

## Polarização de Transistores

### Meta deste capítulo

Relembrar os principais circuitos de polarização de transistores bipolares.

## objetivos

- Apresentar a importância dos circuitos de polarização;
- Analisar os principais circuitos de polarização;
- Resolver exercícios envolvendo circuitos de polarização de transistores;
- Iniciar o contato com circuitos osciladores e multivibradores.

### Pré-requisitos

Não há pré-requisitos para este capítulo.

### Continuidade

A continuidade desta etapa de revisão de conteúdos, antes de iniciar-se a análise de circuitos osciladores e multivibradores, se dará com um estudo de revisão de amplificadores operacionais.

## 1 Introdução

O emprego de transistores bipolares de junção (BJTs) em circuitos eletrônicos é muito frequente, o que também ocorre com circuitos osciladores e multivibradores.

Especialmente em circuitos osciladores discretos, operando em altas frequências, é usual a utilização de transistores bipolares de junção, além de outras tecnologias de transistores e amplificadores operacionais.

Este capítulo pretende relembrar ao estudante os principais circuitos de polarização e sua análise, principais características, além de exemplos em circuitos osciladores e multivibradores.

## 2 Considerações Iniciais

Os transistores bipolares de junção podem ser divididos, quanto a sua construção e portanto funcionamento, em transistores npn ou pnp. Nas figuras Figura 1 e Figura 2 mostram-se os dois modelos e as variáveis principais nestes componentes.

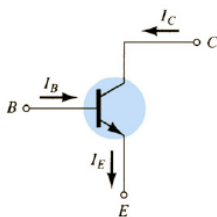


Figura 1 - Transistor npn.

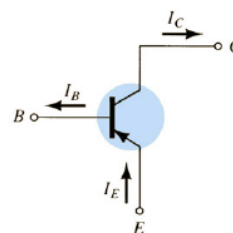


Figura 2 - Transistor pnp.

As principais relações básicas no transistor são:

- Tensão base-emissor ( $V_{BE}$ );
- Tensão coletor-emissor ( $V_{CE}$ );
- Corrente de emissor ( $I_E$ );
- Corrente de coletor ( $I_C$ );
- Ganho ( $\beta$ ).

Algumas considerações são importantes para a análise dos circuitos de polarização, que será realizada adiante. Estas considerações são apresentadas abaixo, correspondendo a tensão base-emissor, característica da queda de tensão de uma junção pn; a corrente de base é muito pequena em relação a corrente de coletor, podendo-se aproximar  $I_E = I_C$ ; a corrente de base é a corrente de coletor dividida pelo ganho do transistor.

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

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B \cong I_C ;$$

$$I_C = \beta \cdot I_B .$$

A partir dos valores destas variáveis pode-se determinar se o transistor está operando em uma de suas três regiões de polarização, quais sejam:

- Região de corte – o transistor não estará conduzindo;
- Região ativa - o transistor estará operando na região de amplificação linear;
- Região de saturação – o transistor estará conduzindo em sua capacidade plena.

Na Figura 3 são apresentadas, em destaque, as três regiões de operação dos transistores bipolares de junção.

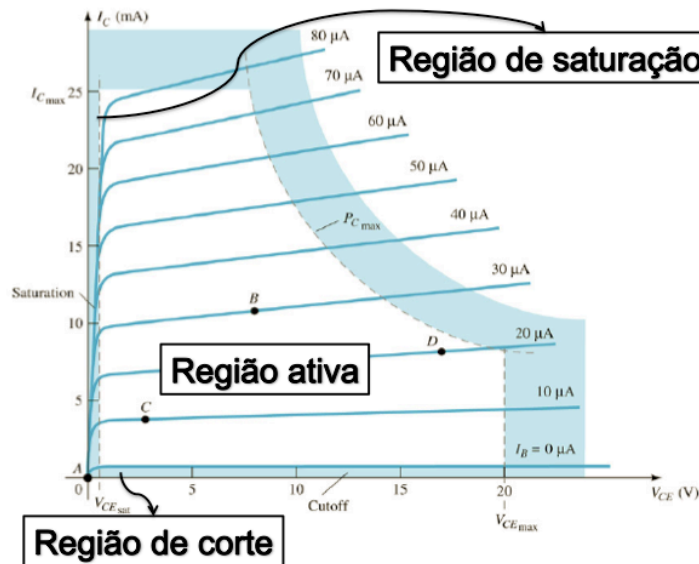


Figura 3 - Regiões de polarização de um transistor bipolar.

### 3 Configuração Emissor-Comum com Polarização Fixa

Um dos circuitos mais simples para polarização de transistores bipolares de junção é a configuração emissor-comum com polarização fixa.

O circuito apresentado na Figura 4 é um exemplo do emprego desta técnica de polarização em um amplificador de sinais. Note que a tensão de entrada do circuito é  $v_i$  e a tensão de saída é  $v_o$ . Se considerarmos que para operação com frequência nula (tensão e corrente contínua) um capacitor se comporta como um circuito aberto e um indutor como um curto-circuito, podemos obter o circuito da Figura 5.

$$|X_L| = \omega \cdot L = 2\pi \cdot F \cdot L = 2\pi \cdot 0 \cdot L = 0\Omega ;$$

$$|X_c| = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot F \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 0 \cdot C} = \infty \Omega.$$

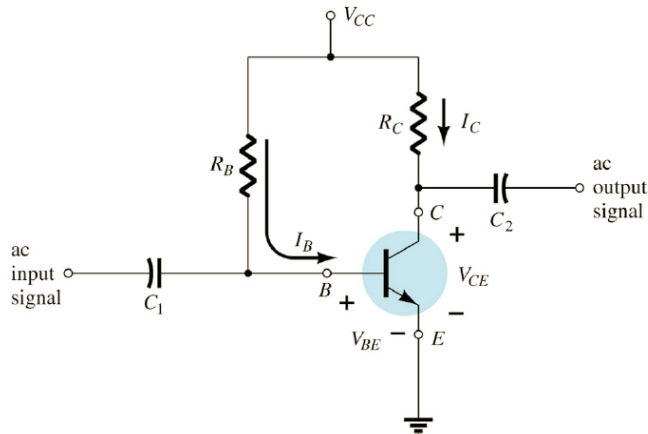


Figura 4 - Configuração emissor-comum com polarização fixa.

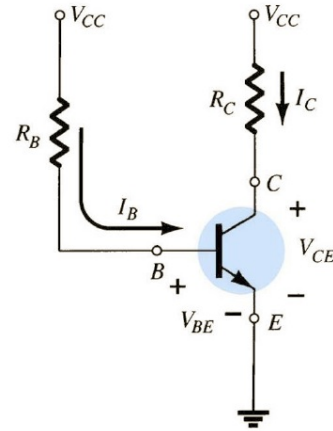


Figura 5 - Circuito de polarização em CC.

Fazendo-se a análise da malha de base-emissor, pode-se desenhar o circuito da Figura 6, obtendo-se:

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

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

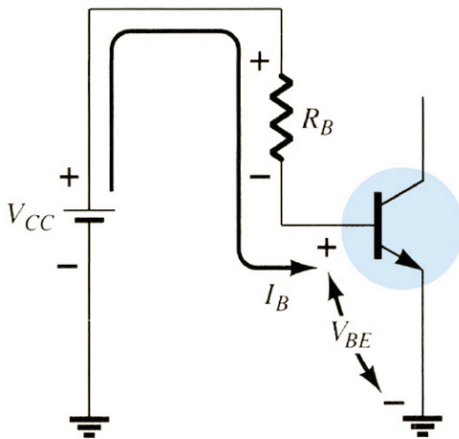


Figura 6 - Malha base-emissor.

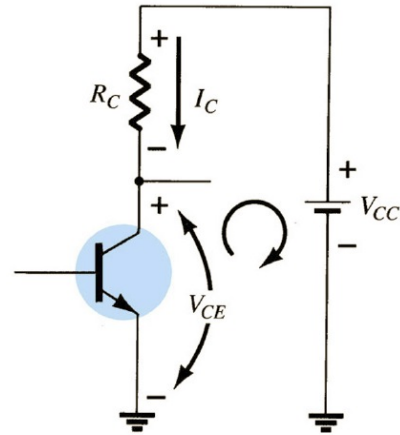


Figura 7 - Malha coletor-emissor

Do mesmo modo, analisando a malha coletor-emissor, tem-se:

$$I_C = \beta \cdot I_B;$$

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

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C.$$

## Exemplo Resolvido

Seja o circuito da Figura 8, a partir do que foi estudado anteriormente, pode-se determinar as variáveis do circuito conforme segue.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0,7}{240k} = 47,08 \mu A;$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 47,08 \mu = 2,35 mA;$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - 2,35m \cdot 2,2k = 6,83V;$$

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

$$V_C = V_{CE} = 6,83V;$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = 0,7 - 6,83 = -6,13V.$$

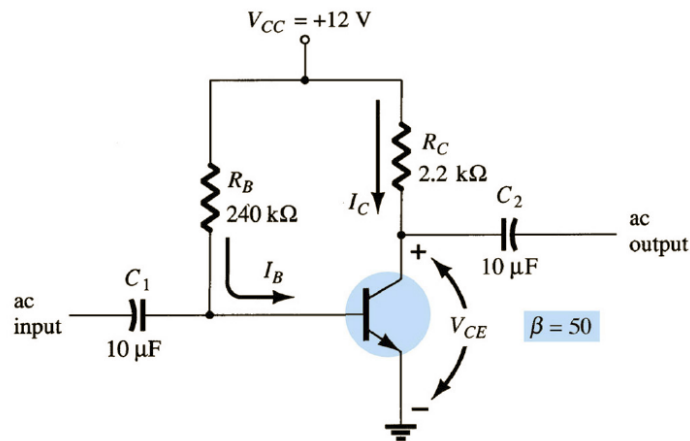


Figura 8 – Circuito de amplificador para o exemplo resolvido.

## Exercícios Específicos

### Exercício 01:

Considerando o circuito da Figura 8 e que a tensão de alimentação seja de 5 V, determine:

- $I_B, I_C$ ;
- $V_{BE}, V_{CE}, V_{CB}$ ;
- $V_B, V_C$ .

### 3.1 Operação na região de saturação

Se o transistor estiver operando na região de saturação, conforme mostrado na Figura 3, então pode-se considerar que a tensão coletor-emissor tenda a zero, como mostrado na Figura 9.

A corrente de saturação pode ser determinada por:

$$I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

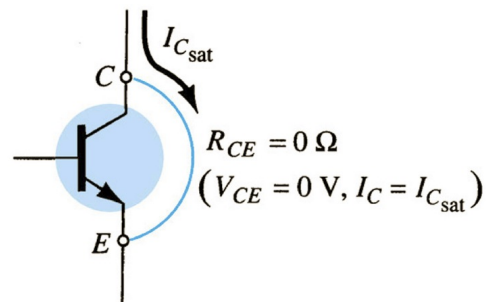


Figura 9 - Transistor operando na saturação.

Lembre que, em oposição à operação na saturação, tem-se a operação na região de corte, onde pode-se considerar:

$$I_C = 0;$$

$$V_{CE} = V_{CC}$$

Utilizando estes limites de operação ( $I_{C_{sat}}$  e  $V_{CE} = V_{CC}$ ) tem-se a reta de carga do circuito, como está mostrado na Figura 10.

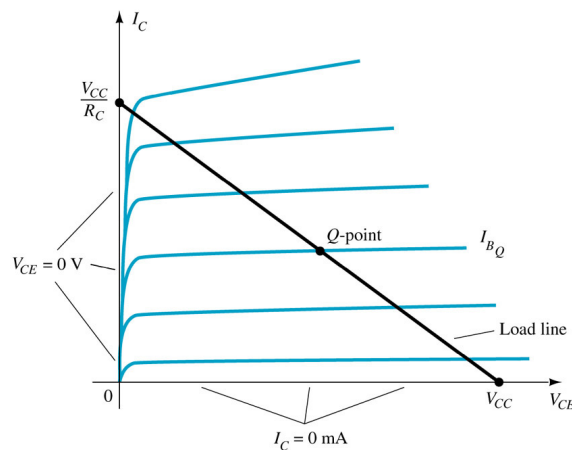


Figura 10 - Reta de carga para polarização fixa.

## Exemplo Resolvido

Considerando o circuito da Figura 11, determinar-se-á a corrente de coletor, caso o transistor esteja saturado, por:

$$I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C};$$

$$I_{C_{sat}} = \frac{12}{3k} = 4mA.$$

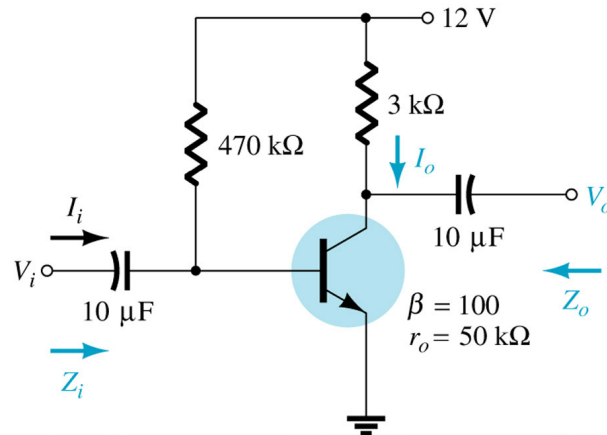


Figura 11 - Circuito exemplo para transistor operando na saturação.

## Exercícios Específicos

### Exercício 02:

Para o circuito da Figura 12 operando na região de saturação, determine a corrente de coletor.

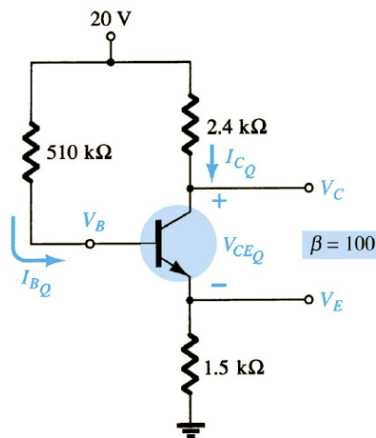


Figura 12 - Circuito para exercício considerando transistor na região de saturação.

## 4 Polarização Estável de Emissor

O principal problema da configuração emissor-comum com polarização fixa é a dependência da corrente de base com o ganho do transistor. Isso pode ser notado pelas expressões abaixo:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \text{ e } I_C = \beta \cdot I_B.$$

Para diminuir a dependência da corrente de base do ganho do transistor, que é muito dependente da temperatura de operação e da fabricação do semicondutor, insere-se um resistor de emissor ao circuito de polarização fixa, originando o circuito de polarização estável de emissor, mostrado na Figura 13.

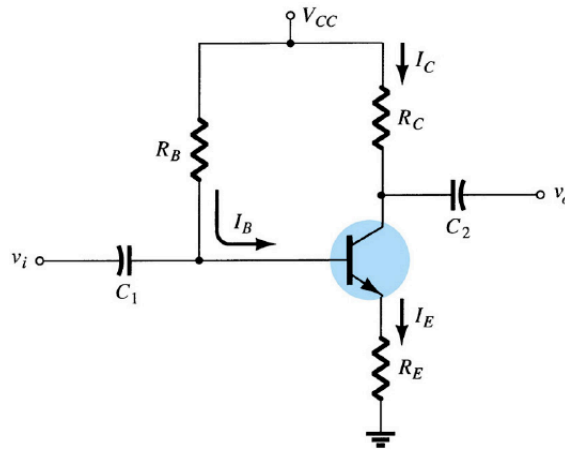


Figura 13 - Circuito de polarização estável de emissor.

Fazendo-se a análise da malha de emissor, pode-se escrever que:

$$I_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E};$$

$$I_C = \beta \cdot I_B.$$

A resistência de entrada, vista pela fonte  $v_i$ , considerando o capacitor um curto-circuito, será:

$$R_i = (\beta + 1) \cdot R_E.$$

Note que enquanto a corrente de base na polarização fixa é dada pela tensão dividida pela resistência de base ( $R_B$ ). Já na polarização estável de emissor, o denominador para determinar a corrente de base é  $R_B + (\beta + 1) \cdot R_E$ .

## Exercícios Específicos

### Exercício 03:

Considere o circuito de polarização fixa apresentado na Figura 14 e o circuito de polarização estável de emissor da Figura 15. Faça uma análise do comportamento das principais

variáveis do circuito ( $I_B$ ,  $I_C$ ,  $V_{CE}$ ) considerando um aumento de 90% no ganho dos transistores.

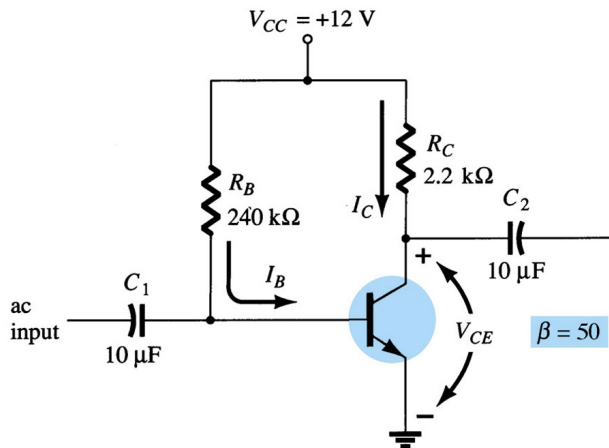


Figura 14 - Circuito com polarização fixa.

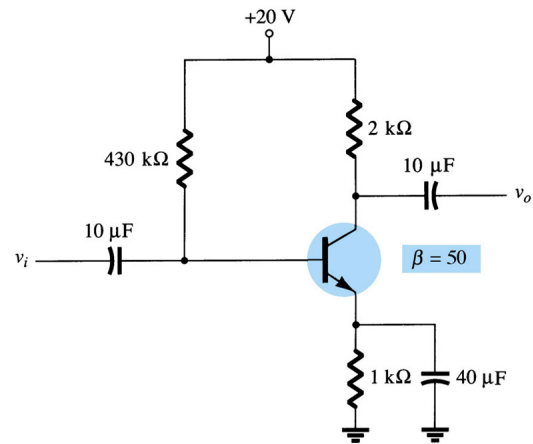


Figura 15 - Circuito de polarização estável de emissor.

**Exercício 04:**

Faça a análise do circuito de polarização do oscilador mostrado na Figura 16. Determine também as variáveis principais do circuito considerando a região de saturação e corte, para fins de desenho da reta de carga do mesmo.

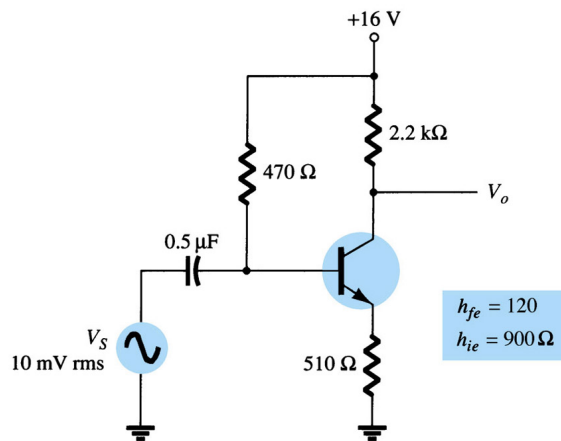


Figura 16 - Circuito de polarização de oscilador.

## 5 Polarização por Divisor de Tensão

O circuito mais utilizado para polarização de transistores, por possuir excelentes características quanto a independência da corrente de base com o ganho do transistor, é o divisor de tensão para geração da tensão de base, como está mostrado na Figura 17.

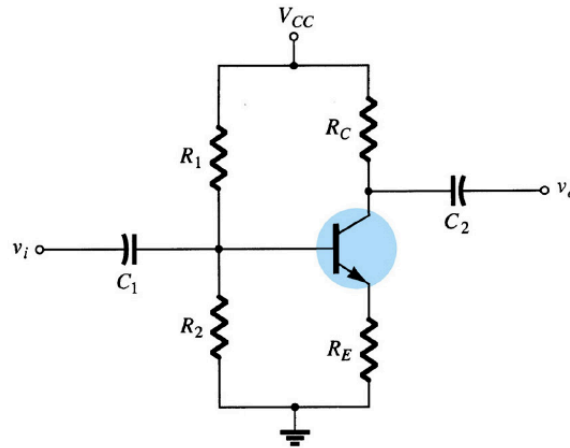


Figura 17 - Circuito de polarização por divisor de tensão.

Pode-se utilizar o circuito equivalente de Thévenin para determinar a tensão de base e a resistência equivalente deste circuito, de acordo com a Figura 18.

A resistência equivalente a tensão da fonte de Thévenin serão:

$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2};$$

$$V_{TH} = V_{R2} = \frac{R_2 \cdot V_{CC}}{R_1 + R_2}.$$

Portanto, a corrente de base e a tensão coletor-emissor serão:

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) \cdot R_E};$$

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

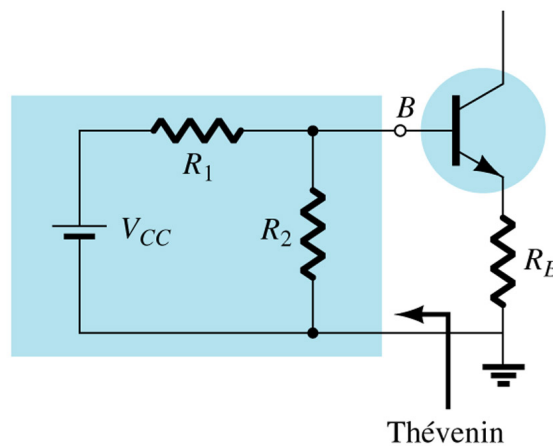


Figura 18 - Circuito equivalente de Thévenin.

Note que a corrente de base é determinada considerando a resistência equivalente de Thévenin e a parcela dependente do ganho ( $\beta$ ).

## Exercícios Específicos

### Exercício 05:

Determine a corrente de base, corrente de coletor e tensão coletor-emissor para o circuito da Figura 19.

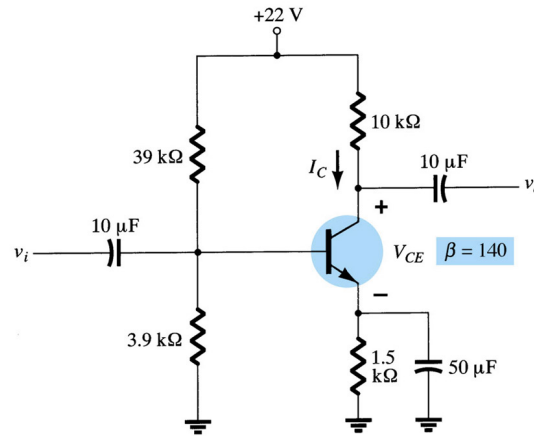


Figura 19 - Circuito de polarização por divisor de tensão para exercícios.

### Exercício 06:

Considere ainda o circuito da Figura 19. Refaça a análise supondo que o ganho do transistor sofreu uma variação de +100%. Compare os resultados obtidos com o exercício anterior.

## 6 Polarização com Realimentação de Tensão

Uma alternativa para melhorar a estabilidade do circuito de polarização em relação ao ganho do transistor é inserir uma realimentação de coletor para a base, como pode ser observado na Figura 20.

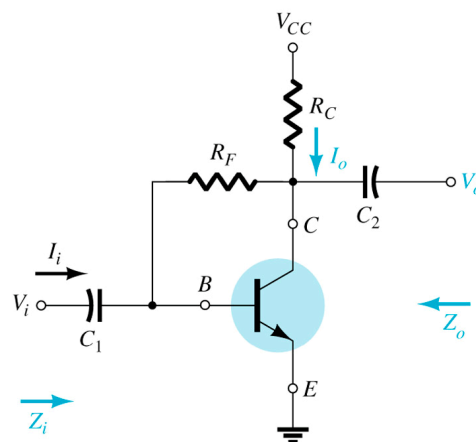


Figura 20 - Circuito de polarização com realimentação de coletor.

A análise fica um pouco mais trabalhosa, mas facilmente pode-se obter:

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

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

## Exercícios Gerais

### Exercício 07:

Para o oscilador Colpits mostrado na Figura 21, determine as principais variáveis do circuito de polarização.

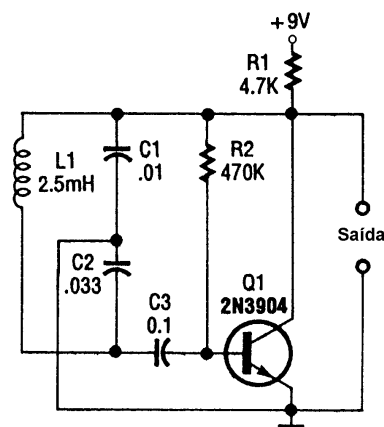


Figura 21 - Oscilador Colpitts para estudo da polarização.

### Exercício 08:

Para o oscilador Clapp mostrado na Figura 22, determine as principais variáveis do circuito de polarização.

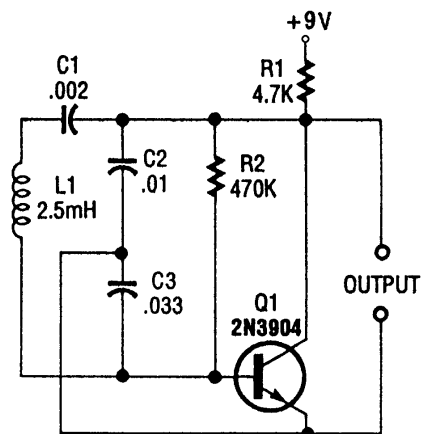


Figura 22 - Oscilador Clapp para estudo da polarização.

**Exercício 09:**

Para o oscilador por deslocamento de fase mostrado na Figura 23, determine as principais variáveis do circuito de polarização.

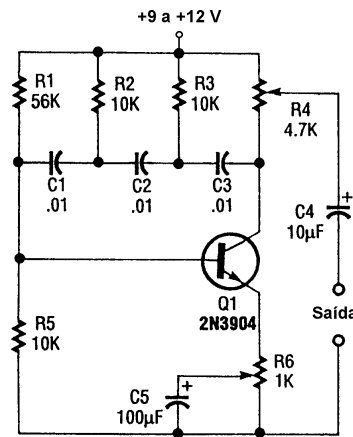


Figura 23 - Oscilador por deslocamento de fase para estudo da polarização.

**Exercício 10:**

Para o oscilador Ponte de Wien mostrado na Figura 24, determine as principais variáveis do circuito de polarização.

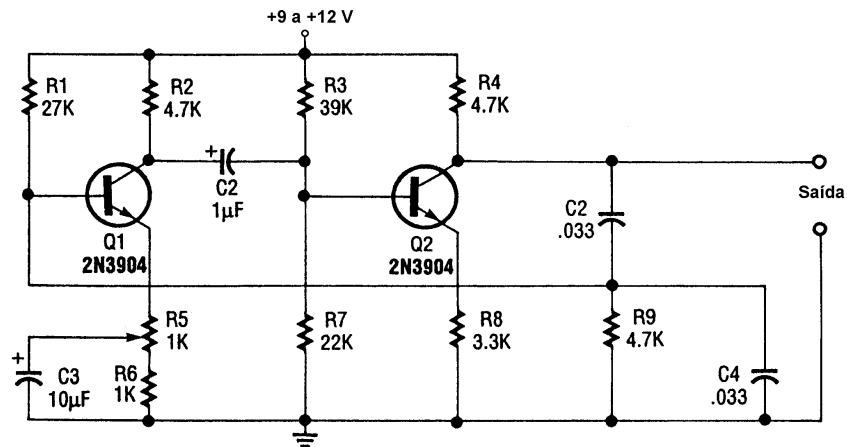


Figura 24 - Oscilador Ponte de Wien para estudo da polarização.

**Exercício 11:**

Para o oscilador Hartley mostrado na Figura 25, determine as principais variáveis do circuito de polarização.

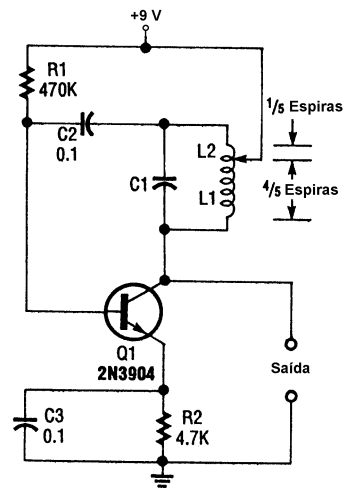


Figura 25 - Oscilador Hartley para estudo da polarização.

## 7 Referências

- [1] BOYLESTAD, R. L. e NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 8<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1984.
- [2] A. P. MALVINO. Eletrônica. Volumes 1 e 2. Editora McGraw Hill do Brasil, São Paulo, 1987.
- [3] LALOND, David E.; Ross, John A. Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – volumes 1 e 2. Makron Books. São Paulo, 1999.
- [4] BOGART JR, Theodore F. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – volumes 1 e 2. Makron Books. 3<sup>a</sup> ed, São Paulo, 2001.