipo N para o material tipo P, os átomos que perdem o elétron ficam ionizados positivamente (catiões) e os que recebem ficam ionizados negativamente (aniões). Na junção cria-se um campo elétrico impedindo que outros elétrons passem do material tipo N para o material tipo P.

Observe que no material tipo N, embora tenham elétrons livres em excesso quem perdem elétrons são os átomos, e como no átomo o número de lacunas ficará maior que o número de elétrons, ficará ionizado positivamente.

Na junção PN, temos o que é chamado de camada de depleção, ou seja, a camada de depleção é definida como a junção PN onde se encontra os catiões e aniões. Devido à camada de depleção, ocorre a barreira de potencial, diferença de potencial na junção. A barreira de potencial na temperatura de 25°C é de aproximadamente 0,7V para os díodos de silício e 0,3V para os díodos de germânio.



Simbologia do díodo é mostrada na Figura 10.



Curva Característica do Díodo

Pela Figura 11 há uma representação das curvas características entre o díodo real de silício e germânio.

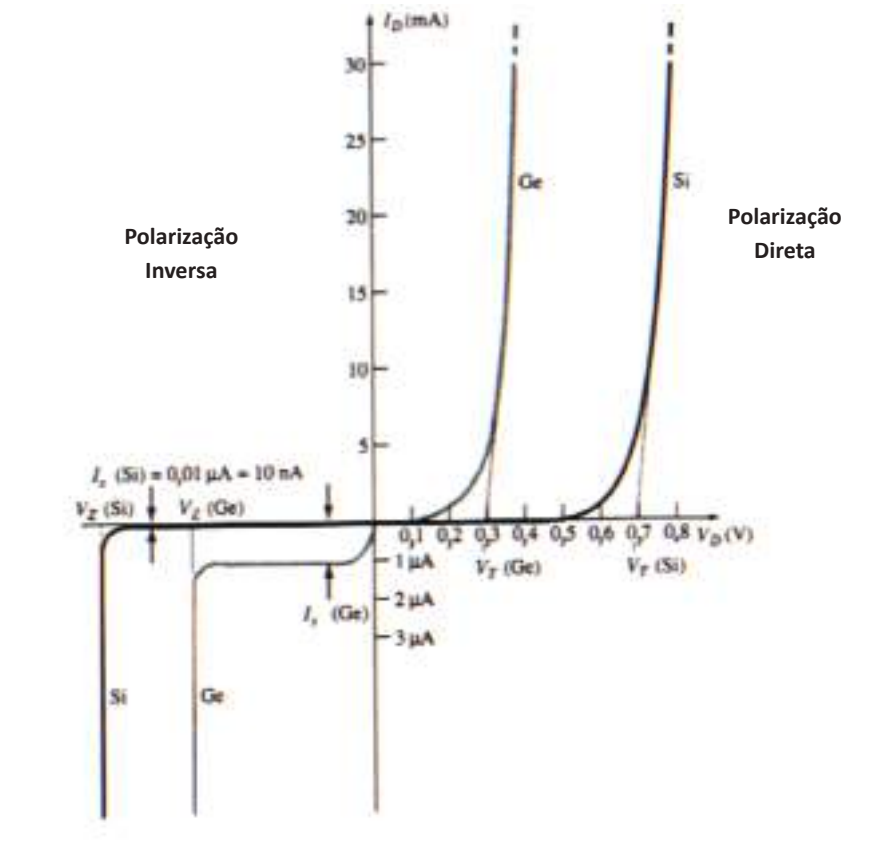


Fig. 11: Curva característica do Díodo de silício e germânio

Pela figura, nota-se que para o díodo 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 inversa. Esta parcela é na ordem de *nano Ampère*. 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 inversa que poderá danificar tanto o díodo, bem como o circuito associado.



Polarização do díodo

Para o seu funcionamento, o díodo precisa ser polarizado. De maneira diferente do que ocorre com uma resistência, na operação do díodo é essencial saber a polaridade da fonte de tensão.

Polarização direta

Na polarização direta, o potencial positivo da fonte é ligado ao ânodo (material tipo P) e o potencial negativo da fonte ligado ao cátodo (material tipo N), como mostra a Figura 12.

O potencial negativo repele os eletrões do material tipo N, onde se a tensão da fonte de alimentação for maior do que a barreira de potencial os eletrões atravessam a junção PN, passa pelo material tipo P e é atraído pelo potencial positivo da fonte.

Ao polarizar diretamente um díodo ideal ele comporta-se como uma chave fechada, isto é, irá circular uma corrente elétrica pelo dispositivo.

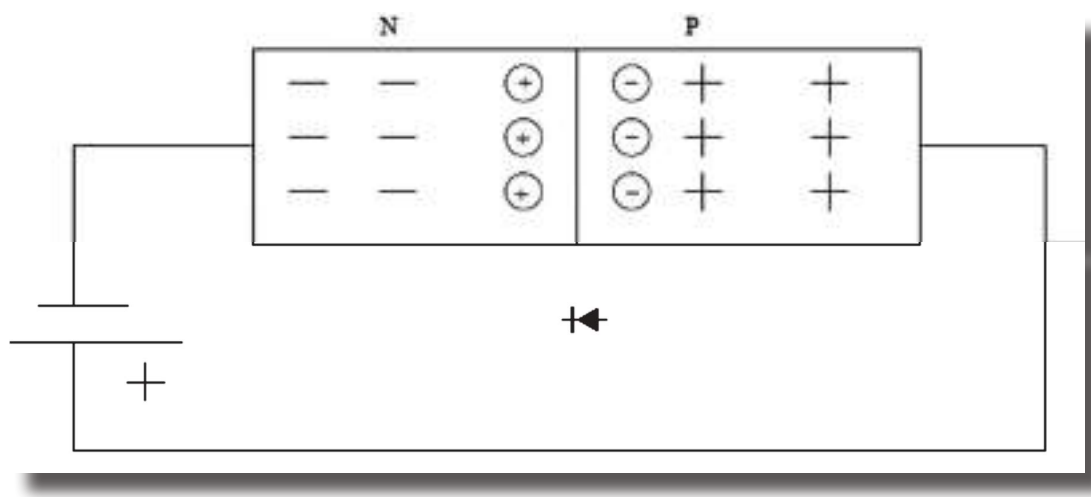


Fig. 12: Díodo polarizado diretamente



Polarização Inversa

Na polarização inversa o potencial positivo da fonte é ligado ao cátodo (material tipo N) e o potencial negativo da fonte é ligado ao ânodo (material tipo P), como mostra a Figura 13. Na polarização inversa um díodo ideal comporta-se como uma chave aberta. No entanto, na prática, temos duas pequenas correntes que circulam no díodo. A corrente de saturação e a corrente de fuga de superfície.

A corrente de saturação existe devido à energia térmica uma vez que são gerados pares de elétrons livres e lacunas. Os portadores minoritários podem dentro da camada depleção, atravessar a junção ocasionando uma pequena corrente.

A corrente de fuga de superfície ocorre na camada mais externa do díodo. Os átomos na superfície não possuem vizinhos para fazer a ligação covalente, esta quebra forma na superfície lacunas comportando-se como um material tipo P. Por isso, os elétrons podem entrar no material N atravessar toda a superfície do díodo passando pelo material tipo P e indo para a polaridade positiva da fonte.

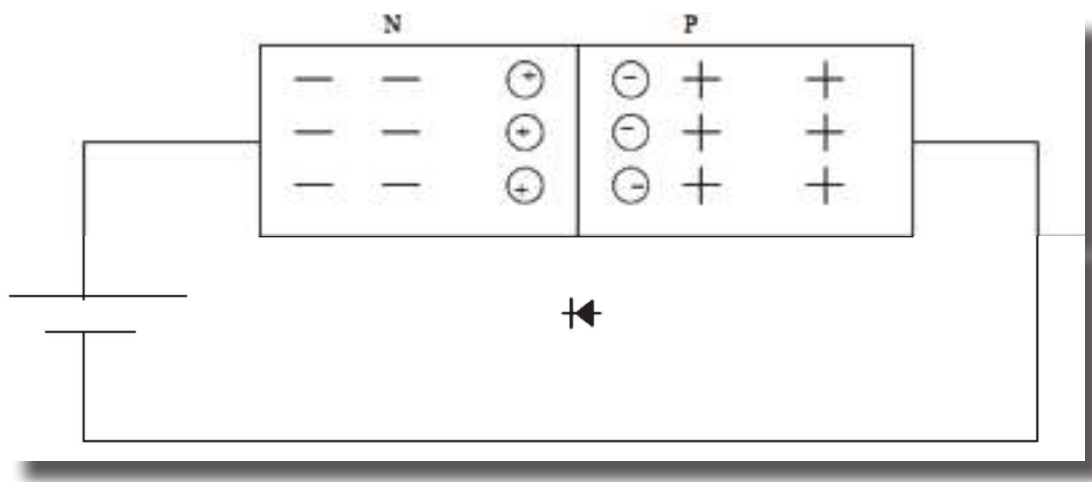


Fig. 13: Díodo polarizado inversamente



Circuitos equivalentes do díodo

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

Em série é acrescentado uma resistência r_{av} , que dá o comportamento de inclinação da curva e mais o díodo ideal que corresponde à condução num só sentido.

Este tipo de modelo linear é ilustrado na Figura 14.



Fig. 14: Modelo Linear

Quando se pensa num circuito como um todo, ou seja, o díodo e o restante total de um circuito, pode-se desprezar a resistência r_{av} Figura 15.



Fig. 15: Modelo Simplificado



Esta situação é possível porque esta 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 16. Note-se que quando a tensão aplicada for maior que zero, haverá condução de corrente elétrica.

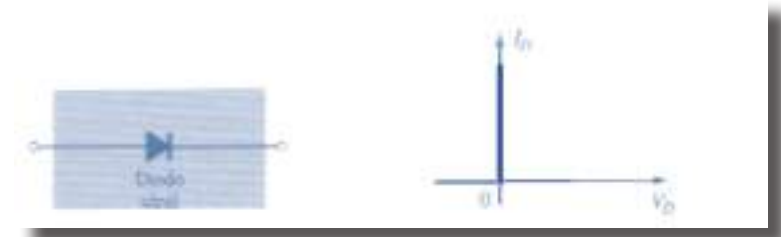


Fig. 16: Modelo Ideal



Circuitos Retificadores

Tensão Senoidal

Uma tensão senoidal pode ser representada graficamente de duas formas: nos domínios temporal e angular como mostram as Figuras 17 e 18, respetivamente.

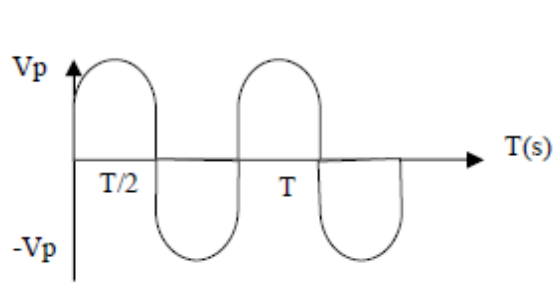


Fig. 17: Domínio temporal

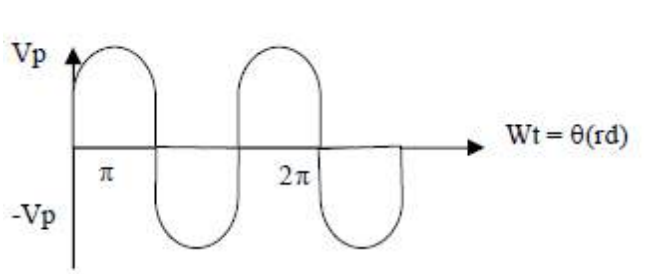


Fig. 18: Domínio Angular

Onde:

V_p – tensão de pico (amplitude máxima positiva ou negativa, que a tensão senoidal pode atingir).

V_{pp} – Tensão de pico a pico (amplitude total, entre os valores máximos positivo e negativo).

Matematicamente, os gráficos da tensão senoidal nos domínios temporal e angular podem ser representados, respetivamente, por:

$$V(T) = V_p \cdot \text{sen } \omega t \text{ e } V(\Theta) = V_p \text{ sen } \Theta$$

Onde:

$V(t) = V(\Theta)$ = valor da tensão no instante t ou para o ângulo Θ (em V).



Transformador

O transformador é um dispositivo que permite modificar a amplitude de uma tensão alternada, aumentando ou diminuindo-a. Pode-se também utilizar para isolar o circuito do lado do primário, do circuito do lado do secundário, neste caso, a amplitude não será alterada.

Um transformador consiste em duas bobinas isoladas eletricamente, montadas num mesmo núcleo de ferro (usado para concentrar as linhas de campo).

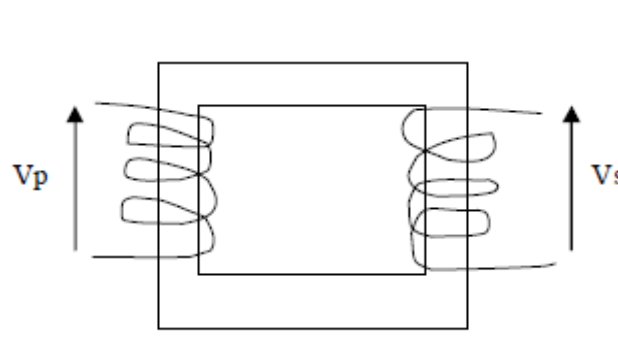


Fig. 19: Transformador

Na figura 19, observamos que a bobina no qual recebe a tensão a ser transformada (V_p) denomina-se primário, e segunda bobina, no qual foi criada a tensão induzida (V_s) denomina-se secundário.

Funcionamento:

Ele funciona a partir do fenômeno da indução mútua. Quando uma corrente alternada ou pulsante passa no enrolamento primário o fluxo magnético variável que ele cria envolve as espiras do enrolamento secundário, causando o aparecimento de uma f.e.m induzida nos terminais do secundário.

Num transformador ideal (que não possui perdas), a potência entregue ao primário (P_p) é igual à potência que o secundário (P_s) entrega à carga, ou seja:

$$P_s = P_p$$

$$P_p = V_p \cdot I_p$$

Logo:

$$V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

$$V_p/V_s = N_p/N_s \quad \text{e} \quad I_s/I_p = N_p/N_s ,$$



Onde:

N_p = Nº espiras/voltas do primário

N_s = Nº espiras/voltas do secundário

Valor eficaz

Para sinais senoidais, existe um conceito muito importante denominado valor eficaz ou rms.

O valor eficaz V_{ef} ou V_{rms} de uma tensão alternada é a tensão que equivale a uma tensão contínua, de tal forma que, ao aplicar uma tensão contínua a uma resistência faria com que ela dissipasse a mesma potência média caso fosse aplicado essa tensão alternada.

$$V_p = \sqrt{2} V_{ef}$$

Circuito Retificador de Meia-Onda

O circuito retificador de meia-onda é constituído por um transformador, um díodo e uma resistência como mostra a Figura 20.

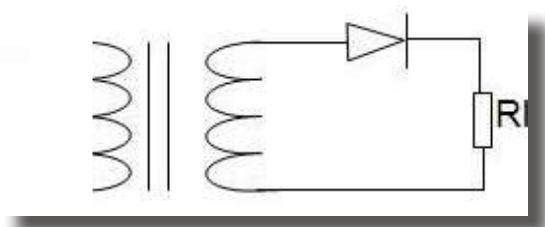


Fig. 20: Circuito retificador de meia onda

No semiciclo positivo, o díodo conduz (polarização direta) e a tensão na resistência é a mesma do secundário do transformador. Observe as Figuras 21(a) e 21 (b).



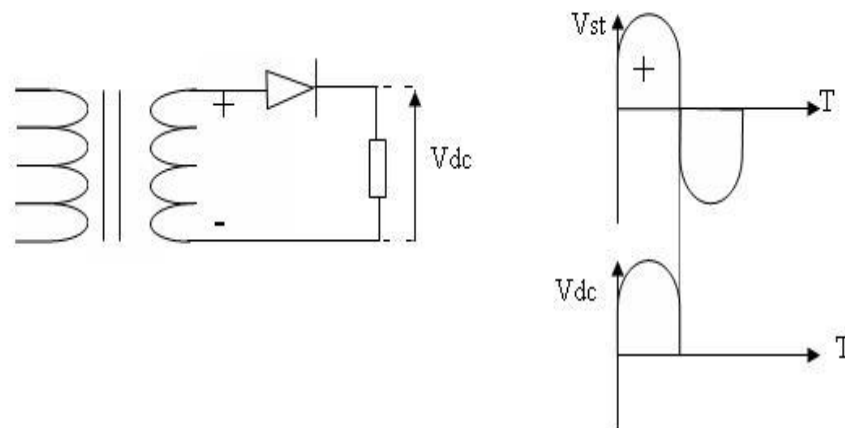


Fig. 21: (a) Circuito retificador de meia onda;
(b) Forma de onda na resistência no semiciclo positivo

No semiciclo negativo o diodo estará inversamente polarizado, portanto esta a funcionar como uma chave aberta, logo a corrente não passará na resistência e a tensão na mesma será zero, como mostra as Figura 22(a) e 22 (b).

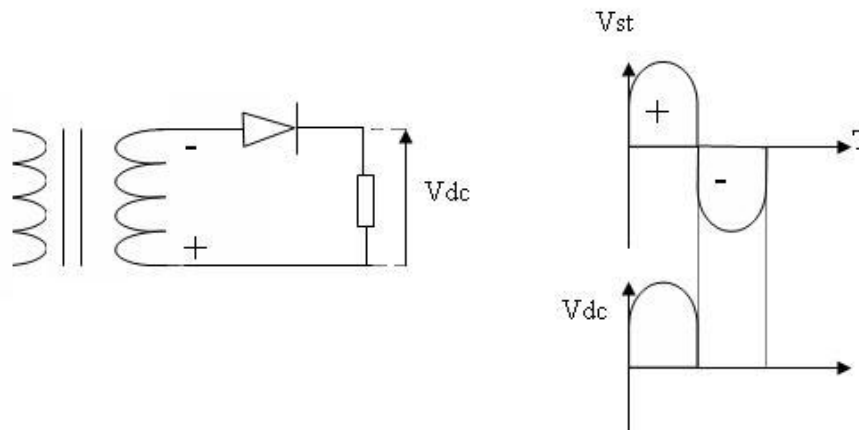


Fig. 22: (a) Circuito retificador de meia-onda, (b) Forma de onda na resistência

Observe que a onda na qual era alternada no secundário do transformador ao passar pelo diodo fica contínua, mais precisamente contínua pulsante.

A finalidade deste circuito é transformar a tensão que era alternada (primário do transformador) em contínua (sinal na resistência).

Qual valor o multímetro indicará ao ler a tensão na resistência, já que a tensão é pulsante?

O multímetro indicará o valor médio, calculado a partir da seguinte fórmula:

$$V_{dc} = \frac{V_p}{\pi}$$



Exemplo:

1. Num circuito retificador de meia-onda, a tensão no secundário do transformador é 12V.

Calcule a tensão média na resistência.

Solução:

V_{st} refere-se a tensão no secundário do transformador

$$V_{st} = 12 \text{ V}$$

$$V_p = \sqrt{2} V_{st}$$

$$V_p = \sqrt{2} \times 12 = 16,97 \text{ V}$$

Assim:

$$V_{dc} = \frac{V_p}{\pi} \leftrightarrow V_{dc} = \frac{16,97}{\pi} = V_{dc} = 5,4 \text{ V}$$

Especificações do díodo

Qual o díodo poderá ser colocado neste circuito?

O díodo deverá suportar a tensão máxima que ficará nele quando é inversamente polarizado e a corrente média quando diretamente polarizado.

Logo temos duas especificações:

PIV – Tensão de pico inversa

I_D – Quantidade de corrente que o díodo deve suportar

O díodo quando reversamente polarizado (semiciclo negativo), funcionará como uma chave aberta, com mostra a Figura 23.

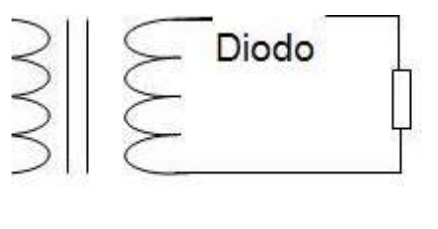


Fig. 23: Circuito Equivalente no Díodo para semiciclo negativo



$PIV = V_p$ (Tensão de pico do secundário do transformador)

Determinação do I_0

I_0 - É a corrente média, quando o diodo está diretamente polarizado, logo a corrente que passa por ele é igual a corrente que passa na resistência.

- No semiciclo positivo o diodo conduz. Tem corrente a passar no diodo e tem corrente na resistência.
- No semiciclo negativo o diodo não conduz. Não tem corrente a passando no diodo e também não tem corrente na resistência.

Logo:

$$I_0 = I_{dc}$$

A quantidade de corrente que passa no diodo é igual a quantidade de corrente que passa na resistência. Logo: $I_{dc} = V_{dc}/R$.

Exemplo:

1. Num circuito retificador de meia-onda a tensão no secundário do transformador é 9V.

Calcule as especificações do diodo, sabendo que $R = 3.9K\Omega$.

Solução:

$$V_p = \sqrt{2} V_{st}$$

$$V_p = \sqrt{2} \times 9 = 12,72 \text{ V}$$

$$V_{dc} = \frac{V_p}{\pi} \Leftrightarrow V_{dc} = \frac{12,72}{\pi} \Leftrightarrow V_{dc} = 4,05 \text{ V}$$

$$PIV = 12,72 \text{ V}$$

$$I_0 = I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} \Leftrightarrow I_0 = \frac{4,05}{3,9K} = 1,03 \text{ mA}$$



Circuito Retificador de Onda Completa

No circuito retificador de onda completa com derivação central (Figura 24), deve-se utilizar um transformador com derivação central, dois díodos e uma resistência.

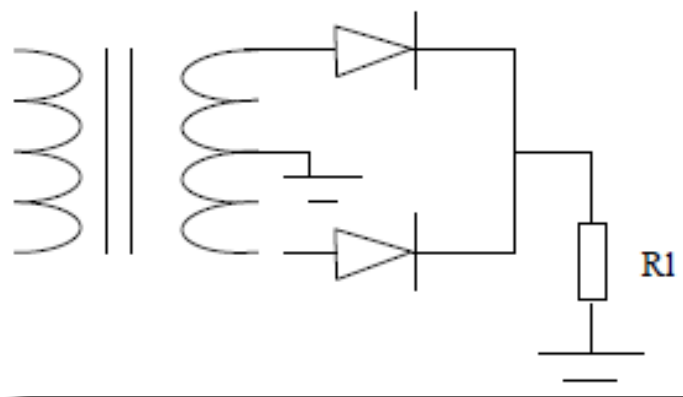


Fig. 24: Circuito retificador de onda completa com derivação central

Na montagem do circuito, utiliza-se de um transformador com derivação central, conhecido também como tomada central ou, em inglês “central – tap” (Figura 25). Nestes transformadores, o enrolamento secundário apresenta uma derivação no centro. Esta derivação fará com que a tensão fique dividida igualmente em metade para uma das extremidades.

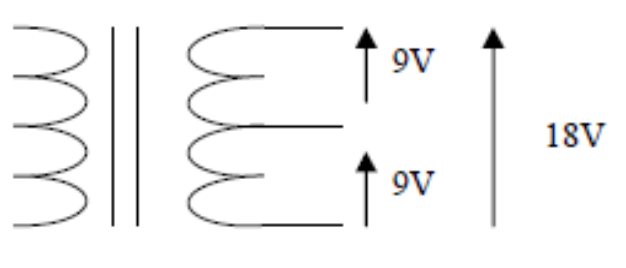


Fig. 25: Transformador com derivação central



No semiciclo positivo D1 conduz e D2 abre, como mostram as Figura 26(a) e 26(b).

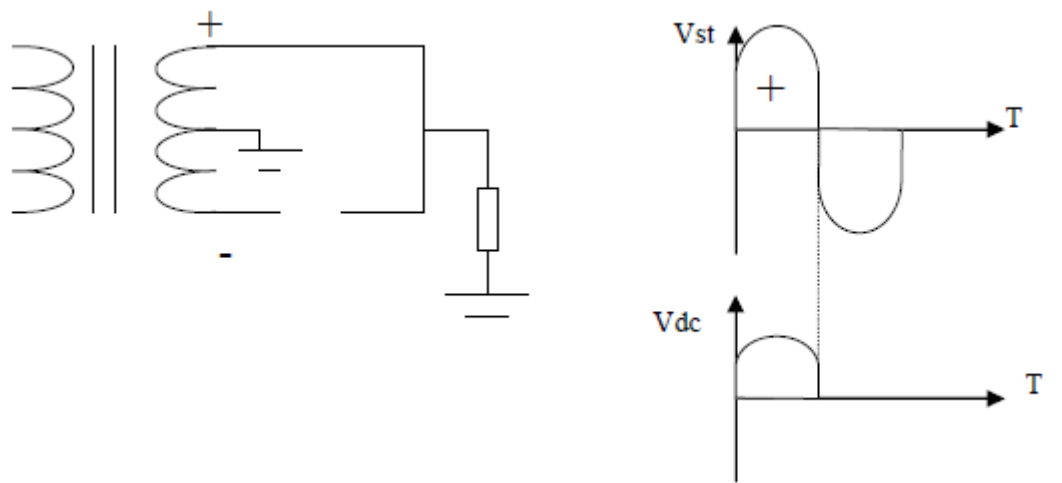


Fig. 26: (a) Circuito retificador de onda completa com derivação central, (b) Forma de onda na resistência no semiciclo positivo

A tensão na resistência será a metade da tensão total do transformador.

No semiciclo negativo D1 abre e D2 conduz, como mostra as Figuras 27(a) e 27(b).

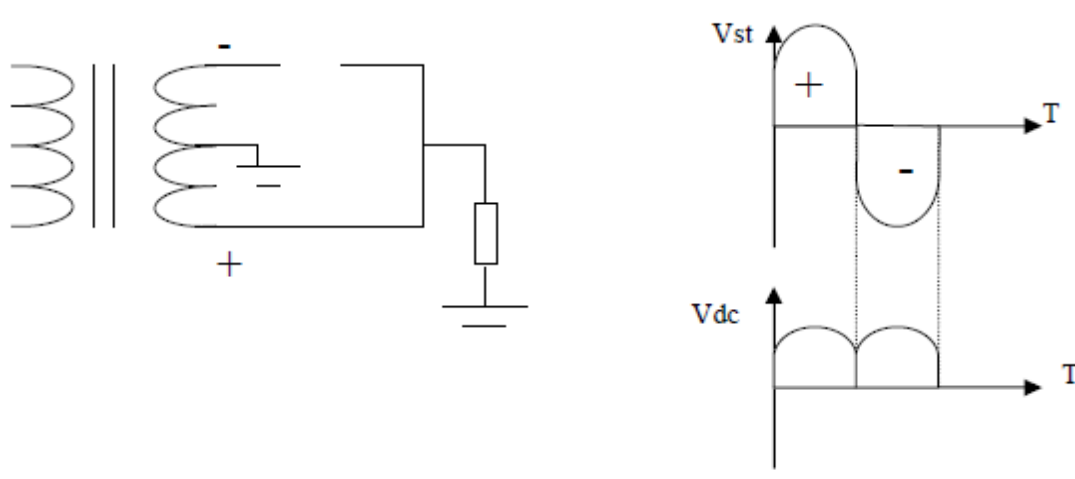


Fig. 27: (a) Circuito retificador de onda completa com derivação central, (b) Forma de onda na resistência no semiciclo negativo

Observe que a polaridade na resistência permanece a mesma e a frequência em relação a tensão no secundário do transformador é o dobro pois o período é a metade.

A tensão \$V_{dc}\$ será:

$$V_{dc} = 2 \frac{V_p}{\pi}$$



OBS: Como apenas metade da tensão no secundário irá para a resistência temos que:

$$V_p = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{st}}{2}$$

Exemplo:

1. Em um circuito retificador de onda completa com derivação central a tensão no secundário do transformador é 16V. Calcule a tensão na resistência de 5,6KΩ.

Solução:

$$V_p = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{st}}{2} = \frac{\sqrt{2} \cdot 16}{2}$$

$$V_p = 11,31V$$

$$V_{dc} = 2 \cdot \frac{11,31}{\pi} = 7,2V$$

Especificações do díodo

PIV – Quando D1 está aberto D2 está a conduzir e a tensão que fica em D1 é a tensão total do secundário do transformador.

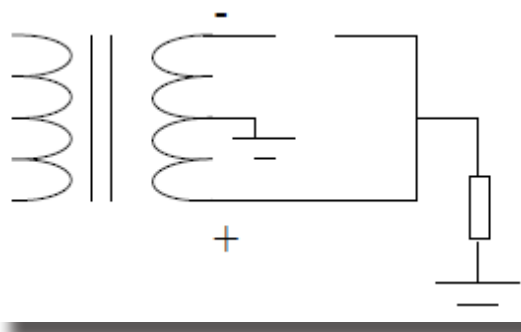


Fig. 28: Circuito equivalente do circuito retificador de onda completa com derivação central no semiciclo positivo

$$PIV = 2 \cdot V_p$$

I₀ – No semiciclo positivo D1 conduz e tem corrente na resistência, no semiciclo negativo D1 estará em aberto mas D2 conduz e existirá corrente na resistência logo:

A quantidade de corrente que passa no díodo é a metade da quantidade de corrente que passa na resistência.

$$I_0 = \frac{I_{dc}}{2}$$



Exemplo:

1. Em um circuito retificador de onda completa com derivação central, a tensão no secundário do transformador é 12V. Calcule as especificações do diodo para uma resistência de 2,7 K Ω .

Solução:

$$V_p = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{st}}{2} = \frac{\sqrt{2} \cdot 12}{2} = 8,48V$$

$$V_{dc} = 2 \times \frac{8,48}{\pi} = 5,4V$$

$$PIV = 2 \times 8,48 = 16,97V$$

$$I_0 = \frac{I_{dc}}{2}, \text{ onde } I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{5,4}{2,7K} = 2mA$$

$$I_0 = \frac{2m}{2} = 1mA$$

Comparação entre as frequências dos circuitos retificadores

Para compreender a frequência do sinal na resistência, vamos analisar o período entre o sinal no secundário do transformador e o sinal na resistência.

Na comparação entre o período do sinal no secundário do transformador e o período do sinal na resistência em um circuito retificador de meia-onda, observando a Figura 29, verificamos que o período do sinal no secundário do transformador terá o mesmo período do sinal na resistência num circuito retificador de meia-onda.

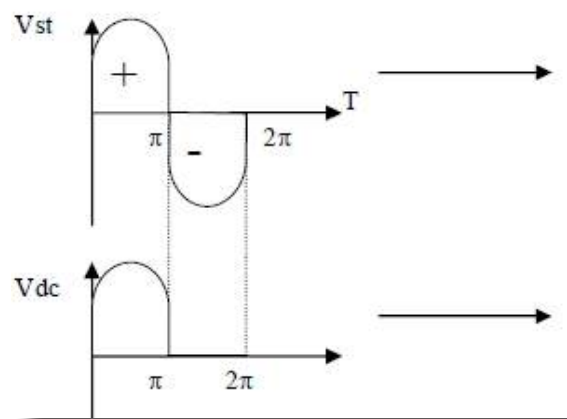


Fig. 29: Comparação entre o período da onda no secundário do transformador e na resistência no circuito retificador de meia onda



Na Figura 29, verificamos que ao comparar o período do sinal do secundário com a do circuito retificador de meia-onda, o período permanece o mesmo, ou seja 2π . Logo, a frequência, é a mesma. Se a frequência no secundário for de 60Hz, num circuito retificador de meia-onda, a frequência também será de 60Hz.

Na comparação entre o período do sinal no secundário do transformador e o período do sinal na resistência em um circuito retificador de onda completa, (Figura 30) vamos fazer a seguinte análise:

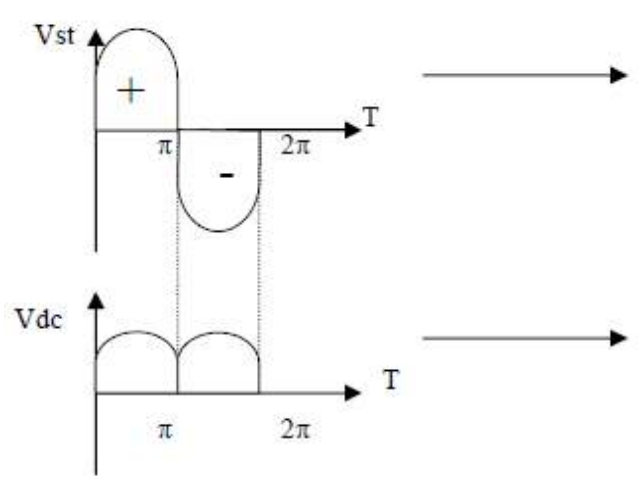


Fig. 30: Comparação entre o período da onda no secundário do transformador e na resistência no circuito retificador de onda completa

O período do secundário é 2π , porém, nos circuitos retificadores de onda completa, na resistência, o período é π , logo, a frequência no circuito retificador de onda completa é o dobro da frequência do secundário. Exemplificando, se no secundário a frequência for de 60Hz, num circuito retificador de onda completa a frequência na resistência será de 120Hz.



Circuitos Retificadores com Filtro

Nos circuitos retificadores vistos até agora, verificamos que a tensão já é contínua, no entanto, o sinal é contínuo pulsando. O próximo passo para construirmos uma fonte de alimentação é aplicar um filtro capacitivo (usando condensadores), para que o sinal fique o mais próximo de uma tensão contínua constante.

Circuito Retificador de Meia-Onda com Filtro Capacitivo

No circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo, foi introduzido um condensador em paralelo a resistência como mostra a Figura 31.

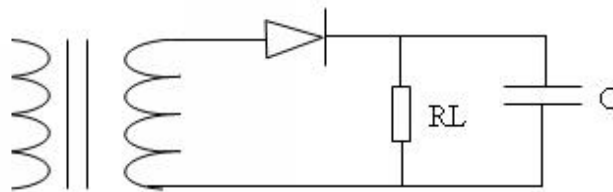


Fig. 31: Circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo

No semiciclo positivo o diodo conduz e o condensador começa a carregar até atingir a tensão de pico no secundário do transformador.

Quando a tensão do secundário do transformador diminuir (sendo menor do que V_p) o diodo abre, pois a tensão no condensador será maior do que a tensão no secundário do transformador (o diodo está a polarizar inversamente). Então o condensador começa a descarregar pela resistência, para este circuito utilizam-se valores relativamente altos para C , de tal forma que $T = RC$, será maior do que o período da onda no secundário do transformador ($T = 1/60$ s).

Durante o semiciclo negativo o diodo está polarizado reversamente e o condensador continua a descarregar pela resistência.

Novamente no semiciclo positivo, quando $V_{st} > V_c$ (tensão no secundário do transformador maior do que a tensão no condensador), o diodo conduz e o condensador carrega até atingir a tensão de pico do secundário do transformador, como mostra a Figura 32.



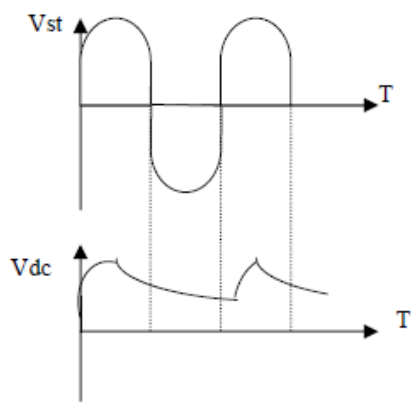


Fig. 32: Forma de onda na resistência

$$V_{dc} = V_p - \frac{V_{ond}}{2}$$

$$V_{ond} = \frac{I}{FC}$$

Onde

I = Corrente na resistência, no entanto iremos aproximar a $\frac{V_p}{R}$

F = frequência da forma de onda na resistência

C = Capacitância

OBS: Quanto maior T = RC, menor será a tensão de ondulação, logo maior será a tensão Vdc e mais contínua será a forma de onda na resistência.

Especificações do díodo

São duas as especificações do díodo: Tensão máxima de pico que fica no díodo quando o mesmo está inversamente polarizado, denominado PIV (Tensão de pico inversa) e o valor médio a corrente no díodo quando o mesmo está diretamente polarizado, denominado IO. PIV - A tensão no díodo terá o maior valor, quando num circuito o condensador tiver um valor muito elevado não tendo tempo para descarregar e a tensão no secundário do transformador estiver no semiciclo negativo como mostra Figura 33.



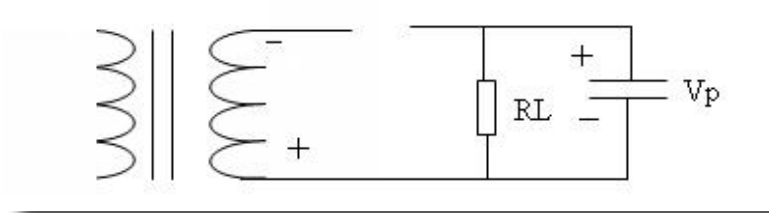


Fig. 33: Circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo no semiciclo negativo

Ao fechar a malha, a tensão máxima que chegará ao díodo será:

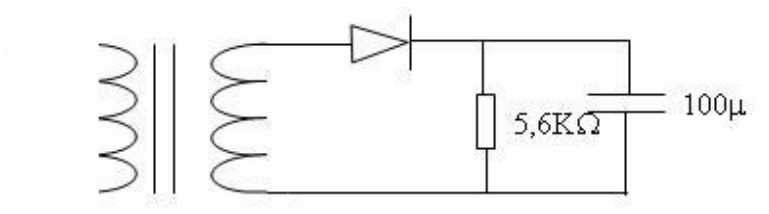
$$PIV = 2 V_p$$

I_0 - A quantidade de corrente que passa no díodo será a maior possível quando num circuito o valor da resistência e o valor do condensador forem muito baixos, de tal forma que o condensador de descarrega quase que totalmente, ficando a forma de onda muito parecida com a do circuito retificador de meia-onda.

$$I_0 = I_{dc}$$

Exemplo:

1) Dado o circuito, calcule a tensão V_{dc} e as especificações do díodo. Sabendo que $V_{st} = 12V$ e $f = 60Hz$.



Solução:

$$V_{dc} = V_p - \frac{V_{ond}}{2}$$

Onde

$$V_{ond} = \frac{I}{FC}$$



Para o circuito retificador de meia-onda a frequência da onda na resistência é igual à frequência do secundário logo:

$$f = 60\text{Hz}$$

$$V_p = \sqrt{2} \times 12 = 16,97$$

$$I \cong \frac{V_p}{R} = \frac{16,97}{5,6K} = 3\text{mA}$$

$$V_{ond} = \frac{3}{60 \times 100\mu} = 0,5V$$

$$V_{dc} = 16,97 - \left(\frac{0,5}{2}\right) = 16,7V$$

$$PIV = 2 \times (16,97) = 33,94V$$

$$I_0 = I_{dc} = \frac{16,7}{5,6K} = 2,98\text{mA}$$

Circuito Retificador de Onda Completa com Derivação Central e Filtro

Capacitivo

No circuito retificador de onda completa com derivação central e filtro capacitivo, foi introduzido um condensador em paralelo com a resistência como mostra Figura 34.

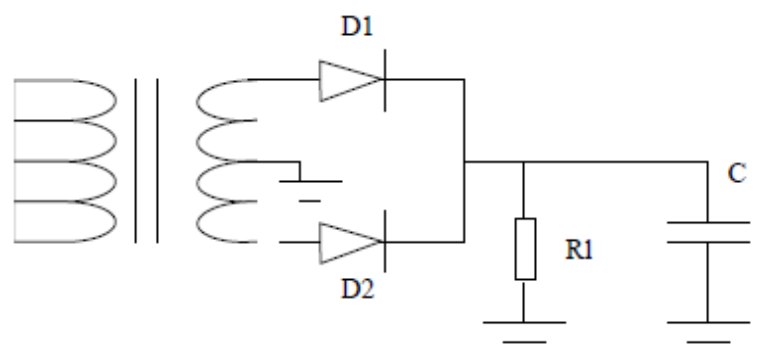


Fig. 34: Circuito retificador de onda completa com derivação central e filtro capacitivo

Durante o primeiro semiciclo positivo, D1 conduz e o condensador começa a carregar até atingir a tensão no secundário do transformador.



Quando V_{st} diminui D1 abre e o condensador começa a descarregar pela resistência.

No semiciclo negativo, quando $V_{st} > V_c$, D2 conduz e o condensador carrega até atingir V_{pst} . Quando V_{st} for menor do que V_{pst} , D2 abre e o condensador novamente começa a descarregar pela resistência.

No semiciclo positivo quando $V_{st} > V_c$, D1 conduz e o condensador carrega até atingir V_{pst} . Novamente quando $V_{st} < V_p$, o diodo abre e o condensador começa a descarregar pela resistência e assim sucessivamente como mostra Figura 35.

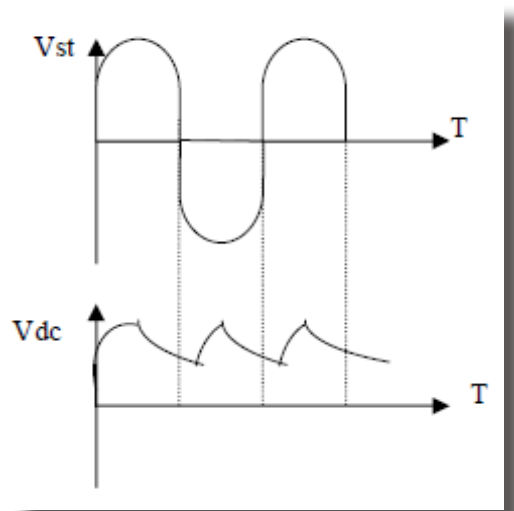


Fig. 35: Forma de onda na resistência

$$V_{dc} = V_p - \left(\frac{V_{ond}}{2}\right)$$

OBS: A frequência é o dobro da frequência do secundário

Especificações do diodo

São duas as especificações do diodo: Tensão máxima de pico que fica no diodo quando o mesmo está inversamente polarizado, denominado PIV (Tensão de pico inversa) e o valor médio a corrente no diodo quando o mesmo está diretamente polarizado, denominado I_0 .

$$PIV = 2 \times V_p$$

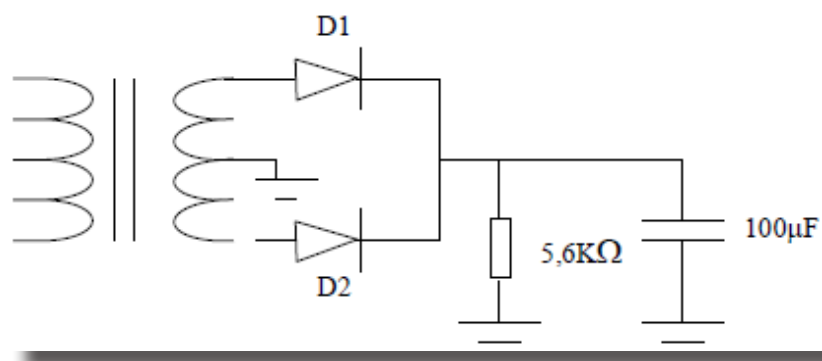
$$I_0 = \frac{I_{dc}}{2}$$



Exemplo:

1. Dado o circuito, calcule a tensão V_{dc} e as especificações do diodo. Sabendo que:

$V_{st} = 12V$ e $f = 60Hz$



$$V_p = \frac{\sqrt{2}}{2} \times V_{st} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 12 = 8,48V$$

$$I = \frac{V_p}{R} = \frac{8,48}{5,6K} = 1,51mA$$

$$V_{ond} = \frac{I}{FC} = \frac{1,51m}{120 \times 100\mu} = 0,12V$$

$$V_{dc} = V_p - \left(\frac{V_{ond}}{2}\right) = 8,48 - \left(\frac{0,12}{2}\right) = 8,42V$$

$$PIV = 2 \times 8,48 = 16,97V$$

$$I_O = \frac{I_{dc}}{2}, \text{ onde } I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{8,42}{5,6K} = 1,5mA$$

$$I_O = \frac{1,5m}{2} = 0,75mA$$



Circuitos Limitadores

Os circuitos limitadores ou ceifadores limitam a tensão de saída, sendo útil em circuitos no qual o sinal de saída precisa de ser limitado.

As aplicações incluem a limitação de amplitude excessivas formação de ondas e o controlo da quantidade de potência entregue a uma carga/resistência.

Na Figura 36(a), temos um limitador positivo, no qual limita a tensão positiva, só deixa passar a tensão negativa, como mostra a Figura 36(b). Observe que o funcionamento é igual ao circuito retificador de meia-onda.

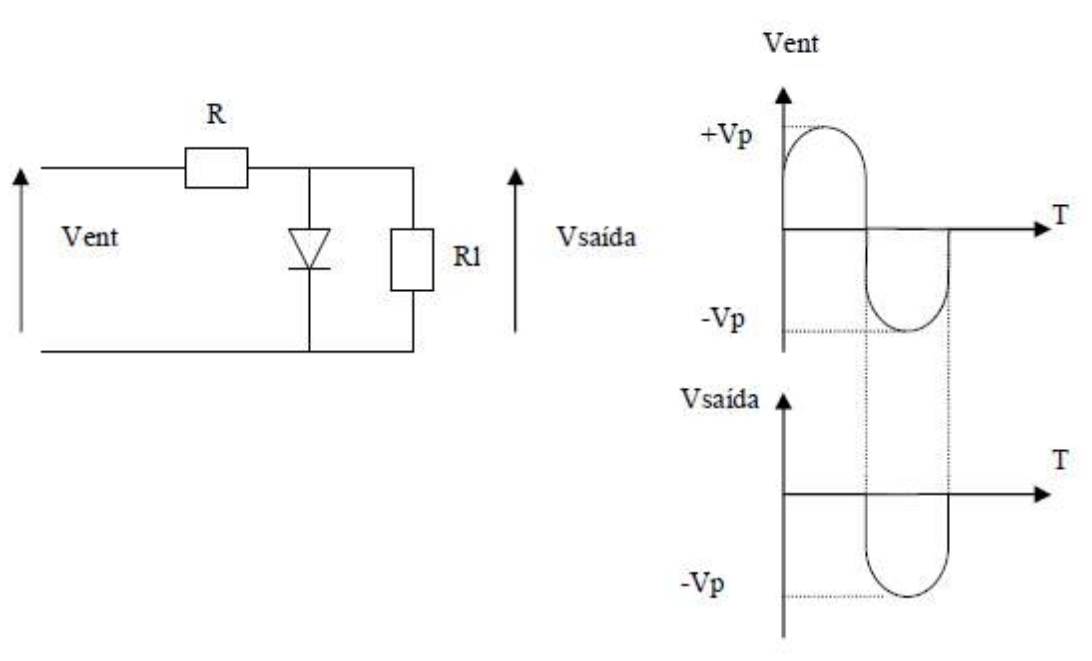


Fig. 36: (a)Circuito limitador positivo; (b) Forma de onda na resistência

Análise do circuito limitador positivo

No semiciclo positivo o diodo conduz logo: $V_{saída} = 0$

No semiciclo negativo o diodo abre, logo : $V_{saída} \cong V_{ent}$, uma vez que $R_L \gg R$

Na Figura 37(a), temos um outro limitador positivo, no qual foi inserida uma fonte de tensão em serie com o diodo. A limitação da tensão será para tensões acima de V como mostra a Figura 37(b).



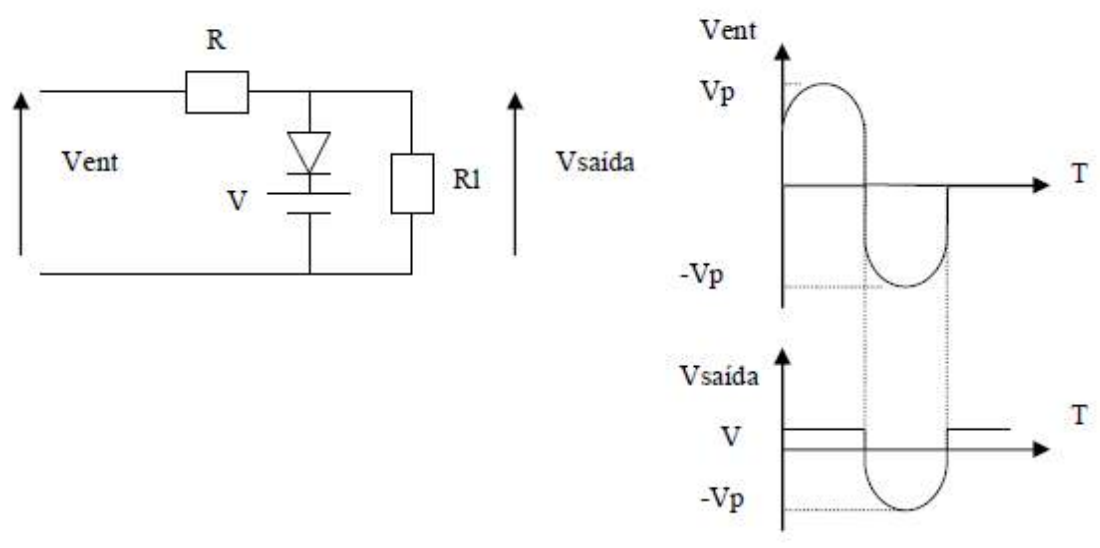


Fig. 37: (a) Circuito limitador positivo polarizado, (b) Forma de onda na resistência

Análise do Circuito limitador positivo polarizado

No semiciclo positivo, quando $V_{ent} > V$ o díodo conduz , logo: $V_{saída} = V$

No semiciclo como o díodo está sempre aberto, pois V e V_{ent} polarizam inversamente o díodo e temos: $V_{saída} = V_{ent}$

Outros circuitos limitadores

Desde a figura 38 à 45 temos exemplos de outros circuitos limitadores e as suas respetivas formas de onda na carga., no qual o funcionamento é semelhante aos circuitos já analisados.



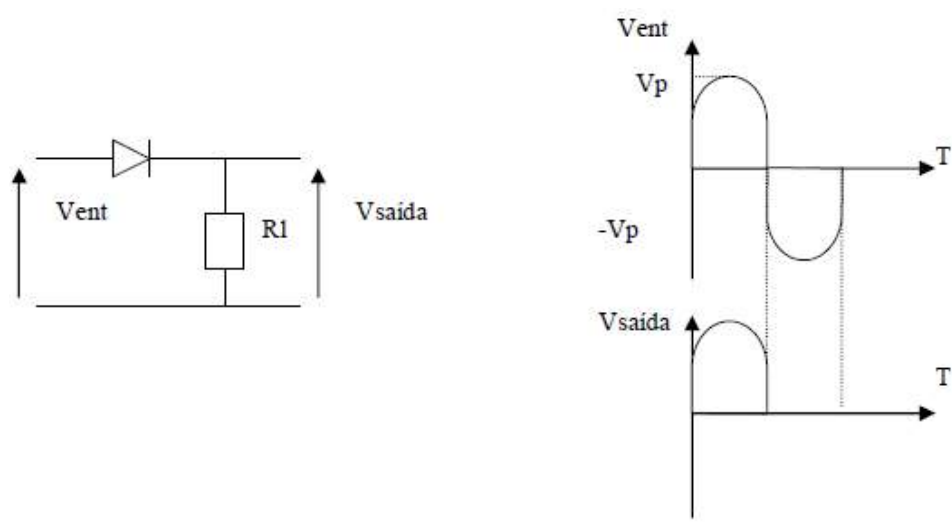


Fig. 38: (a) Circuito limitador negativo, (b) Forma de onda na resistência

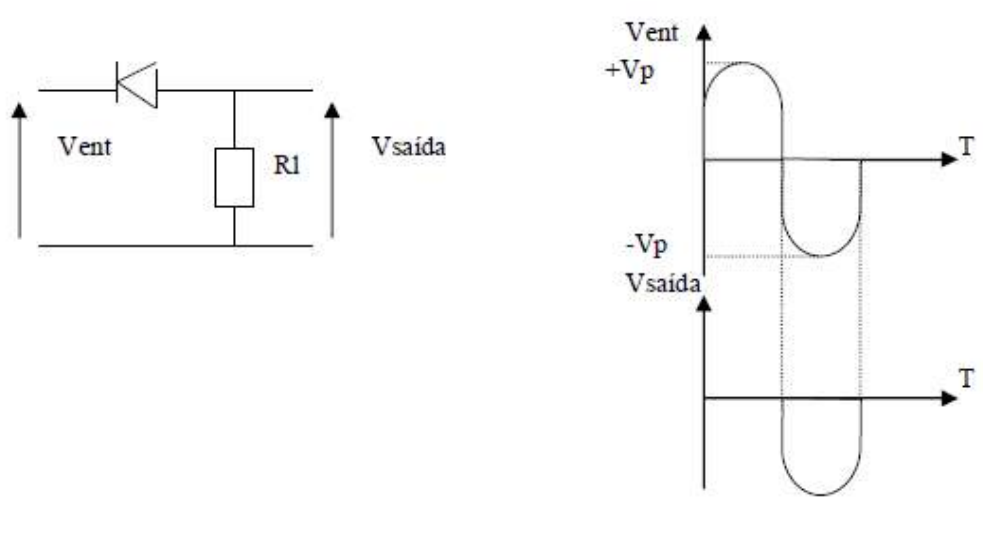


Fig. 39: (a) Circuito limitador positivo, (b) Forma de onda na resistência



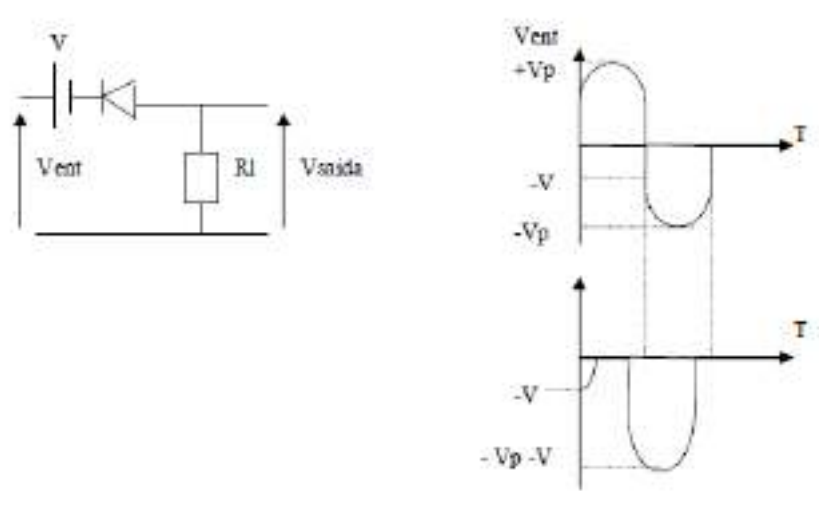


Fig. 40: (a) Circuito limitador positivo polarizado, (b) Forma de onda na resistência

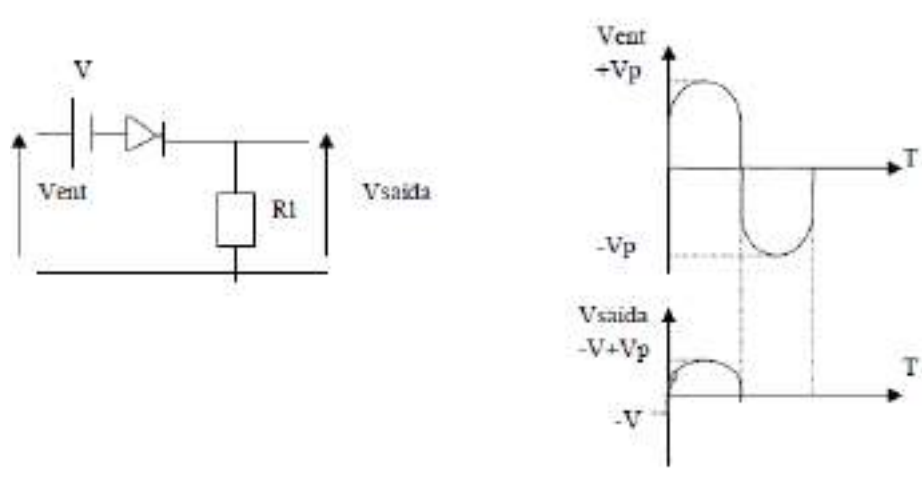


Fig. 41: (a) Circuito limitador negativo polarizado, (b) Forma de onda na resistência

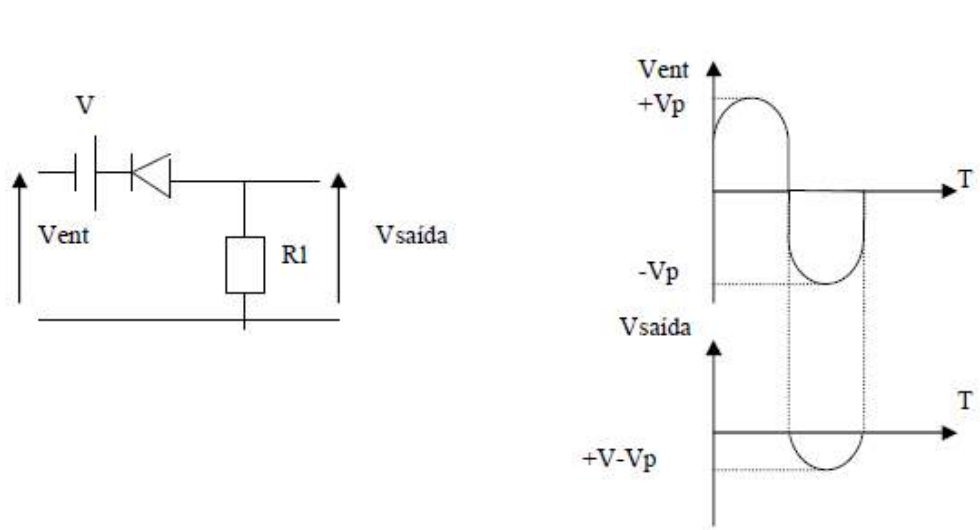


Fig. 42: (a) Circuito limitador positivo polarizado, (b) Forma de onda na resistência



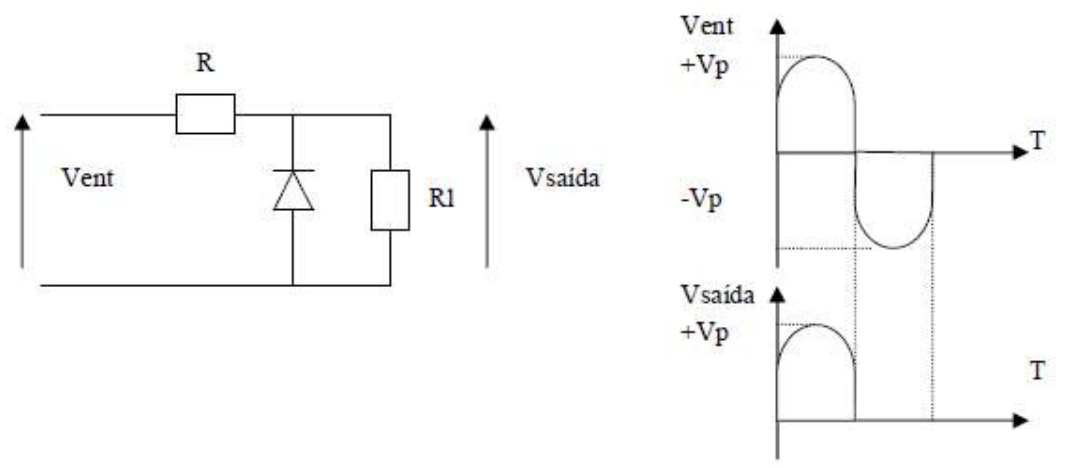


Fig. 43: (a) Circuito limitador negativo, (b) Forma de onda na resistência

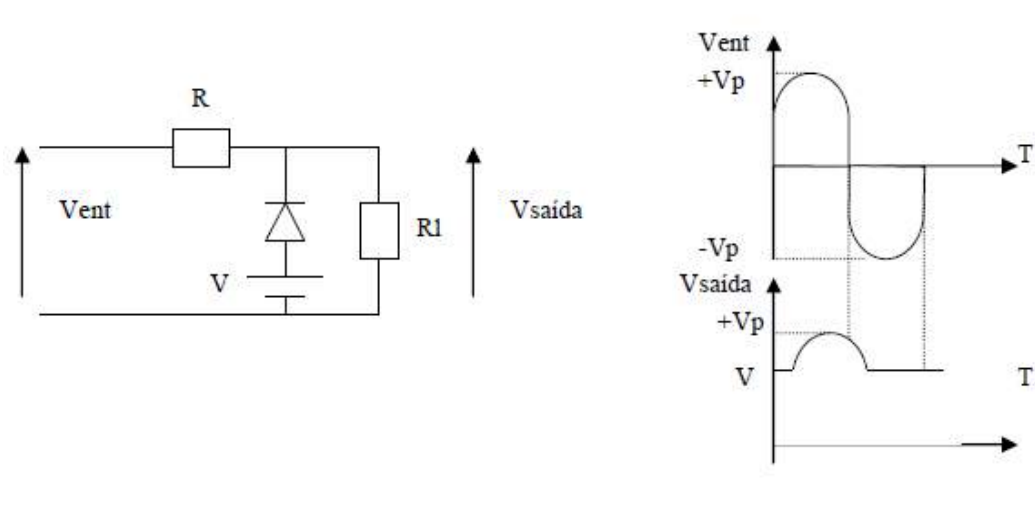


Fig. 44: (a) Circuito limitador polarizado, (b) Forma de onda na resistência

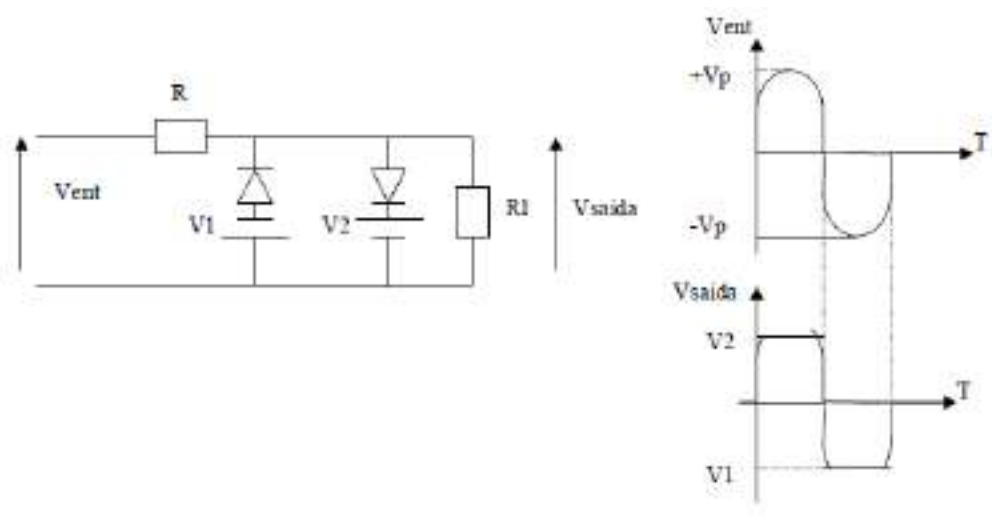


Fig. 45: (a) Associação de limitadores, (b) Forma de onda na resistência



Díodo de Zener

O díodo zener é um díodo construído especialmente para trabalhar polarizado inversamente, conduzindo na região de rotura. Em baixo são mostradas a curva característica do díodo zener e a sua simbologia.

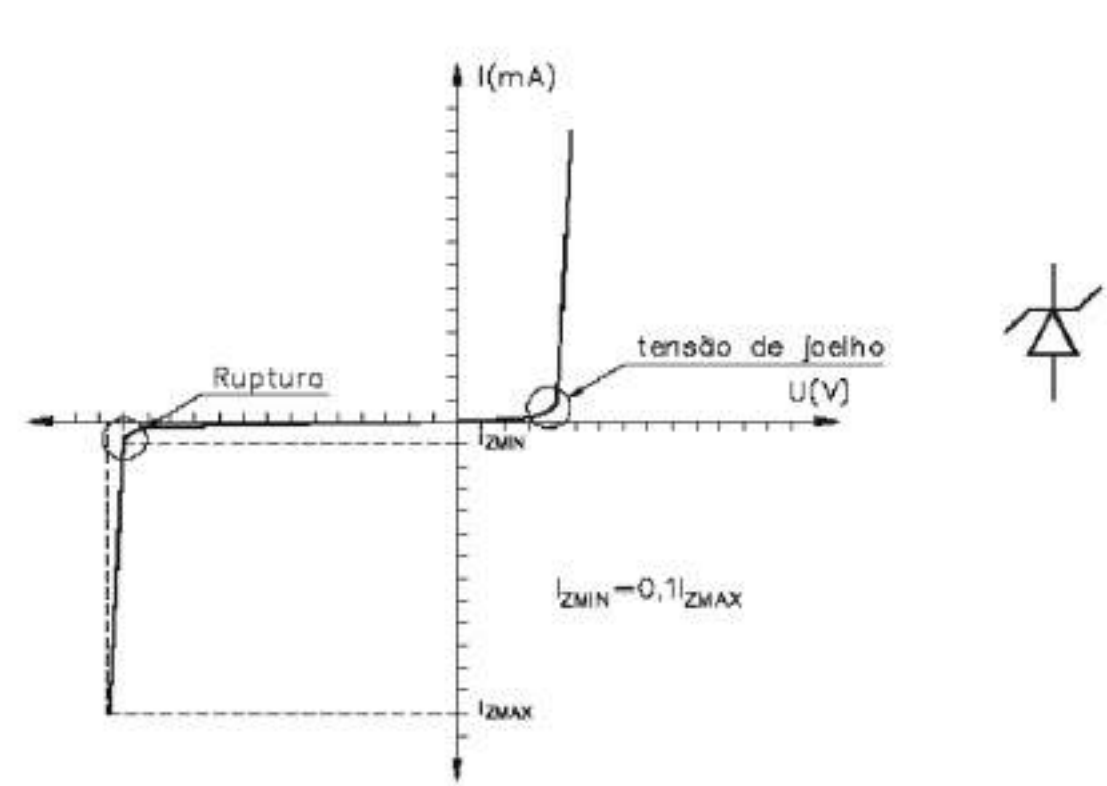


Fig. 46: Curva característica do díodo de zener

O díodo zener quando polarizado diretamente funciona como um díodo comum, mas ao contrário de um díodo convencional, ele suporta a condução de corrente em tensões inversas próximas à tensão de rotura. A sua principal aplicação é a de conseguir uma tensão estável (tensão de rotura), independente da corrente que o atravessa. No circuito da figura 47 ele está em série com uma resistência limitadora de corrente e a sua polarização normalmente é inversa. Graficamente é possível obter a corrente elétrica sob o zener com o uso de reta de carga.



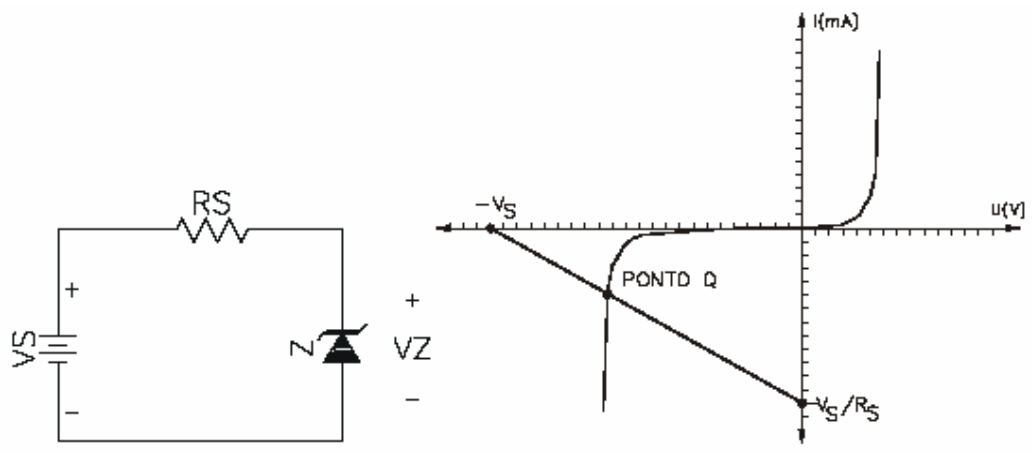


Fig. 47: Díodo de Zener em série com uma resistência

Exemplo:

Se montássemos o circuito da Figura 48, e medíssemos a tensão no díodo zener e a corrente que passa por ele ao aplicar a tensão V_s , dava para construir a tabela 1. Esta tabela é importante para que possamos compreender o funcionamento do díodo zener.

Quando $V_s = 1V \rightarrow V_z = 1V$ e $I_s = 0$
Quando $V_s = 2V \rightarrow V_z = 2V$ e $I_s = 0$
Quando $V_s = 3V \rightarrow V_z = 3V$ e $I_s = 0$
Quando $V_s = 4V \rightarrow V_z = 4V$ e $I_s = 0$
Quando $V_s = 5V \rightarrow V_z = 5V$ e $I_s = 0$
Quando $V_s = 6V \rightarrow V_z = 5,6V$ e $I_s = 0,4 \text{ mA}$
Quando $V_s = 7V \rightarrow V_z = 5,6$ e $I_s = 1,4 \text{ mA}$
Quando $V_s = 8V \rightarrow V_z = 5,6$ e $I_s = 2,4 \text{ mA}$
Quando $V_s = 9V \rightarrow V_z = 5,6$ e $I_s = 3,4 \text{ mA}$
Quando $V_s = 10V \rightarrow V_z = 5,6$ e $I_s = 4,4 \text{ mA}$

Tabela 1: Tabela de funcionamento do díodo de zener



Corrente máxima do díodo zener

A corrente máxima do díodo de zener pode ser representada pela seguinte fórmula:

$$P_z = V_z \times I_{zMAX}$$

Para que percebamos melhor como funciona segue um exemplo para calcular a corrente máxima de zener.

Exercício:

1. Se um díodo zener de 12 V tem uma especificação de potência máxima de 400 mW, Qual será a corrente máxima permitida?

Corrente mínima do zener

A corrente mínima define o ponto aproximado em que o díodo começa a sair da região de rotura em direção à região de corte, onde não há condução de corrente. Quando o díodo entra na região de corte, a sua tensão cai em relação ao valor da tensão de rotura V_z . Considera-se a corrente mínima do zener como sendo de 10 a 20% do valor da corrente máxima do zener. Considerando uma proporção de 15%, temos a expressão abaixo:

$$I_{zMIN} = I_{zMAX} \times 0,15$$

Limitador de tensão com zener

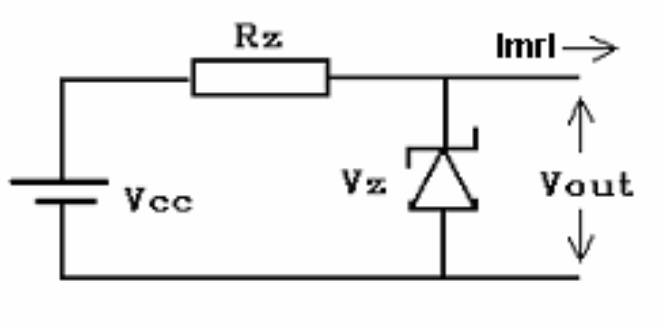


Fig. 49: Circuito limitador de tensão com zener



Descrevendo a equação do circuito acima tem-se:

$$V_{CC} + V_{RZ} + V_Z = 0$$

$$V_{RZ} = V_{CC} - V_Z$$

$$\text{Como } V_{RZ} = R_Z(I_Z + I_{MRL}) \quad V_{RZ} = R_Z(I_Z + I_{MRL})$$

$$R_Z = \frac{(V_{CC} - V_Z)}{I_Z + I_{MRL}}$$

A corrente do zener, quando calculada com base na potência, é o máximo valor que ela pode atingir, mas quando calculada num circuito como o de cima, utiliza-se um valor de I_Z menor que o máximo valor calculado. Fazendo assim, o díodo trabalha com um valor de corrente inferior ao máximo, evitando aquecimento excessivo na junção.

Exemplo:

Considerando um díodo cuja tensão zener seja de 12 V e cuja potência seja 500 mW, sendo a fonte de alimentação de 18 V, pode-se calcular o valor da resistência em série com o díodo.

Cálculo do valor de I_{ZMAX} :

$$P_Z = V_{ZMAX} \times I_{ZMAX}$$

$$I_{ZMAX} = \frac{P_Z}{V_Z}$$

$$I_{ZMAX} = \frac{500mW}{12V} = 41mA$$

Cálculo do I_{ZMIN} :

Considerando que $I_{ZMIN} = 15\% I_{ZMAX}$

$$I_{ZMIN} = 0,15 \times 0,041 = 6.15mA$$



Calculando agora o valor mínimo do resistor R_Z

$$R_{ZMIN} = \frac{V_{CC} - V_Z}{I_{ZMAX}}$$

$$R_{ZMIN} = \frac{18 - 12}{0,041} = 146\Omega$$

O valor de R_Z deve ser superior a R_{ZMIN} para que o diodo não se danifique devido a ser submetido a uma corrente superior à sua corrente máxima I_{ZMAX} .

Calculando agora o valor máximo do resistor R_Z

$$R_{ZMAX} = \frac{V_{CC} - V_Z}{I_{ZMIN} + I_{MRL}}$$

$$R_{ZMAX} = \frac{18 - 12}{0,065 + 0,01} = 371\Omega$$

O valor de R_Z deve ser superior a R_{ZMIN} para que o diodo opere fora da região de corte, onde a corrente é inferior a I_{ZMIN} .

Calculando o valor a ser adotado para R_Z

$$R_{ZMIN} < R_Z \text{ adotado} < R_{ZMAX}$$

$$146\Omega < R_Z \text{ adotado} < 371\Omega$$

O valor adotado para R_Z geralmente é o valor comercial de resistência mais próximo da média entre R_{ZMIN} e R_{ZMAX} , para que se opere o mais longe possível das situações de sobrecarga e corte do diodo zener.

Este foi o método de projeto de um limitador considerando uma tensão de entrada constante. Caso a tensão de entrada varie, calcula-se R_{ZMIN} e R_{ZMAX} da seguinte forma:

$$R_{ZMIN} = \frac{V_{CC} - V_Z}{I_{ZMAX}}$$

$$R_{ZMAX} = \frac{V_{CC} - V_Z}{I_{ZMIN} + I_{MRL}}$$

Segundo as expressões acima, podemos concluir que o aumento da tensão de entrada V_i , provoca sobrecarga no diodo zener, e que a diminuição de V_i tende a levar o diodo para a região de corte.



Díodo Emissor De Luz (LED)

Os díodos emissores de luz são fabricados a partir do GaAs (arsenieto de gálio) acrescidos de fósforo que, dependendo da quantidade, podem irradiar luzes vermelha, laranja, amarela, verde ou azul, são muitos utilizados como sinalizadores em instrumentos eletrônicos ou na fabricação de displays.

Enquanto num díodo comum na passagem de corrente, ocorre a liberação de energia em forma de calor, num LED a liberação de energia é na forma de luz visível.

A simbologia para o led é apresentada na Figura 50.

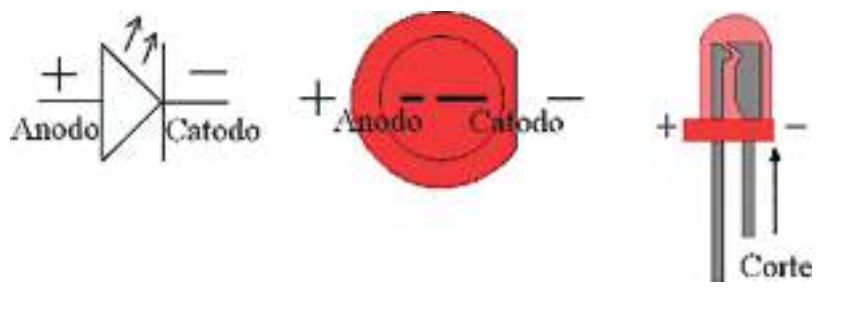


Fig. 50: Simbologia de um Led

Os LEDs apresentam as mesmas características dos díodos comuns, ou seja só conduzem quando polarizados diretamente aplicando uma tensão maior do que a barreira de potencial, no entanto a barreira de potencial varia de 1,5V a 2,5V dependendo da cor. Comercialmente, o led trabalha normalmente com corrente na faixa de 10mA a 50mA. OBS: Para se polarizar um LED, deve-se utilizar uma resistência limitadora de corrente para que o mesmo não se danifique.



Circuito básico

O menor circuito que podemos construir com um led é apresentado na Figura 51. Não se deve ligar um led em paralelo com uma fonte de alimentação, pois danifica facilmente, uma vez que a resistência da fonte é desprezível e a corrente que passará no led terá valor elevado.

$$I_S = \frac{V_s - V_{led}}{R_S}$$

Fig. 51: Circuito básico com Led

OBS: como V_{led} varia de 1,5 a 2,5V vamos adotar 2V

Exercícios

Exercícios Materiais Semicondutores

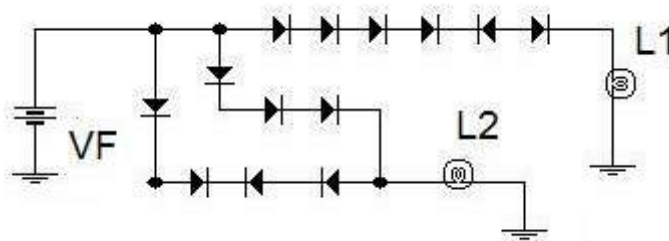
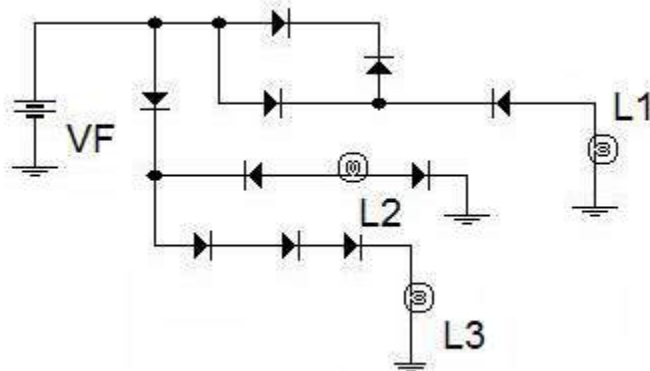
1. Complete

- Os semicondutores mais utilizados e mais comuns são o _____ e o _____.
- O átomo de silício contém ___ elétrons. Com ___ elétrons na camada de valência.
- O átomo de germânio contém ___ elétrons. Com ___ elétrons na camada de valência.
- Os átomos de silício e de germânio por serem _____, precisam de mais ___ elétrons para conseguir a configuração de gás nobre.
- Cada átomo partilha ___ elétrons com seus átomos vizinhos através da ligação _____.
- Na temperatura ambiente, alguns elétrons da camada de valência tornam-se _____.
- A formação de elétrons livres é chamada _____.
- A ocupação de um elétron livre na lacuna é chamada _____.
- O tempo entre a geração e recombinação é chamado _____.



Exercícios curva característica do Díodo

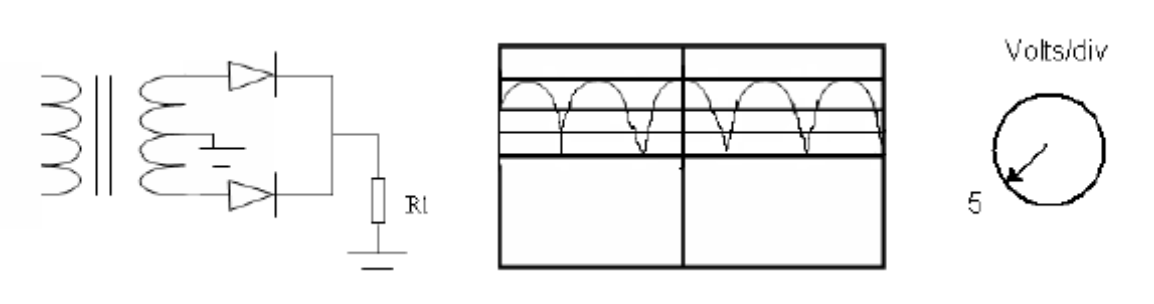
1. Dados os circuitos, indique qual das lâmpadas irá acender.

**Exercícios Circuitos Retificadores****Exercícios:**

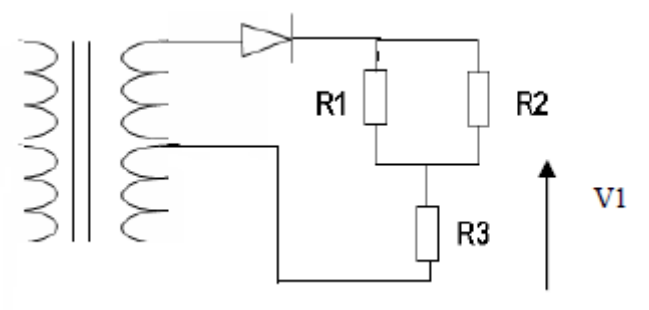
1. Preencha os espaços em branco.
 - a. Num circuito retificador de meia-onda a tensão na resistência será calculada pela seguinte equação: $V_{dc} = \underline{\hspace{2cm}}$
 - b. Num circuito retificador de meia-onda $PIV = \underline{\hspace{2cm}}$ e $I_0 = \underline{\hspace{2cm}}$.
Num circuito retificador de onda completa com derivação central a tensão na resistência será calculado pela seguinte equação: $V_{dc} = \underline{\hspace{2cm}}$ onde $V_p = \underline{\hspace{2cm}}$ da tensão no secundário do transformador.
 - c. Em um circuito retificador de onda completa com derivação central temos: $PIV = \underline{\hspace{2cm}}$ e $I_0 = \underline{\hspace{2cm}}$.
 - d. Se a frequência do secundário for de 50Hz, num circuito retificador de meia-onda a frequência será de $\underline{\hspace{2cm}}$ no circuito retificador de onda completa com derivação central a frequência será de $\underline{\hspace{2cm}}$.



- Num circuito retificador de meia-onda a tensão no secundário do transformador é de 18V, sabendo que $R = 6,8K\Omega$. Calcule as especificações do díodo.
- Num circuito retificador de onda-completa com derivação central a tensão no secundário do transformador é de 25V. Sabendo que $R = 5,6K\Omega$. Calcule as especificações do díodo.
- Um aluno montou em laboratório o circuito da figura a seguir, no qual verificou a forma de onda na resistência com o osciloscópio, como mostra a figura. Se o aluno utilizasse o multímetro para medir a tensão na resistência, qual a tensão que iria ler?



- Dado o seguinte circuito, determine a tensão V_1 e as especificações do díodo. Dado: $V_{st} = 26V$, $R_1 = 1K\Omega$, $R_2 = 3,3K\Omega$ e $R_3 = 5,7K\Omega$

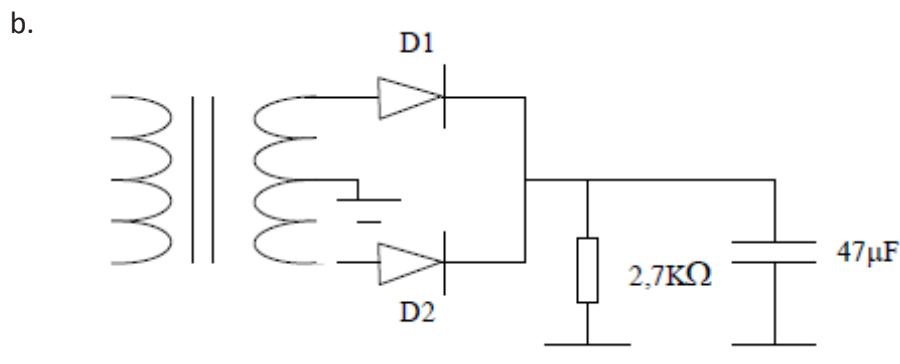
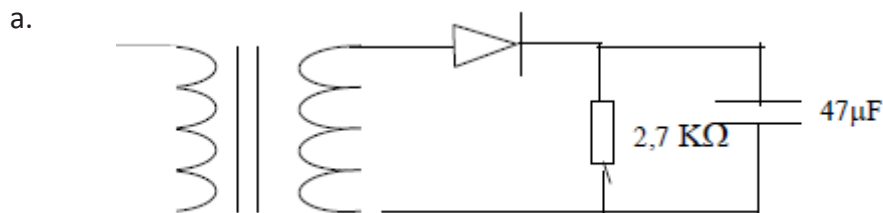


Exercícios Circuitos Retificadores com Filtro

Exercícios:

1. Preencha os espaços em branco.
 - a. Em todos os circuitos retificadores com filtro, observa-se que a forma de onda é a mesma sendo calculado a tensão V_{dc} pela seguinte equação _____. Onde $V_{ond} =$ _____.
 - b. Em um circuito retificador de meia-onda com filtro se a frequência da linha for de 60Hz, a frequência será _____ e no circuito retificador de onda completa a frequência será _____.
 - c. O PIV para o circuito retificador de meia-onda com filtro será igual a _____.
 - d. O PIV para os circuitos retificadores de onda completa com filtro será igual a _____.
 - e. O IO para o circuito retificador de meia-onda com filtro é igual a _____.
 - f. F.O IO dos circuitos retificadores de onda completa com filtro será igual a _____.

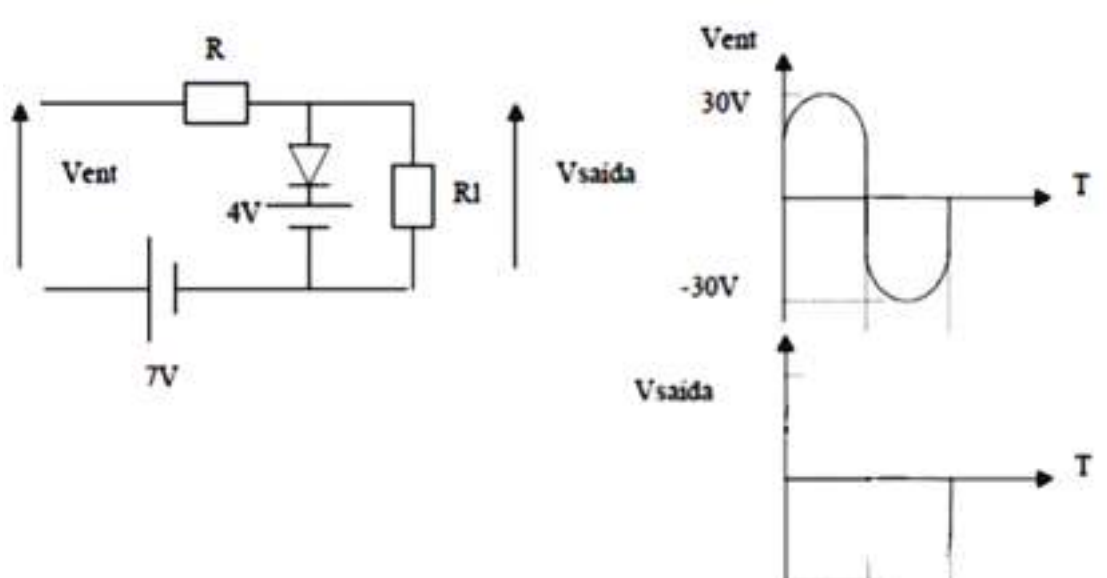
2. Dado os circuitos das Figura a seguir, calcule a tensão V_{dc} e as especificações do diodo. Dado: $V_{st} = 18V$ e $f = 60Hz$



Exercícios Circuitos Limitadores

Exercício:

1. Dado o circuito determine a forma de onda na saída.

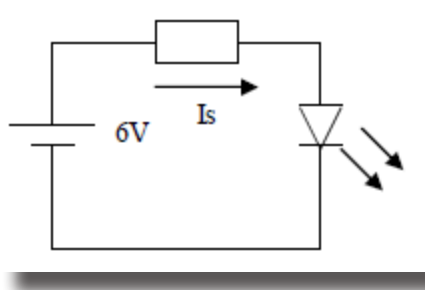


Exercícios Díodo de Zener

1. Se um díodo zener de 12 V tem uma especificação de potência máxima de 400 mW, Qual será a corrente máxima permitida?

Exercícios Díodo Emissor de Luz

1. Determine R_s para que o LED do circuito da figura a seguir, fique polarizado no seu ponto ativo ($V_{led} = 2V$ e $I_d = 20mA$)



Trabalhos Práticos Propostos

Trabalhos Práticos nº1

Compreendendo a polarização em um díodo

Neste circuito, devem-se identificar os terminais ânodo e cátodo num díodo com o auxílio de um multímetro digital. Posteriormente, deve-se montar um circuito simples para compreender a polarização em um díodo.

Material necessário:

- 1 Díodo 1N4001 (ou equivalente);
- 1 Led;
- 1 Resistência de 470Ω ; $\frac{1}{4}$ w
- 1 Fonte de alimentação de 6V;
- 1 Multímetro digital.

Procedimento 1: Identificação dos terminais ânodo e cátodo

1. Coloque a chave seletora do multímetro na indicação do díodo.
2. Segure uma ponta de prova do multímetro na perna do díodo.
3. Observe que:

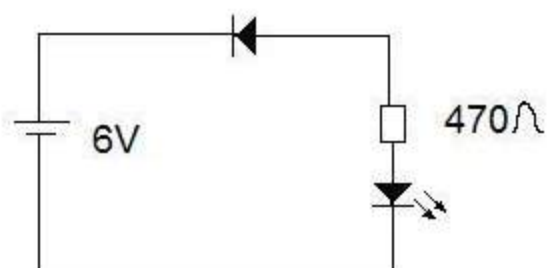
Se o valor que aparecer no display for de 600mV, significa que estamos a polarizar o díodo diretamente, logo, onde está à ponta de prova vermelha refere-se ao ânodo e a ponta de prova preta ao cátodo.

Se o valor que aparece no display for refere a infinito, significa que estamos a polarizar díodo inversamente, logo, onde está à ponta de prova vermelha refere-se ao cátodo e a ponta de prova preta ao ânodo.



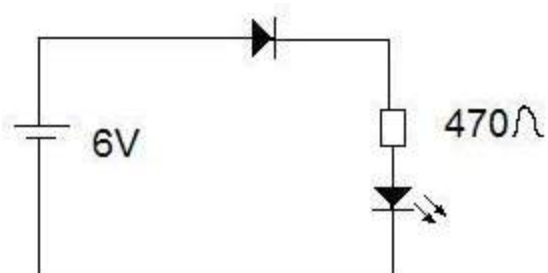
Procedimento 2: Compreendendo a polarização direta e inversa de um diodo

1. Monte o circuito da figura a seguir



Polarização Inversa

2. Inverta o diodo, veja a seguinte figura



Polarização Direta

Trabalhos Práticos nº2

Circuito retificador de meia-onda

Neste circuito, deve-se montar um circuito retificador de meia-onda, para observar o sinal da resistência com o uso do osciloscópio e medir a tensão Vdc.

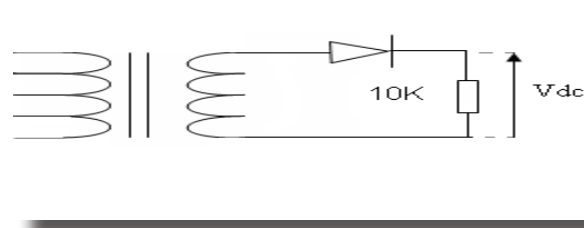
Material necessário:

- Transformador, 110V/220V – 9V, 500mA
- 1 Diodo 1N4001 (ou equivalente);
- 1 Resistência de 10KΩ, 0,25W;
- 1 Multímetro (analógico ou digital);
- 1 Osciloscópio.



Procedimento:

1. Monte o circuito da Figura:



2. Com o uso do osciloscópio, observe a forma de onda na resistência.
3. Utilize as expressões matemáticas e calcule a tensão Vdc.
4. Com o multímetro meça a tensão no resistor (Vdc) e compare com o valor calculado.
5. Inverta o díodo e observe a forma de onda na resistência.

Trabalhos Práticos nº3**Circuito retificador de onda completa com derivação central**

Neste circuito, deve-se montar um circuito retificador de onda completa com derivação central, para observar o sinal na resistência com o uso do osciloscópio e medir a tensão Vdc.

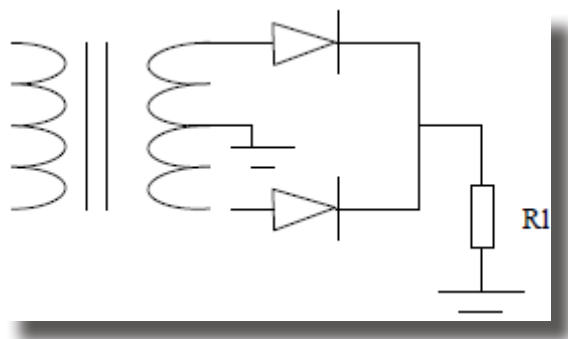
Material necessário:

- 1 Transformador com derivação central, 110V/220V – 12V+12V, 500mA
- 2 Díodos 1N4001 (ou equivalente);
- 1 Resistência de 10K Ω , 0,25W;
- 1 Multímetro (analógico ou digital);
- 1 Osciloscópio.



Procedimento:

1. Monte o circuito da Figura:



2. Com o uso do osciloscópio, observe a forma de onda na resistência.
3. Utilize as expressões matemáticas e calcule a tensão Vdc.
4. Com o multímetro meça a tensão na resistência (Vdc) e compare com o valor calculado.
5. Inverta os díodos e observe a forma de onda na resistência.

Trabalhos Práticos nº4

Circuito retificador de meia-onda com filtro capacitivo

Neste circuito, deve-se montar um circuito retificador de meia-onda com filtro capacitivo, no qual, será observado como a tensão de saída será influenciada de acordo com o valor do condensador.

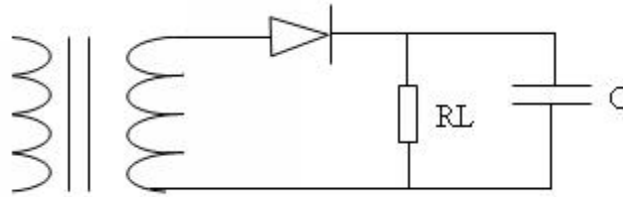
Material necessário:

- 1 Transformador, 110V/220V – 9V, 500mA
- 1 Díodo 1N4001 (ou equivalente);
- 1 Resistência de 10K Ω , 0,25W;
- 3 Condensadores; 1 μ F,10 μ F,47 μ F;
- 1 Multímetro (analógico ou digital);
- 1 Osciloscópio.



Procedimento:

1. Monte o circuito da Figura, primeiramente, utilize o condensador de $1\mu\text{F}$.



2. Com o uso do osciloscópio, observe a forma de onda na resistência.
3. Utilize as expressões matemáticas e calcule a tensão Vdc.
4. Com o multímetro meça a tensão na resistência (Vdc) e compare com o valor calculado.
5. Troque o Condensador pelo valor de $10\mu\text{F}$ e novamente observe a forma de onda na resistência.
6. Troque o condensador pelo valor de $47\mu\text{F}$ e novamente observe a forma de onda na resistência.

Trabalhos Práticos nº5**Circuito retificador de onda completa com derivação central com filtro capacitivo**

Neste circuito, deve-se montar um circuito retificador de onda completa com derivação central, para observar o sinal da resistência com o uso do osciloscópio e medir a tensão Vdc.

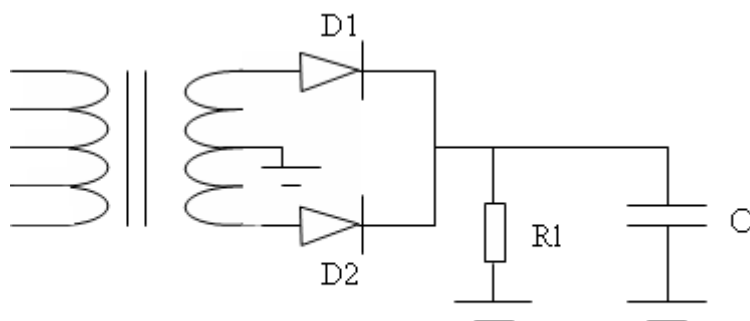
Material necessário:

- 1 Transformador com derivação central, 110V/220V – 12V+12V, 500mA
- 2 Díodos 1N4001 (ou equivalente);
- 1 Resistência de $10\text{K}\Omega$, 0,25W;
- 3 Condensadores; $1\mu\text{F}$, $10\mu\text{F}$, $47\mu\text{F}$;
- 1 Multímetro (analógico ou digital);
- 1 Osciloscópio.



Procedimento:

1. Monte o circuito da Figura



2. Com o uso do osciloscópio, observe a forma de onda na resistência.
3. Utilize as expressões matemáticas e calcule a tensão Vdc.
4. Com o multímetro meça a tensão na resistência (Vdc) e compare com o valor calculado.
5. Troque o condensador pelo valor de $10\ \mu\text{F}$ e novamente observe a forma de onda na resistência.
6. Troque o condensador pelo valor de $47\ \mu\text{F}$ e novamente observe a forma de onda na resistência.



Trabalhos Práticos nº6**O díodo de Zener**

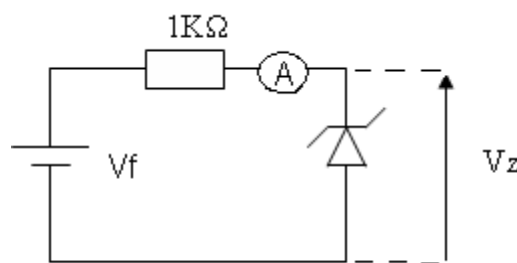
Neste circuito, deve-se montar um circuito básico com o díodo zener para compreender o seu funcionamento.

Material necessário:

- 1 Fonte de alimentação variável (0-15V)
- 1 Díodo zener 5V6, 0,5W;
- 1 Resistência de $1K\Omega$, 0,25W;
- 1 Multímetro (analógico ou digital)

Procedimento:

1. Monte o circuito da Figura.



2. Preencha a tabela abaixo:

Vf	A	Vz
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

4. Qual o valor da tensão que se manteve constante? _____



Bibliografia

ANGULO, J. M., Enciclopédia de Electrónica Moderna, Vol. 1a 4. Madrid. Editorial Paraninfo. (s.d.)

CARLOS, Ângulo e outros, Teoria e Prática de Electrónica. McGraw-Hill. (Makron Books). (s.d.).

MALVINO, Electrónica no Laboratório. McGrawHill. (s.d.).

MALVINO, Princípios de Electrónica, Vol. 1. McGrawHill. (s.d.).

MATIAS, José, Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Didáctica Editora. (s.d.).

MATIAS, José, Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano, Vol. 2 Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Didáctica Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros, Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).

VARANDA, Joaquim, Tecnologias da Electricidade, 11.º Ano, Vol. 2. Didáctica Editora. (s.d.).







Transistor Bipolar

Módulo 5

Apresentação

Este módulo tem carácter teórico-prático, por isso deverá decorrer em parte em ambiente laboratorial de forma a permitir aos alunos verificarem e comprovarem os conceitos teóricos estudados relativos às características, princípio de funcionamento e montagens básicas dos transístores bipolares.

Esta disciplina tem como intenção tornar o aluno apto a compreender a linguagem e as técnicas utilizadas, possibilitando assim um melhor aproveitamento na sequência dos estudos desta e das outras disciplinas técnicas e também na comunicação adequada com os profissionais da área.

Introdução

A abordagem deste módulo de transístores leva-nos a uma melhor compreensão dos vários tipos de aparelhos, que incorporam circuitos que utilizam estas características, existentes no mercado assim como a melhor escolha deste tipo de equipamentos para que se ajuste às crescentes evoluções disponíveis pelas diversas marcas.

Este módulo requer um conhecimento básico de matemática, física e análise de circuitos eletrónicos básicos.

Objetivos de aprendizagem

- Conhecer a constituição, tipos e simbologia do transístor bipolar.
- Polarizar o transístor e compreender o seu funcionamento.
- Relacionar as correntes e tensões no transístor.
- Reconhecer o transístor como amplificador de corrente.
- Identificar os parâmetros (α e β).
- Conhecer as montagens fundamentais: EC, BC, CC.
- Analisar as curvas características do transístor em EC.
- Traçar a reta de carga estática.
- Identificar zonas de funcionamento do transístor.
- Compreender o funcionamento do transístor como comutador.



- Verificar o funcionamento do transistor como amplificador.
- Conhecer os vários tipos de circuitos de polarização, vantagens e desvantagens de cada um.
- Conhecer o funcionamento do transistor em regime dinâmico.
- Conhecer um esquema equivalente para sinais, simplificado e respectivas equações com parâmetros híbridos.
- Analisar o amplificador para sinais em EC, BC e CC.
- Comparar as características das três montagens.

Âmbito de conteúdos

- Transistor Bipolar.
- Constituição e funcionamento.
- Funcionamento estático:
 - Montagens EC, BC, CC.
 - Análise da montagem EC.
 - Curvas características.
 - Zonas de funcionamento.
 - Reta de carga.
- Funcionamento como comutador e amplificador:
 - Polarização:
 - Fixa
 - Com resistência de emissor.
 - Por divisor de tensão.
 - Funcionamento dinâmico:
 - Esquema equivalente para sinais.
 - Montagens: EC, BC, CC.



Transístores Bipolares

Introdução

Durante o período de 1904 até 1947, a válvula foi indubitavelmente o dispositivo eletrónico de interesse e desenvolvimento. Em 1904, o díodo a válvula foi introduzido por J. A. Fleming. Logo depois, em 1906, Lee De Forest adicionou um terceiro elemento, chamado de grade de controlo, ao díodo a válvula eletrónica, resultando no primeiro amplificador, o tríodo. Nos anos seguintes, o rádio e a televisão proporcionaram um grande estímulo à indústria de válvulas. A produção cresceu aproximadamente de 1 milhão de válvulas em 1922 para cerca de 100 milhões em 1937. No início da década de 30, o tétrodo de quatro elementos e o pêntodo de cinco elementos ganharam importância na indústria de válvulas eletrónicas.

Posteriormente, a indústria tornou-se uma das mais importantes, e foram obtidos rápidos avanços nas áreas de projeto, técnicas de fabricação, aplicações de alta potência, alta frequência e miniaturização.

Em 23 de dezembro de 1947, entretanto, a indústria eletrónica estava prestes a experimentar uma linha de interesse e desenvolvimento completamente nova. Foi durante a tarde deste dia que Walter H. Brattain e John Bardeen demonstraram a função de amplificação do primeiro transístor, nos laboratórios da companhia Bell Telephone. O transístor original (um transístor de contato de ponta) está mostrado na Fig.1.



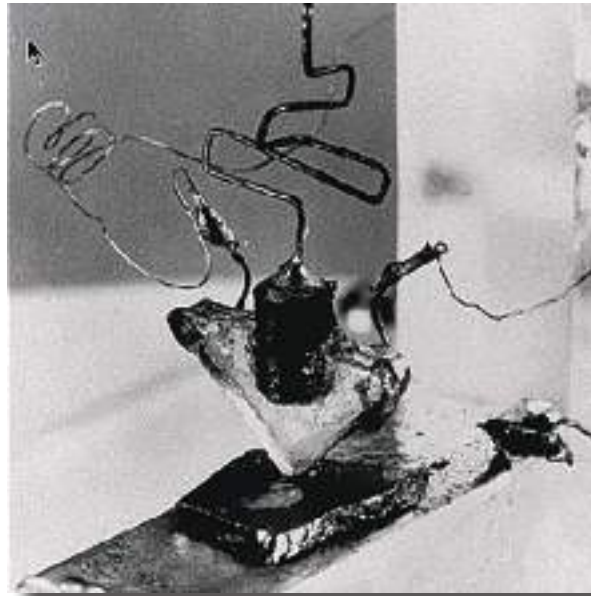


Fig. 1: O primeiro Transistor

As vantagens deste dispositivo de estado sólido de três terminais em relação à válvula eram imediatamente óbvias: menor e mais leve, não apresentava necessidade ou perdas de aquecimento era mais robusto, mais eficiente, já que menos potência era absorvida pelo dispositivo, estava instantaneamente disponível para utilização, não necessitando de um período de aquecimento, e tensões de operação menores poderiam ser utilizadas. Este módulo é a nossa primeira abordagem sobre dispositivos de três ou mais terminais. Iremos descobrir que todos os amplificadores (dispositivos que aumentam a tensão, corrente ou nível de potência) possuirão no mínimo três terminais com um deles controlando o fluxo entre os outros dois.



Construção do transístor

O transístor é um dispositivo semicondutor no qual existe uma camada do tipo p entre duas camadas do tipo n, ou uma camada do tipo n entre duas camadas p. O primeiro é denominado transístor npn, enquanto o último é chamado transístor pnp. Ambos são apresentados na Fig.2, com a polarização dc apropriada. As camadas externas do transístor são materiais semicondutores mais fortemente dopados, com larguras muito maiores do que a camada interna tipo p ou n. Para os transístores mostrados na Fig.2, a razão entre a largura total e a largura da camada central é de $0,150/0,001 = 150:1$. A dopagem da camada interna é também consideravelmente menor do que a das camadas externas (tipicamente, 10:1 ou menor). Este nível de dopagem menor reduz a condutividade (aumenta a resistência) deste material, diminuindo o número de portadores “livres”.

Para a polarização indicada na Fig.2, os terminais são normalmente indicados pela letra maiúscula E para emissor, C para coletor e B para base. Uma avaliação para esta escolha de notação será desenvolvida quando discutirmos a operação básica do transístor. A abreviação TBJ, transístor bipolar de junção, é usualmente aplicada a este dispositivo de três terminais. O termo bipolar reflete o fato de que lacunas e elétrons participam do processo de injeção no material opostamente polarizado. Se for empregue apenas um portador (elétrons ou lacuna), o dispositivo é considerado unipolar.



Operação do Transistor

A operação básica do transistor será agora descrita utilizando o transistor pnp da Fig.2a. A operação do transistor npn é exatamente a mesma, se as funções das lacunas e elétrons fossem trocadas.

Na Fig.3, o transistor pnp foi redesenhado sem a polarização base-coletor. Repare nas semelhanças entre esta situação e a do díodo diretamente polarizado no módulo anterior. A região de depleção foi reduzida em largura devido à tensão aplicada, resultando num fluxo denso de portadores majoritários do material tipo p para o material tipo n.

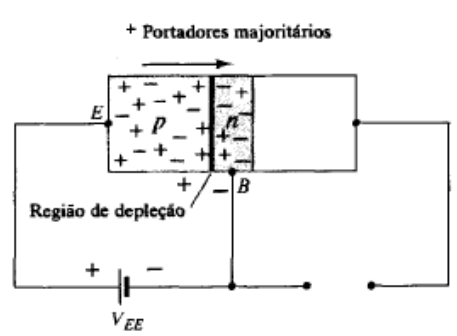


Fig. 3: Junção diretamente polarizada de um transistor tipo PNP

Vamos agora remover a polarização base-emissor do transistor pnp da Fig. 3.2a como mostra a Fig.4. Considere as semelhanças entre esta situação e aquela do díodo inversamente polarizado. Lembre-se de que o fluxo de portadores majoritários é zero, resultando apenas num fluxo de portadores minoritários, como indicado na Fig.4. Em resumo, portanto:

- Uma junção p-n de um transistor está inversamente polarizada, enquanto a outra está diretamente polarizada.



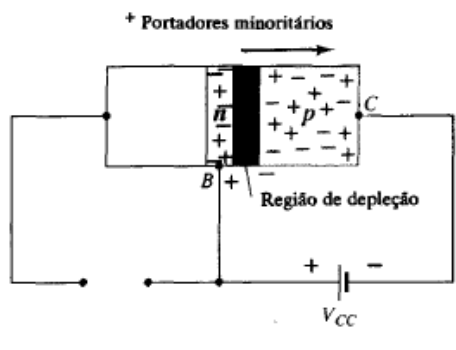


Fig. 4: Junção inversamente polarizada de um transístor PNP

Na Fig.5, ambos os potenciais de polarização foram aplicados a um transístor pnp, com o resultante fluxo de portadores maioritários e minoritários indicados. Note na Fig.5 as larguras das regiões de depleção, indicando claramente qual a junção que está diretamente polarizada e qual está inversamente polarizada. Como indicado na Fig.5, inúmeros portadores maioritários serão injetados através da junção p-n diretamente polarizada, no material tipo n. A questão, portanto, é se estes portadores contribuirão diretamente para a corrente de base I_B , ou se passarão diretamente para o material tipo p. Já que o material tipo n, interno, é muito fino e apresenta uma baixa condutividade, um número muito pequeno de tais portadores adotará este caminho de alta resistência para o terminal da base. O valor da corrente de base é tipicamente da ordem de microampères, enquanto a corrente de coletor e emissor é de miliamperes. Um número maior destes portadores maioritários será injetado, através da junção reversamente polarizada, no material tipo p ligado ao terminal de coletor, conforme a Fig.5. A razão da relativa facilidade com que portadores maioritários podem atravessar a junção inversamente polarizada é facilmente compreendida se considerarmos que para o díodo inversamente polarizado os portadores maioritários comportar-se-ão como portadores minoritários no material tipo n.

Por outras palavras, houve uma injeção de portadores minoritários no material tipo n da base. Combinando isto com o fato de que todos os portadores minoritários na região de depleção atravessarão a junção inversamente polarizada de um díodo, obtém-se o fluxo indicado da Fig.5.



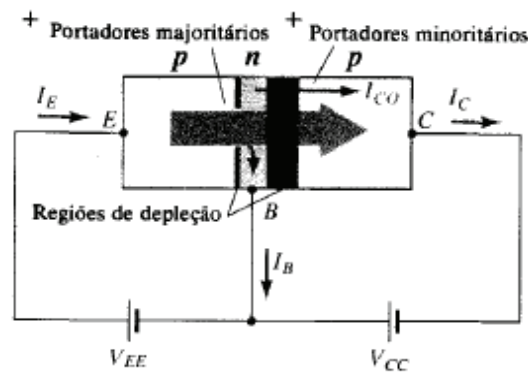


Fig. 5: Fluxo de portadores majoritários e minoritários de um transistor PNP

Aplicando a lei das correntes de Kirchoff ao transistor da Fig.5 como se fosse um nó simples, obtemos:

$$I_E = I_C + I_B$$

E descobrimos que a corrente de emissor é a soma das correntes de base e coletor. A corrente de coletor, entretanto, é composta de dois elementos: os portadores majoritários e minoritários indicados na Fig.5. A componente de portadores minoritários é chamada corrente de fuga, e é dada o símbolo I_{CO} — (corrente I_C com terminal do emissor aberto Open). A corrente de coletor, portanto, é determinada pela equação:

$$I_C = I_{C \text{ majoritário}} + I_{CO \text{ majoritário}}$$

Para os transistores usuais, I_C é da ordem de miliampères, enquanto I_{CO} é medido em microampères ou nano ampères. I_{CO} , assim como I_S , para um díodo inversamente polarizado, é sensível à temperatura e deve ser analisado cuidadosamente quando a faixa de variação da temperatura para a aplicação for extensa. Em temperaturas elevadas, este parâmetro pode afetar consideravelmente a estabilidade de um sistema que não considera apropriadamente o seu efeito. Melhorias implementadas nas técnicas de construção resultaram em níveis significativamente menores de I_{CO} , chegando a um ponto em que seu efeito pode, na maioria das vezes, ser ignorado.



Configurações do Transístor

Configuração Base-Comum (BC)

A notação e símbolos para o transístor, utilizados atualmente na maioria dos textos e manuais publicados, estão indicados na Fig.6 para a configuração base-comum com transístores pnp e npn.

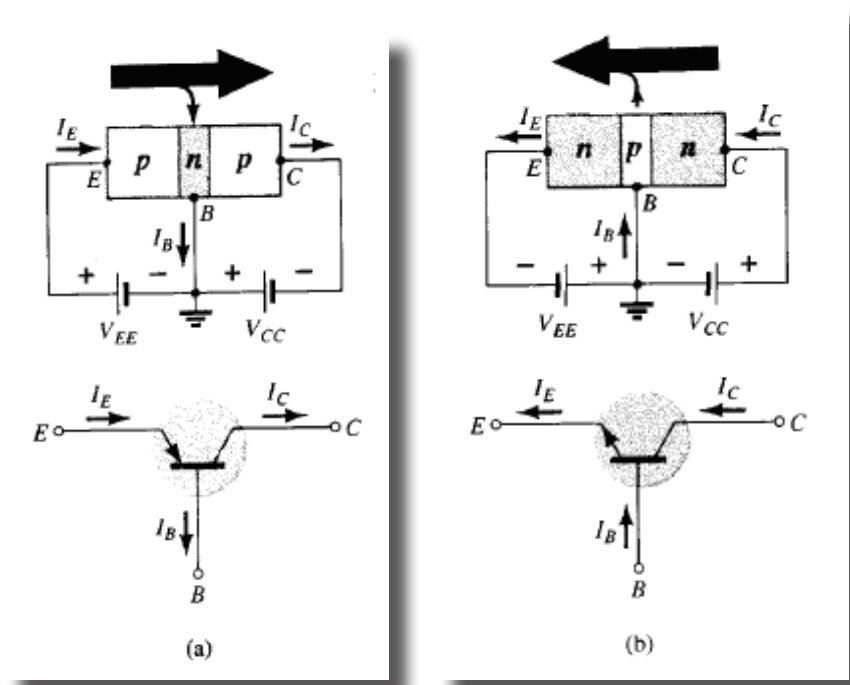


Fig. 6: Notação e símbolos utilizados para configuração base comum:
 (a) transístor pnp, (b) transístor npn.

A terminologia base-comum deriva do fato de a base ser comum tanto à entrada quanto à saída da configuração. Além disso, a base é normalmente o terminal ligado à terra ou com um nível de potencial mais próximo ao terra.

Para o transístor a seta do símbolo gráfico define o sentido da corrente de emissor (fluxo convencional) através do dispositivo.

Todos os sentidos de correntes apresentados na Fig.6 são os sentidos reais, definidos pelo fluxo convencional.



Note que em cada caso $I_E = I_C + I_B$. De notar também que as polarizações aplicadas (fontes de tensão) são tais que estabelecem uma corrente com o sentido indicado em cada ramo. Ou seja, compare o sentido de I_E à polaridade de V_{EE} para cada configuração, e o sentido de I_C à polaridade de V_{CC} .

Para descrever totalmente o comportamento de um dispositivo de três terminais, como o dos amplificadores em base-comum da Fig.6, são exigidos dois conjuntos de curvas características: um para o ponto de excitação, ou parâmetros de entrada, e o outro para a saída. O conjunto de entrada para o amplificador em base-comum, mostrado na Fig.7, relacionará uma corrente de entrada (I_E) a uma tensão de entrada (V_{BE}) para vários níveis de tensão de saída (V_{CB}).

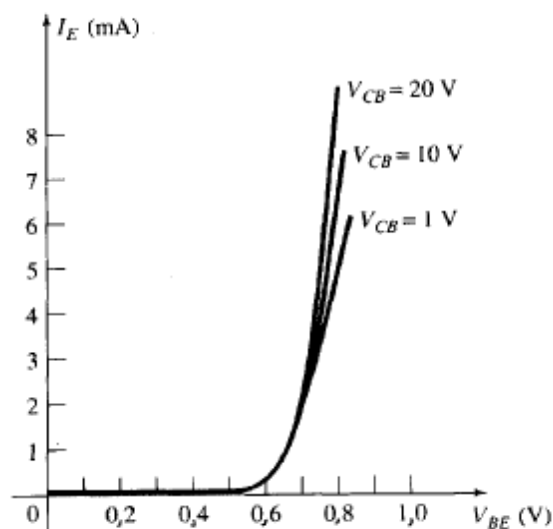


Fig. 7: Curvas características de entrada para um transistor amplificador de silício em base comum

O conjunto de saída relacionará uma corrente de saída (I_C) a uma tensão de saída (V_{CB}) para vários níveis de corrente de entrada (I_E), como mostra a Fig.8. O conjunto de curvas características de saída ou de coletor tem três regiões de interesse indicadas na Fig.8:

- *Ativa,*
- *Corte*
- *Saturação.*



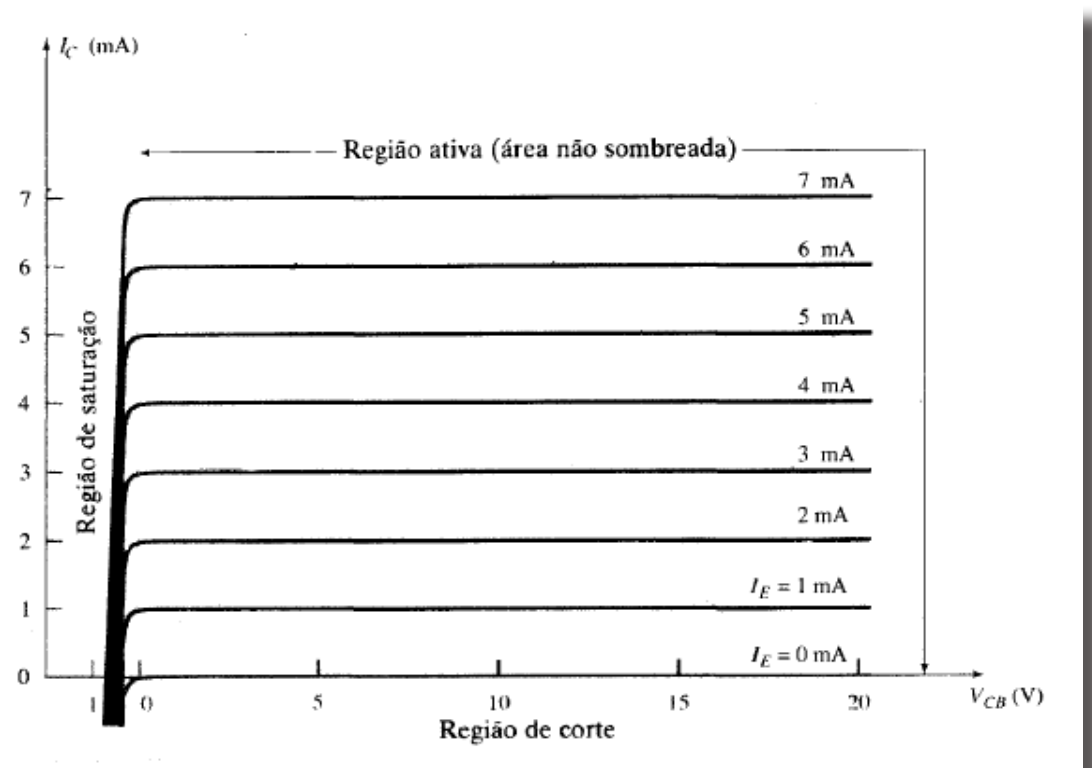


Fig. 8: Curvas características de saída ou de coletor para um transistor amplificador em base comum

A região ativa é aquela normalmente utilizada para amplificadores lineares (não-distorcidos). Em particular:

- Na região ativa, a junção coletor-base esta inversamente polarizada, enquanto a junção base-emissor esta diretamente polarizada.

A região ativa é definida pelos esquemas de polarização da Fig.6. No extremo inferior da região ativa, a corrente de emissor (I_E) é zero, a corrente de coletor é devida exclusivamente à corrente de saturação inversa I_{CO} , como indicado na Fig.8. O valor de corrente I_{CO} é tão pequeno (microamperes) comparado à escala vertical de I_C (miliamperes), que se localiza virtualmente na mesma linha horizontal de $I_C = 0$. As condições de circuito que existem quando $I_E = 0$ para a configuração base-comum estão apresentadas na Fig.9. A notação utilizada mais frequentemente para I_{CO} em folhas de especificação e de dados (DataSheets) é, como indicado na Fig.9, I_{CBO} . Devido a técnicas de construção avançadas, o valor de I_{CBO} para transístores de propósito geral (sobretudo o silício) na faixa de baixa e média potência é normalmente tão pequeno que o seu efeito pode ser



ignorado. Entretanto, para níveis de potência maiores, I_{CBO} ainda se situará na faixa de microamperes. Além disso, saiba que I_{CBO} , assim como I_S para o diodo (ambas correntes de fuga inversas), é sensível à temperatura.

Em temperaturas mais elevadas, o efeito de I_{CBO} pode tornar-se um importante fator, uma vez que este aumenta rapidamente a temperatura.

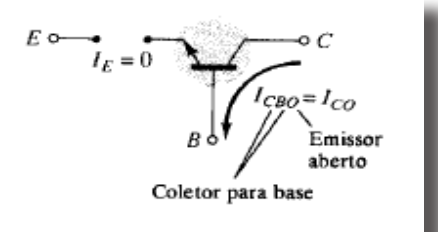


Fig. 9: Corrente de saturação inversa

Observe na Fig.8 que à medida que a corrente de emissor aumenta a partir de zero, a corrente de coletor aumenta até um valor essencialmente igual ao da corrente de emissor, determinada pelas relações básicas de corrente no transistor. Note ainda o efeito quase que desprezível de V_{CB} sobre a corrente de coletor para a região ativa. As curvas indicam claramente que uma primeira aproximação para a relação entre I_E e I_C na região ativa é dada por:

$$I_C \cong I_E$$

A região de saturação é definida como aquela que se situa à esquerda de $V_{CB} = 0 V$. A escala horizontal foi expandida para mostrar as diferenças marcantes desta região.

Observe o aumento exponencial da corrente de coletor à medida que a tensão V_{CB} aumenta em direção a 0V.

Na região de saturação, as junções coletor-base e base emissor estão diretamente polarizadas.



As curvas características de entrada da Fig.7 revelam que para valores fixos de tensão de coletor (V_{CB}), a corrente de emissor aumenta quando a tensão base-emissor aumenta, comportamento que se assemelha às características do diodo. Na verdade, valores crescentes de V_{CB} têm um efeito tão pequeno que para uma primeira aproximação consideram-se desprezáveis as modificações introduzidas pela variação de V_{CB} , de modo que a curva característica pode ser desenhada tal como mostrado na Fig.10a. Se fizermos uma aproximação de maneira linear da curva, o resultado pode ser visto na Fig. 3.10b.

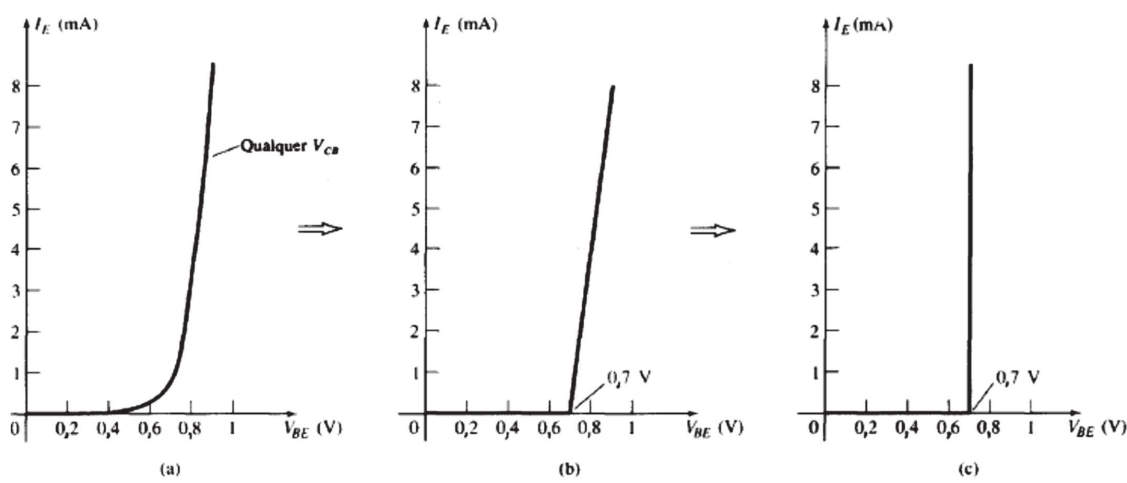


Fig. 10: Desenvolvendo um modelo equivalente com análise dc para ser empregue para a região base-emissor de um amplificador

Prosseguindo e ignorando a inclinação da curva, e portanto a resistência associada à junção diretamente polarizada, resulta na curva característica da Fig.10c. Para as análises posteriores neste módulo, o modelo equivalente da Fig.10c será empregue em toda análise dc de circuitos com transistor. Ou seja, estando o transistor no estado “ligado”, a tensão base-emissor adotada será a seguinte:

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

Por outras palavras, o efeito das variações devido à V_{CB} e a inclinação da curva característica de entrada será ignorado. No nosso estudo, desejamos analisar circuitos com transistor de um modo que forneça boas aproximações para os resultados reais, sem se envolver muito com variações de parâmetros de menor importância.



É importante avaliar totalmente a informação obtida da curva característica da Fig.10c. Ela especifica que com o transistor no estado "ligado", ou ativo, a tensão de base para o emissor será 0,7 V, qualquer que seja o valor da corrente de emissor controlado pelo circuito externo. Na verdade, para qualquer configuração de transistor no modo dc, pode-se agora afirmar imediatamente que a tensão da base para o emissor é de 0,7 V, se o dispositivo estiver na região ativa – uma conclusão muito importante para a análise dc que vem a seguir.

Exercícios:

1. Utilizando as curvas características da Fig.8, determine a corrente de coletor resultante de $I_E = 3mA$ e $V_{CB} = 10V$.
2. Utilizando as curvas características da Fig.8, determine a corrente de coletor resultante se I_E permanecer em $3mA$, mas V_{CB} é reduzido para 2 V.
3. Utilizando as curvas características das Figs.7 e 8, determine V_{BE} se $I_C = 4mA$ e $V_{CB} = 20V$.
4. Repita a letra (c) utilizando as curvas características das Figs.8 e 10c.

Alfa (α)

Na análise dc, os valores de I_C e I_E devidos aos portadores majoritários são relacionados por um parâmetro denominado alfa e definido pela equação:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

Onde I_C e I_E são os níveis de corrente no ponto de operação. Apesar da curva característica da Fig.8 sugerir que $\alpha = 1$, os dispositivos na prática apresentam valores de alfa a variar entre 0,90 e 0,998, sendo que a maioria deles possui um alfa próximo ao extremo superior da faixa. Como alfa é definido exclusivamente para portadores majoritários, a Equação:



$$I_C = I_{C \text{ maioritario}} + I_{CO \text{ maioritário}}$$

Torna-se:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

Para a curva característica da Fig.8, quando $I_E = 0 \text{ mA}$, I_C é igual a I_{CBO} , entretanto, como já foi mencionado, o valor de I_{CBO} é normalmente tão pequeno que não é possível detetá-lo no gráfico da Fig.8. Por outras palavras, quando $I_E = 0 \text{ mA}$ na Fig.8, assume-se também o valor de 0 mA para a faixa de valores de V_{CB} .

Em situações de análise ac, onde o ponto de operação se move sobre a curva característica, alfa ac é definido por:

$$\alpha_{ac} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}, \text{ com } V_{CB} \text{ constante}$$

O alfa ac é formalmente chamado de base-comum, curto-circuito, fator de amplificação. Observe que a equação anterior especifica que uma pequena variação na corrente de coletor é dividida pela variação correspondente da corrente de emissor, com a tensão coletor-base mantida constante. Para a maioria dos casos, os valores de α_{ac} e α_{dc} são bem próximos, permitindo a substituição de um pelo outro.

Polarização

A polarização apropriada da configuração base-comum na região ativa pode ser determinada rapidamente, utilizando a aproximação $I_C = I_E$ assumindo, por enquanto, que $I_B \cong 0 \mu\text{A}$. O resultado é a configuração da Fig.11 para o transistor *pnp*. A seta do símbolo define o sentido do fluxo convencional para $I_C = I_E$. As fontes dc são inseridas com uma polaridade de acordo com o sentido da corrente resultante. Para o transistor *nnp*, as polaridades serão invertidas.



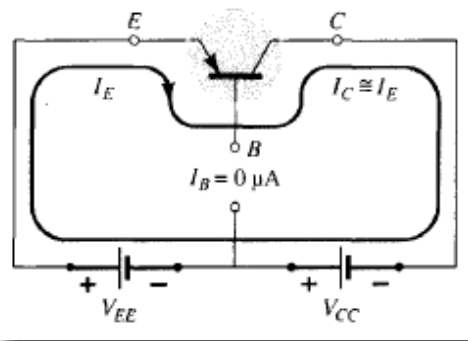


Fig. 11: Estabelecendo a polarização apropriada para um transistor pnp, em base comum na região ativa

Configuração Emissor-Comum (EC)

A configuração mais frequentemente utilizada para o transistor aparece na Fig.12, com transistores pnp e npn. É denominada configuração emissor-comum, uma vez que o emissor é comum em relação aos terminais de entrada e saída (neste caso, comum aos terminais de coletor e base). Dois conjuntos de curvas características são novamente necessários para descreverem totalmente o comportamento da configuração emissor-comum: um para o circuito de entrada ou base-emissor e um para o circuito de saída ou coletor-emissor. Ambos apresentados na Fig.13.

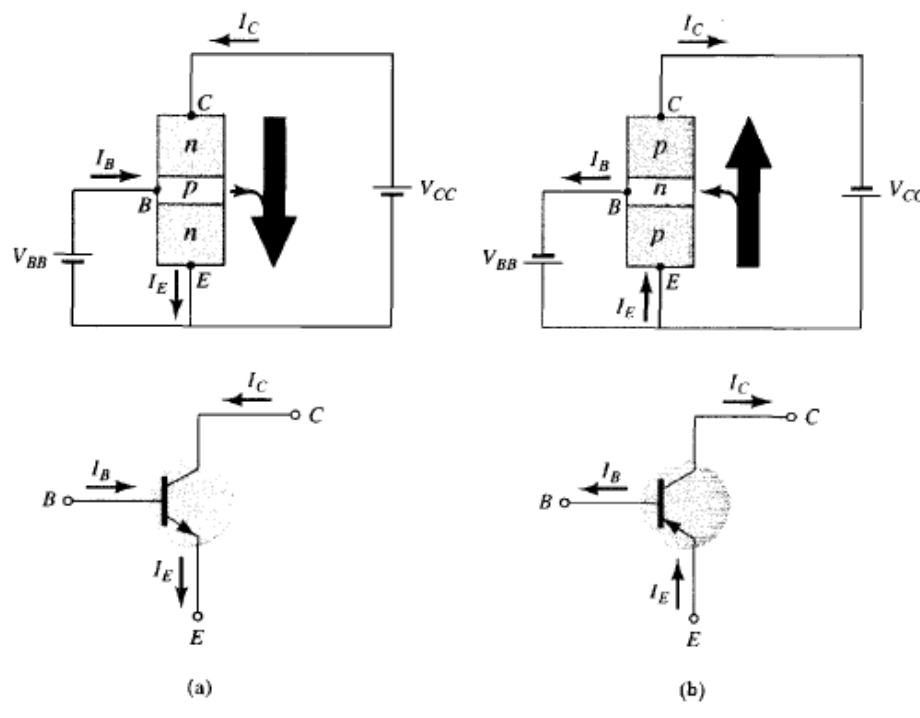


Fig. 12: Notação e símbolos utilizados na configuração emissor-comum:
(a) transistor npn; (b) transistor pnp



As correntes de emissor, coletor e base são mostradas com o sentido convencional adotado para as correntes. Apesar de a configuração para o transistor ter sido alterada, as relações de corrente desenvolvidas anteriormente para a configuração base-comum são ainda aplicáveis. Isto é, $I_E = I_C + I_B$ e $I_C = \alpha I_E$

Para a configuração emissor-comum, as características de saída são representadas pelo gráfico da corrente de saída (I_C) versus a tensão de saída (V_{CE}), para uma faixa de valores de corrente de entrada (I_B). As características de entrada são representadas pelo gráfico de corrente de entrada (I_B) versus a tensão de entrada (V_{BE}), para uma faixa de valores de tensão de saída (V_{CE}).

Observe que nas características apresentadas pela Fig.13 o valor de I_B está em microamperes, comparado aos miliamperes de I_C . Considere também que as curvas de I_B não estão tão horizontais quanto aquelas obtidas para I_E na configuração base-comum, indicando que a tensão coletor-emissor influencia no valor da corrente de coletor.

A região ativa para a configuração emissor-comum é a porção do quadrante superior direito que apresenta a maior linearidade, isto é, a região na qual as curvas de I_B são mais ou menos retas e estão igualmente espaçadas. Na Fig.13a, esta região situa-se à direita da linha vertical em V_{CEsat} e acima da curva para I_B igual a zero. A região à esquerda de V_{CE} é chamada região de saturação.

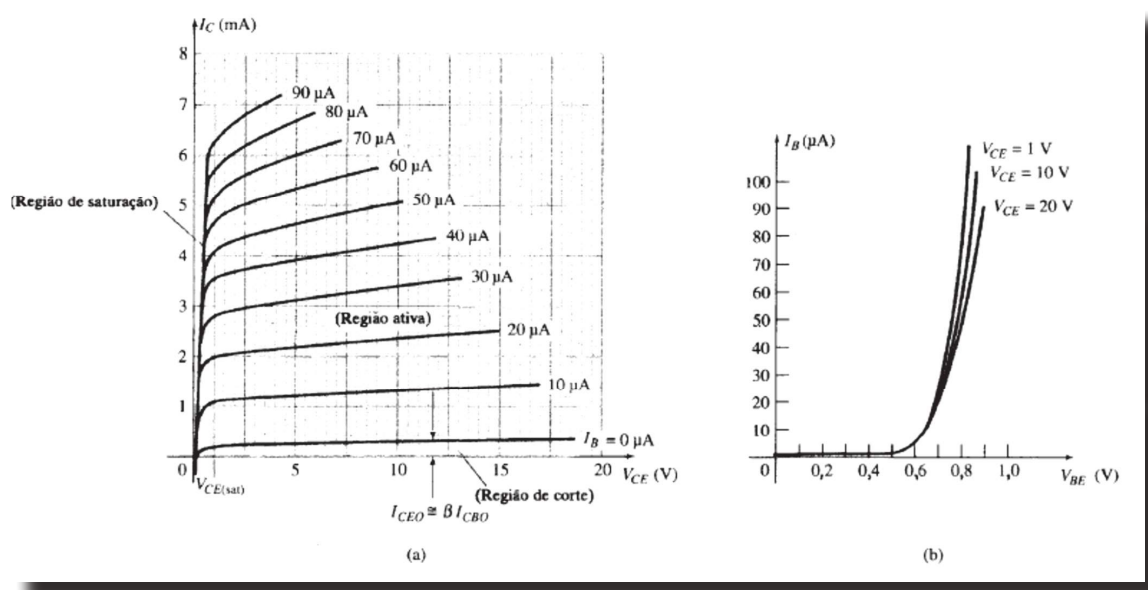


Fig. 13: Curva característica de um transistor de silício na configuração emissor-comum: (a) características do coletor; (b) características de base



Na região ativa de um amplificador em emissor-comum, a junção coletor-base está inversamente polarizada, enquanto a junção base-emissor está diretamente polarizada. Observe que a afirmação acima estabelece as mesmas condições que existiam na região ativa da configuração base-comum.

A região ativa da configuração emissor-comum pode ser empregue para amplificação de tensão, corrente ou potência. A região de corte da configuração emissor-comum não é definida da mesma maneira estabelecida para a configuração base-comum.

Note nas características de coletor da Fig.13 que I_C não é igual a zero quando I_B é zero. Para a configuração base-comum, quando a corrente de entrada I_E era igual a zero, a corrente de coletor era igual somente à corrente de saturação reversa I_{CO} , de modo que a curva $I_E=0$ e o eixo das tensões eram considerados coincidentes.

A razão para esta diferença observada nas características de coletor pode derivar de uma manipulação apropriada das Eqs.

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

Substituindo, vem:

$$I_C = \alpha (I_C + I_B) + I_{CBO}$$

Rearranjando, aparece:

$$I_C = \frac{\alpha I_B}{1 - \alpha} + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha}$$

Se considerarmos o caso discutido acima, onde $I_B = 0$ A, e substituirmos por um valor típico de α , tal como 0,996, a corrente de coletor resultante é a seguinte:

$$I_C = \frac{\alpha(0A)}{1 - \alpha} + \frac{I_{CBO}}{1 - 0,996} = 250I_{CBO}$$

Se $I_{CBO}=0$ fosse $1\mu A$, a corrente de coletor resultante com $I_B=0A$ seria $250 \times (1\mu A) = 0,25mA$, refletindo na curva característica da Fig.13.



Como referência futura, a corrente de coletor definida para a condição $I_B = 0\mu A$ terá a notação indicada pela seguinte equação.

$$I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha}, \text{ para } I_B = 0$$

Na Fig. 14, as condições que envolvem esta corrente são demonstradas com o seu sentido de referência assinalado.

Para uma amplificação linear (distorção mínima), a região de corte para a configuração emissor-comum será definida por $I_C = I_{CEO}$.

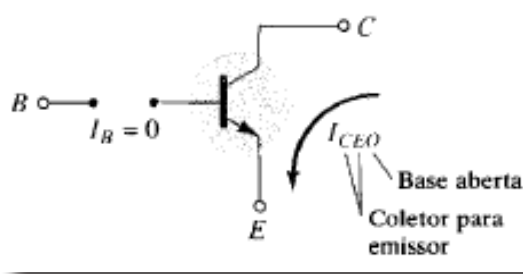


Fig. 14: Condições do circuito relacionadas a I_{CEO}

Por outras palavras, a região abaixo de $I_B = 0 \mu A$ deve ser evitada para que o sinal não seja distorcido. Quando empregue como chave/comutador num circuito lógico de computador, o transistor terá dois pontos de operação de interesse, um na região de corte e outro na região de saturação. A condição de corte deveria idealmente estabelecer $I_C = 0 \text{ mA}$ para a tensão V_{CE} escolhida. Como o valor de I_{CEO} é tipicamente baixo para o silício, o corte em termos de comutação ocorrerá quando $I_B = 0\mu A$ ou $I_C = I_{CEO}$, para transistores de silício somente. Para transistores de germânio, entretanto, o corte para a comutação ocorrerá quando houver as condições resultantes de I_C .

Em geral, esta condição pode ser obtida em transistores de germânio, invertendo-se a polarização da junção base-emissor em algumas dezenas de volts.

Lembre-se de que, para a configuração base-comum, o conjunto de curvas características para a entrada era aproximadamente uma linha reta, resultando em $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ para



qualquer valor de I_E maior do que 0 mA. Para a configuração emissor-comum, a mesma consideração pode ser feita, resultando na Fig.15. Os resultados apoiam a nossa conclusão anterior de que para um transistor na região ativa ou “ligada” a tensão base-emissor é de 0,7V. Neste caso, a tensão está fixa para qualquer valor de corrente de base.

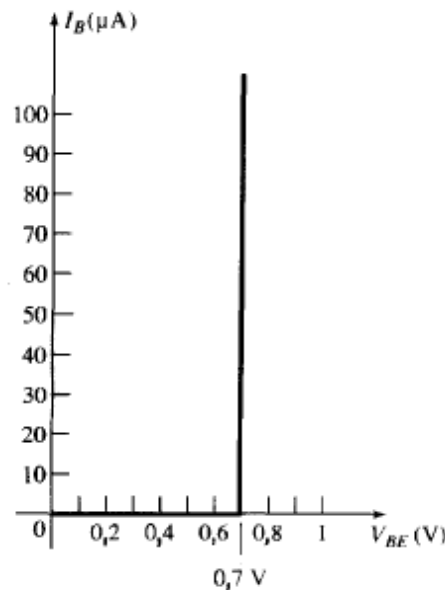


Fig. 15: Aproximação linear equivalente à curva característica do transistor da fig 13b

Exercícios:

1. Utilizando as características da Fig.13, determine I_C em $I_B = 30 \mu\text{A}$ e $V_{CE} = 10 \text{ V}$.
2. Utilizando as características da Fig.13, determine I_C em $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ e $V_{CE} = 15 \text{ V}$.

Beta (β)

Na análise dc os valores de I_C e I_B são relacionados por um parâmetro denominado beta e definido pela seguinte equação:

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



Onde I_C e I_B são determinados por um ponto de operação particular na curva característica. Os dispositivos na prática apresentam valores de β que variam tipicamente de 50 até 400, concentrados, na sua grande maioria, no meio da faixa. Assim como α , β certamente mostra o valor relativo de uma corrente em relação a outra. Para um dispositivo com um β de 200, a corrente de coletor é 200 vezes maior do que a corrente de base.

Nas folhas de especificações (DataSheets), β_{dc} é normalmente incluído como h_{FE} , com h a derivar do circuito equivalente ac híbrido.

As letras FE são derivadas da amplificação de corrente direta (forward) e configuração emissor-comum, respetivamente. Para a análise ac, um beta ac foi definido como se segue:

$$\beta_{ac} = \frac{\diamond I_C}{\diamond I_B}, \text{ Com } V_{CE} \text{ constante}$$

O nome formal para β_{ac} é fator de amplificação de corrente direta em emissor-comum. Uma vez que a corrente de coletor é, normalmente, a corrente de saída para a configuração emissor-comum, e a corrente de base é a corrente de entrada, o termo amplificação é incluído na nomenclatura acima.

A Equação acima é semelhante em formato à equação para α_{ac} na Seção anterior. O procedimento para a obtenção de α_{ac} das curvas características não foi descrito por causa da dificuldade de se medir variações de I_C e I_E nas curvas. A Equação de β , entretanto, pode ser descrita com alguma clareza e, na verdade, o resultado pode ser utilizado para se determinar α_{ac} , utilizando uma equação a ser descrita em breve.

Nas folhas de especificação, (β_{ac} é normalmente incluído como h_{fe}). Observe que a única diferença entre a notação utilizada para o β_{dc} , especificamente, $\beta_{dc}=h_{FE}$, e o tipo de letra subscrita. A letra minúscula h continua a referir-se ao circuito equivalente, e fe refere-se ao ganho de corrente direta (forward) na configuração emissor-comum.



A utilização da equação é mais bem descrita através de um exemplo numérico, utilizando o conjunto de características mostrado na Fig. 13a e repetido na Fig.16. Vamos determinar β_{ac} para uma região do gráfico definida pelo ponto de operação $I_B = 25 \mu A$ e $V_{CE} = 7,5$ V, como indicado na Fig.16. A restrição de V_{CE} ser constante exige que uma linha vertical seja desenhada através do ponto de operação $V_{CE} = 7,5$ V. Em qualquer ponto desta linha vertical, a tensão V_{CE} é de 7,5 V, uma constante.

A variação em I_B ($\diamond I_B$) como a que aparece na equação é, portanto, definida pela escolha de dois pontos acima e abaixo do ponto Q, ao longo de uma linha vertical, com distâncias aproximadamente iguais em relação ao ponto Q. Para esta situação, as curvas $I_B = 20 \mu A$ e $I_B = 30 \mu A$ atendem à exigência sem se distanciarem muito do ponto Q. As curvas também estabelece valores para I_B , sendo desnecessária a interpolação de valores.

Deve ser mencionado que a melhor determinação é normalmente feita mantendo-se $\diamond I_B$ o menor possível. Nas duas interseções de I_B e o eixo vertical, os dois valores de I_{C1} e I_{C2} são obtidos do eixo das ordenadas. O β_{ac} resultante para a região pode ser determinado por:

$$\beta_{ac} = \frac{\diamond I_C}{\diamond I_B} = \frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{B2} - I_{B1}} \beta_{ac} = \frac{3,2 mA - 2,2 mA}{30 \mu A - 20 \mu A} = \frac{1 mA}{10 \mu A} = 100$$

A solução acima revela que, para uma entrada ac na base, a corrente de coletor será aproximadamente 100 vezes maior do que a corrente de base.

Se determinarmos o beta dc no ponto Q:

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2,7 mA}{25 \mu A} = 108$$



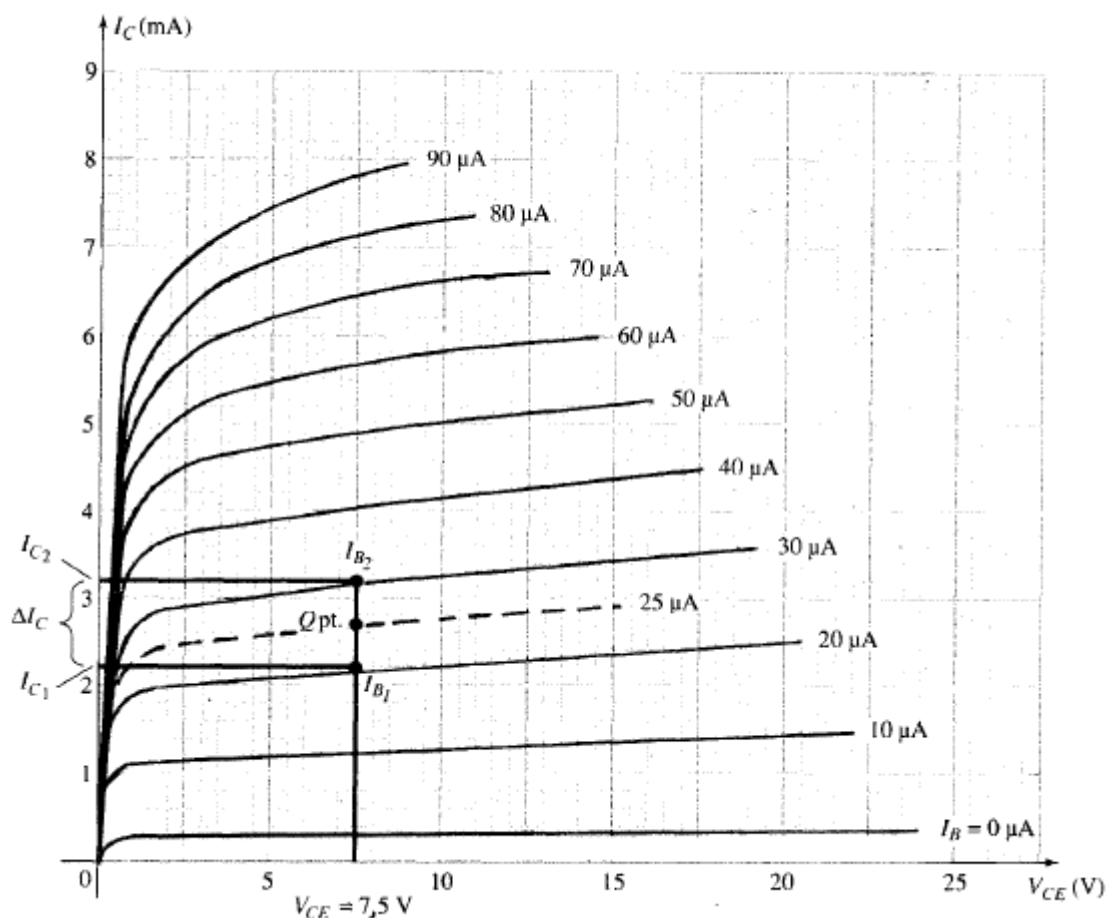


Fig. 16: Determinação de β_{ac} e β_{dc} das curvas características para o coletor

Embora não sejam exatamente iguais, em geral, os valores de β_{ac} e β_{dc} são bem próximos e podem ser empregues indistintamente.

Isto é, se β_{ac} é conhecido, assume-se que o valor de β_{dc} seja mais ou menos o mesmo, e vice-versa. Tenha em mente que num mesmo lote o valor de β_{ac} irá variar de um transistor para outro, apesar de todos os transístores possuírem o mesmo número de código. A variação pode não ser significativa, mas, para a maioria das aplicações, é certamente suficiente para validar a aproximação feita acima. Genericamente, quanto menor for o valor de I_{CEO} , mais próximos são os valores dos dois betas. O que se verifica na prática são valores de I_{CEO} cada vez menores, validando a aproximação anterior.



Se as curvas características têm o aspecto apresentado na Fig.17, o valor de β_{ac} é o mesmo em qualquer região das curvas. Observe que o intervalo para I_B é constante e igual a $10 \mu\text{A}$, e a distância vertical entre as curvas é a mesma em qualquer ponto - neste caso, 2 mA . O cálculo do valor de β_{ac} no ponto Q indicado resulta em:

$$\beta_{ac} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{9 \text{ mA} - 7 \text{ mA}}{45 \mu\text{A} - 35 \mu\text{A}} = \frac{2}{10} = 200$$

A determinação do beta dc no mesmo ponto Q resulta em:

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{8 \text{ mA}}{40 \mu\text{A}} = 200$$

Revelando que, se as curvas têm o aspecto mostrado na Fig.17, o valor de β_{ac} e β_{dc} será o mesmo em qualquer ponto da curva. Em particular, note que $I_{CEO} = 0 \mu\text{A}$.

Embora na prática não se encontre um conjunto de transístores com curvas características exatamente iguais às da Fig.17, esta fornece um conjunto de curvas características que pode ser comparado aos resultados obtidos de um traçador de curva.

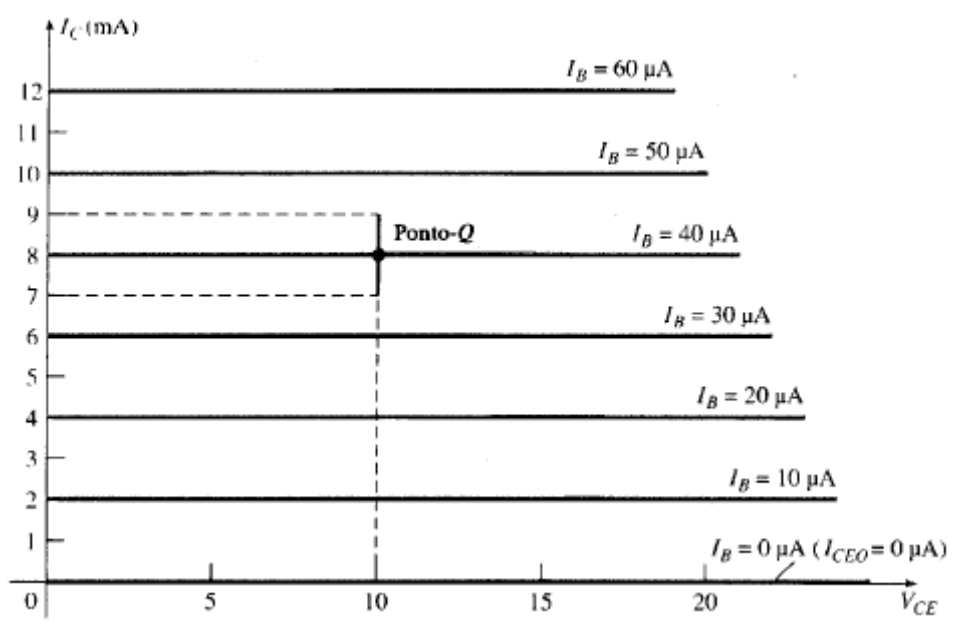


Fig. 17: Curvas características nas quais β_{ac} é o mesmo em qualquer ponto, e $\beta_{ac} = \beta_{dc}$.



Na análise a seguir, o subscrito dc ou ac não será empregue para β , evitando-se, assim, que as expressões tenham símbolos desnecessários. Para situações de análise dc, β será reconhecido simplesmente como β_{dc} , e para a análise ac, β_{ac} . Se um valor de β é especificado para uma configuração em particular do transístor, normalmente serão realizados ambos os cálculos, dc e ac.

Utilizando-se as relações básicas desenvolvidas até o momento, uma expressão pode ser desenvolvida relacionando β e α .

Usando $\alpha = \frac{I_C}{I_B}$, temos $I_B = \frac{I_C}{\beta}$, e de $\alpha = \frac{I_C}{I_E}$, temos $I_E = \frac{I_C}{\alpha}$. Substituindo em:

$$I_E = I_C + I_B$$

Nos temos

$$\frac{I_C}{\alpha} = I_C + \frac{I_C}{\beta}$$

E dividindo ambos os lados da equação por I_C resulta em:

$$\frac{1}{\alpha} = 1 + \frac{1}{\beta}$$

Ou

$$\beta = \alpha\beta + \alpha = (\beta + 1)\alpha$$

Portanto

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

Ou

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$



Alem disso, é de lembrar que

$$I_{ceo} = \frac{I_{ceo}}{1 - \alpha}$$

Usando a equivalência

$$\frac{1}{1 - \alpha} = \beta + 1$$

Chegamos a

$$I_{ceo} = (\beta + 1)I_{ceo}$$

Ou

$$I_{ceo} = \beta I_{ceo}$$

Como indicado na Fig.13a. Beta é um parâmetro particularmente importante, porque fornece uma relação direta entre níveis de corrente dos circuitos de entrada e saída para uma configuração emissor-comum. Isto é

$$I_C = \beta I_B$$

E já que

$$I_E = I_C + I_B \quad I_E = \beta I_B + I_B$$

Nos temos

$$I_E = (\beta + 1)I_B$$



Polarização

A polarização apropriada de um amplificador em emissor-comum pode ser determinada de maneira semelhante àquela introduzida para a configuração base-comum. Vamos assumir que temos um transistor npn tal como mostra a Fig.18a, e a proposta é polarizar apropriadamente o dispositivo para operá-lo na região ativa.

O primeiro passo é indicar o sentido de I_E , determinado pela seta no símbolo do transistor da Fig. 18b. Em seguida, outras correntes são introduzidas como mostrado, sabendo-se que $I_E = I_C + I_B$ segundo a lei das correntes de Kirchhoff. Finalmente, as fontes são introduzidas com polaridades que estão de acordo com os sentidos de I_C e I_B . A mesma abordagem pode ser feita para os transistores pnp. Se o transistor da Fig.18 fosse um transistor pnp, todas as correntes e polaridades da Fig.18c seriam invertidas.

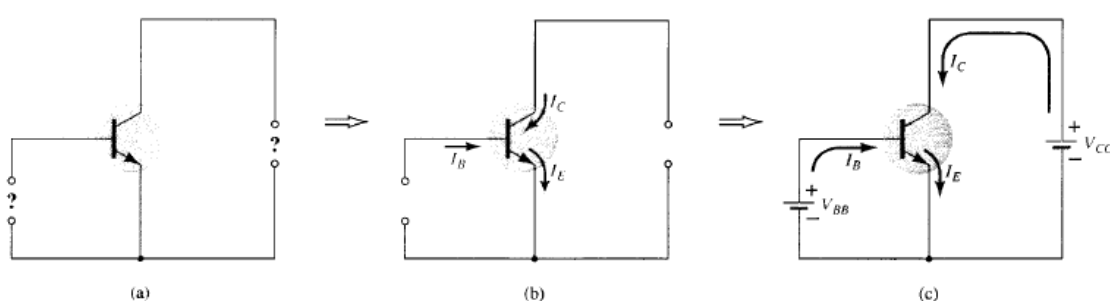


Fig. 18: Determinando a polarização apropriada para um transistor npn em configuração emissor-comum

Configuração Coletor-Comum (CC)

A terceira e última configuração utilizada é a configuração coletor comum mostrada na Fig.19 com as notações adequadas de tensão e corrente. A configuração coletor-comum é utilizada principalmente para o acasalamento de impedância, uma vez que esta configuração apresenta uma alta impedância de entrada e uma baixa impedância de saída, revelando-se em uma situação diferente daquela encontrada para as configurações coletor-comum e base-comum.



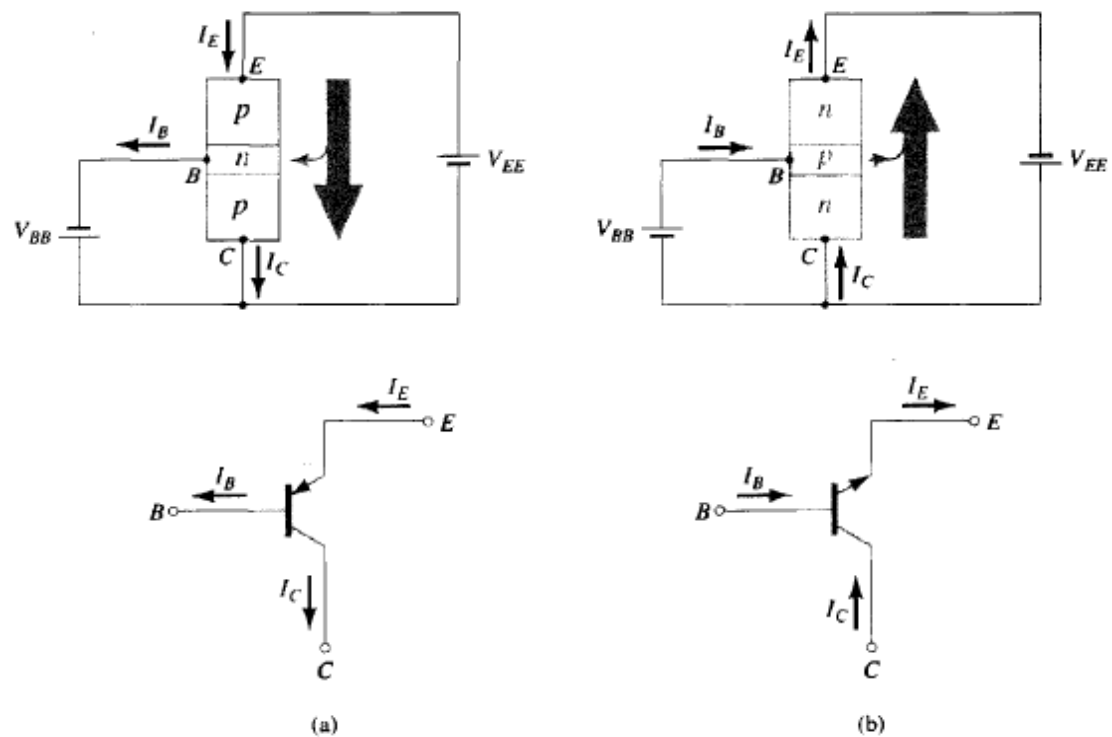


Fig. 19: Notação e símbolos utilizados para a configuração coletor-comum:

(a) transistor pnp (b) transistor npn

Uma configuração coletor-comum está mostrada na Fig.20 com a resistência de carga ligada do emissor para a terra. Apesar de o transistor estar conectado de uma forma que se assemelha à configuração emissor-comum, o coletor está ligado à massa (terra). Do ponto de vista de projeto, não há necessidade de um conjunto de curvas características sobre a configuração coletor-comum, para escolher os parâmetros do circuito da Fig.20.

O projeto pode ser feito, utilizando-se as características do emissor-comum. Na prática, as curvas características de saída para a configuração coletor-comum são iguais às curvas características da configuração emissor-comum. Para a configuração coletor-comum, o gráfico de I_E versus V_{EC} para um conjunto de valores de I_B representa a curva característica da saída. A corrente de entrada, portanto, é a mesma para as configurações coletor-comum e emissor-comum. O eixo horizontal que representa a tensão para a configuração coletor-comum é obtido simplesmente se invertermos o sinal da tensão coletor-emissor das curvas. Finalmente, há uma diferença sutil na escala vertical de I_C para as curvas do emissor-comum, se I_C é substituído por I_E para as curvas características



do coletor-comum (pois $\alpha = 1$). Para o circuito de entrada da configuração coletor-comum, as curvas características levantadas para a base do emissor-comum são suficientes para se obter as informações necessárias.

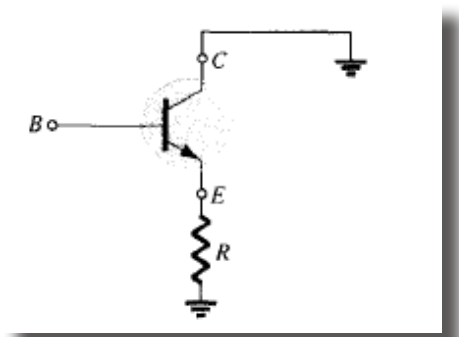


Fig. 20: Configuração coletor-comum utilizada para acasalamento de impedância



Limites de Operação

Para cada transistor, há uma região de operação nas curvas que assegura que os limites para o transistor serão respeitados e que o sinal de saída conterá um mínimo de distorção. Esta região foi definida para as curvas características de um transistor da Fig.21. Todos os limites de operação são definidos, baseados numa folha de especificações típica.

Alguns dos limites de operação são auto explicativos, como a corrente máxima de coletor (normalmente referida nas folhas de especificações como corrente de coletor contínua) e a tensão máxima coletor-emissor (frequentemente abreviada como V_{CEO}).

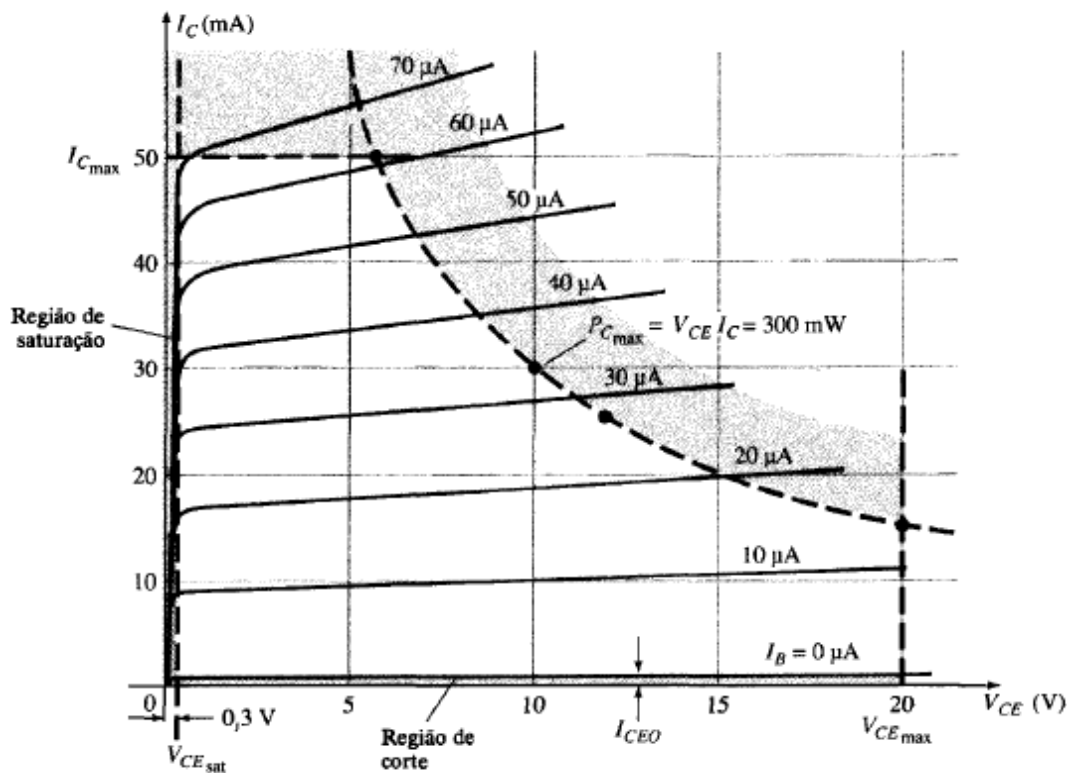


Fig. 21: Definição da região linear (sem distorção) de operação de um transistor

Para o transistor da Fig.21, $I_{C\max}$ e V_{CEO} foram especificados como sendo de 50 mA e 20 V, respetivamente. A linha vertical no gráfico, representando por $V_{CE\text{sat}}$ especifica o valor mínimo de V_{CE} que pode ser aplicado sem que o transistor caia na região não-linear, denominada região de saturação. Em geral, o valor da $V_{CE\text{sat}}$ é de cerca de 0,3 V para este transistor.



O valor máximo de dissipação de potência é determinado pela seguinte equação:

$$P_{C_{max}} = V_{CE} I_C = 300mW$$

Em qualquer ponto das curvas, o produto de V_{CE} por I_C deve ser igual a 300 mW. Se escolhermos o valor de I_C máximo, 50 mA, e substituirmos na relação acima, obtemos:

$$V_{CE} I_C = 300mW$$

$$V_{CE} \times 50mA = 300mW$$

$$V_{CE} = \frac{300mW}{50mA} = 6V$$

Como resultado, achamos que $I_C = 50$ mA, portanto $V_{CE} = 6V$ na curva de dissipação de potência, como indicado na Fig.21.

Se agora escolhermos o valor máximo de V_{CE} , 20 V, o valor de I_C é o seguinte:

$$V_{CE} I_C = 300mW$$

$$20V \times I_C = 300mW$$

$$I_C = \frac{300mW}{20V} = 15mA$$

Definindo um segundo ponto na curva de potência. Escolhendo agora um valor intermedio de I_C , como por exemplo, 25 mA, e solucionando para o valor resultante de V_{CE} , obtemos:

$$V_{CE} I_C = 300mW$$

$$V_{CE} \times 25mA = 300mW$$

$$V_{CE} = \frac{300mW}{25mA} = 12V$$



Como indicado na fig.21.

Uma estimativa grosseira da curva real pode normalmente ser obtida utilizando-se os três pontos definidos acima. E claro que, quanto mais pontos temos, mais precisa é a curva, entretanto uma estimativa aproximada é quase sempre suficiente.

A região de corte é definida como a região abaixo de $I_C = I_{CEO}$. Esta região também deve ser evitada para que o sinal de saída apresente o mínimo de distorção. Nas folhas de especificações, apenas I_{CBO} é fornecida. Deve-se utilizar a equação $I_{CEO} = \beta I_{CBO}$ para que se tenha alguma ideia do nível de corte. A operação na região resultante da Fig.21 assegurará uma distorção mínima do sinal de saída e valores de corrente e tensão que não danificarão o dispositivo.

Se as curvas características não estão disponíveis ou não constam da folha de especificações (o que normalmente ocorre), deve-se simplesmente assegurar que I_C , V_{CE} e o seu produto $V_{CE} I_C$ se situem nos intervalos determinados pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} I_{CEO} &\leq I_C \leq I_{C \max} \\ V_{CE \text{ sat}} &\leq V_{CE} \leq V_{CE \max} \\ V_{CE} I_C &\leq P_{C \max} \end{aligned}$$

Para a configuração base-comum, a curva de máxima potência é definida pelo seguinte produto dos parâmetros de saída:

$$P_{C \max} = V_{CB} I_C$$



Curvas Características do Transistor

As curvas características definem a região de operação de um transistor, tais como: zona de saturação, zona de corte, zona ativa e zona de ruptura. De acordo com as necessidades do projeto estas regiões de operação devem ser escolhidas. Quando precisamos de um transistor como comutador eletrônico, normalmente as regiões de corte e saturação são selecionadas, no caso de um transistor a operar como amplificador, por norma, escolhe-se a região ativa.

A região de ruptura indica a máxima tensão que o transistor pode suportar sem riscos de danos.

A seguir são mostradas algumas curvas características, apenas como fim didático, não obedecendo a rigor a nenhum tipo de escala.

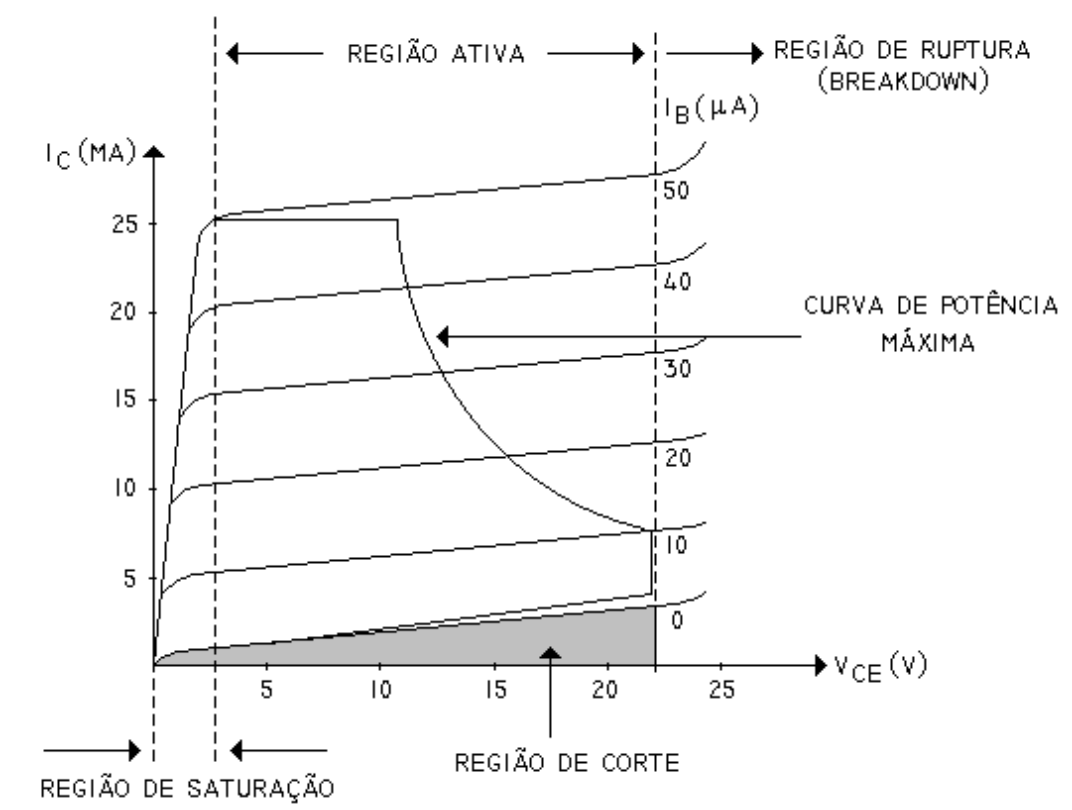


Fig. 22: Curva característica para montagem em EC

A região de corte é mostrada na área sombreada, onde $I_B = 0$.



A curva de potência máxima representa a máxima potência que pode ser dissipada pelo transistor.

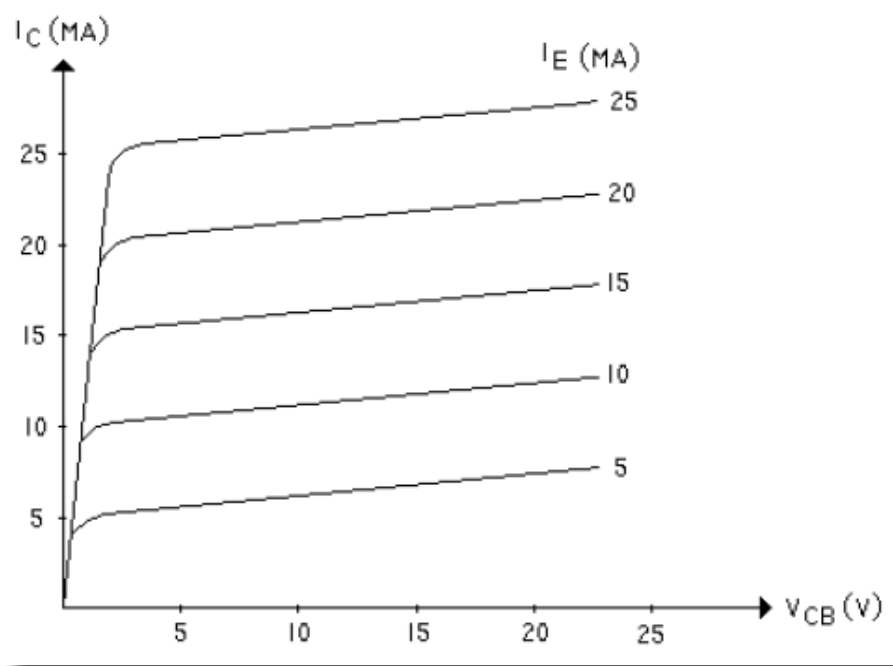


Fig. 23: Curva característica para montagem em BC

Observa-se na curva característica para a montagem em base comum, que a corrente de emissor controla a corrente de coletor, enquanto na curva característica para montagem em emissor comum, a corrente de base controla a corrente de coletor.

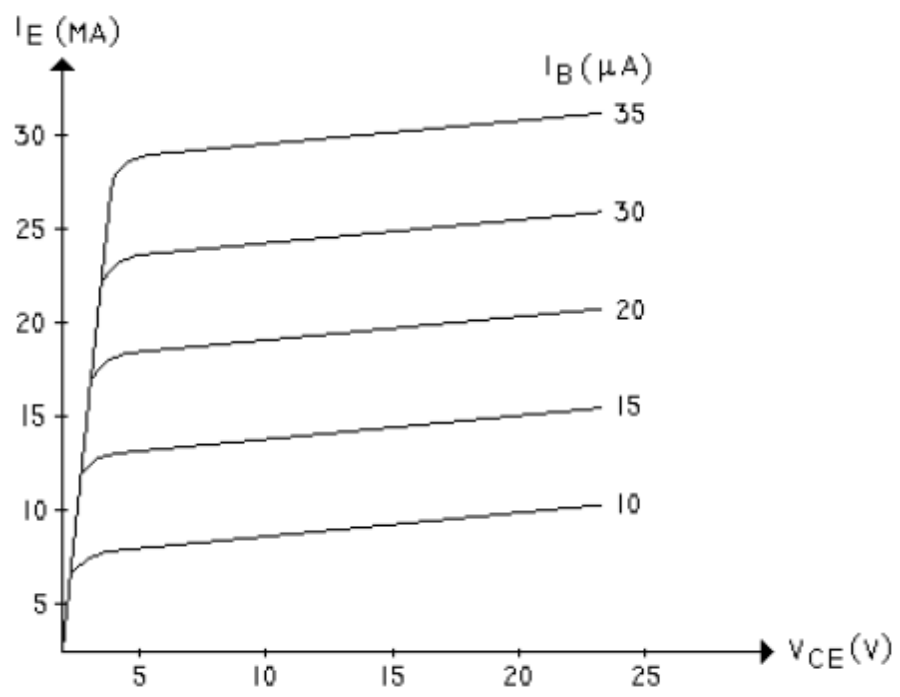


Fig. 24: Curva característica para montagem em CC



Observe a calibração dos eixos de tensão e corrente para a montagem em coletor comum, onde a corrente de base controla a corrente de emissor.

A Fig.25 mostra a curva característica para emissor comum semelhante a vista anteriormente, no entanto, observe a área sombreada, a qual é denominada de área útil, na qual o transistor opera com total segurança.

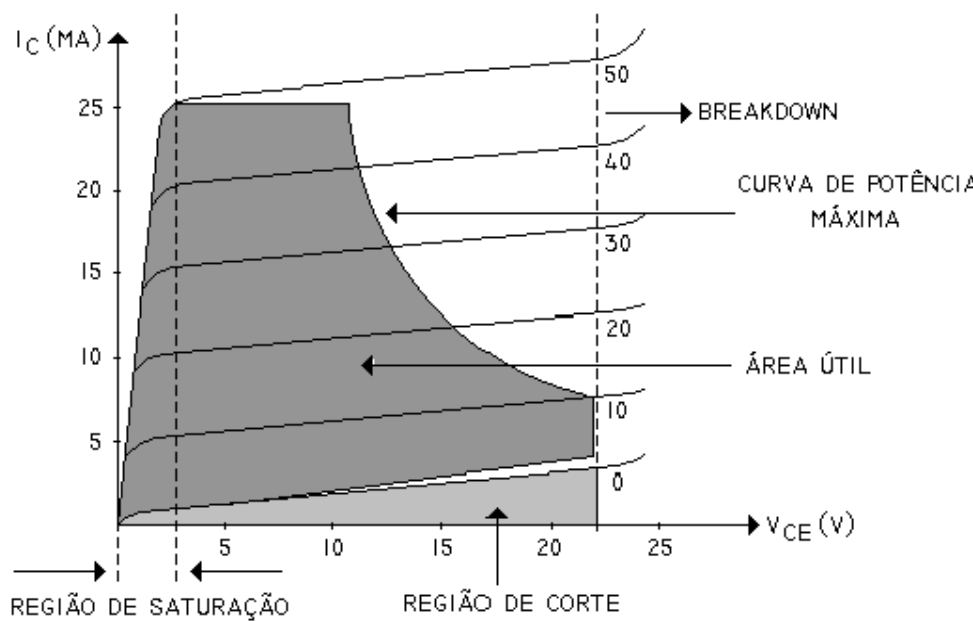


Fig. 25: Curva característica para emissor comum

A região útil é delimitada pela curva de potência máxima e conforme dito anteriormente, o transistor trabalha com segurança, não ultrapassando a máxima potência permitida.

Zona de Corte

É a condição em que o dispositivo não conduz, isto é, a tensão nos terminais do dispositivo é alta e I_C é aproximadamente zero.

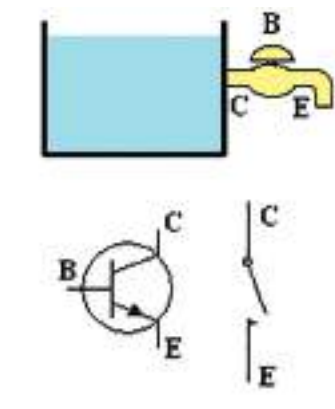


Fig. 26: Transistor a operar na zona de corte



O transístor quando opera na zona de corte comporta-se como um interruptor aberto, “não tem corrente e tem tensão”. Por analogia a um sistema hidráulico, o corte equivale a uma torneira fechada.

Zona de Saturação

É a condição em que o dispositivo conduz, isto é, a tensão nos terminais do dispositivo é a menos possível e a corrente I_c é alta

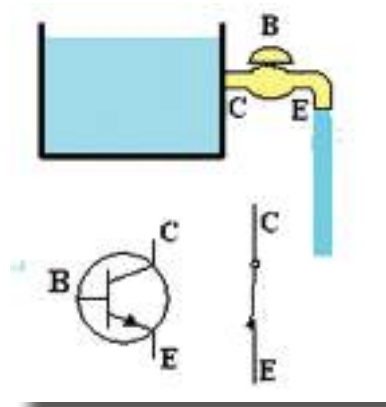


Fig. 27: Transístor a operar na zona de saturação

O transístor a operar na zona de saturação comporta-se como um interruptor fechado, “tem corrente e não tem tensão”. Por analogia a um sistema hidráulico, a saturação corresponde a uma torneira aberta.

Zona Ativa

Nesta região/zona, a junção emissor-base está polarizada diretamente. Esta zona é a região central do gráfico da Fig.22, onde as curvas são lineares e é utilizada principalmente na amplificação de sinais.



Reta de Carga

Podemos determinar o ponto de operação de um transistor através da reta de carga, definindo num projeto ou aplicação os parâmetros de tensão e corrente. Esse método gráfico somente pode ser aplicado se tivermos disponível a curva característica do transistor, fornecida pelo fabricante.

A vantagem da utilização do método gráfico é a rapidez na análise dos pontos de operação de um transistor.

Entende-se como ponto de operação, um determinado ponto em que o transistor opera na ausência de sinal, podendo esse ponto ser escolhido ao longo da reta de carga, se quisermos que ele opere na zona ativa, zona de corte ou zona de saturação. Este ponto é denominado "ponto quiescente" ou simplesmente "Q".

Tomemos como exemplo o circuito a seguir na montagem em emissor comum, onde a curva característica do transistor é mostrada na Fig.28.

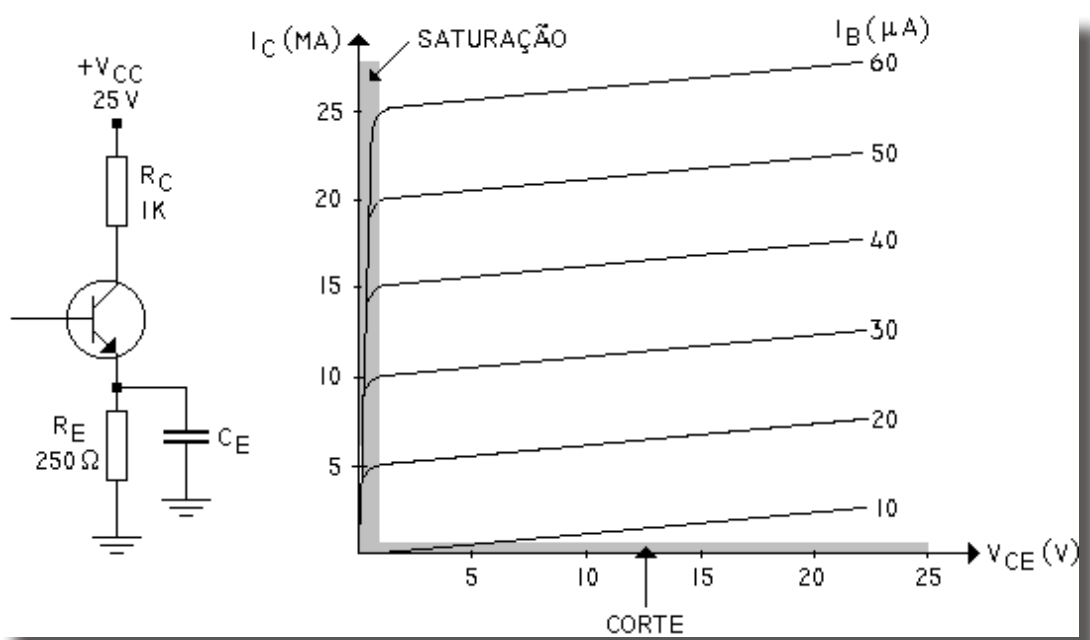


Fig. 28: Circuito e curva característica para montagem em emissor comum

Observe as áreas sombreadas, que representam as zonas de corte e de saturação.

Para determinarmos a reta de carga, precisamos de dois pontos. Através da equação

$$V_{CC} = (R_C + I_E) I_C + V_{CE}, \text{ obtemos:}$$



1º Ponto: para $I_C = 0, V_{CC} = V_{CE} = 25V$

2ª Ponto: para $V_{CE} = 0, \text{temos } I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{25V}{1,25K\Omega} = 20mA$

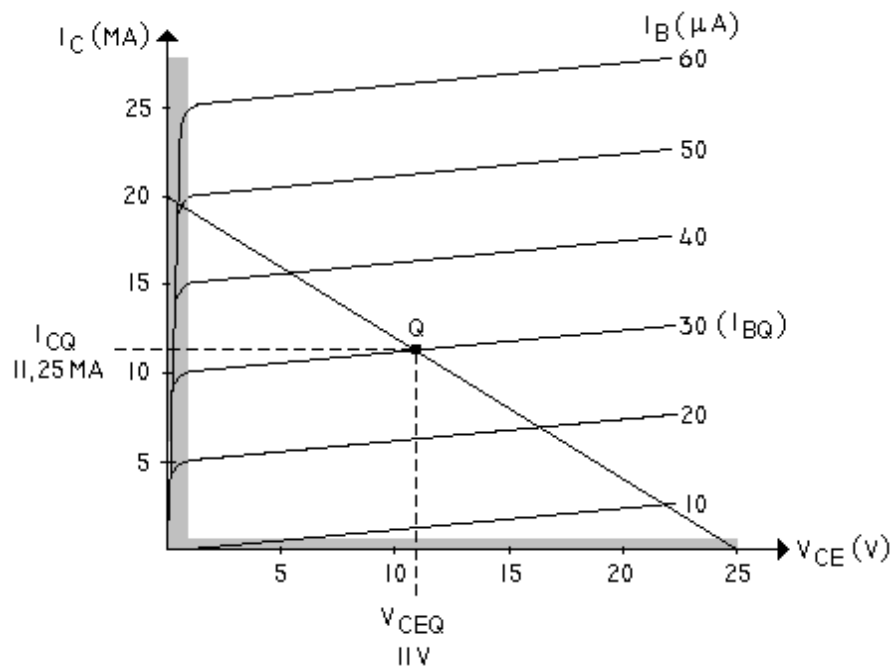


Fig. 29: Traçamento da reta de carga

Traça-se então a reta de carga unindo os dois pontos calculados anteriormente e como apresentado na Fig. 29.

Para que o transistor opere na zona ativa linear, o ponto Q deverá ser o ponto médio da reta de carga. No nosso exemplo o ponto médio (bem aproximado) coincidiu com a corrente de base equivalente a 30mA. A partir daí então podemos determinar a corrente de coletor e a tensão entre coletor e emissor:

$$I_{CQ} = 11,25mA$$

$$V_{CEQ} = 11V$$

$$I_{BQ} = 30\mu A$$

Podemos então calcular o β e aplicar leis de Kirchhoff para determinar a tensão nas resistências:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{11,25mA}{30\mu A} = 375$$



Partindo da equação:

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE}$$

$$V_{RC} = (11,25mA) \times 1K \approx 11,25V$$

$$V_{RE} = (11,25mA) \times 250 \approx 2,812V$$

$$\text{então: } V_{CC} = 11,25 + 11 + 2,812 = 25,062V \approx 25V$$

Se na mesma curva selecionarmos um ponto quiescente (Q1) mais próximo da região de saturação, por exemplo $I_B = 45mA$, teremos um aumento da corrente de coletor e uma diminuição de V_{CE} , para um ponto quiescente (Q2) mais próximo da região de corte, por exemplo $I_B = 10mA$, teremos uma diminuição da corrente de coletor e um aumento de V_{CE} , conforme ilustra a Fig.30.

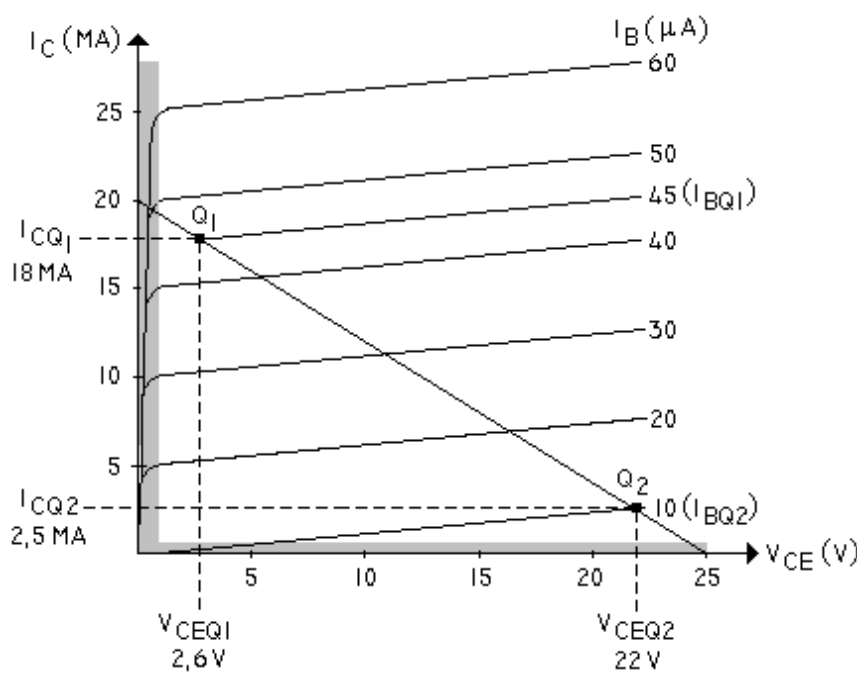


Fig. 30: Exemplo do comportamento de Q para diferentes valores

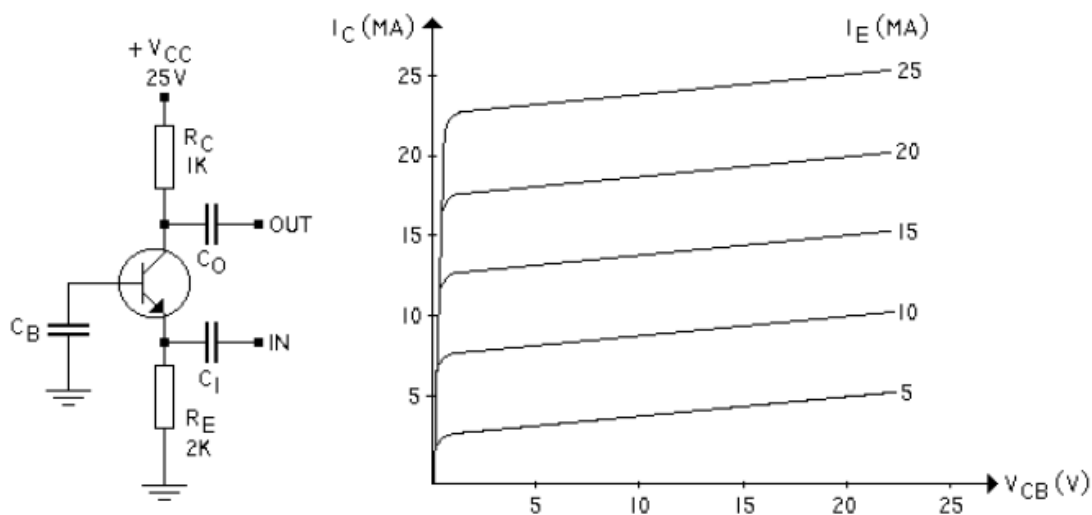
Podemos concluir então que:

1. Quando um transistor opera na região de saturação ou bem próxima dela, a tensão entre coletor e emissor (V_{CE}) tende a zero, pois aumenta consideravelmente a corrente de coletor.
2. Quando um transistor opera na região de corte ou bem próxima dela, a tensão entre coletor e emissor (V_{CE}) tende a se igualar a V_{CC} , pois a corrente de coletor tende a zero.



Exercício:

1. Que tipo de configuração está presente no circuito da figura a baixo.
2. Para o circuito e a curva característica da seguinte figura obtenha a reta de carga.



Polarização do Transístor

Um circuito transistorizado pode ter uma infinidade de funções e os transístores para cada função tem um ponto de funcionamento correto. Este capítulo estuda como estabelecer o ponto de operação ou quiescente de um transístor. Isto é, como polariza-lo.

Polarização Fixa

O circuito com polarização fixa da Fig.31 serve como uma introdução relativamente simples e direta para a análise de uma polarização dc do transístor. Embora o circuito utilize um transístor npn, as equações e cálculos aplicam-se igualmente bem para uma configuração com transístor pnp, bastando para isso que se invertam os sentidos das correntes e polaridades das tensões.

Os sentidos das correntes da Fig. 31 são os sentidos reais, e as tensões são definidas pela notação padrão das duas letras subscritas. Para a análise dc, o circuito pode ser isolado dos níveis ac indicados, substituindo-se os condensadores por um circuito-aberto equivalente. Além disso, a fonte dc V_{CC} pode ser separada em duas fontes (para efeito de análise somente), como mostra a Fig.32, a fim de permitir uma separação entre os circuitos de entrada e saída. Com isto, reduz-se também a ligação entre os dois para a corrente de base I_B . Observando as Figs. 31 e 32, podemos afirmar que a separação é certamente válida, uma vez que, nas duas figuras, V_{CC} esta conectada diretamente a R_B e R_C .



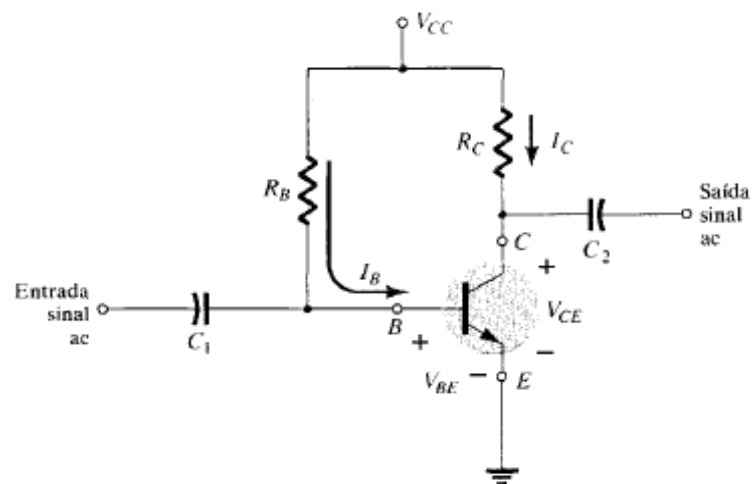


Fig. 31: Circuito com polarização fixa

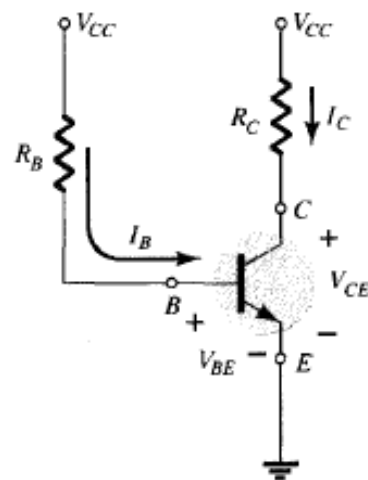


Fig. 32: Equivalente da Fig 31



Polarização Direta da Junção Base-Emissor

Considere inicialmente a malha mostrada na Fig. 33, que inclui a tensão base-emissor.

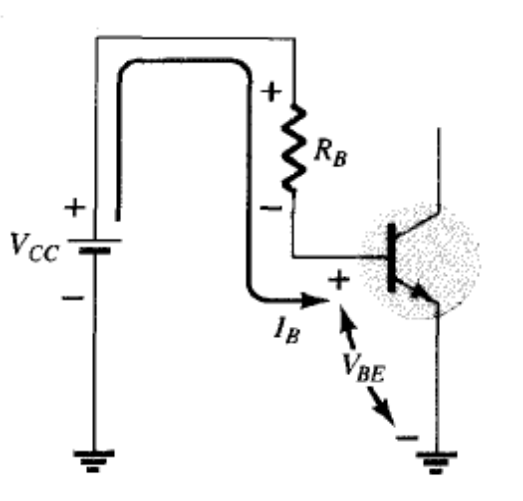


Fig. 33: Malha incluindo a junção base-emissor

Escrevendo a equação das tensões de Kirchhoff no sentido horário da malha, obtemos:

$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

Observe a polaridade da queda de tensão através de R_B , estabelecida pela direção indicada de I_B . Solucionando a equação para a corrente I_B , resulta no seguinte:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

A equação anterior é fácil de ser lembrada, basta observar que a corrente de base e a corrente através de R_B e que, pela lei de Ohm, a corrente e a tensão através de R_B dividida pela resistência R_B . A tensão através de R_B é a tensão V_{CC} aplicada menos a queda através da junção base-emissor (V_{BE}). Além disso, uma vez que a tensão V_{CC} da fonte e a tensão V_{BE} entre a base e emissor são constantes, a escolha de uma resistência de base, R_B , ajusta o nível da corrente de base para o ponto de operação.



Malha Coletor-Emissor

A tensão coletor-emissor do circuito aparece na Fig.34, com o sentido da corrente I_C indicado, e a polaridade resultante através de R_C . O valor da corrente do coletor está diretamente relacionado a I_B através de:

$$I_C = \beta I_B$$

É interessante observar que o valor de I_C não é função da resistência R_C , já que a corrente de base é controlada por R_B e I_C , esta relacionada a I_B por uma constante β . Modificando o valor de R_C , o valor I_B ou I_C não será afetado, desde que o dispositivo esteja na região ativa. Entretanto, como veremos, o valor de R_C determinará o valor de V_{CE} , que é um parâmetro importante.

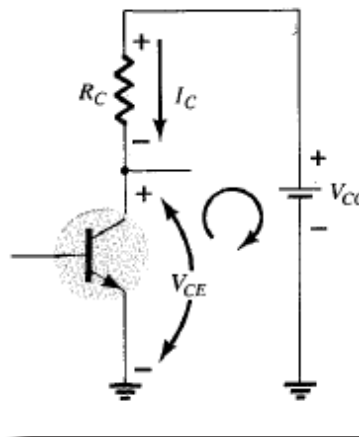


Fig. 34: Malha coletor emissor

Aplicando a lei das tensões de Kirchhoff no sentido horário ao longo da malha indicada na Fig.34, obtemos o seguinte:

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

Esta equação expõe em palavras que a tensão entre coletor e emissor de um transistor, na configuração com polarização fixa, e a fonte de tensão menos a queda através de R_C .



Para uma breve revisão da notação adotada, observe que:

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

Onde V_{CE} é a tensão do coletor para o emissor, e V_C e V_E são tensões do coletor e emissor para terra, respetivamente. Mas neste caso, uma vez que $V_E = 0$ V, nos temos:

$$V_{CE} = V_C$$

Alem disso, já que

$$V_{CE} = V_B - V_E$$

E $V_E = 0$ V, temos que

$$V_{BE} = V_B$$

Tenha em mente que os níveis de tensão, como, p. ex., V_{CE} , são levantados na pratica, colocando-se a ponta vermelha (positiva) do voltímetro no coletor, e a ponta preta (negativa) no emissor, como mostra a Fig.35. V_C é a tensão do coletor para terra, e é medida da forma mostrada na mesma figura. Neste caso, as duas leituras são idênticas, mas nos próximos circuitos elas podem ser bem desiguais. Compreendendo claramente a diferença entre as duas medições, pode-se mostrar bastante útil na solução de problemas de circuitos com transístor.

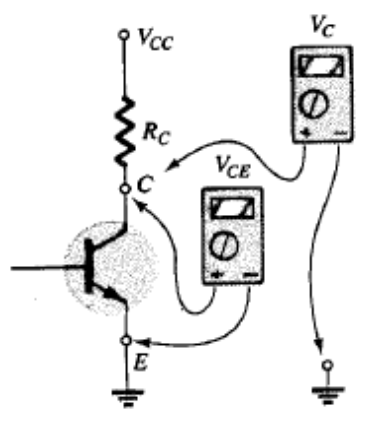
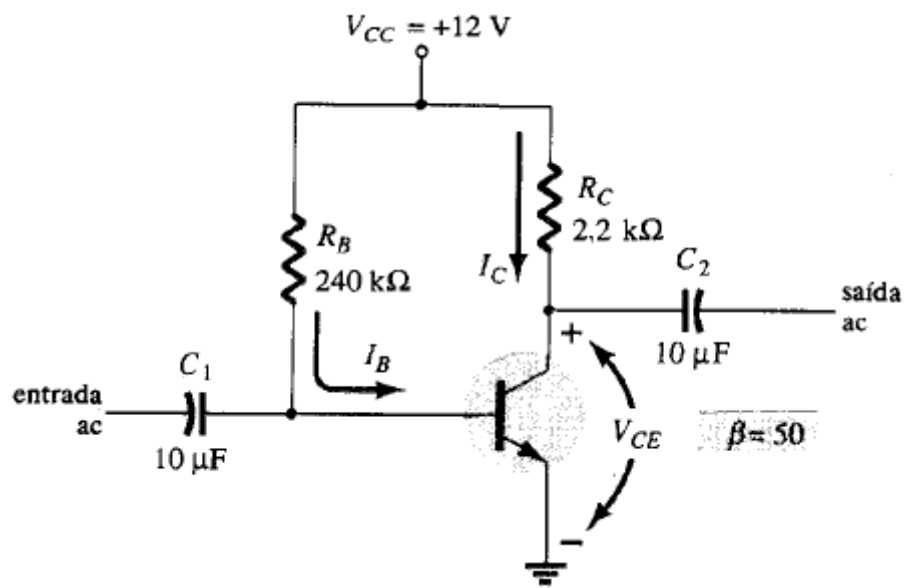


Fig. 35: Medição de V_{CE} e V_C



Exercício:

Determine as seguintes quantidades para a configuração fixa da seguinte figura.



$$I_{BQ} \text{ e } I_{CQ}$$

$$V_{CEQ}$$

$$V_B \text{ e } V_C$$

$$V_{BC}$$

Polarização por Divisor de Tensão

Nas configurações anteriores de polarização, a corrente I_{CQ} e tensão V_{CEQ} de polarização eram funções do ganho de corrente (β) do transistor. Entretanto, uma vez que β é sensível à temperatura, principalmente em transistores de silício, e o valor exato de beta normalmente não é bem definido, seria desejável desenvolver um circuito de polarização que seja menos vulnerável, ou seja, independente do beta do transistor. A configuração de polarização por divisor de tensão da Fig.36 representa um circuito com estas características.



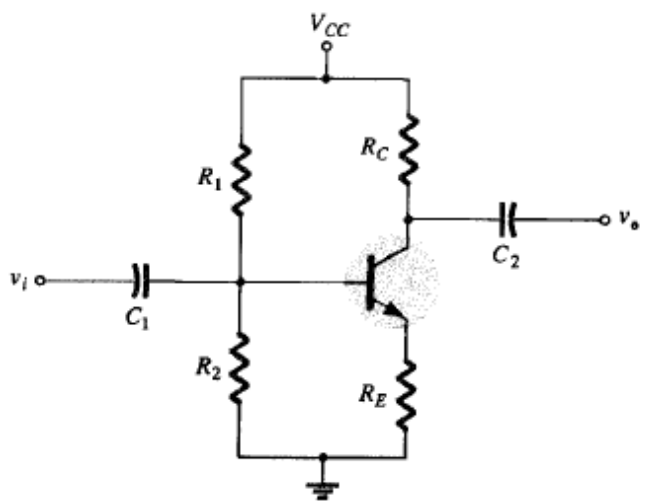


Fig. 36: Configuração de polarização por divisão de tensão

Uma análise adequada revelara que a suscetibilidade as variações de beta é bem pequena. Se os parâmetros do circuito forem escolhidos apropriadamente, os níveis resultantes de I_{CQ} e V_{CEQ} podem ser quase que totalmente independentes de beta. De lembrar que um ponto Q e definido por um nível fixo de I_{CQ} e V_{CEQ} , como mostra a Fig.37. O valor de I_{BQ} será modificado com a variação de beta, mas o ponto de operação nas curvas, definido por I_{CQ} e V_{CEQ} , pode permanecer fixo se forem empregues parâmetros do circuito apropriados.

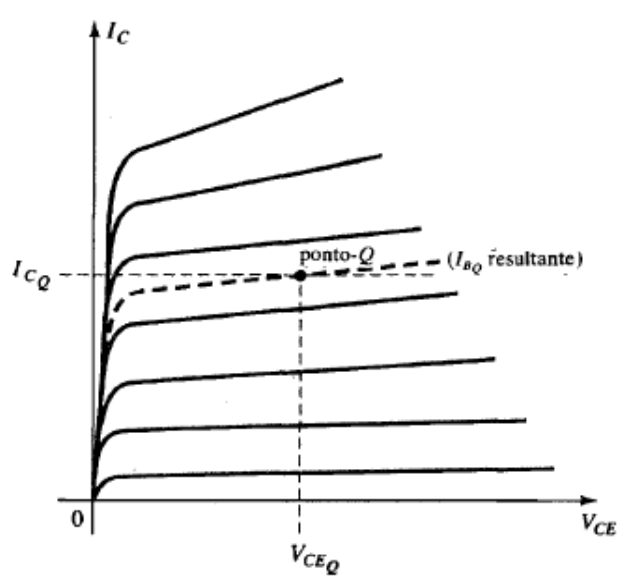


Fig. 37: Definição do ponto Q para a configuração de polarização do divisor de tensão



Como observado acima, há dois métodos que podem ser aplicados para analisar a configuração de divisor de tensão. A razão para a escolha deste nome para a configuração torna-se óbvia na análise a seguir. O primeiro tópico a ser demonstrado é o método exato, que pode ser aplicado a qualquer divisor de tensão.

O segundo refere-se ao método aproximado, e só pode ser utilizado se condições específicas forem satisfeitas. Uma abordagem aproximada permite uma análise mais direta com economia de tempo e energia. Em resumo, o método aproximado pode ser aplicado a maioria das situações e, portanto, deve ser examinado com o mesmo interesse dedicado ao método exato.

Analise Exata

O circuito de entrada do circuito da Fig.36 pode ser redesenhado como mostra a Fig.38 para a análise dc.

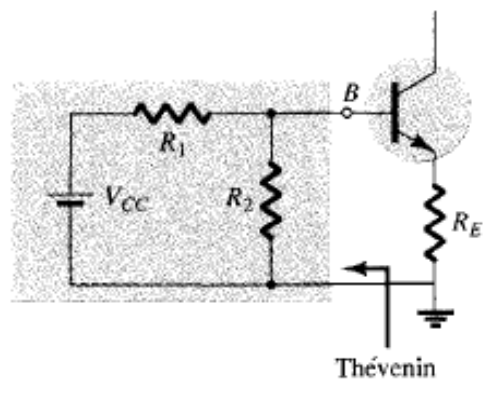


Fig. 38: Redesenhando o circuito de entrada da Fig.36

O circuito equivalente de Thevenin para o circuito à esquerda do terminal da base pode ser determinado da seguinte maneira:

R_{Th} : A fonte de tensão é substituída por um curto-circuito equivalente, como mostra a Fig.39.

$$R_{Th} = R_1 // R_2$$



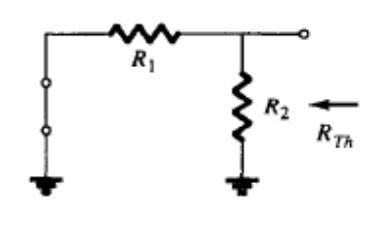


Fig. 39: Determinação RTh

E_{Th} : A fonte de tensão V_{CC} retoma ao circuito, e a tensão Thevenin de circuito-aberto da Fig.40 é determinada como se segue:

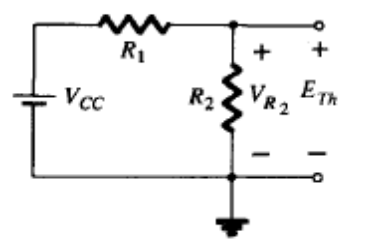


Fig. 40: Determinação de IB

Aplicando a regra do divisor de tensão:

$$E_{Th} = V_{R2} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

O circuito de Thevenin é, portanto, redesenhado conforme Fig.41, e I_{BQ} pode ser determinado aplicando-se inicialmente a lei das tensões de Kirchhoff, no sentido horário, para a malha indicada:

$$E_{Th} - I_B R_{Th} - V_{BE} - I_E R_E = 0$$



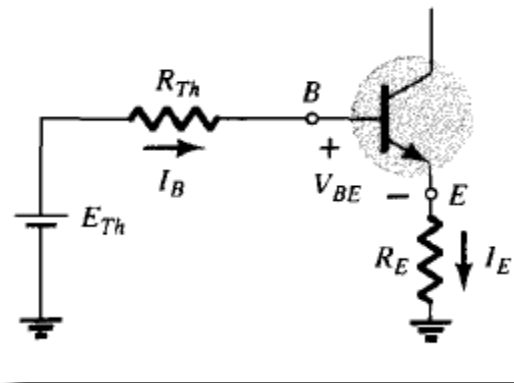


Fig. 41: Inserindo o circuito equivalente de Thevenin

Substituindo $I_E = (\hat{\alpha} + 1)I_B$ e resolvendo para I_B , vem:

$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\hat{\alpha} + 1)R_E}$$

Embora a equação anterior se mostre diferente das equações desenvolvidas antes, observe que o numerador representa novamente uma diferença entre dois níveis de tensões, e o denominador representa uma resistência de base mais o resistor de emissor multiplicado por $(\beta + 1)$.

Uma vez conhecido I_B as quantidades restantes do circuito podem ser determinadas do mesmo modo que foram para a configuração de polarização do emissor. Ou seja,

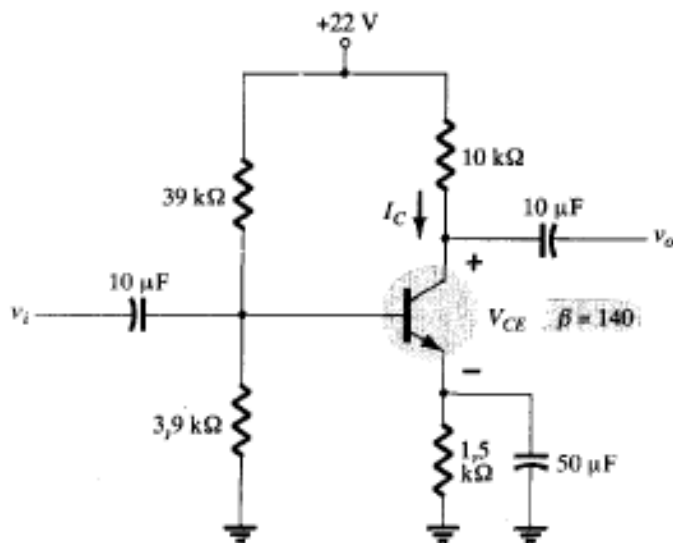
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

As equações restantes para V_E , V_C e V_B também são obtidas da mesma forma.



Exercício:

1. Determine a tensão V_{CE} e a corrente I_C de polarização dc para a configuração do divisor de tensão da figura seguinte.



Análise Aproximada

A secção de entrada do divisor de tensão pode ser representada pelo circuito da Fig.42.

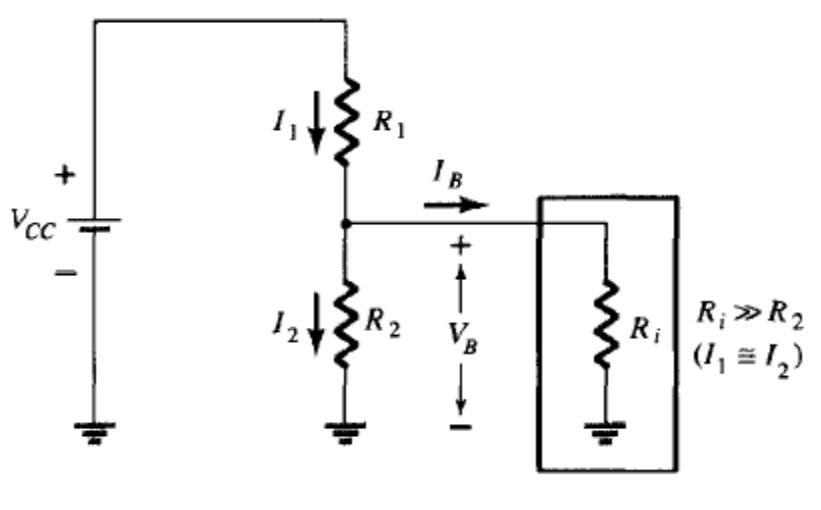


Fig. 42: Circuito parcial de polarização para o cálculo da tensão aproximada de base V_B



A resistência e a resistência equivalente vista da base para a terra, para o transistor com uma resistência de emissor R_E . De lembrar a equação $R_i = (\beta + 1)R_E$. Se R_i é muito maior do que a resistência R_2 , a corrente I_B será muito menor do que I_2 (a corrente procura sempre o caminho de menor resistência), e I_2 será aproximadamente igual a I_1 . Se aceitarmos a aproximação que I_B é desprezável em relação a I_1 ou I_2 , então $I_1 = I_2$ e R_1 , e R_2 podem ser considerados elementos em serie. A tensão através de R_2 , que é, na verdade, a tensão de base, pode ser determinada pela aplicação da regra do divisor de tensão (dai o nome para a configuração) ou seja,

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

Uma vez que $R_i = (\beta + 1)R_E \cong \beta R_E$, a condição que determina se o método aproximado pode ser aplicado é a seguinte:

$$\beta R_E \geq 10R_2$$

Por outras palavras, se o valor de beta multiplicado por R_E é no máximo 10 vezes maior do que o valor de R_2 , o método aproximado pode ser aplicado, obtendo-se um alto grau de precisão nos resultados.

Uma vez determinado V_B , o valor de V_E pode ser calculado de:

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

E a corrente de emissor pode ser determinada da seguinte maneira:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}; I_{CQ} \cong I_E$$

A tensão de coletor emissor é determinada por:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$



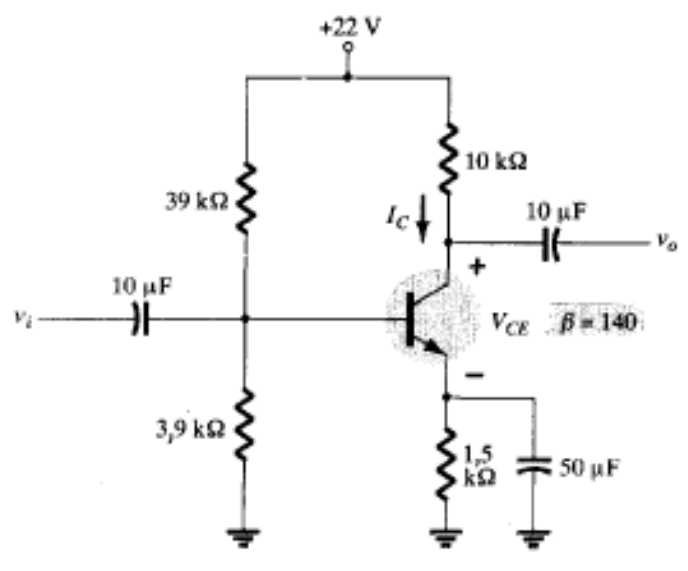
Mas já que $I_C \cong I_E$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

Observe na sequência dos cálculos, da equação. $\beta R_E \geq 10R_2$ até à equação $V_{CEQ} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$, que beta não aparece, e I_B não é calculado. O ponto Q (determinado por I_C e V_{CEQ}) é, portanto, independente do valor de beta.

Exercício:

1. Repita a análise do exercício anterior utilizando a técnica aproximada e compare as soluções para I_C e V_{CEQ} .



Polarização por Realimentação da Base

Consegue-se obter uma melhoria na estabilidade do circuito introduzindo-se uma realimentação de coletor para a base, conforme Fig.43. Embora o ponto Q não seja totalmente independente de beta (mesmo sob condições aproximadas), a suscetibilidade a variações com beta ou na temperatura é normalmente menor do que a percebida para as configurações com divisor de tensão e emissor polarizado. A análise será refeita, considerando-se inicialmente a malha base-emissor, e depois utilizando os resultados



para investigar a malha coletor-emissor.

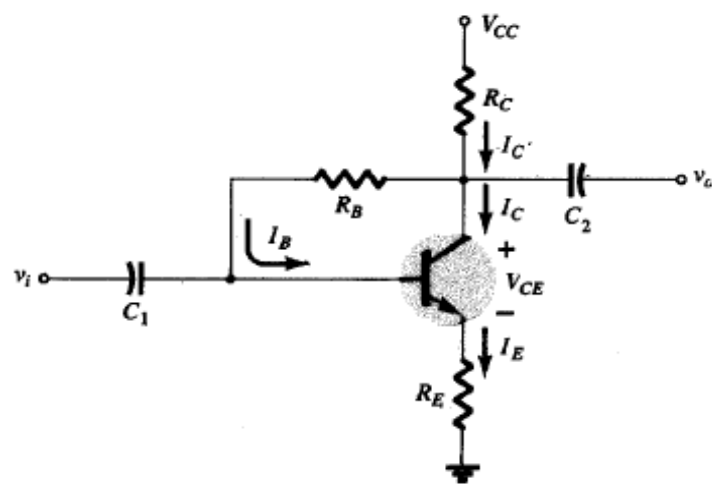


Fig. 43: Circuito de polarização por realimentação da base

Malha Base-Emissor

A Fig. 44 mostra a malha base-emissor para a configuração com realimentação de tensão na base. Escrevendo a lei das tensões de Kirchhoff ao longo da malha indicada, no sentido horário, resulta em:

$$V_{CC} - I'_C R_C - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

E importante observar que a corrente através de R_C não é I_C , mas I'_C (onde $I'_C = I_C + I_B$). Entretanto, o valor de I_C e I'_C é muito maior do que o valor usual de I_B , podendo-se utilizar a aproximação $I'_C \cong I_C$. Substituindo-se $I'_C \cong I_C = \beta I_B$ e $I_E \cong I_C$ resulta em:

$$V_{CC} - \beta I_B R_C - I_B R_B - V_{BE} - \beta I_B R_E = 0$$

Juntando os termos, temos:

$$V_{CC} - V_{BE} - \beta I_B (R_C + R_E) - I_B R_B = 0$$



E resolvendo para I_B , vem :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\beta(R_C + R_E) + R_B}$$

O resultado acima é extremamente interessante, já que o formato é muito parecido com as equações I_R obtidas nas configurações anteriores. O numerador é novamente a diferença entre tensões disponíveis, enquanto o denominador é a resistência de base mais as resistências de coletor e emissor refletidos por beta.

Em geral, portanto, a realimentação resulta na reflexão da resistência R_C para o circuito de entrada, assim como da resistência R_E .

Em geral, a equação para I_R teria o seguinte formato:

$$I_B = \frac{V'}{\beta R' + R_B}$$

Com a ausência de R' para a configuração com polarização fixa, $R' = R_E$ para a estrutura com emissor polarizado (com $(\beta + 1) = \beta$, e $R' = R_C + R_E$ para o circuito com realimentação do coletor.

A tensão V' é a diferença entre dois níveis de tensão.

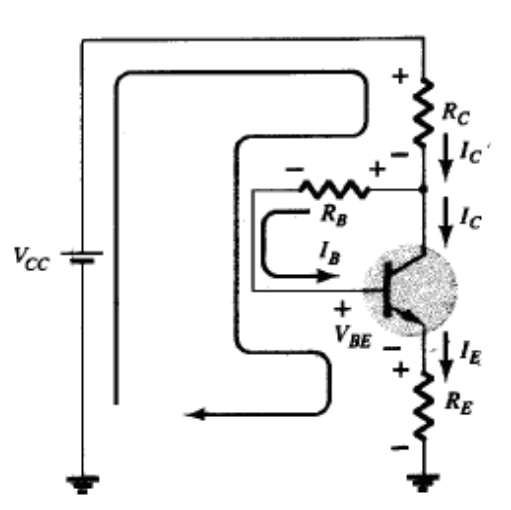


Fig. 44: Malha base emissor para o circuito da Fig. 43



Uma vez que $I_C = \beta I_B$

$$I_{CQ} = \frac{\beta V'}{\beta R' + R_B}$$

Em geral, quanto maior o produto $\beta R'$ em relação a R_B , menor é a suscetibilidade de I_C a variações em beta. Obviamente, se $\beta R' \gg R_B$ e $\beta R'_1 \cong \beta R'$, temos:

$$I_{CQ} = \frac{\beta V'}{\beta R' + R_B} \cong \frac{\beta V'}{\beta R'} = \frac{V'}{R'}$$

I_{CQ} é independente do valor de beta. Já que R' é tipicamente maior para a configuração com realimentação de tensão do que para a configuração com emissor polarizado, a suscetibilidade a variações em beta é menor para a primeira. Obviamente, R' é zero ohm para a configuração com polarização fixa e, portanto, esta configuração é muito sensível a variações em beta.

Malha Coletor-Emissor

A malha coletor-emissor para o circuito da Fig.43 está mostrada na Fig.45. Aplicando a lei das tensões de Kirchhoff ao longo da malha indicada, no sentido horário, resulta em:

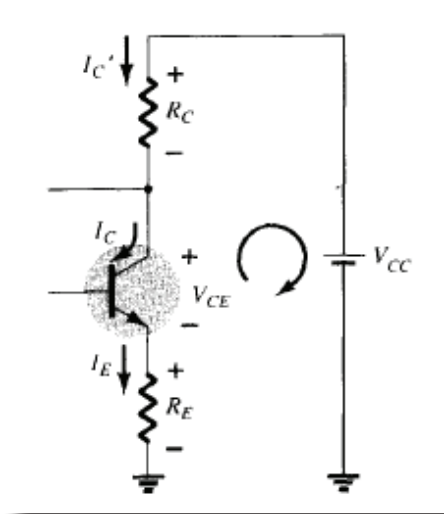


Fig. 45: Malha coletor emissor para o circuito da figura 43



$$I_E R_E + V_{CE} + I'_C R_C - V_{CC} = 0$$

Uma vez que $I'_C \cong I_C$ e $I_E \cong I_C$, temos:

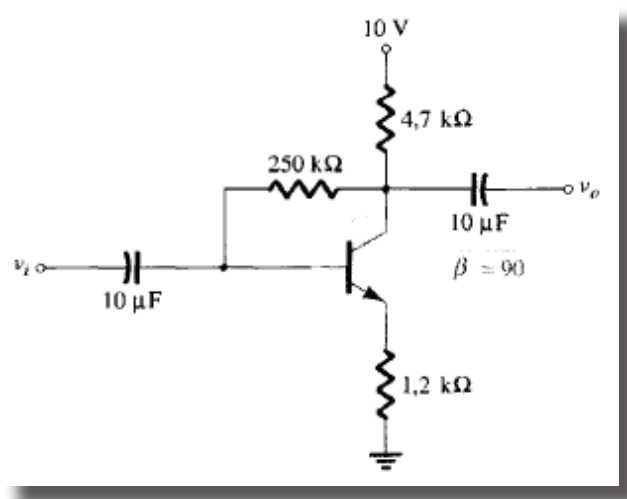
$$I_C (R_C + R_E) + V_{CE} - V_{CC} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

Que é exatamente o resultado obtido para as configurações do emissor polarizado, e polarização por divisor de tensão.

Exercício:

3. Determine os níveis quiescentes de I_C e V_{CE} para o circuito da figura a seguir.



Influência da temperatura na polarização

O material semiconductor do qual é formado o transistor é muito sensível à temperatura, pois como vimos no início do ano, para os semicondutores, a elevação da temperatura libera portadores, aumentando assim a condutividade do material. A temperatura age principalmente nos parâmetros I_{CBO} , β e V_{BE} dos transistores. A figura a seguir mostra a influência da temperatura nos transistores bipolares.

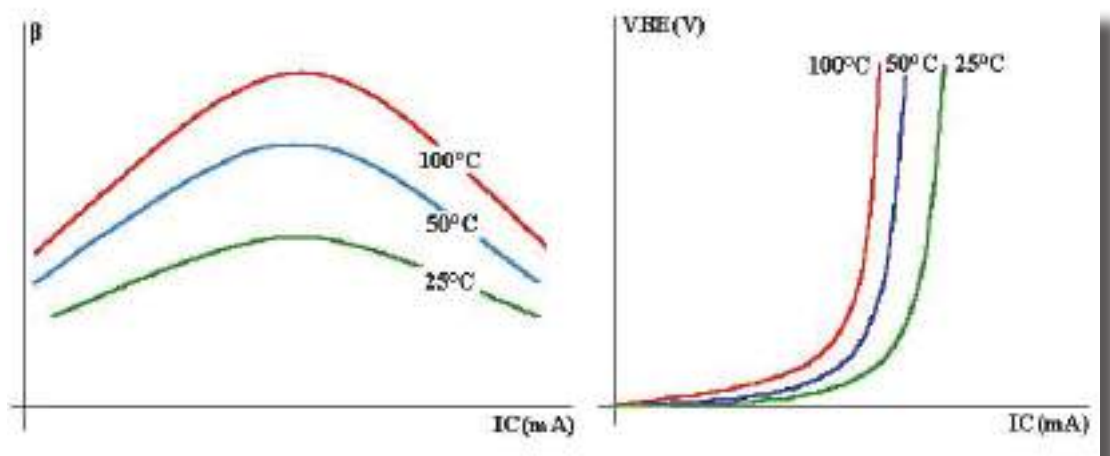


Fig. 46: Curvas de influência da temperatura em transistores

A elevação da temperatura aumenta o β do transistor, que traz como consequência o aumento da corrente de coletor, pois $I_C = \beta I_B$, mesmo que a corrente de base permaneça constante. A corrente de saturação inversa duplica de valor nos transistores de silício a cada 10°C de elevação na temperatura. A tensão V_{BE} diminui 2,5mV a cada grau de elevação na temperatura. Portanto a temperatura influencia enormemente o comportamento dos transistores.



Transístor como Amplificador

Agora que a relação entre I_C e I_E foi estabelecida na Seção configuração base-comum, a operação básica de amplificação do transístor pode ser introduzida, mesmo que a um nível superficial, utilizando a estrutura da Fig.47. A polarização dc não aparece na figura, já que nosso interesse será limitado à resposta ac. Para a configuração base-comum, a resistência de entrada ac determinada pela curva característica da Fig.7 é extremamente pequena, e varia de 10 até 100 Ω . A resistência de saída determinada pelas curvas da Fig.8 é extremamente alta (quanto mais horizontal a curva, mais alta a resistência) e varia tipicamente entre 50 $k\Omega$ e 1 $M\Omega$ (100 $k\Omega$ para o transístor da Fig.47). A diferença de valores entre as resistências de entrada e saída é devida à junção diretamente polarizada na entrada (base para emissor) e à junção inversamente polarizada na saída (base para coletor).

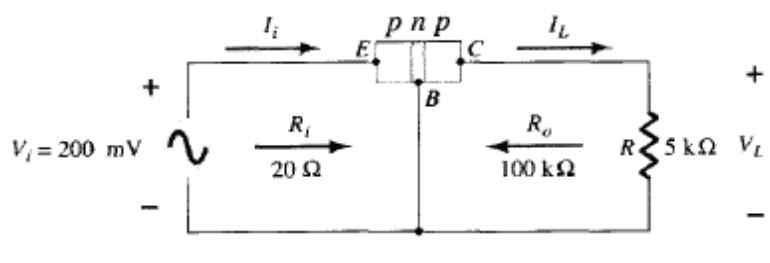


Fig. 47: Operação básica de amplificação de tensão da configuração base-comum

Utilizando um valor usual de 20 Ω para a resistência de entrada, concluiremos que:

$$I_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{200mV}{20\Omega} = 10mA$$

Se assumirmos que $\alpha_{ac} = 1 (I_C = I_E)$,

$$I_L = I_i = 10mA$$

$$V_L = I_L R$$

$$V_L = (10mA) \cdot (5K\Omega)$$

$$V_L = 50V$$



A amplificação de tensão é:

$$A_V = \frac{V_L}{V_i} = \frac{50V}{200mV} = 250$$

Valores típicos de amplificação de tensão para a configuração base comum variam de 50 até 300. A amplificação de corrente $\frac{I_C}{I_E}$ é sempre menor do que 1 para a configuração base comum. Esta última característica é óbvia, já que $I_C = \alpha I_E$, e α é sempre menor do que 1.

A operação básica de amplificação foi produzida transferindo-se uma corrente I de um circuito de baixa resistência para um circuito de alta resistência. A combinação destes dois termos resulta no nome transistor; isto é:

Transferência + resistência → transistor

Exercícios Resolvidos

Configurações do Transistor BC

Exercícios:

1. Utilizando as curvas características da Fig.8, determine a corrente de coletor resultante de $I_E = 3mA$ e $V_{CB} = 10V$.
2. Utilizando as curvas características da Fig.8, determine a corrente de coletor resultante se I_E permanecer em $3mA$, mas V_{CB} é reduzido para 2 V.
3. Utilizando as curvas características das Figs.7 e 8, determine V_{BE} se $I_C = 4mA$ e $V_{CB} = 20V$.
4. Repita a letra (c) utilizando as curvas características das Figs.8 e 10c.

Configurações do Transistor EC



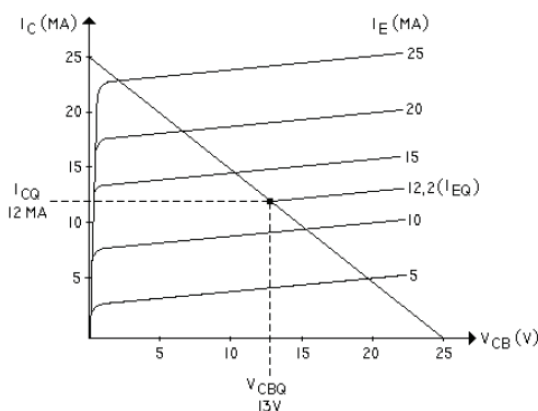
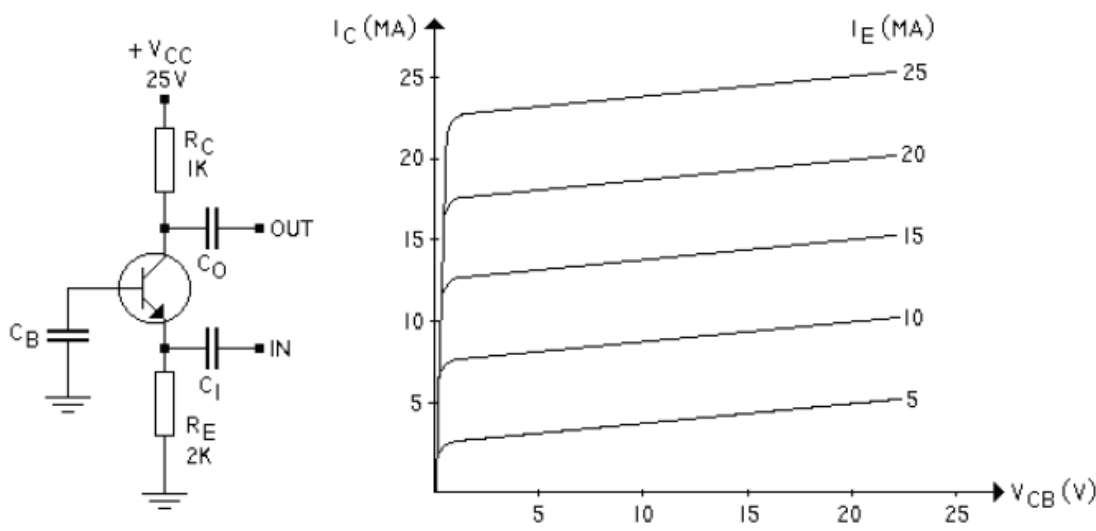
Exercícios:

1. Utilizando as características da Fig.13, determine I_C em $I_B = 30 \mu A$ e $V_{CE} = 10 V$.
2. Utilizando as características da Fig.13, determine I_C em $V_{BE} = 0,7 V$ e $V_{CE} = 15 V$.

Reta de Carga

Exercício:

1. Que tipo de configuração está presente no circuito da figura a baixo.
2. Para o circuito e a curva característica da seguinte figura obtenha a reta de carga.

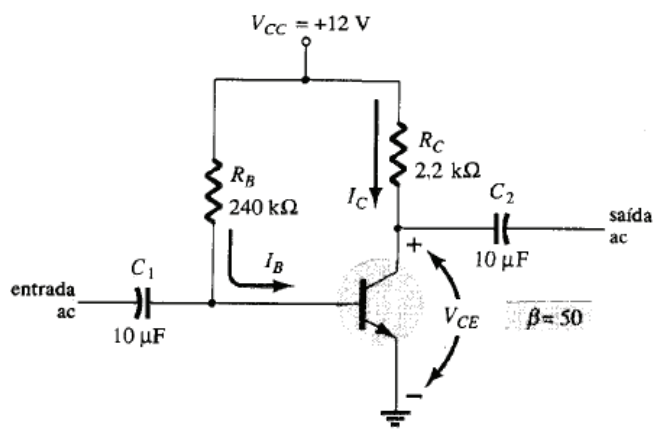


Polarização do Transistor



Exercício:

Determine as seguintes quantidades para a configuração fixa da seguinte figura.



$$I_{BQ} \text{ e } I_{CQ}$$

$$V_{CEQ}$$

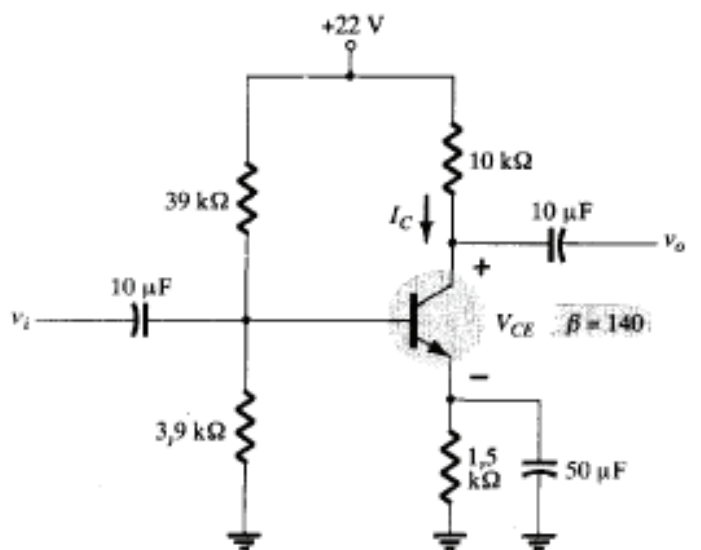
$$V_B \text{ e } V_C$$

$$V_{BC}$$



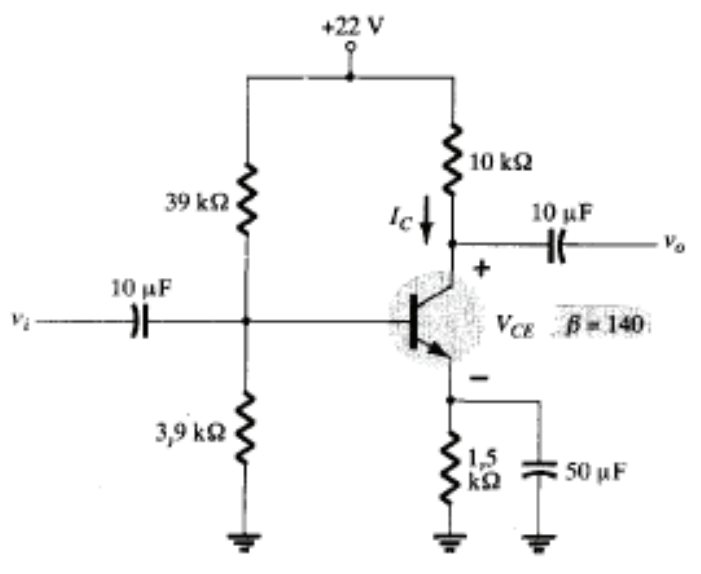
Exercício:

- Determine a tensão V_{CE} e a corrente I_C de polarização dc para a configuração do divisor de tensão da figura seguinte.



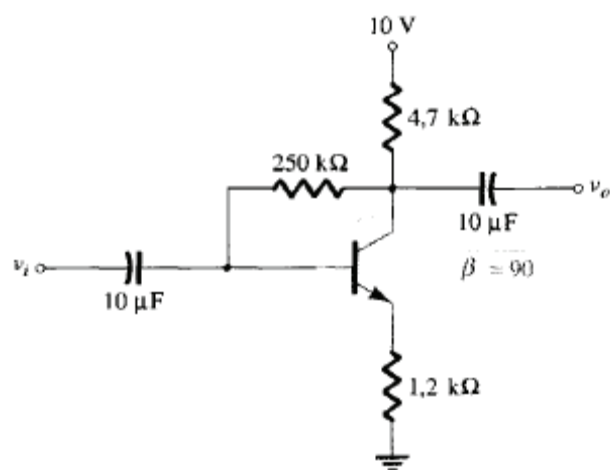
Exercício:

- Repita a análise do exercício anterior utilizando a técnica aproximada e compare as soluções para I_C e V_{CEQ} .



- Determine os níveis quiescentes de I_C e V_{CE} para o circuito da figura a seguir.





Trabalhos Práticos Propostos

Trabalhos Práticos nº1

Transistor como interruptor

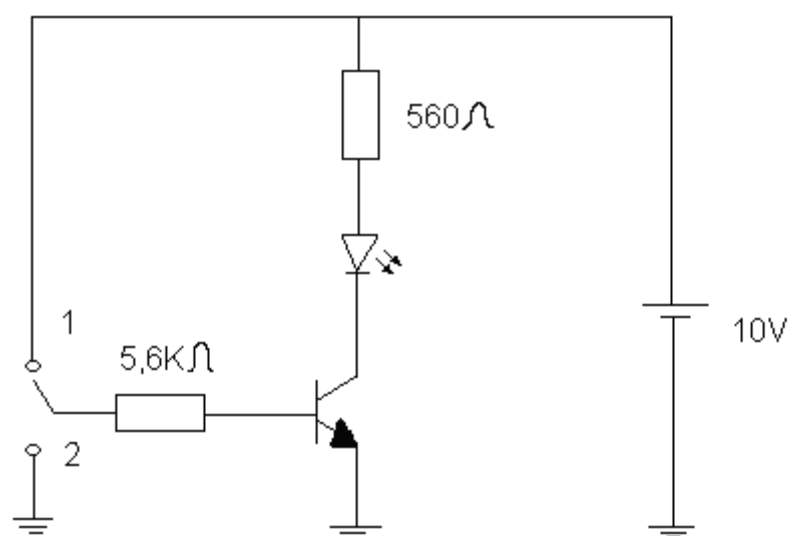
Neste circuito, deve-se montar o circuito, no qual o transistor irá operar como um interruptor.

Material necessário:

- 1 Fonte de alimentação 10V;
- 1 Transistor NPN (BC338);
- 1 Resistência de 5,6K Ω , 560 Ω (0,25W);
- 1 Led;
- 1 Multímetro (analógico ou digital).

Procedimento:

1. Monte o circuito da Figura.



2. Coloque o interruptor na posição 1 e meça $I_B, I_C, I_E, V_{BE}, V_{CE}, V_{CB}$;
3. Coloque o interruptor na posição 2 e meça $I_B, I_C, I_E, V_{BE}, V_{CE}, V_{CB}$;



Trabalhos Práticos nº2

Transistor como Fonte de corrente

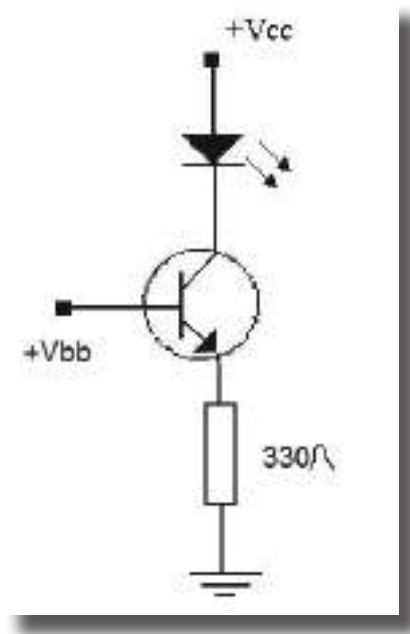
Neste circuito, deve se montar-se o circuito, no qual o transistor irá operar como fonte de corrente de corrente.

Material necessário:

- 2 Fontes de alimentação 8V;
- 1 Transistor NPN (BC338);
- 1 Resistência de 330Ω (0,25W);
- 1 Led;
- 1 Multímetro (analógico ou digital).

Procedimento:

1. Monte o circuito da figura seguinte, no qual $V_{BB} = 3V$ e $V_{CC} = 8V$:



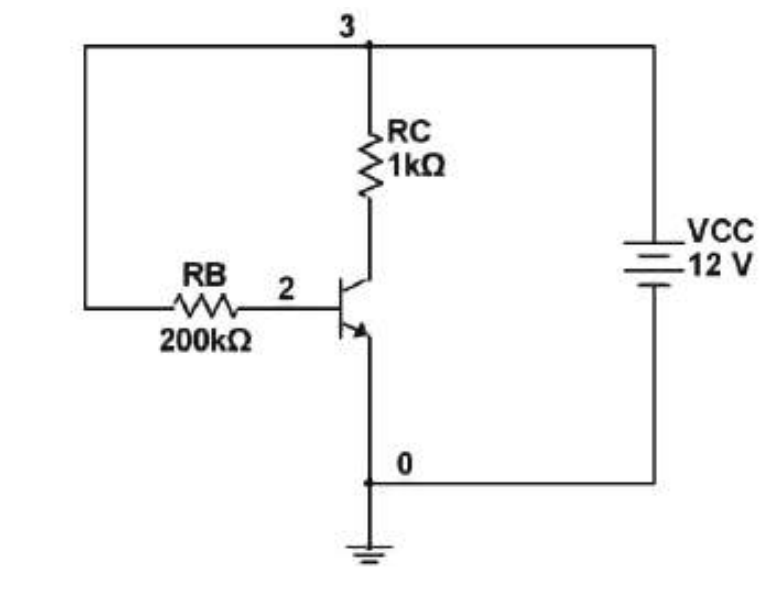
2. Aumente progressivamente a tensão na base até igualar a tensão $V_{CC} = 8V$. Explique porque o led apagou.



Ficha de trabalho

NOTA: Todos os exercícios nesta ficha encontram-se resolvidos, de modo a exemplificar aos alunos os métodos ensinados na sala de aula.

1. Tendo em conta o circuito seguinte, sabendo que $\beta=100$ e $V_{BE}=0,7V$, calcule:



a. A corrente da base, I_B .

$$-V_{CC} + (R_B \times I_B) + V_{BE} \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0,7}{200000} = 56,5\mu A$$

b. A corrente do coletor, I_C .

$$I_C = \beta I_B \quad I_C = 100 \times 56,5\mu A = 5,65mA$$

c. A corrente do emissor, I_E .

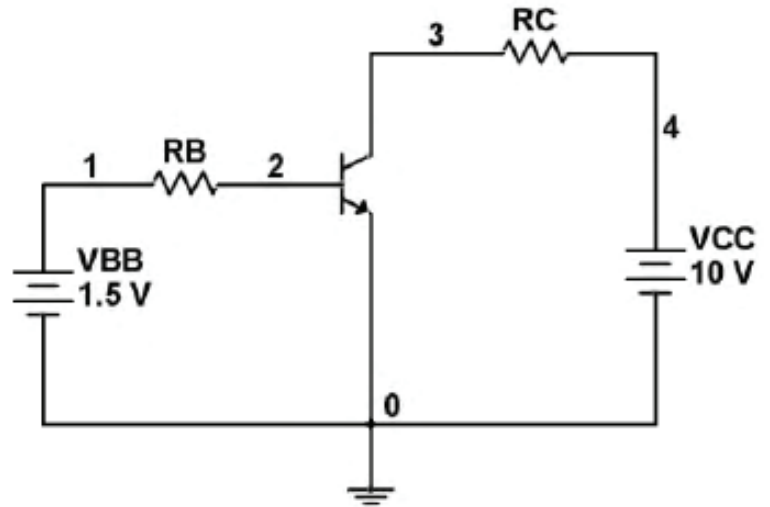
$$I_E = I_B + I_C \quad I_E = 56,5\mu A + 5,65mA = 5,7mA$$

d. A tensão coletor-emissor, V_{CE}

$$-V_{CC} + (R_C \times I_C) + V_{CE} \quad V_{CE} = V_{CC} - (R_C \times I_C) \quad V_{CE} = 12 - (1000 \times 5,65mA) = 6,35V$$



2. Sabendo que o ponto de funcionamento da figura é, $I_C=10\text{mA}$, $V_{CE}=6\text{V}$, $V_{BE}=0,65\text{V}$ e $\beta=120$. Calcule R_C e R_B .



É necessário primeiro calcular I_B , só depois se pode calcular R_B . Note que R_C não pode ser calculado sem primeiro calcular I_B .

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10\text{mA}}{120} = 83,3\mu\text{A}$$

Cálculo da resistência da base R_B

$$-V_{BB} + (R_B \times I_B) + V_{BE} = 0$$

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_B} = \frac{15 - 0,65}{83,3\mu\text{A}} = 10,2\text{K}\Omega$$

Cálculo da resistência da base R_C

$$-V_{CC} + (R_C \times I_C) + V_{CE} = 0$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} = \frac{10 - 6}{10\text{mA}} = 400\text{K}\Omega$$

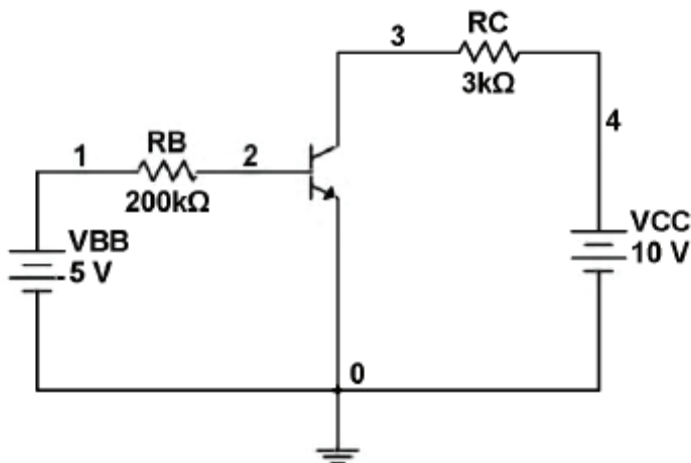


3. A corrente de base de um transístor bipolar polarizado na região ativa é de $400\mu A$ e a corrente do coletor de $32mA$. Calcule a corrente do emissor, o valor de β e o valor de α .

$$I_B = 400\mu A \quad I_C = 32mA$$

$$I_E = I_B + I_C = 400\mu A + 32mA = 32,4mA$$

3. O transístor da figura tem os seguintes valores, $\beta=100$ e $V_{BE}=0,7V$. Calcule:



- a. A corrente do coletor, I_C .

Para calcular I_C é necessário calcular I_B

$$-V_{BB} + (R_B \times I_B) + V_{BE} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0,7}{200k\Omega} = 21,5\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 21,5\mu A = 2,15mA$$

- b. A tensão coletor-emissor, V_{CE} .

$$-V_{CC} + (R_C \times I_C) + V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C \times I_C) = 10 - (3000 \times 2,15mA) = 3,55V$$

- c. A corrente da base, I_B .

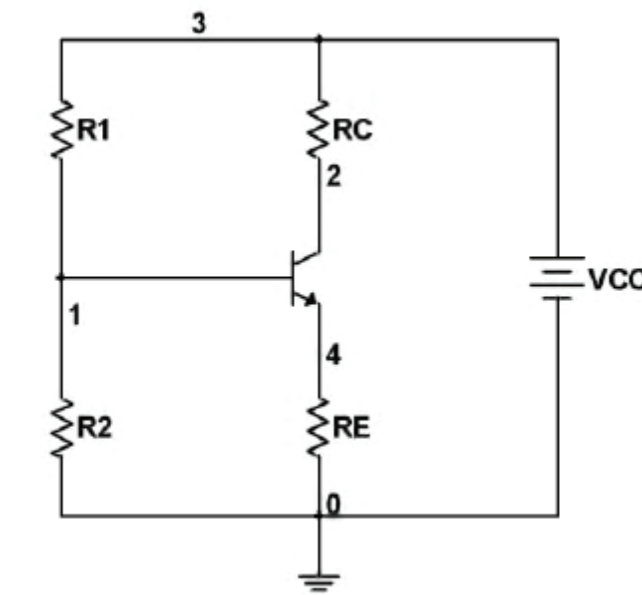
I_B já tinha sido calculado na alínea a).



4. O transistor da figura está polarizado por divisor de tensão. Tendo em conta os seguintes valores calcule:

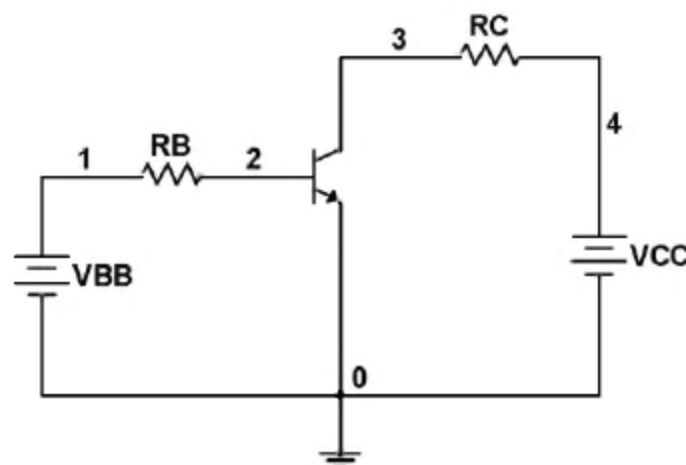
$$V_{BE} = 0,7V; R_i = 27k\Omega; R_C = 1k\Omega; \beta = 100$$

$$V_{CC} = 15V; R_2 = 5,1k\Omega; R_E = 240\Omega$$



- a. A corrente da base, I_B .

É necessário aplicar o teorema de Thévenin de modo a simplificar o circuito no seguinte:



$$R_B = R_1 // R_2$$

$$R_B = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{27000 \times 5100}{27000 + 5100} = 4289 \Omega$$

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} = \frac{5100}{27000 + 5100} \times 15 = 2,38V$$

Tendo em conta que:

$$I_E = I_C + I_B, e I_C = \beta I_B, \text{então: } I_E = I_B + \beta I_B = (1 + \beta) I_B$$

$$-V_{BB} + (R_B \times I_B) + V_{BE} + (R_E \times I_E) = 0$$

$$-V_{BB} + (R_B \times I_B) + V_{BE} + R_E (1 + \beta) I_B = 0$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R_E (1 + \beta)} = \frac{2,38 - 0,7}{4289 + 240 \times (1 + 100)} = 58,8 \mu A$$

b. A corrente do coletor, I_C .

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 58,8 \mu A = 5,88 mA$$

c. A tensão coletor-emissor, V_{CE} .

$$-V_{CC} + (R_C \times I_C) + V_{CE} + (R_E \times I_E) = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C \times I_C) - (R_E \times I_E)$$

$$V_{CE} = 15 - (1000 \times 5,88 mA) - 240 \times (1 + 100) \times 58,8 \mu A = 7,69V$$



Bibliografia

ANGULO, J. M., Enciclopédia de Electrónica Moderna, Vol. 3. Madrid. Editorial Paraninfo. (s.d.).

CARLOS, Ângulo e outros, Teoria e Prática de Electrónica. McGraw-Hill. (Makron Books). (s.d.).

MALVINO, Electrónica no Laboratório. McGrawHill. (s.d.).

MALVINO, Princípios de Electrónica, Vol. 1. McGrawHill. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 11.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros, Sistemas Analógicos e Digitais, 11.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).

PINTO, António; ALVES, Vítor, Tecnologias, 11.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).

VARANDA, Joaquim, Tecnologias da Electricidade, 11.º Ano, Vol. 2. Didáctica Editora. (s.d.).



