

Centro de Formação Profissional “ Aloysio Ribeiro de Almeida”

ELETRÔNICA

/

FIEMG

CIEMG

SESI

SENAI

IEL

Sistema FIEMG



Presidente da FIEMG
Robson Braga de Andrade

Gestor do SENAI
Petrônio Machado Zica

Diretor Regional do SENAI e
Superintendente de Conhecimento e Tecnologia
Alexandre Magno Leão dos Santos

Gerente de Educação e Tecnologia
Edmar Fernando de Alcântara

Elaboração
Vanderlei Batista Flausino

Unidade Operacional
Centro de Formação Profissional “Aloysio Ribeiro de Almeida”
Varginha - MG
2004.



Sumário

APRESENTAÇÃO	4
TRANSISTOR BIPOLAR.....	6
POLARIZAÇÃO.....	7
OPERAÇÃO BÁSICA.....	8
CONFIGURAÇÕES BÁSICAS:.....	13
REPRESENTAÇÃO DE TENSÕES E CORRENTES	16
CURVAS CARACTERÍSTICAS:	18
CIRCUITOS DE POLARIZAÇÃO:.....	20
RETA DE CARGA	31
TRANSISTOR COMO CHAVE ELETRÔNICA.	37
TRANSISTOR COMO FONTE DE CORRENTE.....	40
REGULADOR SÉRIE.	45
REGULADOR PARALELO	50
REGULADOR COM AMPLIFICADOR DE ERRO	54
CONFIGURAÇÃO DARLINGTON	60
PRÉ AMPLIFICADORES	64
AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA CLASSE A E B.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

FIEMG

CIEMG

SESI

SENAI

IEL

Apresentação

“Muda a forma de trabalhar, agir, sentir, pensar na chamada sociedade do conhecimento.”
Peter Drucker

O ingresso na sociedade da informação exige mudanças profundas em todos os perfis profissionais, especialmente naqueles diretamente envolvidos na produção, coleta, disseminação e uso da informação.

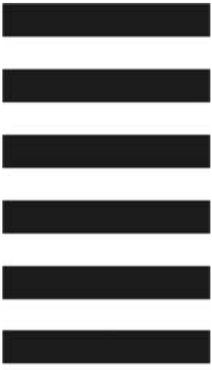
O **SENAI**, maior rede privada de educação profissional do país, sabe disso, e, consciente do seu papel formativo, educa o trabalhador sob a égide do conceito da competência: *“formar o profissional com responsabilidade no processo produtivo, com iniciativa na resolução de problemas, com conhecimentos técnicos aprofundados, flexibilidade e criatividade, empreendedorismo e consciência da necessidade de educação continuada.”*

Vivemos numa sociedade da informação. O conhecimento, na sua área tecnológica, amplia-se e se multiplica a cada dia. Uma constante atualização se faz necessária. Para o **SENAI**, cuidar do seu acervo bibliográfico, da sua infraestrutura, da conexão de suas escolas à rede mundial de informações – internet – é tão importante quanto zelar pela produção de material didático.

Isto porque, nos embates diários, instrutores e alunos, nas diversas oficinas e laboratórios do **SENAI**, fazem com que as informações, contidas nos materiais didáticos, tomem sentido e se concretizem em múltiplos conhecimentos.

O **SENAI** deseja, por meio dos diversos materiais didáticos, aguçar a sua curiosidade, responder às suas demandas de informações e construir *links* entre os diversos conhecimentos, tão importantes para sua formação continuada!

Gerência de Educação e Tecnologia



Transistor Bipolar

O transistor de junção bipolar é um dispositivo semicondutor de três terminais, formado por três camadas consistindo de: duas camadas de material tipo "n" e uma de tipo "p" ou de duas de material tipo "p" e uma de tipo "n".

O primeiro é chamado de transistor *npn* enquanto que o segundo é chamado de transistor *pnp*.

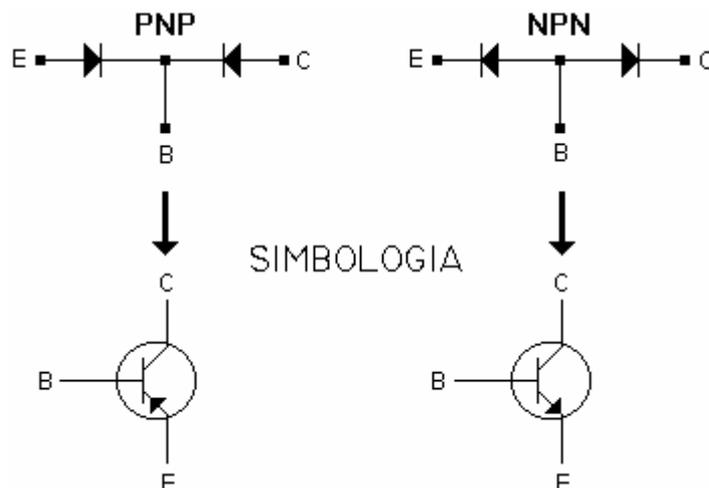
Através de uma polarização de tensão adequada consegue-se estabelecer um fluxo de corrente, permitindo que o transistor seja utilizado em inúmeras aplicações como: chaves comutadoras eletrônicas, amplificadores de tensão e de potência, osciladores, etc.

O termo bipolar refere-se ao fato dos portadores lacunas e elétrons participarem do processo do fluxo de corrente. Se for utilizado apenas um portador, elétron ou lacuna, o transistor é denominado unipolar (FET).

Estrutura Básica:

As figuras abaixo ilustram a estrutura básica de um transistor, representando um circuito T equivalente com diodos, ligados de tal forma a permitir a identificação da polarização das junções, as quais são: base-emissor e base-coletor (B-E e B-C respectivamente).

Observa-se que no transistor pnp a junção dos dois catodos do diodo forma a base, que é negativa, sendo o emissor e o coletor positivos, enquanto que no transistor npn a junção dos dois anodos do diodo forma a base que é positiva, sendo o emissor e o coletor negativos. A simbologia utilizada para os transistores de junção é mostrada logo abaixo dos circuitos equivalentes "T" com diodos.



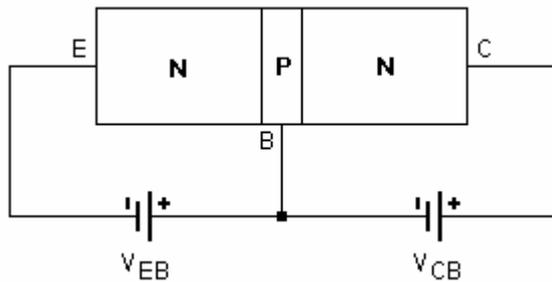
Polarização

Para que um transistor funcione é necessário polarizar corretamente as suas junções, da seguinte forma:

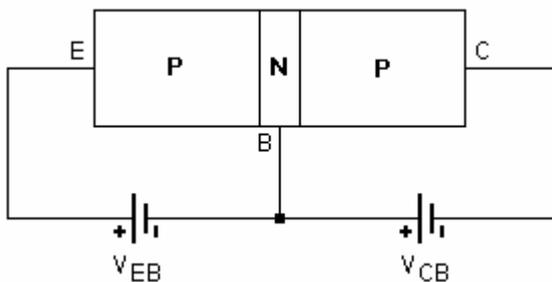
- 1 - Junção base-emissor: deve ser polarizada diretamente
- 2 - Junção base-coletor: deve ser polarizada reversamente

Esse tipo de polarização deve ser utilizado para qualquer transistor de junção bipolar, seja ele npn ou pnp.

As figuras abaixo ilustram exemplos de polarização para os dois tipos de transistores:



Transistor npn com polarização direta entre base e emissor e polarização reversa entre coletor e base.



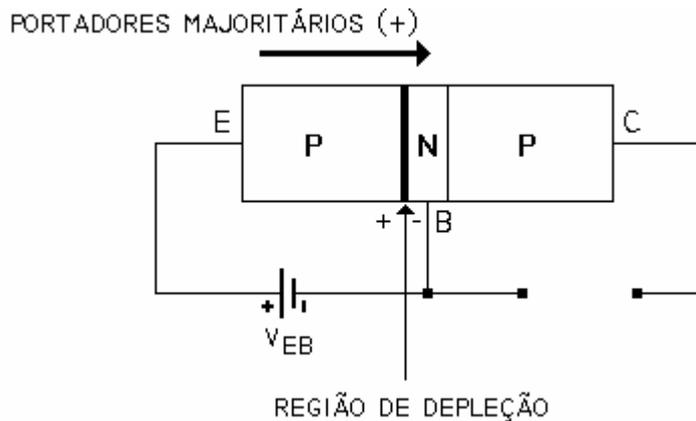
Transistor pnp com polarização direta entre base e emissor e polarização reversa entre coletor e base

Observe atentamente nas figuras acima a polaridade das baterias.

Operação Básica

Junção Diretamente Polarizada:

A figura abaixo mostra o desenho de um transistor pnp com a polarização direta entre base e emissor. Para estudar o comportamento da junção diretamente polarizada, foi retirada a bateria de polarização reversa entre base e coletor.

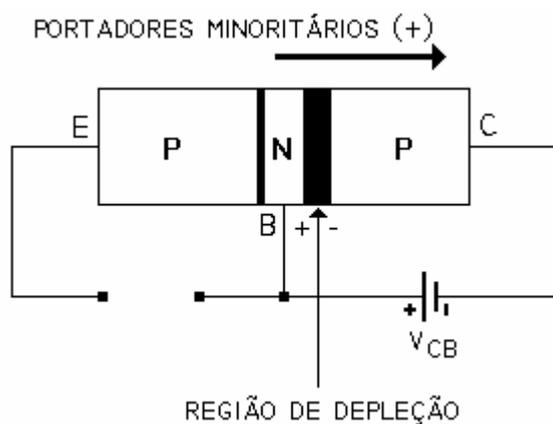


Observa-se então uma semelhança entre a polarização direta de um diodo com a polarização direta entre base e emissor, onde aparece uma região de depleção estreita.

Neste caso haverá um fluxo relativamente intenso de portadores majoritários do material p para o material n.

Junção Reversamente Polarizada:

Passemos a analisar o comportamento da junção reversamente polarizada, conforme mostra a figura abaixo. Neste caso, foi removida a bateria de polarização direta entre emissor e base.



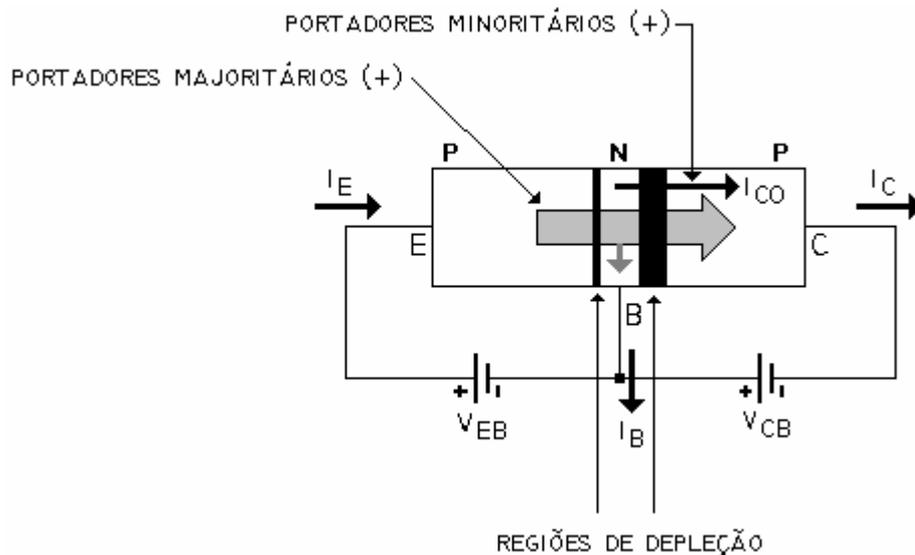
Observa-se agora, em virtude da polarização reversa um aumento da região de depleção semelhante ao que acontece com os diodos de junção, isto é ocorre um fluxo de portadores minoritários (corrente de fuga nos diodos), fluxo este que depende também da temperatura. Podemos então dizer que uma junção p-n deve ser diretamente polarizada (base-emissor) enquanto que a outra junção p-n deve ser reversamente polarizada (base-coletor).

Fluxo de Corrente:

Quando um transistor é polarizado corretamente, haverá um fluxo de corrente, através das junções e que se difundirá pelas camadas formadas pelos cristais p ou n.

Essas camadas não tem a mesma espessura e dopagem, de tal forma que:

1. A base é a camada mais fina e menos dopada;
2. O emissor é a camada mais dopada;
3. O coletor é uma camada mais dopada do que a base e menos dopada do que o emissor.



Uma pequena parte dos portadores majoritários ficam retidos na base. Como a base é uma película muito fina, a maioria atravessa a base e se difunde para o coletor.

A corrente que fica retida na base recebe o nome de corrente de base (I_B), sendo da ordem de microampères. As correntes de coletor e emissor são bem maiores, ou seja da ordem de miliampères, isto para transistores de baixa potência, podendo alcançar alguns ampères em transistores de potência. Da mesma forma, para transistores de potência, a corrente de base é significativamente menor.

Podemos então dizer que o emissor (E) é o responsável pela emissão dos portadores majoritários; a base (B) controla esses portadores enquanto que o coletor (C) recebe os portadores majoritários provenientes do emissor.

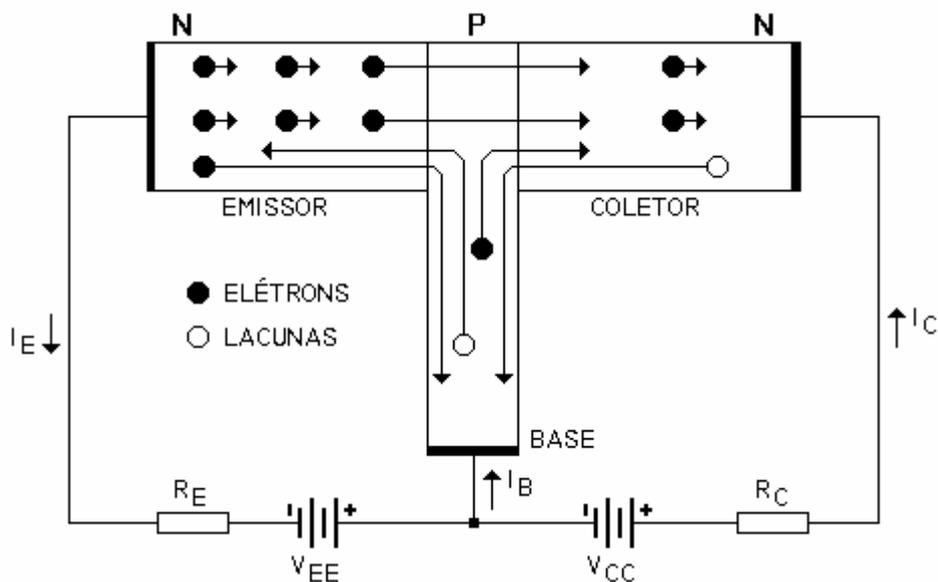
A exemplo dos diodos reversamente polarizados, ocorre uma pequena corrente de fuga, praticamente desprezível, formada por portadores minoritários. Os portadores minoritários são gerados no material tipo n (base), denominados também de corrente de fuga e são difundidos com relativa facilidade até ao material do tipo p (coletor), formando assim uma corrente minoritária de lacunas. Lembre-se de que os portadores minoritários em um cristal do tipo n são as lacunas. Desta forma a corrente de coletor (I_C), formada pelos portadores majoritários provenientes do emissor soma-se aos portadores minoritários (I_{CO} ou I_{CBO}).

Aplicando-se a lei de Kirchhoff para corrente, obtemos:

$$I_E = I_C + I_B, \quad \text{onde:}$$

$$I_C = I_C \text{ (PORTADORES MAJORITÁRIOS)} + I_{CO} \text{ OU } I_{CBO} \text{ (PORTADORES MINORITÁRIOS)}$$

Para uma melhor compreensão, a figura a seguir ilustra o fluxo de corrente em um transistor npn, através de uma outra forma de representação. No entanto, o processo de análise é o mesmo.

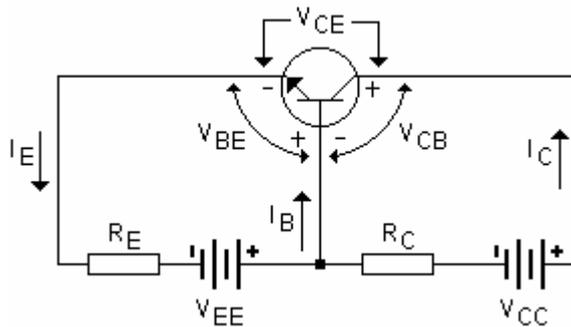


Na figura acima observa-se que os portadores minoritários (I_{CO} ou I_{CBO}) provenientes da base são os elétrons, que se somarão a corrente de coletor. Verifica-se ainda em relação ao exemplo anterior (transistor pnp), que a corrente de base (I_B) tem um sentido oposto, uma vez que, essa corrente é formada por lacunas. Da mesma forma as correntes de emissor (I_E) e de coletor (I_C) também tem sentidos opostos, por serem formadas por elétrons.

OBS: Os transistores do tipo pnp e npn são submetidos ao mesmo processo de análise, bastando para isso, inverter a polaridade das baterias de polarização e lembrar que:

Cristal N - os portadores majoritários são os elétrons e os minoritários as lacunas;
Cristal P - os portadores majoritários são as lacunas e os minoritários os elétrons.

A figura abaixo mostra um circuito com transistor npn.



A junção base-emissor está polarizada diretamente e por isto, representa uma região de baixa impedância. A voltagem de polarização base-emissor é baixa (da ordem de 0,55V a 0,7V para transistores de silício), polarização esta, caracterizada pela bateria V_{EE} enquanto que, a junção base-coletor está reversamente polarizada em função da bateria V_{CC} . Na prática, V_{CC} assume valores maiores do que V_{EE} .

Como já foi dito anteriormente, a corrente I_C é o resultado dos portadores majoritários provenientes do emissor. A corrente de coletor divide-se basicamente em duas componentes: a corrente proveniente do emissor e a corrente proveniente do junção reversamente polarizada coletor-base, denominada I_{CBO} , sendo que esta última assume valores extremamente baixos que em muitos casos podem ser desprezados.

A quantidade de corrente que chega no coletor proveniente do emissor depende do tipo de material e dopagem do emissor. Essa quantidade de corrente varia de acordo com o tipo de transistor.

A constante de proporcionalidade dessa corrente é definida como α (alfa)¹, de forma que, a corrente de coletor é representada por αI_E . Os valores típicos de α variam de 0,9 a 0,999. Isto significa que parte da corrente do emissor não chega ao coletor².

Exemplo: Qual é a corrente de coletor de um transistor com $\alpha = 0,95$, sabendo-se que a corrente de emissor é 2mA?

Solução:

$$I_C = \alpha I_E$$

$$I_C = 0,95 \cdot 2\text{mA} = 1,9\text{mA}$$

Caso I_{CBO} não seja desprezada, a corrente de coletor é dada por:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (I)$$

¹ O símbolo h_{FB} é algumas vezes usado na lugar de α

² Isto é explicável, pois α é menor do que 1.

Como dito anteriormente, parte da corrente do emissor que fica retida na base forma a corrente de base, assim:

$$I_E = I_C + I_B \quad (II)$$

Substituindo (I) em (II), podemos calcular a corrente de base:

$$I_B = (1 - \alpha) \cdot I_E - I_{CBO} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} \cdot I_C - \frac{I_{CBO}}{\alpha}$$

A relação $\alpha / (1 - \alpha)$ é representada por β (beta)³.

Podemos então estabelecer as relações:

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

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

Exemplos:

a) Um transistor possui um fator $\alpha = 0,92$. Qual é o fator β ?

Solução:

$$\beta = \frac{0,92}{1 - 0,92} = \frac{0,92}{0,08} = 11,5$$

b) Um transistor possui um fator $\beta = 100$. Qual é o fator α ?

Solução:

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{100}{101} = 0,99$$

Podemos então estabelecer uma relação entre α e β .⁴

Temos então:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

β assume valores muito mais elevados em relação a α (o valor típico de β é da ordem de 30 a 600). Então, quanto maior for o valor de β , mais o valor de α tende a aproximar-se de 1.

Assim, levando-se em conta que $I_C = \alpha I_E$, para um valor de $\beta \geq 100$, podemos considerar para fins práticos:

$$I_C = I_E$$

³ O símbolo h_{FE} é algumas vezes usado no lugar de β

⁴ Alguns autores utilizam a notação α_{CC} e β_{CC}

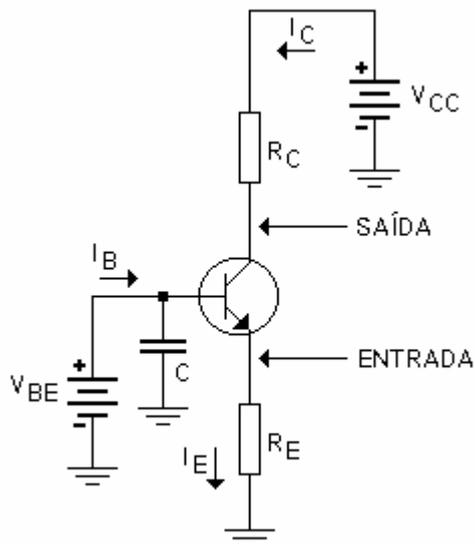
Configurações Básicas:

Os transistores podem ser ligados em três configurações básicas: base comum (BC), emissor comum (EC) e coletor comum (CC). Essas denominações relacionam-se aos pontos onde o sinal é injetado e retirado, ou ainda, qual dos terminais do transistor é referência para a entrada e saída de sinal.

Base Comum:

No circuito a seguir, observa-se que o sinal é injetado entre emissor e base e retirado entre coletor e base.

Desta forma, pode-se dizer que a base é o terminal comum para a entrada e saída do sinal. O capacitor "C" ligado da base a terra assegura que a base seja efetivamente aterrada para sinais alternados.

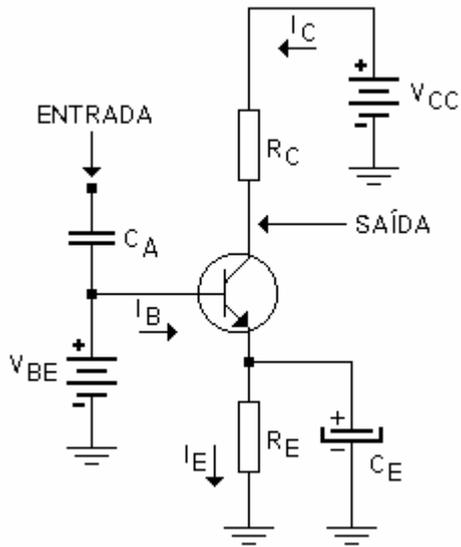


CARACTERÍSTICAS:

- Ganho de corrente (G_i): < 1
- Ganho de tensão (G_v): elevado
- Resistência de entrada (R_{IN}): baixa
- Resistência de saída (R_{OUT}): alta

Emissor Comum

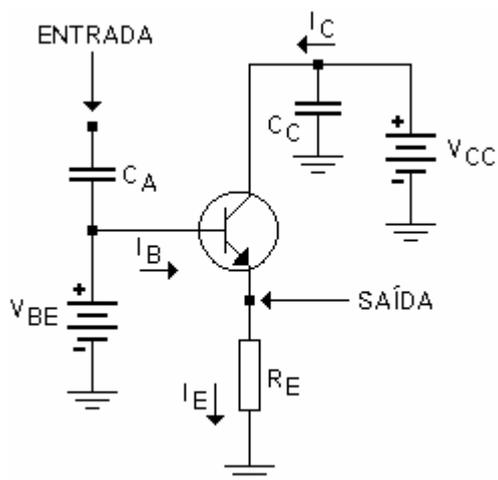
No circuito emissor comum, o sinal é aplicado entre base e emissor e retirado entre coletor e emissor. O capacitor no emissor "CE" assegura o aterramento do emissor para sinais alternados. CA é um capacitor de acoplamento de sinal.

**CARACTERÍSTICAS:**

- Ganho de corrente (G_i): elevado
- Ganho de tensão (G_V) elevado
- Resistência de entrada (R_{IN}) média
- Resistência de saída (R_{OUT}) alta

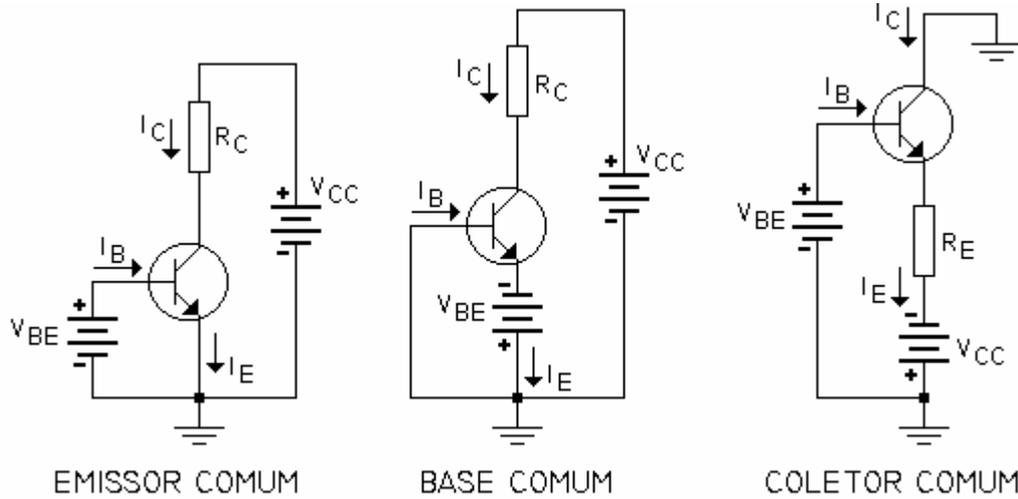
Coletor Comum

A figura a seguir mostra um circuito na configuração coletor comum. A configuração coletor comum também é conhecida como seguidor de emissor. Essa denominação é dada devido a tendência de todo o sinal aplicado na entrada estar praticamente presente na saída (circuito de emissor). O sinal de entrada é aplicado entre base e coletor e retirado do circuito de emissor. O capacitor "CC" ligado do coletor a terra assegura que o coletor esteja aterrado para sinais alternados. C_A é um capacitor de acoplamento de sinal.

**CARACTERÍSTICAS:**

- Ganho de corrente (G_i): elevado
- Ganho de tensão (G_V): ≤ 1
- Resistência de entrada (R_{IN}): muito elevada
- Resistência de saída (R_{OUT}): muito baixa

As configurações emissor comum, base comum e coletor comum, são também denominadas emissor a terra, base a terra e coletor a terra. Essas configurações também podem ser apresentadas conforme ilustram as figuras abaixo:



Representação de Tensões e Correntes

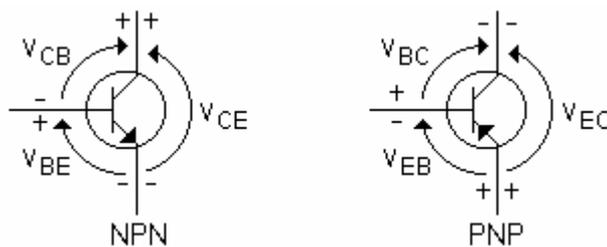
Para representar tensões e correntes em um circuito com transistores, utiliza-se usualmente o método convencional, através de setas.

Para as tensões, a ponta da seta aponta sempre para o potencial mais positivo e as correntes são representadas com setas em sentido contrário as das tensões.

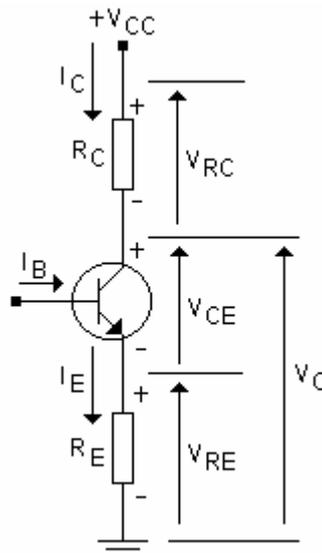
Podemos por exemplo representar uma tensão entre coletor e emissor por V_{CE} quando o transistor for npn. Isto significa que o coletor é mais positivo do que o emissor. Em outras palavras, a primeira letra após o V (neste caso o coletor) é mais positiva do que a segunda letra (neste caso o emissor).

Para um transistor pnp a tensão entre coletor e emissor é representada por V_{EC} , indicando que o emissor é mais positivo do que o coletor.

A figura abaixo ilustra dois transistores com polaridades opostas, utilizando essa representação. (na maioria das literaturas V_{EC} é simbolizada por V_{CE})



Na figura abaixo temos um outro exemplo utilizando essas representações; observe que as setas que indicam o sentido da corrente são opostas aquelas que indicam as tensões.



Para as tensões V_{RC} (tensão no resistor de coletor) e V_{RE} (tensão no resistor de emissor), a ponta da seta indica que a tensão na parte superior desses resistores é mais positiva do que na parte inferior.

Polarização com uma única Bateria:

Temos visto até agora a polarização de transistores utilizando duas baterias, sendo uma para polarização da junção base-emissor e outra para a junção base-coletor.

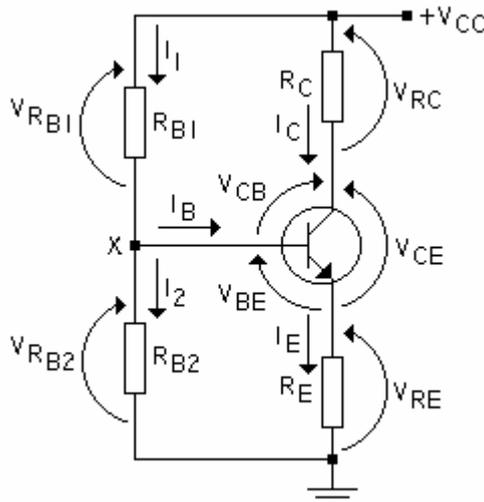
Na maioria das vezes, uma única bateria pode polarizar um circuito transistorizado, visto que o mesmo comporta-se como um circuito fechado.

As tensões nas junções do transistor e nos componentes externos, como resistores, capacitores, indutores, etc. podem ser calculadas utilizando-se as leis de Kirchhoff para tensão (LKT).

Da mesma forma, as correntes podem ser calculadas aplicando-se LKC.

A figura a seguir mostra um transistor com polarização por divisor de tensão na base, cuja teoria será vista no capítulo referente aos circuitos de polarização.

Observe atentamente as indicações das tensões e das correntes em função do sentido das setas.



Aplicando-se LKT, podemos obter várias equações:

1. $V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - V_{RE} = 0$
2. $V_{CE} - V_{BE} - V_{CB} = 0$
3. $V_{CC} - V_{RB1} - V_{RB2} = 0$
4. $V_{RB1} - V_{RC} - V_{CB} = 0$
5. $V_{RB2} - V_{BE} - V_{RE} = 0$
6. $V_{CC} - V_{RC} - V_{CB} - V_{BE} - V_{RE} = 0$

Aplicando-se LKC no ponto X, temos:

1. $I_B = I_1 - I_2$
2. $I_1 = I_2 + I_B$

Curvas Características:

As curvas características definem a região de operação de um transistor, tais como: região de saturação, região de corte, região ativa e região de ruptura.

De acordo com as necessidades do projeto essas regiões de operação devem ser escolhidas. Quando necessitamos de um transistor como chave eletrônica, normalmente as regiões de corte e saturação são selecionadas; no caso de transistor operando como amplificador, via de regra, escolhe-se a região ativa.

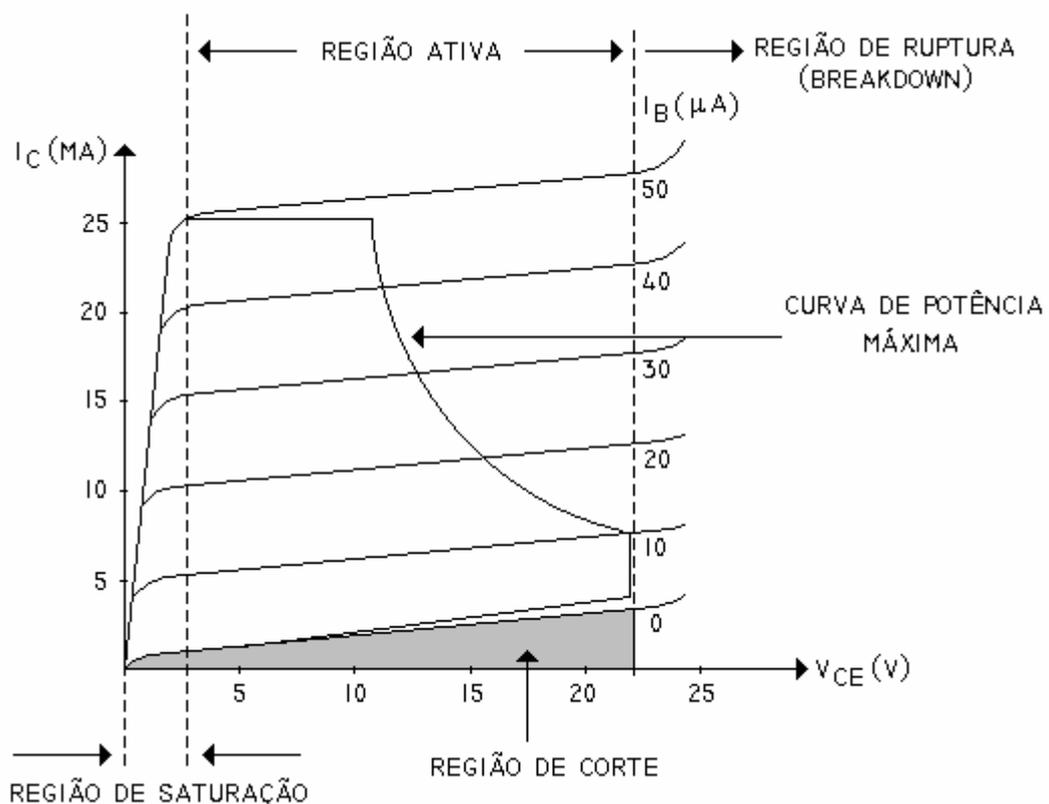
A região de ruptura indica a máxima tensão que o transistor pode suportar sem riscos de danos.

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

Curva Característica para Montagem em Emissor Comum:

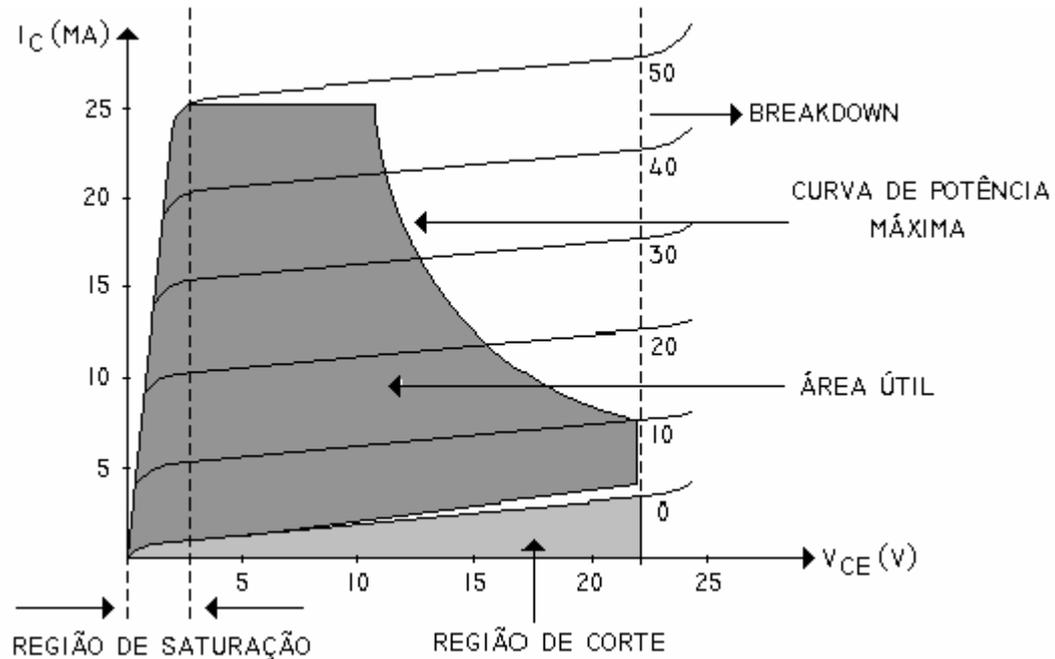
A região de corte é mostrada na área sombreada, onde $I_B = 0$.

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



A figura abaixo 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.

A região útil é delimitada pela curva de potência máxima⁵ e conforme dito anteriormente, o transistor trabalha com segurança, não ultrapassando a máxima potência permitida.

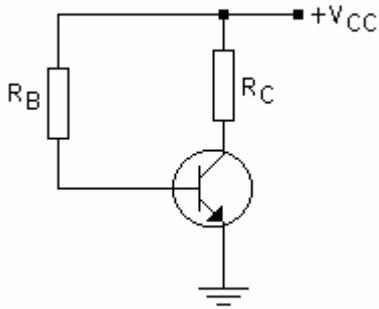


⁵ Também denominada hipérbole de máxima dissipação.

Circuitos de Polarização:

Apresentaremos a seguir alguns circuitos de polarização muito utilizados e suas principais características:

Polarização por Corrente de Base Constante



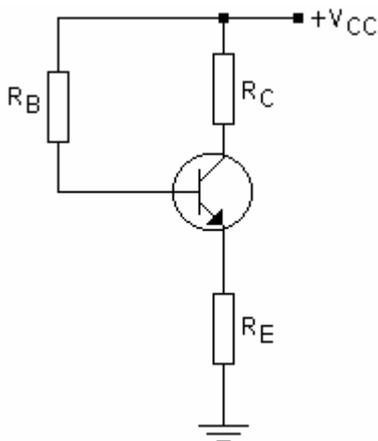
Também denominado de polarização fixa, é um circuito muito utilizado quando deseja-se que o transistor opere como chaveamento eletrônico, com dois pontos bem definidos: corte e saturação.

Por esse motivo esse tipo de polarização não é utilizado em circuitos lineares, pois é muito instável, pois uma variação da temperatura provoca uma variação de β .

Para este tipo de polarização: $I_C = \beta I_B$

Para evitar o disparo térmico, adota-se geralmente: $V_{CE} = 0,5V_{CC}$

Polarização por Corrente de Emissor Constante



Diferente do caso anterior, procura-se compensar as variações de β através do resistor de emissor.

Assim, quando β aumentar, a corrente de coletor aumenta, aumentando também a tensão no emissor, fazendo com que haja uma diminuição da tensão de polarização V_{BE} , reduzindo a corrente de base. Isto resulta numa corrente de coletor menor compensando parcialmente o aumento original de β .

Aplicando LKT: $V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + R_E I_E$

Onde: $V_{RC} = R_C I_C$

Logo: $V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E$

Adota-se como prática para garantir a estabilidade térmica sem afetar o sinal de saída: $V_{RE} = 0,1V_{CC}$

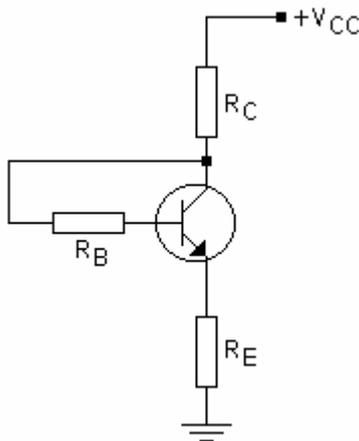
Equações básicas:

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_B + \beta R_E} \text{ ou ainda: } I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

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

Polarização por Realimentação Negativa

Este circuito reduz o ganho, mas em compensação aumenta a estabilidade.



Equações básicas:

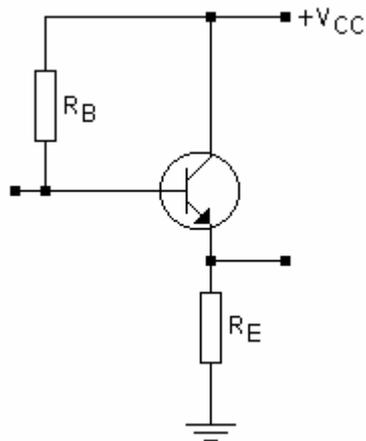
$$V_{RE} = 0,1V_{CC}$$

$$V_{RC} = V_{CC} - (V_{CE} + V_{RE})$$

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_B + \beta R_C}$$

Seguidor de Emissor

O seguidor de emissor tem como característica o ganho de tensão baixo (≤ 1)



Equações básicas:

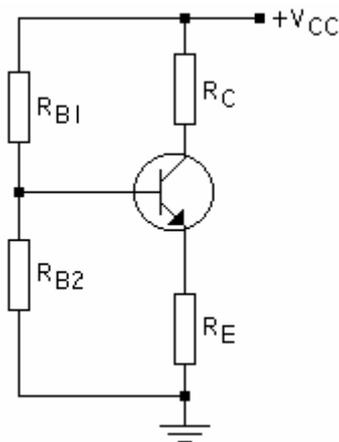
$$V_{CE} = 0,5V_{CC}$$

$$R_E = \frac{0,5V_{CC}}{I_E}$$

$$I_E = \beta I_B$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{be}}{R_B + \beta R_E}$$

Polarização por Divisor de Tensão na Base



A polarização por divisor de tensão na base ou polarização universal é um dos métodos mais usados em circuitos lineares.

A grande vantagem desse tipo de polarização é sua estabilidade térmica (praticamente independente de β). O nome divisor de tensão é proveniente do divisor de tensão formado por R_{B1} e R_{B2} , onde R_{B2} polariza diretamente a junção base-emissor.

Passemos a analisar como opera esse tipo de polarização.

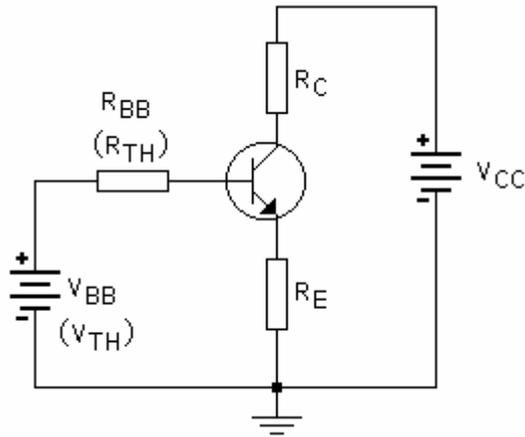
Aplicando Thèvenin: Abrindo o terminal da base temos:

$$V_{TH} = \frac{R_{B2} \cdot V_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

Ainda com o terminal da base aberto e VCC em curto, temos:

$$R_{TH} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

Isto nos dá o circuito equivalente de Thèvenin:



OBS: A resistência equivalente de Thèvenin recebe o nome de R_{BB} enquanto que a tensão equivalente de Thèvenin recebe o nome de V_{BB}

Aplicando LKT:

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

$$\text{Sendo: } I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}, \text{ temos: } I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{TH}}{\beta + 1}}$$

Se R_E for 10 vezes maior do que $\frac{R_{TH}}{\beta + 1}$, podemos simplificar a fórmula:

$$I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E}$$

Para se conseguir uma boa estabilidade no circuito utiliza-se a regra 10:1, o que equivale dizer que:

$$R_{TH} \leq 0,1\beta R_E$$

Apresentamos a seguir algumas regras práticas para a elaboração de um projeto de polarização por divisor de tensão na base:

$$V_E = 0,1V_{CC}$$

$$V_{CE} = 0,5V_{CC}$$

$$V_{RC} = 0,4V_{CC}$$

$$R_C = 4R_E$$

$$R_{BB} = 0,1\beta R_E$$

$$R_{B1} = \frac{R_{BB} \cdot V_{CC}}{V_{BB}} \quad \text{ou} \quad R_{B1} = R_{BB} \cdot \frac{V_{CC}}{V_{BB}}$$

$$R_{B2} = \frac{R_{B1} \cdot R_{BB}}{R_{B1} - R_{BB}} \quad \text{ou} \quad R_{B2} = \frac{R_{BB}}{1 - \frac{V_{BB}}{V_{CC}}}$$

Cálculo das correntes de emissor, base e coletor

➤ Em função de β

$$I_B = \frac{I_E}{(\beta + 1)} - I_{CBO} \quad \rightarrow \quad I_E = (\beta + 1)I_B + (\beta + 1)I_{CBO}$$

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO} \quad \text{onde:} \quad (\beta + 1)I_{CBO} = I_{CEO}$$

➤ Em função de α :

➤ Partindo da equação (II) da página 6 desta apostila:

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

$$\text{Temos: } I_E = I_C + I_B$$

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

$$\text{Portanto: } I_C = \alpha I_C + \alpha I_B + I_{CBO}$$

$$\text{Resolvendo: } I_C - \alpha I_C = \alpha I_B + I_{CBO}$$

Colocando I_C em evidência resulta:

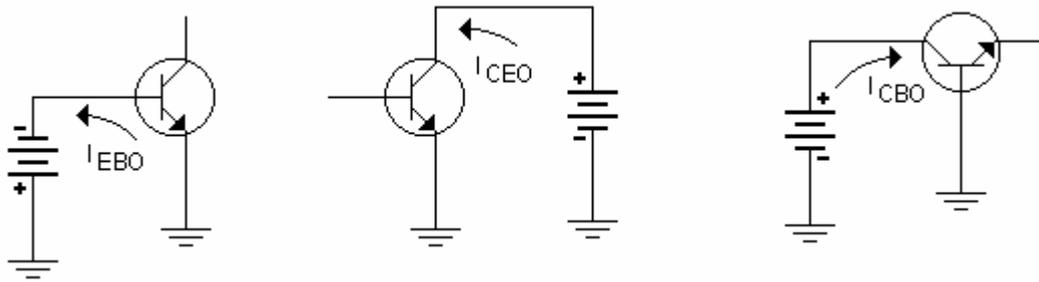
$$I_C(1 - \alpha) = \alpha I_B + I_{CBO}$$

Portanto:

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

Correntes de Fuga no Transistor:

Existem três situações distintas para o transistor: coletor aberto; emissor aberto e base aberta.



I_{EBO} : É a corrente entre base e emissor com o coletor aberto. Não é normal termos esta situação, uma vez que a junção base-emissor de um transistor é sempre polarizada diretamente.

I_{CEO} : Esta corrente ao contrário da anterior, tem um elevado significado. Trata-se da corrente entre coletor e emissor com a base aberta.

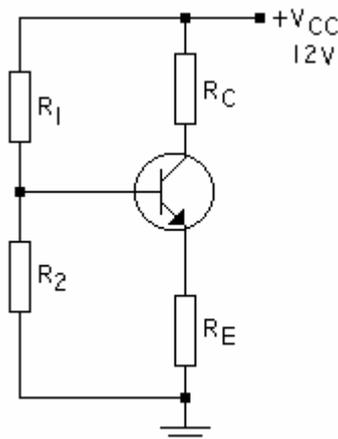
$$I_{CEO} = (\beta + 1)I_{CBO}$$

Basicamente determina a amplificação de um circuito, conforme será visto mais adiante.

I_{CBO} : Varia com a temperatura, sendo de grande importância, uma vez que, para cada 10°C de aumento de temperatura, essa corrente dobra. É a corrente entre coletor e base, com o emissor aberto.

Exercícios Resolvidos sobre Polarização:

1- Dado o circuito abaixo, polarizar o transistor na região ativa, determinando o valor dos resistores e as correntes.



DADOS:
 $\beta = 100$
 $I_C = 3\text{mA}$
 $V_{BE} = 0,7\text{V}$

Solução:

Adotando $V_E = 0,1V_{CC}$, $V_{CE} = 0,5V_{CC}$ e $V_{RC} = 0,4V_{CC}$, temos:

$$V_E = V_{RE} = 1,2V$$

$$V_{CE} = 6V$$

$$V_{RC} = 4,8V$$

Cálculo de I_B

Como $\beta = 100$, podemos fazer $I_C = I_E$, logo: $I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{3mA}{100} = 30\mu A$

Cálculo de R_E

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{1,2V}{3mA} = 400\Omega$$

Cálculo de R_{BB}

$$R_{BB} = 0,1\beta \cdot 400 = 4k\Omega$$

Cálculo de V_{BB}

$$V_{BB} = R_{BB}I_B + V_{BE} + V_{RE} = 4.000 \cdot (30 \cdot 10^{-6}) + 0,7 + 1,2 = 0,12 + 0,7 + 1,2$$

$$V_{BB} = 2,02V$$

Cálculo de R_C

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = \frac{4,8V}{3mA} = 1,6k\Omega \text{ (equivalente a } 4R_E)$$

Cálculo de R_1

$$R_1 = \frac{R_{BB} \cdot V_{CC}}{V_{BB}} = \frac{4.000 \cdot (12)}{2,02} = \frac{48.000}{2,02} = 23.762\Omega$$

Cálculo de R_2

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_{BB}}{R_1 - R_{BB}} = \frac{(23.762) \cdot (4.000)}{23.762 - 4.000} = \frac{95.048}{19.762} = 4.817\Omega$$

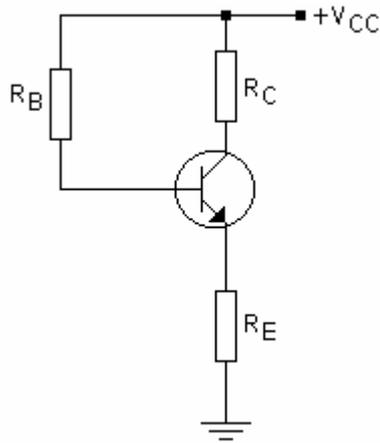
Podemos também calcular R_2 da seguinte forma:

$$R_2 = \frac{R_{BB}}{1 - \frac{V_{BB}}{V_{CC}}} = \frac{4.000}{1 - \frac{2,02}{12}} = \frac{4.000}{1 - 0,1683} = \frac{4.000}{0,8317} = 4.809\Omega \approx 4.817\Omega$$

2 - Dado o circuito a seguir, calcule: β , I_{CEO} , I_C , I_B , R_C e R_B .

DADOS:

$I_E = 4mA$

**Cálculo de β**

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0,92}{1 - 0,92} = 11,5$$

Cálculo de I_{CEO}

$$I_{CEO} = (\beta + 1)I_{CBO} = 12,5 \cdot (6\mu A) = 75\mu A$$

Cálculo de I_C

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} = 0,92 \cdot (4mA) = 3,68mA + 75\mu A = 3,755mA$$

Cálculo de I_B

$$I_B = I_E - I_C = 4mA - 3,755mA = 245\mu A$$

Cálculo de R_C

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} \rightarrow V_{RC} = V_{CC} - V_{CE} - V_{RE} \text{ (onde } V_{RE} = 0,1V_{CC}\text{)}$$

$$V_{RC} = 12 - 5 - 1,2 = 5,8V$$

$$R_C = \frac{5,8V}{3,755mA} = 1,54k\Omega \text{ (1.544,6}\Omega\text{)}$$

Cálculo de R_E

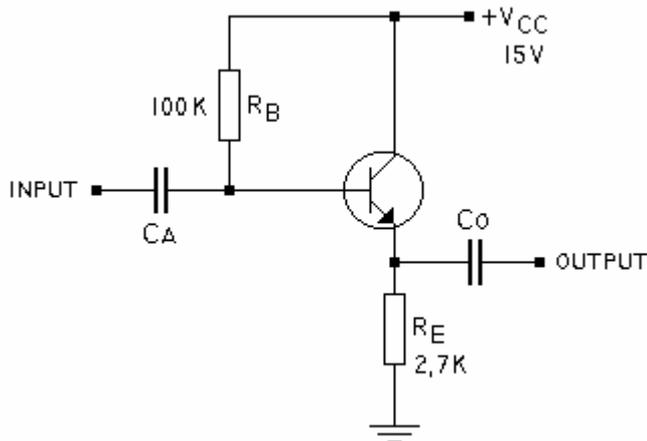
$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{1,2}{4mA} = 300\Omega$$

Cálculo de R_B

$$R_B = \frac{V_{RB}}{I_B} \rightarrow V_{RB} = V_{CC} - V_{BE} - V_{RE} \rightarrow V_{RB} = 12 - 0,55 - 1,2 = 10,25V$$

$$R_B = \frac{10,25V}{245\mu A} = 41,84k\Omega \quad (41.836,7\Omega)$$

3 - No seguidor de emissor a seguir, calcule todas as tensões e correntes de polarização, considerando $\beta = 40$.



Cálculo de I_B

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta R_E} = \frac{14,3}{100k\Omega + 40(2,7k\Omega)} = \frac{14,3}{100k + 108k} = 68,75 \mu A$$

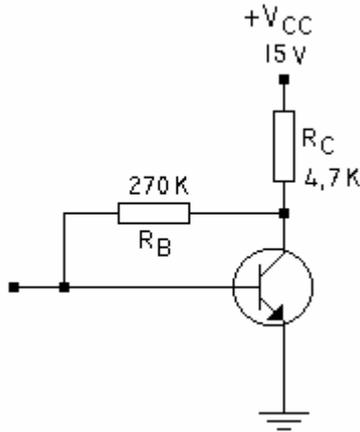
Cálculo de I_E

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = (41) 68,75\mu A = 2,82mA$$

Cálculo de V_{CE}

$$V_{CE} = V_{CC} - R_E I_E = V_{CC} - V_{RE} = 15 - (2,7k\Omega \cdot 2,82mA) = 15 - 7,61V = 7,3V$$

4 - Calcule as correntes e as tensões de polarização no circuito a seguir: Considere $\beta = 100$.



Cálculo de I_B

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta R_C} = \frac{14,3}{270k + 100 \cdot 4,7k} = \frac{14,3}{270k + 470k} = \frac{14,3}{740k} = 19,32 \mu A$$

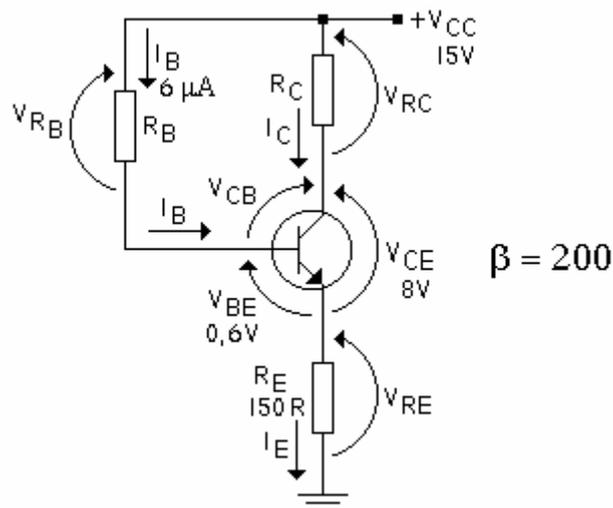
Cálculo de I_C

$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot (19,32 \mu A) = 1,932 mA$$

Cálculo de V_{CE}

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 15 - (4,7k \cdot 1,932 mA) = 15 - 9,08 = 5,91 V$$

5 - Calcule I_C , I_B , R_C e R_B no circuito abaixo.



Equações básicas

$$(I) V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - V_{RE} = 0$$

$$V_{RC} = R_C I_C \text{ e } V_{RE} = R_E I_E, \text{ temos:}$$

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

Cálculo de I_C

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}, \text{ logo: } I_C = 6\mu\text{A} \cdot 200 = 1,2\text{mA}$$

Cálculo de I_E

$$I_E = I_C + I_B = 1,2\text{mA} + 6\mu\text{A} = 1,206\text{mA} \approx 1,2\text{mA}$$

Quando $\beta > 100$, podemos considerar $I_C = I_E$

Cálculo de R_C

Utilizando a equação (II)

$$15 = (R_C \cdot 1,2\text{mA}) + 8 + (150 \cdot 1,2\text{mA}) \rightarrow 15 = (R_C \cdot 1,2\text{mA}) + 8 + 0,18$$

$$15 = (R_C \cdot 1,2\text{mA}) + 8,18$$

$$R_C = \frac{15 - 8,18}{1,2\text{mA}} = 5,68\text{k}\Omega \text{ (5.683,3}\Omega\text{)}$$

Cálculo de R_B

$$V_{RB} = V_{CB} + V_{RC}$$

$$R_B I_B = V_{CB} + R_C I_C \text{ como: } V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}, \text{ então: } V_{CB} = 8 - 0,6 = 7,4\text{V}$$

$$\text{Desta forma: } R_B \cdot (6\mu\text{A}) = 7,4 + (5,68\text{k} \cdot 1,2\text{mA}) = 7,4 + 6,816 = 14,216\text{V}$$

$$R_B = \frac{14,216\text{V}}{6\mu\text{A}} = 2,37\text{M}\Omega \text{ (2.369.333,33}\Omega\text{)}$$

Reta de Carga

Podemos determinar o ponto de operação de um transistor através da reta de carga, definindo em um projeto ou aplicação os parâmetros de tensão e corrente.

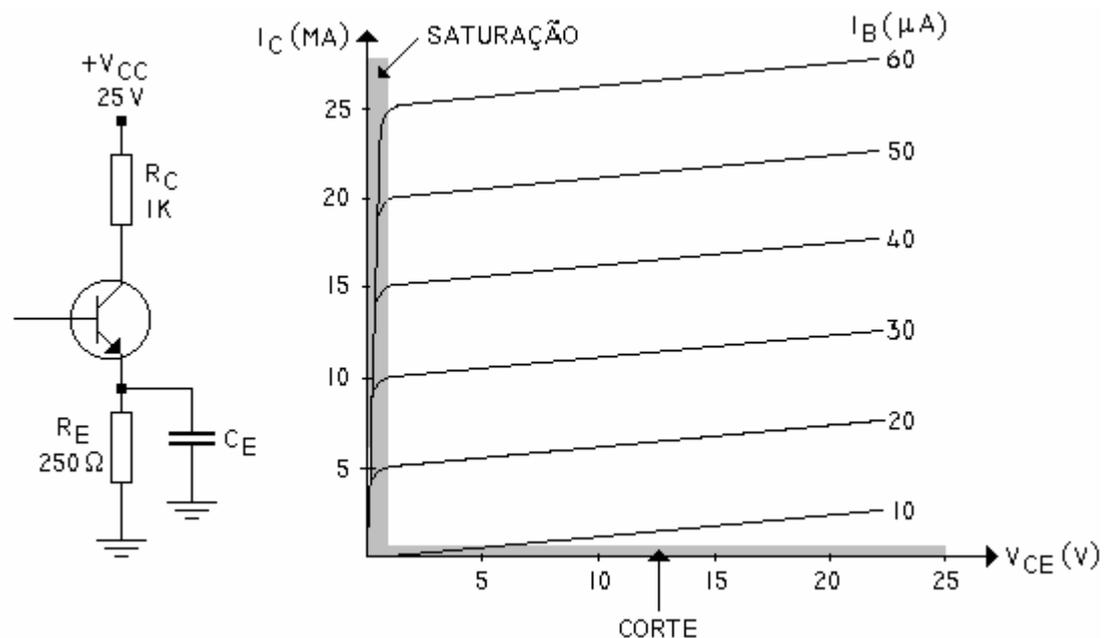
Esse método gráfico somente pode ser aplicado se tivermos disponível a curva característica do transistor, fornecida pelo fabricante.

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

Neste capítulo abordaremos apenas reta de carga para CC; reta de carga para CA será abordada posteriormente.

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 região linear, região de corte ou região 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 ao lado.

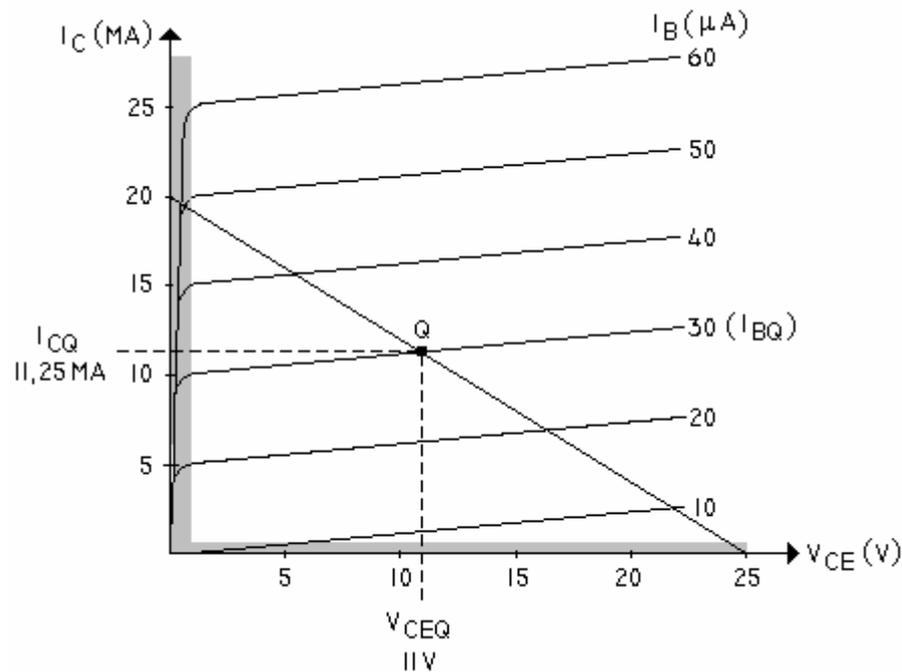


Observe as áreas sombreadas, que representam as regiões de corte e de saturação.

Para determinarmos a reta de carga, necessitamos de dois pontos. Através da equação $V_{CC} = (R_E \cdot I_E) + (R_C \cdot I_C) + V_{CE}$, obtemos:

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

2º ponto: para $V_{CE} = 0$, temos $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{25V}{1,25k\Omega} = 20mA$



Procedimento:

Traça-se então a reta de carga unindo os dois pontos.

Para que o transistor opere na região 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 $30\mu A$.

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 LKT para determinar a tensão nos resistores:

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

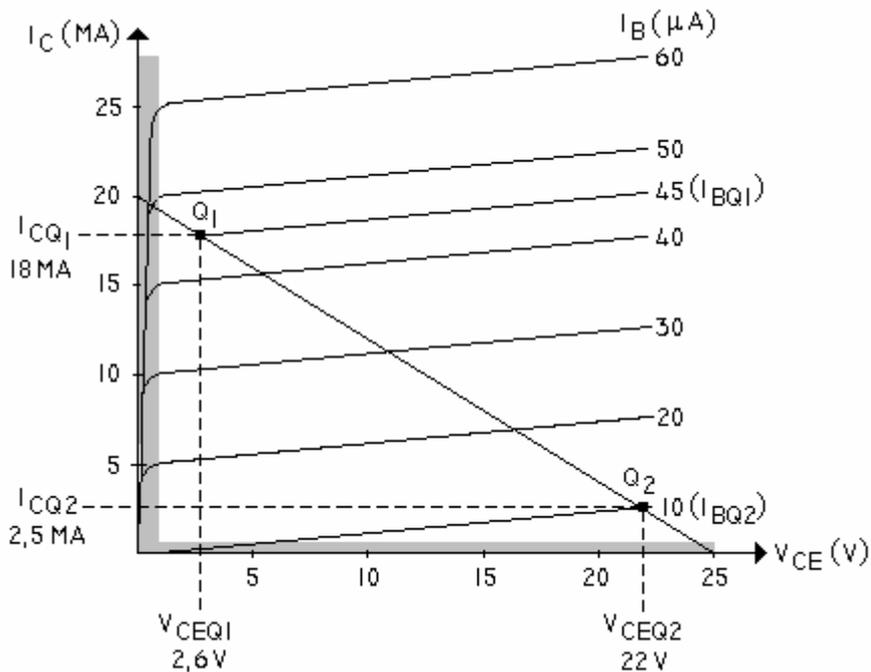
Partindo da equação: $V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE}$

$$V_{RC} = (11,25mA) \cdot 1k\Omega = 11,25V$$

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

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

Se na mesma curva selecionarmos um ponto Quiescente (Q1) mais próximo da região de saturação, por exemplo $I_B = 45\mu A$, 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 $I_B = 10\mu A$, teremos uma diminuição da corrente de coletor e um aumento de V_{CE} , conforme ilustra a figura abaixo:



CONCLUSÕES:

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.

A tensão de saturação típica para um transistor de silício é da ordem de 150 a 250mV.

Podemos então aplicar LKT referente aos pontos Q_1 e Q_2 , e constatar a variação de β ao longo da reta de carga.

Para Q_1 :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{18\text{mA}}{45\mu\text{A}} = 400$$

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE} = 1\text{k}\Omega \cdot (18\text{mA}) + 2,6 + 250\Omega \cdot (18\text{mA})$$

$$V_{CC} = 18 + 2,6 + 4,5 = 25,1\text{V} \approx 25\text{V}$$

Para Q_2 :

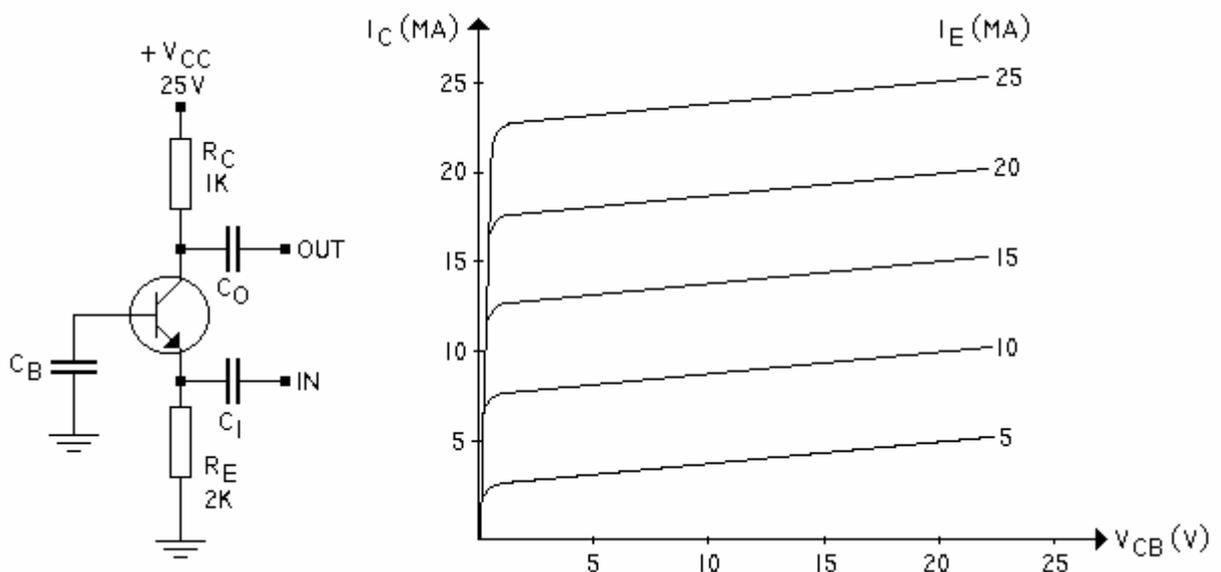
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2,5\text{mA}}{10\mu\text{A}} = 250$$

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE} = 1\text{k}\Omega \cdot (2,5\text{mA}) + 22 + 250\Omega \cdot (2,5\text{mA})$$

$$V_{CC} = 2,5 + 22 + 0,625 = 25,125\text{V} \approx 25\text{V}$$

A reta de carga pode ser também obtida para uma configuração base comum ou emissor comum, seguindo o mesmo processo. Apresentaremos um exemplo de uma reta de carga para uma montagem em base comum.

Como no caso anterior, devemos determinar dois pontos para traçar a reta de carga.



1º ponto:

Quando $I_C = 0$, temos $V_{CB} = V_{CE} = V_{CC}$.

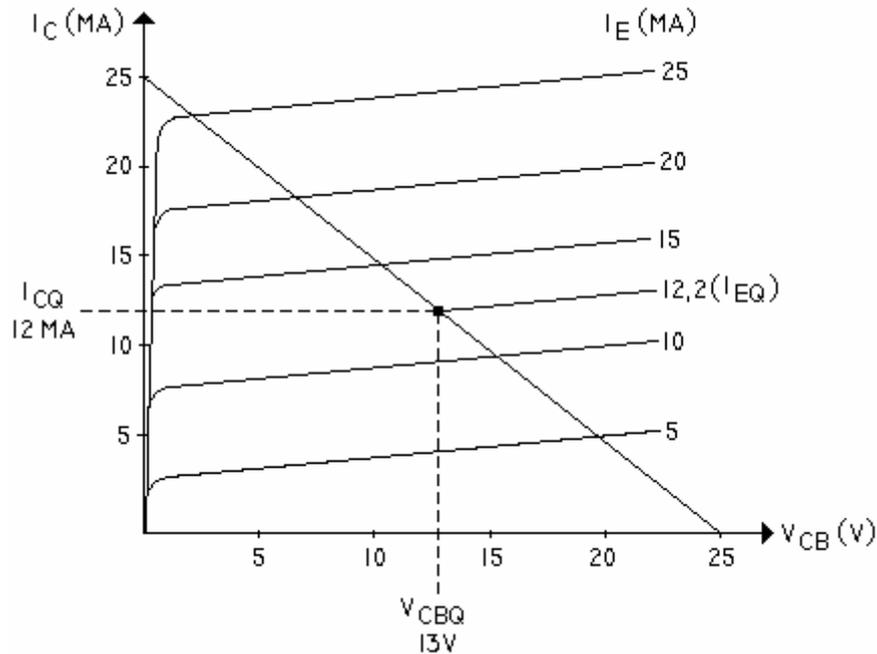
Observe que o eixo da tensão está calibrado em V_{CB} .

Quando $I_C = 0$, $V_{BE} = 0$, como $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$, logo $V_{CB} = V_{CE} - 0$
Portanto, $V_{CB} = 25\text{V}$

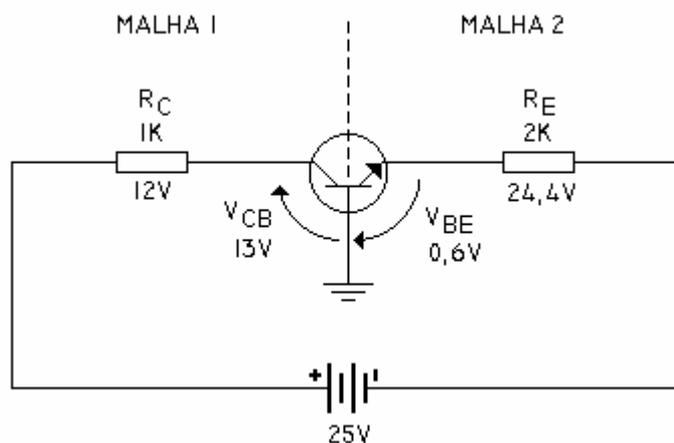
2º ponto:

Para $V_{CE} = 0$, temos: $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{25\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 25\text{mA}$

Neste caso R_E é o circuito de entrada da configuração base comum, sendo então desconsiderado para calcular um dos pontos da reta de carga.

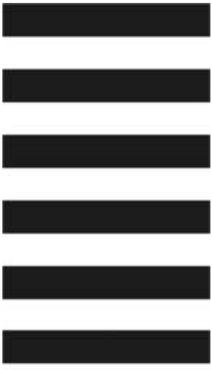


Podemos então aplicar LKT no circuito em função dos dados obtidos no gráfico. Como trata-se de uma configuração base-comum, existem duas malhas definidas: uma para o circuito de entrada (base-emissor) e outra para o circuito de saída (base-coletor). Veja a figura abaixo:



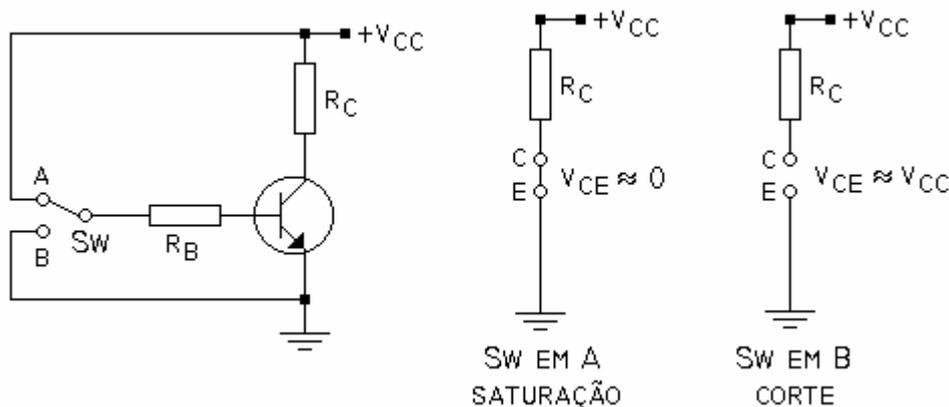
Onde: $V_{RC} = R_C I_C = 1k\Omega \cdot (12mA) = 12V$
 $V_{RE} = R_E I_E = 2k\Omega \cdot (12,2mA) = 24,4V$

Desta forma: $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} = 13 + 0,6 = 13,6V$



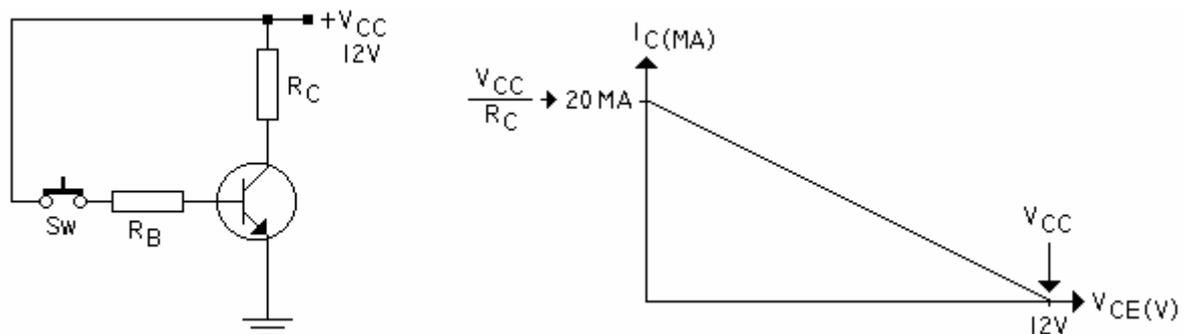
Transistor como Chave Eletrônica.

É a forma mais simples de operação de um transistor, pois ao longo da reta de carga são definidos apenas dois pontos: corte e saturação e, portanto, podemos dizer que quando um transistor está saturado, comporta-se como uma chave eletrônica fechada e quando está em corte, como uma chave eletrônica aberta.



Para que efetivamente o transistor opere como uma chave eletrônica, é preciso garantir sua saturação para qualquer tipo de transistor, sob todas as condições de funcionamento; variação da temperatura, correntes, β , etc.

Na prática, ao projetar uma chave eletrônica com transistor, utiliza-se a corrente de base da ordem de $1/10$ da corrente de coletor no extremo superior da reta de carga, conforme mostra a figura abaixo:



O valor de 20 mA foi escolhido na curva característica e portanto, a corrente de base será $1/20\text{ mA} = 2\text{ mA}$.

OBS: Na elaboração do projeto, deve-se tomar o cuidado de não ultrapassar os valores máximos especificados pelo fabricante, como corrente de coletor, corrente de base, tensão entre coletor e emissor, potência de dissipação, etc.

Estamos considerando o valor de 20 mA plenamente compatível com nosso exemplo de projeto.

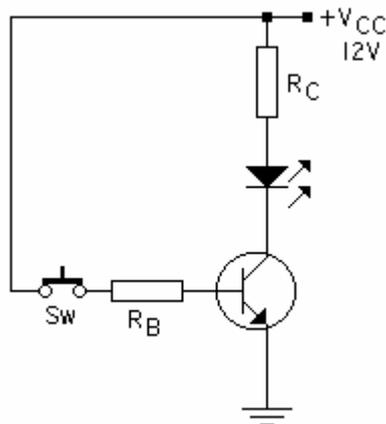
Podemos então definir os valores de R_C e R_B

$$R_B = \frac{V_{RB}}{I_B} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 0,7}{2\text{mA}} = \frac{11,3\text{V}}{2\text{mA}} = 5,65\text{k}\Omega$$

Considerando V_{CE} de saturação = 0, teremos:

$$R_C = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{12}{0,02} = 600\Omega$$

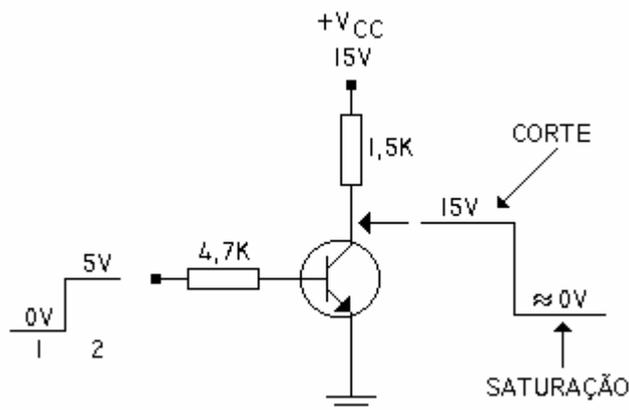
Para levar o transistor ao corte, basta abrir Sw, pois com isso, $I_B = 0$. Admitamos que queiramos no mesmo circuito controlar um led. Deveremos então recalcular o valor de R_C .



Supondo que a tensão no led seja de 1,6V (valor típico), então:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{led}}{I_C} = \frac{12 - 1,6}{20\text{mA}} = \frac{10,4}{0,02} = 520\Omega$$

OBS: É importante observar se o led suporta a corrente do projeto. Um outro exemplo de transistor usado como chave é mostrado abaixo.



Um sinal cuja forma de onda é quadrada e amplitude que varia de 0 a 5V é aplicado na entrada.

No instante 1, com 0V na entrada o transistor entra em corte, operando como uma chave aberta e teremos na saída 15V (V_{CC}); no instante 2, com 5V na entrada o transistor entra em saturação, operando como uma chave fechada e portanto, teremos na saída $\approx 0V$.

O próximo passo é verificar se os valores adotados para R_C e R_B garantem a saturação do transistor, ou seja, I_B deve ser da ordem de 1/10 de I_C .

$$I_B = \frac{5V - 0,7V}{4,7k\Omega} = 0,915mA$$

$$I_C = \frac{15V}{1,5k\Omega} = 10mA$$

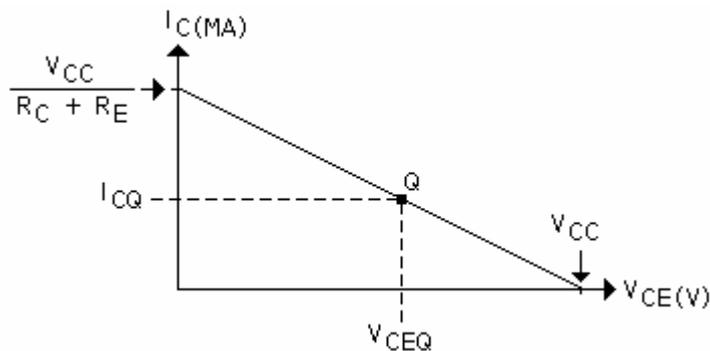
Portanto, a relação é válida ($10/0,915 = 10,9$), garantindo a saturação

Transistor como Fonte de Corrente.

Consiste em tornar a tensão de emissor fixa, resultando assim em uma corrente de emissor fixa.

Pelo fato da tensão V_{BE} ser fixa (da ordem de 0,7V), V_E seguirá as variações da tensão de entrada (V_{BB}), isto é, se a tensão de entrada aumentar de 6V para 10V, a tensão V_E (nos extremos de R_E) variará de 5,3V para 9,3V.

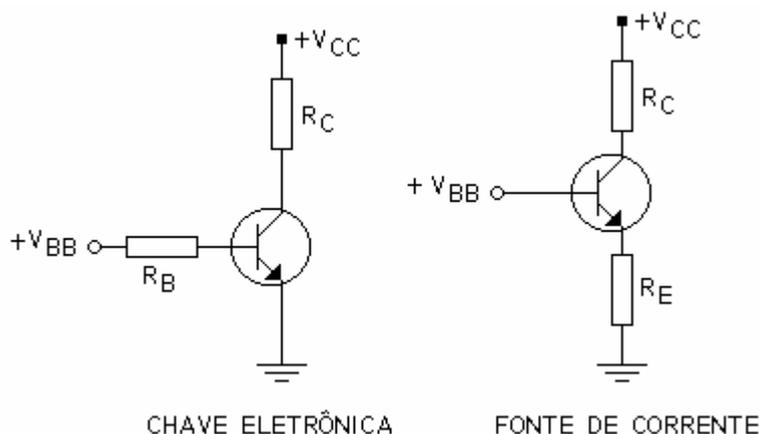
Ao contrário do transistor como chave eletrônica, o ponto de operação situa-se na região ativa ao longo da reta de carga.



A identificação entre um circuito com transistor operando como chave eletrônica e como fonte de corrente é fácil; quando opera como chave eletrônica, o emissor é aterrado e existe um resistor na base, ao passo que, como fonte de corrente o emissor é aterrado através de um resistor, não havendo resistor na base.

Quando desejamos acionar um led, o ideal é fazê-lo através de uma fonte de corrente, principalmente quando o valor de V_{CC} é baixo, levando-se em conta a queda de tensão no led da ordem de 1,5 a 2,5V.

A ilustração abaixo mostra as diferenças entre uma chave eletrônica e uma fonte de corrente.



Para entender melhor o que foi acima exposto, vamos considerar um transistor operando como fonte de corrente.

Devemos então estabelecer um valor ideal de R_E para nosso projeto.

Vamos supor:

V_{BB} (tensão de entrada) = +5V

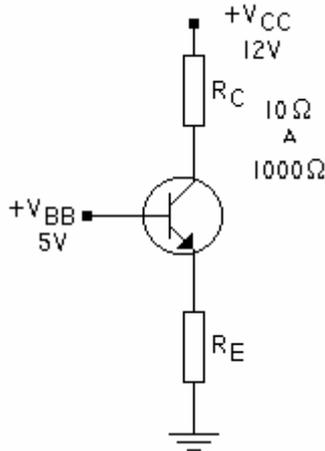
V_{CC} = +12V

I_C = 5mA (um ponto médio da reta de carga dentro da região ativa)

Determinar:

As tensões em R_C para os valores de 10Ω e 1000Ω

O valor de V_{CE} nas duas condições



Determinando R_E

Considerando $I_C = I_E$, temos:

$$R_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_E} = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{5V - 0,7V}{5mA} = \frac{4,3V}{5mA} = 860\Omega$$

Lembrar que $V_{BB} - V_{BE} = V_{RE} = V_E$

A tensão de 4,3V ficará fixa, fixando também a corrente do emissor, para uma grande gama de valores de R_C , desde que o transistor opere dentro da região ativa.

Calculando V_{RC}

Levando-se em conta que a tensão do emissor está amarrada em 4,3V então, para os dois casos $I_C = 5mA$ (estamos admitindo $I_E = I_C$).

Para $R_C = 10\Omega \rightarrow V_{RC} = 10\Omega \cdot (5mA) = 0,05V$

Para $R_C = 1,0k\Omega \rightarrow V_{RC} = 1k\Omega \cdot (5mA) = 5V$

Para satisfazer a equação $V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - V_{RE} = 0$, a tensão V_{CE} é que variará, assim sendo temos:

Para $R_C = 10\Omega$

$$V_{CE} = 12 - 0,05 - 4,3 = 7,65V$$

Para $R_C = 1k\Omega$

$$V_{CE} = 12 - 5 - 4,3 = 2,7V$$

CONCLUSÕES:

A corrente de coletor manteve-se constante para uma variação muito grande de R_C (100 vezes).

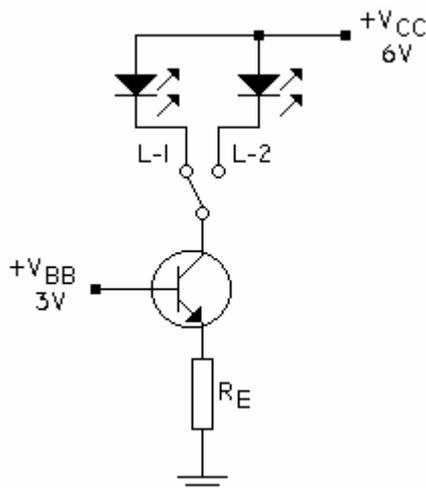
Mesmo com $R_C = 0$ a corrente de emissor se manterá em 5mA. No entanto, se R_C assumir valores mais elevados, suponhamos $4k\Omega$, teríamos teoricamente $V_{RC} = 20V$, o que invalidaria a equação $V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - V_{RE} = 0$, em outras palavras, para satisfazer a dita equação, I_C teria que assumir valores menores. Deve-se portanto evitar trabalhar com valores de R_C que propiciem uma tensão V_{CE} muito próxima da região de saturação.

O valor da corrente de coletor não depende do valor de β , isto é, ao substituir o transistor por outro de β diferente, a corrente de coletor permanecerá praticamente igual.

Quanto maior for R_E (respeitando-se as características do projeto), mais estável torna-se a corrente de coletor.

Quando o valor de V_{CC} for relativamente baixo (por exemplo 5V) o acionamento de leds é mais eficaz com uma fonte de corrente, pois para leds de cores, tamanhos e fabricantes diferentes (a tensão pode variar de 1,5V a 2,5V), a corrente será praticamente constante não prejudicando a luminosidade.

Para fixar melhor o conceito referente ao transistor operando como fonte de corrente vamos admitir uma situação conforme ilustra a figura abaixo.



Os leds L-1 e L-2 necessitam de uma corrente de 15mA para obter uma

luminosidade ideal. No entanto L-1 proporciona uma queda de 1,5V enquanto que L-2 uma queda de 2,5V. Poderá o led 2 ter sua luminosidade diminuída por necessitar de mais tensão?

Solução:

A primeira impressão é de que realmente o led 2 terá sua luminosidade diminuída, pois em comparação ao led 1 necessita de mais tensão em seus terminais.

No entanto como os leds estão sendo acionados por uma fonte de corrente tal não acontecerá, conforme será mostrado nos cálculos a seguir:

Fixando a corrente de emissor:

Se ambos os leds necessitam de 15mA para o brilho ideal então basta fixar a corrente de emissor em 15mA, dimensionando o valor de R_E .

$$R_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_E} = \frac{3V - 0,7V}{15mA} = 153,333\Omega \text{ (onde } V_{BB} - V_{BE} = V_{RE})$$

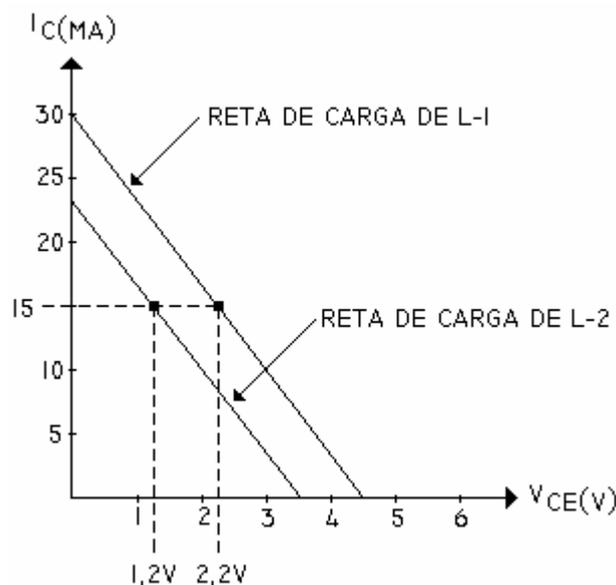
Adotaremos então $R_E = 150\Omega$

$$\text{Para o led 1: } V_{CE} = 6 - V_{led} - V_{RE} = 6 - 1,5 - 2,3 = 2,2V$$

$$\text{Para o led 2: } V_{CE} = 6 - V_{led} - V_{RE} = 6 - 2,5 - 2,3 = 1,2V$$

Desta forma, a luminosidade do led 2 não será diminuída.

A figura a seguir mostra que a corrente nos leds permanece constante, embora as tensões sejam diferentes.



Reta de carga de L-1

1º ponto:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{led}}{R_E} = \frac{6V - 1,5V}{150\Omega} = 30mA$$

2º ponto:

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{led} = 6 - 1,5 = 4,5V$$

Reta de carga de L-2

1º ponto:

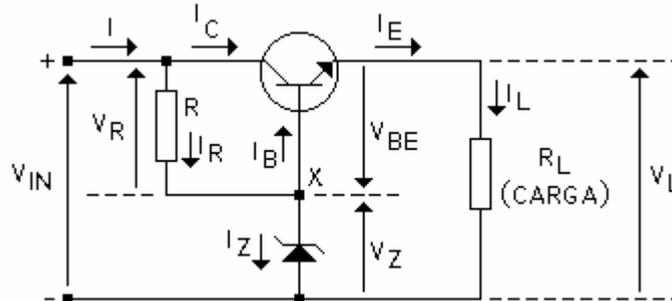
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{led}}{R_E} = \frac{6V - 2,5V}{150\Omega} = 23,3mA$$

2º ponto:

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{led} = 6 - 2,5 = 3,5V$$

Regulador Série.

O regulador série é na realidade uma fonte de alimentação regulada mais sofisticada em relação aos reguladores que utilizam apenas diodo zener.



O diodo zener atua apenas como elemento de referência enquanto que o transistor é o elemento regulador ou de controle. Observa-se que o transistor está em série com a carga, daí o nome regulador série.

Funcionamento:

- A tensão de saída estará disponível na carga (V_L), então: $V_L = V_Z - V_{BE}$
- Como $V_Z \gg V_{BE}$ podemos aproximar: $V_L = V_Z$
- Sendo V_Z constante, a tensão no ponto "x" será constante
- Caso V_{IN} aumente podemos analisar o que acontece aplicando LKT:

$$V_{IN} = V_R + V_Z, \text{ mas } V_R = V_{CB}, \text{ logo: } V_{IN} = V_{CB} + V_Z$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

Portanto, quando V_{IN} aumenta, como V_Z é constante, V_{CB} também aumentará provocando um aumento de V_{CE} , de modo a suprir a variação na entrada, mantendo V_L constante.

$$V_L = V_{IN} - V_{CE}$$

Então: se V_{IN} aumenta $\rightarrow V_{CE}$ aumenta $\rightarrow V_L$ não se altera

Caso V_{IN} diminua podemos analisar o que acontece aplicando LKT, obedecendo os mesmos princípios adotados anteriormente. Neste caso V_{CB} diminui.

Com a diminuição de $V_{IN} \rightarrow V_{CE}$ diminui $\rightarrow V_L$ não se altera

Limitações:

Valores mínimos e máximos de V_{IN} como

$$V_{IN} = V_R + V_Z \quad \text{e} \quad V_R = R \cdot I_R \quad \text{mas} \quad I_R = I_Z + I_B$$

Então:

$$V_{IN} = R(I_Z + I_B) + V_Z$$

Para V_{IN} mínima temos: $V_{IN(MIN)} = R(I_{Z(MIN)} + I_{B(MAX)})$

Portanto, abaixo do valor mínimo de entrada o diodo zener perderá suas características de estabilização.

Para V_{IN} máxima temos: $V_{IN(MAX)} = R(I_{Z(MAX)} + I_{B(MIN)})$

Acima do valor máximo de entrada o diodo zener perderá também suas características de estabilização e será danificado.

Condições para um Projeto:

Alguns parâmetros devem ser observados para que o circuito opere em condições normais sem danificar seus componentes.

➤ Tensão de entrada máxima:

$$V_{IN(MAX)} = (I_{B(MIN)} + I_{Z(MAX)}) \cdot R + V_Z \quad (I)$$

Na pior condição $R_L = \infty$ (carga aberta), logo $I_{B(MIN)} = 0$

$$V_{IN(MAX)} = R \cdot (I_{Z(MAX)}) + V_Z$$

$$\text{Onde: } I_{Z(MAX)} = \frac{P_{Z(MAX)}}{V_Z}$$

➤ Tensão de entrada mínima:

$$V_{IN(MIN)} = (I_{B(MAX)} + I_{Z(MIN)}) \cdot R + V_Z \quad (II)$$

$$\text{De (I) tiramos: } I_{Z(MAX)} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z}{R} \quad (III)$$

$$\text{De (II) tiramos: } I_{Z(MIN)} + I_{B(MAX)} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_Z}{R} \quad (IV)$$

Dividindo (III) e (IV) temos:

$$\frac{I_{Z(MAX)}}{I_{Z(MIN)} + I_{B(MAX)}} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z}{V_{IN(MIN)} - V_Z}$$

Projeto

Projetar uma fonte de alimentação estabilizada com diodo zener e transistor com as seguintes características:

Tensão de saída (V_L): 6V

Corrente de saída máxima ($I_{L(MAX)}$): 1,5A

Tensão de entrada (V_{IN}): $12V \pm 10\%$

Escolha do transistor

O transistor a ser utilizado deverá obedecer as seguintes características:

$V_{CBO} > V_{IN(MAX)} \rightarrow$ no caso 13,2V

$I_{C(MAX)} > I_{L(MAX)} \rightarrow$ no caso 1,5A

$P_{C(MAX)} > (V_{IN(MAX)} - V_L) \cdot I_{C(MAX)}$

Supondo que o transistor escolhido seja o BD235, que de acordo com o manual do fabricante tem as especificações:

$V_{CBO(MAX)} = 45V$

$I_{C(MAX)} = 2A$

$P_{C(MAX)} = 25W$

$40 > \beta < 250$

Neste caso, o valor mínimo de beta é 40 e o máximo 250. Para que o projeto funcione sem problemas adota-se o beta de menor valor. O transistor escolhido atende as exigências quanto a $V_{CBO(MAX)}$ e $I_{C(MAX)}$. No entanto é preciso verificar se a potência que será dissipada pelo coletor será suficiente para este projeto.

Verificando a potência que será dissipada pelo coletor:

$$P_{C(MAX)} = (V_{IN(MAX)} - V_L) \cdot I_{C(MAX)}$$

$$I_{C(MAX)} = I_{E(MAX)} - I_{B(MAX)}$$

$$I_{E(MAX)} = I_{L(MAX)} \rightarrow I_{C(MAX)} = I_{L(MAX)} - I_{B(MAX)}$$

$$I_{B(MAX)} = \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}} \quad \text{logo:} \quad I_{C(MAX)} = I_{L(MAX)} - \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}}$$

$$I_{C(MAX)} = \frac{I_{L(MAX)}}{1 + \frac{1}{\beta_{(MIN)}}} = \frac{1,5}{1 + \frac{1}{40}} = \frac{1,5}{1,025} = \frac{1,5}{1,025} = 1,46A$$

$$P_{C(MAX)} = (13,2V - 6V) \cdot 1,46A = 10,5W$$

⁶ $I_{C(MAX)}$ é a máxima corrente que o coletor pode suportar

⁷ $P_{C(MAX)}$ é a máxima potência de dissipação do coletor

O transistor escolhido atenderá as necessidades do projeto quanto a dissipação de potência, por estar abaixo da potência máxima especificada pelo fabricante. Torna-se necessário entretanto o uso de um dissipador adequado para evitar sobreaquecimento do transistor.

Escolha do diodo zener:

Levando-se em conta que $V_L = V_Z - V_{BE}$ e que $V_{BE} \approx 0,7V$, se adotarmos um diodo zener com tensão nominal de 6V, então na carga teremos 5,3V. O ideal então é adotar um diodo zener com 6,7V, porém este valor não é comercial. O valor comercial mais próximo encontrado é o BYXC6V8, que tem uma tensão nominal de 6,8V e $P_{Z(MAX)}$ igual a 500mW com $I_{Z(MIN)} = 8mA$.

$$P_{Z(MAX)} = \frac{0,5W}{6,8V} = 73,53mA$$

Teremos então na carga 6,1V, valor este, perfeitamente aceitável.

Verificando se o diodo zener escolhido pode ser utilizado:

$$I_{Z(MAX)} = \left(\frac{V_{IN(MAX)} - V_Z}{V_{IN(MIN)} - V_Z} \right) \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{B(MAX)})$$

$$I_{B(MAX)} = \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}} = \frac{1,46A}{40} = 36,5mA$$

$$I_{Z(MAX)} = \left(\frac{13,2V - 6,8V}{10,8V - 6,8V} \right) \cdot (8mA + 36,5mA)$$

$$I_{Z(MAX)} = \frac{6,4V}{4V} \cdot 44,5mA = 71,2mA$$

Como $P_{Z(MAX)}$ teórico = 73,53mA e $I_{Z(MAX)} = 71,2mA$ o diodo zener escolhido pode ser utilizado.

Cálculo de R:

Para a máxima de tensão de entrada:

$$V_{IN(MAX)} = 13,2V$$

$$V_{IN(MAX)} = R \cdot (I_{B(MIN)} + I_{Z(MAX)}) + V_Z$$

Na pior condição: $R_L = \infty \rightarrow I_{B(MIN)} = 0$

$$V_{IN(MAX)} = (R \cdot I_{Z(MAX)}) + V_Z$$

$$R = \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z}{I_{Z(MAX)}} = \frac{13,2V - 6,8V}{73,53mA} = \frac{6,4V}{73,53mA} = 87,04\Omega$$

Para a mínima tensão de entrada:

$$V_{IN(MIN)} = 10,8V$$

$$R = \frac{V_{IN(MIN)} - V_Z}{I_{B(MAX)} + I_{Z(MIN)}} = \frac{10,8V - 6V}{36,5mA + 8mA} = \frac{4V}{44,5mA} = 89,89\Omega$$

Portanto R deverá ser maior do que 87,04Ω e menor do que 89,89Ω. Adotaremos o valor comercial mais próximo: 91Ω

Potência dissipada pelo resistor:

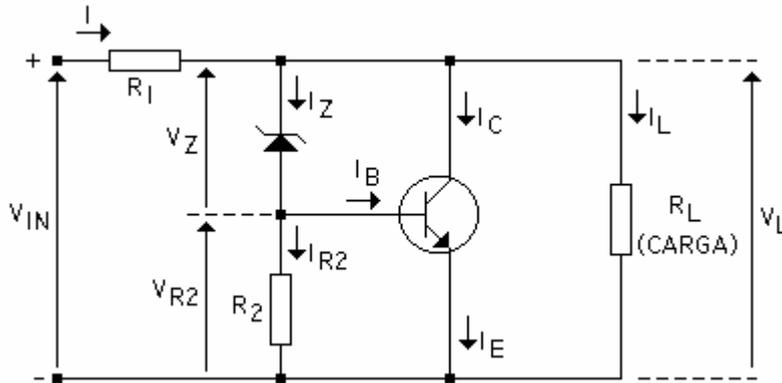
$$P = \frac{E^2}{R} \rightarrow P = \frac{(V_{IN(MAX)} - V_Z)^2}{R} = \frac{(13,2V - 6V)^2}{91} = \frac{(6,8V)^2}{91} = 0,508W$$

Podemos adotar um valor comercial mais próximo: 1W

Regulador Paralelo

A exemplo do regulador série, o transistor atua como elemento de controle e o zener como elemento de referência.

Como a carga fica em paralelo com o transistor, daí a denominação regulador paralelo, cujo circuito é mostrado abaixo.



A análise do seu funcionamento segue basicamente os mesmos princípios do regulador série, no que diz respeito aos parâmetros do transistor e do diodo zener.

Funcionamento:

- $V_Z = V_{CB} \rightarrow$ como V_Z é constante, V_{CB} será constante
- $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$, mas $V_{CB} \gg V_{BE}$
- logo: $V_{CE} = V_{CB}$, onde $V_{CE} = V_Z$

Ao variar a tensão de entrada dentro de certos limites, como V_Z é fixa, variará V_{BE} variando a corrente I_B e conseqüentemente I_C . Em outras palavras, variando-se a tensão de entrada ocorrerá uma atuação na corrente de base a qual controla a corrente de coletor.

Neste caso, V_{CE} tende a permanecer constante desde que I_Z não assuma valores menores que $I_{Z(MIN)}$ e maiores que $I_{Z(MAX)}$.

Os parâmetros para o projeto de em regulador paralelo são essencialmente: V_{IN} , V_L e $I_{L(MAX)}$.

➤ Tensão de entrada máxima:

Na pior condição $R_L = \infty \rightarrow I_L = 0$

$$V_{IN(MAX)} = R_1 \cdot (I_{L(MAX)} + I_{C(MAX)}) + V_Z + V_{BE}$$

$$\frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{R_1} = I_{Z(MAX)} + I_{C(MAX)} \quad (1)$$

➤ Tensão de entrada mínima:

$$V_{IN(MIN)} = R_1 \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}) + V_Z + V_{BE}$$

$$\frac{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}}{R_1} = I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)} \quad (II)$$

Dividindo (I) e (II), temos:

$$\frac{I_{Z(MAX)} + I_{C(MAX)}}{I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}}$$

Isolando $I_{Z(MAX)}$:

$$I_{Z(MAX)} = \left(\frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}} \right) \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}) - I_{C(MAX)} \quad (III)$$

OBS: $I_{C(MIN)}$ é a corrente de coletor para uma tensão de entrada mínima. Em muitos projetos a mesma pode ser desprezada por não ter influência significativa no resultado final.

➤ Corrente em R_2 :

$$I_{R2} = I_{Z(MIN)} - I_{B(MIN)}, \quad \text{onde } I_{B(MIN)} = \frac{I_{C(MIN)}}{\beta_{(MIN)}}$$

$$\text{Portanto: } I_{R2} = I_{Z(MIN)} - \frac{I_{C(MIN)}}{\beta_{(MIN)}} \quad (IV)$$

Quando a tensão de entrada for máxima e a carga estiver aberta (pior condição), um acréscimo de corrente circulará pelo diodo zener. Como V_{BE} é praticamente constante, essa corrente circulará pela base do transistor, daí então teremos:

$$\begin{cases} I_{C(MAX)} = \beta_{(MIN)} \cdot I_{B(MAX)} \\ I_{B(MAX)} = I_{Z(MAX)} - I_{R2} \end{cases} \quad I_{C(MAX)} = \beta_{(MIN)} \cdot (I_{Z(MAX)} - I_{R2}) \quad (V)$$

Substituindo (V) em (III), temos:

$$I_{Z(MAX)} = \left(\frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}} \right) \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}) - \beta_{(MIN)} \cdot (I_{Z(MAX)} - I_{R2})$$

$$I_{Z(MAX)} = \left[\left(\frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}} \right) \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}) + \beta_{(MIN)} \cdot I_{R2} \right] \cdot \frac{1}{\beta_{(MIN)} + 1}$$

Escolha do transistor:

Deverão ser observados os parâmetros:

$$V_{CEO}^8 > (V_Z + V_{BE})$$

$$I_{C(MAX)} > I_{L(MAX)}$$

⁸ V_{CEO} é a tensão entre coletor e emissor com a base aberta

$$P_{C(MAX)} > (V_Z + V_{BE}) \cdot I_{C(MAX)}$$

Escolha do diodo zener:

Os parâmetros são idênticos aos adotados no regulador série.

PROJETO

Projetar um regulador paralelo, com as seguintes características:

$$V_L = 15V$$

$$I_{C(MAX)} = 600mA$$

$$V_{IN} = 22V \pm 10\%$$

Escolha do transistor:

O transistor deverá ter as seguintes características:

$$V_{CEO} > (V_{CE} + V_{VBE})$$

$$I_{C(MAX)} > I_{L(MAX)}$$

$$P_{C(MAX)} > (V_Z + V_{BE}) \cdot I_{C(MAX)}$$

Adotaremos o transistor 2N3534, que tem as características:

$$V_{CEO} = 35V$$

$$I_{C(MAX)} = 3A$$

$$P_{C(MAX)} = 35W$$

$$\beta \text{ (mínimo} = 40; \text{ máximo} = 120)$$

Escolha do diodo zener:

O diodo zener escolhido foi o BZX1C15, que tem as características:

$$P_{Z(MAX)} = 1,3W$$

$$I_{Z(MIN)} = 20mA$$

$$V_Z = 15V$$

$$I_{Z(MAX)} = \frac{P_{Z(MAX)}}{V_Z} = \frac{1,3W}{15V} = 86,67mA$$

Verificando se o diodo zener escolhido pode ser utilizado:

$$I_{Z(MAX)} = \left[\left(\frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}} \right) \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}) + \beta_{(MIN)} \cdot I_{R2} \right] \cdot \frac{1}{\beta_{(MIN)} + 1}$$

Desprezando $I_{C(MIN)} \rightarrow I_{C(MIN)} = 0$, então como $I_{R2} = I_{Z(MIN)} - \frac{I_{C(MIN)}}{\beta_{(MIN)}}$, $I_{R2} = 20mA$

$$I_{Z(MAX)} = \left[\left(\frac{24,2V - 15V - 0,7V}{19,8V - 15V - 0,7V} \right) \cdot (20mA + 0 + 600mA) + 40 \cdot (20mA) \right] \cdot \frac{1}{41}$$

$$I_{Z(MAX)} = \left[\left(\frac{8,5V}{4,1V} \right) \cdot (620mA + 800mA) \right] \cdot 0,0244 = (2,073 \cdot 1,42) \cdot 0,0244 = 71,83mA$$

$I_{Z(MAX)} = 71,83mA$ (o zener pode escolhido é compatível)

Calculando $I_{C(MAX)}$:

$$I_{C(MAX)} = \beta_{(MIN)} \cdot (I_{Z(MAX)} - I_{R2})$$

$$I_{C(MAX)} = 40 \cdot (71,83mA - 20mA)$$

$$I_{C(MAX)} = 40 \cdot 51,83mA = 2,073A$$

$$I_{C(MAX)} = 2,073A \text{ (o transistor é compatível quando a } I_{C(MAX)})$$

Calculando $P_{C(MAX)}$:

$$P_{C(MAX)} = (V_Z + V_{BE}) \cdot I_{C(MAX)} = 15,07 \cdot 2,073 = 31,24W$$

$$P_{C(MAX)} = 31,24W$$

O transistor escolhido atenderá as necessidades do projeto quanto a dissipação de potência, por estar abaixo da potência máxima especificada pelo fabricante. Torna-se necessário entretanto o uso de um dissipador adequado para evitar sobreaquecimento do transistor.

Calculando R_2 :

$$V_{R2} = R_2 \cdot I_{R2} \rightarrow V_{R2} = V_{BE}$$

$$R_2 = \frac{V_{BE}}{20mA} = \frac{0,7V}{20mA} = 35\Omega \text{ (adotar } 33\Omega)$$

$$P_{R2} = \frac{(E_{R2})^2}{R_2} = \frac{(0,7)^2}{33\Omega} = \frac{0,49V}{33\Omega} = 14,85mW$$

Calculando R_1 :

$$R_1 = \frac{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}}{I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}} = \frac{19,8V - 15V - 0,7V}{20mA + 600mA} = \frac{4,1V}{620mA} = 6,613\Omega$$

OBS: $I_{C(MIN)} = 0$

$$R_1 = \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{I_{Z(MAX)} + I_{C(MAX)}} = \frac{24,2V - 15V - 0,7V}{86,67mA + 2,073A} = \frac{8,5V}{2,16} = 3,94\Omega$$

R_1 deverá ser maior do que $3,94\Omega$ e menor do que $6,613\Omega$

$$3,94\Omega < R_1 < 6,61\Omega$$

R_1 adotado = $5,6\Omega$ (valor comercial)

Potência dissipada por R_1 :

$$P_{R1} = \frac{(V_{R1})^2}{R_1} = \frac{(V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE})^2}{5,6\Omega} = \frac{(24,2V - 15V - 0,7V)^2}{5,6\Omega} = \frac{(8,5V)^2}{5,6\Omega} = 12,9W$$

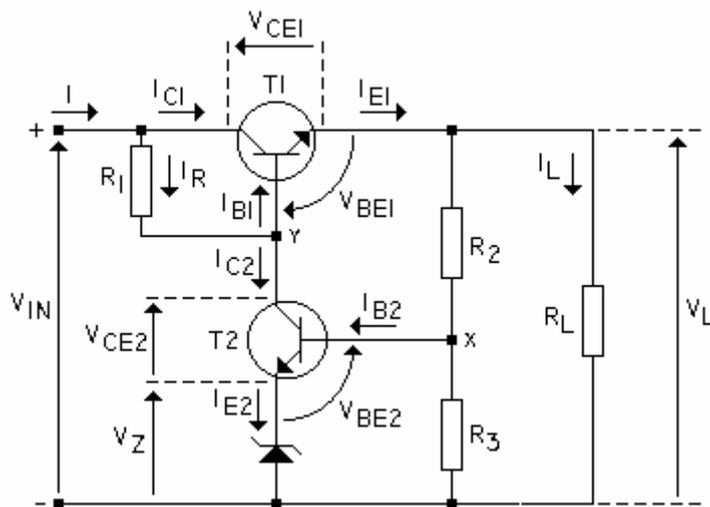
(adotar 15W - valor comercial)

Regulador com Amplificador de Erro

O regulador com amplificador de erro torna o circuito mais sensível às variações da tensão de entrada, ou variações da corrente de carga, através da introdução de um transistor junto ao elemento de referência.

A figura a seguir ilustra esse tipo de regulador, onde os elementos que compõem o circuito tem as seguintes funções:

- Diodo Zener: é utilizado como elemento de referência de tensão;
- Transistor T_1 : é o elemento de controle, que irá controlar a tensão de saída a partir de uma tensão de correção a ele enviada através de um circuito comparador;
- Transistor T_2 : é basicamente um comparador de tensão DC, isto é, compara duas tensões, V_{R2} e V_{R3} , sendo a tensão V_{R3} fixa (denominada também tensão de referência), cuja finalidade é controlar a tensão de polarização do circuito de controle. Qualquer diferença de tensão entre os dois resistores irá fornecer à saída do comparador uma tensão de referência que será aplicada ao circuito de controle.



Funcionamento:

Quando houver uma variação da tensão de entrada, a tendência é ocorrer uma variação da tensão de saída.

Supondo que V_{IN} aumente, a tensão nos extremos de R_L tenderá a aumentar, aumentando a tensão V_{R2} e V_{R3} , mas, como a tensão no emissor de T_2 é fixada por V_Z , então um aumento de tensão no ponto "x" provocará um aumento de V_{BE2} , que aumentará I_{B2} e conseqüentemente I_{C2} .

Quando I_{C2} aumenta, haverá um aumento da tensão em R_1 (V_{R1}), uma vez que a tensão do emissor de T_2 é fixada pela tensão de zener (V_Z).

Como V_{BE1} é fixa, então um aumento de V_{R1} provocará um aumento de V_{CE1} .

Lembrar que $V_{R1} = V_{CB1}$ e que $V_{CB1} + V_{BE1} = V_{CE1}$.

Um aumento de I_{C2} provocará também um discreto aumento na corrente de base de T_1 (I_{B1}).

$$I_{C2} = I_{R1} - I_{B1}$$

$$I_{R1} = I_{C2} + I_{B1}$$

Formulário:

➤ Considerando a tensão de entrada máxima

$$V_{IN(MAX)} = V_L + V_{BE1(MIN)} + R_1 \cdot (I_{Z(MAX)} + I_{B1(MIN)})$$

mas, $I_{Z(MAX)} \gg I_{B1(MIN)}$, logo:

$$V_{IN(MAX)} = V_L + V_{BE1(MIN)} + R_1 \cdot (I_{Z(MAX)})$$

$$I_{Z(MAX)} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{R_1} \quad (I)$$

➤ Considerando a tensão de entrada mínima

$$V_{IN(MIN)} = V_L + V_{BE1(MAX)} + R_1 \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{B1(MAX)})$$

$$I_{Z(MIN)} + I_{B1(MAX)} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{R_1}$$

mas, $I_{B1(MAX)} = \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}} \rightarrow I_{L(MAX)} \approx I_{C(MAX)} \rightarrow$ temos então:

$$I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{R_1} \quad (II)$$

dividindo (I) e (II)

$$\frac{I_{Z(MAX)}}{I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}}} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}$$

$$I_{Z(MAX)} = \left(\frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}} \right) \cdot \left(I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}} \right) \quad (III)$$

Cálculo de R₁

$$R_1 > \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{I_Z(MAX)} \quad \rightarrow \quad R_1 < \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{I_Z(MIN) + \frac{I_L(MAX)}{\beta_1(MIN)}}$$

A potência desenvolvida em R₁ no pior caso é dada por:

$$V_{R1} = V_{IN(MAX)} - (V_L + V_{BE1(MIN)})$$

$$P_{R1} = \frac{[(V_{IN(MAX)} - (V_L + V_{BE1(MIN)}))]^2}{R_1 \text{ (adotado)}}$$

Cálculo de R₂

Adota-se uma regra prática, onde: $I_{R2} = 0,1 \cdot I_{C2}$

$$\text{➤ Quando } I_{C2} = I_{Z(MIN)} \rightarrow R_2 < \frac{V_L - V_Z - V_{BE2(MAX)}}{0,1 \cdot I_{Z(MIN)}}$$

$$\text{➤ Quando } I_{C2} = I_{Z(MAX)} \rightarrow R_2 > \frac{V_L - V_Z - V_{BE2(MIN)}}{0,1 \cdot I_{Z(MAX)}}$$

$$I_{Z(MAX)} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{R_1 \text{ (adotado)}}$$

$$I_{Z(MIN)} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{R_1 \text{ (adotado)}} - I_{B1(MAX)} \rightarrow I_{B1(MAX)} = \frac{I_L(MAX)}{\beta_1(MIN)}$$

Cálculo de potência dissipada em R₂

$$V_{R2} = V_L - V_Z - V_{BE2(MIN)}$$

$$P_{R2} = \frac{(V_L - V_Z - V_{BE2(MIN)})^2}{R_2 \text{ (adotado)}}$$

Cálculo de R₃

$$V_{R3} = V_L \cdot \left(\frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) \rightarrow V_{R3} \cdot (R_3 + R_2) = V_L \cdot R_3$$

$$V_{R3} \cdot R_2 + V_{R3} \cdot R_3 = V_L \cdot R_3 \rightarrow V_{R3} \cdot R_2 = V_L \cdot R_3 - V_{R3} \cdot R_3$$

$$V_{R3} \cdot R_2 = R_3 \cdot (V_L - V_{R3})$$

$$R_3 = \frac{V_{R3} \cdot R_2}{V_L - V_{R3}} \rightarrow (R_2 \text{ adotado no cálculo anterior})$$

Cálculo de potência em R₃

Em R₃ temos: $V_{R3} = V_Z + V_{BE2(MAX)}$

$$P_{R3} = \frac{(V_Z + V_{BE2(MAX)})^2}{R_{3(adotado)}}$$

PROJETO

Projetar uma fonte regulada com amplificador de erro, usando dois transistores e um diodo zener de referência, que obedeça as características:

$$V_{IN} = 25V \pm 10\%$$

$$I_{L(MAX)} = 800mA$$

$$\text{Tensão na carga } (V_L) = 12V$$

$$\text{Teremos: } V_{IN(MAX)} = 25 + 2,5 = 27,5V \rightarrow V_{IN(MIN)} = 25 - 2,5 = 22,5V$$

Escolha de T₁:

O transistor T₁ deverá ter as seguintes características:

$$I_{C(MAX)} > I_{L(MAX)} = 0,8A$$

$$V_{CEO} > V_{IN(MAX)} - V_L = 27,5 - 12 = 15,5V$$

$$P_{C(MAX)} > (V_{IN(MAX)} - V_L) \cdot I_{L(MAX)} = (27,5V - 12V) \cdot 800mA = 12,4W$$

O transistor escolhido foi o BD233 que tem os seguintes parâmetros:

$$V_{CEO} = 45V$$

$$I_{C(MAX)} = 2A$$

$$P_{C(MAX)} = 25W$$

$$\beta_{(MIN)} = 40 \rightarrow \beta_{(MAX)} = 250$$

Escolha do diodo zener:

Podemos escolher uma tensão de referência. Adotamos como tensão de referência para nosso projeto V_Z aproximadamente $0,5V_L$. No entanto, outro valor pode ser escolhido.

Para este projeto, optou-se pelo diodo zener BZX87-C5V1, que tem os parâmetros:

$$I_{Z(MIN)} = 50mA$$

$$V_Z = 5,1V$$

$$P_{Z(MAX)} = 1,3W$$

Devemos verificar se o zener escolhido é adequado ao projeto:

$$I_{Z(MAX)} = \frac{P_{Z(MAX)}}{V_Z} = \frac{1,3W}{5,1V} = 255mA$$

$$I_{Z(MAX)} = \left(\frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}} \right) \cdot \left(I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}} \right)$$

Adotando para este projeto $V_{BE1(MIN)} = 0,6V$ e para $V_{BE1(MAX)} = 0,7V$

$$I_{Z(\text{MAX})} = \left(\frac{27,5\text{V} - 12\text{V} - 0,6\text{V}}{22,5\text{V} - 12\text{V} - 0,7\text{V}} \right) \cdot \left(50\text{mA} + \frac{800\text{mA}}{40} \right)$$

$$I_{Z(\text{MAX})} = \left(\frac{14,9\text{V}}{9,8\text{V}} \right) \cdot 70\text{mA} = 106,43\text{mA}$$

Portanto, o diodo escolhido poderá ser usado.

Escolha de T₂:

O transistor T₂ deverá ter as seguintes características:

$$V_{\text{CEO}} > (V_L + V_{\text{BE2}(\text{MIN})} - V_Z) = (12\text{V} + 0,6\text{V}) - 5,1\text{V} = 12,6\text{V} - 5,1\text{V} = 7,5\text{V}$$

$$I_{\text{C}(\text{MAX})} > I_{Z(\text{MAX})} = 255\text{mA}$$

$$P_{\text{C}(\text{MAX})} > [(V_L + V_{\text{BE1}(\text{MIN})} - V_Z) \cdot I_{Z(\text{MAX})}]$$

$$P_{\text{C}(\text{MAX})} > [(12\text{V} + 0,6\text{V}) - 5,1\text{V}] \cdot 255\text{mA} = 1,912\text{W}$$

Para o transistor T₂ também foram adotados os valores de 0,6V e 0,7V para V_{BE2(MIN)} e V_{BE2(MAX)} respectivamente.

O transistor escolhido foi o BD135 que tem as seguintes características:

$$V_{\text{CEO}} = 45\text{V}$$

$$I_{\text{C}(\text{MAX})} = 1\text{A}$$

$$P_{\text{C}(\text{MAX})} = 8\text{W}$$

$$\beta_{(\text{MIN})} = 40 \rightarrow \beta_{(\text{MAX})} = 250$$

Cálculo de R₁:

$$R_1 > \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_L - V_{\text{BE1}(\text{MIN})}}{I_{Z(\text{MAX})}} = \frac{27,5\text{V} - 12\text{V} - 0,6\text{V}}{255\text{mA}} = \frac{14,9\text{V}}{255\text{mA}} = 58,4\Omega$$

$$R_1 < \frac{V_{\text{IN}(\text{MIN})} - V_L - V_{\text{BE1}(\text{MAX})}}{I_{Z(\text{MIN})} + \frac{I_{\text{L}(\text{MAX})}}{\beta_{1(\text{MIN})}}} = \frac{22,5\text{V} - 12\text{V} - 0,7\text{V}}{50\text{mA} + \frac{800\text{mA}}{40}} = \frac{9,8\text{V}}{70\text{mA}} = 140\Omega$$

$$58,4\Omega < R_1 < 140\Omega \rightarrow \text{valor adotado: } 100\Omega$$

Calculando a potência desenvolvida em R₁:

$$P_{R_1} = \frac{[(V_{\text{IN}(\text{MAX})} - (V_L + V_{\text{BE}(\text{MIN})}))]^2}{R_1(\text{adotado})} = \frac{(27,5\text{V} - 12,6\text{V})^2}{100\Omega} = \frac{(14,9\text{V})^2}{100\Omega} = 2,22\text{W}$$

(Adotar 5W)

Cálculo de R₂:

$$R_2 > \frac{V_L - V_Z - V_{\text{BE2}(\text{MIN})}}{0,1 \cdot I_{Z(\text{MAX})}} \rightarrow I_{Z(\text{MAX})} = \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_L - V_{\text{BE1}(\text{MIN})}}{R_1(\text{adotado})}$$

$$I_{Z(\text{MAX})} = \frac{27,5\text{V} - 12\text{V} - 0,6\text{V}}{100\Omega} = 149\text{mA}$$

$$R_2 > \frac{12V - 5,1V - 0,6V}{14,9mA} = \frac{6,3V}{14,9mA} = 422,82\Omega$$

$$R_2 < \frac{V_L - V_Z - V_{BE2(MAX)}}{0,1 \cdot I_{Z(MIN)}} \rightarrow I_{Z(MIN)} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{R_1(\text{adotado})} - I_{B1(MAX)}$$

$$I_{Z(MIN)} = \frac{22,5V - 12V - 0,7V}{100} - \frac{800mA}{40} = 98mA - 20mA = 78mA$$

$$R_2 < \frac{12V - 5,1V - 0,7V}{7,8mA} = \frac{6,2V}{7,8mA} = 794,87\Omega$$

$$422,82\Omega < R_2 < 794,87\Omega \rightarrow \text{adotar } 560\Omega$$

Calculando a potência desenvolvida em R_2 :

$$P_{R2} = \frac{(V_L - V_Z - V_{BE2(MIN)})^2}{R_2(\text{adotado})}$$

$$P_{R2} = \frac{(12V - 5,1V - 0,6V)^2}{560\Omega} = \frac{(6,3V)^2}{560\Omega} = 70,88mW$$

Cálculo de R_3 :

$$R_3 = \frac{V_{R3} \cdot R_2}{V_L - V_{R3}} = \frac{5,7V \cdot (560\Omega)}{12V - 5,7V} = \frac{3.192}{6,3} = 506,67\Omega \rightarrow \text{adotar } 470\Omega$$

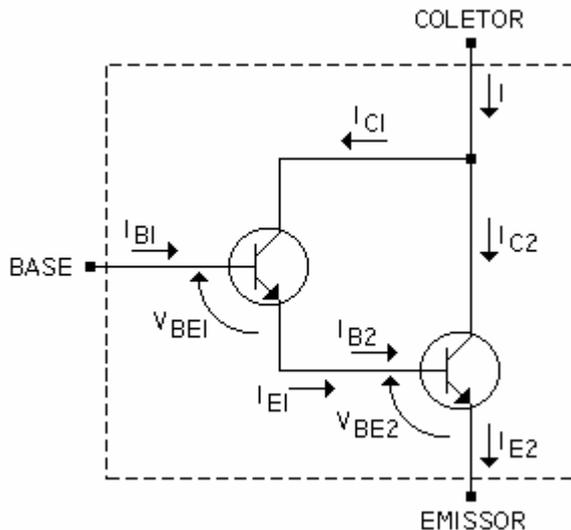
$$\text{Onde: } V_{R3} = V_Z + V_{BE2(MIN)}$$

Calculando a potência desenvolvida em R_3 :

$$P_{R3} = \frac{(V_Z + V_{BE2(MIN)})^2}{R_3(\text{adotado})}$$

$$P_{R3} = \frac{(5,1V + 0,7V)^2}{470\Omega} = \frac{(5,8)^2}{470\Omega} = 71,57mW$$

Configuração Darlington



A configuração Darlington consiste na ligação entre dois transistores na configuração seguidor de emissor, ligados em cascata, conforme ilustra a figura ao lado, proporcionando em relação a um único transistor um ganho de corrente bastante elevado. O ganho total de tensão é aproximadamente igual a 1.

Se $\beta_1 = \beta_2 = 100$, teremos: $I_{C1} = I_{E1}$ e $I_{C2} = I_{E2}$

O ganho total (β_T) será dado por: $\beta_1 \cdot \beta_2 = 100 \cdot 100 = 10.000$

Assim, $I_{C2} = \beta_T \cdot I_{B1}$

A tensão entre base e emissor é dada por: $V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2}$

Por se tratar da configuração emissor comum, assume valor bastante elevado de impedância de entrada e valor bastante baixo de impedância de saída, em relação a um transistor comum. A configuração Darlington normalmente é encontrada em um único invólucro, como por exemplo os transistores BD262 e BD263, com polaridades *pn*p e *np*n respectivamente.

PROJETO DE UM REGULADOR SÉRIE COM TRANSISTOR DARLINGTON

Reprojetar o regulador série da página 34, utilizando transistor Darlington; proceder uma análise do projeto comparando-o ao projeto anterior e apresentar conclusões.

Características do regulador:

Tensão de saída (V_L): 6V

Corrente de saída máxima ($I_{L(MAX)}$): 1,5A

Tensão de entrada (V_{IN}): $12V \pm 10\%$

Para este projeto foi escolhido o transistor BD263, cujas características são:

$$\begin{aligned}
 V_{CBO} &= 80V \\
 I_{C(MAX)} &= 4A \\
 P_{C(MAX)} &= 36W \\
 \beta_{(MIN)} &= 500 \rightarrow \beta_{(MAX)} = 1.000
 \end{aligned}$$

Neste caso, V_{BE} é maior. Vamos considerar para este projeto, $V_{BE} = 1,4V$.
 Desta forma, o diodo zener deverá ter uma tensão: $6V + 1,4V = 7,4V$.
 O valor comercial mais próximo é de $7,5V$.
 O diodo zener escolhido foi o BZX75C7V5, cujas características são:

$$\begin{aligned}
 V_Z &= 7,5V \\
 P_{Z(MAX)} &= 400mW \\
 I_{Z(MIN)} &= 10mA
 \end{aligned}$$

$$I_{Z(MAX)} = \frac{0,4W}{7,5V} = 53,33mA$$

Verificando a escolha do transistor:

$$\begin{aligned}
 P_{C(MAX)} &= (V_{IN(MAX)} - V_L) \cdot I_{C(MAX)} \\
 I_{C(MAX)} &= I_{E(MAX)} - I_{B(MAX)} \\
 I_{E(MAX)} &= I_{L(MAX)} \rightarrow I_{C(MAX)} = I_{L(MAX)} - I_{B(MAX)}
 \end{aligned}$$

$$I_{B(MAX)} = \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}} \quad \text{logo:} \quad I_{C(MAX)} = I_{L(MAX)} - \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}}$$

$$I_{C(MAX)} = \frac{I_{L(MAX)}}{1 + \frac{1}{\beta_{(MIN)}}} = \frac{1,5}{1 + \frac{1}{500}} = \frac{1,5}{1 + 0,002} = \frac{1,5}{1,002} = 1,497A$$

$$P_{C(MAX)} = (13,2V - 6V) \cdot 1,497A = 10,78W$$

O transistor escolhido poderá ser utilizado, no entanto, é aconselhável a utilização de um dissipador de calor para evitar o sobreaquecimento do transistor.

Verificando a escolha do zener:

$$I_{Z(MAX)} = \left(\frac{V_{IN(MAX)} - V_Z}{V_{IN(MIN)} - V_Z} \right) \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{B(MAX)})$$

$$I_{B(MAX)} = \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}} = \frac{1,497A}{500} = 2,994mA$$

$$I_{Z(MAX)} = \left(\frac{13,2V - 7,5V}{10,8V - 7,5V} \right) \cdot (10mA + 2,994mA)$$

$$I_{Z(\text{MAX})} = \frac{5,7\text{V}}{3,3\text{V}} \cdot 12,994\text{mA} = 22,44\text{mA}$$

Como $P_{Z(\text{MAX})}$ teórico = 53,33mA e $I_{Z(\text{MAX})} = 22,44\text{mA}$ o diodo zener escolhido pode ser utilizado.

Cálculo de R:

Para a máxima de tensão de entrada: $V_{\text{IN}(\text{MAX})} = 13,2\text{V}$

$$V_{\text{IN}(\text{MAX})} = R \cdot (I_{B(\text{MIN})} + I_{Z(\text{MAX})}) + V_Z$$

Na pior condição: $R_L = \infty \rightarrow I_{B(\text{MIN})} = 0$

$$V_{\text{IN}(\text{MAX})} = (R \cdot I_{Z(\text{MAX})}) + V_Z$$

$$R = \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z}{I_{Z(\text{MAX})}} = \frac{13,2\text{V} - 7,5\text{V}}{53,33\text{mA}} = \frac{5,7\text{V}}{53,33\text{mA}} = 106,88\Omega$$

Para a mínima tensão de entrada: $V_{\text{IN}(\text{MIN})} = 10,8\text{V}$

$$R = \frac{V_{\text{IN}(\text{MIN})} - V_Z}{I_{B(\text{MAX})} + I_{Z(\text{MIN})}} = \frac{10,8\text{V} - 7,5\text{V}}{2,994\text{mA} + 10\text{mA}} = \frac{3,3\text{V}}{12,994\text{mA}} = 253,96\Omega$$

Portanto R deverá ser maior do que $106,88\Omega$ e menor do que $253,96\Omega$. Adotaremos o valor comercial mais próximo a partir de uma média aritmética dos dois valores, que neste caso é 180Ω .

Potência dissipada pelo resistor:

$$P = \frac{E^2}{R} \rightarrow P = \frac{(V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z)^2}{R} = \frac{(13,2\text{V} - 7,5\text{V})^2}{180} = \frac{(5,7\text{V})^2}{180} = 180,5\text{mW}$$

Podemos adotar um valor comercial mais próximo: 250mW (1/4W).

Comparações:

Parâmetros	Projeto com transistor comum	Projeto com transistor Darlington
R_1	91 Ω	180 Ω
P_{R1}	508mW	180,5mW
$I_{C(\text{MAX})}$	1,46A	1,497A
$P_{C(\text{MAX})}$	10,5W	10,78W
$I_{Z(\text{MAX})}$ teórico	73,53mA	53,33mA
$I_{Z(\text{MAX})}$ prático	71,2mA	22,44mA
V_Z	6,8V	7,5V
$I_{B(\text{MAX})}$	36,5mA	2,994mA

Dos parâmetros acima apresentados, a conclusão mais importante é que com o

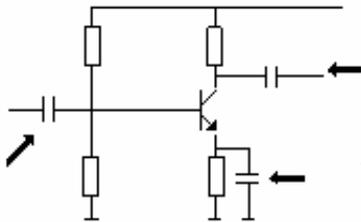
transistor Darlington controla-se uma corrente de carga com uma corrente de base bem menor. Isto se explica pelo fato de que o ganho de corrente no transistor Darlington é bem maior.

Pré Amplificadores

Após o transistor ter sido polarizado com ponto Q próximo da metade da linha de carga podemos acoplar um sinal ca á base , isto produz flutuação na corrente de coletor de mesma forma de freqüência .

Por exemplo , se for acoplado um sinal ca de 1Khz á base , teremos no coletor um sinal de 1Khz com a amplitude da onda aumentada.

O amplificador que mantém a forma de onda é chamado de linear ou de alta - fidelidade .



As setas apontam para os capacitores de acoplamento e desacoplamento (desvio) , que são responsáveis pela isolação do sinal ca à ser amplificado da tensão de polarização do transistor.

Capacitores de Acoplamento e Desacoplamento

Um capacitor de acoplamento possibilita a passagem do sinal ca para dentro do estagio amplificador . Para que isso aconteça a reatância capacitiva precisa ser muito pequena comparada com a resistência total do circuito.

$$R = R_{th} + R_L$$

O valor do capacitor de acoplamento depende da freqüência mais baixa que se vai acoplar. A reatância capacitiva deve ser menor ou igual a um décimo da resistência total em série .

$$X_C = 0.1R$$

Exemplo ; projetando um estágio amplificador a transistor na faixa de audio , 20Hz à 20KHz , com resistência total em série de $10K\Omega$, então a X_C deve ser igual á $1k\Omega$ na freqüência mais baixa ou seja 20hz .

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Tirando o valor de C:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = 7.96\mu F$$

Esta é capacitância necessária para um acoplamento quase ideal .Na pratica poderíamos usar $10\mu\text{F}$, o valor padrão seguinte mais alto , garantindo um acoplamento estabilizados para todas frequências acima de 20Hz

Capacitores de Desacoplamento

Um capacitor de desacoplamento é semelhante a um de acoplamento , exceto que ele acopla um ponto desaterrado à um ponto aterrado . A reatância apresentada deve ser um décimo da resistência total do circuito não considerando o resistência de carga.

O capacitor se comporta como um curto para o sinal ca colocando o emissor em potencial terra , quando se refere ao sinal ca , o capacitor não perturba à tensão cc ,pois se apresenta como uma chave aberta.

Para se manter a notação cc diferente da notação ca é de uso comum empregar letras maiúsculas para cc e minúsculas para ca .

CC

IE - IC - IB - para correntes em cc .

VE - VC - VB - para tensões cc ao terra .

VBE - VCE - VCB - para tensões entre terminais .

CA

ic - ie - ib - para correntes em ca

ve - vc - vb - para tensões ca ao terra.

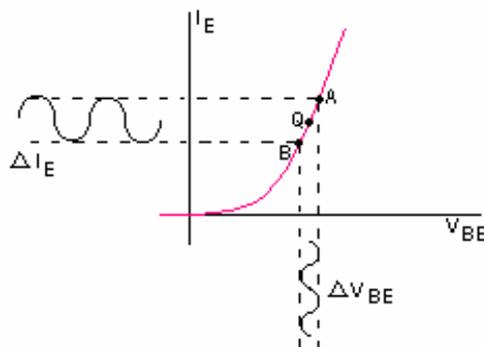
Vbe - vce - vbe - para tensões ca entre terminais .

Também é comum usar o sinal negativo para indicar dois sinais senoidais que estão defasados de 180°

Exemplo:

V saída = -V ent.

Resistência CA do Emissor.



A fig. Acima mostra a curva do diodo relacionando IE e VBE , na ausência de um sinal ca , o transistor funciona no ponto Q. Quando um sinal ca aciona o transistor entretanto a corrente e a tensão do emissor variam . Se o sinal for pequeno , o ponto de operação oscilará senoidalmente de Q , ou seja um pico positivo no ponto A e um negativo no B e de volta ao Q , assim o ciclo se repete.

Se o sinal for pequeno os pontos A e B serão próximos de Q, e a operação será linear, ou seja o arco de A e B é praticamente uma linha reta. Por isso as variações de tensão e corrente são proporcionais. No que se refere a r'_e , o diodo aparece como se fosse uma resistência dada por:

$$r'_e = \frac{v_{be}}{I_E}$$

Exemplo: se $v_{be} = 10 \text{ mV}$ e $i_e = 0.4 \text{ mA}$, então:

$$r'_e = \frac{10^{-3}}{0.4 \cdot 10^{-3}} = 25 \Omega$$

Neste caso o diodo base emissor é substituído pela resistência r'_e do emissor. Como r'_e é a razão entre a variação de v_{be} e de i_e , o seu valor depende do ponto Q. Quando mais alto na curva estiver o ponto Q, menor se torna r'_e , porque a mesma variação na tensão base - emissor produz uma variação maior na corrente do emissor. Torna-se viável usar para v_{be} em r'_e uma tensão constante de 25 mV originando que:

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E}$$

Exemplo: se o ponto Q tiver $I_E = 1 \text{ mA}$, temos:

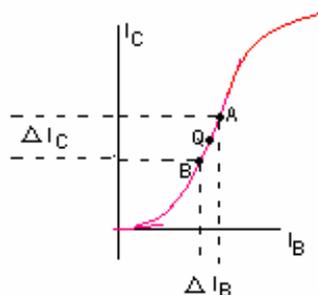
$$r'_e = \frac{0.025}{0.001} = 25 \Omega$$

Ou para o ponto Q mais alto com $I_E = 5 \text{ mA}$.

$$r'_e = \frac{0.025}{0.005} = 5 \Omega$$

OBS: r'_e é uma quantidade r'_e cujo valor depende de uma quantidade r'_e (I_E), isto quer dizer que o ponto Q determina o valor de r'_e .

Beta CA



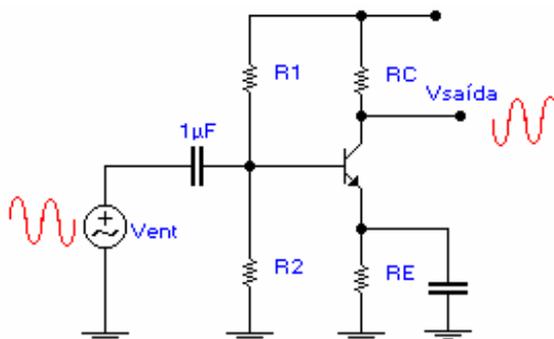
A figura mostra um gráfico típico de I_C versus I_B . β_{cc} é razão entre I_C e I_B . Como o gráfico não é linear, β_{cc} depende da localização do ponto Q. O beta ca, é uma quantidade de pequeno sinal que depende da localização do ponto Q. O beta ca é definido da seguinte forma:

$$\beta = \frac{i_c}{i_b}$$

Graficamente, o beta é a inclinação da curva no ponto Q. Por esta razão, ele tem valores diferentes em diferentes posições de Q.

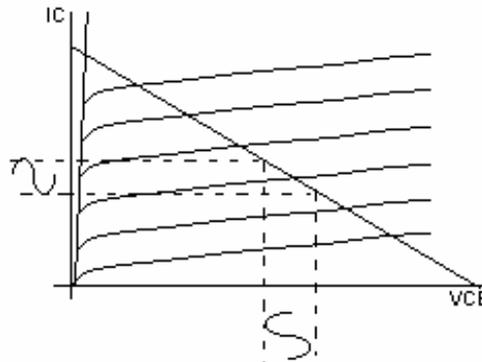
Amplificador em Emissor Comum.

A fig. abaixo mostra um amplificador EC. Como o emissor é derivado para o terra também é chamado de amplificador com emissor aterrado, isto significa que o emissor está ligado ao terra ca, não ao terra cc. A aplicação de pequena onda senoidal à base, produz variações na corrente de base. Por causa do beta a corrente do coletor é uma onda senoidal amplificada de mesma freqüência. Esta corrente senoidal do coletor flui através da resistência de coletor e produz uma tensão de saída amplificada.



Devido a flutuação ca na corrente de coletor, a tensão de saída oscila senoidalmente acima e abaixo da tensão quiescente. Durante o semi-ciclo positivo da tensão de entrada, a corrente de base aumenta, fazendo crescer a corrente de coletor. Isto produz uma queda de tensão maior através da resistência de coletor, portanto a tensão de coletor diminui originando o primeiro semi-ciclo negativo na saída. Reciprocamente, no semi-ciclo negativo da tensão de entrada, flui uma corrente menor no coletor, e a queda tensão no resistor de coletor diminui, por esta razão a tensão do coletor ao terra aumenta, originando o semi-ciclo positivo na saída. Com isso a tensão de saída está defasada de 180° da tensão de entrada.

Ponto de Vista da Linha de Carga.



O gráfico da linha de carga ca é o ponto Q . A tensão de entrada produz variações na corrente de base, resultando em variações senoidais em torno do ponto Q.

Para operações com pequenos sinais a oscilação de pico a pico na corrente de coletor deve ser menos de dez por cento da corrente quiescente do coletor .(isto mantém a distorção abaixo dos níveis aceitáveis).

Para os sinais grandes o ponto de operação oscila mais adiante ao longo da linha de carga . Se o sinal for grande demais o transistor entra em corte e saturação . Isto ceifa os picos negativos e positivos do sinal .Em algumas aplicações podemos querer o ceifamento , mais com amplificadores lineares o transistor deve funcionar na região ativa em todos os instantes ou seja nunca atingir a saturação e o corte durante o ciclo.

Ganho de Tensão

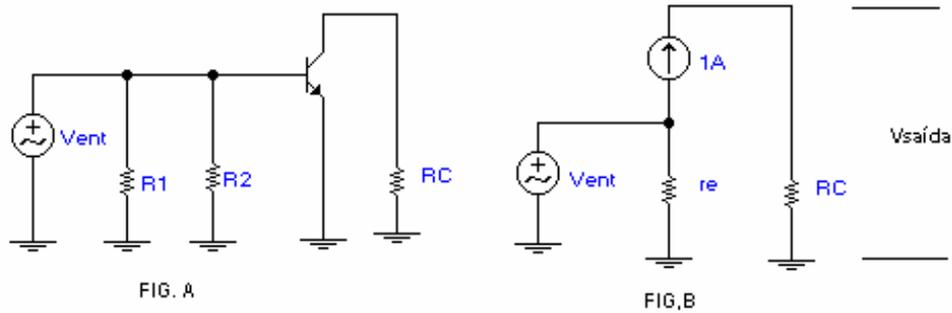
O ganho de tensão de um amplificador é a razão entre a tensão ca de saída e a tensão ca de entrada

$$A_V = \frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{ent}}}$$

Exemplo : se medirmos uma tensão de saída de 250mv e uma tensão de entrada de 2.5mv temos :

$$A_V = \frac{250^{-3}}{2,5^{-3}} = 100$$

Ao analisar defeitos , é bom ter idéia de que teve ser o ganho de tensão . Aqui esta como deduzir formulas para o ganho de tensão . substitua a circuito pelo seu circuito equivalente ca , isto significa pôr em curto a fonte de alimentação , e todos os capacitores .A figura (a) abaixo mostra o circuito ca equivalente do último circuito apresentado .A resistência de coletor esta aterrado porque o ponto de alimentação aparece como um curto em ca .Da mesma forma o resistor R1 agora esta aterrado , de modo que ele aparece em paralelo com o resistor R2 e com o diodo emissor. Por causa do circuito paralelo ao lado da entrada , a tensão de entrada aparece diretamente através do diodo emissor . Portanto podemos visualizar o circuito equivalente ca como o mostrado na figura (b).



A lei de ohm nos diz que a corrente do emissor é:

$$i_e = \frac{V_{ent}}{r'_e}$$

Pelo fato de IC ser aproximadamente igual a IE.

$$i_e \cong i_c$$

Esta corrente ca do coletor flui através do resistor de coletor produzindo uma tensão de saída de :

$$V_{saída} = -i_e.R_c$$

Como $i_e = V_{ent} / r'_e$ a equação torna-se :

$$V_{saída} = -\frac{v_{ent}.R_c}{r'_e}$$

Arranjando os termos para obter o ganho de tensão temos:

$$A_v = \frac{V_{saída}}{V_{ent}} = -\frac{R_c}{r'_e}$$

O ganho de tensão é a razão entre a resistência do coletor e a resistência ca do emissor. Isto quer dizer que você pode calcular rapidamente o ganho aproximado de tensão do amplificador de emissor comum .

A seguir você pode medir a tensão de saída e entrada e comparar o resultado real do ganho com ganho teórico .

Exemplo: se $R_c = 4.7k\Omega$ e $r'_e = 25\Omega$, então o ganho de tensão será :

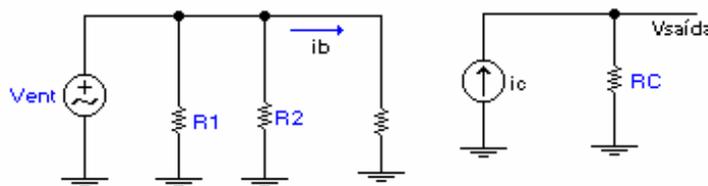
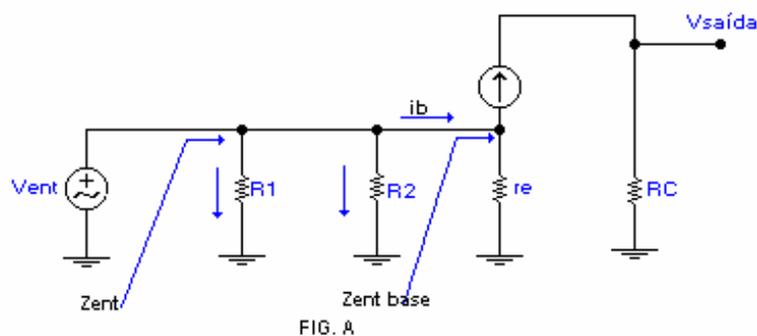
$$A_v = 4700 / 25 = - 188.$$

Ou seja ,uma tensão na base de 1mv produz uma tensão de saída de 188mv (as tensões pode ser rms , de pico ou de pico a pico desde que as entradas e saídas sejam consistentes .)

Impedância de Entrada

A fonte ca que aciona um amplificador, tem que fornecer a corrente alternada ao amplificador. Geralmente quanto menos corrente o amplificador consome da fonte melhor. A impedância de entrada de um amplificador determina a quantidade de corrente que será retirado da fonte ca. Na faixa de frequência normal de um amplificador onde os capacitores de acoplamento e desacoplamento se comportam como curto em ca e todas outras reatâncias são desprezíveis, a impedância ca de entrada é definida assim:

$$Z_{ent} = \frac{V_{ent}}{i_{ent}}$$



Olhando para um amplificador de emissor aterrado, a fonte ca vê os resistores de polarização em paralelo com o diodo emissor. A corrente convencional (i_1) passa por R_1 , (i_2) passa por R_2 e i_b pela base. A impedância que olha diretamente para a base é simbolizada por $Z_{ent(base)}$, e é dada por:

$$Z_{ent(base)} = \frac{V_{ent}}{i_b}$$

A lei de ohm nos diz que:

$$V_{ent} = i_e \cdot r'_e$$

Como $i_e = i_c$ e $i_c = \beta i_b$, esta equação torna-se:

$$V_{ent} = \beta \cdot i_b \cdot r'_e$$

Simplificando

$$Z_{ent(base)} = \frac{\beta \cdot i_b \cdot r'_e}{i_b} = \beta \cdot r'_e$$

Esta impedância de entrada olha somente para a base do transistor, ela não inclui os efeitos dos resistores de polarização. Então a impedância de entrada que olha para a base de um amplificador com o emissor aterrado é igual ao ganho de corrente ca vezes a resistência ca do emissor.

Porque a impedância de entrada de base não é igual a r'_e ?

A fonte ca olha para base e tem que fornecer corrente somente para a base. Dentro do transistor, a corrente do coletor soma-se com a corrente de base, produzindo a corrente de emissor através de r'_e . Pelo fato da corrente de base ser β vezes menor que a corrente de emissor, a impedância de entrada de base é β vezes maior do que r'_e .

A impedância total de entrada incluindo os resistores de polarização será :

$$Z_{ent} = R1 // R2 // \beta \cdot r'_e$$

A fonte ca vê o circuito paralelo formado por $R1, R2$ e $\beta r'_e$.

Impedância de Saída

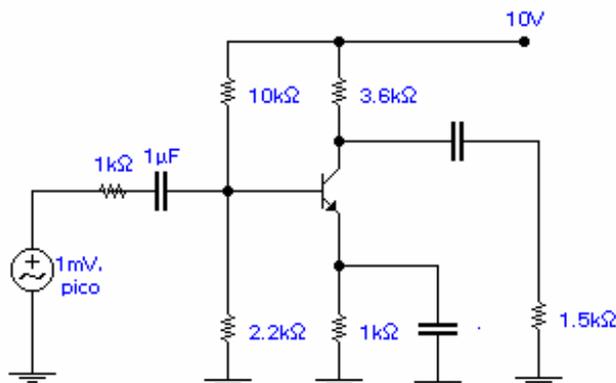
Façamos agora uma coisa interessante no lado da saída do amplificador. Vamos theveniza-lo, a tensão thevenim que aparece na saída é:

$$V_{saída} = A \cdot V_{ent}$$

A impedância thevenim é a associação paralela de RC e da impedância interna da fonte de corrente do coletor, que se pode considerar ideal, portanto ela tem uma impedância interna infinita. Assim a impedância thevenim é:

$$Z_{saída} = R_c$$

Exemplo: calcule $V_B, I_E, V_C, r'_e, A_v, Z_{ent(base)}, Z_{ent}$ e $V_{saída}$ do circuito abaixo



No circuito acima aparece duas coisas novas , a fonte ca tem uma impedância de $1k\Omega$. Portanto parte do sinal da fonte sofre uma queda através desta resistência antes de alcançar a base . Do lado da saída o capacitor acopla o sinal ca à uma resistência de carga de $1.5k\Omega$. Isto poderia produzir algum efeito na carga , coma resultado , esperamos que o sinal de saída seja mais baixo .

Calculando V_B .

$$V_B = R_1 / R_1 + R_2 \times V_{cc} = 2200 / 12200 \times 10 = 1.8V.$$

Calculo de I_E

$$I_E = V_E / R_E$$

V_E : será igual a tensão de base menos o V_{BE} típico do transistor assim:

$$V_E = V_B - V_{BE} = 1.8 - 0.7 = 1.1 V$$

$$I_E = 1.1/1000 = 1.1mA$$

Calculo de V_C (usando a lei de Kirchhoff)

$$V_C = V_{CC} - V_{RC}$$

$$\text{Onde : } V_{RC} = I_C R_C = 1.1 \cdot 3.6 = 3.6V$$

$$V_C = 10 - 3.6 = 6.04V$$

Calculo de r'_e .

Usando o sinal de entrada ca e a corrente cc do emissor temos :

$$r'_e = 25^{-3} / 1.1^{-3} = 22.7\Omega$$

Calculo do ganho de tensão

$$A_v = R_C / r'_e = 3600 / 22.7 = -159$$

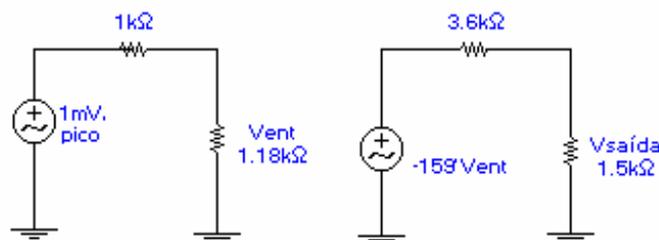
Calculo da $Z_{ent}(\text{base})$

$$Z_{ent(\text{base})} = \beta r'_e = 150 \cdot 22.7 = 3.4k\Omega$$

Calculo de Z_{ent} .

$$Z_{ent} = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta r'_e = 10^3 \parallel 2.2^3 \parallel 3.4^3 = 1.18k\Omega$$

Depois de conhecermos a impedância de entrada o circuito inicial pode ser representado da seguinte forma:



O calculo da tensão de entrada com resistência interna da fonte ca . temos dois divisores de tensão .O divisor de tensão de entrada reduz o sinal na base .
 $V_{ent} = Z_{ent} / R_F + Z_{ent} \times V_e \approx 1.18^{+3} / 2.18^{+3} \times 1^{-3} = 0.541\text{mv}$

Calculo da tensão de saída

$$V_{saída} = A \cdot V_{ent} = -159 \cdot 0.541 = -86\text{mv}$$

Esta é a saída sem carga

Calculo da tensão de saída com carga .

$$V_{saída (carga)} = R_L / R_L + R_C \times V_{saída (sem carga)}$$

$$V_{saída (carga)} = 1.5^{+3} / 5.1^{+3} \times -86^{-3} = -25\text{mv}$$

Ou seja a saída tem uma tensão de pico de 25mv , e o ganho real de tensão é de
 $A_v = 25^{-3} / 1^{-3} = 25$

AMPLIFICADOR LINEARIZADO

A quantidade $r'e$ é idealmente igual a $25\text{mv}/I_E$. Como foi evidenciado anteriormente , o valor real de $r'e$ depende da temperatura e do tipo da junção . Por isso o $r'e$ de um transistor pode variar ao longo de uma faixa para diferentes temperaturas e transistores . Qualquer variação no valor de $r'e$ variará o ganho da tensão no amplificador com emissor comum , Em algumas aplicações , é aceitável uma variação no ganho de tensão do amplificador . Por exemplo , num rádio , podemos compensar o ganho ajustando o controle de volume. Mas há muitas aplicações que precisa de um ganho o mais estável possível .

Muitos projetistas inseri um resistor r_E em série com o emissor , como mostra a fig. abaixo . Agora o emissor não mais esta no potencial terra ca . Por isso , a corrente ca do emissor flui através do r_E e produz uma tensão ca no emissor . Quando r_E for muitas vezes maior que $r'e$, praticamente todo sinal ca aparecerá no emissor , colocando de outra forma quando r_E for bem maior que $r'e$, o emissor estará amarrado à base tanto em ca quanto em cc.

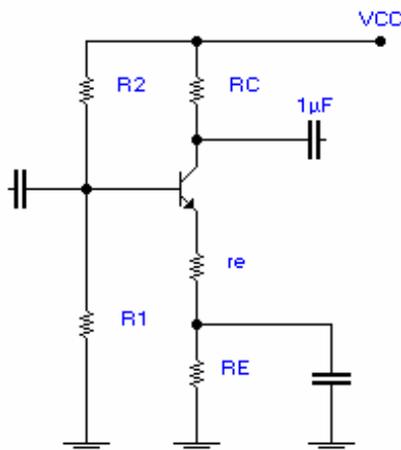


FIG.A

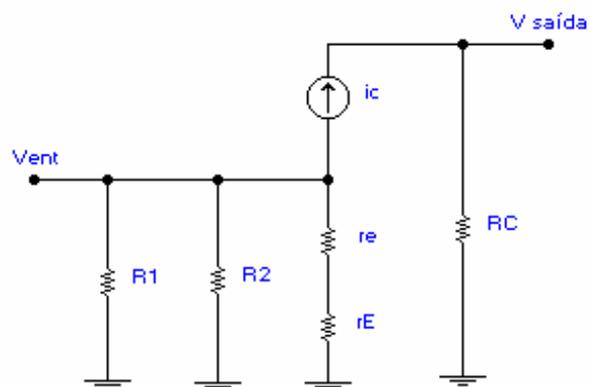


FIG.B

Pelo fato de r_E estar em série com r'_e , a resistência total é $r_E + r'_e$. A entrada v_{in} aparece através dessa resistência e produz uma corrente i_e no emissor de

$$i_e = v_{in} / (r_E + r'_e)$$

Linearizar parcialmente o diodo emissor significa fazer r_E muito maior do que r'_e .

O ganho passa a ser igual :

$$A = R_C / (r_E + r'_e)$$

O resistor r_E é chamado de resistor de linearização. Quando colocado reduz o ganho de tensão, mais por razão de ser muitas vezes maior que r'_e , as variações em r'_e tem menos efeito sobre o ganho de tensão.

exemplo : suponha que r'_e aumente de 25 a 50 Ω ao longo de uma faixa de temperatura, $R_C = 10k\Omega$ e $R_E = 510\Omega$,

O ganho máximo de tensão será :

$$A_v = 10000 / 510 + 25 = -18.7$$

O ganho mínimo será :

$$A_v = 10000 / 510 + 50 = -17.9$$

A diminuição do ganho de tensão é menor que 5% mesmo que r'_e aumente 100%. O baixo ganho de tensão é o preço da estabilização, pois o mesmo amplificador sem o resistor de linearização, apresenta os seguintes ganhos:

Ganho máximo de tensão :

$$A_v = 10000 / 25 = -400$$

Ganho mínimo de tensão

$$A_v = 10000 / 50 = -200$$

Ou seja o ganho de tensão varia de proporcional a r'_e .

Uma outra vantagem da linearização do diodo emissor é redução da distorção. É a não linearidade do diodo emissor que produz a distorção em amplificadores de grande sinal. Com $r'_e = 25^{-3} / I_E$ qualquer variação significativa em I_E , produz uma variação perceptível em r'_e .

OBS- Num amplificador linearizado, o emissor está amarrado à base para v_{in} como para v_{cc} . Por isso a tensão v_{cc} do emissor está dentro de 0.7V da tensão v_{cc} da base, e a tensão v_{in} do emissor é aproximadamente igual a tensão v_{in} de base. A extremidade inferior do r'_e deve estar no terra v_{in} , um problema comum é o capacitor de derivação aberto, isto diminui o ganho de tensão porque R_E se soma com r'_e , produzindo um amplificador superlinearizado com um ganho muito pequeno.

A impedância de entrada passa a ser :

$$Z_{ent} = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta (r_E + r'_e)$$



Amplificador de Potência Classe A e B

Todo amplificador vê duas cargas, uma carga CC e outra CA . Por isso Todo amplificador possui duas linhas de carga. O amplificador abaixo fig. A tem seu equivalente CC na fig. B. Assim podemos deduzir a linha de carga da fig. C . Quando o sinal aciona o transistor os capacitores aparecem como curto e as resistências da fonte e da carga vista pelo transistor são diferentes

$$r_B = R_S // R_1 // R_2$$

E a resistência de carga vista pelo coletor é:

$$r_C = R_C // R_L$$

A fig. D mostra o circuito equivalente C.A , quando nenhum sinal estiver presente, o transistor funciona no ponto Q . Quando houver presença de sinal , o ponto de funcionamento oscila ao longo da linha de carga C.A e não pela linha de carga CC.

Por convenção chama se de I_{CQ} a corrente Quiescente do coletor e de V_{CEQ} a tensão Quiescente ao coletor-emissor.

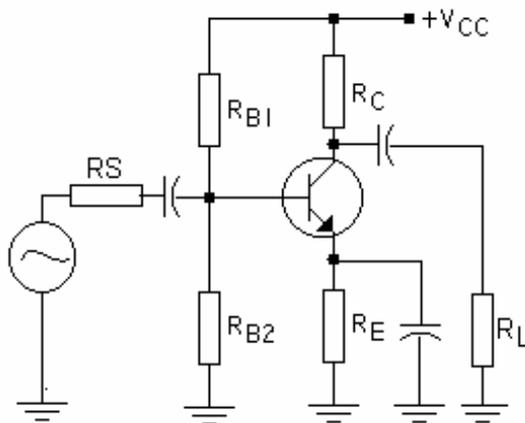


Fig. A

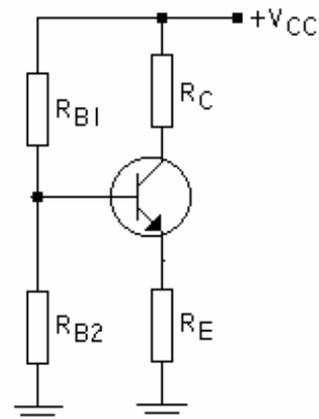


Fig. B

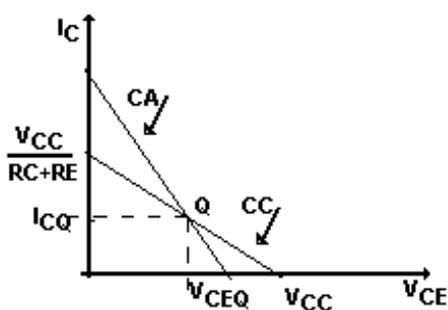


Fig. C

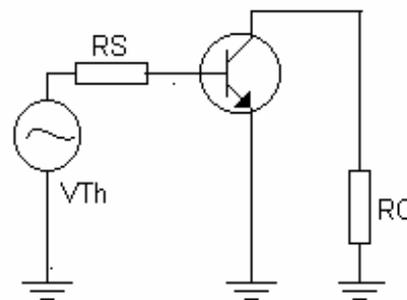


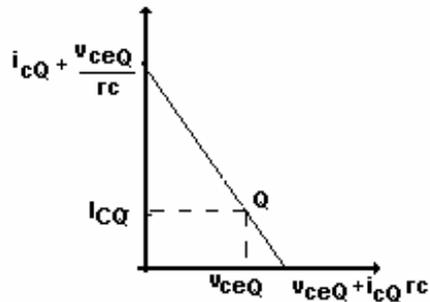
Fig. D

Saturação e Corte C. A

Os pontos de saturação e de corte na linha de carga C.A são diferentes dos pontos da linha de carga CC, fig. C. Observando a fig.D, podemos somar as tensões C.A ao longo da malha de coletor para obter:

Assim:

$$v_{ce} + i_c \cdot r_c = 0$$



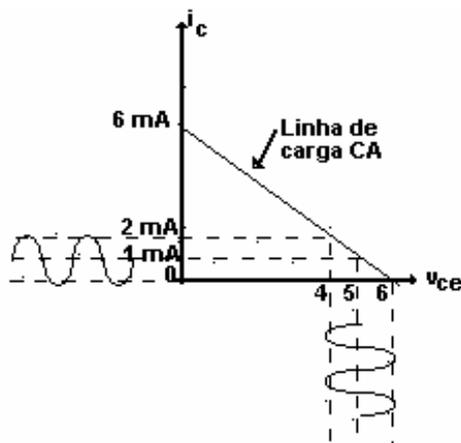
Compliance CA de Saída

A linha de carga CA consiste num recurso visual para melhor compreensão do funcionamento em grandes sinais, durante o semiciclo positivo da tensão da fonte. A tensão de coletor oscila do ponto Q até a saturação.

No semiciclo negativo, a tensão de coletor oscila do ponto Q até o corte.

Para um sinal CA suficientemente grande, o ceifamento pode ocorrer num ou nos dois picos do sinal.

A compliance CA de saída é a tensão CA máxima de pico a pico não ceifada que um amplificador pode produzir.



A compliance CA de saída é simbolizada por PP, uma notação que lembra esse valor a tensão máxima não ceifada de pico a pico. Assim

$$PP = 2i_{cQ} \cdot r_c$$

$$PP = 2v_{ceQ}$$

Operação Classe A

Define-se que o transistor opera na região ativa em todos os instantes, isto implica que a corrente de coletor flua durante 360° do ciclo CA.

Ganho de Tensão com Carga

$$A_v = -\frac{r_c}{r'_e}$$

Esta fórmula alternativa para o ganho de tensão, nos permite calcular os efeitos de RL, sem Thevenizar o circuito de saída. Ex:

$R_c = 10\text{k}\Omega$, $R_L = 30\text{k}\Omega$ e $r'_e = 50\Omega$.

$$A_v = -\frac{10\text{k} // 30\text{k}}{50} = -150$$

Ganho de Corrente

É a razão entre a corrente CA do coletor e a corrente CA de base.

$$A_i = \frac{i_c}{i_b}$$

Entretanto na maioria dos circuitos, você pode usar seguinte aproximação com erro desprezível.

$$A_i \cong \beta$$

Ganho de Potência.

A potência CA de entrada é:

$$P_{\text{ent}} = v_{\text{ent}} \cdot i_b$$

A potência de saída é:

$$P_{\text{saída}} = -v_{\text{saída}} \cdot i_c$$

Assim a razão dessas potências é chamado de ganho de Potência:

$$A_p = \frac{v_{\text{saída}} \cdot i_c}{v_{\text{ent}} \cdot i_b}$$

$$A_p = -A_v \cdot A_i$$

Potência na Carga.

A carga em um amplificador pode ser um alto falante , um motor ,ou qualquer outro dispositivo.

(Usar esta formula quando as medidas forem feitas com um multímetro)

$$P_L = \frac{V_L^2}{R_L}$$

(Usar esta formula quando as medidas forem feitas com um osciloscópio)

$$P_L = \frac{V_{PP}^2}{8R_L}$$

Operação Classe B

Determina que a corrente do coletor flui durante 180° do ciclo CA , isto implica que o ponto Q se situe aproximadamente no corte , para as duas linhas de carga. Assim a operação classe B , exige maiores trabalhos e menor dissipação de potência.

Circuito” PUSH-PULL ”

Quando um transistor opera em classe B , ele corta um semiciclo . para evitar a distorção resultante coloca se dois transistor em um arranjo chamado push-pull. Isto quer dizer que um conduz durante o semiciclo positivo e o outro durante o semiciclo negativo. Observe o circuito:

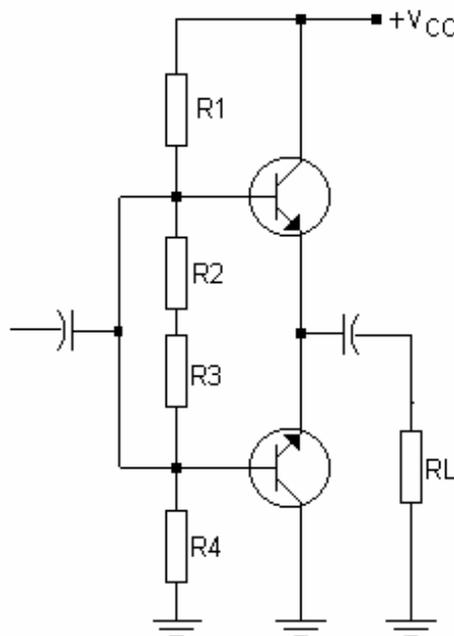


Fig. A

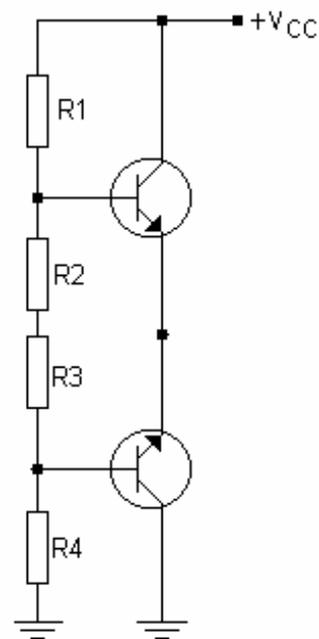


Fig. B

Na figura B o projetista determina os resistores de polarização para situarem o ponto Q no corte. Isto polariza o diodo emissor de cada transistor entre 0.6 e 0.7V. Pelo fato dos resistores de polarização serem iguais, cada diodo emissor é polarizado com a mesma tensão. Resultando que a metade da tensão de alimentação fique sobre cada transistor.

Formulas para Analise CA.

Linha de carga CA

$$V_{ceQ} = \frac{VCC}{2}$$

$$I_{c_{sat}} = i_{cQ} + \frac{V_{ceQ}}{r'e}$$

$$V_{ce_{corte}} = V_{ceQ} + i_{cQ}.r'e$$

No circuito push-pull

$$i_{c_{sat}} = \frac{VCC}{2R_L}$$

$$V_{ce_{corte}} = \frac{VCC}{2}$$

Ganho de tensão com carga.

$$A_v = \frac{R_L}{R_L + r'e}$$

Impedância de entrada com carga.

$$Z_{ent(base)} \cong \beta.(R_L + r'e)$$

Impedância de saída

$$Z_{saída} \cong r'e + \frac{r'e}{\beta}$$

Ganho de Potência

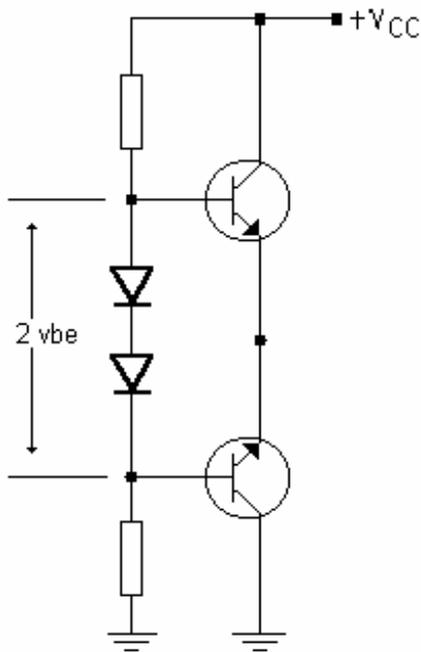
$$A_p = A_v.A_i$$

Polarização de um Amplificador classe B

Situar o ponto que próximo do corte , não é tarefa fácil, para isso usa se alguns circuitos de polarização, sendo o mais usado , a polarização por diodos.

A idéia é de usar diodos compensadores para fornecer a tensão de polarização aos diodos emissores.

Para que isso funcione, as curvas dos diodos devem se casar com as curvas de V_{BE} dos transistores.



Espelho de Corrente

A corrente de base é muito menor do que a corrente através do resistor e do diodo. Por esta razão , as correntes dos resistores e dos diodos são aproximadamente iguais .Como a corrente do coletor é praticamente igual a corrente do emissor.

$$I_C \cong I_R$$

Este resultado é muito importante , quer dizer que podemos estabelecer I_C controlando I_R .

A polarização por diodo , de um seguidor de emissor push-pull classe B , conta com dois espelhos de corrente. A metade superior é um espelho de corrente NPN e a metade inferior é um espelho de corrente PNP.

O exemplo abaixo representa um circuito completo de amplificador sendo :

- ◆ Amplificador de pequenos sinais (Q1)
- ◆ Amplificador classe A para grandes sinais (Q2)
- ◆ Amplificador classe B tipo PUSH-PULL (Q3 e Q4)

Referências Bibliográficas

FIGINI, Gianfranco ; Eletrônica Industrial ; Circuitos e aplicações; São Paulo Hemus-1983.

MALLEY , John O'Malley ; Analise de Circuitos; São Paulo Makron books - 1993

MALVINO, Albert Paul ; Eletrônica ;São Paulo McGraw- Hill, 1987