

Amplificación con BJT

Barbosa E. Liliana M., Ocampo R. Angee L.

Resumen - Durante el desarrollo del presente preinforme, se procede a elaborar un análisis, mediante el uso de herramientas de simulación como Pspice, además material bibliográfico y Python como herramienta de cálculo, de la configuración y diseño de un transistor BJT tipo NPN (2N2222A) como amplificador. Ello se realiza para interiorizar conocimientos teóricos respecto al tema y posteriormente poder realizar una correcta comparación del mismo diseño pero en un ámbito experimental.

I. INTRODUCCIÓN

Los transistores BJT son dispositivos semiconductores que se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde amplificadores y osciladores hasta interruptores y sensores. En este informe, se presenta un análisis de la configuración y diseño de un transistor BJT tipo NPN (2N2222A) como amplificador.

El objetivo de este análisis es interiorizar los conocimientos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento de un transistor BJT como amplificador. Para ello, se utilizarán herramientas de simulación como Pspice, además de material bibliográfico y Python como herramienta de cálculo.

Marco teórico:

Para lo siguiente es necesario conocer las diferentes formas de configuración de un amplificador en AC, de las cuales se pueden resaltar:

- **Emisor-común:** En esta configuración, la terminal de emisor del transistor se conecta a tierra, mientras que las terminales de base y colector se utilizan para aplicar la señal de entrada y obtener la señal de salida.
- **Base-común:** Configuración de transistor bipolar en la que la terminal de base se conecta a tierra. Las terminales de emisor y colector se utilizan para aplicar la señal de entrada y obtener la señal de salida.
- **Colector-común:** El transistor en colector común es una configuración de transistor bipolar que se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, desde amplificadores y osciladores hasta interruptores y sensores. En esta configuración, la terminal de colector del transistor se conecta a tierra, mientras que las terminales de base y emisor se utilizan para aplicar la señal de entrada y obtener la señal de salida.

A. Transistor en Región Activa – Amplificador Emisor Común

❖ Diseño del circuito:

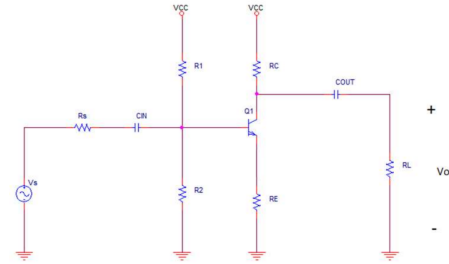


Fig. 1. Circuito con transistor como amplificador.

De acuerdo a la imagen anteriormente mostrada, se puede identificar que este circuito es un amplificador de emisor común, puesto que la salida se obtiene mediante la resistencia de carga R_L conectada al colector y la entrada de la señal es a través de la base, asimismo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para el diseño del circuito presentado en la presente práctica:

1. Posee una $R_s = 50\Omega$ como parte de la fuente de voltaje de entrada.
2. La carga es igual a $R_L = 47K\Omega$.
3. El amplificador debe poseer una ganancia igual a $|A_v| = \left| \frac{v_o}{v_s} \right| = 50 \frac{V}{V}$.
4. $R_B = 0.1 * \beta * R_e$

Se comienza por realizar un análisis en DC, en el cual las fuentes de voltaje AC se cortocircuitan, y los capacitores se comportan como circuito abierto debido a que la frecuencia es cero, por tanto, se retira la fuente de entrada AC y su resistencia asociada para la simplificación de su estudio, en este orden de ideas el circuito resultante es el mostrado a continuación:

Esquemático del circuito

A continuación, se procede a emplear el modelo T debido a la resistencia de emisor (R_e) y se conecta con el circuito mostrado en el anterior figura, obteniendo lo siguiente:

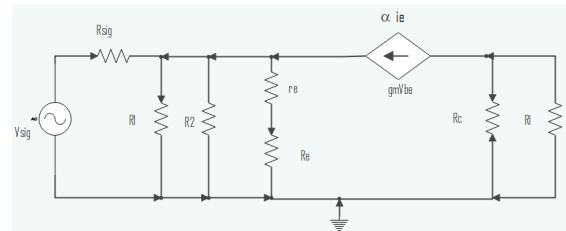


Fig. 2. Esquemático del circuito completo a trabajar.

Ahora se sigue con encontrar las impedancias de entrada y de salida del circuito para poder hallar la ganancia del mismo, por esto, se hace uso de las leyes de Kirchhoff de la siguiente manera, aplicando LTK en la segunda malla del circuito:

$$-V_i + \beta r_e I_b + R_e (\beta + 1) I_b = 0$$

¹El presente documento corresponde al preinforme de la octava práctica de laboratorio de la materia "Electrónica Analógica I" presentado en la Universidad de Antioquia de Medellín en el periodo académico 2023-02.

$$V_i = \beta r_e I_b + R_e (\beta + 1) I_b$$

$$V_i = I_b [\beta r_e + R_e (\beta + 1)]$$

$$Z_i = \frac{V_i}{I_b}$$

Por tanto la impedancia de entrada del circuito es igual a

$$Z_i = \frac{I_b [\beta r_e + R_e (\beta + 1)]}{I_b}$$

$$Z_i = \beta r_e + R_e (\beta + 1) \quad (1)$$

$$\text{Sea } \beta \approx \beta + 1$$

$$Z_i = \beta (r_e + R_e)$$

Se sigue con deducir, mediante la ley de Ohm, la impedancia de salida del mismo, como se puede apreciar a continuación:

$$V_o = I_b \beta * (R_c || r_o)$$

$$Z_o = \frac{|V_o|}{I_b \beta} = \frac{I_b \beta (R_c || r_o)}{I_b \beta}$$

$$Z_o = (R_c || r_o)$$

$$\text{Si } r_o \gg R_c$$

$$Z_o = R_c \quad (2)$$

Calculando la ganancia del circuito, con base en las expresiones anteriormente halladas y considerando la resistencia de carga:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-I_b \beta (R_c || r_o || R_l)}{I_b [\beta r_e + R_e (\beta + 1)]}$$

$$\text{Si } r_o \gg R_c, r_o \gg R_l, \text{ y } \beta \approx \beta + 1$$

$$A_v = \frac{-I_b \beta (R_c || R_l)}{I_b [\beta r_e + R_e]}$$

$$A_v = - \frac{R_c || R_l}{r_e + R_e} \quad (3)$$

Por otro lado, también se tienen las siguientes consideraciones:

$$R_{DC} = R_e + R_c \quad R_{AC} = R_c || R_l + R_e$$

$$I_B = \frac{I_c}{\beta}$$

$$I_E = \beta I_B$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E}$$

$$I_c = \frac{5(R_c + R_l)}{0.9(R_c * R_l)}$$

$$V_{BE} = 0.66V$$

De la ecuación (3) se procede a hallar R_e , asumiendo el valor de $R_c = 3k\Omega$ y $V_T = 25mV$:

$$I_c = 1.87mA \quad I_E = 1.889mA \quad I_B = 18.017\mu A$$

$$r_e = 13.738\Omega$$

$$A_v = - \frac{R_c || R_l}{r_e + R_e} \Rightarrow A_v (r_e + R_e) = - R_c || R_l$$

$$A_v (R_e) = - R_c || R_l - A_v r_e$$

$$R_e = - \frac{R_c || R_l}{A_v} - r_e$$

$$R_e = 47.79\Omega$$

Continuando con el procedimiento, se procede a hallar la resistencia y voltaje de la base del siguiente modo:

$$R_B = 0.1 * \beta * R_e = 477.947k\Omega$$

$$V_{BB} = \left(\frac{R_B}{\beta} + R_e \right) * I_c + V_{BE}$$

$$V_{BB} = 0.7557V$$

Ahora, se sigue con encontrar los valores de resistencia R_1 y R_2 que conforman el paralelo:

$$R_1 = \frac{R_B * V_{CC}}{V_{BB}} = 7.589k\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_B}{1 - \frac{V_{BB}}{V_{CC}}} = 510.06\Omega$$

Finalmente, se procede a establecer la corriente de base, el voltaje colector-base, y colector-emisor:

$$V_{CE} = \frac{V_{CC}}{1 + \frac{R_{AC}}{R_{DC}}} = 5.7995V$$

$$V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = -5.1385V$$

	V_{CC}	R_2	R_1	R_e	R_c
Elementos del circuito	12V	510.06Ω	7.589kΩ	47.79Ω	3.3kΩ

Tabla 1. Elementos exactos del circuito amplificador.

	I_B	I_c	V_{BE}	V_{BC}	V_{CE}	β_{DC}	Modo de operación
Punto de operación	18.017μA	1.802mA	0.66V	-5.14V	5.8V	100	Activo

Tabla 2. Puntos de operación con los elementos de la tabla 1.

Por otro lado, se procede a realizar el mismo cálculo de componentes pero a través de un código en Python.

```

1  RL = 47000 #Ohm
2  RS = 51 #Ohm
3  beta = 100
4  Vcc = 12 #Vdc
5  Vs = 0.1 #Vac
6  VT = 0.025 #25mV
7
8  RC = 3305.7 #Suposición = RL = 47k
9  print("-----RC: ", RC)
10
11 Vceq = Vcc/2 #5.8V colector-emisor
12 Icq = (50*(RC+RL))/(9*(RC*RL))
13 ...
14 Tomando Av = 50 = Vo/Vs = (Ren/(Ren+Rs))*((RL||RC)/(re+RE)), se realiza dos cambios de variable donde
15 RE = (re+RE) y X = (RL||RC): 50 = (Ren/(Ren+Rs))*(X/RE_)
16 Por otro lado, gracias a la aproximación (RE_ ~ (re+RE)) entonces Ren ~ Rb, por lo cual:
17 50*((Rb+Rs)/Rb) ~ (X/RE_), y, RE_ = Rb/(0.1*beta)... despejando Rb:
18 ...
19 Rb = ((RL*RC*beta)/(500*(RL+RC)))-RS
20 print("Rb: ", Rb)
21
22 RE = (Rb/(0.1*beta))-(VT/Icq) #RE_ = (re+RE) --> RE = RE_re
23 print("-----RE: ", RE)
24
25 Ieq = Icq*(beta+1)/beta
26 Ibk = Ieq/(beta+1)
27 Vbe = 0.676 #Suposición
28 Vbb = Rb*Ibk + RE*Ieq + Vbe
29
30 R1 = (Rb*Vcc)/Vbb
31 print("-----R1: ", R1)
32 R2 = Rb*Vcc/(Vcc-Vbb)
33 print("-----R2: ", R2)
34 print("Icq: ", Icq, "Vceq: ", Vceq, "Ieq: ", Ieq, "Ibk: ", Ibk)

```

Fig. 3. Código automatizado del proceso de cálculo de componentes.

Vale resaltar que en el código planteado, la información calculada se hace con base en los requerimientos pedidos en el inicio de la sección y a través de otros métodos (siendo estos explicados allí mismo). Es importante mencionar que en este caso, todos los valores necesarios son calculados tras suponer

el valor de la resistencia RC.

	V_{CC}	R_2	R_1	R_e	R_c
Elementos del circuito	12V	604.36Ω	9.0926kΩ	42.77Ω	3.306kΩ

Tabla 3. Elementos exactos del circuito amplificador con el código.

	I_B	I_c	V_{BE}	V_{BC}	V_{CE}	β_{DC}	Modo de operación
Punto de operación	17.988μA	1.799mA	0.66V	-5.34V	6V	100	Activo

Tabla 4. Puntos de operación con los elementos de la tabla 3.

Así, al comparar la los datos de los diferentes métodos, se puede observar los porcentajes de error de la aproximación inmediatamente anterior respecto a los datos de los cálculos matemáticos:

	R_2	R_1	R_e	R_c	I_B	I_c	V_{BE}	V_{BC}	V_{CE}
%Error	17.6%	19%	10.5%	0.18%	0.16%	0.16%	0%	3.89%	3.44%

Tabla 5. Porcentajes de error de los componentes mediante los diferentes métodos.

De la tabla anterior se puede observar que los porcentajes de error entre ambas formas de cálculo, tanto de los componentes como de los valores de corriente y voltaje en el punto de operación, son muy pequeños, por lo cual, se decide que en casos posteriores de requerir cambios en las resistencias utilizadas se hará uso de la forma automatizada de cálculo.

Por otro lado, con el propósito de facilitar el montaje en el circuito se hacen las siguientes aproximaciones y con ayuda del simulador Pspice se comienzan a realizar aproximaciones para encontrar valores comerciales tales que faciliten el montaje del circuito, obteniendo lo siguiente:

$$R_e \approx 51\Omega$$

$$R_1 = 10k\Omega$$

$$R_2 = 680\Omega$$

Con dichos valores, la tabla que contiene los elementos de circuito con la modificación realizada anteriormente queda de la siguiente manera:

	V_{CC}	R_2	R_1	R_e	R_c
Elementos del circuito	12V	680Ω	10kΩ	51Ω	3.3kΩ

Tabla 6. Aproximación de los valores obtenidos mediante el primer método.

A pesar de los cambios realizados, al calcular nuevamente los valores de los dichos voltajes y corrientes, estos se mantiene, ya que las fórmulas no dependen de los valores alterados, además de que se procura mantener las relaciones entre las resistencias; sin embargo, es importante resaltar que si habrá una variación de la ganancia como se muestra más adelante.

❖ Análisis de ganancia:

Usando las ecuaciones (1) y (2) para calcular la impedancia de

entrada y salida del circuito con los valores de resistencia hallados en un comienzo, es decir, con los valores no comerciales, se obtendrá lo siguiente:

$$Z_i = \beta r_e + R_e(\beta + 1)$$

$$Z_i = 6.2011k\Omega$$

$$Z_o = 3.3k\Omega$$

$$A_v = -\frac{R_c || R_L}{r_e + R_e} = -50 \frac{V}{V}$$

	Z_i	Z_o	A_v
Valores calculados	6.2011kΩ	3.3kΩ	-50 $\frac{V}{V}$

Tabla 7. Datos del análisis de la señal AC con las resistencias exactas del primer método.

Ahora, se procede a calcular el valor de las impedancias y ganancia del circuito con los valores comerciales hallados:

$$Z_i = \beta r_e + R_e(\beta + 1)$$

$$Z_i = 6.5248k\Omega$$

$$Z_o = 3.3k\Omega$$

$$A_v = -\frac{R_c || R_L}{r_e + R_e} = -47.5293 \frac{V}{V}$$

	Z_i	Z_o	A_v
Valores calculados	6.5248kΩ	3.3kΩ	-47.6302 $\frac{V}{V}$

Tabla 8. Datos del análisis de la señal AC con las resistencias aproximadas comerciales del primer método.

❖ Simulación del punto de operación

Para verificar los cálculos teóricos desarrollados anteriormente y el punto de operación del transistor, se hace uso de la herramienta de simulación Pspice en este se comienza por simular el circuito en DC de la siguiente forma:

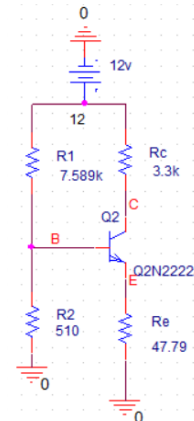


Fig. 4. Esquemático del circuito DC para valores no comerciales.

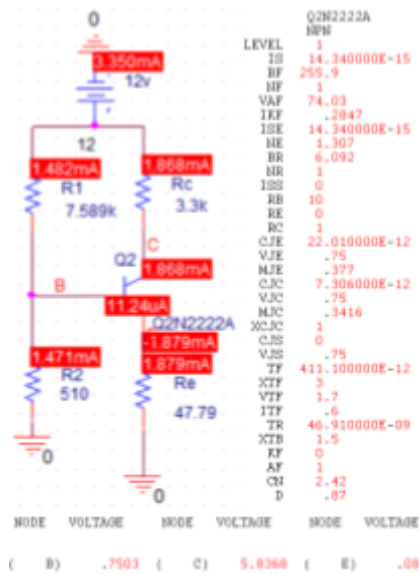


Fig. 5. Esquemático del circuito DC con los datos de su punto de operación.

	I_B (μA)	I_C (mA)	V_{BE} (V)	V_{BC} (V)	V_{CE} (V)	β_{DC}	Modo de operación
Punto de operación	11.24	1.868	0.661	- 5.09	5.75	255.9	Activo

Tabla 9. Valores del punto de operación de la figura 5.

Con el fin de comparar los datos obtenido por medio de los cálculos teóricos y la simulación, se procede a cuantificar los porcentajes de error que se contienen en la siguiente tabla:

	I_B	I_C	V_{BE}	V_{BC}	V_{CE}	β_{DC}
%Error	60.29%	3.53%	0.15%	0.982%	0.87%	60.92%

Tabla 10. Porcentajes de error entre los puntos de operación del primer método con las resistencias aproximadas y las exactas.

Es posible observar que los valores son muy similares; no obstante, el error medido en la corriente de la base es considerablemente grande con respecto a lo simulado, esto se debe a la variación del beta, ya que el beta asumido para los cálculos difiere enormemente al conseguido en la simulación, si se cuantifica nuevamente la corriente de base asumiendo el beta de la simulación se obtiene:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 7.34 \mu A$$

$$\%Error = 34.65\%$$

Se puede apreciar que el cambio del beta asumido disminuye el porcentaje de error obtenido anteriormente. Por otro lado, si repetimos este procedimiento con los valores comerciales se tiene:

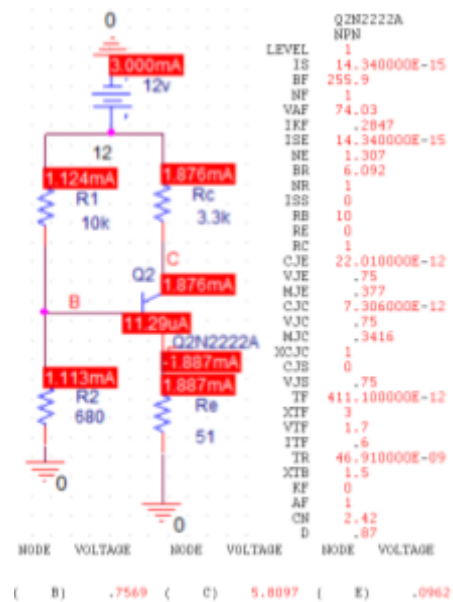


Fig. 6. Esquemático del circuito DC para valores comerciales de resistencias con los datos de su punto de operación.

Se comprueba que a pesar de variar las resistencias, los valores de los voltajes en las terminales del transistor, tanto como la corriente de base y de colector, no presentan variaciones.

❖ Simulación de todo el amplificador:

A continuación se realiza una simulación en Pspice del circuito completo (tanto la parte AC como la DC), con el fin de evaluar su comportamiento con una señal de entrada alterna de 200mVpp (200 mV pico a pico) a una frecuencia de 5kHz. Así, los gráficos de las señales de voltaje en la entrada, en el Emisor, en la Base, en el Colector y en salida, son los siguientes:

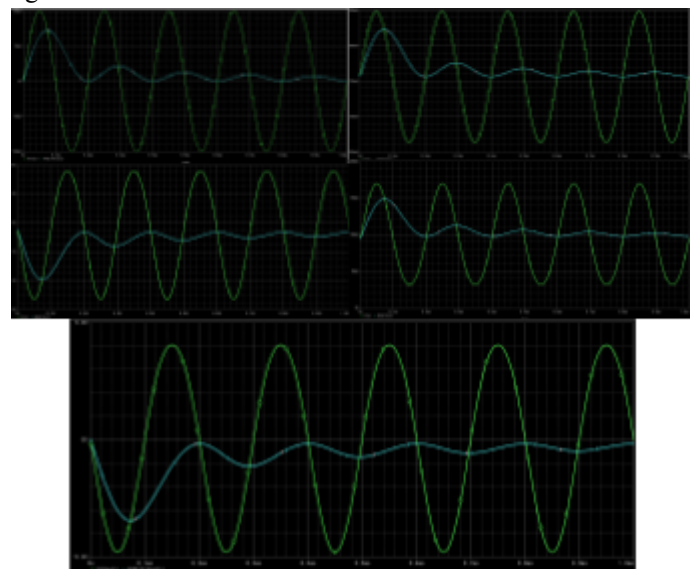


Fig. 7. Gráficas de voltaje de entrada, base, colector, emisor y salida con su respectivo nivel DC.

	V_{in}	V_b	V_c	V_e	V_{out}
Nivel DC	0V	757.473mV	5.419 V	95.94mV	- 82.87mV

Tabla 11. Valores de la figura 7.

Es importante resaltar que para identificar el nivel DC de cada una de las señales se editó la configuración de la simulación para que el tiempo en el cual se grafica la señal aumentará, pasando de 1ms a 5ms, y así conseguir que el nivel DC de cada una de las señales se establezca para ser medido. Continuando con la comparación de las ganancias e impedancias adquiridas mediante los cálculos elaborados, se procede a evaluar los valores entregados por la simulación con los valores de resistencia no comerciales que se aprecian en la siguiente tabla:

	Z_i	Z_o	A_v
Valores calculados	15.8281k Ω	3.3k Ω	- 42.601 $\frac{V}{V}$
Error (%)	60.736	0	17.368

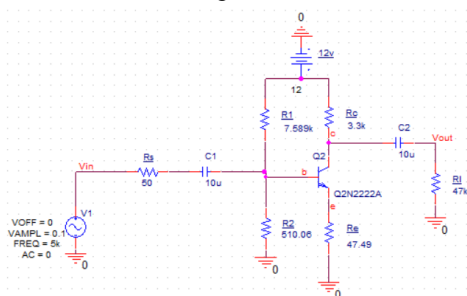
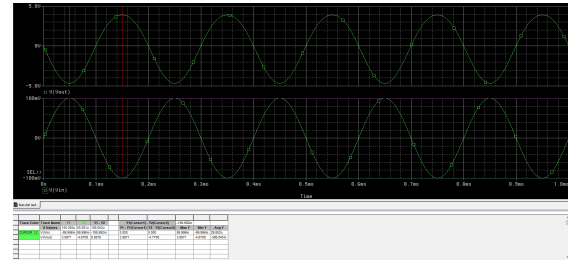
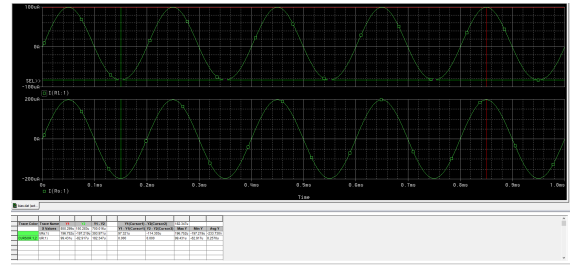
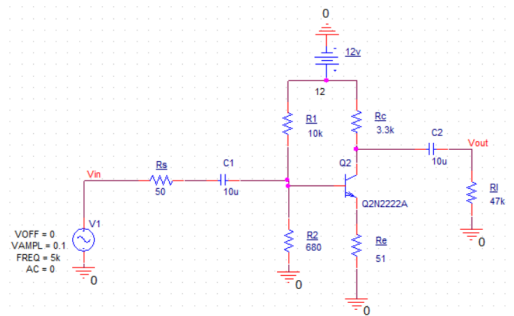
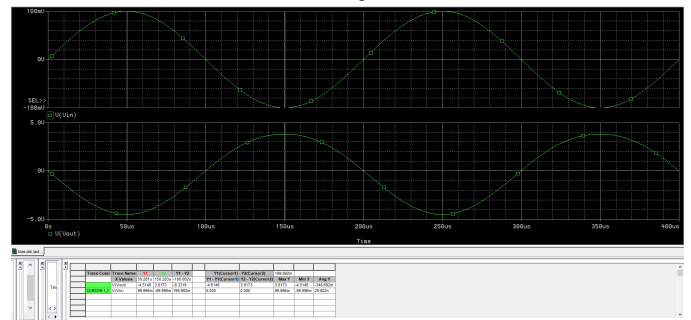
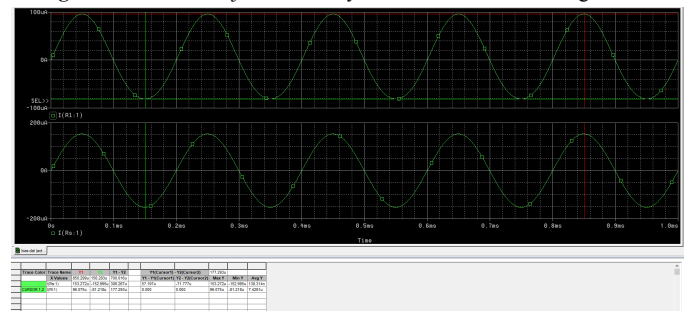
Tabla 12. Datos del análisis AC con valores exactos del primer método, tras la simulación en Pspice.

Luego, se sigue con realizar la comparación con los valores de resistencias comerciales:

	Z_i	Z_o	A_v
Valores calculados	16.6332k Ω	3.3k Ω	- 41.664 $\frac{V}{V}$
Error (%)	60.689	0	14.078

Tabla 13. Datos del análisis AC con valores comerciales del primer método tras la simulación en Pspice.

A continuación, se procede a realizar el análisis simulado en Pspice de la ganancia del circuito completo. En un primer lugar se realiza la simulación del circuito con las resistencias calculadas explícitamente:

**Fig. 8.** Circuito completo (parte AC y DC) con resistencias exactas con el primer método.**Fig. 9.** Señal de voltaje de entrada y salida del circuito de la figura 8.**Fig. 10.** Señal de corriente de entrada y salida del circuito de la figura 8. Ahora, se realiza la simulación con los valores ideales de las resistencias:**Fig. 11.** Circuito completo (parte AC y DC) con resistencias aproximadas y comerciales con el primer método.**Fig. 12.** Señal de voltaje de entrada y salida del circuito de la figura 11.**Fig. 13.** Señal de corriente de entrada y salida del circuito de la figura 11.

Asimismo, considerando las ganancias de corriente de los dos circuitos propuestos, se expone que la ganancia de corriente del primero es de $A_i = 0.4602 \frac{\mu A}{\mu A}$ y del segundo es igual a $A_i = 0.5789 \frac{\mu A}{\mu A}$. Cabe mencionar que, como se ve en la imagen, las corrientes de salida y entrada se encuentran en fase, mientras que los voltajes de salida y entrada están en contrafase, es decir, que una presenta un desfase de 180° con respecto a la otra.

III. CONCLUSIONES

- Al ser catalogado un amplificador emisor-común, las ganancias de voltaje y corriente deben ser mayor que uno y negativa, sin embargo, como el emisor no se dirige directamente a tierra, sino que existe una resistencia en el camino a tierra, la amplificación en corriente es menor a uno y positiva (salida en fase con la entrada) mientras que la amplificación en voltaje sí cumple con los requerimientos.
- Se corroboró que el funcionamiento correcto de un transistor BJT como amplificador es precisamente en región activa, ya que en región de saturación funciona como switch y en región de corte simplemente no conduce señal.
- Es importante resaltar la relevancia que tiene el beta del transistor para el diseño del circuito, puesto que, como se pudo observar, los valores de algunos de los componentes del mismo guardaban una estrecha relación con este valor, al igual que, la resistencia de entrada del modelo propuesto para el estudio del transistor en región activa y por ende este beta repercutía en la ganancia de salida del amplificador emisor-común.

REFERENCIAS

- [1] P. A. Gustavo. “Aplificador con BJT Análisis de pequeña señal Parte 1” . [video-Youtube]. Marzo 24, 2021. Disponible: [\(85\) Aplificador con BJT Análisis de pequeña señal Parte 1 - YouTube](#)
- [2] Udearroba. *Amplificador con BJT Análisis de pequeña señal Parte 2*. (3 de octubre de 2021). [Video en línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=IYik7iDm3Pg>
- [3] Udearroba. Diseño de un amplificador BJT del tipo emisor común EC con transistor NPN. (3 de octubre de 2021). [Video en línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=RzUq0gnspPg>
- [4] Udearroba. *Diseño de un amplificador BJT del tipo emisor común EC con transistor PNP Simulación en Spice*. (4 de octubre de 2021). [Video en línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=p2W9ihbnJaM>