

# EE531 - Laboratório de Eletrônica Básica I

## Experiência II – Transistores Bipolares

Prof. J. A. SIQUEIRA DIAS - DEMIC/FEEC/UNICAMP

1º Semestre de 2007

### 1 Objetivo

Levantar a curva característica de um transistor bipolar e identificar o comportamento do dispositivo em cada um das regiões. Calcular, a partir dos dados medidos, os principais parâmetros elétricos dos transistores. Fazer medidas em um circuito translinear, que explora a dependência exponencial da corrente de coletor  $I_C$  com a tensão  $V_{BE}$ . Comparar os resultados experimentais com os resultados teóricos e com valores obtidos através de simulação no SPICE.

### 2 Introdução

O transistor bipolar é o componente mais utilizado em projetos de circuitos analógicos de alto desempenho. Este componente se destaca pelo fato de que a característica de  $I_C \times V_{BE}$ , dada por

$$I = I_s \left[ e^{\left( \frac{V_{BE}}{\eta V_T} \right)} - 1 \right], \quad (1)$$

é válida, com altíssima precisão, para uma ampla faixa de correntes (muitas vezes chegando a mais de seis ordens de grandeza na corrente), e o valor de  $\eta$  para transistores integrados de boa qualidade, é praticamente 1,0. Valores típicos encontrados são de  $\eta$  variando na faixa de 1,001 a 1,01, para correntes de coletor variando em uma faixa de até 6 décadas de corrente, como, por exemplo de  $I_C = 1 \text{ nA}$  até  $I_C = 1 \text{ mA}$ .

Devido a esta grande estabilidade e extrema confiabilidade na relação  $I_C \times V_{BE}$ , muitos circuitos são projetados usando esta característica. Como exemplo de aplicação de circuitos que usam esta característica, temos os amplificadores logarítmicos, os multiplicadores analógicos e todos os circuitos da classe chamada de *translineares*.

### 3 Circuitos translineares

Os circuitos translineares foram propostos por Gilbert [1]-[2], sendo o seu princípio de funcionamento muito simples. O chamado "princípio translinear" pode ser enunciado da seguinte forma:

Em uma malha fechada contendo um número par de junções ideais, arranjadas de forma que o número de junções no sentido anti-horário seja igual ao número de junções no sentido horário, sem nenhum outro tipo de gerador de tensão dentro desta malha, o produto das densidades de corrente no sentido anti-horário é igual ao produto das densidades de corrente no sentido horário.

Este princípio pode ser demonstrado facilmente, com auxílio do circuito apresentado na Fig.1, onde vemos um exemplo de malha translinear com quatro junções no sentido horário e quatro no sentido anti-horário.

A soma de todas as tensões na malha tem que ser nula, pois não existe nenhum gerador de tensão na malha. Logo temos que:

$$\sum V_{Fk} = 0, \quad (2)$$

onde  $V_F$  é a queda de tensão na junção. Normalmente, nos circuitos translineares, os diodos são as junções base-emissor de transistores (NPN ou PNP, não importa). Portanto, as tensões  $V_K$  são as tensões  $V_{BE}$  dos transistores e as correntes que circulam nas junções são as correntes de coletor  $I_C$  dos transistores.

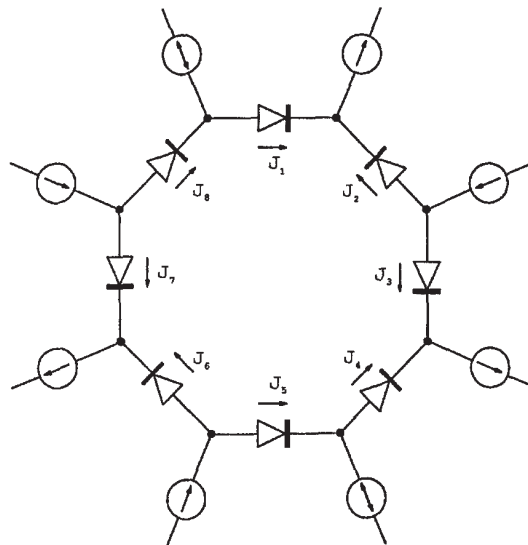


Figura 1: Malha translinear

Lembrando que para  $V_{BE} > 400$  mV

$$I_C = I_s \left[ e^{\left( \frac{V_{BE}}{\eta V_T} \right)} \right], \quad (3)$$

podemos escrever que:

$$V_{BE} = \eta V_T \ln \frac{I_C}{I_S} \quad (4)$$

Para a malha da Fig. 1, para que a Eq.(2) seja verdade, temos:

$$V_{BE1} + V_{BE3} + V_{BE6} + V_{BE8} = V_{BE2} + V_{BE4} + V_{BE5} + V_{BE7} \quad (5)$$

Substituindo a expressão de  $V_{BE}$  dado pela Eq.(4) na Eq.(5), temos:

$$\eta V_T \ln \frac{I_{C1} I_{C3} I_{C6} I_{C8}}{I_S^4} = \eta V_T \ln \frac{I_{C2} I_{C4} I_{C5} I_{C7}}{I_S^4} \quad (6)$$

Em um circuito integrado podemos assumir que todos os transistores são casados, ou seja, possuem o mesmo  $I_S$ , o mesmo  $\eta$  e que também estão à mesma temperatura (e portanto têm o mesmo  $V_T$ ). Com isso podemos simplificar a Eq.(6) e escrever que:

$$I_{C1} I_{C3} I_{C6} I_{C8} = I_{C2} I_{C4} I_{C5} I_{C7} \quad (7)$$

ou seja, o produto das correntes no sentido anti-horário é igual ao produto das correntes no sentido horário.

## 4 Parte Experimental

O circuito a ser estudado é o translinear apresentado na Fig.2, onde todos os transistores são idênticos, pois são fabricados em um circuito integrado monolítico, o "array" de transistores LM 3046.

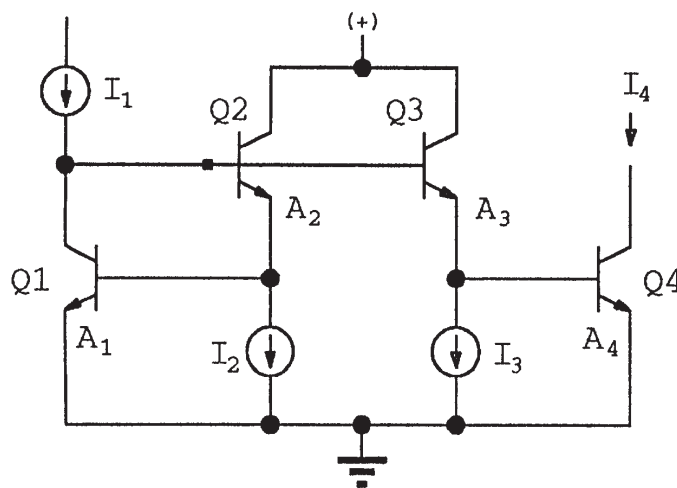


Figura 2: Circuito translinear

Para este circuito:

1. Encontre a malha translinear e, usando o princípio translinear, calcule o valor de  $I_4$ , supondo que as correntes  $I_1, I_2$  e  $I_3$  são os sinais de entrada.
2. Caracterize um transistor do LM 3046, medindo  $I_C \times V_{BE}$  e descubra em que região de correntes  $I_C$  ele funcionará bem com elemento de um circuito translinear.

A pinagem do LM 3046 é apresentada na Fig.3. Atenção ao pino 13 (substrato)! A isolação entre os transistores é feita através de junções polarizadas reversamente, sendo que, para essa técnica de isolação funcionar corretamente, é necessário garantir que a junção formada pelo substrato tipo  $P$  do CI (pino 13) e as ilhas tipo  $N$  (coletores dos transistores) nunca fique polarizada diretamente. Uma forma simples de garantir isso é ligar o substrato sempre ao menor potencial do CI.

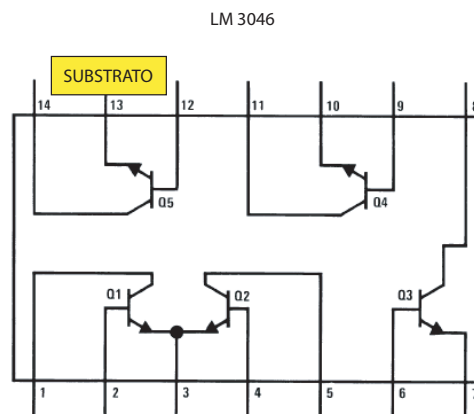


Figura 3: O LM 3046

3. Projete as fontes de corrente  $I_1, I_2$  e  $I_3$ , cuja implementação se dá baseada no conceito de *espelhos de corrente*. Faça  $I_3$  constante e  $I_1$  e  $I_2$  podendo variar em uma ampla faixa, de acordo com a caracterização realizada anteriormente. Verifique se os valores que você calculou para serem usados em  $I - 1, I_2$  e  $I_3$  fazem com que  $I_4$  continue em uma faixa onde a expressão dada pela Eq.(3) seja válida.

Os resistores  $R_1$  e  $R_2$ , em série com os potenciômetros  $P_1$  e  $P_2$ , servem para limitar a corrente nos transistores  $Q_1$  e  $Q_2$  quando os potenciômetros estão com resistência nula entre os seus terminais. Calcule os conjuntos Resistor/Potenciômetro de forma que:

- a corrente seja limitada em valores seguros (máximo de 10 mA);
- a variação do potenciômetro entre seus valores extremos (0 e  $R_{P_{max}}$ ) permita variar as correntes na faixa completa de valores desejados.

4. Monte o circuito completo apresentado na Fig.4 e meça  $I_4$ , com  $I_1$  e  $I_2$  variando de acordo com os valores

calculados. O valor de  $I_4$  é medido através da queda de tensão em  $R_4$ . Ao calcular  $R_4$ , tome o cuidado para que a queda de tensão sobre ele não seja maior do que 1 Volt, de forma a não alterar muito a tensão  $V_{CE}$  sobre o transistor  $Q_4$ , e fazer com que o efeito de modulação na base dele afete a precisão do circuito. Compare os resultados das medidas com o valor esperado para  $I_4$  calculado através do princípio translinear.

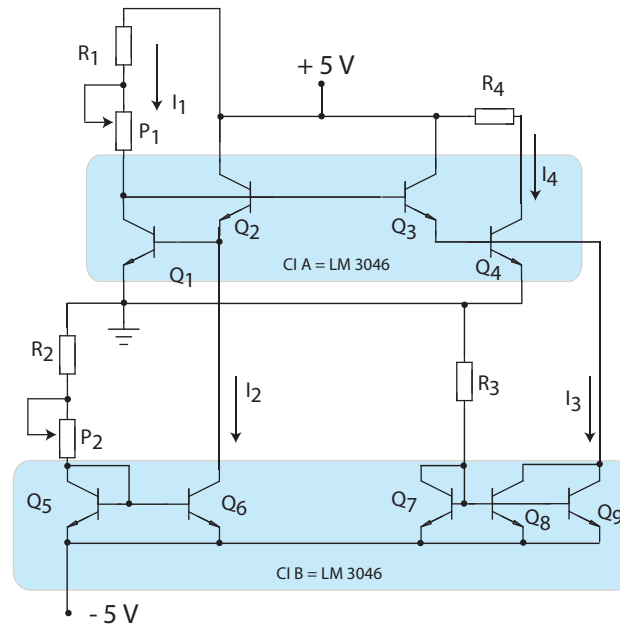


Figura 4: Circuito completo

**Atenção:** Evite trabalhar com correntes muito altas em apenas um dos transistores, para evitar gradientes de temperatura dentro do LM 3046 e invalidar a aproximação que foi feita, onde assumiu-se que todos os transistores operam à mesma temperatura. Para isso, é necessário cuidado ao escolher os valores de  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ .

## Referências

- [1] B. Gilbert, "Translinear circuits: a proposed classification," *Electronics Letters* 11(1), pp. 14-16; and errata, 11(6), p. 136.
- [2] B. Gilbert, "Translinear Circuits: An Historical Overview", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 9, pp. 95-118, 1996.