

## Capítulo 4 – Transistores de Junção Bipolar – TJB

Ao longo do nosso atual curso de eletrônica, foram estudados já alguns componentes semicondutores de extrema importância, componentes estes que foram o diodo e o diodo Zener. Além disso, foram estudados também os circuitos utilizando esses componentes, onde podemos estudar, de uma forma simplificada ainda é claro, o funcionamento de um alternador de um carro. Foi estudado também o circuito retificador de meia onda e onda completa, fonte de tensão regulada e diferentes formas de polarização do transistor TJB. Agora, vamos começar a estudar um novo componente eletrônico no nosso curso de Eletrônica, que é o transistor bipolar de junção – TJB.

### 4.1 – O Transistor de Junção Bipolar – TJB

As características principais referentes ao ponto de operação do mesmo, ou seja, quais são as limitações do transistor, que podem ser retiradas diretamente do manual do mesmo, fornecido pelo fabricante, conhecido como *Datasheet*. Caso o aluno deseje mais informações sobre as características de construção do TJB, indica-se a leitura do Capítulo 3 do livro texto da disciplina “*Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – Robert L. Boylestad*”. Os dados mais importantes para a utilização do transistor são os listados a seguir:

- ✓ Potência de Coletor Máxima:  $P_{C_{MÁX}}$ , [W]
- ✓ Tensão entre Coletor e Emissor Máxima:  $V_{CE_{MÁX}}$  (NPN) ou  $V_{EC_{MÁX}}$  (PNP), [V]
- ✓ Tensão entre Coletor e Emissor de Saturação:  $V_{CE_{SAT}}$  (NPN) ou  $V_{EC_{SAT}}$  (PNP), [V]
- ✓ Corrente de Coletor Máxima:  $I_{C_{MÁX}}$ , [A]
- ✓ Ganho de Corrente –  $\beta$  ou  $h_{FE}$

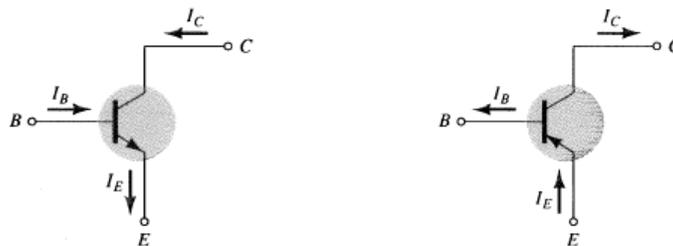


Figura 4.1 – Transistor NPN e PNP, respectivamente

Tão importantes quanto os dados retirados do *datasheet*, são as relações matemáticas comuns aos transistores *PNP* ou *NPN*, apresentadas a seguir:

- ✓ Tensão entre base e emissor:  $V_{BE} \approx 0,7$  Volts
- ✓ Corrente de Coletor  $\approx$  Corrente de Emissor ( $I_C \approx I_E$ )
- ✓ Corrente de Coletor =  $\beta$  x Corrente de Base ( $I_C = \beta \times I_B$ )
- ✓ Potência de Coletor Máxima ( $P_{C_{MÁX}}$ ) =  $V_{CE} \times I_C$

Outro ponto muito importante para o estudo e para a correta utilização do transistor TJB é a chamada curva característica do componente (Figura 4.2), onde são apresentados os seus limites de operação. A partir dessa curva, pode-se realizar a polarização direta do transistor, conhecendo dados como corrente de coletor e tensão de alimentação, como veremos mais a diante durante o nosso curso. Analisando a Figura 4.2, podemos concluir que:

- ✓ A corrente de coletor máxima do componente ( $I_{C_{MÁX}}$ ) é de 50 mA
- ✓ A tensão entre coletor e emissor máxima ( $V_{CE_{MÁX}}$ ) é de 20 Volts
- ✓ A tensão entre coletor e emissor de saturação ( $V_{CE_{SAT}}$ ) é de 0,3 Volts
- ✓ A potência de coletor máxima ( $P_{C_{MÁX}}$ ) é de 300 mW

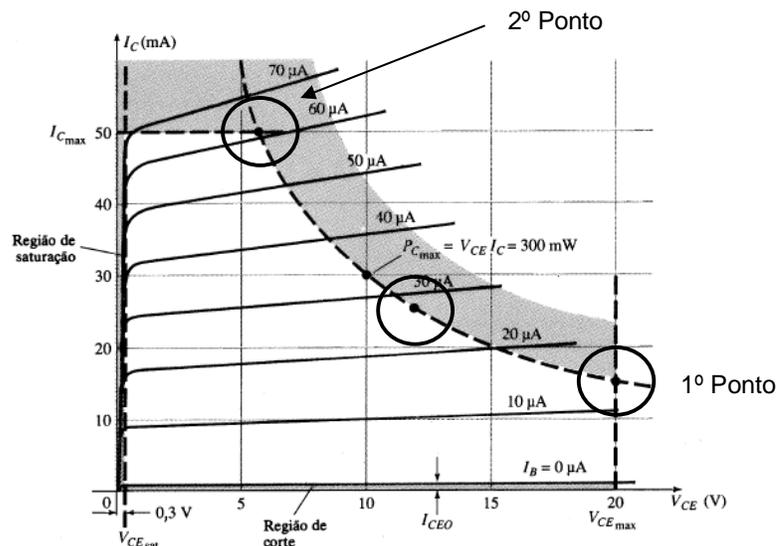


Figura 4.2 – Curva Característica do Transistor TJB

Para uma operação segura do componente, podemos polarizar o mesmo em qualquer ponto de operação, desde que esse ponto esteja dentro da área delimitada pelos valores máximos, ou seja, dentro da área branca delimitada pelos extremos cinza.

Caso o fabricante não forneça o gráfico de curva característica do componente, é possível traçar esse gráfico de uma forma bastante simples, apenas conhecendo os limites de operação do transistor. Com os limites de operação em mãos, os pontos 1 e 2 ficam definidos de forma direta, ou seja:

$$P_{C_{MÁX}} = V_{CE} * I_C \rightarrow 300mW = V_{CE} * 50mA \therefore V_{CE} \cong 6V \text{ (1º Ponto)}$$

$$P_{C_{MÁX}} = V_{CE} * I_C \rightarrow 300mW = 20V * I_C \therefore I_C \cong 6A \text{ (2º Ponto)}$$

Com esses dois pontos definidos, basta que sejam adotados valores intermediários de tensão  $V_{CE}$  compreendidos entre  $0,3 \text{ Volts} \leq V_{CE} \leq 20 \text{ Volts}$  e dessa forma, encontrar os valores de  $I_C$  correspondentes, a partir do valor de potência de coletor máxima igual a 300 mW.

Ou também é possível que sejam adotados valores intermediários de corrente, compreendidos entre  $0mA \leq I_C \leq 50mA$  e dessa forma, encontrar os valores de  $V_{CE}$  correspondentes, a partir da potência de coletor máxima igual a 300 mW.

## 1.2 – A polarização do Transistor de Junção Bipolar – TJB

A partir de agora, com os limites de operação definidos, e as relações básicas conhecidas do transistor TJB, vamos lembrar e estudar as três configurações para polarização DC mais utilizadas com o transistor TJB, e que posteriormente iremos utilizá-las para o estudo de amplificadores de pequenos sinais. Vale lembrar que o intuito desse capítulo é apenas dar ao aluno uma breve revisão de um assunto já estudado no semestre anterior. Caso o aluno desejar realizar um estudo mais aprofundado, indica-se a leitura do capítulo 4 do livro texto da disciplina “*Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – Robert L. Boylestad*”.

### 1.2.1 – Polarização Fixa:

Para o estudo dessa polarização e das demais que iremos lembrar nesse capítulo, estudaremos basicamente para o equacionamento do circuito, duas malhas: a malha compreendida pelo emissor e coletor do transistor e a malha compreendida pela base e pelo emissor do transistor. Dessa forma, duas equações serão determinadas, usando as leis de *Kirchoff* estudadas no primeiro semestre do curso, na disciplina de Eletricidade Básica.

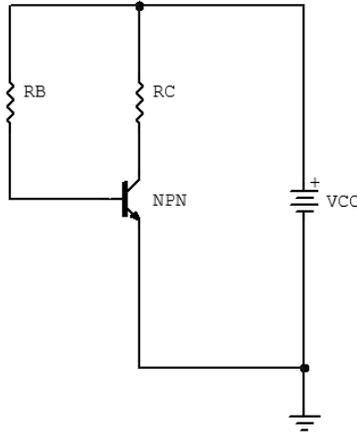
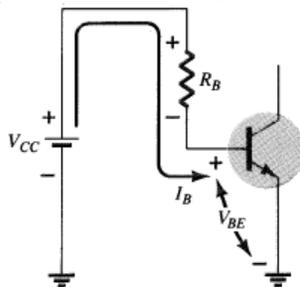


Figura 4.3 – Circuito Básico de Polarização DC TJB – Polarização Fixa

**Equacionamento:**

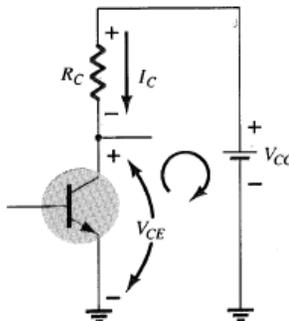
✓ Malha BASE – EMISSOR:



$$V_{CC} = V_{R_B} + V_{BE} \rightarrow V_{R_B} = V_{CC} - V_{BE} \rightarrow$$

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

✓ Malha COLETOR – EMISSOR:



$$V_{CC} = V_{R_C} + V_{CE} \rightarrow V_{R_C} = V_{CC} - V_{CE} \rightarrow$$

$$\rightarrow R_C * I_C = V_{CC} - V_{CE} \rightarrow \therefore I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

Uma vez equacionado o circuito, por onde devemos começar a escolher os valores das variáveis das equações? A resposta para essa pergunta torna-se fácil de ser respondida quando recorremos à ajuda dos limites de operação do transistor. Observe a Figura 4.4 a seguir, onde é apresentada novamente a curva característica do transistor TJB e uma reta traçada dentro dessa área útil, chamada de reta de carga.

Os limites de operação do transistor são os extremos da reta de carga, a partir da equação obtida através da análise da malha COLETOR - EMISSOR, podemos obter o valor da corrente de coletor máxima quando tornamos o valor de  $V_{CE}$  igual a zero na equação. Da mesma forma, o valor de  $V_{CE}$  fica determinado quando tornamos o valor de  $I_C$  igual a zero na equação, como mostra o equacionamento a seguir:

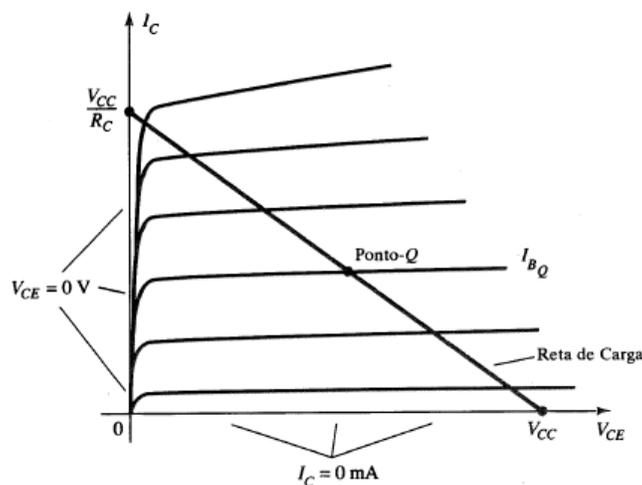


Figura 4.4 – Curva característica do Transistor com a Reta de Carga Traçada

$$V_{CE} = 0 \therefore I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

$$I_C = 0 \therefore V_{CE} = V_{CC}$$

Sendo assim, para que possamos iniciar a polarização do circuito, e determinar algumas incógnitas nas equações das malhas analisadas, basta que, a partir dos dados máximos fornecido pelo fabricante do componente através do seu respectivo *datasheet*, sejam adotados os seguintes valores para  $V_{CC}$  e  $I_C$ :

$$V_{CC} \leq V_{CE_{MÁX}} \text{ e } I_C \leq I_{C_{MÁX}}$$

Uma vez determinado os valores de  $V_{CC}$  e de  $I_C$ , substituindo esses valores nas equações determinadas através da análise das malhas, determina-se as demais variáveis e os valores das resistências  $R_B$  e  $R_C$  necessárias para colocar o circuito em funcionamento.

**Observação Importante:** Perceba que, aumentando ou diminuindo o valor de  $R_C$  a inclinação da reta de carga é alterada, desde que o valor de  $V_{CC}$  seja mantido constante. Da mesma forma, mantendo-se o valor de  $R_C$  constante, e alterando-se o valor de  $V_{CC}$  surgem retas paralelas a reta de carga originalmente encontrada. Essa observação será muito importante quando iniciarmos o estudo de amplificadores de pequenos sinais.

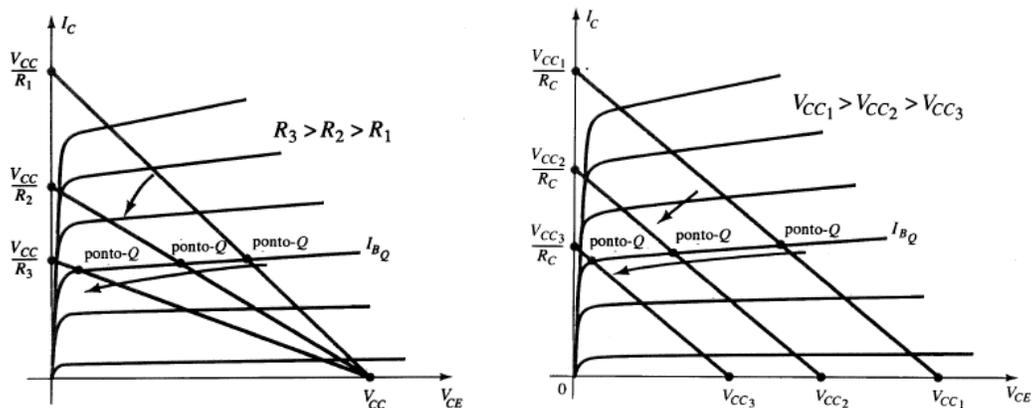


Figura 4.5 – Variações das Retas de Carga em função da variação de  $V_{CC}$  e  $R_C$

### Exemplo 1:

Vamos utilizar os dados do transistor apresentado na Figura 4.2 pela sua curva característica, e dessa forma, escolher valores adequados para  $V_{CC}$  e  $I_C$ :

Dados do Transistor:

- ✓  $I_{C_{MÁX}} = 50 \text{ mA}$
- ✓  $V_{CE_{MÁX}} = 20 \text{ Volts}$
- ✓  $V_{CE_{SAT}} = 0,3 \text{ Volts}$
- ✓  $P_{C_{MÁX}} = 300 \text{ mW}$
- ✓  $\beta = 200$

Escolha dos pontos da reta de carga (aleatório):

- ✓  $I_C = 35\text{mA}$
- ✓  $V_{CC} = 15\text{ Volts}$

Equacionamento do circuito:

$$V_{CC} = V_{RB} + V_{BE} \rightarrow V_{RB} = 15 - 0.7 \rightarrow R_B * I_B = 15 - 0.7$$

$$I_C = 35\text{mA} \rightarrow I_B = \frac{35 \times 10^{-3}}{200} \therefore \boxed{I_B \cong 175 \mu\text{A}}$$

$$R_B * 175 \times 10^{-6} = 15 - 0.7 \therefore \boxed{R_B \cong 82\text{k}\Omega}$$

Adotando  $V_{CE} \approx 50\% V_{CC}$ , chega-se ao valor desejado de  $R_C$ :

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} \rightarrow V_{RC} = 15 - (0.5 * 15) \rightarrow R_C * 35 \times 10^{-3} = 15 - (0.5 * 15)$$
$$\therefore \boxed{R_C \cong 210\Omega}$$

Apenas para verificação, vamos calcular o valor da potência de coletor do circuito:

$$P_{COLETOR} = V_{CE} * I_C \rightarrow P_{COLETOR} = 7.5 * 35 \times 10^{-3}$$
$$P_{COLETOR} = 260\text{mW} \leq 300\text{mW} \therefore \text{OK !!!!!}$$

Simulando os valores encontrados no software *Circuit Maker*, encontramos os valores de  $I_C$  e de  $I_B$  aproximadamente iguais aos valores teóricos calculados. Os valores obtidos são apresentados na Figura 4.6 a seguir.

**Exercícios Extras:** Desenvolver os exercícios propostos pelo livro texto, capítulo 4, item 4.3, exercícios de 1 a 5.

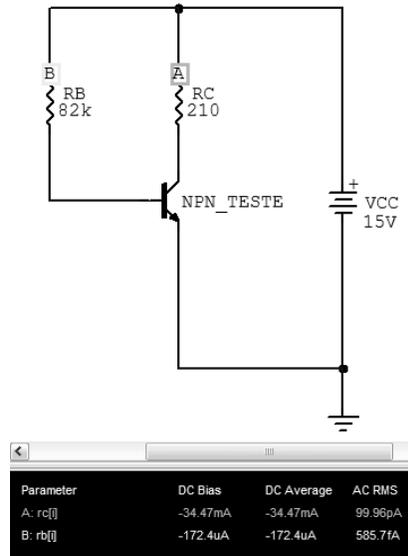


Figura 4.6 – Simulação do Circuito por Polarização Fixa

### 1.2.2 – Polarização por Circuito Estável de Emissor:

O circuito por polarização estável de emissor contém um resistor de emissor para melhorar o nível de estabilidade da polarização apresentada pela configuração anterior. A melhoria será demonstrada mais adiante com um exemplo numérico, comparando as duas polarizações usando o mesmo transistor, através de uma variação no seu valor de ganho de corrente beta ( $\beta$ ), fato muito comum no dia a dia, onde o circuito é projetado para um determinado valor de beta, e, por algum motivo, é necessário realizar a troca do transistor. Mesmo trocando o transistor por outro, de mesmo código, mesmo fabricante, etc, vai existir uma variação no valor de beta, e conseqüentemente, existirá uma variação do ponto de polarização do circuito. A solução definitiva para esse problema é solucionada pelo terceiro tipo de polarização, que estudaremos mais a diante.

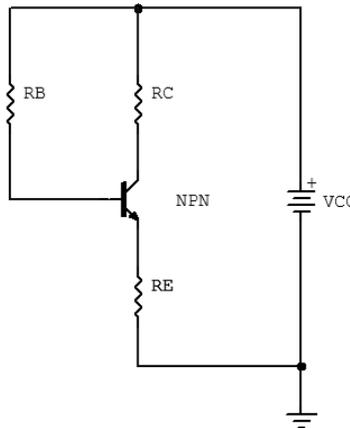
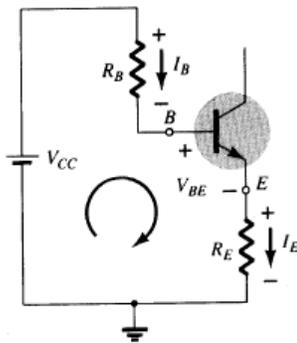


Figura 4.7 – Polarização por Circuito Estável de Emissor

**Equacionamento:**

✓ Malha BASE – EMISSOR:



$$V_{CC} = V_{R_B} + V_{BE} + V_{R_E} \rightarrow V_{R_B} + V_{R_E} = V_{CC} - V_{BE}$$

$$(R_B * I_B) + (R_E * I_E) = V_{CC} - V_{BE}$$

Chegamos a uma relação onde temos duas variáveis, que são o nosso objetivo de estudo, que são as correntes  $I_B$  e  $I_E$ . Para solucionarmos essa equação, basta lembrarmos que a corrente de emissor  $I_E$  é a soma da corrente de coletor  $I_C$  com a corrente de base  $I_B$ , resultando na seguinte análise:

$$I_E = I_C + I_B \rightarrow I_C = \beta * I_B$$

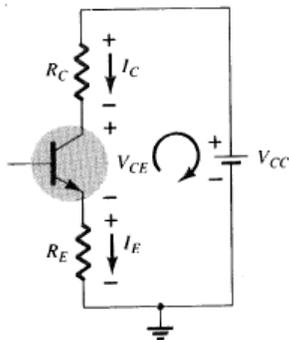
$$I_E = (\beta * I_B) + I_B \therefore I_E = (\beta + 1) * I_B$$

Substituindo a relação determinada acima na equação obtida através da análise da malha BASE EMISSOR, temos:

$$(R_B * I_B) + (R_E * I_E) = V_{CC} - V_{BE} \rightarrow (R_B * I_B) + (R_E * [(\beta + 1) * I_B])$$

$$\therefore I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (R_E * (\beta + 1))}$$

✓ Malha COLETOR – EMISSOR:



$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE} \rightarrow V_{CC} = (R_C * I_C) + V_{CE} + (R_E * I_E)$$

$$I_C \cong I_E \therefore$$

$$V_{CC} = (R_C * I_C) + V_{CE} + (R_E * I_C) \rightarrow V_{CC} = I_C (R_C + R_E) + V_{CE}$$

$$\therefore I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$$

Uma vez equacionado o circuito apresentado pela Figura 4.7 devemos seguir as mesmas orientações para a escolha dos componentes e dos valores dos extremos da reta de carga apresentados na polarização por polarização fixa.

### Exemplo 2:

Vamos utilizar os mesmos dados do transistor utilizado no Exemplo 1, apresentado na Figura 4.2 pela sua curva característica, escolhendo outros valores adequados para  $V_{CC}$  e  $I_C$ :

Dados do Transistor:

- ✓  $I_{C_{MÁX}} = 50 \text{ mA}$
- ✓  $V_{ce_{MÁX}} = 20 \text{ Volts}$
- ✓  $V_{ce_{SAT}} = 0,3 \text{ Volts}$
- ✓  $P_{C_{MÁX}} = 300 \text{ mW}$
- ✓  $\beta = 200$

Escolha dos pontos da reta de carga (aleatório):

- ✓  $I_C = 25\text{mA}$
- ✓  $V_{CC} = 18\text{ Volts}$

Equacionamento do circuito:

$$V_{CC} = V_{RB} + V_{BE} + V_{RE} \rightarrow V_{RB} + V_{RE} = 18 - 0.7$$

$$(R_B * I_B) + (R_E * I_E) = 18 - 0.7 \rightarrow (R_B + [(\beta + 1) * R_E]) * I_B = 17.3$$

$$I_C = 25\text{mA} \rightarrow I_B = \frac{25 \times 10^{-3}}{200} \therefore \boxed{I_B \cong 125 \mu\text{A}}$$

$$\therefore \boxed{(R_B + [(201) * R_E]) * 125 \times 10^{-6} = 17.3}$$

Como podemos perceber, chegamos a uma equação com duas incógnitas. Da mesma forma que no circuito anterior, onde adotamos  $V_{CE} \approx 50\% V_{CC}$  para ser possível a determinação do valor desejado de  $R_C$ , na polarização por circuito estável, será adotada uma relação prática para as tensões dos resistores, determinando assim os valores dos componentes:  $V_{CE} \approx 50\% V_{CC}$ ;  $V_{RC} \approx 40\% V_{CC}$ ;  $V_{RE} \approx 10\% V_{CC}$ .

$$V_{RE} \cong 0.1 * V_{CC} \rightarrow V_{RE} \cong 0.1 * 18 \therefore V_{RE} \cong 1.8 \text{ Volts}$$

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} \rightarrow I_E \cong I_C \rightarrow R_E = \frac{1.8}{25 \times 10^{-3}}$$

$$\therefore \boxed{R_E = 72 \Omega}$$

Com o valor determinado de  $R_E$  torna-se fácil encontrar o valor de  $R_B$ :

$$(R_B + [(\beta + 1) * R_E]) * 125 \times 10^{-6} = 17.3 \rightarrow (R_B + [(201) * 72]) * 125 \times 10^{-6} = 17.3$$

$$125 \times 10^{-6} * R_B = 17.3 - 1.8$$

$$\therefore \boxed{R_B \cong 125 \text{ k}\Omega}$$

Vamos agora determinar o valor de  $R_C$  através da equação da malha COLETOR – EMISSOR:

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE} \rightarrow V_{CC} = (R_C * I_C) + V_{CE} + (R_E * I_C)$$

$$I_C \cong I_E \therefore 18 = (R_C * 25 \times 10^{-3}) + (18 * 0.5) + (72 * 25 \times 10^{-3})$$

$$R_C = \frac{18 - 9 - 1.8}{25 \times 10^{-3}} \therefore \boxed{R_C \cong 290 \Omega}$$

Apenas para verificação, vamos calcular o valor da potência de coletor do circuito:

$$P_{COLETOR} = V_{CE} * I_C \rightarrow P_{COLETOR} = 9 * 25 \times 10^{-3}$$

$$P_{COLETOR} = 225 \text{mW} \leq 300 \text{mW} \therefore \text{OK !!!!!}$$

Simulando os valores encontrados no software *Circuit Maker*, encontramos os valores de  $I_C$  e de  $I_B$  aproximadamente iguais aos valores teóricos calculados. Perceba também que a aproximação usada durante os cálculos, de que o valor da corrente  $I_E$  é aproximadamente igual ao valor da corrente  $I_C$  também é válida. Os valores obtidos são apresentados na Figura 4.8 a seguir.

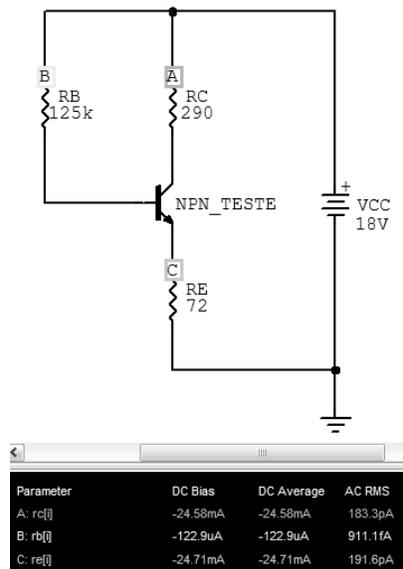


Figura 4.8 – Simulação do Circuito por Polarização Estável de Emissor

**Exercícios Extras:** Desenvolver os exercícios propostos pelo livro texto, capítulo 4, item 4.4, exercícios de 6 a 8.

### 1.2.3 – Melhoria na Estabilidade (Polarização Fixa x Polarização Estável)

Vamos realizar um estudo de um problema já previamente comentado, onde em um circuito em que um transistor TJB esteja corretamente polarizado, acaba ocorrendo uma necessidade da troca do componente por outro que possui um valor de  $\beta$  diferente do transistor original. O transistor a ser utilizado será o mesmo que usamos nos Exemplos 1 e 2, bem como os valores das resistências encontrados para a polarização dos circuitos. A mudança que iremos fazer é a alteração do valor de  $\beta$ , que originalmente é igual a 200 para um valor de 290 e analisar os valores de tensão e corrente de polarização em cada um dos circuitos. Os resultados são apresentados pelas Tabelas 4.1 e 4.2 a seguir:

Tabela 4.1 – Variação do  $\beta$  para o Circuito de Polarização Fixa

$\beta$	$I_B$ ( $\mu A$ )	$I_C$ (mA)	$V_{CE}$ (Volts)
200	175	35	7.5
290	175	50	4.5

Tabela 4.2 – Variação do  $\beta$  para o Circuito de Polarização Estável de Emissor

$\beta$	$I_B$ ( $\mu A$ )	$I_C$ (mA)	$V_{CE}$ (Volts)
200	125	25	9
290	117	34	5.6

A conclusão em que se chega é que, o segundo circuito de polarização consegue conter de uma forma mais eficiente o aumento da corrente  $I_C$  provocado pela modificação do valor de  $\beta$ , mantendo-se as características originais de projeto do circuito, ou seja, os mesmos valores de resistores e de tensão de alimentação.

#### 1.2.4 – Polarização por Divisor de Tensão de Base:

Até o presente momento, temos condições de colocar em operação o transistor TJB usando duas formas diferentes de polarização. Porém, em ambas as polarizações estudadas, um problema ocorre quando temos uma variação do valor de  $\beta$ , causando uma mudança do seu ponto de operação originalmente projetado. Esse fato poderá ser visto nas aulas de laboratório, onde os valores dos resistores do circuito de polarização por polarização estável foram projetados usando um valor de  $\beta$  que não necessariamente é o mesmo valor que temos nas placas didáticas do laboratório.

Para minimizar esse efeito, apresentamos o circuito que será o mais utilizado para as aplicações do transistor TJB como amplificador de pequenos sinais, que é a configuração de polarização por divisor de tensão de base. A grande “sacada” desse tipo de polarização é “fazer” com que a corrente de coletor passe a ser “comandada” pela corrente de emissor, e não pela corrente de base como nas polarizações anteriores.

Para isso, é necessário que a tensão  $V_{RE}$  juntamente com a sua resistência, funcione como uma fonte de corrente constante. O estudo de fonte de corrente será feito com mais detalhes futuramente ao longo do nosso curso, e por enquanto, basta que se tenha em mente, que uma fonte de corrente constante é formada por uma fonte de tensão em série com uma resistência.

#### Equacionamento:

Vamos adotar o equacionamento através de uma análise aproximada do circuito apresentado na Figura 4.9, onde através de algumas simplificações, será mais fácil a determinação das grandezas desejadas, que são os valores dos resistores para que o circuito opere da forma que se deseja.

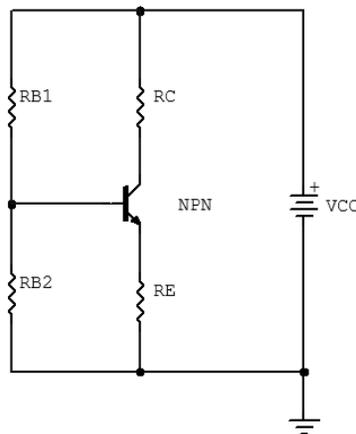


Figura 4.9 – Polarização por Divisor de Tensão de Base

A análise exata e o equacionamento através dessa análise ficarão como uma leitura complementar para o aluno realizar no livro texto adotado na disciplina.

A seção de entrada do circuito acima pode ser representada pelo circuito apresentado pela Figura 4.10 a seguir. A resistência  $R_i$  é a resistência equivalente vista da base para a terra, para o transistor com um resistor de emissor  $R_E$ , onde o valor de  $R_i$  é igual a  $(\beta+1)*R_E$ .

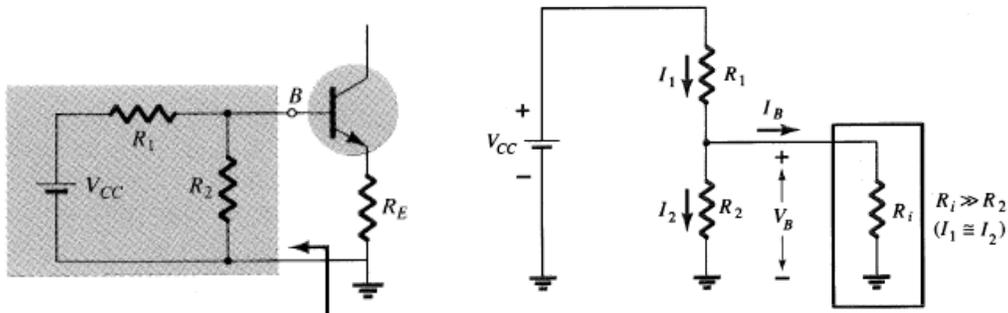


Figura 4.10 – Circuito para a Análise Aproximada da Polarização por Divisor de Tensão de Base

Ora, analisando o circuito acima, percebemos que a tensão  $V_B$  é a tensão formada pela tensão  $V_{RE}$  mais a tensão  $V_{BE}$ . Lembrando da análise de resistências em paralelo, e tomando como premissa que essa polarização visa a independência sobre o valor de beta, e conseqüentemente da obtenção da corrente de coletor através da corrente de base, basta que seja adotado um valor de  $R_i$  suficientemente alto, de tal forma que a corrente  $I_B$  que deveria circular sobre  $R_i$  tem que ser o menor valor possível, o que é razoável de ser dito. Geralmente, considera-se um valor suficientemente alto, quando temos uma relação de pelo menos igual a 10, ou seja:

$$(\beta + 1) * R_E \geq 10 * R_2$$

Como consideramos que a corrente de base é desprezível, temos que os resistores  $R_1$  e  $R_2$ , que são respectivamente,  $R_{B1}$  e  $R_{B2}$ , são elementos em série, e a tensão de base  $V_B$  pode ser determinada através de uma relação de divisor de tensão simples (daí o nome da polarização):

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

Como a corrente de base passa a ser desprezível, temos que a corrente de coletor passa ser aproximadamente igual à de coletor, e dessa forma, podemos escrever as seguintes relações:

$$I_B \cong 0 \rightarrow I_{C_Q} \cong I_E$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

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

$$V_{CE_Q} = V_{CC} - I_{C_Q} (R_C + R_E)$$

**Exemplo 3:**

Vamos utilizar o transistor BC 547C, que será o mesmo transistor que iremos utilizar nas experiências de laboratório.

Dados do Transistor:

- ✓  $I_{C_{MÁX}} = 100 \text{ mA}$
- ✓  $V_{CE_{MÁX}} = 45 \text{ Volts}$
- ✓  $V_{CE_{SAT}} = 0,7 \text{ Volts}$
- ✓  $P_{C_{MÁX}} = 625 \text{ mW}$
- ✓  $\beta = 300$

Escolha dos pontos da reta de carga (aleatório):

- ✓  $I_{C_q} = 12 \text{ mA}$
- ✓  $V_{CC} = 18 \text{ Volts}$

Equacionamento do circuito:

Para darmos início ao dimensionamento dos resistores, vamos adotar valores para a Resistência  $R_E$  e para a tensão  $V_{CE}$ :

- ✓  $R_E = 680\Omega$  e  $V_{CE} = 9 \text{ Volts}$

Com o valor de  $R_E$  e sabendo que, a corrente de coletor é aproximadamente igual a de emissor, podemos determinar a tensão  $V_E$ , e conseqüentemente os valores de  $V_B$ ,  $R_{B2}$ ,  $R_{B1}$  e  $R_C$ :

$$V_{RE} \cong R_E * I_{C_Q} \rightarrow V_{RE} \cong 680 * 12x10^{-3} \therefore V_{RE} \cong 8.2 \text{ Volts}$$

$$(\beta + 1) * R_E \geq 10 * R_{B2} \rightarrow (300 + 1) * 680 \geq 10 * R_{B2}$$

$$20.5x10^3 \geq R_{B2} \rightarrow \text{Adotando } \boxed{R_{B2} = 10k\Omega}$$

$$V_B = V_{RE} + V_{BE} \rightarrow V_B = 8.2 + 0.7 \therefore \boxed{V_B = 8.9V}$$

$$V_B = \frac{V_{CC} * R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \rightarrow 8.9 = \frac{18 * 10x10^3}{R_{B1} + 10x10^3} \therefore \boxed{R_{B1} \cong 10k\Omega}$$

$$V_{CE_Q} = V_{CC} - I_{C_Q} (R_C + R_E) \rightarrow 9 = 18 - 12x10^{-3} * (R_C + 680)$$

$$9 - 18 + 12x10^{-3} * 680 = -12x10^{-3} * R_C \therefore \boxed{R_C \cong 70\Omega}$$

Simulando os valores encontrados no software *Circuit Maker*, encontramos os valores de  $I_C$  e de  $I_E$  aproximadamente iguais, porém com valores iguais a metade do tornando-se válida a aproximação realizada durante o equacionamento. Os valores obtidos são apresentados na Figura 4.11 a seguir.

Observando a simulação, verifica-se que a corrente de coletor resultou em um valor aproximadamente igual a corrente de emissor, e o valor da corrente de base é praticamente desprezível, satisfazendo as premissas iniciais desse tipo de polarização.

Para verificar se realmente a polarização por divisor de tensão de base torna-se praticamente imune as variações de beta, a Figura 4.12 mostra o mesmo transistor com um valor de beta diferente (400) do da Figura 4.11, que era igual a aproximadamente 670.

**Exercícios Extras:** Desenvolver os exercícios propostos pelo livro texto, capítulo 4, item 4.5, exercícios de 12 a 14.

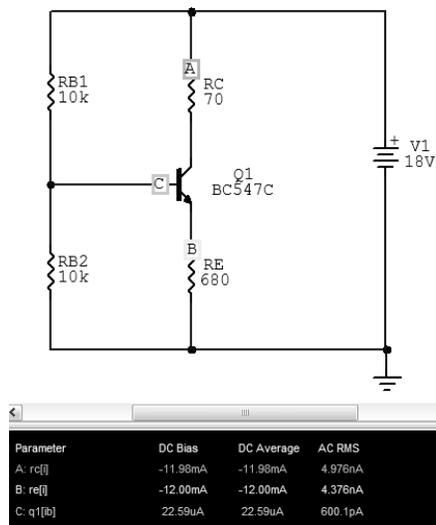


Figura 4.11 – Polarização por Divisor de Tensão de Base, beta igual a 670

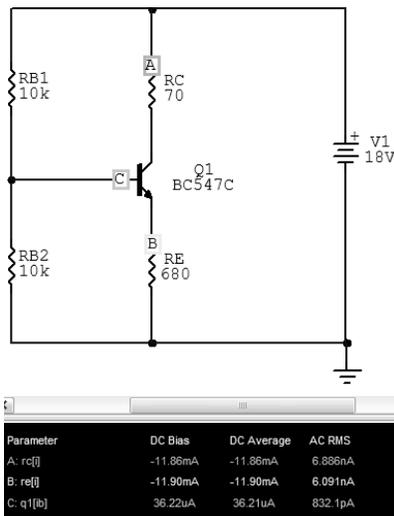


Figura 4.12 – Polarização por Divisor de Tensão de Base, beta igual a 400