



Facultad de Ingeniería
OBERA



8^{va} JIDeTEV
Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción



Experiencias Didácticas con Polarización de BJT

Francisco L. Pólích, Héctor Anocibar, Jorge A. Olsson, Luis Urbani.

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b GID-IE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

^c LABSE, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina

e-mails: franciscopolich@gmail.com, anocibar@gmail.com, jorgealbertoolsson@gmail.com, ctt.urbani@gmail.com

Resumen

Estas actividades se realizaron como consigna de la cátedra de Electrónica Analógica de la carrera de Ingeniería Electrónica con el fin de estudiar el comportamiento del punto Q de funcionamiento de transistores bipolares. Mediante cálculos, simulación y ensayos, se determinó que, para una misma configuración, con diferentes transistores, el punto Q cambia para cada uno. Esto se debe a que tienen diferencias constructivas, trabajan con distintas ganancias, y son sensibles a la temperatura y perturbaciones de diferente manera. Se realizaron dos configuraciones distintas, una con divisor resistivo y otra solo con resistor en el emisor del transistor, para comparar estos dos modelos. Como se esperaba, el que posee divisor resistivo hace que el punto Q varíe en menor medida que la otra configuración, porque la referencia de tensión que posee la base del transistor es mejor, a pesar de que los resistores son con una tolerancia del 5 %. La comparación también se realizó entre cálculos teóricos, simulación y ensayo, para medir la efectividad de la estimación

Palabras Clave – Transistores, polarización, divisor resistivo.

1. Introducción

El objetivo de esta actividad con transistores bipolares (BJT) es reconocer las características operacionales de cada uno, calcular, simular, ensayar y comparar distintas configuraciones para determinar ventajas y desventajas de los mismos.

Estos trabajos, realizados en la cátedra de Electrónica Analógica de la carrera de Ingeniería Electrónica, surgieron como una necesidad de presentar trabajos que pudieran ser realizados fuera del laboratorio, con las herramientas que pudiera poseer el alumno, a partir del hecho de la elevada cantidad de feriados que recayeron sobre la cursada.

En el presente informe, se presentará datos relacionados con transistores de unión bipolar, mostrando la utilidad de la denominada “hoja de datos” y su utilidad para el dimensionamiento de circuitos con este tipo de transistor. Además, realizar una comparación del desempeño que poseen cuatro transistores bipolares NPN o PNP de uso comercial. De manera de buscar el fundamento acerca del funcionamiento de estos transistores a través de cálculos teóricos, simulación en software y ensayo en protoboard. Mediante el concepto del punto Q de funcionamiento, se procedió a adaptar los cálculos a la práctica una configuración con un transistor arbitrario, a modo de referencia, para comparar en la misma implementación, en qué lugar queda el punto Q con los demás transistores. Los resultados, corresponden a dos implementaciones distintas, una denominada polarización fija, y otra llamada “autopolarizada” o polarización con divisor resistivo.

2. Circuitos con transistores bipolares – polarización

El término “polarización” es un término totalmente inclusivo de la aplicación de voltajes de corriente continua para establecer un nivel fijo de corriente y tensión. Para amplificadores con transistores, la corriente y tensión de corriente continua resultantes establecen un *punto de operación* en las características que definen la región que se empleará para amplificar la señal aplicada. Como el punto de operación es fijo en las características, también se llama *punto quiescente* (de ahí el punto Q), lo que por definición significa quieto, inmóvil, inactivo.

El dispositivo BJT podría ser polarizado para que opere afuera de los límites máximos, pero el resultado de tal operación acortaría considerablemente la duración del dispositivo o lo destruiría. Si se limita a la región activa, es posible seleccionar muchas áreas o puntos de operación diferentes. A menudo, el punto Q seleccionado depende del uso pretendido del circuito.

Si no se utilizara polarización, al principio el dispositivo estaría totalmente apagado o inactivo, y el punto Q estaría en A, es decir, a corriente y tensión cero a través del dispositivo. Para el punto B, si se aplica una señal al circuito, el dispositivo variará la corriente y el voltaje a partir del punto de operación, lo que permite que el dispositivo reaccione (y que posiblemente amplifique) tanto las excursiones positivas como las negativas de la señal de entrada. Si se selecciona apropiadamente la señal de entrada, el voltaje y la corriente del dispositivo variarán, pero no lo suficiente para llevar al dispositivo a *corte* o *saturación*. En el punto C permitiría alguna variación positiva y negativa de la señal de entrada, pero el valor pico a pico se vería limitado por la proximidad de $V_{ce} = 0\text{ V}$ e $I_c = 0\text{ mA}$. En general, es preferible operar donde la ganancia del dispositivo es bastante constante (o lineal) para garantizar que la amplificación a lo largo de toda la excursión de la señal de entrada sea la misma. El punto B es una región de más separación lineal, y por consiguiente de más operación lineal. El punto D sitúa en punto de operación cerca del nivel máximo de voltaje y potencia.

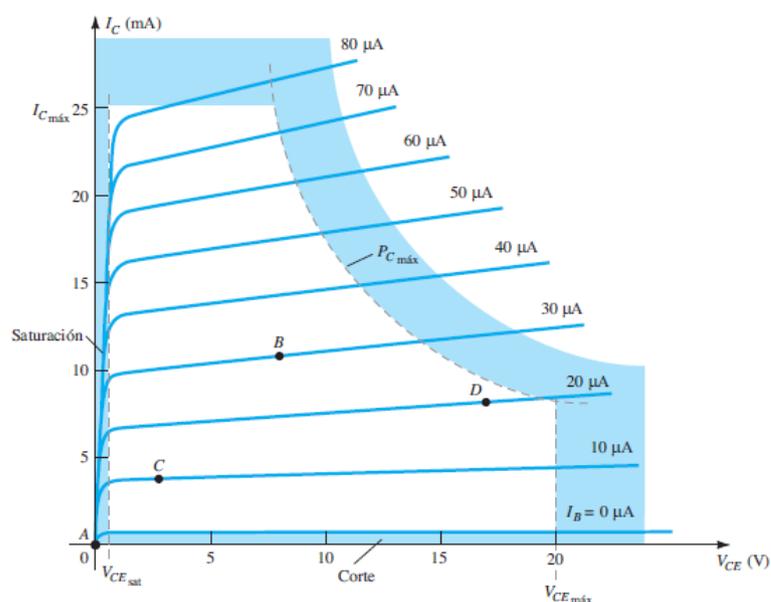


Fig. 1. Varios puntos de operación dentro de los límites de operación de un transistor.

En un circuito de polarización fija, se puede realizar un análisis por medio de la recta de carga. Mediante la ecuación:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Donde V_{ce} es la tensión colector emisor, V_{cc} es la tensión de alimentación, I_c la corriente de colector y R_c la resistencia de colector. Quedando una gráfica como en la Fig. 2. Donde es posible observar los puntos característicos de la ecuación y su relación con el punto Q.

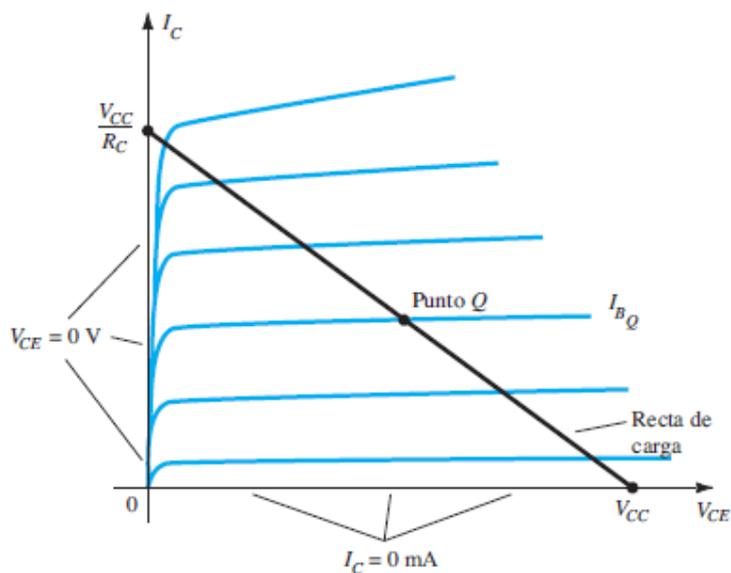


Fig. 2. Recta de carga de polarización fija.

2.1. Polarización fija

2.1.1. Concepto

Es la configuración de polarización de corriente continua más simple. Aun cuando la red emplea un transistor npn, las ecuaciones y cálculos aplican igualmente bien para una configuración del transistor pnp tan sólo con cambiar todas las direcciones de la corriente y las polaridades del voltaje.

Se dispone una fuente de alimentación simétrica, construida durante la cursada de la cátedra, de 15 V, utilizando la alimentación positiva y masa. Se supone un beta de entre 100 y 300 para estimar la resistencia de base, así como se supone una caída base emisor. Teniendo en cuenta estas suposiciones, es claro que el resultado coincida con la simulación, por lo que se modifica R_b hasta aproximarse al punto Q. Para probar experimentalmente, se toma el BC548 como referencia (de manera arbitraria) y se coloca un preset para R_b , en la protoboard se ajusta el mismo hasta lograr el punto deseado, dejando el preset en este valor. Se registra la tensión colector emisor y la de base emisor, las corrientes surgen por cálculo sin necesidad de medir. Luego, se procede a cambiar el transistor verificando la conexión, registrando nuevamente los valores. Finalmente, se repiten todos los pasos para un transistor pnp, a fin de obtener el punto Q a mitad de tensión de alimentación.

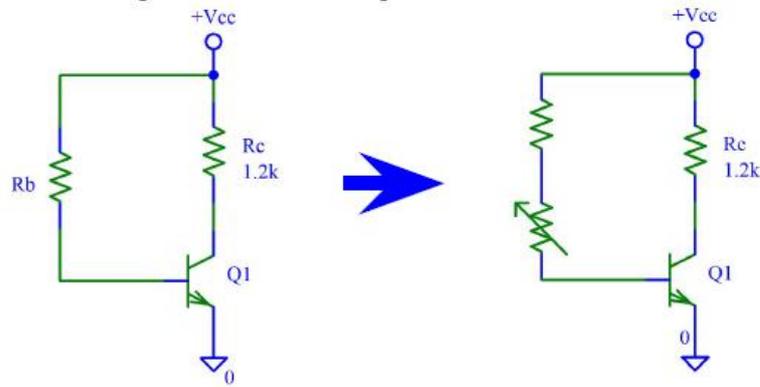


Fig. 3. Esquema circuital para transistor npn.

2.1.2. Cálculos

En primer lugar, se calcula la corriente de colector. Teniendo en cuenta que la tensión colector emisor se toma como la mitad de la tensión de alimentación.

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{15\text{ V} - 7,5\text{ V}}{1,2\text{ k}\Omega} = 6,25\text{ mA} \quad (1)$$

Para la corriente de base.

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{6,25\text{ mA}}{200} = 31,25\text{ }\mu\text{A} \quad (2)$$

Por último, la resistencia de base.

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{15\text{ V} - 0,7\text{ V}}{31,25\text{ }\mu\text{A}} = 457,6\text{ k}\Omega \quad (3)$$

2.1.3. Simulación

Para la simulación se utilizó software PSpice en su versión estudiantil.

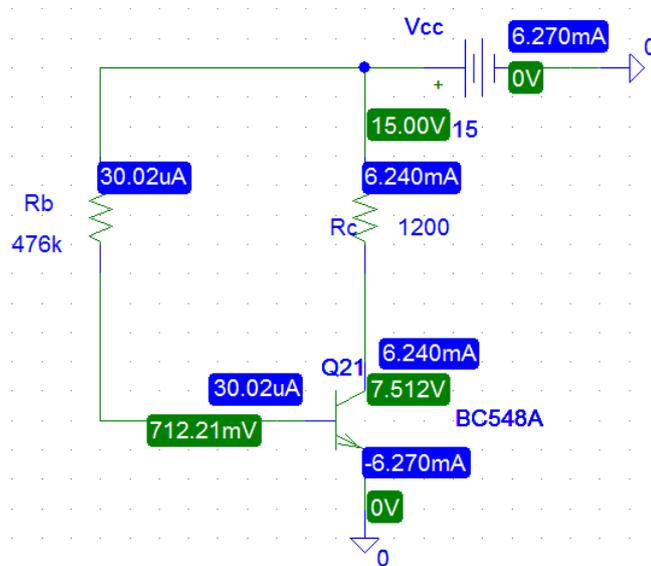


Fig. 4. Indicación de corrientes y tensiones en el circuito simulado.

Con el fin de aproximarse al punto de operación, se realizó un ajuste de la resistencia de base. Obteniéndose 7,512 V.

2.1.4. Resultados experimentales

Tabla 1. Resultados obtenidos.

Transistor	Vce (V)	Vbe (V)	Ic (mA)
BC548	7,51	0,66	6,24
2N2222	6,42	0,59	7,15
BC368	10,21	0,6	3,99

2.1.5. Transistor PNP

Para este tipo de dispositivo, se repiten todos los pasos anteriores. Con la ayuda de la Fig. 5.

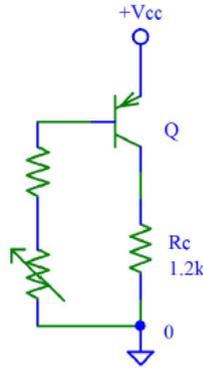


Fig. 5. Polarización fija con transistor pnp.

Los cálculos quedan de la siguiente manera: para la corriente de colector.

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{15\text{ V} - 7,5\text{ V}}{1200\ \Omega} = 6,25\text{ mA} \quad (4)$$

Para la corriente de base.

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{6,25\text{ mA}}{220} = 28,41\ \mu\text{A} \quad (5)$$

Y en último lugar, la resistencia de base.

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{15\text{ V} - 0,66\text{ V}}{28,41\ \mu\text{A}} = 503,68\text{ k}\Omega \quad (6)$$

La simulación se puede apreciar en la Fig. 6. El software no posee el BC554, pero si el BC556, que, por información de hoja de datos, son similares en características.

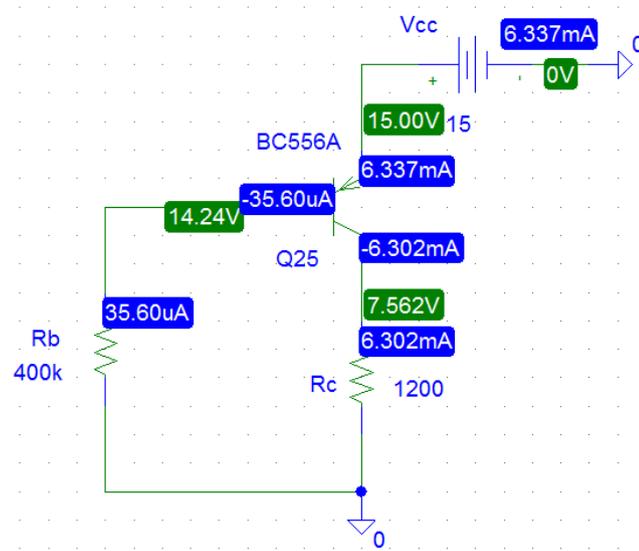


Fig. 6. Simulación con transistor pnp.

Como resultados experimentales se obtuvieron, una tensión colector emisor de 7,56 V, una corriente de colector de 6,2 mA, una tensión base emisor de 0,68 V.

2.2. Autopolarización

2.2.1. Concepto

Se sabe a ciencia cierta que la ganancia de corriente β es sensible a la temperatura, sobre todo si se trata de transistores de silicio, y como el valor real de beta en general no está muy bien definido, conviene desarrollar un circuito de polarización que dependa menos de la beta del transistor.

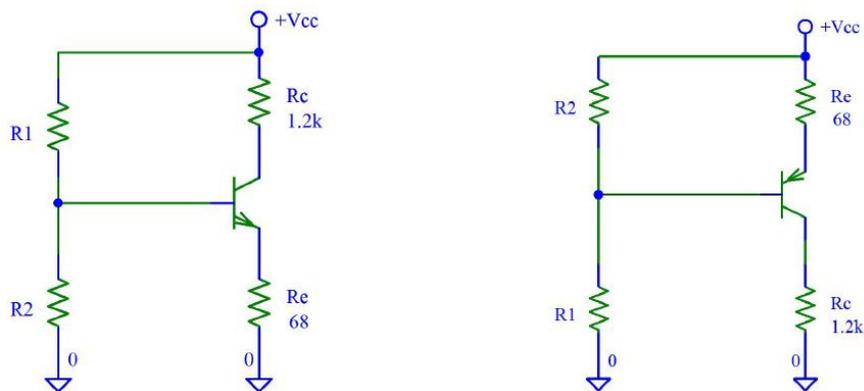


Fig. 7. Circuito de autopolarización con transistor npn (izquierda) y pnp (derecha).

Para conocer los distintos parámetros, se utiliza el Teorema de Thévenin. Planteando la tensión y resistencia de Thévenin.

$$V_{TH} = \frac{V_{CC}R_2}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

$$R_{TH} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

Luego, la corriente de base.

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1)R_E} \quad (9)$$

Partiendo de la consideración de que $I_C \cong I_E$.

$$V_{CC} - V_{CE} - I_C(R_C + R_E) = 0 \quad (10)$$

Finalmente, por la consideración de divisor resistivo.

$$R_{TH} = \frac{\beta R_E}{10} \quad (11)$$

Con base en el método aproximado y la Fig. 8.

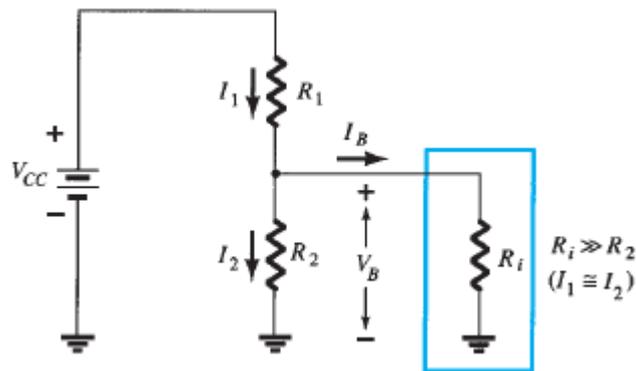


Fig. 8. Circuito de polarización parcial para calcular el voltaje VB en la base.

Utilizando la regla del divisor de voltaje, V_B queda.

$$V_B = \frac{R_2V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (12)$$

Y como $R_i = (\beta + 1)R_E \cong \beta R_E$, la condición que define si se puede aplicar el método es.

$$\beta R_E \geq 10 R_2 \quad (13)$$

Cumplida esta condición, se puede aplicar el método aproximado con un alto grado de precisión. Una vez determinado V_B , el nivel de V_E se calcula.

$$V_E = V_B - V_{BE} \quad (14)$$

Y la corriente de emisor se determina a partir de

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \quad (15)$$

Y

$$I_{CQ} \cong I_E \quad (16)$$

El voltaje del colector al emisor se determina por medio de

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \quad (17)$$

El punto Q queda determinado por V_{CEQ} y I_{CQ} , por lo tanto es independiente del valor de beta.

2.2.2. Cálculos

En primer lugar, se plantea la resistencia del equivalente de Thévenin.

$$R_{TH} = \frac{h_{FE} R_E}{10} = \frac{250 * 68}{10} = 1,7 \text{ k}\Omega \quad (18)$$

Y sabiendo que

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (19)$$

Adoptando $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ y despejando R_2

$$R_2 = \frac{R_{TH} R_1}{R_1 - R_{TH}} = 1,92 \text{ k}\Omega \quad (20)$$

2.2.3. Simulación

Para la simulación se realizó un ajuste de la resistencia R_2 para obtener el punto Q deseado.

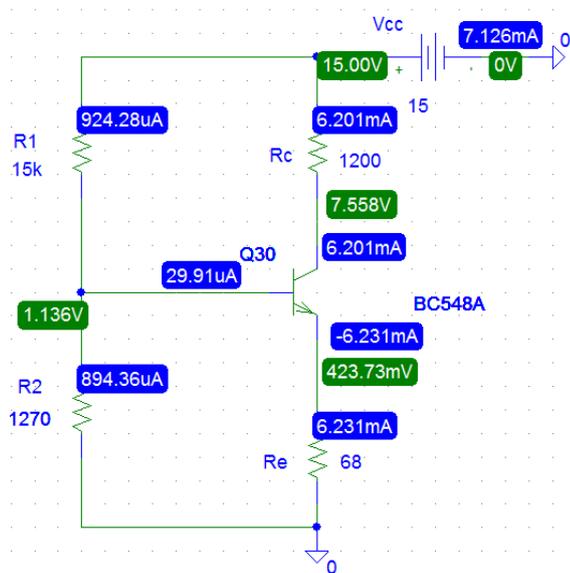


Fig. 9. Simulación de autopolarización con BC548.

2.2.4. Resultados experimentales

Tabla 2. Resultados experimentales.

Transistor	Vce (V)	Vbe (V)	Ic (mA)
BC548	7,51	0,67	5,9
2N2222	6,47	0,6	6,72
BC368	6,65	0,6	6,58

2.2.5. Transistor PNP

Tomando los mismos valores calculados anteriormente, se realiza la simulación para el transistor PNP. Nuevamente realizando un ajuste de R2 para el punto Q que se desea obtener.

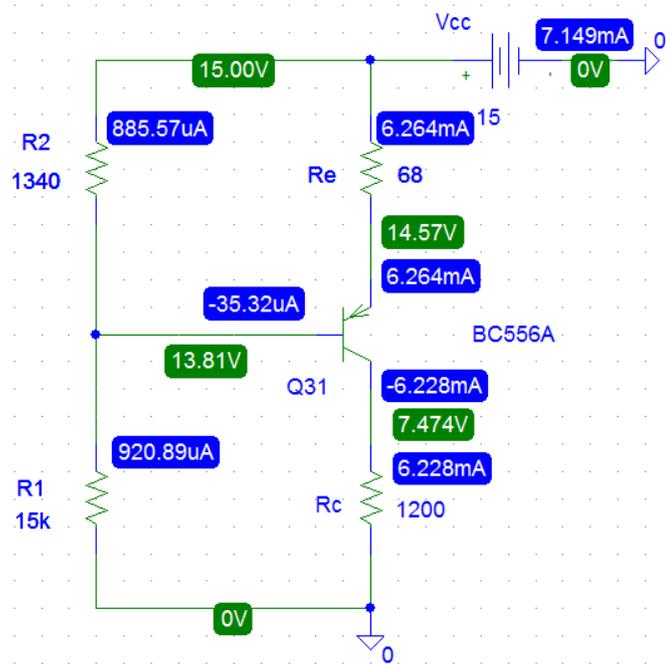


Fig. 10. Simulación con transistor pnp.

Realizando el ensayo del circuito y adaptando el preset, se obtuvo una tensión colector-emisor de 7,5 V, una tensión base-emisor de 0,65 V y una corriente de colector de 5,91 mA.

3. Conclusiones

Luego de realizadas las distintas experiencias, se comprobó que es posible realizar ensayos con fines académicos fuera del laboratorio. No obstante, esto requiere la tenencia de las herramientas necesarias para llevar a cabo dichos ensayos, como ser multímetro, puntas de prueba, protoboard y componentes electrónicos necesarios. Aunque estos últimos fueron dispuestos por la cátedra, los demás elementos deben ser de posesión de cualquier alumno de la carrera, ya que los usará durante toda su vida profesional.

Las experiencias sirvieron para enriquecer el conocimiento acerca del funcionamiento de los transistores bipolares. En este caso, se ensayaron tres transistores npn y uno pnp, ya que este último es de uso menos común en la práctica. Al mismo tiempo, comprobar que para cada transistor existen diferentes distribuciones de patillas, con lo que se debe tener especial cuidado al realizar la conexión. Por tal motivo, se debe revisar la hoja de datos de cada transistor.

En la primera configuración de polarización fija, el punto Q de operación se desvía en forma evidente de la referencia adoptada con el B548, ya que se trata del método de polarización más sencillo.

En la segunda implementación, con la ayuda del divisor resistivo, se observó que el punto Q se desvía en muy escasa medida de la referencia. Esto es gracias a la independencia de la ganancia beta

en las ecuaciones, y con la ayuda del divisor resistivo que logra mantener el punto con muy poca variación.

Finalmente, la experiencia global sirvió de gran ayuda a la comprensión sobre el uso de los BJT en los aspectos más importantes del diseño de circuitos, que son, cálculo, simulación y ensayo. Cabe señalar las ventajas acerca de realizar este tipo de actividad fuera del aula, en primer lugar, la falta de práctica en el uso de los distintos dispositivos electrónicos, por lo que se necesitó tiempo para reconocer cada componente, el cual, de haberlo hecho en el horario de clases no hubiera sido suficiente, motivo por el cual se destaca el enriquecimiento práctico de la actividad. Otra ventaja, fue el uso de redes sociales para establecer comunicación sencilla y rápida entre docentes y alumnos, en los casos de tener dudas puntuales acerca de la realización de cada actividad, que no sólo fue escrita, sino que se aprovechó el hecho de poder enviar y recibir imágenes de esquemas. Al mismo tiempo, surgieron debates acerca de la duda de algún alumno con lo que existe una importante retroalimentación. Este modo de trabajo, culminó siendo un gran aporte a la formación del alumno, motivado por estas consignas proporcionadas por la cátedra.

Referencias

- [1] R. L. Boylestad y L. Nashelsky “Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos”, 10ma edición, Pearson. pp. 161-199, 2009.
- [2] H. Anocibar “Apunte teórico de clase”, Electrónica Analógica, Facultad de Ingeniería, Oberá, Misiones.