

## 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.

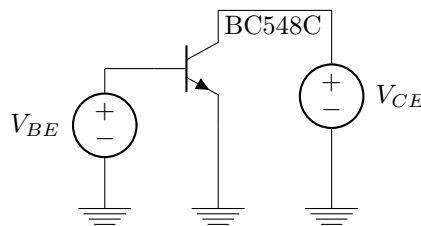


Figura 1: Circuito utilizado para la obtención de las curvas de transferencia.

##### 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.

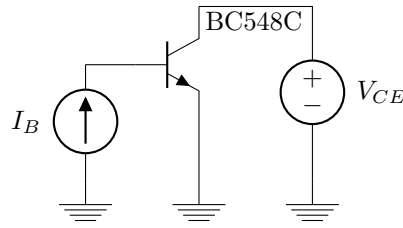


Figura 2: Circuito utilizado para la obtención de las curvas de salida y de la ganancia de corriente.

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

De la hoja de datos de MCC(Micro Commercial Components) se obtuvieron los siguientes valores:

- $h_{FE} = 300$
- $I_S = 8,4\text{fA}$
- $0,55\text{V} \leq V_{BE(ON)} \leq 0,7\text{V}$
- $V_{CE(SAT)} = 0,3\text{V}$
- $V_A = 100\text{V}$
- $g_m = 0,487\Omega^{-1}$

De la hoja de datos de Siemens se obtuvieron los siguientes valores:

- $h_{FE} = 270$
- $I_S = 171,4\text{fA}$
- $V_{BE(ON)} = 0,66\text{V}$
- $V_{CE(SAT)} = 0,3\text{V}$
- $V_A = 100\text{V}$
- $g_m = 2\Omega^{-1}$

### 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  $5\text{V}$ . El potenciómetro utilizado es de  $20\text{k}\Omega$ .

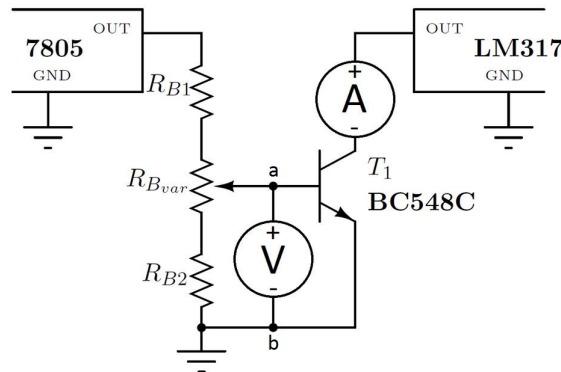


Figura 3: Circuito para la medición de la curva de transferencia  $I_C$  vs.  $V_{BE}$

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  $I_B \geq 0\mu\text{A}$ :  $V_{BE_{ON}} = 0,5\text{V}$ ,  $R_1 = R_{B1} = 5\text{k}\Omega$  y  $R_2 = R_{B2} + 20\text{k}\Omega = 45\text{k}\Omega$   
Obteniendo los siguientes valores para el equivalente de Thévenin:

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

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

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

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

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

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  $I_B = 10\mu\text{A}$  y  $V_{CE} = 2,8\text{V}$

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  $20\text{k}\Omega$ .

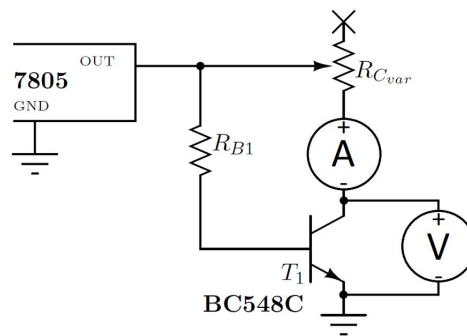


Figura 4: Circuito para la medición de la curva de salida  $I_C$  vs.  $V_{CE}$

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

- Transistor 1:  $h_{FE} = 361$

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

## 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

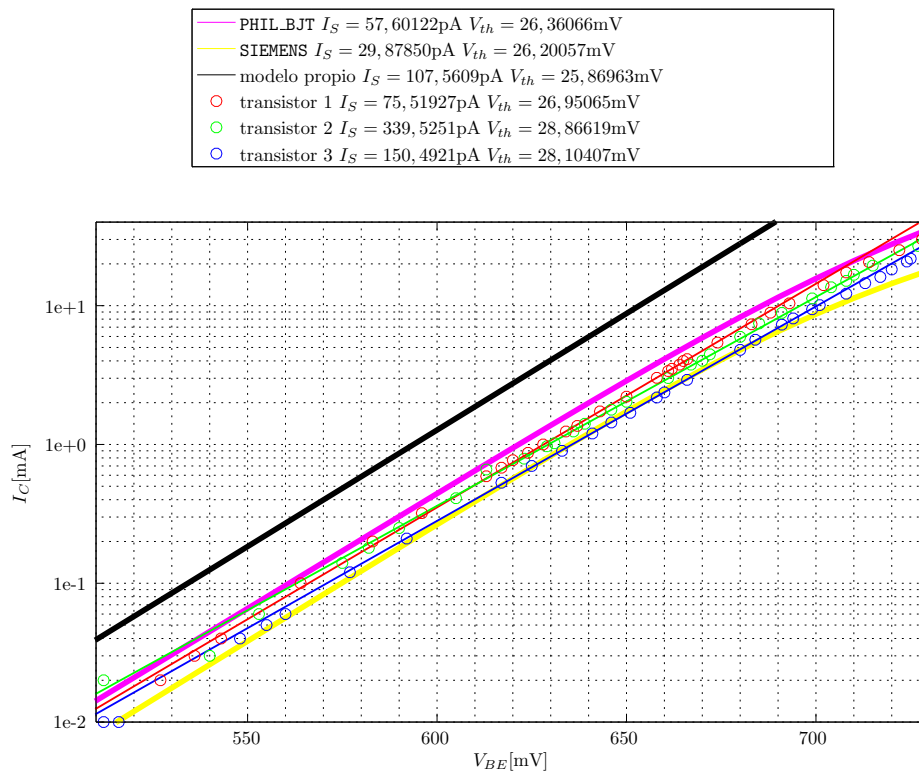


Figura 5: Curva de transferencia con ajuste exponencial

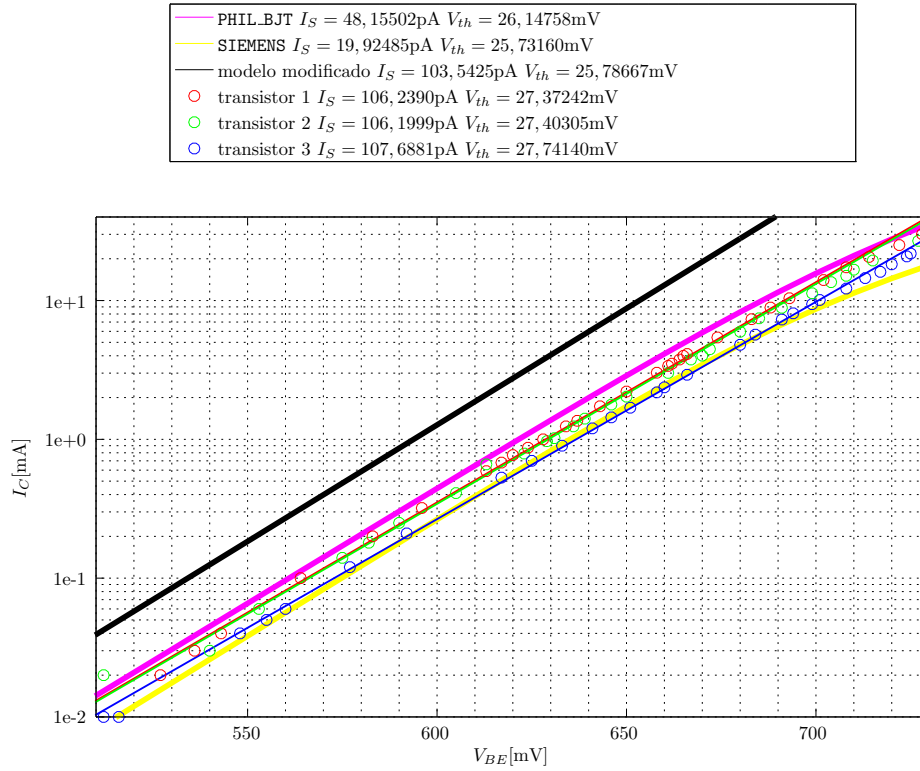


Figura 6: Curva de transferencia con ajuste lineal

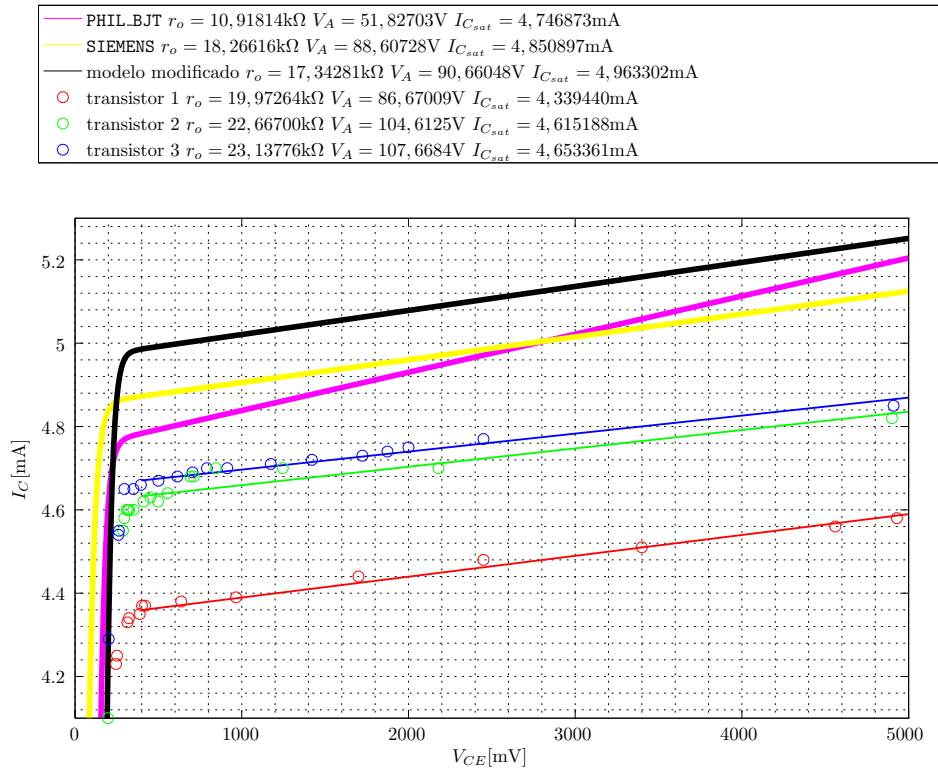


Figura 7: Curva de salida para  $I_{C_{MAD}} = 5\text{mA}$

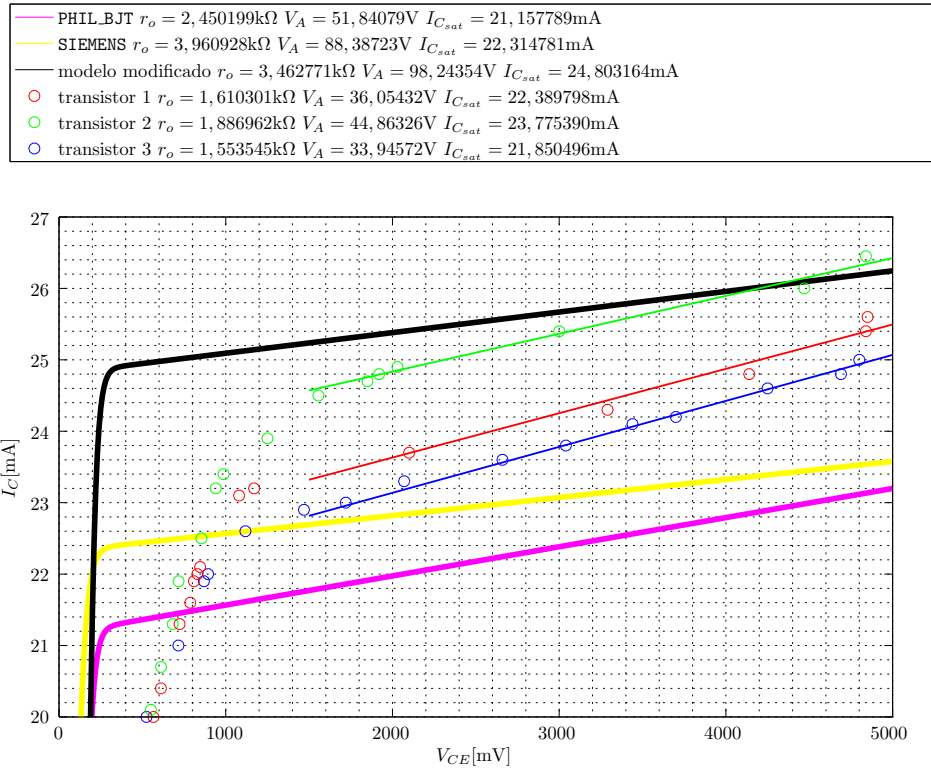


Figura 8: Curva de salida para  $I_{C_{MAD}} = 25\text{mA}$

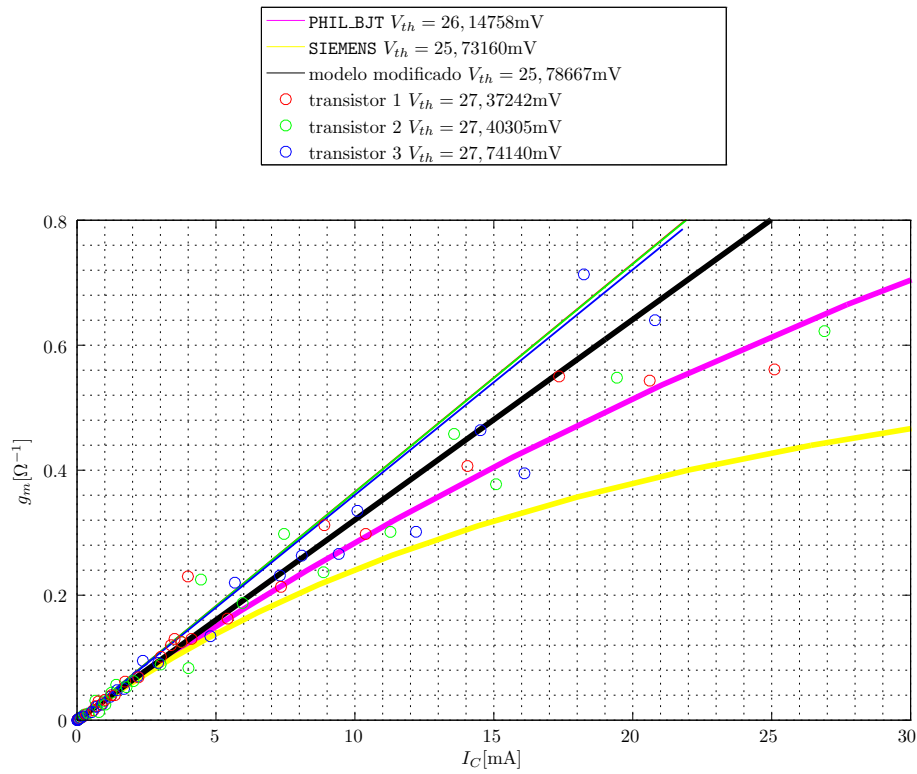


Figura 9: Curva de transconductancia



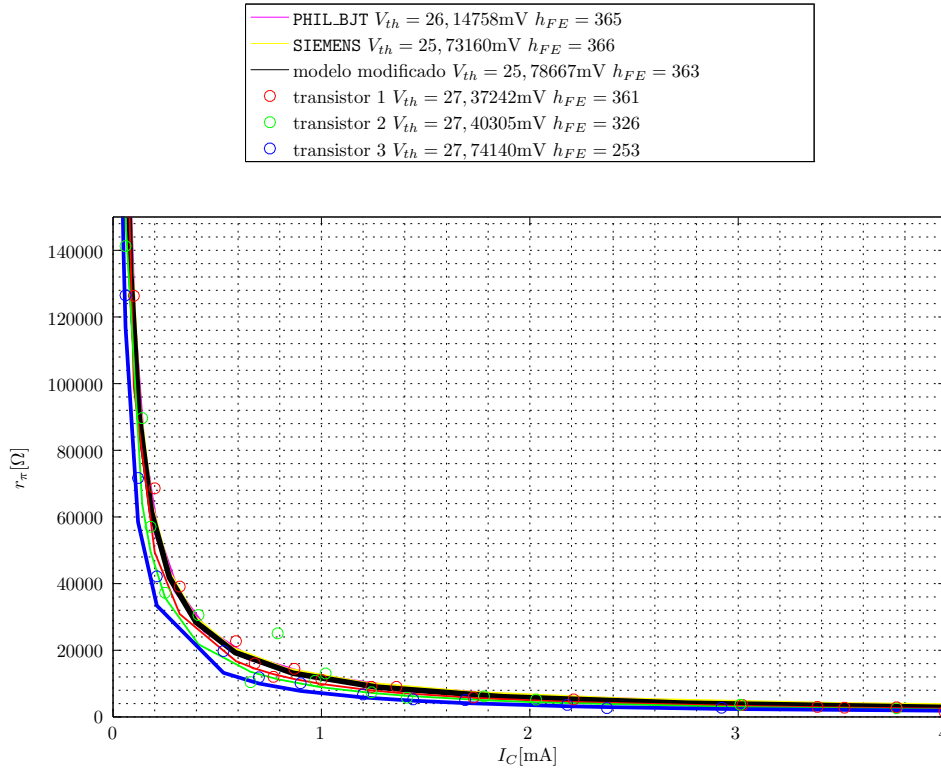


Figura 10: Curva de resistencia de entrada

## 2.2. Comparación de los resultados

Se partió comparando los parámetros obtenidos mediante los distintos métodos de ajuste.

De las figuras 5 y 6 a simple vista no se encuentra una diferencia importante entre los ajustes, sin embargo en la tabla 1 podemos encontrar diferencias importantes entre los valores de  $I_S$  de cada transistor para distintos ajustes y poca diferencia entre los valores de  $V_{th}$  de cada transistor para distintos ajustes.

		PHIL_BJT	SIEMENS	modelo modificado	Transistor 1	Transistor 2	Transistor 3
$\frac{I_{Sexp} - I_{Slineal}}{I_{Sexp}}$	100 %	16,4 %	33,3 %	3,7 %	40,7 %	68,7 %	28,4 %
$\frac{V_{thexp} - V_{thlineal}}{V_{thexp}}$	100 %	0,8 %	1,8 %	0,3 %	1,6 %	5,1 %	1,2 %

Tabla 1: Comparación de entre los dos métodos de ajuste

Se puede apreciar que la corriente de saturación para cada transistor son muy similares. Esto habla de la construcción de los dispositivos, los parámetros constructivos deben ser similares para que esto ocurra.

Finalmente comparamos los parámetros principales de los transistores simulados con el transistor 1. En la tabla 2 se eligió el transistor 1 como referencia ya que el modelo modificado fue diseñado con sus parámetros principales.

	$X$		PHIL_BJT	SIEMENS	modelo modificado
Ajuste exponencial	$\frac{I_{Sx} - I_{Stransistor\ 1}}{I_{Stransistor\ 1}}$	100 %	23,7 %	60,4 %	43,4 %
	$\frac{V_{thx} - V_{thtransistor\ 1}}{V_{thtransistor\ 1}}$	100 %	2,2 %	2,8 %	4,0 %
Ajuste lineal	$\frac{I_{Sx} - I_{Stransistor\ 1}}{I_{Stransistor\ 1}}$	100 %	54,7 %	81,2 %	2,5 %
	$\frac{V_{thx} - V_{thtransistor\ 1}}{V_{thtransistor\ 1}}$	100 %	4,5 %	6,0 %	5,8 %
$I_C \approx 5\text{mA}$	$\frac{r_{ox} - r_{otransistor\ 1}}{r_{otransistor\ 1}}$	100 %	45,3 %	8,5 %	13,2 %
	$\frac{V_{Ax} - V_{Atransistor\ 1}}{V_{Atransistor\ 1}}$	100 %	40,2 %	2,2 %	4,6 %
$I_C \approx 25\text{mA}$	$\frac{r_{ox} - r_{otransistor\ 1}}{r_{otransistor\ 1}}$	100 %	52,2 %	146,0 %	115,0 %
	$\frac{V_{Ax} - V_{Atransistor\ 1}}{V_{Atransistor\ 1}}$	100 %	43,8 %	145,2 %	172,5 %

Tabla 2: Comparación de los parámetros principales de los modelos simulados respecto al transistor 1

En las curvas de salida se encontró que para los transistores utilizados en las mediciones experimentales el parámetro  $V_A$  varía respecto a la corriente de saturación en el colector  $I_{C_{sat}}$ . Esto no ocurre en los transistores simulados en *Spice*.

También como se puede observar en la figura 7 todos los transistores saturan aproximadamente a la misma tensión  $V_{CE_{sat}} \approx 300\text{mV}$  como fué indicado en las hojas de datos. Esto no ocurre para  $I_{C_{sat}} \approx 25\text{mA}$ , como se puede observar en la figura 8, en donde los transistores simulados saturan a  $V_{CE_{sat}} \approx 300\text{mV}$  y los transistores medidos saturan a  $V_{CE_{sat}} \approx 1400\text{mV}$ .

### 3. Conclusiones

Entre los distintos métodos de ajuste, para las curvas de transferencia, podemos concluir que el parámetro  $I_S$  no tiene mucha influencia en la curva. Ya que a pesar de tener diferencias importantes entre distintos métodos de ajustes las curvas son muy similares. Tampoco hubo diferencias importantes entre los valores de  $V_{th}$  tanto para los transistores usados en las mediciones experimentales como en los simulados. Esto corroboró que  $V_{th}$  depende de la temperatura ya que  $V_{th} = \frac{K}{q} T$  y al estar los transistores aproximadamente a la misma temperatura los valores obtenidos fueron similares.

Se encontraron mas diferencias entre las curvas simuladas con las obtenidas experimentalmente para  $I_{C_{sat}} \approx 25\text{mA}$  que para  $I_{C_{sat}} \approx 5\text{mA}$ . Con lo que se puede concluir que a mayores valores de  $I_C$  los datos experimentales varían respecto a los valores obtenidos mediante las simulaciones en *Spice* y los datos obtenidos de las hojas de datos.

Respecto a la transconductancia  $g_m$  se pudo observar en los gráficos que a medida que  $I_C$  aumenta el valor teórico difiere del experimental.

Finalmente destacamos la importancia del parámetro  $h_{FE}$  en los transistores TBJ ya que tienen valores muy diversos para transistores del mismo modelo. Esto se debe a que es difícil de controlar en el proceso de fabricación. Es importante considerarlo ya que para conseguir los mismos resultados con distintos transistores se debe modificar el circuito al que se encuentra conectado. De la misma forma para distintos transistores se debió utilizar distintas resistencias para obtener la misma corriente de saturación.