

### Aula prática-9 (Influência da temperatura no ponto de operação do transistor bipolar)

1) Utilizando o simulador **Multisim**:

- 1.1. Efetue uma varredura paramétrica associada à simulação do ponto de operação no circuito da Figura 1 para determinar o valor de R1 para o qual  $V_{c1}=2,5V$ . Observe que a temperatura padrão considerada no simulador é  $t=27^{\circ}C$ . Portanto, o ponto de operação determinado corresponde a esta temperatura.
- 1.2. Com o valor de R1 determinado, efetue uma varredura de temperatura (*Temperature Sweep*) de  $0^{\circ}C$  a  $60^{\circ}C$  e verifique o comportamento de  $V_{c1}$ . Justifique o resultado obtido.
- 1.3. Acrescente a fonte de sinal  $V_e$ , conforme a Figura 2, atribuindo a  $V_e$  a seguinte característica: senóide de 1KHz com amplitude pico a pico de 100mV e offset nulo. Nestas condições, por meio de simulações de transiente, determine os ganhos incrementais ( $v_{c1}/v_e$ ) nas temperaturas  $10^{\circ}C$ ,  $27^{\circ}C$  e  $60^{\circ}C$ . Justifique os resultados obtidos com base nas variações de  $V_t$  (tensão termodinâmica) e  $r_e$  (inverso da transcondutância) com a temperatura.

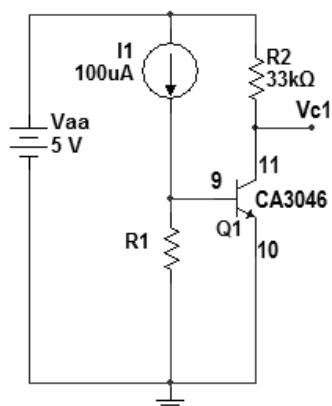


Figura 1

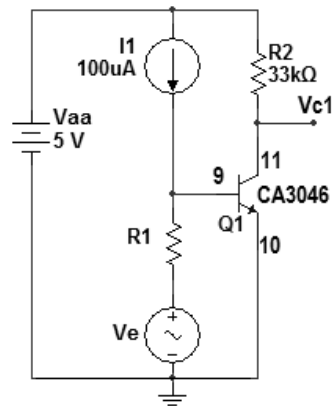


Figura 2

2) Monte o circuito da Figura 3 usando os transistores do circuito integrado CA3046, conforme identificados.

Ajuste o gerador de funções para que o sinal  $V_{bh}$  seja uma onda quadrada de 0,1Hz, amplitude de 5Vpp e tensão de offset de 2.5V. Nestas condições:

- 2.1. Obtenha as formas de onda do sinal  $V_s$  para as seguintes amplitudes de  $V_{ch}$ : 7V, 9V, 12V e 15V.
- 2.2. Trace um gráfico relacionando a variação de  $V_s$  com a potência dissipada em Q3//Q4.

Explique o funcionamento do circuito e justifique os resultados obtidos.

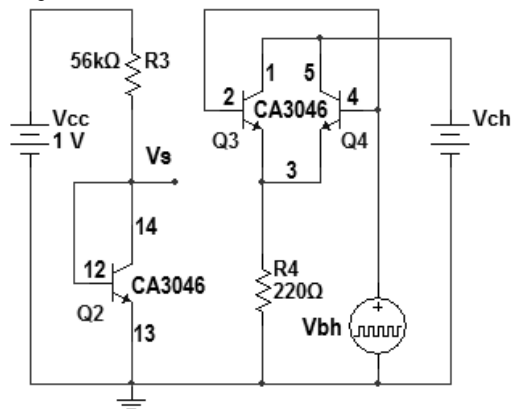


Figura 3

3) Conforme mostra a Figura 4, acrescente ao circuito já montado o amplificador de tensão que utiliza o transistor Q1. Para implementar a fonte de corrente I1, utilize o circuito correspondente visto na aula prática 6. Nestas condições:

- 3.1. Mantendo  $V_{ch}=15V$  e o gerador de funções desabilitado ( $V_{bh}=0$ ), verifique se o valor de  $R1$  determinado por meio das simulações realizadas no item 1.1 faz com que  $V_{c1}=2,5V$ . Se não for, ajuste  $R1$  usando um trimpot multivoltas.
- 3.2. Habilite o gerador de funções ( $V_{bh}$  = onda quadrada de 0,1Hz, 6Vpp e  $V_{offset}=3V$ ) e obtenha as formas de onda de  $V_{c1}$  atribuindo a  $V_{ch}$  as amplitudes de 7V, 9V, 12V e 15V. Justifique os resultados.

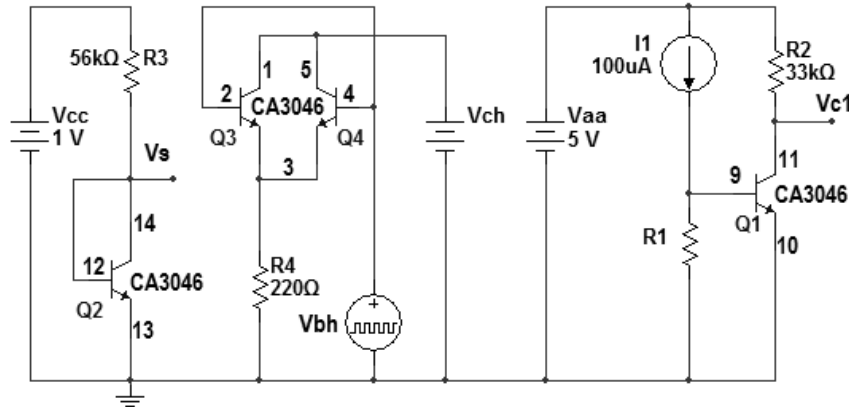


Figura 4

- 3.3. Mantendo  $V_{ch}=15V$ , mude o sinal  $V_{bh}$  para uma onda triangular com fator de simetria de 100% (rampa), 6Vpp,  $V_{offset}=3V$  e frequência de 0,1Hz. Obtenha a forma de onda de  $V_{c1}$  e justifique o resultado obtido.

4) Utilizando o simulador **Multisim**:

- 4.1. Efetue uma varredura paramétrica associada à simulação do ponto de operação no circuito da Figura 5 para determinar o valor de  $R1$  para o qual  $V_{c1}=2,5V$ .
- 4.2. Com o valor de  $R1$  determinado, efetue uma varredura de temperatura (*Temperature Sweep*) de 0°C a 60°C e verifique o comportamento de  $V_{c1}$ . Compare o resultado obtido com o que foi obtido no item 1.2. Justifique.

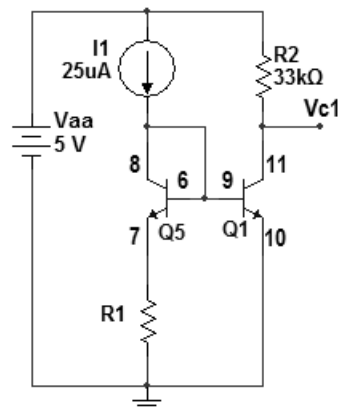
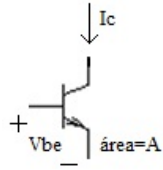


Figura 5

## Características térmicas do transistor bipolar



$$J_c = \frac{I_c}{A}$$

A dependência da tensão entre base e emissor de um transistor bipolar,  $V_{be}$ , com a Temperatura está bem estabelecida através da equação de Shockley. Admitindo que o transistor opere na condição em que  $V_{cb} \approx 0$ , então:

$$J_c = J_s \left[ e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right] \cong J_s e^{\frac{V_{BE}}{V_t}}$$

Onde:

$J_c$  = Densidade de corrente de coletor

$V_t$  = Tensão térmica ( $kT/q$ )

$J_s$  = Densidade de corrente de saturação reversa

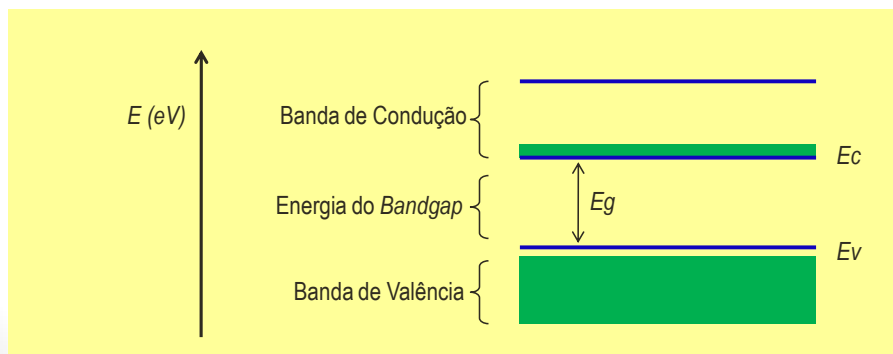
A densidade de corrente de saturação reversa é definida como:

$$J_s \cong C T^n e^{\frac{-V_g}{V_t}}$$

$C, n$  = Constantes características do material e do processo de fabricação

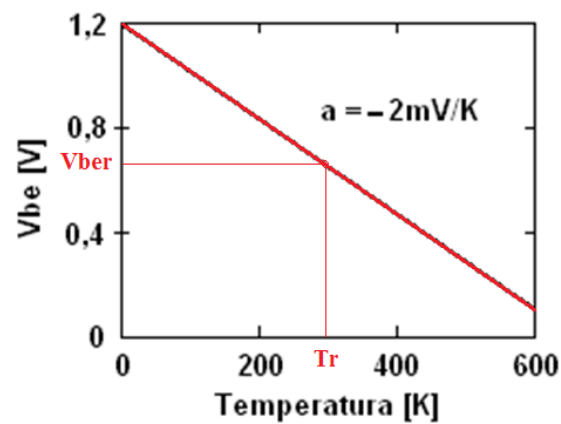
$V_g$  = Tensão equivalente à energia da banda proibida (Bandgap) do Silício, cuja variação por efeito térmico é, em primeira ordem, linear; ou seja

$$V_g = V_g(T) \cong V_{go} - \alpha \cdot T$$



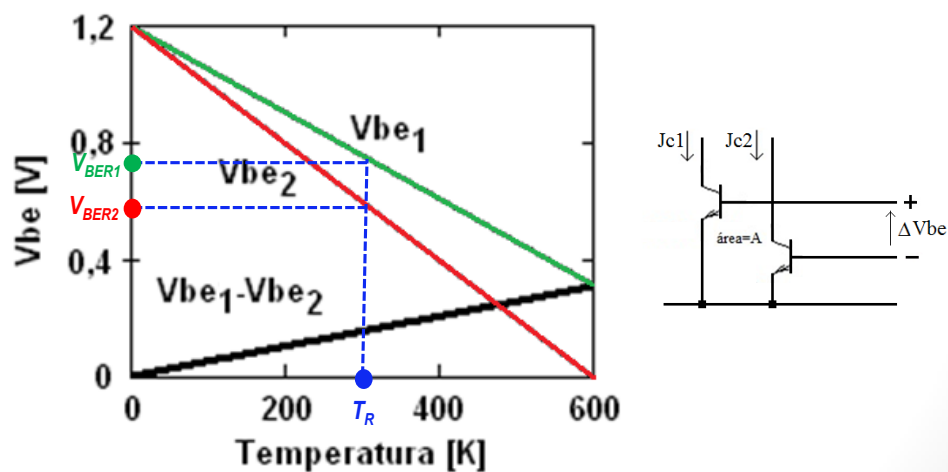
Após algumas transformações com as equações anteriores chega-se à seguinte expressão simplificada para  $V_{be}=V_{be}(T)$ :

$$V_{BE} = V_{BE}(T) \cong V_{go} - aT$$



Para dois transistores que operem com diferentes densidades de corrente de coletor, a diferença entre suas tensões  $V_{BE}$  é dada por:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \left( \frac{V_{BER1} - V_{BER2}}{T_R} \right) T$$



Uma forma alternativa de expressar a diferença entre as tensões  $V_{be}$  dos transistores:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \cdot \ln \frac{J_{C1}}{J_{C2}}$$

Onde  $J_{C1}$  e  $J_{C2}$  correspondem às densidades de corrente de coletor dos transistores considerados

Se a razão entre as densidades de corrente dos transistores for constante, por exemplo mantendo a mesma corrente de coletor nos dois transistores que por sua vez têm áreas de emissor distintas, então fica evidente a RELAÇÃO LINEAR que há entre  $\Delta V_{be}$  e a temperatura absoluta  $T$ .

$$\Delta V_{BE} = V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \frac{A_2}{A_1} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \frac{A_2}{A_1} \quad \Delta V_{BE} = \left[ \frac{k}{q} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \frac{A_2}{A_1} \right] T$$

constante

Considerando um transistor que opere em condições onde  $V_{cb} \cong 0$  e que a queda de potencial na região do coletor seja desprezível, então a relação Corrente de Coletor versus Tensão Base-Emissor obedece a equação de Shockley.

Nestas condições, a corrente de saturação reversa,  $I_s$ , é dada por

$$I_s = \frac{q^2 \cdot A e^2 \cdot n_i^2 \cdot D_n}{Q_B}$$

$$I_s = \frac{q \cdot A e \cdot n_i^2 \cdot D_n}{N_A \cdot W_B}$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad \text{Relação de Einstein}$$

Considerando que a concentração intrínseca depende da temperatura através da relação:

$$ni^2 = C \cdot \left( \frac{T}{T_R} \right)^3 \cdot e^{-\frac{Vg}{Vt}}$$

C é uma constante e Vg é a tensão de Bandgap do semiconductor

$$I_S = I_{S_R} \cdot \left( \frac{T}{T_R} \right)^4 \cdot e^{-\frac{Vg}{Vt}} \cdot \frac{\mu_n}{\mu_{nR}}$$

Sendo  $I_{S_R}$  a corrente de saturação reversa na temperatura  $T_R$  e dada por

$$I_{S_R} = \frac{k \cdot T_R \cdot A \cdot e \cdot C \cdot \mu_{nR}}{N_A \cdot W_B}$$

$\mu_{nR}$  é o valor da mobilidade dos elétrons na base medida na temperatura de referência  $T_R$

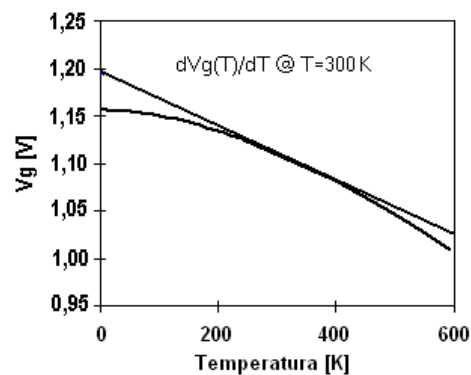
Por substituição:

$$I_C = I_{S_R} \left( \frac{T}{T_R} \right)^4 \left( \frac{\mu_n}{\mu_{nR}} \right) \cdot e^{-\frac{V_{BE} - Vg}{Vt}}$$

Conseqüentemente:

$$V_{BE} = Vg + (V_{BER} - Vg_R) \frac{T}{T_R} + Vt \cdot \ln \frac{I_C}{I_{C_R}} - 4Vt \cdot \ln \frac{T}{T_R} - Vt \cdot \ln \frac{\mu_n}{\mu_{nR}}$$

Vg varia em temperatura de forma linear, seguindo o comportamento da reta tangente à função de Varshni para o Silício.



$$\mu_n(T) = \mu_n \left( \frac{T}{T_R} \right)^{-\eta}$$

onde  $\eta$  é uma constante. Por substituição:

$$V_{BE}(T) = V_{go} - \left( \frac{V_{go} - V_{BER}}{T_R} \right) T - (4 - \eta) \cdot V_t \cdot \ln \frac{T}{T_R} + V_t \cdot \ln \frac{I_c}{I_{cR}}$$

Se a corrente de coletor com a qual o transistor opera varia de forma proporcional à temperatura absoluta (PTAT), tal como:

$$I_c = I_{cR} \cdot \frac{T}{T_R}$$

então:

$$V_{BE}(T) = V_{go} - \left( \frac{V_{go} - V_{BER}}{T_R} \right) T - (m - 1) \cdot V_t \cdot \ln \frac{T}{T_R}$$

Os parâmetros  $m$  e  $V_{go}$  são determinados pelo ajuste desta função a dados experimentais

Esta equação mostra a dependência da tensão  $V_{BE}$  com a temperatura. Os dois primeiros termos evidenciam uma relação linear decrescente enquanto o último termo introduz uma componente não linear cuja amplitude máxima, no entanto, é muito menor que as anteriores.

Como a variação da tensão  $V_{be}$  de um transistor bipolar polarizado com corrente PTAT é praticamente linear, conforme mostra a curva abaixo, o transistor é um bom dispositivo para ser usado como sensor de temperatura em diversas aplicações.

