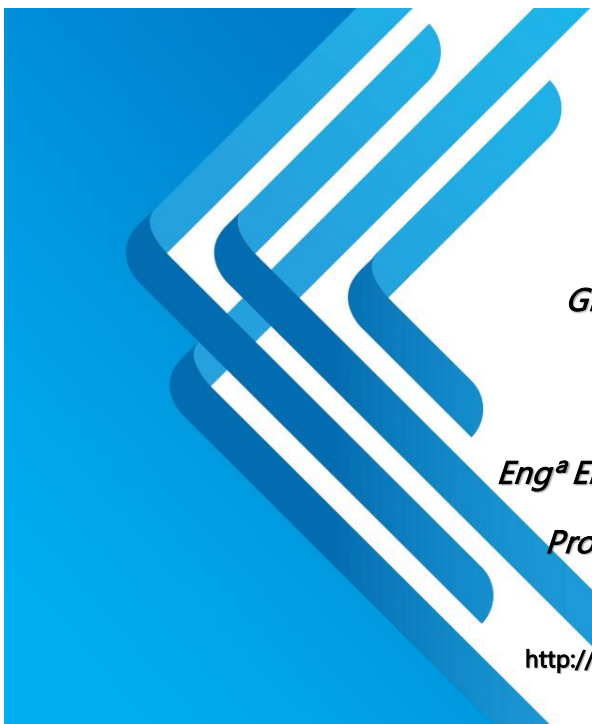




kroton
paixão por educar

GRADUAÇÃO PRESENCIAL
2º semestre- 2015

Eletrônica II
Engª Elétrica – 5º/6º semestres

Profº. Ms.Cristiano Malheiro

cmalheiro@aedu.com

<http://cristianotm.wix.com/notasdeaula>

1



Aula 3

HISTÓRIA DA MICROELETRÔNICA

→ *Evolução da Eletrônica*

Válvula 1896 ⇒ *Transistor* 1947 ⇒ *Circuitos Integrados* 1958

Microeletrônica



Aula 3

O Primeiro Transistor



- Transistor de contato puntual
- Concebido em 1947 por W. Shockely, W. Brattain e J. Bardeen, nos laboratórios da AT&T
- alternativa para as válvulas

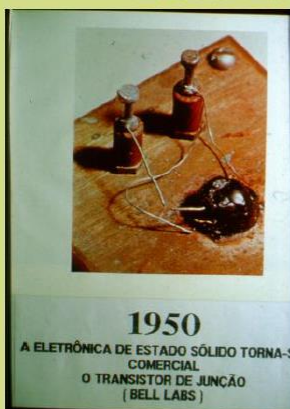
3

kroton
paixão por educar



Aula 3

Transistor de junção



- Desenvolvido por W. Shockley em 1950
- Mais estável que o transistor de contato puntual

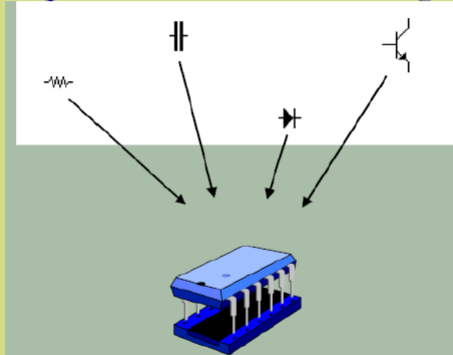
4

kroton
paixão por educar



Aula 3

→ O que é um Circuito Integrado ?



5

kroton
paixão por educar



Aula 3

TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO-TBJ

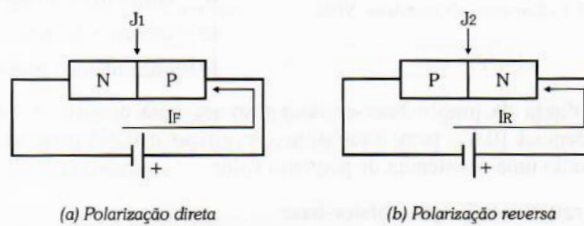
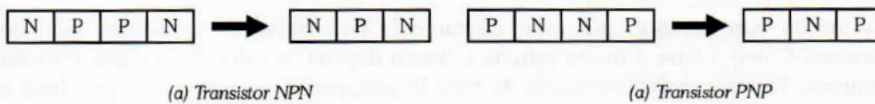


Figura 3.1 - Junções PN polarizadas.



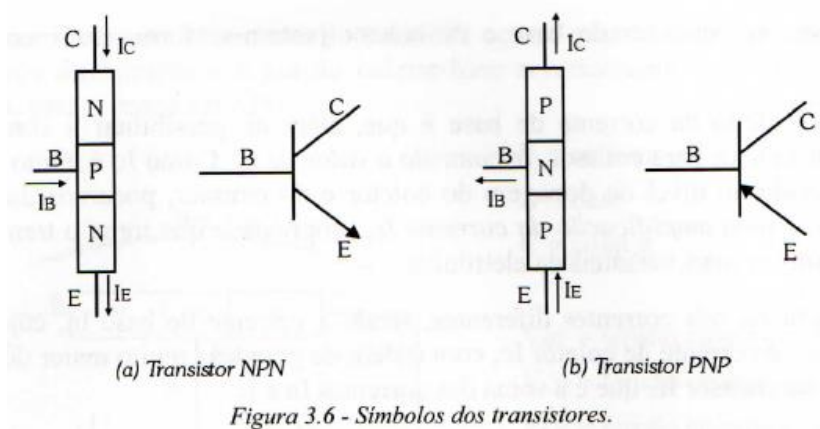
6

kroton
paixão por educar



Aula 3

TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO- SIMBOLOGIA



7

kroton
paixão por educar



Aula 3

TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO- TBJ

Nos transistores:

- Região intermediária- base (B), é estreita e pouco dopada, para evitar a recombinação dos pares elétron- lacuna.
- As outras duas são denominadas de emissor (E), é fortemente dopado e coletor (C) com dopagem intermediária.

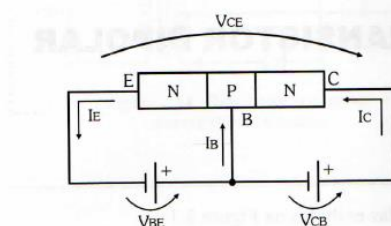


Figura 3.3 - Estrutura do transistor NPN.

E = emissor

B = base

C = coletor

V_{BE} = tensão base-emissor

V_{CB} = tensão coletor-base

V_{CE} = tensão coletor-emissor

I_E = corrente de emissor

I_B = corrente de base

I_C = corrente de coletor

8

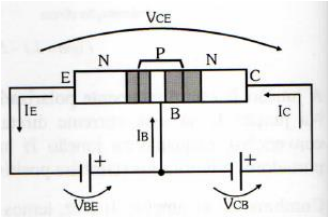
kroton
paixão por educar



Aula 3

TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO- TBJ

- A corrente I_B além de possibilitar a condução de corrente do coletor para emissor, controla o valor de I_C .
- Como I_C é muito maior do que I_B , devido ao nível de dopagem do coletor e emissor, pode-se dizer que a corrente I_C é uma amplificação de corrente I_B , propriedade que torna o transistor um dos dispositivos mais versáteis da eletrônica.



Em relação às tensões nos terminais do transistor, tem-se que V_{BE} e V_{CB} somadas produzem V_{CE} .

$$I_E = I_C + I_B$$

e

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

9



Aula 3

TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO- TBJ

Potência dissipada no transistor

A região de coletor é responsável pela quase totalidade da dissipação de potência, de modo que a potência dissipada no transistor é o produto da corrente de coletor I_C pela tensão entre coletor e emissor V_{CE} .

$$P_c = V_{CE} \cdot I_c$$

Para o transistor BC548 (Motorola):

Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625 5.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
--	-------	------------	----------------------------

10





Aula 2

TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO- TBJ

Ganho de Corrente no Transistor

A especificação do transistor que caracteriza o seu *efeito de amplificação de corrente contínua* é simbolizado por β , sendo as relações entre as correntes de coletor I_C e de base I_B :

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

Nos manuais de fabricantes, essa especificação é denominada h_{fe} .

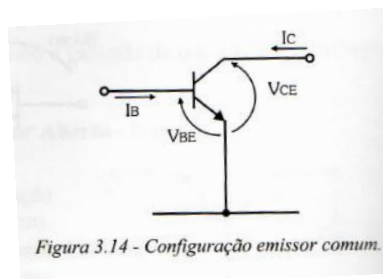
11



Aula 3

Curvas características do Transistor

O transistor é um dispositivo de três terminais. Ele opera com três correntes e três tensões.



As curvas características do transistor estabelecem relações entre variáveis de entrada e de saída para cada configuração, sendo a principal e mais utilizada a configuração em emissor comum.

12

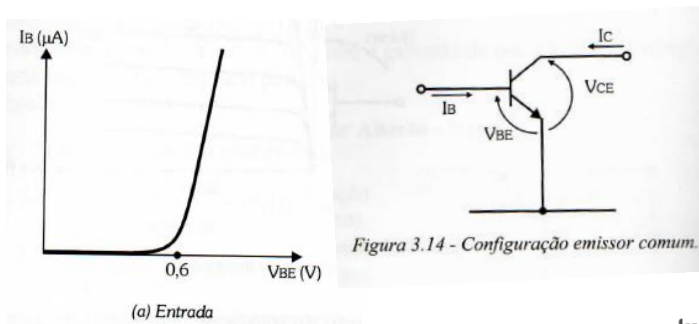




Aula 3

Curvas características do Transistor

A curva característica de entrada é semelhante à curva de um diodo polarizado diretamente, já que a junção base-emissor do transistor deve também ser polarizada diretamente.



13

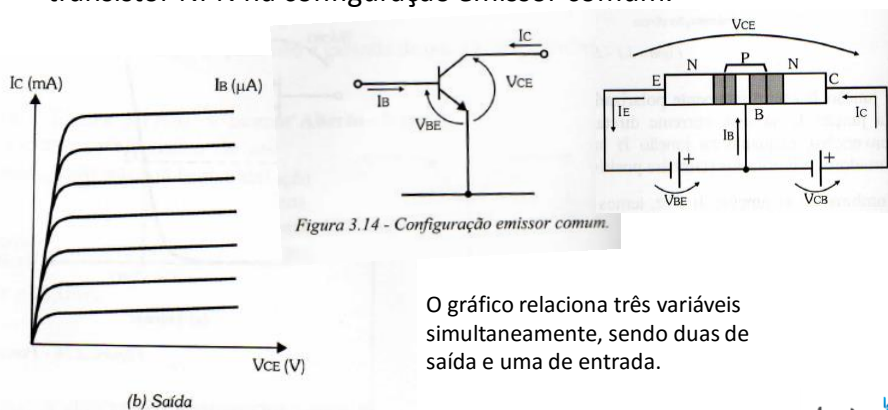
kroton
paixão por educar



Aula 3

Curvas características do Transistor

A figura abaixo mostra a curva característica de saída do transistor NPN na configuração emissor comum.



O gráfico relaciona três variáveis simultaneamente, sendo duas de saída e uma de entrada.

14

kroton
paixão por educar



Aula 3

Ponto Quiescente de um Transistor- pág. 79

O ponto quiescente Q de um transistor é a denominação para o seu *ponto de operação*.

Quando o transistor encontra-se polarizado, todas as suas variáveis ficam definidas, ou seja, as correntes I_B , I_C e I_E e as tensões V_{BE} , V_{CE} e V_{CB} . Essas variáveis definidas caracterizam o ponto quiescente do transistor.

Pelas curvas características de entrada e de saída, vimos que bastam as correntes I_B e I_C e as tensões V_{BE} e V_{CE} para que o comportamento do transistor fique completamente definido.

15



 paixão por educar


Aula 3

Ponto Quiescente de um Transistor- pág. 79

O ponto quiescente Q de um transistor é a denominação para o seu *ponto de operação*.

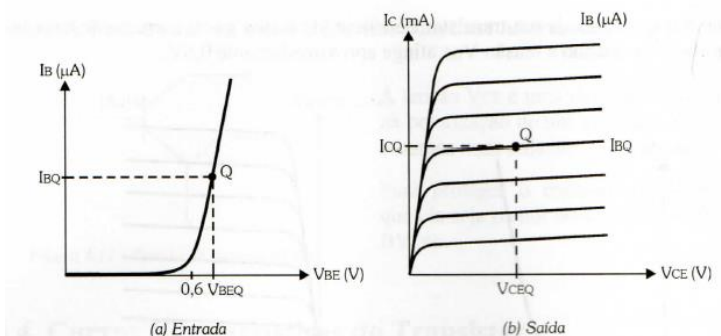


Figura 3.16 - Ponto quiescente do transistor.

16



 paixão por educar

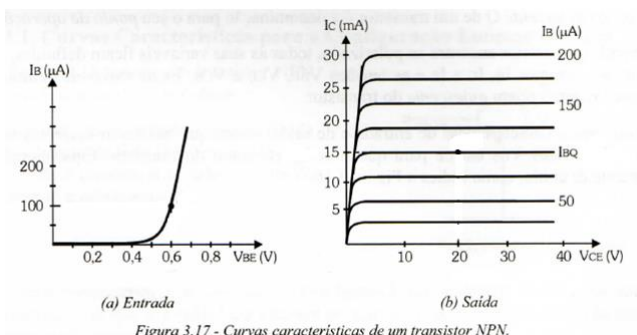


Aula 3

Ponto Quiescente de um Transistor- pág. 80

Exemplo:

Dada as curvas características de entrada e de saída de um transistor e considerando que ele se encontra polarizado com $V_{BEQ}=0,6V$ e $V_{CEQ}=20V$, determine as correntes I_{BQ} , I_{CQ} , I_{EQ} e o ganho de corrente h_{fe} .



17

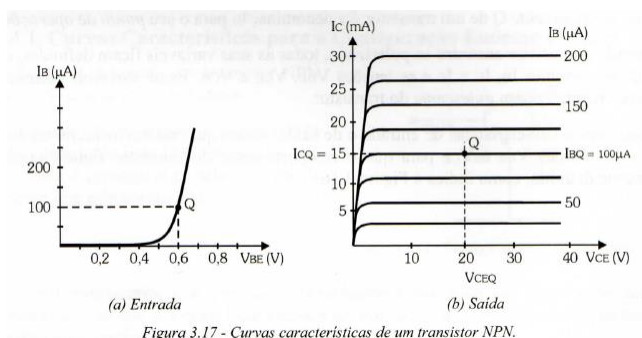


Aula 3

Ponto Quiescente de um Transistor- pág. 80

Exemplo:

Dada as curvas características de entrada e de saída de um transistor e considerando que ele se encontra polarizado com $V_{BEQ}=0,6V$ e $V_{CEQ}=20V$, determine as correntes I_{BQ} , I_{CQ} , I_{EQ} e o ganho de corrente h_{fe} .



18



Aula 3

Limitações do transistor para curva de saída

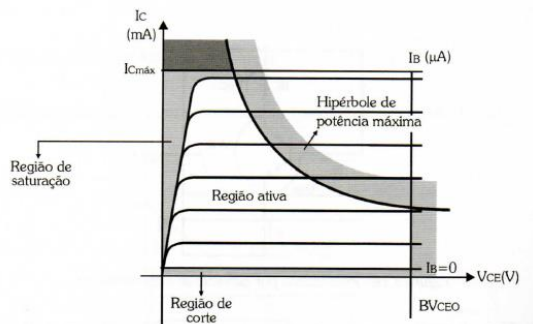


Figura 3.18 - Limitações do transistor na curva característica de saída.

Quando o transistor está saturado, é como se houvesse uma chave fechada do coletor para o emissor. Quando o transistor está cortado, é como uma chave aberta.

19

kroton
paixão por educar



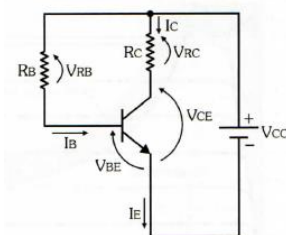
Aula 3

Polarização de Transistores- pág. 82

Exemplo:

Polarizar um transistor é definir o seu *ponto quiescente*. Isso é feito por meio de uma fonte de alimentação externa, que denominamos V_{CC} e de resistores que ligados de forma conveniente aos terminais do transistor, garantem a sua correta operação – junção base-emissor polarizada diretamente e a junção coletor- base reversamente.

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Base Comum



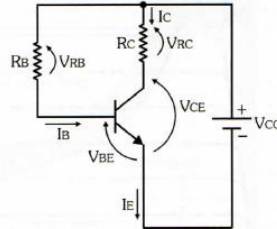
20

kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Base Comum – pág. 82



A partir da malha externa do circuito, obtemos:

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

R_B e R_C são os resistores de polarização!!!

A partir da malha de saída do circuito, obtemos:

$$R_C \cdot I_C + V_{CE} = V_{CC} \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C}$$

21



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Base Comum – pág. 83

Calculados os resistores de polarização, podemos traçar a reta de carga do transistor na sua curva característica de saída. Para determinação da reta de carga é necessário calcular os pontos de corte e saturação.

Ponto de Corte:

$$I_{CCORTE}=0 \text{ na equação: } R_C \cdot I_{CCORTE} + V_{CECORTE} = V_{CC}; \text{ logo } V_{CECORTE} = V_{CC}$$

Ponto de Saturação

$$V_{CESAT}=0 \text{ na equação: } R_C \cdot I_{CSAT} + V_{CESAT} = V_{CC}; \text{ logo } I_{CSAT} = V_{CC} / R_C$$

22





Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Base Comum – pág. 83

$I_{CCORTE}=0$ na equação: $R_C \cdot I_{CCORTE} + V_{CECORTE} = V_{CC}$; logo $V_{CE} = V_{CC}$

$V_{CESAT}=0$ na equação: $R_C \cdot I_{CSAT} + V_{CECORTE} = V_{CC}$; logo $I_{CSAT} = V_{CC} / R_C$

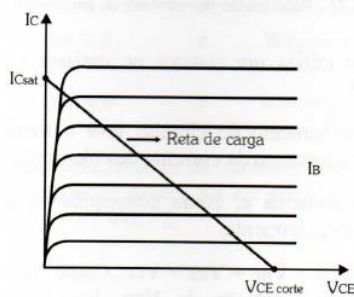


Figura 3.20 - Reta de carga do transistor.

A aplicação desse circuito restringe-se à operação do transistor como uma chave eletrônica, ou seja, apenas nos pontos de corte e saturação.

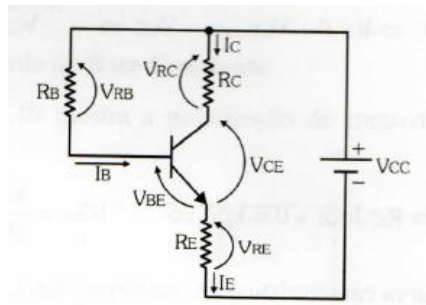
23

kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Emissor Constante



Função do R_E : estabilizar termicamente o transistor

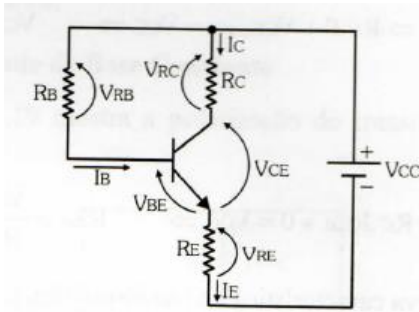
24

kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Emissor Constante



Na malha externa temos:

$$V_{RB} + V_{BE} + V_{RE} = V_{CC}$$

- VCC e VBE são constantes;
- Aumento de V_{RE} provoca a redução de V_{RB} ;

O que causará???

- Redução de I_B consequentemente redução de I_C , estabilizando termicamente o transistor.
- É um circuito utilizado como amplificador!!!

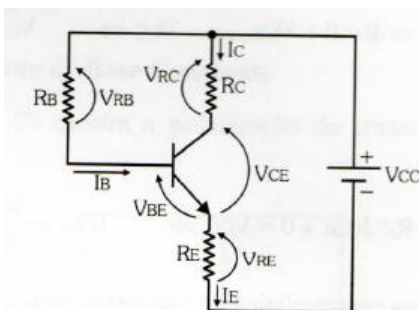
25

kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Emissor Constante



Para o R_E não precisa possuir uma tensão elevada. Geralmente utiliza-se 10% da tensão V_{CC} para polarizar o emissor. Veja:

$$V_{RE} = 0,1 \cdot V_{CC} \quad R_E \cdot I_E = 0,1 \cdot V_{CC}$$

Logo:

$$R_E = \frac{0,1 \cdot V_{CC}}{I_E}$$

Para $h_{fe} > 20$, considerar $I_E = I_C$, é válida porque o erro que ela insere é de 5% no valor da corrente, que é o mesmo valor da tolerância dos resistores usados para polarização.

26

kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Emissor Constante

Da malha externa, temos:

$$R_B \cdot I_B + V_{BE} + 0,1 \cdot V_{CC} = V_{CC}$$

Logo:

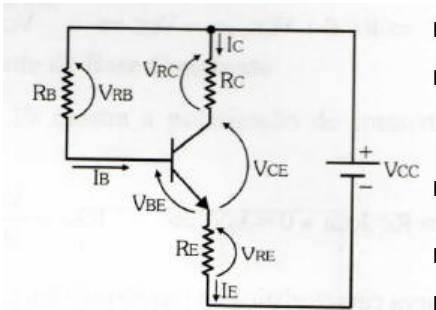
$$R_B = \frac{0,9 \cdot V_{CC} - V_{BE}}{I_B}$$

Da malha de saída do circuito, temos:

$$R_C \cdot I_C + V_{CE} + 0,1 \cdot V_{CC} = V_{CC}$$

Logo:

$$R_C = \frac{0,9 \cdot V_{CC} - V_{CE}}{I_C}$$



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Base Comum – pág. 83

Calculados os resistores de polarização, podemos traçar a reta de carga do transistor na sua curva característica de saída. Para determinação da reta de carga é necessário calcular os pontos de corte e saturação.

Ponto de Corte:

$$I_{CCORTE} = 0 \text{ na equação: } R_C \cdot I_{CCORTE} + V_{CECORTE} + R_E \cdot I_{CCORTE} = V_{CC}; \text{ logo } V_{CECORTE} = V_{CC}$$

Ponto de Saturação

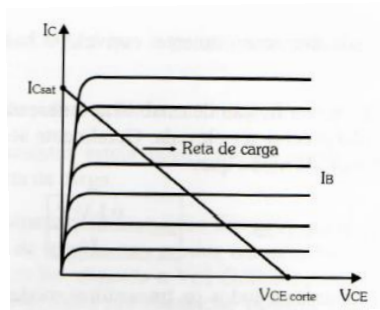
$$V_{CESAT} = 0 \text{ na equação: } R_C \cdot I_{CSAT} + V_{CECORTE} + R_E \cdot I_{CSAT} = V_{CC}; \text{ logo } I_{CSAT} = V_{CC} / R_C + R_E$$



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Corrente de Base Comum – pág. 83

- $I_{CCORTE}=0$ na equação: $R_C \cdot I_{CCORTE} + V_{CECORTE} R_E \cdot I_{CCORTE} = V_{CC}$; logo $V_{CECORTE} = V_{CC}$
- $V_{CESAT}=0$ na equação: $R_C \cdot I_{CSAT} + V_{CECORTE} + R_E \cdot I_{CSAT} = V_{CC}$; logo $I_{CSAT} = V_{CC} / R_C + R_E$



29

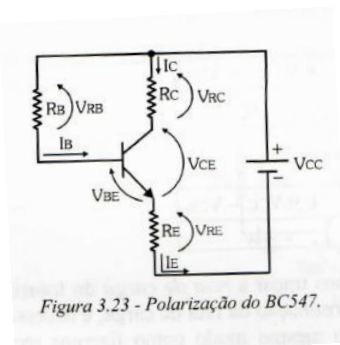
kroton
paixão por educar



Aula 3

Exercícios

- 1) Polarize o transistor BC 547 com corrente de emissor constante, na região ativa, sendo $I_C=2\text{mA}$. Use uma fonte de alimentação de 12V.



Especificações do transistor:

- Código BC547- silício
- $V_{BE}=0,6\text{V}$
- $H_{fe\text{mín}}=110$

Dados:

- $V_{CC}=12\text{V}$
- $I_C=2\text{mA}$
- $V_{CE}=V_{CC}/2$

30

kroton
paixão por educar



Aula 3

Exercícios

Valores comerciais de resistor:

Resistores de 5%													
Décadas	10	12	15	18	22	27	33	39	47	56	68	82	91
Potências (W)	1/8	1/4	1/3	1/2	1	2	3	5	10				

31

kroton
paixão por educar



Aula 3

Exercícios

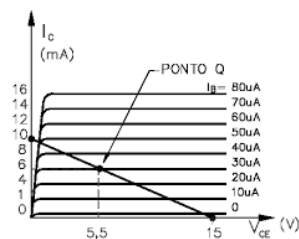
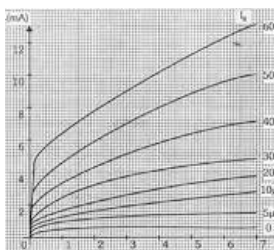
2) Determine a reta de carga do circuito do exercício anterior e localize no gráfico o ponto quiescente Q do transistor.

Especificações do transistor:

- Código BC547- silício
- $V_{BE}=0,6V$
- $H_{fe\min}=110$

Dados:

- $V_{CC}=12V$
- $I_C=2mA$
- $V_{CE}=V_{CC}/2$



32

kroton
paixão por educar



Aula 3

Exercícios

3) Dado o circuito a seguir e considerando $V_{RE}=0,1.V_{CC}$, determine I_B , I_C e V_{CE} quiescentes.

Especificações do transistor:

- Código BC550B- silício
- $V_{BE}=0,6V$
- $H_{fe\min}=200$

Dados:

- $V_{CC}=5V$
- $R_B=100k\Omega$
- $R_C=220\Omega$

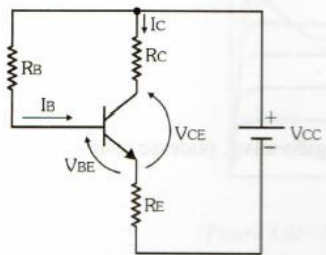


Figura 3.25 - Circuito polarizado.

33

kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Divisão de Tensão na Base – pág. 89

Este tipo de polarização utiliza um divisor de tensão na base composto por dois resistores, R_{B1} e R_{B2} . Esse divisor, se bem projetado, torna o transistor muito mais estável.

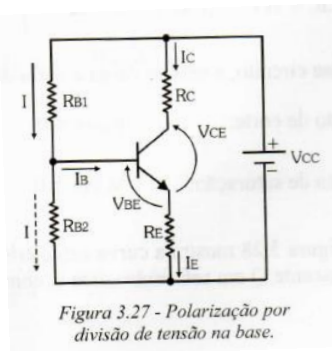


Figura 3.27 - Polarização por divisão de tensão na base.

34

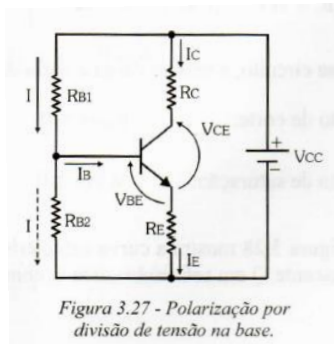
kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Divisão de Tensão na Base – pág. 89

A ideia é dividir a tensão V_{CC} em dois valores estáveis, de modo que a tensão em R_{B2} seja constante. Isso é possível com que a Corrente I que atravessa R_{B1} seja bem maior que I_B , tornando esta última desprezível.



35

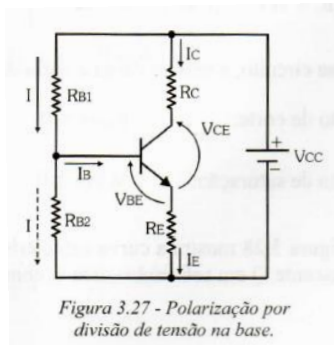
kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Divisão de Tensão na Base – pág. 89

$I_C - I_E$, tende a deslocar o ponto quiescente à região de saturação. O aumento de I_E provoca aumento da tensão R_E que força a diminuição de V_{BE} , já que a tensão em R_{B2} é constante. A redução de V_{BE} reduz I_B e, conseqüentemente I_C .



36

kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Divisão de Tensão na Base – pág. 89

Para o cálculo de R_{B1} e R_{B2} , é preciso, definir o valor da corrente I em função das características do transistor. $I \gg I_B$.

Uma relação prática muito considerada é I igual 10% da corrente de coletor I_C , já que no geral é maior 100 vezes que a corrente I_B .

Assim:

$$I = 0,1 \cdot I_C$$

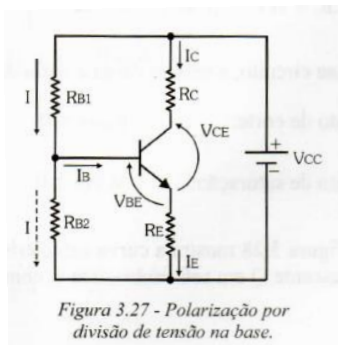
$$\text{Lembrando que } V_{RE} = 0,1 \cdot V_{CC}$$

37



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Divisão de Tensão na Base – pág. 89



Da malha externa, temos:

$$R_{B2} \cdot I = V_{BE} + V_{RE}$$

$$R_{B2} \cdot 0,1 \cdot I_C = V_{BE} + 0,1 \cdot V_{CC}$$

$$R_{B2} = \frac{V_{BE} + 0,1 \cdot V_{CC}}{0,1 \cdot I_C}$$

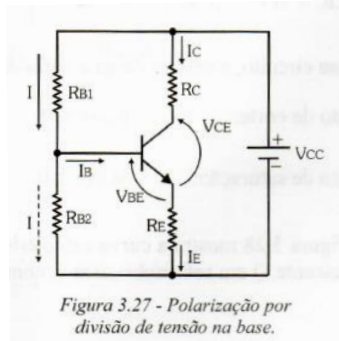
38





Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Divisão de Tensão na Base – pág. 89



Da malha externa, temos:

$$(R_{B1} + R_{B2}) \cdot I = V_{CC}$$

$$(R_{B1} + R_{B2}) \cdot 0,1 \cdot I_C = V_{CC}$$

$$R_{B1} = \frac{V_{CC}}{0,1 \cdot I_C} - R_{B2}$$

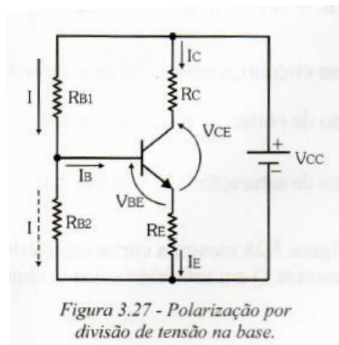
39

kroton
paixão por educar



Aula 3

Configuração Emissor Comum – Polarização por Divisão de Tensão na Base – pág. 89



Da malha de saída, temos:

$$V_{RE} = 0,1 \cdot V_{CC} \quad R_E \cdot I_E = 0,1 \cdot V_{CC}$$

Logo:

$$R_E = \frac{0,1 \cdot V_{CC}}{I_E}$$

$$R_C \cdot I_C + V_{CE} + 0,1 \cdot V_{CC} = V_{CC}$$

Logo:

$$R_C = \frac{0,9 \cdot V_{CC} - V_{CE}}{I_C}$$

40

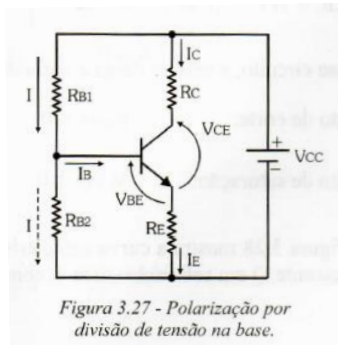
kroton
paixão por educar



Aula 3

Exercício– pág. 91

- 1) Polarize o transistor 2N3904 com divisor de tensão na base, na região ativa, sendo $I_C=10\text{mA}$ e usando uma fonte de alimentação de 12V.



Especificações do transistor:

- Código 2N3904- silício
- $V_{BE}=0,6\text{V}$
- $h_{fe\min}=100$

Dados:

- $V_{CC}=12\text{V}$
- $I_C=10\text{mA}$
- $V_{CE}=V_{CC}/2$

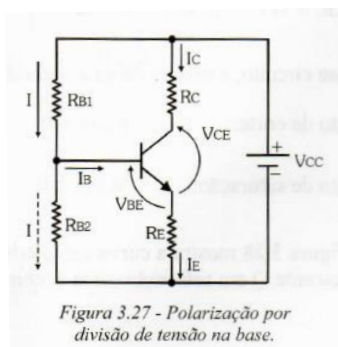
41



Aula 3

Exercício– pág. 91

- 2) Considere o circuito abaixo e determine os valores de V_{CE} , I_C e I_B quiescentes.



Especificações do transistor:

- Código BC547B- silício
- $V_{BE}=0,6\text{V}$
- $h_{fe\min}=200$

Dados:

- $V_{CC}=9\text{V}$
- $R_C=330\Omega$
- $R_{B1}=15\text{K}\Omega$
- $I=0,1\text{I}$
- $V_{RE}=0,1.V_{CC}$
- $R_{B1}=180\Omega$
- $R_{B2}=3,3\text{K}\Omega$

42

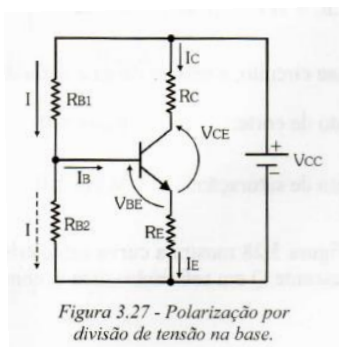




Aula 3

Exercício– pág. 91

3) Considere o circuito abaixo e determine os valores de V_{CE} e I_C quiescentes pelo traçado da reta de carga, sabendo-se que $I_B = 20\mu A$.



Dados:

- $V_{CC} = 30V$
- $R_C = 2,2k\Omega$
- $R_E = 800\Omega$
- $I_B = 20\mu A$

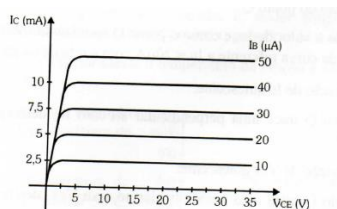


Figura 3.32 - Curva característica.

43

kroton
paixão por educar



Aula 3

Exercício– pág. 91

Solução:

Ponto de saturação:

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{30}{2,2 \cdot 10^3 + 800} = \frac{30}{3 \cdot 10^3} \Rightarrow I_{Csat} = 10mA$$

A reta de carga está mostrada na Figura 3.33.

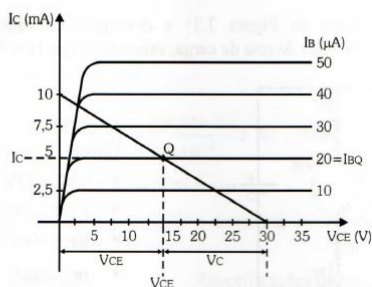


Figura 3.33 - Curva característica com reta de carga.

44

kroton
paixão por educar



Aula 3

**Exercícios para entregar individual, folha padrão – pág. 101
Dia 08/09!!!**

**3.2; 3.3 e 3.4 – Livro Eletrônica Aplicada
Autor: Eduardo Alves César Cruz.**

45

kroton
paixão por educar



Aula 3

Exercícios escaneados:

3.2) Polarize o transistor BC547B na região ativa, com corrente de emissor constante, determinando os valores comerciais dos resistores R_B , R_E e R_C .

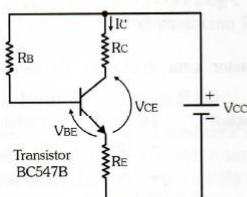


Figura 3.40 - Transistor polarizado por corrente de emissor constante.

Especificações do transistor:

- Código - BC547B - silício
- $V_{BE} = 0,6V$
- $h_{FEmin} = 200$

Dados do circuito:

- $V_{CC} = 15V$
- $I_C = 10mA$
- $V_{CE} = V_{CC} / 2$

Transistor Bipolar



46

kroton
paixão por educar



Aula 3

Exercícios escaneados:

- 3.3) Polarize o transistor BC547 na região ativa, com divisor de tensão na base, determinando os valores comerciais dos resistores R_{B1} , R_{B2} , R_E e R_C .

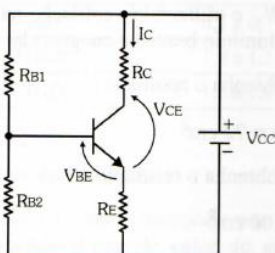


Figura 3.41 - Transistor polarizado por divisão de tensão na base.

Especificações do transistor:

- Código - BC547 - silício
- $V_{BE} = 0,6V$
- $h_{FEmin} = 110$

Dados do circuito:

- $V_{CC} = 10V$
- $I_C = 5mA$
- $V_{CE} = V_{CC} / 2$

47

kroton
paixão por educar



Aula 3

Exercícios escaneados:

- 3.4) Considere o circuito da Figura 3.42, a curva característica do transistor dada na Figura 3.43 e determine os valores de V_{CE} e I_C quiescentes pelo traçado da reta de carga, sabendo-se que $I_B = 20\mu A$.

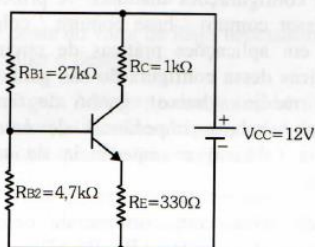


Figura 3.42 - Transistor polarizado por divisão de tensão na base.

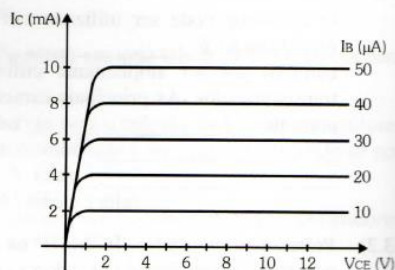


Figura 3.43 - Curva característica do transistor.

48

kroton
paixão por educar



Aula 3

Respostas:

Capítulo 3

- 3.1) Emissor comum; alto; alto; média; alta
- 3.2) $R_B = 270k\Omega$; $R_E = 150\Omega$; $R_C = 560\Omega$ ou 680Ω
- 3.3) $R_{B1} = 15k\Omega$ ou $18k\Omega$; $R_{B2} = 3,3k\Omega$; $R_E = 180\Omega$ ou 220Ω ; $R_C = 820\Omega$
- 3.4) $V_{CE} = 6,5V$ e $I_C = 4mA$
- 3.5) $P_{Cm\acute{a}x} = 9,13W$

49

kroton
paixão por educar



kroton
paixão por educar

Bibliografia desta aula:

CRUZ, Eduardo Cesar Alves; CHOUERI, Salomão. **Eletrônica Aplicada**, 2ª edição. São Paulo: Editora Erica, 2013.

50

