

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.

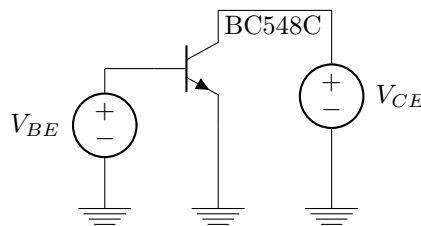


Figura 1: Circuito utilizado para la obtención de las curvas de transferencia.

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.

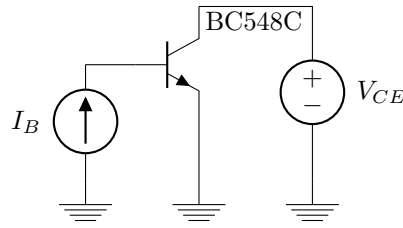


Figura 2: Circuito utilizado para la obtención de las curvas de salida y de la ganancia de corriente.

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 $20k\Omega$ 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 $V_{CE} = 1,25V$ y el regulador de tensión **LM7805** provee una alimentación constante de $5V$. El potenciómetro utilizado es de $20k\Omega$.

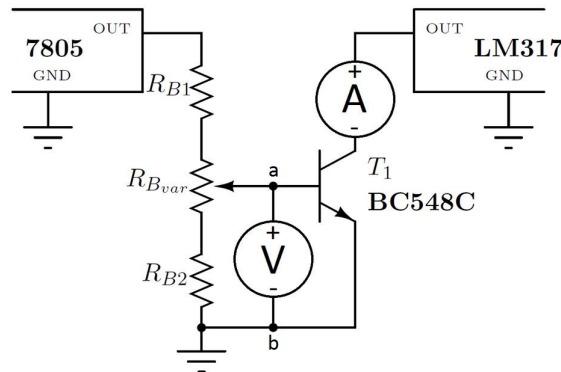


Figura 3: Circuito para la medición de la curva de transferencia I_C vs. V_{BE}

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 .

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

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 $R_{Bvar} = R_{B1var} + R_{B2var} = 20k\Omega$. Siendo R_{Bvar} el potenciómetro de $20k\Omega$.

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

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 :

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

Entonces:

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

Para el máximo valor de I_B :

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

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 $0,5V \leq V_{BEON} \leq 0,7V$.

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

- 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 maximo 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 $20\text{k}\Omega$.

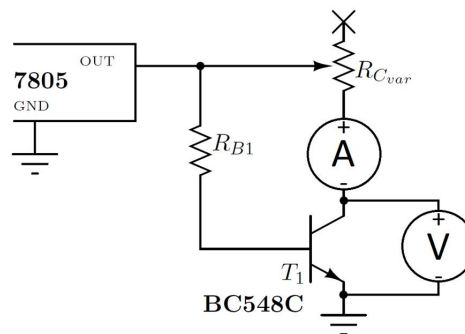


Figura 4: Circuito para la medición de la curva de salida I_C vs. V_{CE}

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_π 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

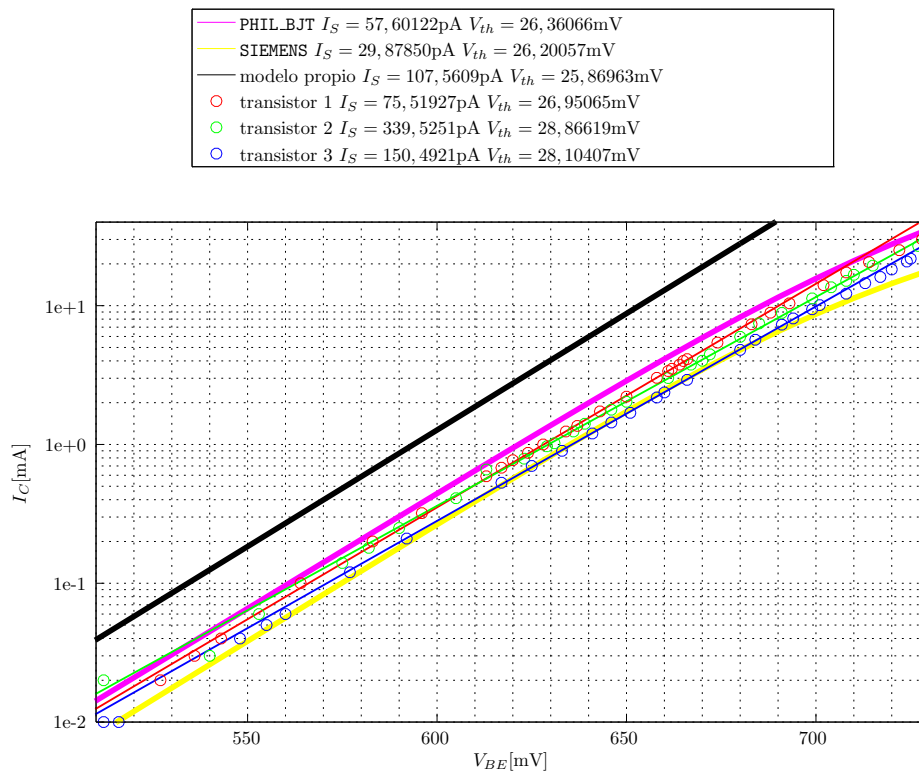


Figura 5: Curva de transferencia con ajuste exponencial

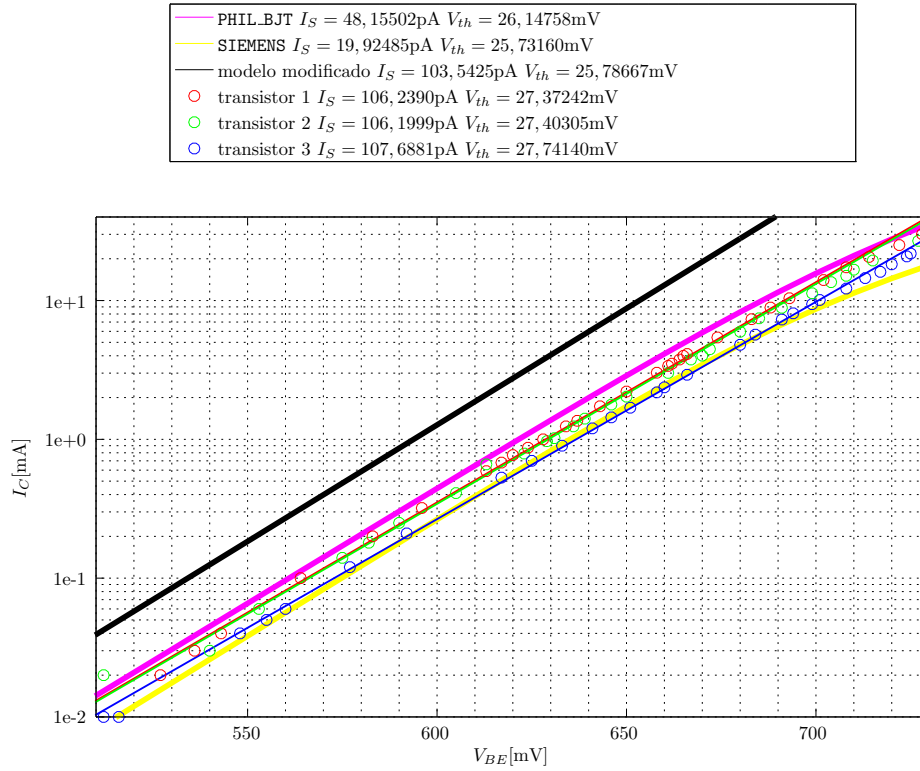


Figura 6: Curva de transferencia con ajuste lineal

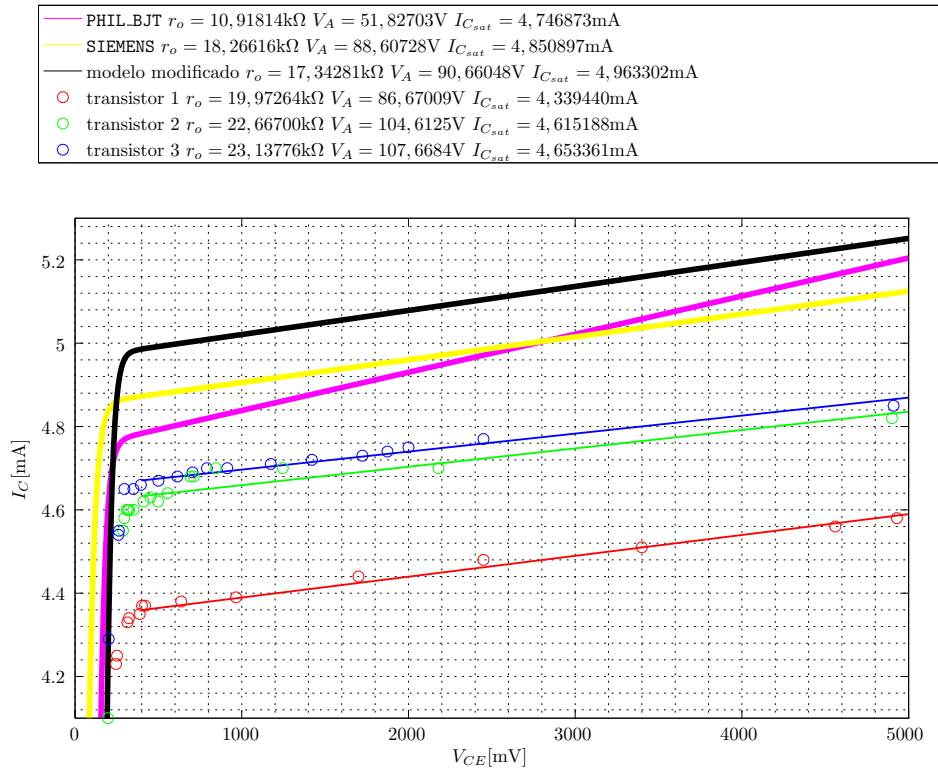


Figura 7: Curva de salida para $I_{C_{MAD}} = 5\text{mA}$

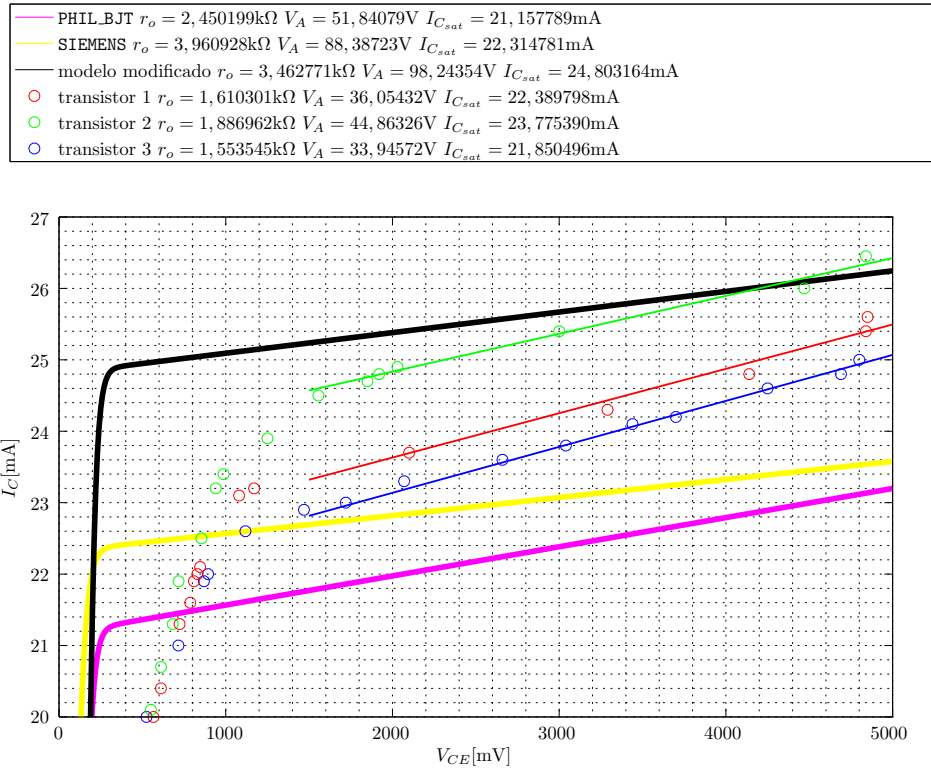


Figura 8: Curva de salida para $I_{C_{MAD}} = 25\text{mA}$

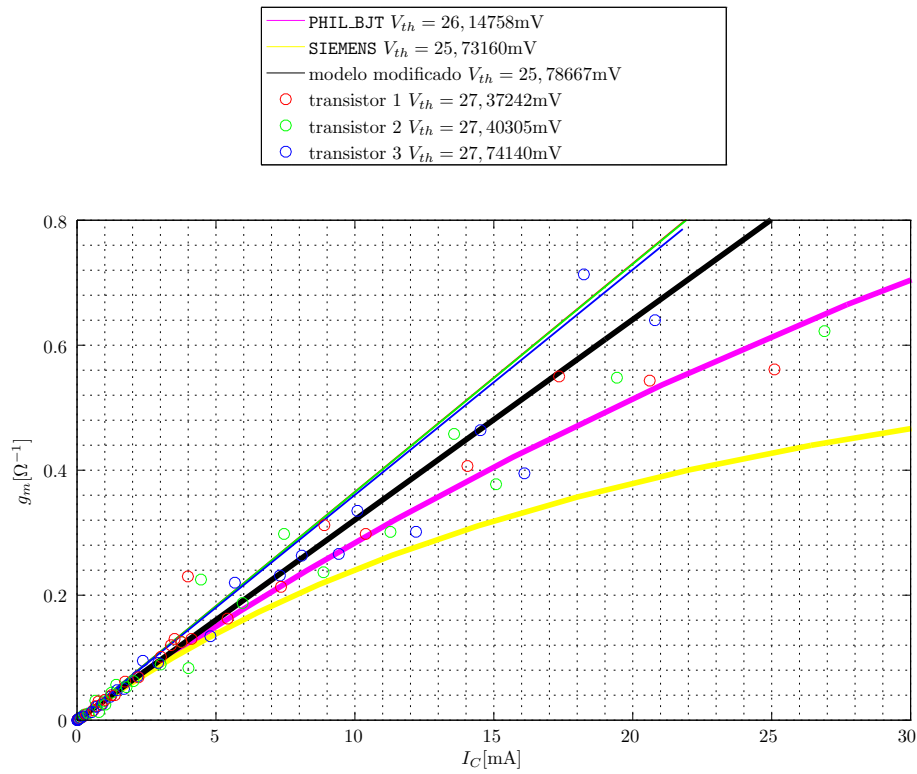


Figura 9: Curva de transconductancia

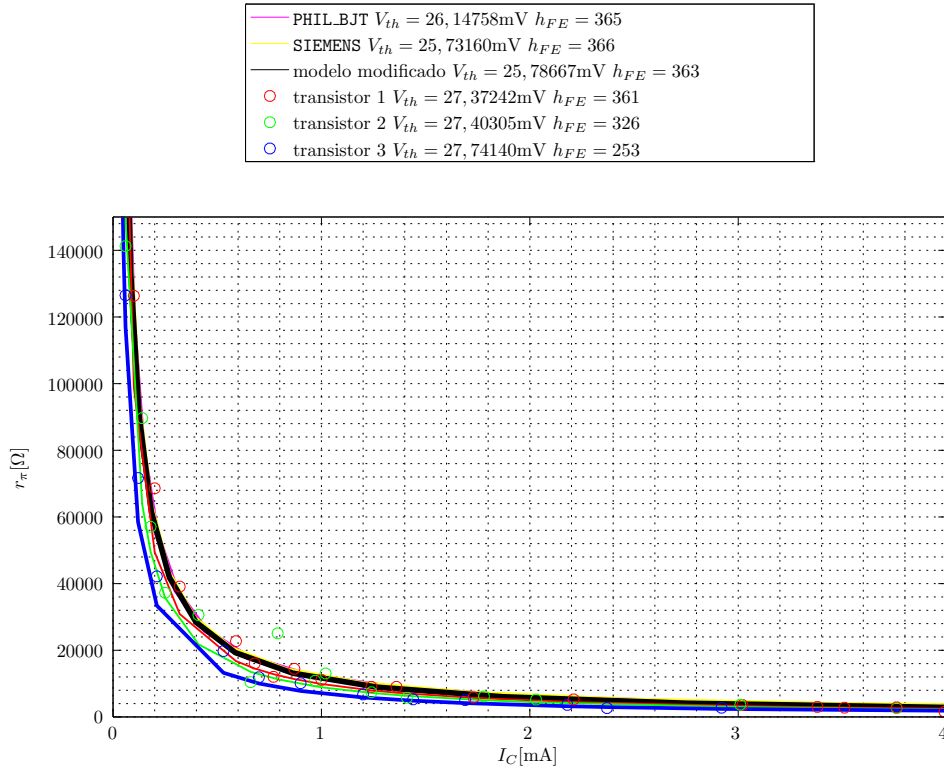


Figura 10: Curva de resistencia de entrada

2.2. Comparación de los resultados

| | X | | PHIL_BJT | SIEMENS | modelo modificado |
|-----------------------------------|---|-------|----------|---------|-------------------|
| | $\frac{k_X - k_{\text{modelo modificado}}}{k_{\text{modelo modificado}}}$ | 100 % | | | |
| $I_{D_{SAT}} \simeq 0,5\text{mA}$ | $\frac{r_{oX} - r_{\text{modelo modificado}}}{r_{\text{modelo modificado}}}$ | 100 % | % | % | % |
| | $\frac{\lambda_X - \lambda_{\text{modelo modificado}}}{\lambda_{\text{modelo modificado}}}$ | 100 % | % | % | % |
| $I_{D_{SAT}} \simeq 2,5\text{mA}$ | $\frac{r_{oX} - r_{\text{modelo modificado}}}{r_{\text{modelo modificado}}}$ | 100 % | % | % | % |
| | $\frac{\lambda_X - \lambda_{\text{modelo modificado}}}{\lambda_{\text{modelo modificado}}}$ | 100 % | % | % | % |

Tabla 1: Comparación de los parámetros principales respecto al modelo modificado

3. Conclusiones