

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR

## Estrutura, polarização e curvas características

O transistor de junção bipolar é um dispositivo semiconductor 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".

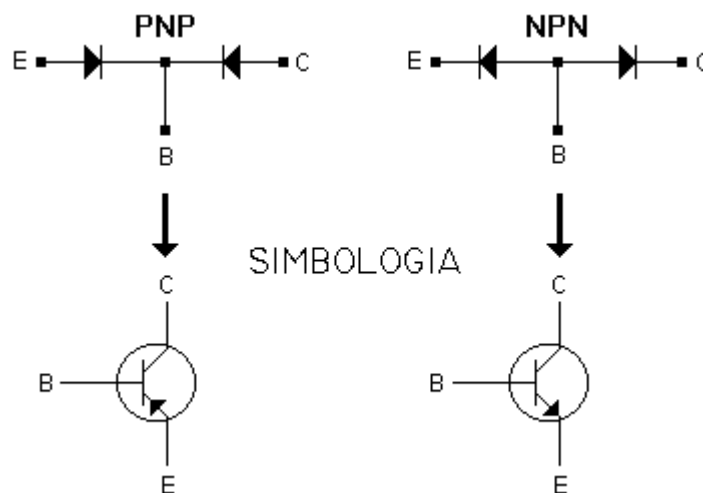
O primeiro é chamado de transistor *nnp* enquanto que o segundo é chamado de transistor *pnp*.

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 *nnp* a junção dos dois anodos 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.

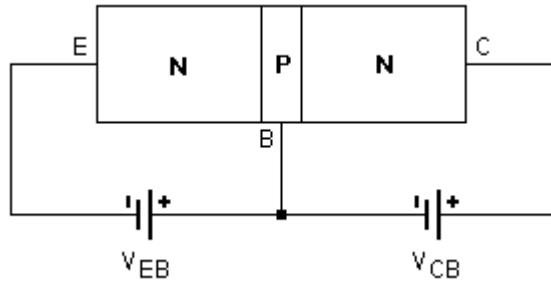
### POLARIZAÇÃO:

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

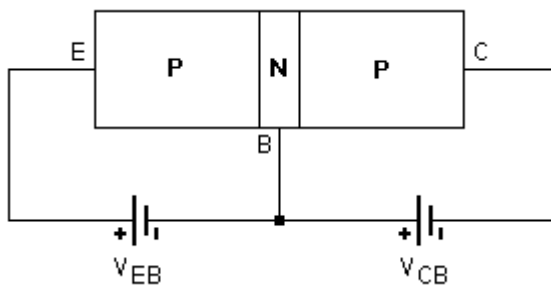
- 1 - Junção base-emissor: deve ser polarizada diretamente
- 2 - Junção base-coletor: deve ser polarizada reversamente

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 *nnp* 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

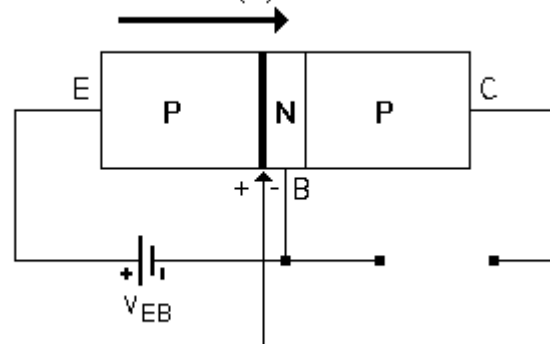
Observe atentamente nas figuras acima a polaridade das baterias.

## OPERAÇÃO BÁSICA:

### 1 - 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.

PORTADORES MAJORITÁRIOS (+)



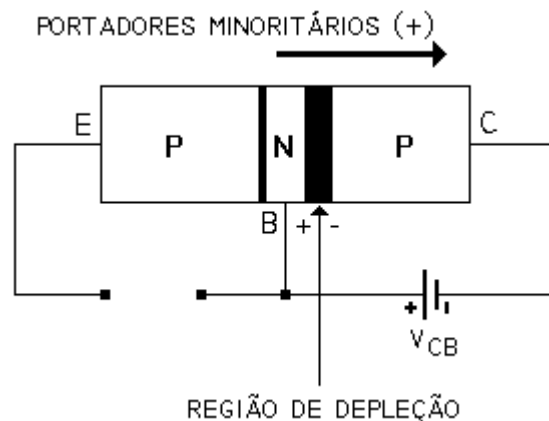
REGIÃO DE DEPLEÇÃO

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*.

## 2 - 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.



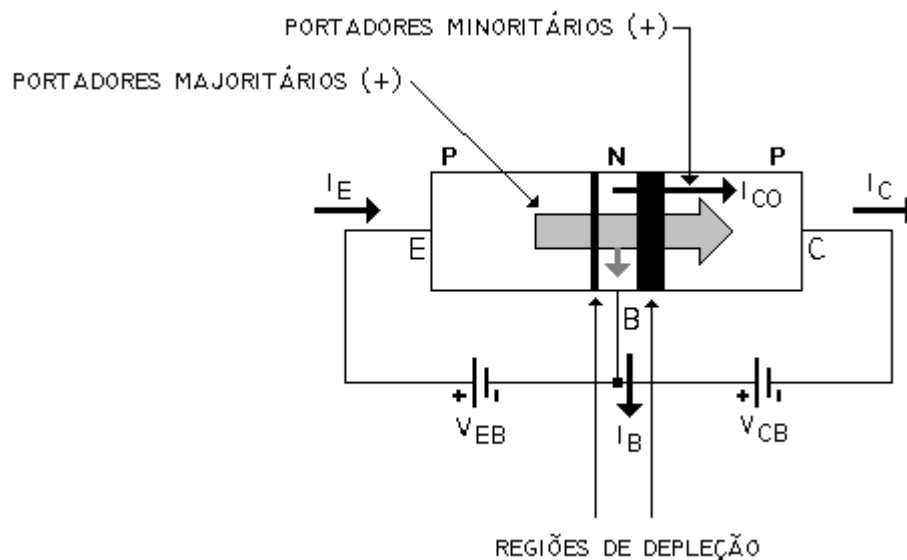
Observa-se agora, em virtude da polarização reversa um aumento da região de depleção semelhante ao que acontece com os diodos de junção, isto é ocorre um fluxo de portadores minoritários (corrente de fuga nos diodos), fluxo este que depende também da temperatura. Podemos então dizer que uma junção  $p-n$  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 maior.

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.

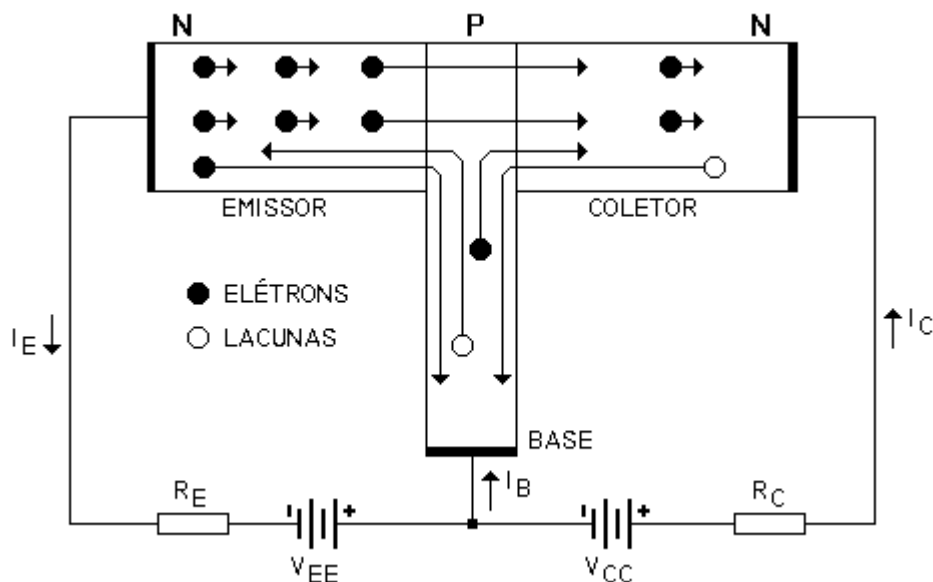
Desta forma a corrente de coletor ( $I_C$ ), formada pelos portadores majoritários provenientes do emissor soma-se aos portadores minoritários ( $I_{CO}$  ou  $I_{CBO}$ ).

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

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

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

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

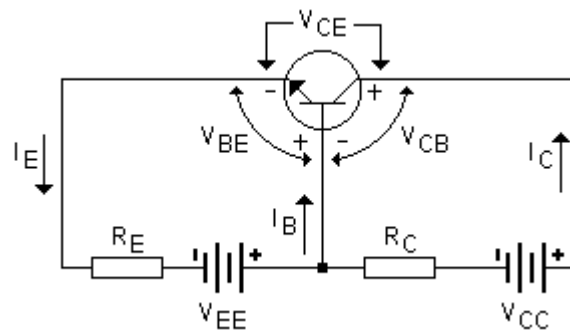
por lacunas. Da mesma forma as correntes de emissor ( $I_E$ ) e de coletor ( $I_C$ ) também tem sentidos opostos, por serem formadas por elétrons.

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  $\alpha$  (alfa)<sup>1</sup>, de forma que, a corrente de coletor é representada por  $\alpha I_E$ . Os valores típicos de  $\alpha$  variam de 0,9 a 0,99. Isto significa que parte da corrente do emissor não chega ao coletor<sup>2</sup>.

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

*Solução:*

$$I_C = \alpha I_E$$

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

<sup>1</sup> O símbolo  $h_{FB}$  é algumas vezes usado na lugar de  $\alpha$

<sup>2</sup> Isto é explicável, pois  $\alpha$  é menor do que 1.

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

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

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  $\beta$  (beta)<sup>3</sup>. 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  $\beta$ ?

*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  $\alpha$ ?

*Solução:*

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

Podemos então estabelecer uma relação entre  $\alpha$  e  $\beta$ .<sup>4</sup>

Temos então:

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

$\beta$  assume valores muito mais elevados em relação a  $\alpha$  (o valor típico de  $\beta$  é da ordem de 30 a 300). Então, quanto maior for o valor de  $\beta$ , mais o valor de  $\alpha$  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:

$$I_C = I_E$$

<sup>3</sup> O símbolo  $h_{FE}$  é algumas vezes usado no lugar de  $\beta$

<sup>4</sup> Alguns autores utilizam a notação  $\alpha_{CC}$  e  $\beta_{CC}$

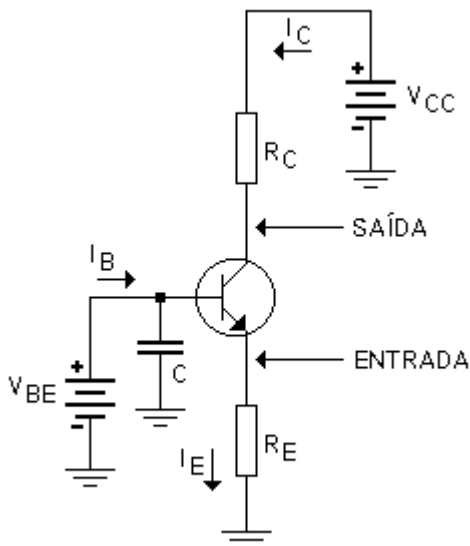
## CONFIGURAÇÕES BÁSICAS:

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.

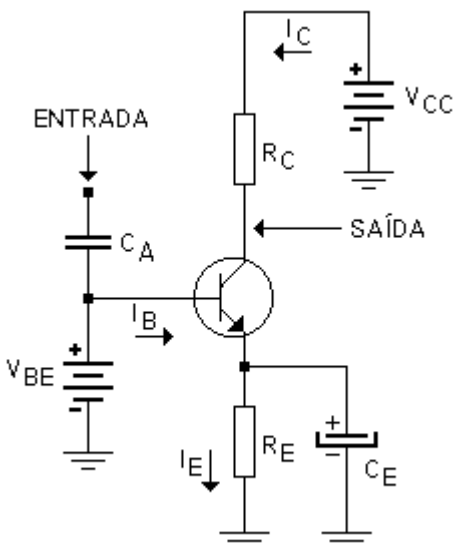


### CARACTERÍSTICAS:

- 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:

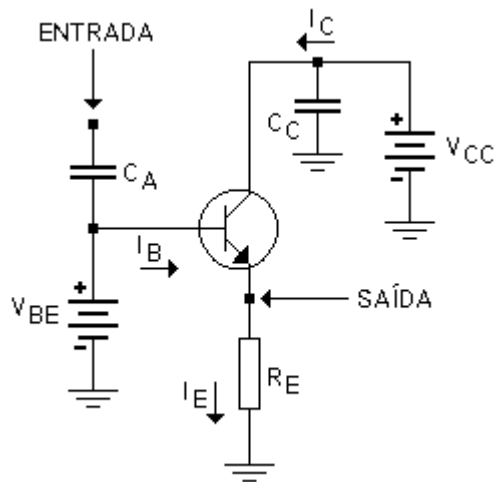
- Ganho de corrente ( $G_i$ ): elevado
- Ganho de tensão ( $G_v$ ): elevado
- Resistência de entrada ( $R_{IN}$ ): média
- Resistência de saída ( $R_{OUT}$ ): alta

### ➤ 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).

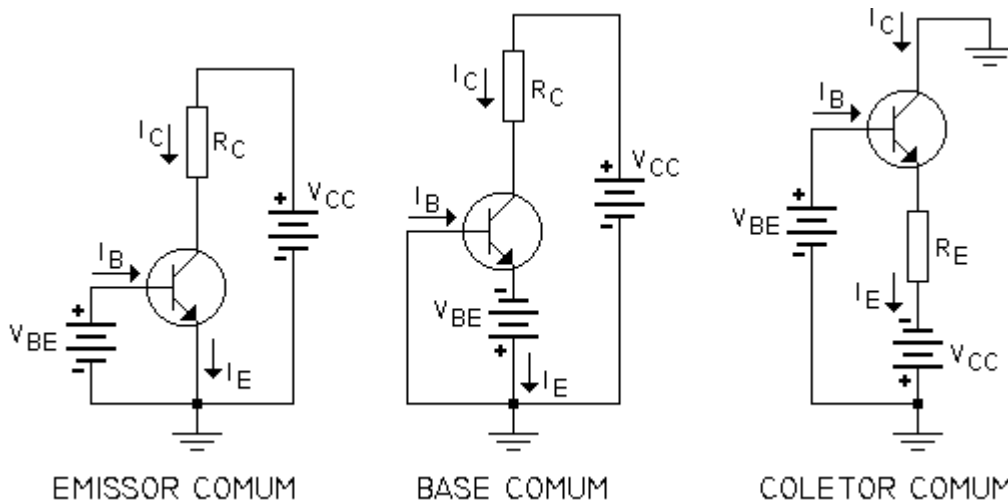
O sinal de entrada é aplicado entre base e coletor e retirado do circuito de emissor. O capacitor " $C_C$ " ligado do coletor a terra assegura que o coletor esteja aterrado para sinais alternados.  $C_A$  é um capacitor de acoplamento de sinal.



#### CARACTERÍSTICAS:

- Ganho de corrente ( $G_i$ ): elevado
- Ganho de tensão ( $G_v$ ):  $\leq 1$
- 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 (do + para o -), 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.

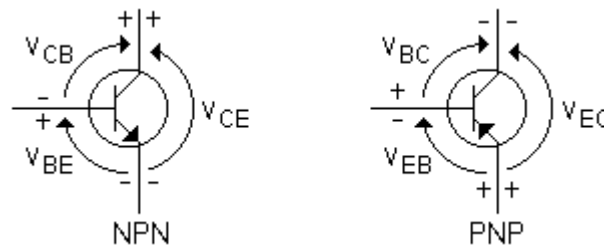
Podemos por exemplo representar uma tensão entre coletor e emissor por  $V_{CE}$  quando o transistor for *npn*. Isto significa que o coletor é mais positivo do que o



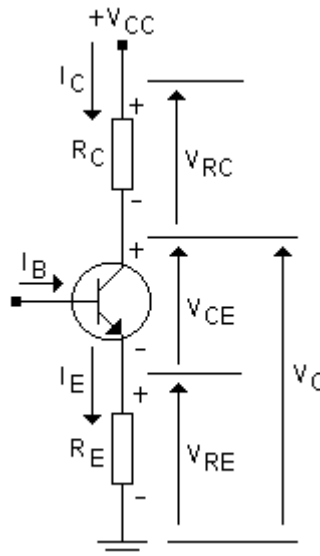
emissor. Em outras palavras, a primeira letra após o V (neste caso o coletor) é mais positiva do que a segunda letra (neste caso o emissor).

Para um transistor *npn* 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 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.

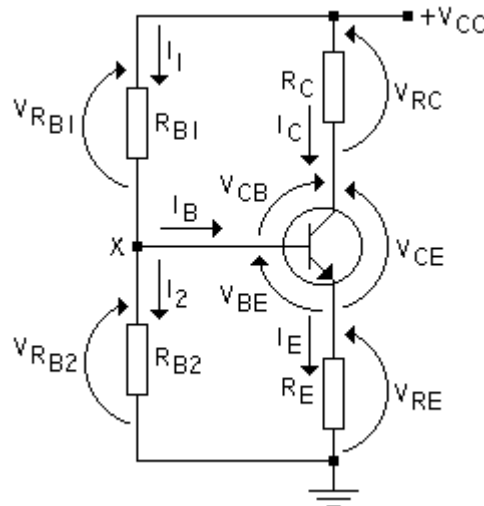
Na maioria das vezes, uma única bateria pode polarizar um circuito transistorizado, visto que o mesmo comporta-se como um circuito fechado.

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:**

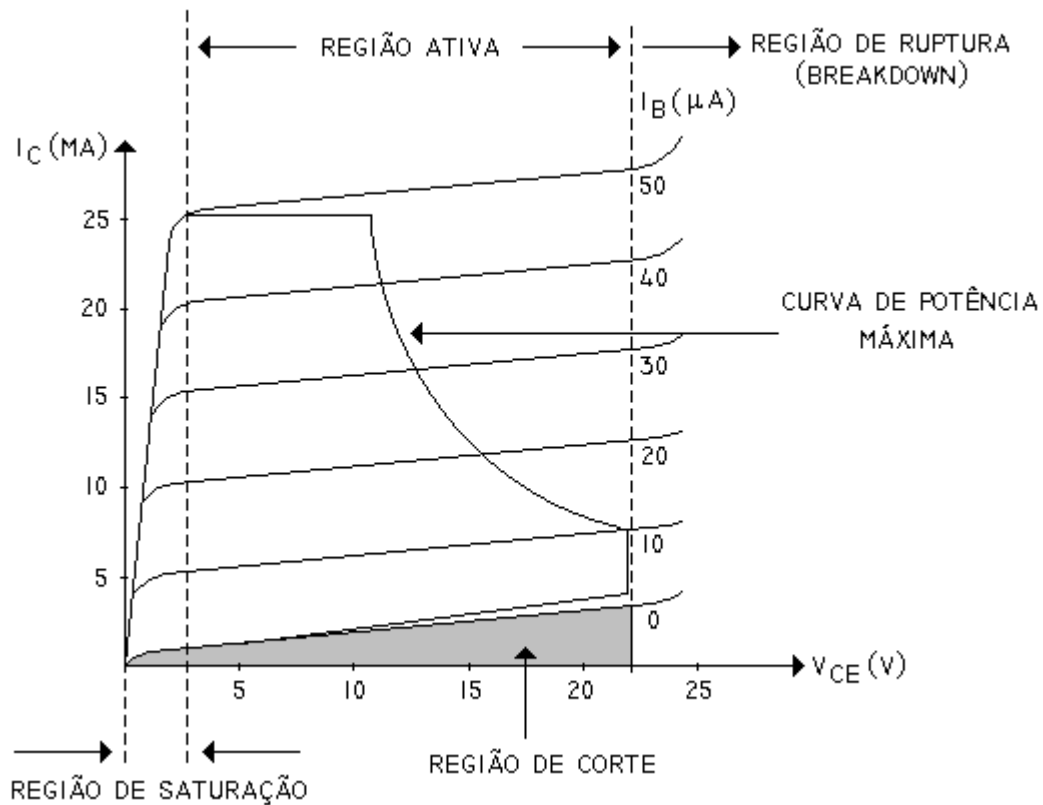
As curvas características definem a região de operação de um transistor, tais como: região de saturação, região de corte, região ativa e região de ruptura.

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.

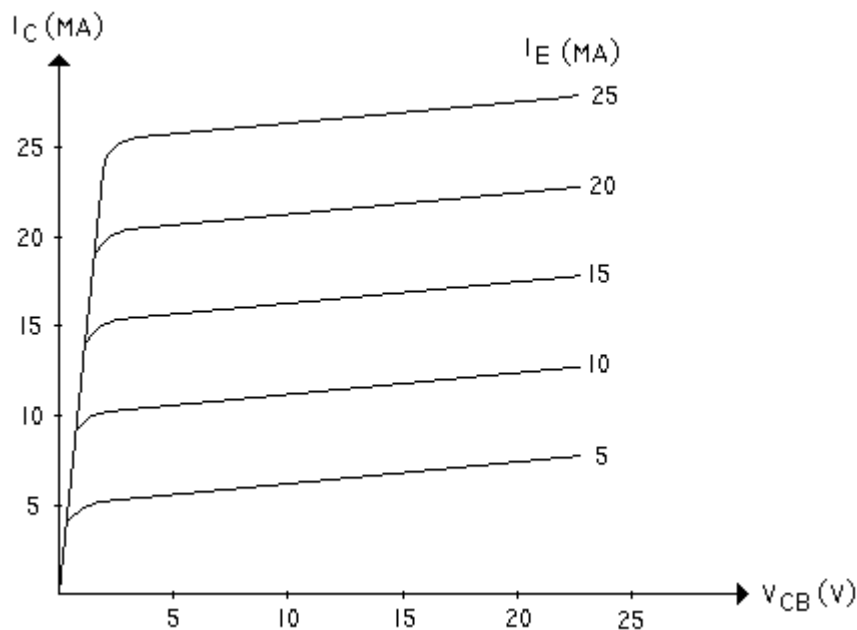
### CURVA CARACTERÍSTICA PARA MONTAGEM EM EMISSOR COMUM:



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

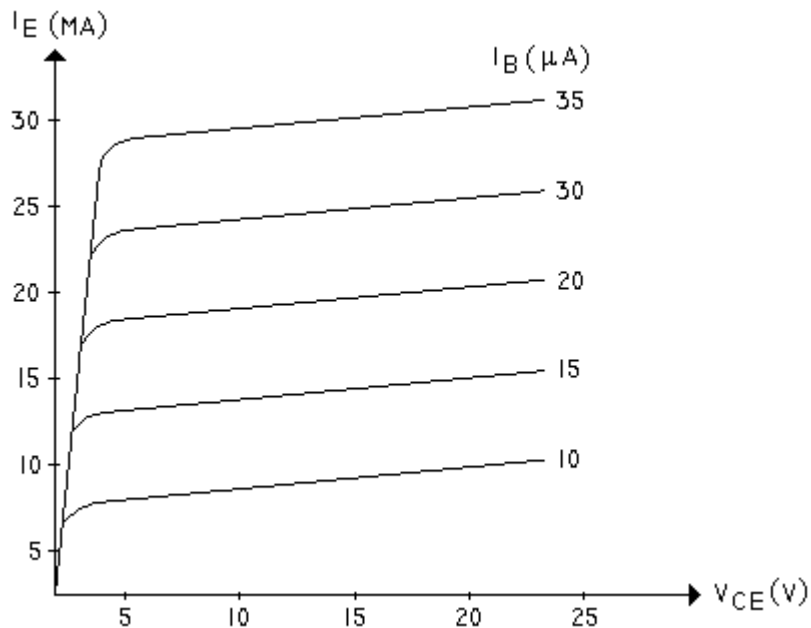
A curva de potência máxima representa a máxima potência que pode ser dissipada pelo transistor.

### CURVA CARACTERÍSTICA PARA MONTAGEM EM BASE COMUM:



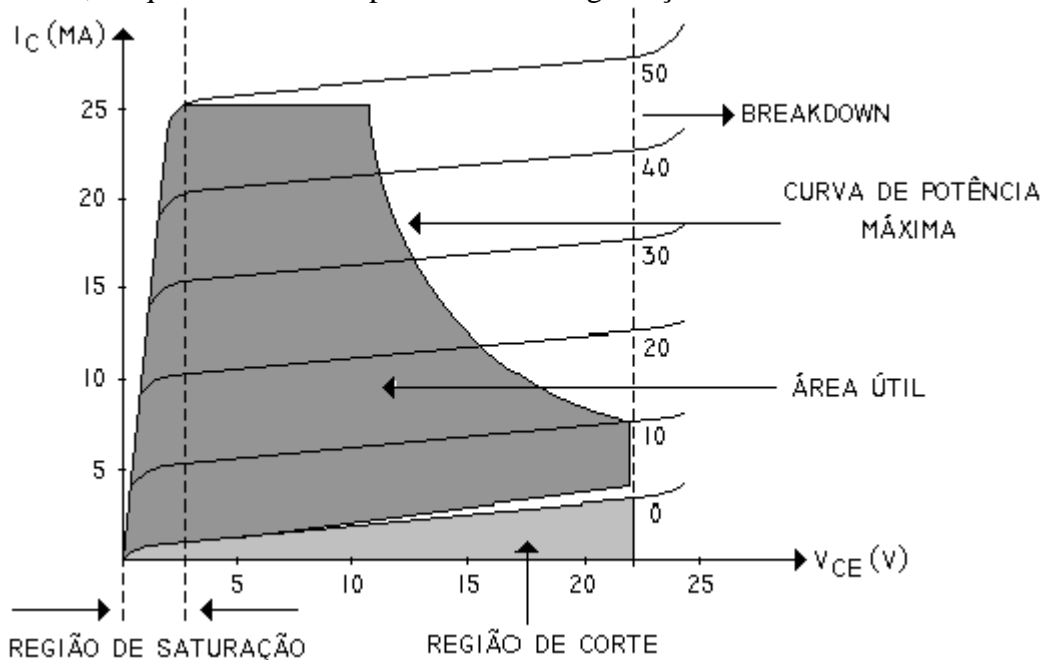
Observa-se na curva característica para montagem em base comum, que a corrente de emissor controla a corrente de coletor, enquanto que na curva característica para montagem em emissor comum, a corrente de base controla a corrente de coletor.

### CURVA CARACTERÍSTICA PARA MONTAGEM EM COLETOR COMUM:



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

A 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.

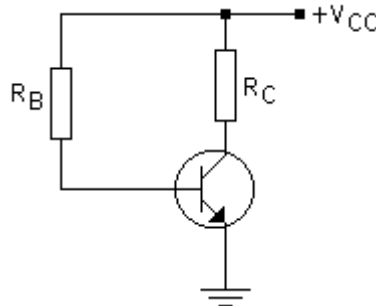


A região útil é delimitada pela curva de potência máxima<sup>5</sup> e conforme dito anteriormente, o transistor trabalha com segurança, não ultrapassando a máxima potência permitida.

## CIRCUITOS DE POLARIZAÇÃO:

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

### 1 - POLARIZAÇÃO POR CORRENTE DE BASE CONSTANTE



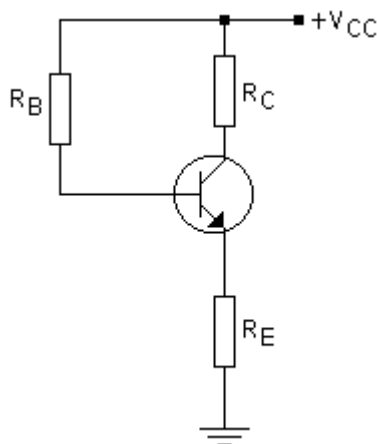
Também denominado de *polarização fixa*, é um circuito muito utilizado quando deseja-se que o transistor opere como chaveamento eletrônico, com dois pontos bem definidos: corte e saturação.

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  $\beta$ .

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

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

### 2 - POLARIZAÇÃO POR CORRENTE DE EMISSOR CONSTANTE



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

Assim, quando  $\beta$  aumentar, a corrente de coletor aumenta, aumentando também a tensão no emissor, fazendo com que haja uma diminuição da tensão de

---

<sup>5</sup> Também denominada hipérbole de máxima dissipação.  
TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR I - Prof. Edgar Zuim

polarização  $V_{BE}$ , reduzindo a corrente de base. Isto resulta numa corrente de coletor menor compensando parcialmente o aumento original de  $\beta$ .

Aplicando LKT:

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + R_E I_E$$

onde:  $V_{RC} = R_C I_C$

logo:

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

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

↓  
 diminui  
 ↓  
 ↑                      ↑  
 aumenta              aumenta

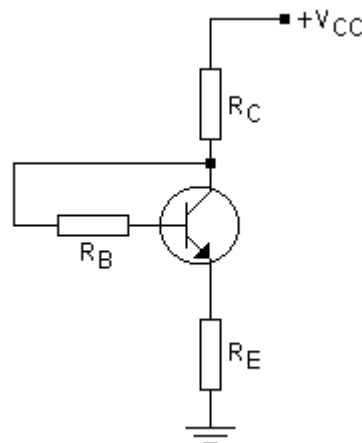
Adota-se como prática para garantir a estabilidade térmica sem afetar o sinal de saída:  $V_{RE} = 0,1 V_{CC}$

Equações básicas:

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

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

### 3 - POLARIZAÇÃO POR REALIMENTAÇÃO NEGATIVA



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

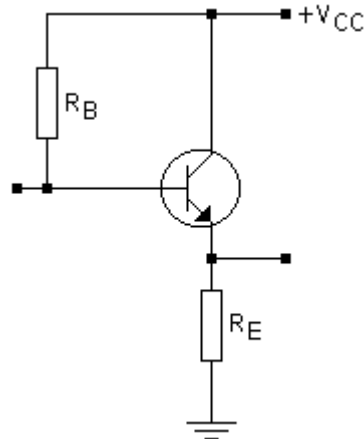
Equações básicas:

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

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

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

#### 4 - SEGUIDOR DE EMISSOR



O seguidor de emissor tem como característica o ganho de tensão baixo ( $\leq 1$ )

Equações básicas:

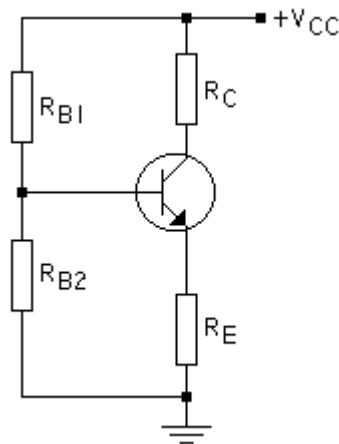
$$V_{CE} = 0,5V_{CC}$$

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

$$I_E = \beta I_B$$

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

#### 5 - 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  $\beta$ ). 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.

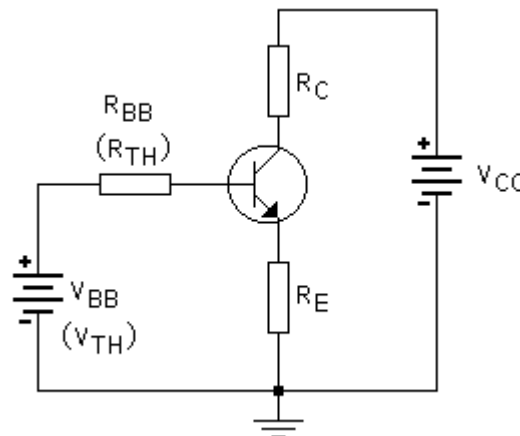
**Aplicando Thèvenin:**

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  $V_{CC}$  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:

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

Sendo:  $I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}$ , 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  $\beta$

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

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

➤ Em função de  $\alpha$ :

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

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

temos:  $I_E = I_C + I_B$

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

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

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

colocando  $I_C$  em evidência resulta:

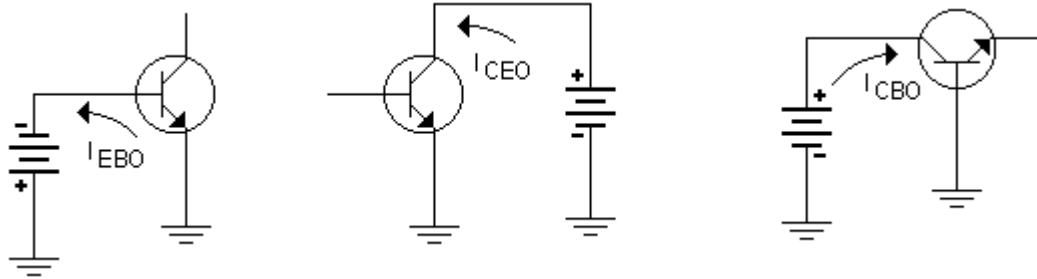
$$I_C (1 - \alpha) = \alpha I_B + I_{CBO}$$

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.

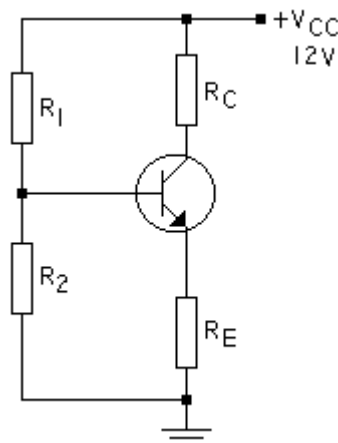
$$I_{CEO} = (\beta + 1)I_{CBO}$$

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  $10^\circ\text{C}$  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 $R_2$**

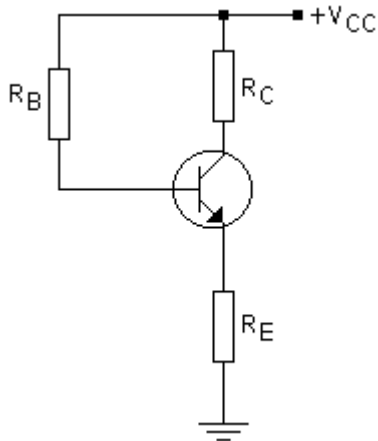
$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_{BB}}{R_1 - R_{BB}} = \frac{(23.762) \cdot (4.000)}{23.762 - 4.000} = \frac{95.048}{19.762} = 4.817\Omega$$

Podemos também calcular  $R_2$  da seguinte forma:

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

### **RESPOSTAS:**

|       |                  |
|-------|------------------|
| $R_C$ | 1,6k $\Omega$    |
| $R_E$ | 400 $\Omega$     |
| $R_1$ | 23,762k $\Omega$ |
| $R_2$ | 4,817k $\Omega$  |
| $I_B$ | 30 $\mu A$       |
| $I_E$ | 3mA              |
| $I_C$ | 3mA              |



**DADOS:**

$I_E = 4\text{mA}$   
 $V_{BE} = 550\text{mV}$   
 $V_{CE} = 5\text{V}$   
 $V_{CC} = 12\text{V}$   
 $I_{CBO} = 6\mu\text{A}$   
 $\alpha = 0,92$

2 - Dado o circuito acima, calcule:  $\beta$ ,  $I_{CEO}$ ,  $I_C$ ,  $I_B$ ,  $R_C$  e  $R_B$ .

**Cálculo de  $\beta$**

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

**Cálculo de  $I_{CEO}$**

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

**Cálculo de  $I_C$**

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

**Cálculo de  $I_B$**

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

**Cálculo de  $R_C$**

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

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

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

**Cálculo de  $R_E$**

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

**Cálculo de  $R_B$**

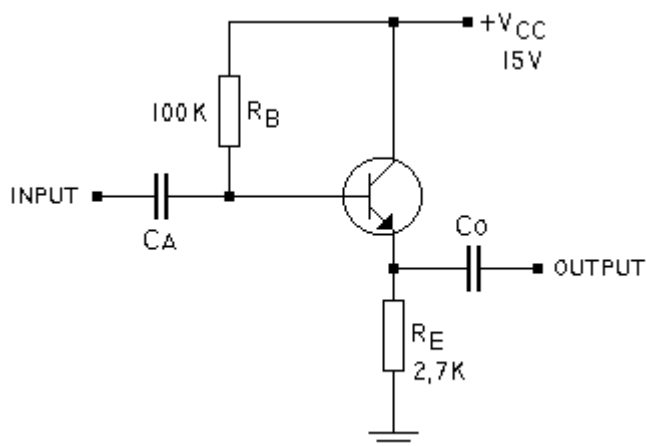
$$R_B = \frac{V_{RB}}{I_B} \rightarrow V_{RB} = V_{CC} - V_{BE} - V_{RE} \rightarrow V_{RB} = 12 - 0,55 - 1,2 = 10,25\text{V}$$

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

**RESPOSTAS:**

|           |                |
|-----------|----------------|
| $\beta$   | 11,5           |
| $I_{CEO}$ | $75\mu A$      |
| $I_C$     | $3,755mA$      |
| $I_B$     | $245\mu A$     |
| $R_C$     | $1,54k\Omega$  |
| $R_E$     | $300\Omega$    |
| $R_B$     | $41,84k\Omega$ |

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



#### Cálculo de $I_B$

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_B + \beta R_E} = \frac{15}{100k\Omega + 40(2,7k\Omega)} = \frac{15}{100k + 108k} = \frac{15}{208k} = 72,12\mu A$$

#### Cálculo de $I_E$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = (41) \cdot 72,12\mu A = 2,96mA$$

#### Cálculo de $V_{CE}$

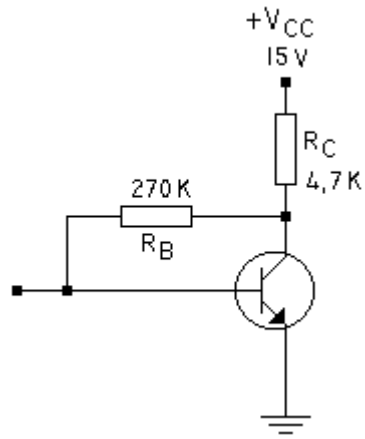
$$V_{CE} = V_{CC} - R_E I_E = V_{CC} - V_{RE} = 15 - (2,7k\Omega \cdot 2,96mA) = 15 - 7,992V = 7,008V \approx 7V$$

$$V_{RE} = 7,992V \approx 8V$$

#### RESPOSTAS:

|          |              |
|----------|--------------|
| $I_B$    | $72,12\mu A$ |
| $I_E$    | $2,96mA$     |
| $V_{CE}$ | $7V$         |
| $V_{RE}$ | $8V$         |

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



### Cálculo de $I_B$

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_B + \beta R_C} = \frac{15}{270k + 100 \cdot 4,7k} = \frac{15}{270k + 470k} = \frac{15}{740k} = 20,27\mu A$$

### Cálculo de $I_C$

$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot (20,27\mu A) = 2,027mA$$

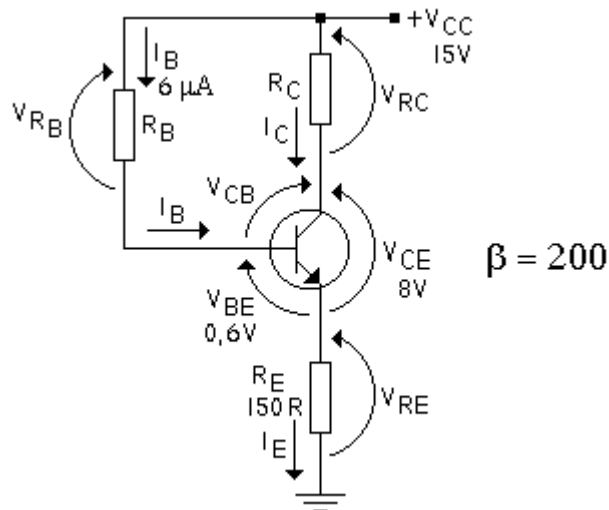
### Cálculo de $V_{CE}$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 15 - (4,7k \cdot 2,027mA) = 15 - 9,527 = 5,473V$$

### RESPOSTAS:

|                    |                 |                   |
|--------------------|-----------------|-------------------|
| $I_B = 20,27\mu A$ | $I_C = 2,027mA$ | $V_{CE} = 5,473V$ |
|--------------------|-----------------|-------------------|

5 - Calcule  $I_C$ ,  $I_E$ ,  $R_C$  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 $R_B$

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

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

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

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

### RESPOSTAS:

|                      |                            |
|----------------------|----------------------------|
| $I_C = 1,2\text{mA}$ | $R_C = 5,68\text{k}\Omega$ |
| $I_E = 1,2\text{mA}$ | $R_B = 2,37\text{M}\Omega$ |

### 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.

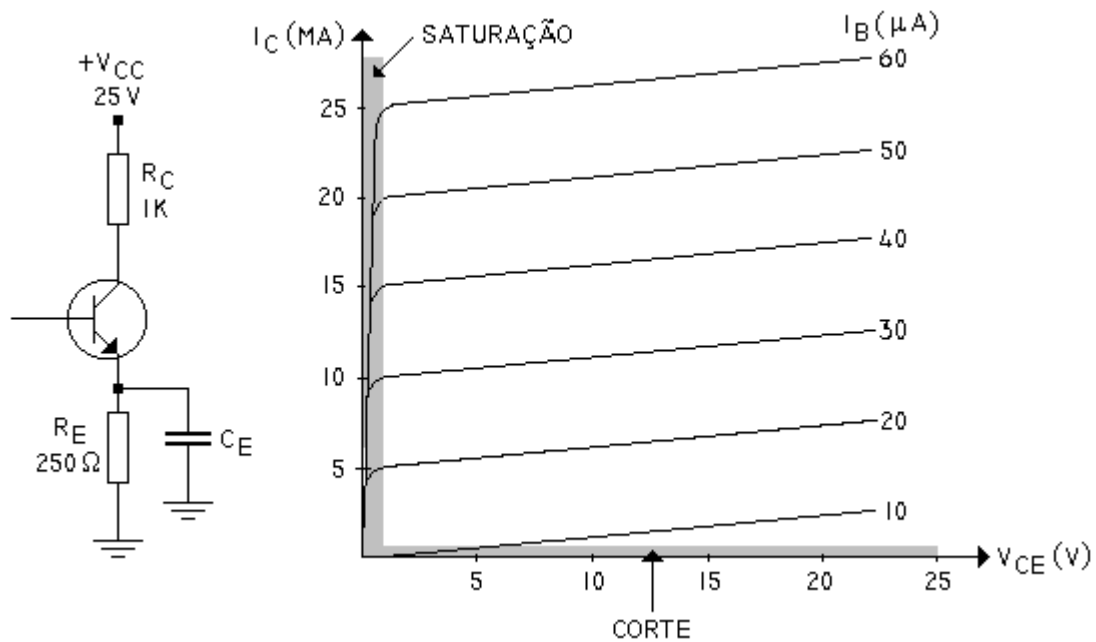
A vantagem da utilização do método gráfico é a rapidez na análise dos pontos de operação de um transistor.

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.

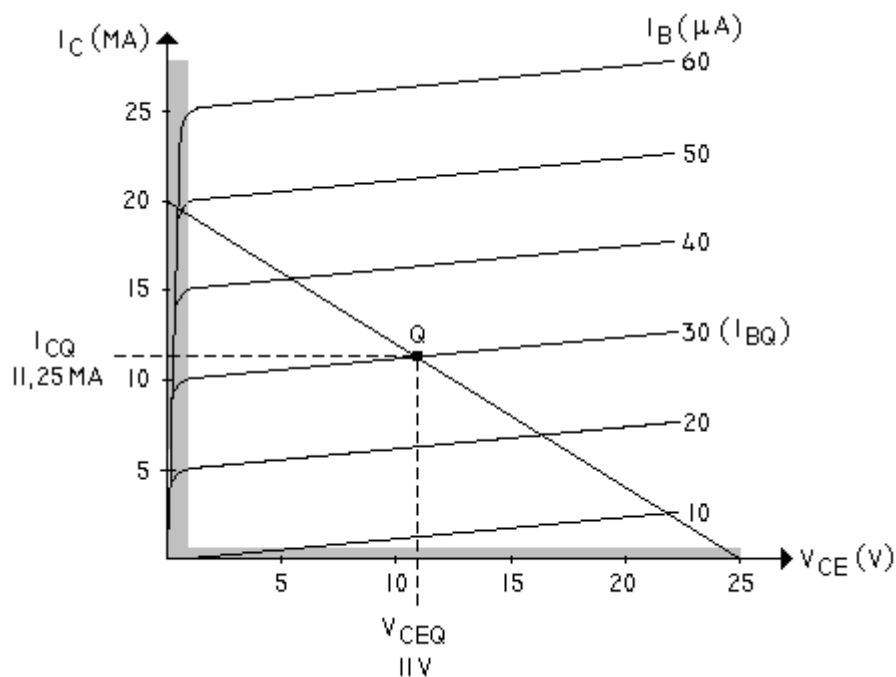


Observe as áreas sombreadas, que representam as regiões de corte e de saturação.

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

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

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





### 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  $30\mu\text{A}$ .

A partir daí então podemos determinar a corrente de coletor e a tensão entre coletor e emissor:

$$\begin{aligned}I_{CQ} &= 11,25\text{mA} \\V_{CEQ} &= 11\text{V} \\I_{BQ} &= 30\mu\text{A}\end{aligned}$$

Podemos então calcular o  $\beta$  e aplicar LKT para determinar a tensão nos resistores:

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

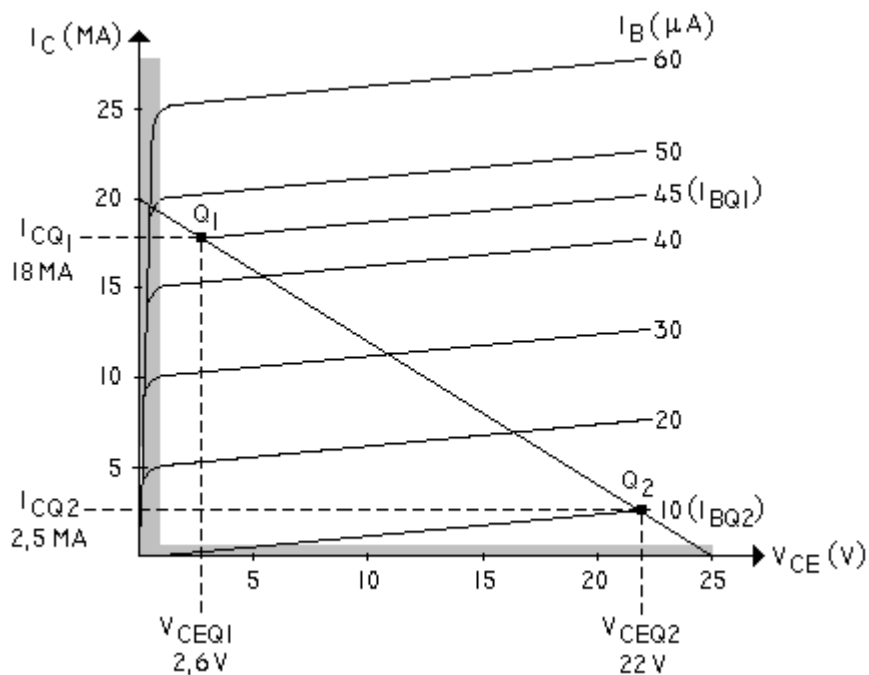
Partindo da equação:  $V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE}$

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

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

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

Se na mesma curva selecionarmos um ponto quiescente ( $Q_1$ ) mais próximo da região de saturação, por exemplo  $I_B = 45\mu\text{A}$ , teremos um aumento da corrente de coletor e uma diminuição de  $V_{CE}$ ; para um ponto quiescente ( $Q_2$ ) mais próximo da região de corte, por exemplo  $I_B = 10\mu\text{A}$ , 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  $\beta$  ao longo da reta de carga.

**Para  $Q_1$ :**

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

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

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

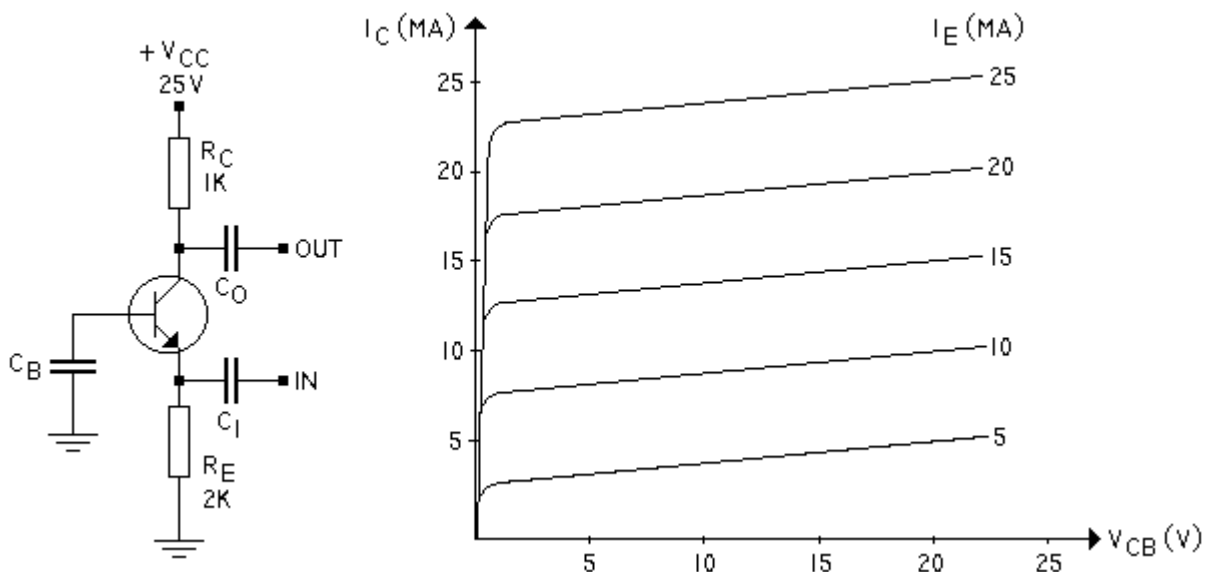
**Para  $Q_2$ :**

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

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

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

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  $V_{CB}$ .

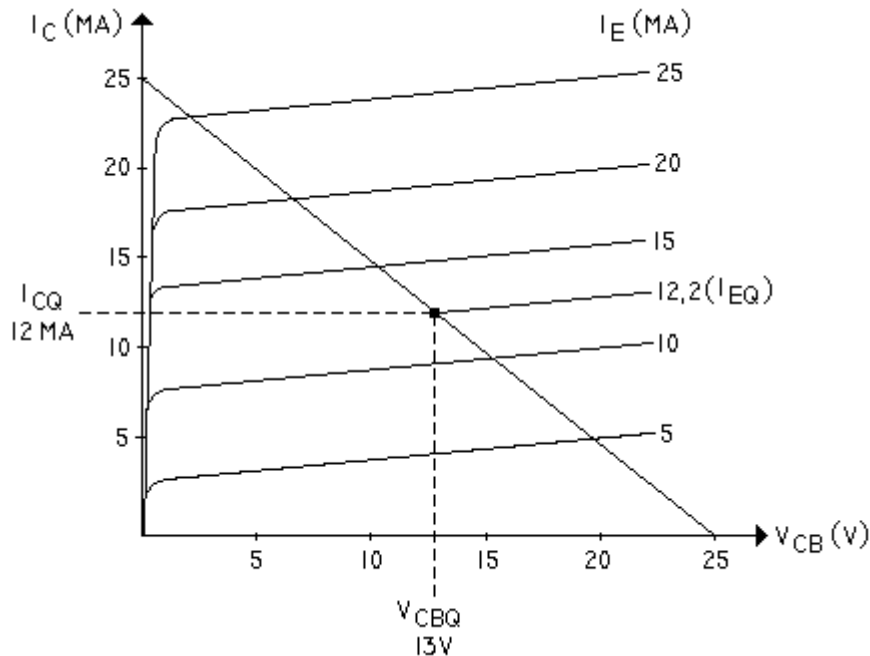
Quando  $I_C = 0$ ,  $V_{BE} = 0$ , como  $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$ , logo  $V_{CB} = V_{CE} - 0$

Portanto,  $V_{CB} = 25V$

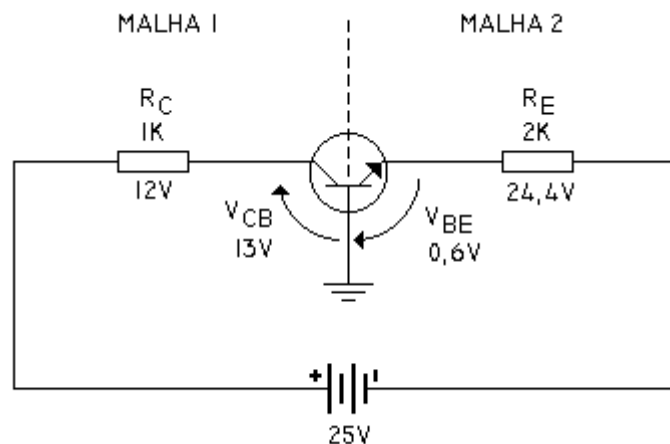
2º ponto:

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

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:



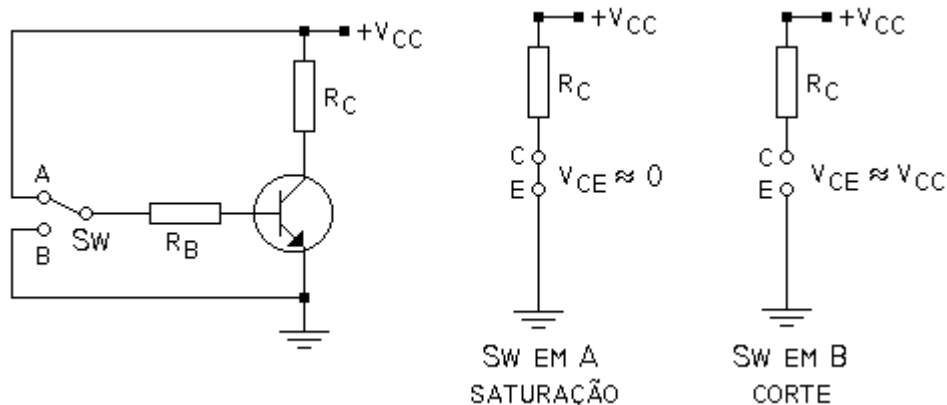
Onde:  $V_{RC} = R_C I_C = 1k\Omega \cdot (12mA) = 12V$

$V_{RE} = R_E I_E = 2k\Omega \cdot (12,2mA) = 24,4V$

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

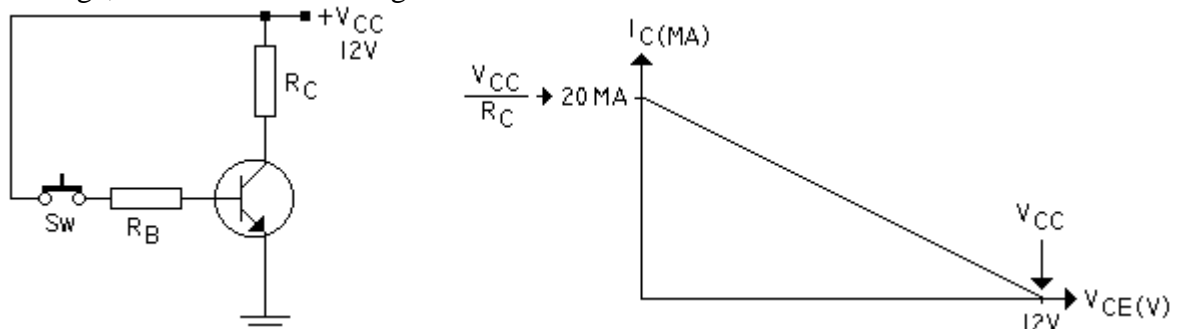
## TRANSISTOR COMO CHAVE ELETRÔNICA:

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,  $\beta$ , 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 20mA 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 20mA plenamente compatível com nosso exemplo de projeto.

Podemos então definir os valores de  $R_C$  e  $R_B$

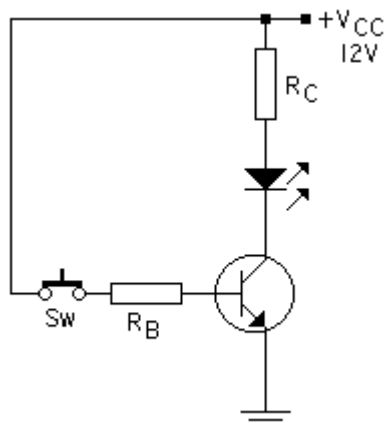
$$R_B = \frac{V_{RB}}{I_B} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 0,7}{2\text{mA}} = \frac{11,3\text{V}}{2\text{mA}} = 5,65\text{k}\Omega$$

$$\text{Considerando } V_{CE} \text{ de saturação} = 0, \text{ teremos: } R_C = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{12\text{V}}{20\text{mA}} = 600\Omega$$

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  $R_C$ .

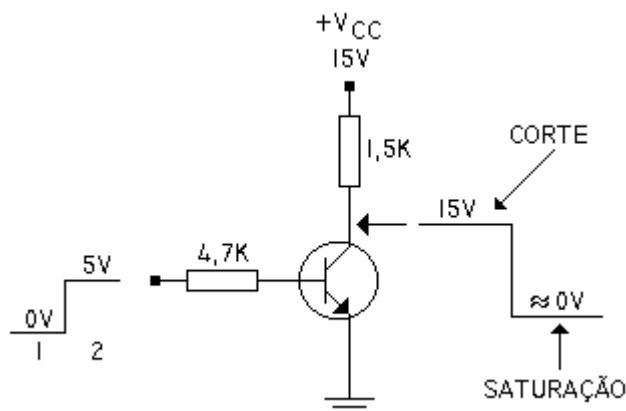


Supondo que a tensão no *led* seja de 1,5V (valor típico), então:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{led}}{I_C} = \frac{12 - 1,5}{20\text{mA}} = \frac{10,5}{20\text{mA}} = 525\Omega$$

*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  $I_C$ .

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

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

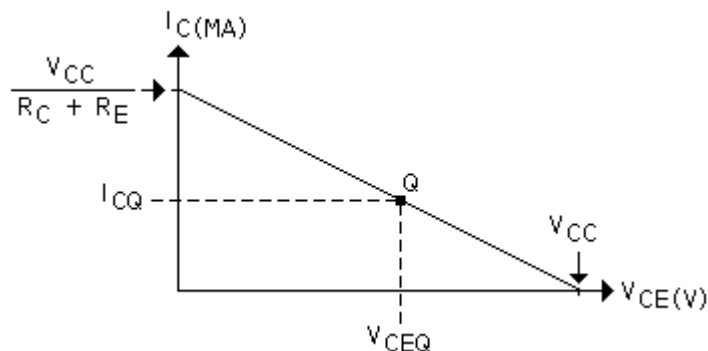
Portanto, a relação é válida ( $10/0,915 = 10,9$ ), garantindo a saturação.

## 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.

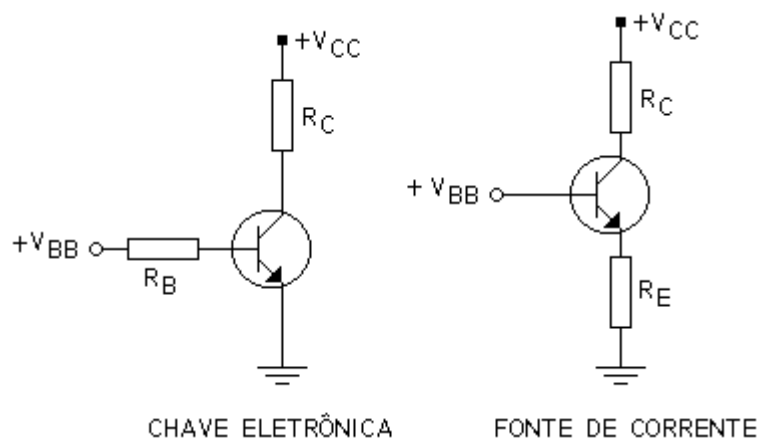
Ao contrário do transistor como chave eletrônica, o ponto de operação situa-se na região ativa ao longo da reta de carga.



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 chave de corrente.

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

Vamos supor:

$V_{BB}$  (tensão de entrada) = +5V

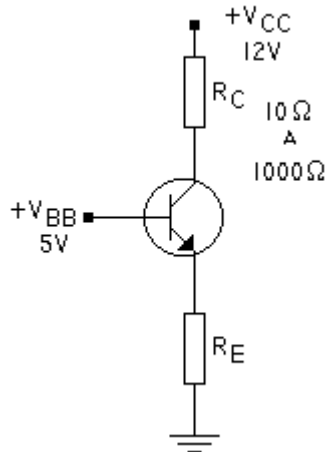
$V_{CC}$  = +12V

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

**Determinar:**

➤ **As tensões em  $R_C$  para os valores de  $10\Omega$  e  $1000\Omega$**

➤ **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  $R_C = 1k\Omega \rightarrow V_{RC} = 1k\Omega \cdot (5mA) = 5V$

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).

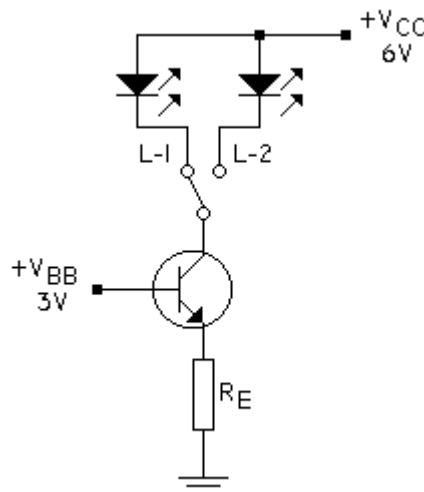
Mesmo com  $R_C = 0$  a corrente de emissor se manterá em 5mA. No entanto, se  $R_C$  assumir valores mais elevados, suponhamos  $4k\Omega$ , teríamos teoricamente  $V_{RC} = 20V$ , o que invalidaria a equação  $V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - V_{RE} = 0$ , em outras palavras, para satisfazer a dita equação,  $I_C$  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  $\beta$ , isto é, ao substituir o transistor por outro de  $\beta$  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  $R_E$ .

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

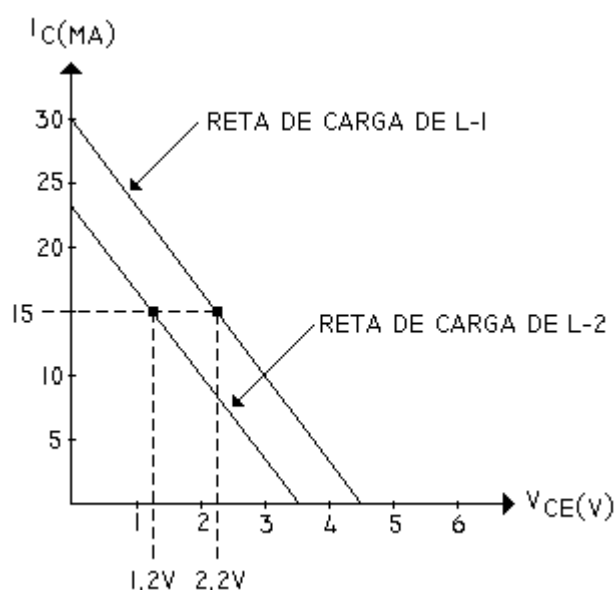
Adotaremos então  $R_E = 150\Omega$

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

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:

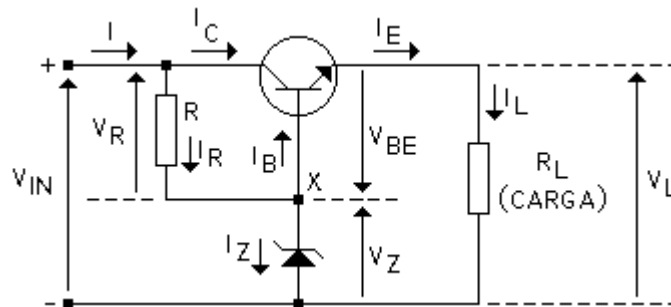
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{led}}{R_E} = \frac{6V - 2,5V}{150\Omega} = 23,3mA$$

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

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  $I_{B(MIN)} = 0$

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

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

➤ **Tensão de entrada mínima:**

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

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

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:

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

$$I_{C(MAX)} \overset{6}{>} I_{L(MAX)} \rightarrow \text{no caso } 1,5A$$

$$P_{C(MAX)} \overset{7}{>} (V_{IN(MAX)} - V_L) \cdot I_{C(MAX)}$$

Supondo que o transistor escolhido seja o BD235, que de acordo com o

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

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

manual do fabricante tem as especificações:

$$\begin{aligned}V_{CBO(MAX)} &= 45V \\ I_{C(MAX)} &= 2A \\ P_{C(MAX)} &= 25W \\ \beta &> 40 < 250\end{aligned}$$

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:

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

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

$$I_{C(MAX)} = \frac{I_{L(MAX)}}{1 + \frac{1}{\beta_{(MIN)}}} = \frac{1,5}{1 + \frac{1}{40}} = \frac{1,5}{1 + 0,025} = \frac{1,5}{1,025} = 1,46A$$

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

*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  $I_{Z(MIN)} = 8mA$ .

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

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

Verificando se o diodo zener escolhido pode ser utilizado:

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

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

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

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

Como  $I_{Z(\text{MAX})}$  teórico = 73,53mA e  $I_{Z(\text{MAX})} = 71,2\text{mA}$  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:  $R_L = \infty \rightarrow I_{B(\text{MIN})} = 0$

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

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

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

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

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:

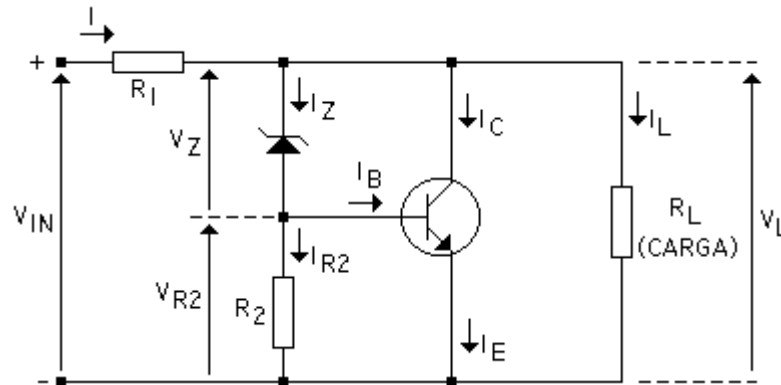
$$P = \frac{E^2}{R} \rightarrow P = \frac{(V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z)^2}{R} = \frac{(13,2\text{V} - 6,8\text{V})^2}{91} = \frac{(6,4\text{V})^2}{91} = 0,45\text{W}$$

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  $R_L = \infty \rightarrow I_L = 0$   
 $V_{IN(MAX)} = R_1 \cdot (I_{L(MAX)} + I_{C(MAX)}) + V_Z + V_{BE}$

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

#### ➤ **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:

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

Isolando  $I_{Z(\text{MAX})}$ :

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

*OBS:  $I_{C(\text{MIN})}$  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  $R_2$ :**

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

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

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

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

Substituindo ( V ) em ( III ), temos:

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

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

**Escolha do transistor:**

Deverão ser observados os parâmetros:

$$\begin{aligned} V_{\text{CEO}}^8 &> (V_Z + V_{\text{BE}}) \\ I_{C(\text{MAX})} &> I_{L(\text{MAX})} \\ P_{C(\text{MAX})} &> (V_Z + V_{\text{BE}}) \cdot I_{C(\text{MAX})} \end{aligned}$$

**Escolha do diodo zener:**

Os parâmetros são idênticos aos adotados no regulador série.

## PROJETO

<sup>8</sup>  $V_{\text{CEO}}$  é a tensão entre coletor e emissor com a base aberta  
TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR I - Prof. Edgar Zuim

Projetar um regulador paralelo , com as seguintes características:

$$\begin{aligned}V_L &= 15V \\I_{L(MAX)} &= 600mA \\V_{IN} &= 22V \pm 10\%\end{aligned}$$

**Escolha do transistor:**

O transistor deverá ter as seguintes características:

$$\begin{aligned}V_{CEO} &> (V_{CE} + V_{VBE}) \\I_{C(MAX)} &> I_{L(MAX)} \\P_{C(MAX)} &> (V_Z + V_{BE}) \cdot I_{C(MAX)}\end{aligned}$$

Adotaremos o transistor 2N3534, que tem as características:

$$\begin{aligned}V_{CEO} &= 35V \\I_{C(MAX)} &= 3A \\P_{C(MAX)} &= 35W \\ \beta &(\text{mínimo} = 40; \text{máximo} = 120)\end{aligned}$$

**Escolha do diodo zener:**

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

$$\begin{aligned}P_{Z(MAX)} &= 1,3W \\I_{Z(MIN)} &= 20mA \\V_Z &= 15V\end{aligned}$$

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

**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  $I_{C(MAX)}$ :**

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



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

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

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

### Calculando $P_{C(MAX)}$ :

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

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

*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 $R_2$ :

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

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

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

### Calculando $R_1$ :

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

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

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

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

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

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

### Potência dissipada por $R_1$ :

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

(adotar  $15\text{W}$  - valor comercial)

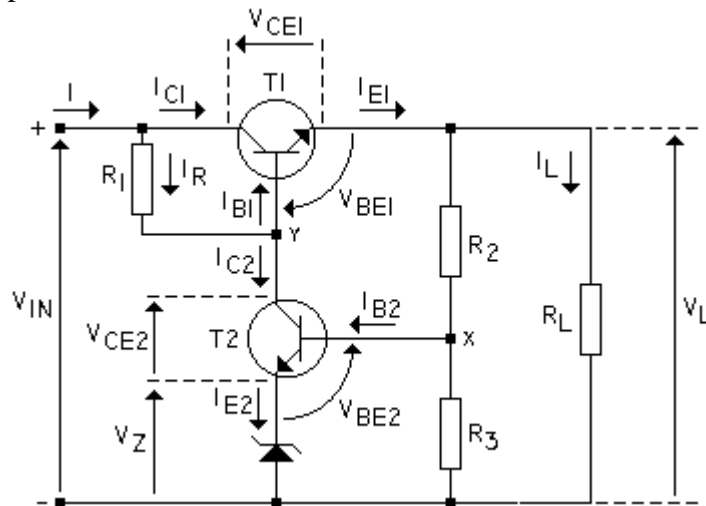
## REGULADOR COM AMPLIFICADOR DE ERRO:

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<sub>1</sub>: 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<sub>2</sub>: é basicamente um comparador de tensão DC, isto é, compara duas tensões, V<sub>R2</sub> e V<sub>R3</sub>, sendo a tensão V<sub>R3</sub> 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<sub>IN</sub> aumente, a tensão nos extremos de R<sub>L</sub> tenderá a aumentar, aumentando a tensão V<sub>R2</sub> e V<sub>R3</sub>, mas, como a tensão no emissor de T<sub>2</sub> é fixada por V<sub>Z</sub>, então um aumento de tensão no ponto "x" provocará um aumento de V<sub>BE2</sub>, que aumentará I<sub>B2</sub> e consequentemente I<sub>C2</sub>.

Quando I<sub>C2</sub> aumenta, haverá um aumento da tensão em R<sub>1</sub> (V<sub>R1</sub>), uma vez que a tensão do emissor de T<sub>2</sub> é fixada pela tensão de zener (V<sub>Z</sub>).

Como V<sub>BE1</sub> é fixa, então um aumento de V<sub>R1</sub> provocará um aumento de V<sub>CE1</sub>.

Lembrar que V<sub>R1</sub> = V<sub>CB1</sub> e que V<sub>CB1</sub> + V<sub>BE1</sub> = V<sub>CE1</sub>.

Um aumento de I<sub>C2</sub> provocará também um discreto aumento na corrente de base de T<sub>1</sub> (I<sub>B1</sub>).

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

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

### 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 R<sub>1</sub>**

$$R_1 > \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{I_{Z(MAX)}} \rightarrow R_1 < \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}}}$$

A potência desenvolvida em R<sub>1</sub> 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 R<sub>2</sub>**

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

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

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

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

$$I_{Z(\text{MIN})} = \frac{V_{IN(\text{MIN})} - V_L - V_{BE1(\text{MAX})}}{R_1(\text{adotado})} - I_{B1(\text{MAX})} \rightarrow I_{B1(\text{MAX})} = \frac{I_{L(\text{MAX})}}{\beta_{1(\text{MIN})}}$$

### Cálculo de potência dissipada em R2

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

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

### 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

$$\text{Em } R_3 \text{ temos: } V_{R3} = V_Z + V_{BE2(\text{MAX})}$$

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

## PROJETO

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

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

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

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

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

### 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  $V_{BE1(MAX)} = 0,7V$

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

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

Portanto, o diodo escolhido poderá ser usado.

### Escolha de $T_2$ :

O transistor  $T_2$  deverá ter as seguintes características:

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

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

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

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

Para o transistor  $T_2$  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:

$$\begin{aligned} V_{CEO} &= 45\text{V} \\ I_{C(\text{MAX})} &= 1\text{A} \\ P_{C(\text{MAX})} &= 8\text{W} \\ \beta_{(\text{MIN})} &= 40 \rightarrow \beta_{(\text{MAX})} = 250 \end{aligned}$$

### Cálculo de R<sub>1</sub>:

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

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

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

Calculando a potência desenvolvida em R<sub>1</sub>:

$$P_{R1} = \frac{[(V_{IN(\text{MAX})} - (V_L + V_{BE1(\text{MIN})}))]^2}{R_1 (\text{adotado})} = \frac{(27,5\text{V} - 12,6\text{V})^2}{100\Omega} = \frac{(14,9\text{V})^2}{100\Omega} = 2,22\text{W}$$

(adotar 5W)

### Cálculo de R<sub>2</sub>:

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

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

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

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

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

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

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

Calculando a potência desenvolvida em R<sub>2</sub>:

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

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

### Cálculo de R<sub>3</sub>:

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

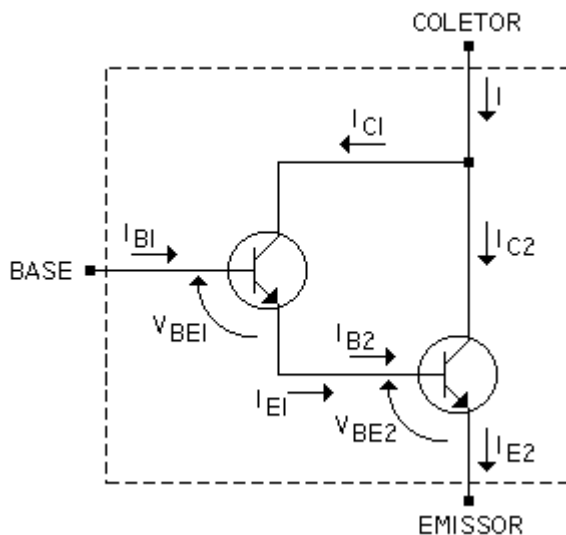
onde:  $V_{R3} = V_Z + V_{BE2(MIN)}$

Calculando a potência desenvolvida em R<sub>3</sub>:

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

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

## 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 ( $\beta_T$ ) 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 *npn* e *npn* 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:

$$\begin{aligned} \text{Tensão de saída (V}_L\text{): } & 6\text{V} \\ \text{Corrente de saída máxima (I}_{L(\text{MAX})}\text{): } & 1,5\text{A} \\ \text{Tensão de entrada (V}_{\text{IN}}\text{): } & 12\text{V} \pm 10\% \end{aligned}$$

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

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

Neste caso,  $V_{\text{BE}}$  é maior. Vamos considerar para este projeto,  $V_{\text{BE}} = 1,4\text{V}$ . Desta forma, o diodo zener deverá ter uma tensão:  $6\text{V} + 1,4\text{V} = 7,4\text{V}$ .

O valor comercial mais próximo é de  $7,5\text{V}$ .

O diodo zener escolhido foi o BZX75C7V5, cujas características são:

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

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

### Verificando a escolha do transistor:

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

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

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

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

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

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

*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:

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

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

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

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

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 106,88Ω e menor do que 253,96Ω. 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 $\Omega$                  | 180 $\Omega$                      |
| $P_{R1}$             | 508mW                        | 180,5mW                           |
| $I_{C(MAX)}$         | 1,46A                        | 1,497A                            |
| $P_{C(MAX)}$         | 10,5W                        | 10,78W                            |
| $I_{Z(MAX)}$ teórico | 73,53mA                      | 53,33mA                           |
| $I_{Z(MAX)}$ prático | 71,2mA                       | 22,44mA                           |
| $V_Z$                | 6,8V                         | 7,5V                              |
| $I_{B(MAX)}$         | 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.

## BIBLIOGRAFIA:

- Malvino, Albert Paul** - ELETRÔNICA - vols. 1 e 2 - Ed. McGraw-Hill SP - 1.986  
**Malvino, Albert Paul** - ELETRÔNICA NO LABORATÓRIO - Ed. McGraw-Hill SP - 1.987  
**Boylestad, Robert - Nashelsky, Louis** - DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS - Ed. Prentice/Hall Brasil - RJ - 1.993  
**Volnei A. Pedroni** - CIRCUITOS ELETRÔNICOS - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. - RJ - 1.982  
**Schilling, Donald L. - Belove, Charles** - ELECTRONIC CIRCUITS - McGraw-Hill International Editions - Singapore  
**Horenstein, Mark N.** - MICROELETRÔNICA CIRCUITOS E DISPOSITIVOS - Ed. Prentice/Hall - RJ - 1.996  
**Grob, Bernard** - BASIC ELECTRONICS - McGraw-Hill Kogakusha - Tokyo - 1.990  
**Ibrap** - MANUAL DE TRANSISTORES - DADOS PARA PROJETOS - 1.990