

## TP N°2: Curvas características del transistor TBJ BC548C

Accifonte, Franco - 93799  
franco.accifonte@gmail.com

Iturria, Germán - 86270  
german.iturria@gmail.com

Vázquez, Matías - 91523  
mfvazquez@gmail.com

30 de octubre de 2014

*En el siguiente trabajo se analizan las principales características de polarización y frecuencias medias de transistores TBJ tipo NPN. Estudiando las curvas de transferencia y de salida, obtenidas en mediciones, se consiguen los parámetros característicos y se calculan los parámetros de pequeña señal. Finalmente se realiza un modelo básico de Spice con los parámetros calculados y se presentan simulaciones para contrastar con las mediciones.*

### 1. Desarrollo

A continuación se detalla el desarrollo del trabajo realizado, tanto la realización de las simulaciones mediante *Spice*, como las mediciones realizadas.

#### 1.1. Simulación de transistores BC548C

En primera instancia se obtuvieron con *LTSPICE* las curvas de transferencia, la ganancia de corriente entre base y colector y las curvas de salida propias al transistor. Usando las bibliotecas PHIL\_BJT y SIEMENS proporcionadas por la cátedra.

##### 1.1.1. Curva de transferencia

Se simuló  $I_C$  vs.  $V_{BE}$  para  $V_{CE} = 1,25V$  para ambas bibliotecas. Se varió la tensión  $V_{BE}$  entre 0V y 0,9V con pasos de 0,01V, utilizando el circuito simulado en la figura 1.

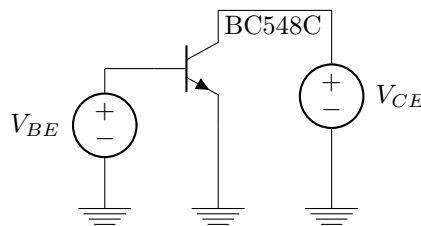


Figura 1: Circuito utilizado para la obtención de las curvas de transferencia.

##### 1.1.2. Ganancia de corriente entre base y colector

Para ambas bibliotecas se simuló el circuito de la figura 2 bajo las condiciones de medición del multímetro que se utilizará en las mediciones. Estas son  $I_B = 10\mu A$  y  $V_{CE} = 2,8V$ . Se obtuvo el parámetro BETADC del Simulation Output File.

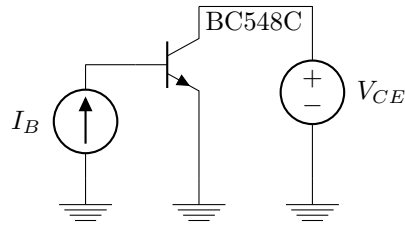


Figura 2: Circuito utilizado para la obtención de las curvas de salida y de la ganancia de corriente.

Se obtuvieron los siguientes valores:

- PHIL\_BJT:  $h_{FE} = 460$
- SIEMENS:  $h_{FE} = 432$

### 1.1.3. Curva de salida

Se simuló  $I_C$  vs.  $V_{CE}$  para  $I_B = cte$  para ambas bibliotecas. Se varió la tensión  $V_{CE}$  entre 0V y 5V con pasos de 0,01V, utilizando el circuito simulado en la figura 2.

La corriente  $I_B$  se determinó mediante la ecuación 2 para cada valor de  $I_C$  deseado, utilizando el parámetro  $h_{FE}$  correspondiente al transistor de cada biblioteca.

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad (1)$$

A continuación se listan los valores de  $I_B$  utilizados.

- PHIL\_BJT con  $h_{FE} = 460$ 
  - $I_C = 5\text{mA}$ :  $I_B = 10,9\mu\text{A}$
  - $I_C = 25\text{mA}$ :  $I_B = 54,3\mu\text{A}$
- SIEMENS con  $h_{FE} = 432$ 
  - $I_C = 5\text{mA}$ :  $I_B = 11,6\mu\text{A}$
  - $I_C = 25\text{mA}$ :  $I_B = 57,9\mu\text{A}$

## 1.2. Obtención de parámetros de las hojas de datos

### 1.3. Obtención de las curvas de forma experimental

Se obtuvieron las curvas de tres transistores **TBJ BC548C** distintos utilizando una placa experimental, un regulador de tensión **LM317** y un **LM7805**, un potenciómetro lineal de  $20\text{k}\Omega$  y resistencias de valores apropiados para cada medición. También se midió para cada transistor el valor de  $h_{FE}$  utilizando un multímetro con esta función.

#### 1.3.1. Curva de transferencia

Para obtener la curva  $i_C$  vs  $v_{BE}$  se utilizó el banco de mediciones presentado en la figura 3. El regulador de tensión **LM317** fija la tensión  $V_{CE} = 1,25\text{V}$  y el regulador de tensión **LM7805** provee una alimentación constante de 5V. El potenciómetro utilizado es de  $20\text{k}\Omega$ .

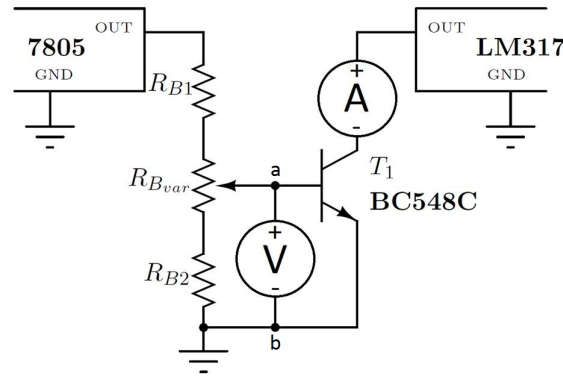


Figura 3: Circuito para la medición de la curva de transferencia  $I_C$  vs.  $V_{BE}$

Para la obtención de las resistencias  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$  se partió planteando el rango de la corriente  $I_C$  deseado y suponiendo  $h_{FE} = 200$  se obtuvo el rango de  $I_B$ .

$$0\text{mA} \leq I_C \leq 50\text{mA} \quad \Rightarrow \quad 0\mu\text{A} \leq I_B \leq 250\mu\text{A}$$

Luego se obtuvo el equivalente de Thévenin entre los terminales  $a$  y  $b$ . Para simplificar las ecuaciones se utilizó  $R_1 = R_{B1} + R_{B1var}$  y  $R_2 = R_{B2} + R_{B2var}$  con  $R_{Bvar} = R_{B1var} + R_{B2var} = 20\text{k}\Omega$ . Siendo  $R_{Bvar}$  el potenciómetro de  $20\text{k}\Omega$ .

$$V_{TH} = V_{DD} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Siendo  $V_{DD}$  la salida del regulador de tensión **LM7805**.

Del circuito mostrado en la figura 3 obtenemos la ecuación 2

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BEON}}{R_{TH}} \quad (2)$$

Reemplazando la ecuación 2 en el rango de valores deseado.

Para el mínimo valor de  $I_B$ :

$$\frac{V_{TH} - V_{BEON}}{R_{TH}} \geq 0\mu\text{A}$$

Entonces:

$$V_{TH} \geq V_{BEON} \quad (3)$$

Para el máximo valor de  $I_B$ :

$$\frac{V_{TH} - V_{BEON}}{R_{TH}} \leq 250\mu\text{A} \quad (4)$$

Con las inecuaciones 3 y 4 se buscaron valores de  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$  que las cumplan. Teniendo en cuenta que para cada inecuación los valores de  $V_{TH}$  y  $R_{TH}$  son distintos ya que dependen de  $R_1$  y  $R_2$  que varían por estar conectados a un potenciómetro y  $0,5\text{V} \leq V_{BEON} \leq 0,7\text{V}$ .

Se propusieron los siguientes valores  $R_{B1} = 5\text{k}\Omega$  y  $R_{B2} = 25\text{k}\Omega$ :

- Para  $I_B \geq 0\mu\text{A}$ :  $V_{BEON} = 0,5\text{V}$ ,  $R_1 = R_{B1} = 5\text{k}\Omega$  y  $R_2 = R_{B2} + 20\text{k}\Omega = 45\text{k}\Omega$

Obteniendo los siguientes valores para el equivalente de Thévenin:

$$V_{TH} = 0,5\text{V} \geq 0,5\text{V} = V_{BEON}$$

- Para  $I_B \leq 250\mu\text{A}$ :  $V_{BEON} = 0,7\text{V}$ ,  $R_1 = R_{B1} + 20\text{k}\Omega = 25\text{k}\Omega$  y  $R_2 = R_{B2} = 25\text{k}\Omega$

$$V_{TH} = 2,5\text{V} \quad R_{TH} = 12,5\text{k}\Omega$$

$$\frac{V_{TH} - V_{BE_{ON}}}{R_{TH}} = \frac{2,5V - 0,7V}{12,5k\Omega} = 144\mu A \leq 250\mu A$$

Entonces el valor maximo medido de  $I_C$  será:  $I_{C_{MAX}} = I_B h_{FE} = 144\mu A \cdot 200 = 28,8mA$

Como se ve los valores  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$  elegidos cumplen las condiciones esperadas.

### 1.3.2. Ganancia de corriente entre base y colector

Para obtener  $h_{FE}$  se utilizó un multímetro que realiza la medición bajo las condiciones  $I_B = 10\mu A$  y  $V_{CE} = 2,8V$

Se obtuvieron los siguientes valores para cada transistor:

- Transistor 1:  $h_{FE} = 361$
- Transistor 2:  $h_{FE} = 326$
- Transistor 3:  $h_{FE} = 253$

### 1.3.3. Curva de salida

Para obtener la curva  $i_C$  vs  $v_{CE}$  se utilizó el banco de mediciones presentado en la figura 4. El regulador de tensión **LM7805** provee una alimentación constante de 5V. El potenciómetro utilizado es de 20k $\Omega$ .

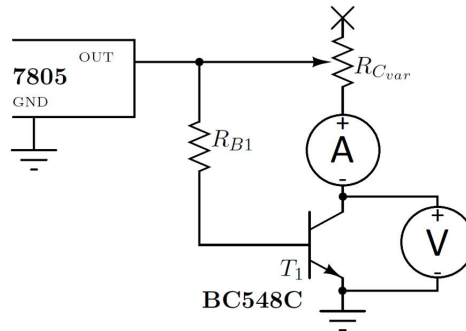


Figura 4: Circuito para la medición de la curva de salida  $I_C$  vs.  $V_{CE}$

Para la obtención de la resistencia  $R_{B1}$  planteamos la ecuación obtenida del circuito mostrado en la figura 4:

$$R_{B1} = \frac{V_{DD} - V_{BE_{ON}}}{I_B}$$

Y teniendo en cuenta que  $I_B = \frac{I_C}{h_{fe}}$  se llegó a la ecuación 5

$$R_{B1} = \frac{(V_{DD} - V_{BE_{ON}})h_{FE}}{I_C} \quad (5)$$

Siendo  $V_{DD} = 5V$  la salida del regulador de tensión **LM7805** y  $V_{BE_{ON}} = 0,7V$   
A continuación listamos los valores de  $R_{B1}$  para cada transistor y para cada  $I_C$ :

- Transistor 1:  $h_{FE} = 361$ 
  - Para  $I_C = 5mA$ :  $R_{B1} \approx 310k\Omega$
  - Para  $I_C = 25mA$ :  $R_{B1} \approx 62k\Omega$
- Transistor 2:  $h_{FE} = 326$ 
  - Para  $I_C = 5mA$ :  $R_{B1} \approx 280k\Omega$
  - Para  $I_C = 25mA$ :  $R_{B1} \approx 56k\Omega$
- Transistor 3:  $h_{FE} = 253$ 
  - Para  $I_C = 5mA$ :  $R_{B1} \approx 217k\Omega$
  - Para  $I_C = 25mA$ :  $R_{B1} \approx 43k\Omega$

## 1.4. Obtención de parámetros a partir de las mediciones

### 1.4.1. Parámetros característicos

En las curvas de transferencia  $I_C$  vs.  $V_{BE}$  medidas y simuladas se obtuvieron los parámetros  $I_S$  y  $V_{th}$  mediante un ajuste. Se utilizaron dos métodos de ajuste distintos.

**Ajuste exponencial:** Se tomaron los resultados de la expresión

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_{th}}}$$

y se realizó un ajuste mediante una función exponencial.

$$y = A e^{Bx}$$

**Ajuste lineal:** Se tomaron los resultados de la expresión

$$\ln(I_C) = \ln(I_S) + \frac{V_{BE}}{V_{th}}$$

y se realizó un ajuste mediante una recta.

$$y = Ax + B$$

En las curvas de salida  $I_C$  vs.  $V_{CE}$  medidas y simuladas se obtuvieron los parámetros  $I_{C_{sat}}$  y  $r_o$  mediante un ajuste lineal, en la región de modo activo directo, a los resultados de la expresión

$$I_C = I_{C_{sat}} + \frac{V_{CE}}{r_o}$$

Luego pudo ser calculada la *Tensión de Early*  $V_A$  mediante la expresión

$$V_A = r_o I_{C_{sat}}$$

### 1.4.2. Cálculo de parámetros de pequeña señal

Se calculó y graficó  $g_m$  en función de la corriente  $I_C$  como

$$g_m(k) = \frac{I_C(k) - I_C(k-1)}{V_{BE}(k) - V_{BE}(k-1)}$$

Tanto para los transistores simulados como los utilizados en la medición experimental.

Mediante cálculos teóricos, utilizando los parámetros obtenidos en los ajustes, se obtuvo la siguiente ecuación

$$g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_Q = \frac{I_S}{V_{th}} e^{\frac{V_{BE}}{V_{th}}} = \frac{I_C}{V_{th}}$$

Para los 3 transistores utilizados en la medición experimental.

Finalmente se graficó  $r_\pi$  mediante la siguiente ecuación

$$r_\pi = \frac{h_{FE}}{g_m}$$

Utilizando los distintos todos los  $g_m$  obtenidos mediante los dos métodos antes mencionados.

## 1.5. Simulación del modelo modificado

Se diseñó un modelo modificado basado en el modelo de *Spice* del TBJ NPN genérico ajustado a los parámetros característicos del Transistor 1. Realizamos las mismas simulaciones que para las bibliotecas PHIL\_BJT y SIEMENS incluyendo la siguiente directiva:

```
.MODEL MiModelo NPN (BF=361 IS=106.239f VAF=86.67009)
```

Para la simulación de la ganancia de corriente entre base y colector se obtuvo  $h_{FE} = 370$

## 2. Análisis y comparación de los resultados

### 2.1. Curvas obtenidas

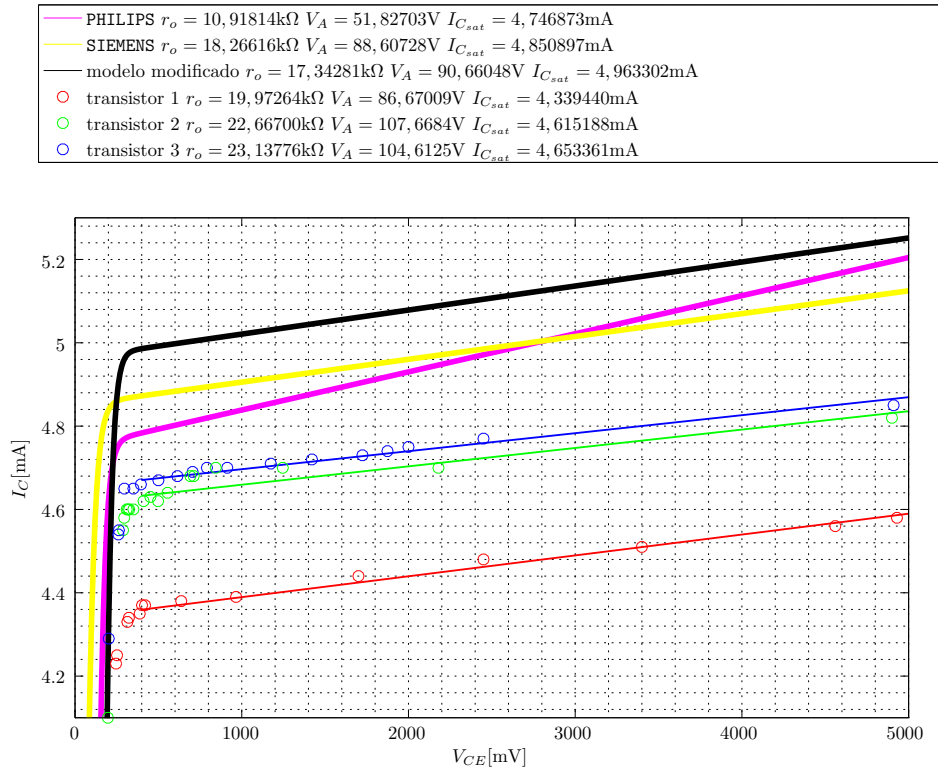


Figura 5: curva  $I_C$  vs  $V_{CE}$   $I_C = 25 \text{ mA}$

### 2.2. Comparación de los resultados

## 3. Conclusiones