

# 1 Introducción

En el presente informe se desarrollará el análisis teórico de un amplificador implementado a partir de transistores, la construcción de dicho amplificador y la medición de sus características. El objetivo de este análisis es comprobar en la práctica algunos de los aspectos más destacados de los circuitos estudiados durante el curso de Electrónica I, dentro de un marco de simulación de recursos escasos.

# 2 Amplificador

Se construyó el amplificador de la figura 1. Tal como se observa en ella, el circuito es un colector común con una fuente de corriente, cuyo objetivo es polarizar y ser carga activa.

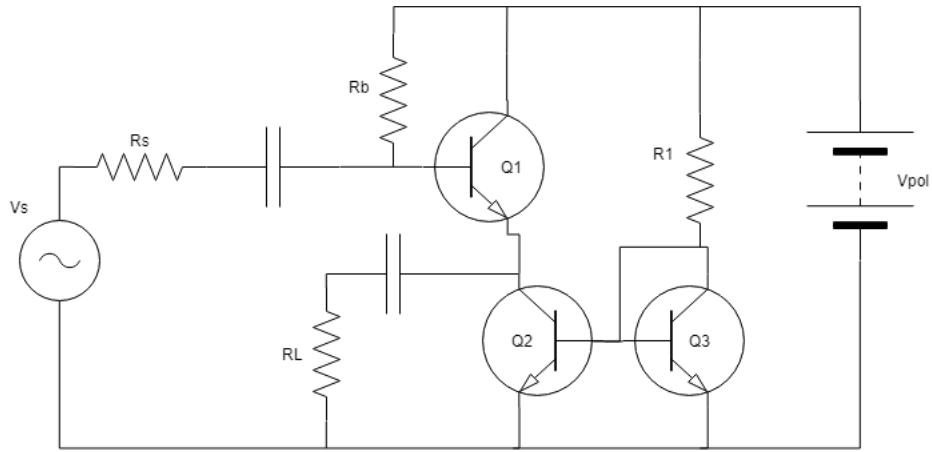


Figura 1: Amplificador

Los valores de los componenetes del circuito son los indicados en la siguiente tabla:

Componente	Valor
$R_S$	$560\Omega$
$R_L$	$2.2k\Omega$
$R_B$	$680k\Omega$
$R_1$	$10k\Omega$
$C$	$1\mu F$
$V_{POL}$	$20V$
$Q_1 = Q_2 = Q_3$	BC547

Table 1: Tabla de componentes

Las caracterísiticas de los transistores son las siguientes <sup>1</sup> :

$H_{FE}(\text{DC})$	$h_{fe}(\text{AC})$	$V_A$
110	165	98V

Table 2: Caracterísiticas de los transistores

La tensión de Early se obtuvo proyectando una recta en la zona lineal de la curva  $I_C$  en función de  $V_{CE}$ , tal como se observa en la figura 2. En el punto donde la recta azul corte el eje horizontal es  $V_A$

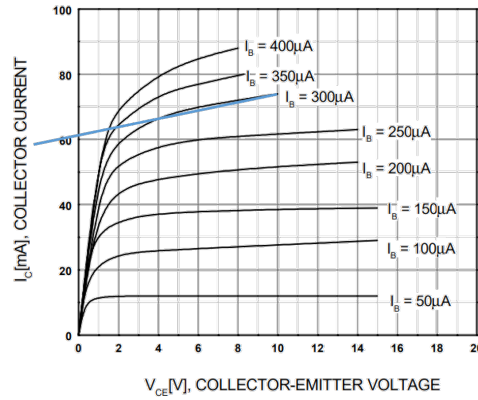


Figura 2: Tención de Early

## 2.1 Análisis del amplificador

En esta sección se analizará la polarización y las características de pequeñas señales del amplificador.

### 2.1.1 Polarización

Para analizar la polarización del circuito, se pasivarán las fuentes del alterna. Lo primero a calcular es la fuente de corriente de la figura 3.

<sup>1</sup>Datasheet del BC547: Sparkfun.com. (2018). [online] Disponible en: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/BC546.pdf> [Accedido 10 Nov. 2018].

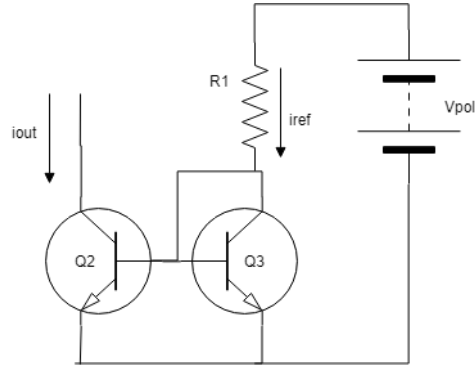


Figura 3: Fuente de corriente constante

$$I_{REF} = I_{CQ3} + I_{BQ3} + I_{BQ2} \quad (1)$$

Suponiendo que  $Q_2$  y  $Q_3$  son transistores iguales, entonces

$$I_{REF} = I_{CQ3} + 2 \cdot I_B \quad (2)$$

Suponiendo que las corrientes de base ( $\mu A$ ) son pequeñas frente a las de colector ( $mA$ ),  $I_{OUT} \cong I_{REF}$ .

Recorriendo la malla de entrada de  $Q_3$  obtenemos que:

$$I_{REF} = \frac{V_{POL} - V_{BE}}{R_1} \quad (3)$$

Conociendo las características de la fuente de corriente, se analizará la polarización del circuito:

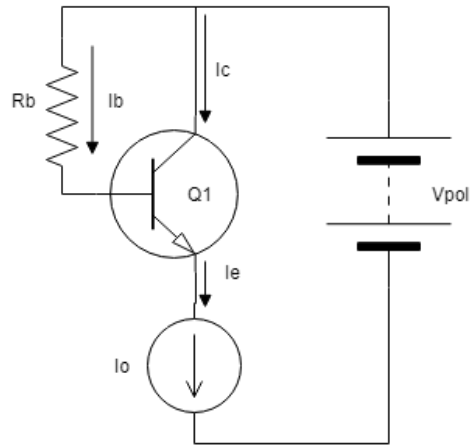


Figura 4: Polarización del amplificador

Como  $I_E = I_O$ , e  $I_O$  se obtiene a partir de la ecuación 3, entonces:

$$I_E = (H_{FE} + 1) I_B = I_O \quad (4)$$

despejando  $I_B$  se obtiene:

$$I_B = \frac{I_O}{H_{FE} + 1} \quad (5)$$

$$I_C \cong I_O \quad (6)$$

La tensión colector emisor se puede calcular de la siguiente manera:

$$V_C = V_{POL} \quad (7)$$

$$V_E = V_{POL} - R_B I_B - V_{BE} \quad (8)$$

Restando ambas expresiones obtenemos:

$$V_{CE} = I_B R_B + V_{CE} \quad (9)$$

Finalmente reemplazando con los valores de los componentes de las tablas 1 y 2, obtenemos :

$$I_B = 17.5\mu A$$

$$I_C = 1.93mA$$

$$V_{CE} = 12.6V$$

### 2.1.2 Modelo incremental

Los tres transistores comparten la misma corriente de colector y también de base, ya que los tres transistores son iguales. Por ende poseen los mismos parámetros híbridos.

$$\widehat{\frac{1}{h_{oe}}} \cong \frac{V_A}{I_{Cq}}$$

$$\widehat{h_{ie}} \cong (h_{fe} + 1) \frac{V_T}{I_{Cq}}$$

Evalutando las expresiones anteriores con los resultados obtenidos anteriormente, y con el contenido de las tablas 1 y 2, obtenemos :

$$\frac{1}{h_{oe}} \cong 50.8k\Omega$$

$$h_{ie} \cong 2.2k\Omega$$

### 2.1.3 Circuito incremental

En la siguiente figura se puede observar el circuito incremental del amplificador.  $R_{OS} \cong \frac{1}{h_{oe}} \cong 50.8\text{k}\Omega$  es la impedancia de salida de la fuente espejo.

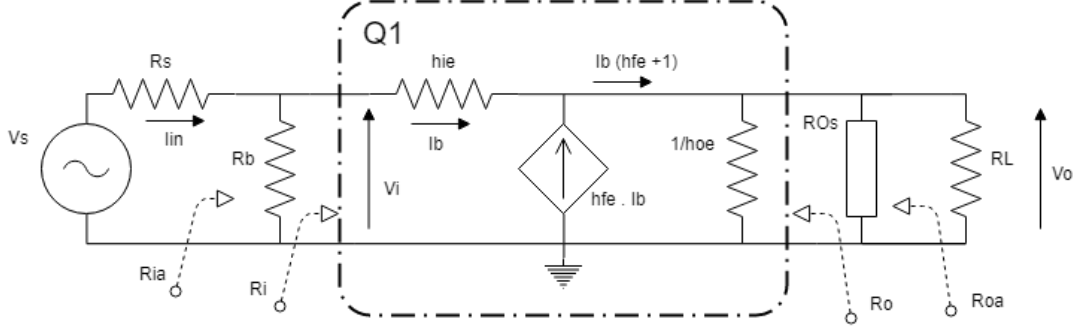


Figura 5: Circuito incremental

A partir del circuito incremental se obtuvieron las siguientes relaciones:

$$R_D = \left( R_L // \frac{1}{h_{oe}} // R_{OS} \right) \quad (10)$$

$$v_O = (h_{fe} + 1) i_B R_D \quad (11)$$

$$v_I = (h_{fe} + 1) i_B R_D + h_{ie} i_B \quad (12)$$

Definiendo  $\Delta v = \frac{v_O}{v_I}$  y simplificando:

$$\Delta v = \frac{v_O}{v_I} = \frac{(h_{fe} + 1) R_D}{(h_{fe} + 1) R_D + h_{ie}} \quad (13)$$

Tambien se define  $\Delta v_S = \frac{v_O}{v_S}$

$$\Delta v_S = \frac{v_O}{v_S} = \frac{v_I}{v_S} \frac{v_O}{v_I} = \frac{v_I}{v_S} \Delta v \quad (14)$$

Donde

$$\frac{v_I}{v_S} = \frac{R_{IA}}{R_{IA} + R_S} \quad (15)$$

Dividiendo la ecuación 12 por  $i_B$  obtenemos  $R_I$

$$R_I = \frac{v_I}{i_B} = (h_{fe} + 1) R_D + h_{ie} \quad (16)$$

$$R_{IA} = R_I // R_B = \frac{R_I R_B}{R_I + R_B} \quad (17)$$

Para hallar la impedancia de salida se pasivó la fuente  $v_S$ , se conectó a la salida un generador y se calculó el cociente entre la tensión y la corriente.

$$R_O = \left( \frac{h_{ie} + (R_S // R_B)}{h_{fe} + 1} \right) // \frac{1}{h_{oe}} \quad (18)$$

$$R_{OA} = R_O // R_{OS} \quad (19)$$

En cuanto a la ganancia de corriente  $\Delta i = \frac{i_{RL}}{i_{IN}}$ :

$$\Delta i = \frac{R_B}{R_B + R_I} \frac{\left( \frac{1}{h_{oe}} // R_{OS} \right)}{\left( \frac{1}{h_{oe}} // R_{OS} \right) + R_L} (h_{fe} + 1) \quad (20)$$

Finalmente reemplazando por los valores obtenidos de las tablas 1 y 2, en las ecuaciones, se obtuvieron los siguientes valores:

$$\Delta v = 0.994$$

$$\Delta v_S = 0.991$$

$$R_I = 338\text{k}\Omega$$

$$R_{IA} = 226\text{k}\Omega$$

$$R_O = 13.3\Omega$$

$$R_{OA} = 13.3\Omega$$

$$\Delta i = 102$$

## 2.2 Simulación del amplificador

Se simuló en LTSPICE, la respuesta en frecuencia del amplificador, su comportamiento en pequeñas señales y su polarización.

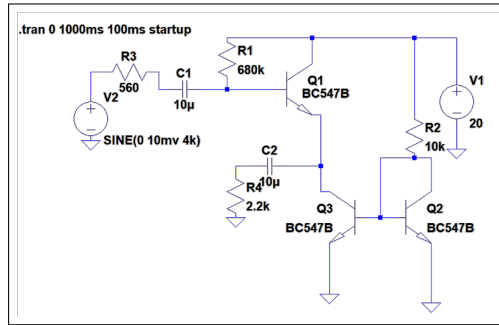


Figura 6: Circuito simulado

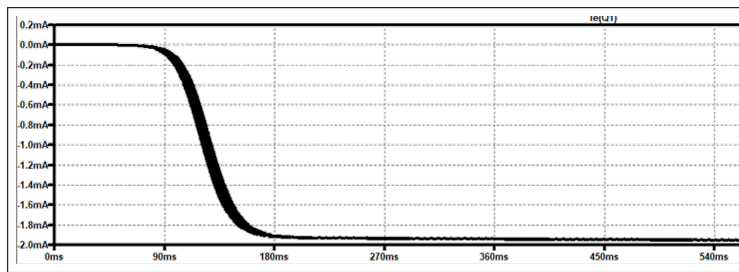


Figura 7: Corriente de polarizacion

Tal como se observa en la figura 7, la corriente de polarización, del amplificador es del orden de los  $2mA$ , coincidiendo con el resultado calculado en el análisis teórico.

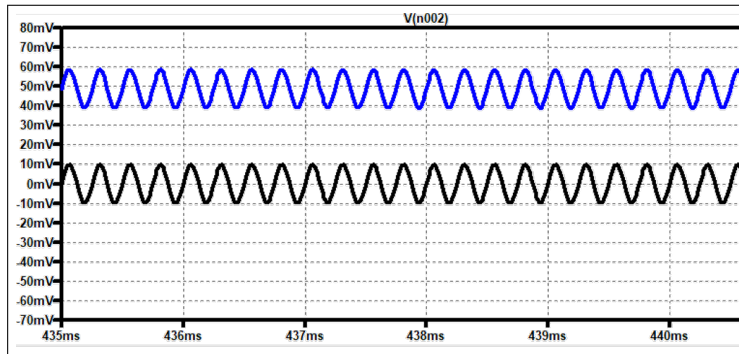


Figura 8: Ganancia de tensión

La figura 8, muestra la tensión de entrada del amplificador (color negro), y la tensión de salida (color azul). La amplitud de ambas señales es aproximadamente  $20mV$ , coincidiendo con lo calculado, la ganancia del amplificador es aproximadamente uno.

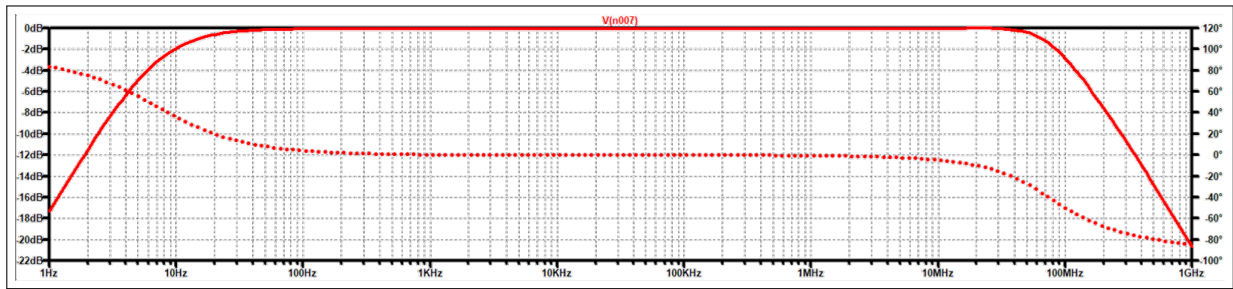


Figura 9: Respuesta en frecuencia

La figura 9 es la simulación de la respuesta en frecuencia del circuito, tal como se observa se obtuvo un pasabanda.

### 2.3 Medición del amplificador

Se realizó el amplificador en protoboard (figura 10) y se midieron los parametros calculados anteriormente:

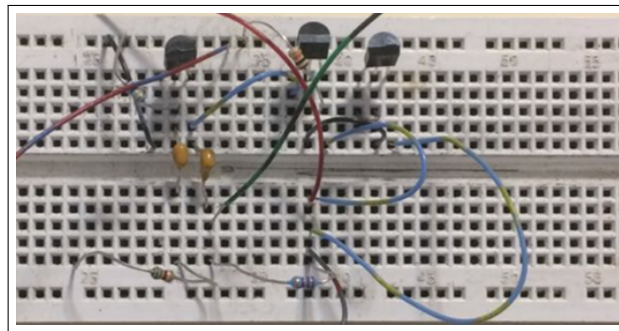


Figura 10: Circuito implementado

$$\Delta v = 0.99$$

$$\Delta v_S = 0.99$$

$$R_{IA} = 175k\Omega$$

$$R_{OA} = 145\Omega$$

$$\Delta i = 78$$



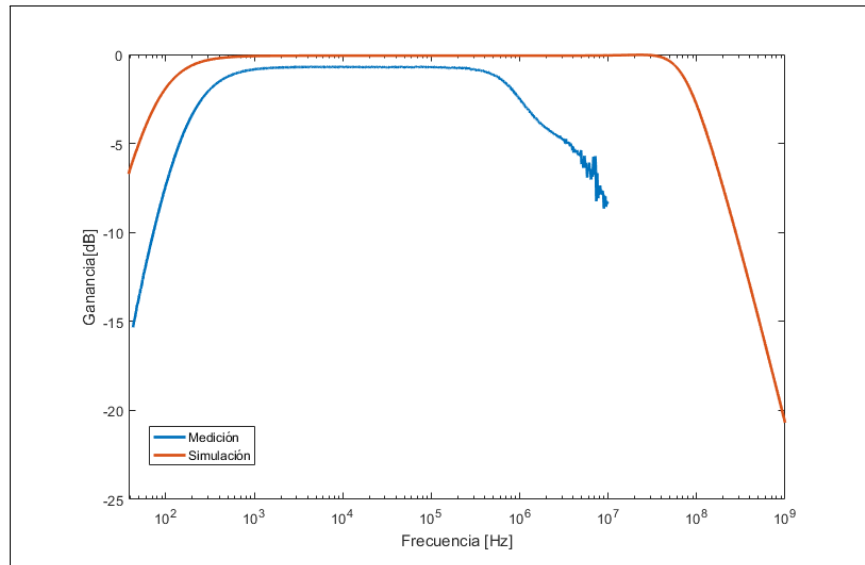


Figura 11: Respuesta en frecuencia, modulo

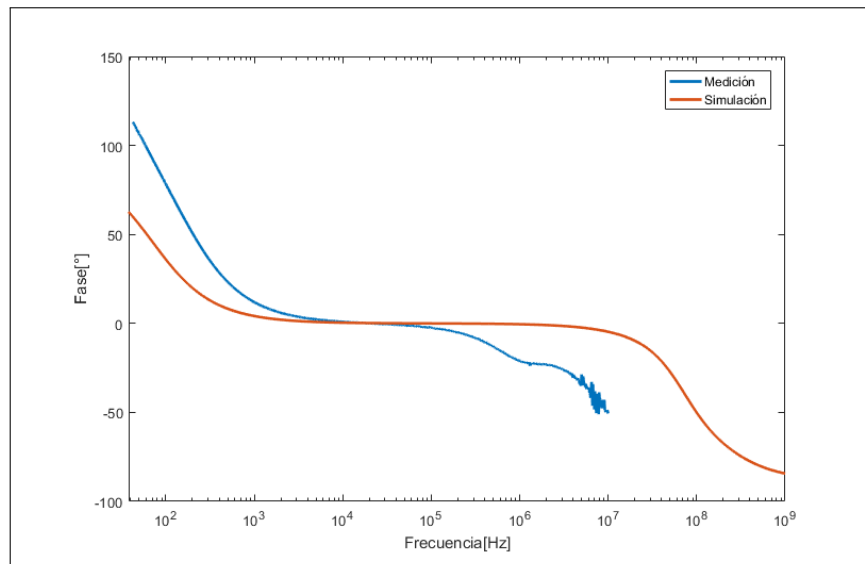


Figura 12: Respuesta en frecuencia, fase

### 3 Conclusión

Comparando los resultados de la medición se observa que hay gran diferencia en las impedancias de entrada y de salida comparando con las teóricas. Esto se pudo deber a que el  $h_{fe}$  utilizado no sea el correcto, debido a que el fabricante lo da en un rango, y los cálculos se realizaron con el típico.

Las características más sobresalientes del circuito son su alta impedancia de entrada, su baja impedancia de salida, la ganancia de tensión es prácticamente uno y su alta ganancia de corriente.