

Instructivo de Experimento 4

## **EL3215 Laboratorio de Electrónica Analógica**

Escuela de Ingeniería Electrónica  
Prof: Ing. José Miguel Barboza Retana, MSc.  
II Semestre 2021

## Experimento 4: Transistores de unión bipolar

### Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Lectura recomendada</b>	<b>3</b>
<b>3. Objetivos claves</b>	<b>3</b>
<b>4. Componentes necesarios</b>	<b>3</b>
<b>5. Parte 1: Curva característica del BJT</b>	<b>4</b>
5.1. Procedimiento . . . . .	4
5.2. Preguntas . . . . .	6
<b>6. Parte 2: Circuitos interruptores con BJT</b>	<b>7</b>
6.1. Procedimiento . . . . .	7
6.2. Preguntas . . . . .	9

## 1. Introducción

Un transistor de unión bipolar (BJT) es un dispositivo de tres terminales capaz de amplificar una señal CA. Los BJT son amplificadores de corriente. Una pequeña corriente de base es amplificada con una ganancia de corriente, conocida como el beta CD ( $\beta_{CD}$ ), factor que relaciona la corriente de colector con la corriente de base del transistor. Otro parámetro es el beta CA (también conocido como la ganancia en pequeña señal), el cual representa la razón de cambio entre la corriente de colector y la corriente de base. En la Parte 1 de este experimento, se determinará la curva característica del BJT y con está el valor de los parámetros de ganancia  $\beta_{CD}$  y  $\alpha_{CD}$ .

En la Parte 2, se introducen los circuitos interruptores con transistores BJT. Muchas aplicaciones digitales usan circuitos integrados, pero se usan circuitos interruptores discretos con transistores cuando es necesario para proveer corrientes más altas o voltajes distintos de los que permiten los circuitos integrados. Los interruptores con transistores son más confiables que interruptores mecánicos, son más baratos y rápidos. Además, pueden aislar las cargas en ubicaciones peligrosas y remotas.

Los transistores como interruptores son operados en la región de corte o de saturación. La región de corte se refiere a la condición donde el transistor no conduce y la de saturación sucede cuando el transistor conduce libremente. Si un transistor está en corte, no hay corriente en el colector. Si está en saturación, conduce lo máximo posible.

Después de probar un circuito interruptor básico con un transistor, se realizarán 3 mejoras: (1) evitar las transiciones graduales con un segundo transistor, (2) aumentar el umbral de voltaje donde ocurre la transición y (3) añadir histéresis. La histéresis se refiere a dos distintos umbrales, según el estado de la salida. La histéresis ofrece protección ante el ruido eléctrico.

## 2. Lectura recomendada

- Floyd, Dispositivos Electrónicos, octava edición, Capítulo 4: Transistores de unión bipolar.

## 3. Objetivos claves

- Parte 1: Medir y graficar la curva característica de salida para un BJT y determinar el  $\beta_{CD}$  del transistor.
- Parte 2: Construir y probar varias características de circuitos interruptores con transistores, incluyendo los umbrales. Probar un circuito interruptor con histéresis.

## 4. Componentes necesarios

- Parte 1
  - 1 resistencia de  $100\ \Omega$
  - 1 resistencia de  $33\ k\Omega$
  - 1 transistor 2N3904 (o equivalente)
  - 1 diodo rectificador (1N4001 o equivalente)
- Parte 2
  - 1 resistencia de  $330\ \Omega$
  - 1 resistencia de  $1\ k\Omega$
  - 2 resistencias de  $10\ k\Omega$

- 1 potenciómetro de  $10\text{ k}\Omega$ .
- 2 transistores 2N3904 (o equivalente)
- 1 LED

## 5. Parte 1: Curva característica del BJT

### 5.1. Procedimiento

1. Mida y anote los valores de las resistencias en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de resistencia utilizados

Componente	Valor requerido	Valor medido
$R_1$	$33\text{ k}\Omega$	
$R_2$	$100\text{ }\Omega$	

2. Construya el circuito de la Figura 1. Inicie cada fuente variable en  $0\text{ V}$ . La resistencia  $R_1$  limita la corriente de base y permite la determinación indirecta de la corriente de base del transistor. Incremente lentamente la tensión  $V_{BB}$  hasta que  $V_{R1}$  alcance los  $1,65\text{ V}$ . Esto establece una corriente de base de  $50\text{ }\mu\text{A}$ , lo cual se determina aplicando la Ley de Ohm a  $R_1$ .

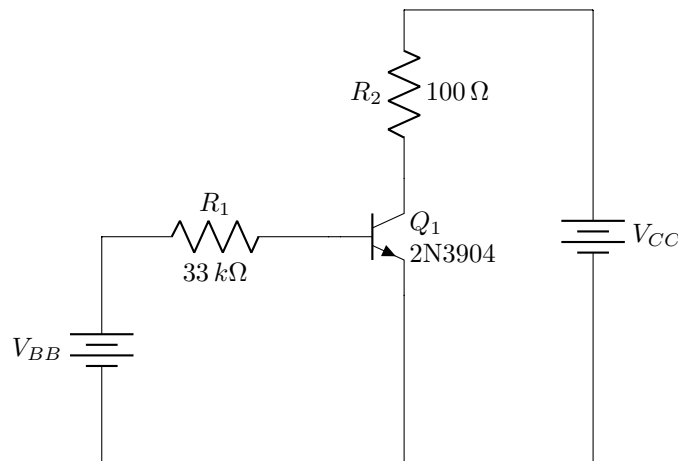


Figura 1: Circuito de emisor común para medir curvas características del BJT

3. Sin modificar  $V_{BB}$ , incremente lentamente  $V_{CC}$  hasta medir  $+2,0\text{ V}$  entre el colector y emisor ( $V_{CE}$ ). Mida y anote  $V_{R2}$  en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados experimentales

$V_{CE}$ (med.)	Corriente de base = $50\text{ }\mu\text{A}$		Corriente de base = $100\text{ }\mu\text{A}$		Corriente de base = $150\text{ }\mu\text{A}$	
	$V_{R2}$ (med.)	$I_C$ (cal.)	$V_{R2}$ (med.)	$I_C$ (calc.)	$V_{R2}$ (med.)	$I_C$ (calc.)
$2,0\text{ V}$						
$4,0\text{ V}$						
$6,0\text{ V}$						
$8,0\text{ V}$						

4. Con la tensión  $V_{R2}$  y el valor de  $R_2$ , aplique la Ley de Ohm y calcule la corriente de colector ( $I_C$ ). Note que la corriente de  $R_2$  es la misma corriente  $I_C$  del transistor. Apunte el valor calculado en la Tabla 2.
5. Sin cambiar  $V_{BB}$ , aumente  $V_{CC}$  hasta medir  $V_{CE} = 4,0 V$ . Mida y apunte  $V_{R2}$ . Calcule  $I_C$  aplicando la Ley de Ohm de la misma manera que el Paso 4. Repita este proceso para los valores de  $V_{CE}$  mostrados en la Tabla 2.
6. Reajuste  $V_{CC}$  a  $0 V$  y aumente  $V_{BB}$  hasta que  $V_{R1} = 3,3 V$ . Ahora la corriente de base es de  $100 \mu A$ .
7. Sin cambiar la configuración de  $V_{BB}$ , incremente lentamente  $V_{CC}$  hasta que  $V_{CE} = 2,0 V$ . Mida y anote  $V_{R2}$  en la Tabla 2. Calcule  $I_C$  y anote en la misma tabla.
8. Incremente  $V_{CC}$  hasta que  $V_{CE} = 4,0 V$ . Mida y anote  $V_{R2}$ . Calcule  $I_C$ . Repita este proceso para los valores de  $V_{CC}$  mostrados en la Tabla 2.
9. Reajuste  $V_{CC}$  a  $0 V$  y aumente  $V_{BB}$  hasta que  $V_{R1} = 4,95 V$ . Ahora la corriente de base es de  $150 \mu A$ .
10. Repita los pasos 7 y 8 con esta nueva corriente de base y complete la Tabla 2.
11. Grafique las tres curvas características de salida usando los datos de la Tabla 2. La curva característica de salida es una gráfica de  $I_C$  en función de  $V_{CE}$ , manteniendo la corriente de base constante. Escoga una escala para  $I_C$  apropiada para observar todos los datos. Etiquete las curvas con su corriente de base correspondiente. Utilice un gráfico como el mostrado en la Figura 2.

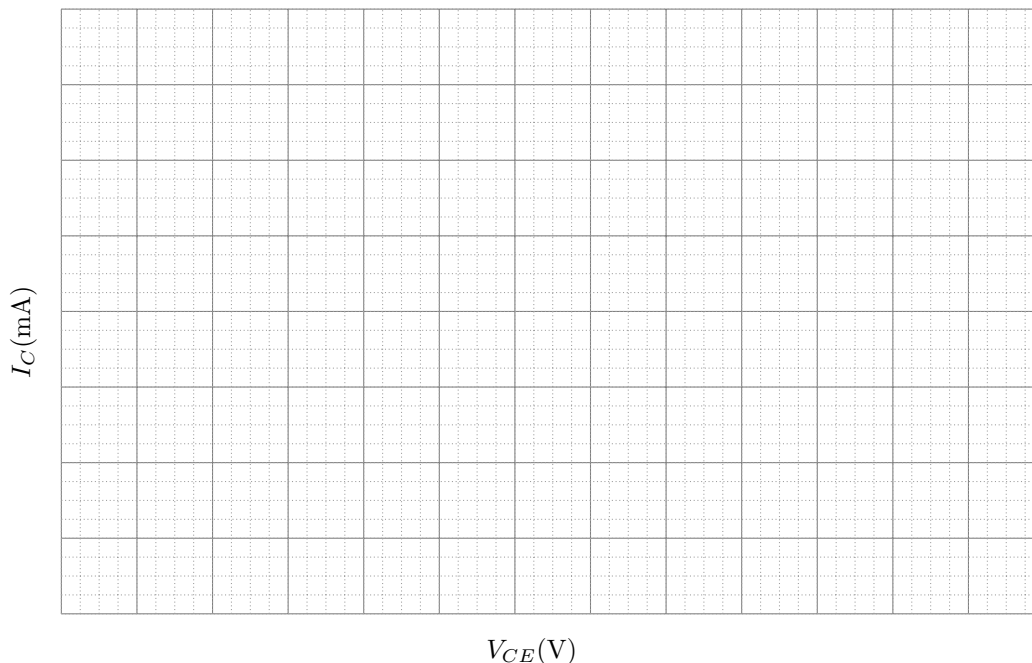


Figura 2: Gráfica para curvas características del BJT

12. Utilice la curva característica creada en el paso anterior para determinar el  $\beta_{CD}$  del transistor para  $V_{CE} = 3,0 V$  y corriente de base de  $50 \mu A$ ,  $100 \mu A$  y  $150 \mu A$ . Repita este paso con  $V_{CE} = 5,0 V$ . Anote los resultados en la Tabla 3.

Tabla 3: Ganancia en corriente  $\beta_{CD}$

$V_{CE}$	$I_B = 50 \mu A$	$I_B = 100 \mu A$	$I_B = 150 \mu A$
3,0 V			
5,0 V			

13. Construya el circuito de la Figura 3. Este circuito se utiliza para visualizar la curva característica de salida de un transistor BJT NPN en el osciloscopio. Este circuito es una modificación del anterior. La fuente de tensión del colector se cambió por un generador y un diodo. El generador puede ser configurado a una frecuencia de  $60 \text{ Hz}$ . Ahora, configure  $V_{BB}$  para medir  $V_{R1} = 1,65 \text{ V}$  y así obtener como antes  $I_B = 50 \mu A$ . Coloque el osciloscopio en modo X-Y con el canal Y invertido. Ajuste las escalas de los canales en el osciloscopio para observar la curva característica de la forma más clara posible y registre la curva. Repita este procedimiento para  $I_B = 100 \mu A$  y  $I_B = 150 \mu A$ .

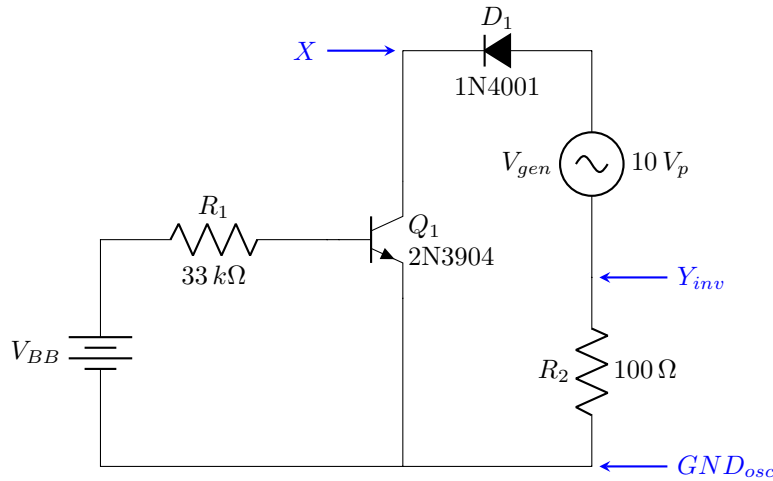


Figura 3: Circuito para observar curvas características del BJT con el osciloscopio

## 5.2. Preguntas

1. ¿Los datos indican que  $\beta_{CD}$  se mantiene constante en todos los puntos? ¿Tiene esto algún afecto sobre la linealidad del transistor?
2. ¿Qué efecto tendría un valor de  $\beta_{CD}$  más alto sobre las curvas características medidas?
3. ¿Cuál es la potencia máxima disipada por el transistor según los datos obtenidos en el experimento?
4. El alfa en CD de un transistor bipolar es la razón de corriente de colector  $I_C$  dividida entre la corriente de emisor  $I_E$ . Considerando que  $I_E = I_C + I_B$ , demuestre que el alpha CD se puede escribir como:

$$\alpha_{CD} = \frac{\beta_{CD}}{\beta_{CD} + 1}$$

Además, calcule el valor de  $\alpha_{CD}$  para el transistor utilizado en  $V_{CE} = 4,0 \text{ V}$  y  $I_B = 100 \mu A$ .

5. ¿Cuál valor de  $V_{CE}$  esperaría si la base del transistor se desconecta? ¿Por qué?

## 6. Parte 2: Circuitos interruptores con BJT

### 6.1. Procedimiento

1. Mida y anote los valores de las resistencias mostradas en la Tabla 4.  $R_1$  es un potenciómetro de  $10\text{ k}\Omega$  y no se muestra en la tabla.  $R_{C1}$  se usa en el paso 4.

Tabla 4: Valores de resistencia utilizados

Componente	Valor requerido	Valor medido
$R_B$	$10\text{ k}\Omega$	
$R_C$	$1,0\text{ k}\Omega$	
$R_{C1}$	$10\text{ k}\Omega$	
$R_E$	$330\text{ }\Omega$	

2. Idealmente, el transistor de un circuito interruptor opera en corte o en saturación. El circuito mostrado en la Figura 4 es un amplificador básico. Fácilmente se puede ajustar para que el transistor opere en las regiones extremas variando el potenciómetro ( $R_1$ ), pero este circuito también puede operar en región activa, lo cual no es ideal en un circuito interruptor. Calcule la tensión de colector-emisor ( $V_{CE}$ ) en el borde de la región de corte y luego en el de saturación. Luego calcule la tensión del resistor de colector en el borde de la región de saturación ( $V_{RC}$ ). Calcule  $I_{sat}$  asumiendo una tensión de  $2,0\text{ V}$  a través del LED y  $0,1\text{ V}$  a través del transistor. Muestre los valores calculados en la Tabla 5.

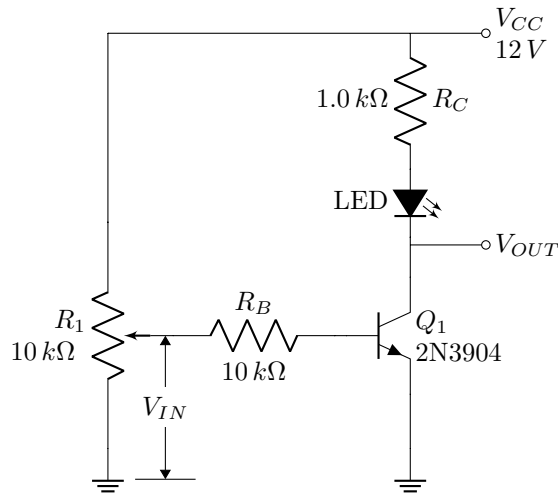


Figura 4: Circuito interruptor simple

Tabla 5: Cantidades características para circuito interruptor

Cantidad	Valor calculado	Valor medido
$V_{CE(corte)}$		
$V_{CE(sat.)}$		
$V_{RC(sat.)}$		
$I_{sat.}$		

3. Contruya el circuito de la Figura 4 y observe el efecto de variar el potenciómetro. Ajuste el potenciómetro al valor mínimo y mida  $V_{CE}$  en corte (el LED debería estar apagado). Ajuste el po-

tenciómentro al valor máximo y mida tanto  $V_{CE}$  en saturación (el LED debería estar encendido) como  $V_{RC}$ . El transistor está saturado ya que no puede alimentar más corriente en el circuito del colector. Anote las mediciones en la Tabla 5 y compare con los valores calculados en el Paso 2.

- En este paso se agrega un segundo transistor, su ganancia adicional mejora el comportamiento de las transiciones. El circuito se muestra en la Figura 5. Note que el resistor de  $1,0\text{ k}\Omega$  ahora es el resistor de colector de  $Q_2$ . Cuando  $V_{IN}$  es bajo,  $Q_1$  está en corte ya que no tiene suficiente corriente de base y  $Q_2$  está en saturación porque recibe su corriente de base a través de  $R_{C1}$ , entonces el LED estará encendido. Conforme aumenta la tensión de base de  $Q_1$ , este empieza a conducir. Cuando  $Q_1$  está cerca de saturarse, la tensión de base de  $Q_2$  cae, y este cambia de saturación a corte rápidamente. La tensión de salida baja y el LED se apaga. Construya el circuito y pruébelo según el siguiente paso.

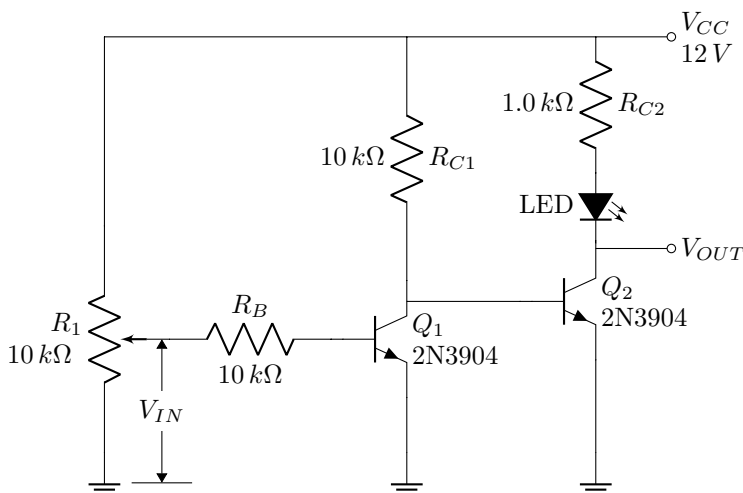


Figura 5: Circuito interruptor con dos transistores

Tabla 6: Cantidades características para circuito interruptor

Cantidad	Valor medido
$V_{IN(LED\ on)}$	
$V_{OUT(LED\ on)}$	
$V_{IN(Umbral)}$	
$V_{OUT(Umbral)}$	

- Ajuste el potenciómetro al mínimo para lograr que  $V_{IN} = 0\text{ V}$ . Ya que  $Q_1$  está apagado, el LED debería estar encendido. Mida y anote  $V_{IN}$  y  $V_{OUT}$  en la Tabla 6. Aumente  $V_{IN}$  lentamente hasta que se apague el LED. Notará que el LED se apaga inmediatamente a cierta tensión. Anote  $V_{IN}$  y  $V_{OUT}$  en el umbral donde se apaga el LED. Note que la tensión de salida indica si  $Q_2$  está en corte o en saturación.
- En el Paso 5, el umbral de transición fue claro, pero la tensión de umbral es baja y es sensible al ruido de entrada. Otra mejora sencilla al circuito se muestra en la Figura 6. La resistencia de emisor común  $R_E$  aumenta la tensión de umbral. Además, ya que las corrientes de saturación de los transistores son distintas, el umbral es distinto para cuando la salida está en corte o en saturación. Este fenómeno importante se llama histéresis y es característico de los disparadores de tipo Schmitt. Modifique el circuito del Paso 5 con el resistor de  $330\Omega$  y pruébelo según el siguiente paso.



7. Ajuste el potenciómetro al mínimo para lograr que  $v_{IN} = 0\text{ V}$ . El LED debería estar encendido. Mida y anote  $V_{IN}$  y  $V_{OUT}$  en la Tabla 7. La lectura de  $V_{OUT}$  es mayor al circuito anterior, pero el transistor sigue saturado (¿Por qué?). Para probar el umbral superior, aumente lentamente  $V_{IN}$  hasta que el LED se apague. Mida y anote  $V_{IN}$  y  $V_{OUT}$ , confirme que el transistor está en corte. Ahora disminuya lentamente  $V_{IN}$ . Note que el LED permanece apagado hasta que la tensión es menor. Cuando el LED encienda nuevamente, mida y anote  $V_{IN}$  y  $V_{OUT}$  en el umbral inferior.

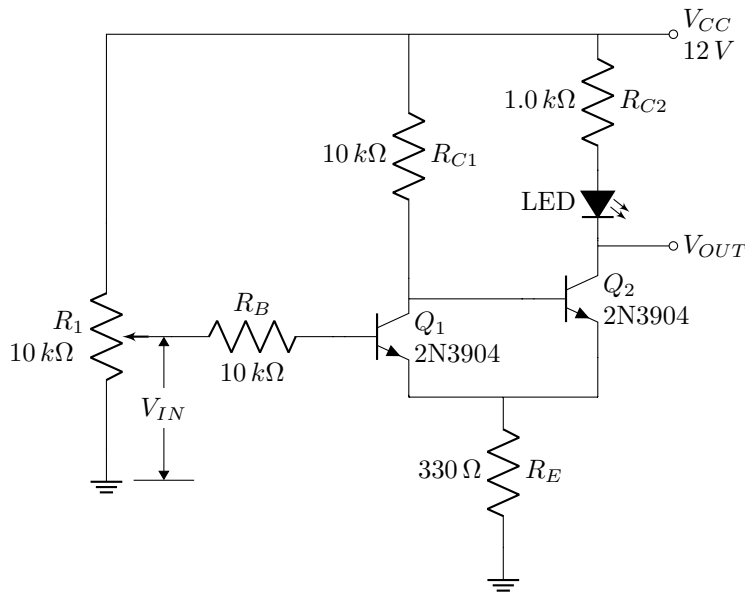


Figura 6: Circuito interruptor con dos transistores y con resistor de emisor

Tabla 7: Cantidades características para circuito interruptor

Cantidad	Valor medido
$V_{IN(LED\ on)}$	
$V_{OUT(LED\ on)}$	
$V_{IN(Umbral\ sup.)}$	
$V_{OUT(Umbral\ sup.)}$	
$V_{IN(Umbral\ inf.)}$	
$V_{OUT(Umbral\ inf.)}$	

8. Una curva de transferencia es un gráfico de la salida de un circuito (en el eje Y) en función de la entrada (en el eje X). Monte una tabla de datos para el circuito de la Figura 6 y anote las tensiones de entrada y salida conforme se ajusta la tensión de entrada. Anote suficientes datos para entender la tensión de salida para el rango de valores de entrada. Grafique los datos y asigne las etiquetas en los ejes correspondientes.

## 6.2. Preguntas

- ¿Cuáles son 3 ventajas de los circuitos interruptores con transistores?
- ¿Cuál es la función de  $R_B$  en el circuito de la Figura 6?
- Asumiendo que se desea determinar la corriente de base del transistor  $Q_1$  del circuito de la Figura 6. ¿Qué tensión se debe medir para determinar indirectamente esta corriente?

4. En el Paso 6, se mencionó que los transistores tienen corrientes de saturación distintos. ¿Por qué?