

Laboratório 3: Polarização de transistores BJTs

Larissa Kelmer de Menezes Silva

Centro de Tecnologia/CT

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Natal, Brasil

lariskelmer@gmail.com

Paulo Costa Braga

Escola de Ciências e Tecnologia/ECT

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Natal, Brasil

paulo.braga.083@ufrn.edu.br

Rychardson Ribeiro de Souza

Escola de Ciências e Tecnologia/ECT

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Natal, Brasil

rychard.ribeiro.souza@hotmail.com

Andres Ortiz Salazar

Departamento de Engenharia de Computação e Automação/DCA

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Natal, Brasil

andres@dca.ufrn.br

I. INTRODUÇÃO

Nesse sentido, o presente relatório objetiva abordar sobre o conteúdo discutido na disciplina que motiva este projeto, “DCA0213.0 – Eletrônica – Laboratório”, sob orientação do professor Dr. Andres Ortiz Salazar. O foco, aqui, é fazer um estudo aplicado do funcionamento e aplicação de transistores bipolares de junção. O método utilizado para tanto será o software de simulação gráfica LTspice, da empresa Analog Devices, que permite a simulação e análise de circuitos analógicos.

II. ABORDAGEM TEÓRICA

A. Transistor Bipolar de Junção

O transistor bipolar de junção, ou TBJ, é um semicondutor de três terminais, no qual o fluxo de corrente corre bidirecionalmente. Esse tipo de dispositivo pode ser utilizado como amplificador, o que significa um sinal de saída maior que o de entrada. Inicialmente, utilizar-se-á a configuração emissor-comum e, em seguida, a de amplificador com divisor de tensão na base.

1) *Amplificador Emissor Comum*: Nessa configuração, o transistor tem o terminal emissor como ponto comum entre a entrada e a saída do amplificador e, geralmente, está aterrado, o terminal coletor é a saída do amplificador, ao qual se conecta uma carga; e o terminal base é a entrada do sinal a se amplificar. Essa estrutura conta com uma fonte de corrente contínua (CC) - responsável por gerar o ponto de operação e o ganho ao amplificador; quatro resistores R_{b1} , R_{b2} , R_c e R_e ; dois capacitores de acoplamento, que visam acoplar o sinal de corrente alternada (CA) e a carga ao amplificador sem alterar a polarização (por vezes, também se utiliza de capacitores de derivação, que criam um “terra” ao sinal CA).

2) *Amplificador com Divisor de Tensão na Base*: De forma análoga, o amplificador com divisores de tensão na base é um amplificador análogo ao anterior, mas polarizado por um divisor de tensão e um resistor em sua base. Nessa configuração, há uma maior estabilidade térmica, além de um menor variação dos parâmetros de polarização.

III. EXPERIMENTOS

Os experimentos realizados foram feitos por meio de simulações no software LTspice, a fim de analisar o comportamento de transistores BTJ.

- Assim, a prática divide-se em dois momentos, em que, no primeiro, é pedido a montagem do circuito1 no LTspice, segundo os valores:

$$V_1 = 9V_{cc}; V_2 = 4.5V_{cc}; \quad (1)$$

$$R_1 = 1M\Omega; R_2 = 1.2k\Omega; \quad (2)$$

$$Q_1 = \text{BC547B}. \quad (3)$$

Com base em tais dados, era pedido:

- O ponto de operação do transistor, considerando o β típico dado pelo fabricante;
- o ponto de operação dado na simulação e uma justificativa no caso de diferenças;
- o valor de β do transistor para V_1 a 0V, 1V, 2V, 4V, 8V, 16V e 32V; e $V_2 = 10V$. Além de pedir que se explique o que ocorre com a corrente do coletor, à medida em que se aumenta a corrente de base (devido ao aumento de V_1);
- a faixa de valores de V_1 , de forma a garantir o ganho de β . Além de o que acontece com I_c caso o transistor entre em saturação devido ao V_1 ;
- tomando V_2 como uma fonte senoidal de 60HZ, 2.25 V_p e 2.25 de *offset* segundo os valores de “c”, deveria ser traçada a curva V_{CE} vs I_C .

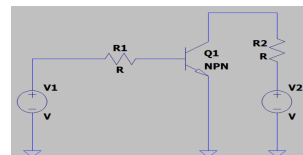


Fig. 1. Imagem 1 das instruções experimentais do professor Andrés Ortiz.

- A segunda prática pedia a montagem do circuito2 no LTspice, segundo as instruções que seguem:
 - a) o ponto de operação do transistor, considerando o β típico dado pelo fabricante;
 - b) o ponto de operação dado na simulação e uma justificativa no caso de diferenças;
 - c) a curva V_{CE} vs I_C para 4 correntes de base diferentes, considerando-se uma fonte senoidal de 60HZ e $10 V_p$ em série com uma fonte V_{CC} DE 10v, PARA $V_{BB} = 0v, 3v, 6v$ e $10V$.
 - d) o valor de β para os valores citados de V_{BB} ;
 - e) o ganho da tensão V_0 na saída, caso fosse colocado um V_i senoidal de 10 mV_p e 1kHz no ponto de operação de "a";
 - a) verificação da simetria da tensão senoidal em V_0 , a partir da comparação das amplitudes e períodos da tensões de pico positiva e negativa.

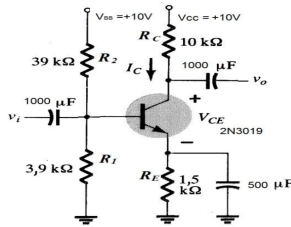


Fig. 2. Imagem 2 das instruções experimentais do professor Andrés Ortiz.

IV. RESULTADOS

Para a parte 1, primeiramente, simulou-se o circuito 1:

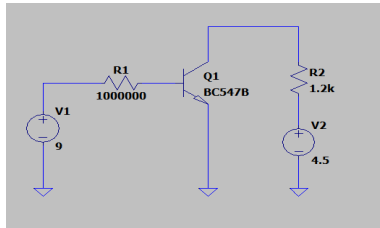


Fig. 3. Circuito na configuração emissor-comum.

Só então focou-se na resolução das questões. Assim, para "a", em que se pedia o ponto de operação, foi preciso, primeiro, achar o V_{CE} . Para achar o V_{CE} , era necessário o cálculo das correntes I_b e I_c , para as quais vale:

$$I_b = \frac{(V_{CC} - V_{be})}{R_b} \therefore (4)$$

$$V_{CC} = 9; V_{be} = 0.7; R_b = 1000000 \therefore I_b = 8.3\mu A \quad (5)$$

Para I_C , tem-se:

$$I_C = \beta \times I_b \quad (6)$$

$$\beta = 290 \therefore I_C = 2407\mu A \quad (7)$$

Assim, para obter-se V_{CE} , é utilizado:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \times R_C, \text{ em que :} \quad (8)$$

$$V_{CC} = 4.5V, I_C = 0.002407A, R_C = 1200\Omega \quad (9)$$

Logo, teremos $V_{CE} = 1.6116V$

Na sequência, para "b", percebe-se, no ponto de operação, que os valores são diferentes dos calculados. Isso se dá porque o simulador usa valores diferentes para os parâmetros, por exemplo, em I_c o ponto de operação do LTSpice nos dá $I_c = 2.37 \text{ mA}$ e o nosso V_{ce} no simulador será $1.65426V$ isso é proveniente do uso de um β diferente.

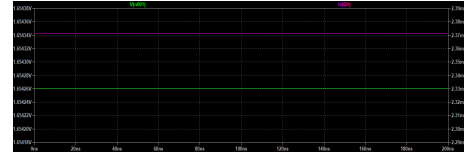


Fig. 4. Ponto de operação simulado no LTspice.

Para o item "c", adotou-se a simulação no LTSpice para achar os valores de I_c e I_b para, assim, calcular-se o β , usando a fórmula: $I_C = \beta \times I_b$

A partir do experimento, notou-se que, à medida com que se muda a tensão na fonte V_1 , não só o I_c , como o I_b também aumentava. Porém, I_b aumenta a uma taxa um pouco maior que I_c . A fim de averiguar a taxa de aumento, levou-se os valores à equação e foi possível notar que β caía à medida a tensão V_1 aumentava, já que o denominador I_b aumentava a uma taxa maior que o numerador I_c .

A corrente no coletor (I_c) irá aumentar conforme o aumento da corrente de base (I_b) e o β representa quantas vezes a corrente no coletor é maior que a corrente de base. Assim, o valor de β para as diferentes tensões (0V, 1V, 2V, 4V, 8V, 16V, 32V), respectivamente, foi: (1.003; 324.25; 323.45; 319.36; 310.5; 293.77; 260.44)

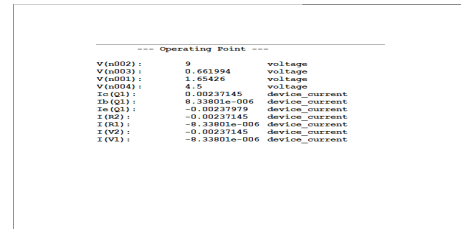


Fig. 5. Ponto de operação.

Para "d", retomando o circuito original 1, com $V_2 = 4.5V$, para obter-se um ganho de 290 vezes, conforme o β informado pelo fabricante no *datasheet*, precisa-se de uma voltagem em $V_1 = 6.25V$

Quando o transistor for saturado, ter-se-á um ponto de intersecção entre a reta de carga e a curva, onde o circuito funcionará como uma chave fechada entre o coletor e o emissor. Na região de saturação, a corrente no coletor (I_c) será máxima.

Em "e", tem-se o gráfico de V_{ce} x I_c , segundo 7 temos a região de saturação com um I_c máximo para V_1 em 16V e 32V, atingindo em torno de 3.6 mA, a região ativa é representada pela nossa curva rosa que o V_1 está em 8V e que a nossa corrente está na faixa de 2.0 mA.

Quanto às outras 4 curvas abaixo da região ativa, nossa fonte V_1 assume valores de 4V, 2V, 1V e 0.2V respectivamente, de cima para baixo e fazem menção a região de corte, com a corrente se aproximando de 0 mA.

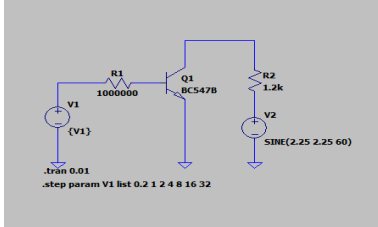


Fig. 6. Circuito para fonte senoidal.

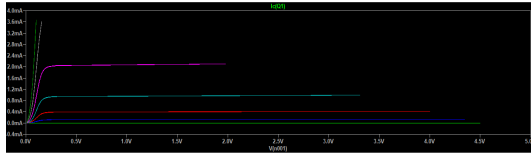


Fig. 7. Gráfico V_{ce} x I_c para fonte senoidal.

Já na parte 2, tem-se:

Para "a", sabendo que $\beta = 200$ segundo fabricante, tem-se que, a fim de encontrar o ponto de operação do circuito 2 com Thévenin, precisa-se, primeiramente, achar o R_{th} e o E_{th} e, para isso, precisa-se fazer o uso do método de Thévenin e chegaremos no circuito da figura 8.

$$R_{th} = R_1 || R_2 = \frac{39k \times 3.9k}{39k + 3.9k} = 3.545K \quad (10)$$

$$E_{th} = \frac{R_2 \times V_{bb}}{R_1 + R_2} = \frac{3.9k \times 10}{39k + 3.9k} = 0.909V \quad (11)$$

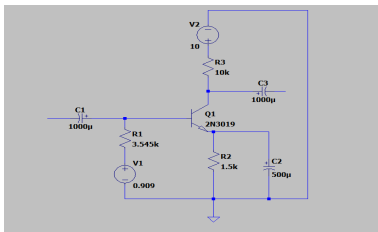


Fig. 8. Circuito montado com método de Thevenin.

Agora que obtivemos a resistência e a tensão, com isso, podemos simular o circuito completo após o uso do método de Thévenin, explicitado na figura 9.

Pode-se, então, calcular I_b com a seguinte relação:

$$I_b = \frac{E_{th} - V_{be}}{R_{th} + (\beta + 1) \times R_4} = \frac{0.909 - 0.7}{3.545k + (200 + 1) \times 1.5k} = 0.6851\mu A \quad (12)$$

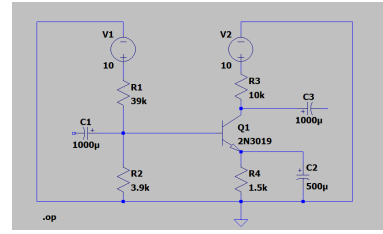


Fig. 9. Circuito simulado no LTSpice.

$$I_c = \beta \times I_b = 200 \times 0.6851 = 137.02\mu A \quad (13)$$

$$V_{CC} = 10V \therefore V_{CE} = V_{CC} - I_c(R_3 + R_4) = 8.424V \quad (14)$$

Logo, o ponto de operação será: (8.424 ; 137.02µ)

Para "b", notou-se que, no LTSpice, o ponto de operação será diferente. De acordo com a figura 10, pode-se perceber uma dessas diferenças já, já que o I_c na simulação é de 200.8 µA, enquanto o calculado é de 137.02µA. Essa diferença é devido ao uso de um β diferente no simulador, o que influencia diretamente no valor de I_c , já que $I_c = \beta \cdot I_b$.

--- Operating Point ---			
V(n002) :	10	voltage	
V(n005) :	0.905766	voltage	
V(n001) :	0.000904861	voltage	
V(n003) :	7.99386	voltage	
V(n006) :	0.302628	voltage	
V(n001) :	10	voltage	
V(n004) :	0.00796388	voltage	
Ic(Q1) :	0.000200814	device_current	
Ib(Q1) :	9.37858e-007	device_current	
Ie(Q1) :	-0.000201752	device_current	
I(C3) :	7.98386e-015	device_current	
I(C2) :	1.51314e-016	device_current	
I(C1) :	0.04861e-016	device_current	
I(R4) :	0.000201752	device_current	
I(R3) :	0.000200814	device_current	
I(R2) :	0.000232248	device_current	
I(R1) :	0.000233185	device_current	
I(V2) :	-0.000200814	device_current	
I(V1) :	-0.000233185	device_current	

Fig. 10. Ponto de operação.

o V_{CE} , conforme mostrado na figura 11, é de 7.6892V. Logo, o ponto de operação será: (7.6892 ; 200.8µ)

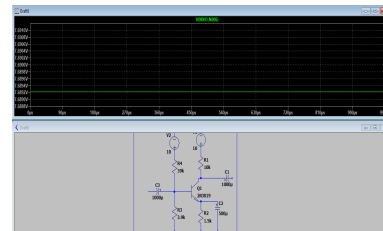


Fig. 11. Tensão V_{ce} no LTSpice.

Para "c", obteve-se o comportamento esperado para V_1 segundo a curva azul ciano, que contempla os valores de 6V e 10V para V_1 . Desta forma, a curva em vermelho ($V_1 = 3V$) e a curva em azul escuro ($V_1 = 0V$) mostram que não foram bem representadas pelo simulador devido às suas correntes baixíssimas.

Para "d", encontrou-se os valores de β nas condições do V_{be} do "c", basta utilizar as fórmulas já mencionadas em "a".

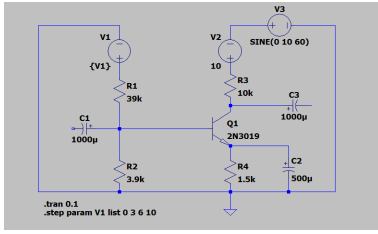


Fig. 12. Circuito com fonte senoidal para valores de Vbb.

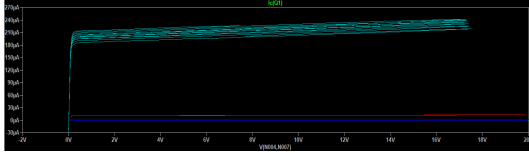


Fig. 13. Gráfico para Vbb com fonte senoidal.

Para $V1(V_{bb}) = 0V$

$$E_{th} = (R2 * V_{bb}) / (R1 + R2) = (3.9k * 0) / (39k + 3.9k) = 0V \quad (15)$$

$$R_{th} = 3.545k \text{ (Calculado no item A)} \quad (16)$$

$$I_b = (E_{th} - V_{be}) / (R_{th} + (\beta + 1) * R_4) = (0 - 0.7) / (3.545k + (200 + 1) * 1.5k) = -2.294 \mu A \quad (17)$$

$$I_c = 137.02 \mu \text{ (calculado no item A)}$$

$$B = I_c / I_b = 137.02 \mu / -2.294 = -59.733$$

Desta forma, essa sequência de passos irá se repetir para os próximos valores de $V1 (V_{bb})$, que serão 3V, 6V e 10V, em que só se precisará substituir o valor do V_{bb} e gerar um novo E_{th} , assim como I_b , a fim de se encontrar os valores de β para as voltagens pedidas.

Para $V1 (V_{bb}) = 3V$: $\beta = -97.66$ Para $V1 (V_{bb}) = 6V$: $\beta = -269.88$ Para $V1 (V_{bb}) = 10V$: $\beta = 200$

Para "e", com uma fonte V_i na figura 13, obtivemos um valor de 10.40V como máximo para V_0 , enquanto sem o sinal V_i , representado na figura 11, teve-se um valor máximo de 9.83V, o que representa um ganho de 5.8% quando colocamos uma fonte V_i .

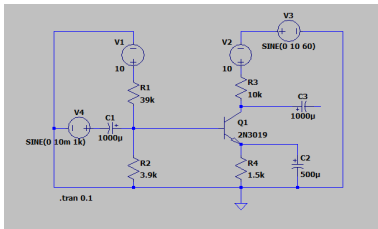


Fig. 14. Circuito para o ganho de tensão com fonte V_i .

Para "f", a tensão não está simétrica, no eixo positivo possuímos um pico de 10.40V, enquanto no eixo negativo, é atingido -7.67V, além de que o gráfico apresenta oscilações,

para corrigirmos isso, podemos alterar o valor do resistor de R_2 no circuito original, desta forma teremos uma tensão de saída simétrica e sem interferências.

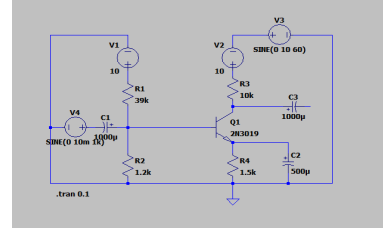


Fig. 15. Circuito para V_i simétrico com resistor R_2 de 1.2k.

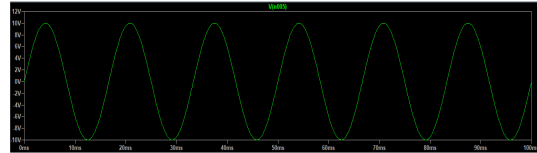


Fig. 16. Gráfico simétrico com fonte V_i .

Nota-se que com um R_2 de 1.2kOhm, as interferências já não são mais perceptíveis, conforme observado na figura 16.

V. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Percebe-se que a configuração emissor-comum é muito importante na operação dos circuitos, tendo utilidade na análise de ganho de tensão e de corrente, servindo como amplificador, que com a manipulação do circuito nos permite controlar esses ganhos conforme o desejado. Durante a experimentação, também notou-se que os resultados teóricos podem divergir dos resultados experimentais, seja pelo uso de uma voltagem diferente do software escolhido, ou pelo uso de diferentes valores de ganhos, já que o transistor pode apresentar variações de acordo com o fabricante.

Nos circuitos amplificadores, notou-se que variações na resistência e tensão, resultam significativamente em mudanças na saída, com interferências no gráfico ou no ganho desejado.

REFERENCES

- [1] BOYLESTAD, Roberto. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. PHB, Rio de Janeiro, 1999.