

## Trabajo Práctico

### Transistor Bipolar de Juntura

#### Objetivos

Se estudiará el dispositivo TBJ NPN BC547C a partir del modelo de simulación provisto por el *software* LTSpice. Los objetivos del trabajo son:

- Simular las curvas características corriente–tensión de un transistor TBJ NPN.
- Obtener a partir de los resultados de simulación, algunos de los parámetros característicos del transistor.
- Calcular a partir de los parámetros obtenidos y utilizando el modelo de pequeña señal, las figuras de mérito del transistor.
- Obtener a partir de simulaciones, las figuras de mérito del transistor.

#### Parte 1: Curvas características

El modelo a utilizar corresponde al transistor en régimen Activo Directo (M.A.D.):

$$I_C = I_{C_0}(V_{BE}) \exp\left(\frac{V_{BE}}{m V_{th}}\right) + I_{CB_0} \quad (1)$$

$$I_B = I_{B_0} \left[ \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) - 1 \right] + I_{B_r,SCR} + I_{B_r,QNR} - I_{CB_0} \quad (2)$$

donde

- $I_{B_r,SCR}$  es la corriente de recombinación en la SCR de la juntura Base–Emisor y responde a la ecuación:

$$I_{B_r,SCR} = I_{B_r,0} \left[ \exp\left(\frac{V_{BE}}{2 V_{th}}\right) - 1 \right]$$

- $I_{B_r,QNR}$  es la corriente de recombinación en la QNR de la Base y se considerará despreciable:  $I_{B_r,QNR} \approx 0$ .
- $I_{CB_0}$  representa a la corriente de saturación inversa de la juntura Base–Colector<sup>[1]</sup>.

#### Curvas de transferencia/entrada

Simular en LTSpice el circuito de la figura 1 para  $V_{CE} = 3\text{ V}$ , variando la tensión  $V_{BE} = \{0\text{ V}; 1\text{ V}\}$  de a pasos de 1 mV (comando .dc) y exportar para su procesamiento y análisis las variables  $I_C$  y  $I_B$ .

Considerando que para  $V_{BE} = 0$ :

$$I_C = I_{C_0} + I_{CB_0} \quad \wedge \quad I_B = -I_{CB_0}$$

---

<sup>[1]</sup>Al estar la juntura Base–Colector en inversa, la corriente ingresa por Colector, sumándose a la corriente  $I_C$  y sale por Base, restando a la corriente  $I_B$ .

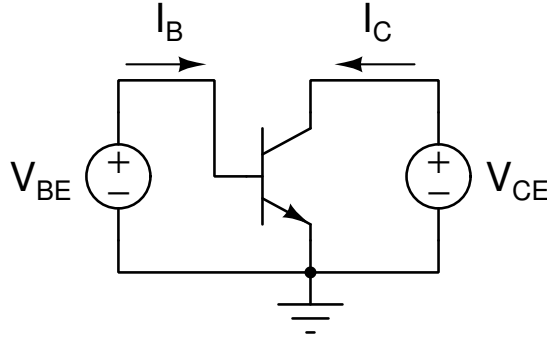


Figura 1: Circuito esquemático para la simulación de las curvas características del transistor.

1. A partir de la corriente  $I_B$ , obtener el valor de  $I_{CB_0}$  y reportarlo.
2. Realizar un gráfico [FIG01] en escala semilogarítmica de las corrientes  $I_C - I_{CB_0}$  y  $I_B + I_{CB_0}$  en función de  $V_{BE}$ .
3. Sobre estas curvas, se deben obtener distintos ajustes para la obtención de los parámetros. Considerando que cuando  $V_{BE} \gg V_{th}$  los términos exponenciales son dominantes, en todos los casos se puede aproximar que:

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{V_{BE}}{m V_{th}} = a V_{BE} + b \quad (3)$$

con  $a = (m V_{th})^{-1}$  y  $b = \ln(I_0)$ .

Indicando claramente los rangos de tensión utilizados para cada uno de los siguientes ajustes, se deben obtener los parámetros descritos a continuación:

- a) Para tensiones  $V_{BE}$  bajas se debe obtener  $I_{B_{r,0}}$  a partir del ajuste de la ecuación de  $I_B$ :

$$I_B + I_{CB_0} \approx I_{B_{r,0}} \exp\left(\frac{V_{BE}}{2 V_{th}}\right) \Rightarrow \ln(I_B + I_{CB_0}) \approx \ln(I_{B_{r,0}}) + \frac{V_{BE}}{2 V_{th}}$$

- b) Para tensiones  $V_{BE}$  medias donde el efecto de  $r_b$  sea despreciable, se debe obtener  $I_{B_0}$  a partir del ajuste de la ecuación de  $I_B$ :

$$I_B + I_{CB_0} \approx I_{B_0} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) \Rightarrow \ln(I_B + I_{CB_0}) \approx \ln(I_{B_0}) + \frac{V_{BE}}{V_{th}}$$

- c) Para tensiones  $V_{BE}$  medias donde es válida la hipótesis de bajo nivel de inyección (BNI) y el efecto de  $r_b$  sea despreciable, se debe obtener  $I_{C_0} = I_{C_0}^{(BNI)}$  a partir del ajuste de la ecuación de  $I_C$ :

$$I_C - I_{CB_0} \approx I_{C_0} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) \Rightarrow \ln(I_C - I_{CB_0}) \approx \ln(I_{C_0}) + \frac{V_{BE}}{V_{th}}$$

- d) Para tensiones  $V_{BE}$  altas donde se manifiestan los efectos de tener alto nivel de inyección (ANI) en la Base, y considerando despreciable el efecto de  $r_b$ , se debe obtener  $I_{C_0} = I_{C_0}^{(ANI)}$  a partir del ajuste de la ecuación de  $I_C$ :

$$I_C - I_{CB_0} \approx I_{C_0} \exp\left(\frac{V_{BE}}{2 V_{th}}\right) \Rightarrow \ln(I_C - I_{CB_0}) \approx \ln(I_{C_0}) + \frac{V_{BE}}{2 V_{th}}$$

Verificar si en todos los casos se cumple que  $V_{th}$  sea tal que  $T = 27^\circ\text{C}$ . Considerar como correcto si el valor se encuentra dentro de una dispersión del 10 % en su valor ( $\pm 2,5\text{ mV}$ ).

4. Estimar el dopaje de la base a partir de los valores de corriente de saturación en BNI ( $I_{C_0}^{(BNI)}$ ) y ANI ( $I_{C_0}^{(ANI)}$ ) obtenidos de los ajustes. ¿Es un valor lógico? ¿Qué hipótesis podría no cumplirse en caso no obtenerse un valor coherente?
5. En la figura anterior [FIG01], graficar con distintas líneas punteadas las 4 curvas de ajuste correspondiente a cada uno de los tramos analizados.
6. Calcular el parámetro  $\beta_0$  y realizar un gráfico en función de la corriente de colector en escala logarítmica para ambos ejes [FIG02].

Considerar para el cálculo:

$$\beta_0 = \frac{I_C - I_{CB_0}}{I_B + I_{CB_0}}$$

7. Calcular el parámetro  $g_m$  a partir de las diferencias finitas de la corriente  $I_C$ :

$$g_m = \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}}$$

y realizar tres gráficos:

- Un gráfico de  $g_m$  vs.  $I_C$  [FIG03]. Incluir en la figura una línea punteada con pendiente  $V_{th}^{-1}$ .
- Un gráfico de  $g_m$  vs.  $I_C$  [FIG04] en escala logarítmica en ambos ejes. Incluir en la figura una línea punteada con pendiente  $V_{th}^{-1}$ .
- Un gráfico de  $g_m/I_C$  vs.  $I_C$  en escala semilogarítmica para la corriente [FIG05]. Analizar si el valor se mantiene constante y en qué valor.

## Curvas de salida

Simular en LTSpice el circuito de la figura 1 para  $V_{BE} = \{620\text{ mV}; 665\text{ mV}; 685\text{ mV}\}$ , variando la tensión  $V_{CE} = \{0\text{ V}; 3\text{ V}\}$  de a pasos de 3 mV (comando .dc) y exportar para su procesamiento y análisis la corriente  $I_C$ .

1. Realizar un gráfico [FIG06] de la corrientes  $I_C$  en función de  $V_{CE}$  para todos los valores de  $V_{BE}$ .
2. Para cada valor de  $V_{BE}$ , se debe obtener el parámetro  $V_A$  a partir de un ajuste lineal de la corriente  $I_C$  en régimen de MAD considerando que:

$$V_A + V_{CE} = I_C \left( \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right)^{-1}$$

$$\Rightarrow I_C(V_{CE} = 0) = \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} V_A$$

$$\Rightarrow I_C = I_C(V_{CE} = 0) + \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} V_{CE} = I_C(V_{CE} = 0) \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) = a V_{BE} + b \quad (4)$$

con  $a = \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}}$  y  $b = I_C(V_{CE} = 0)$ , entonces

$$V_A = \frac{I_C(V_{CE} = 0)}{\frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}}} = \frac{b}{a} \quad (5)$$

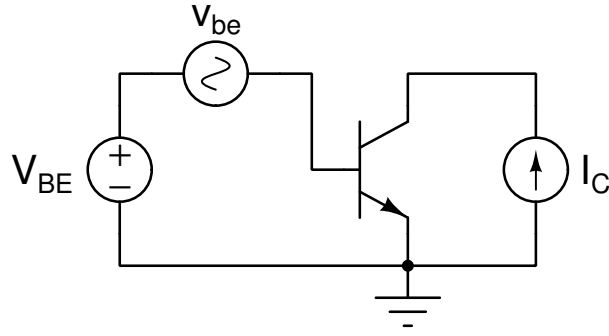


Figura 2: Circuito esquemático para la simulación de las de la ganancia intrínseca.

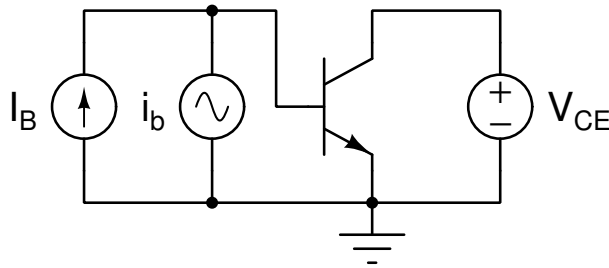


Figura 3: Circuito esquemático para la simulación de las de la respuesta en frecuencia.

Además:

$$r_o = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} = \frac{V_A}{I_C(V_{CE} = 0)} = \frac{1}{a} \quad (6)$$

Indicar claramente los rangos de tensión  $V_{CE}$  utilizados para cada uno de los ajustes.

3. En la figura [FIG06], graficar con distintas líneas punteadas las curvas de ajuste correspondiente a cada uno de los  $V_{BE}$ .

Realizar una tabla [TAB01] comparativa para cada valor de  $V_{BE}$  indicando los valores correspondientes de  $I_B$ ;  $I_C$  [FIG01];  $\beta_0$  [FIG02];  $g_m$  [FIG03];  $V_A$  y  $r_o$  [FIG06].

## Parte 2: Modelo de pequeña señal

A partir del modelo de pequeña señal, se calcularán los parámetros intrínsecos del transistor: ganancia intrínseca ( $a_v$ ) y la máxima frecuencia de trabajo ( $f_T$ ).

1. A partir de los datos calculados en la Parte 1, calcular la ganancia intrínseca del transistor ( $a_v$ ) para cada valor de  $I_C$  de la tabla [TAB01].
2. Realizar una simulación del tipo transitorio (comando `.tran`) del circuito de la figura 2 para cada valor de  $V_{BE}$  e  $I_C$  de la tabla [TAB01]<sup>[2]</sup>. Utilizar una fuente de señal de tensión senoidal con amplitud 1 mV y frecuencia  $f = 1$  kHz.

---

<sup>[2]</sup> Acomodar el valor de  $I_C$  de forma tal que la tensión  $V_{CE} \approx 3$  V.

3. Realizar un gráfico temporal [FIG07] de las señales  $v_{be}(t)$  (común para toda  $I_C$ ) y de cada  $v_{ce}(t)$  correspondiente a cada  $I_C$ . A partir de los valores picos de las señales, calcular la ganancia intrínseca para cada valor de  $I_C$ .
4. Simular el circuito de la figura 3 para cada valor de  $I_B$  de la tabla [TAB01] y para  $V_{CE} = 3\text{ V}$ . Utilizar una fuente de corriente en AC de amplitud 1, en un rango de frecuencias  $f = \{1\text{ kHz}; 1\text{ GHz}\}$  simulando 100 puntos por década. Al observar la corriente  $I_C$  como resultado de la simulación, el análisis normaliza al valor de amplitud de la fuente AC obteniéndose como resultado  $\beta(f)$ .
5. Realizar un gráfico de Bode (escala logarítmica en ambos ejes) mostrando la variación de  $\beta(f)$  [FIG08]. Determinar el valor de la ganancia de corriente en continua ( $\beta_0$ ) así como también de la frecuencia de trabajo ( $f_T$ ) a partir de la frecuencia a la cual se obtiene  $\beta = 1$ .

Realizar una tabla [TAB02] comparativa para cada valor de  $V_{BE}$  indicando los valores correspondientes de  $I_B$ ;  $I_C$  [FIG01];  $a_v$  calculado;  $a_v$  simulado [FIG07];  $\beta_0$  y  $f_T$  [FIG08].

## Condiciones de entrega

- La entrega debe ser a través del Aula Virtual en el Campus Posgrado FIUBA (<https://campusposgrado.fi.uba.ar>) en la fecha y horario publicadas en la misma Aula Virtual.
- La entrega debe ser un único documento .pdf.
- La entrega debe ser exclusivamente a través del Aula Virtual en el Campus Posgrado FIUBA. Ante cualquier inconveniente, deben comunicarse por correo electrónico a [ds\\_v02@cursoscapse.com](mailto:ds_v02@cursoscapse.com). No se recibirán informes en casillas de mail personales.