

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, COMPUTACIÓN Y CONTROL

LABORATORIO 3 - Polarización del BJT

Estudiantes:
Santana Ricardo C.I.:29571461
Fajardo Carla C.I.:27571576

Índice

1. Resumen	2
2. Introducción	3
3. Objetivos	4
3.1. Objetivo General	4
3.2. Objetivos Específicos	4
4. Marco Teórico	5
4.1. Construcción del transistor	5
4.2. Simbolos y convenio de signos	5
4.3. zonas de funcionamiento	5
4.4. Curvas Características en Emisor Común	6
4.4.1. Curvas características de entrada	6
4.4.2. Curvas características de salida	7
5. Metodología	8
5.1. Trabajo Previo al Laboratorio	8
5.2. Trabajo de Laboratorio	8
6. Cálculos previos	11
6.1. Analisis del circuito de la Figura 5.1	12
6.2. Analisis del circuito de la Figura 5.2	12
6.3. Analisis del circuito de la Figura 5.3	13
6.4. Analisis del circuito de la Figura 5.4	14
6.5. Analisis del circuito de la Figura 5.5	16
6.6. Analisis del circuito de la Figura 5.6	17
6.7. Resumen Puntos de Operación estáticos	19
7. Materiales e Instrumentos	20
8. Presentación de Resultados	21
9. Análisis de Resultados	31
10. Conclusiones y Recomendaciones	32
11. Bibliografía	33
12. Anexos	34

1. Resumen

Con los circuitos necesarios previamente montados se procedió a seguir los pasos planteados en la metodología. En cuanto a las mediciones, estas se realizaron sin mayores inconvenientes ya que se tomaron previsiones al identificar todas las resistencias que se utilizarían debido a las múltiples combinaciones de resistencias que había que hacer para ciertos circuitos, con el fin de estudiar el comportamiento del transistor en sus distintas zonas de operación.

2. Introducción

Entre las diversas estructuras que pueden conformar los semiconductores cabe destacar la del transistor de unión bipolar, conocido por sus siglas en inglés como BJT (Bipolar Junction Transistor), ésta consta de dos uniones pn construidas de manera especial y conectadas en serie, espalda con espalda.

El transistor consta de tres terminales, estos se denominan emisor (E), base (B) y colector (C); en base a estos el transistor puede implementarse en un circuito con configuración emisor común, base común o colector común. Se experimentará utilizando la configuración emisor común.

Se presentará en el escrito las nociones básicas del BJT, de tal forma que se permita establecer el punto estático de operación que relaciona a la recta de carga y la curva característica del transistor, la cual nos facilita la implementación y diseño de circuitos electrónicos más complejos con transistores.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Análizar las características y el funcionamiento del BJT en la configuración emisor común.

3.2. Objetivos Específicos

- Familiarizar y estudiar topologías básicas de polarización del BJT en la configuración Emisor Común.
- Obtener nociones acerca de la polarización del BJT.
- Estudiar el punto estático de operación variando el valor de las resistencias del circuito.
- Estudiar la recta de carga estática y su relación con las curvas características del transistor.

4. Marco Teórico

El transistor BJT se describe en [1] de la siguiente manera:

4.1. Construcción del transistor

El transistor es un dispositivo de tres zonas o capas. Podemos tener una zona de material tipo n en medio de dos zonas de material tipo p, en este caso se denomina transistor pnp, o bien tener una zona tipo p con dos zonas tipo n a cada lado, en cuyo caso estaríamos hablando de un transistor npn.

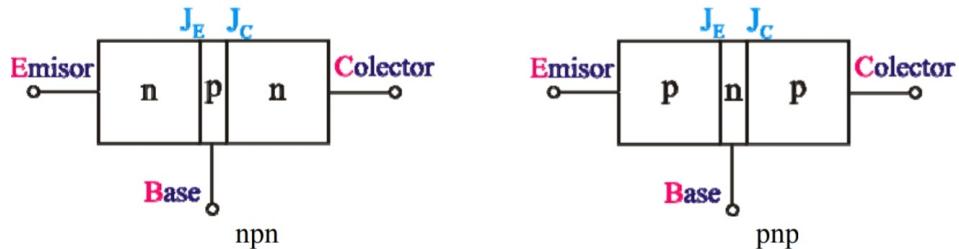


Figura 4.1: Estructura del transistor

La zona central se denomina base, y las laterales emisor y colector. Cada una de las zonas consta de un terminal por donde extraer las corrientes. Estos terminales se representan por la inicial del nombre de la zona respectiva: E (emitter), B (base) y C (colector).

4.2. Símbolos y convenio de signos

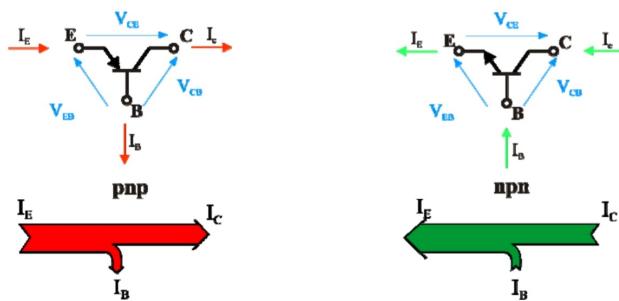


Figura 4.2: Estructura del transistor

En la figura aparecen los símbolos que se utilizan para la representación del transistor de unión bipolar. Para las corrientes se han representado los sentidos reales de circulación de las mismas.

4.3. zonas de funcionamiento

Cuando anteriormente hablábamos de la unión pn veíamos que teníamos dos posibilidades de polarización de la misma, de tal forma que el diodo tenía dos posibles estados o zonas de trabajo: en directa y en inversa. Ahora estamos ante un dispositivo que tiene dos uniones, una unión entre las zonas de emisor y base (que denominaremos

a partir de ahora unión de emisor JE) y otra unión entre las zonas de base y colector (de que denominaremos unión de colector JC), cada una de las cuales puede ser polarizada en las dos formas mencionadas anteriormente. Así, desde el punto de vista global del dispositivo tenemos cuatro zonas de funcionamiento posibles en función del estado de polarización de las dos uniones.

De esta forma, si polarizamos las dos uniones en directa, diremos que el transistor está trabajando en la zona de saturación. En el caso de que la unión de emisor la polaricemos en directa y la unión de colector en inversa, estaremos en la zona activa. Cuando las dos uniones se polarizan en inversa, se dice que el transistor está en la zona de corte. Por último, si la unión de emisor se polariza en inversa y la unión de colector en directa, el transistor se encuentra en activa inversa. De las cuatro zonas, las 3 mencionadas en primer lugar son las más interesantes desde el punto de vista del funcionamiento del transistor, siendo la zona activa inversa una zona puramente teórica y sin interés práctico.

4.4. Curvas Características en Emisor Común

4.4.1. Curvas características de entrada

En la siguiente figura aparecen representados los convenios de tensiones y corrientes positivas que se han tenido en cuenta para representar las distintas curvas.



Figura 4.3: Sentido positivo de las variables en la curva característica de entrada del BJT

Como se puede ver en la figura, no hay una única curva que relacione I_B con V_{BE} , sino que hay una familia de curvas en función de V_{CE} .

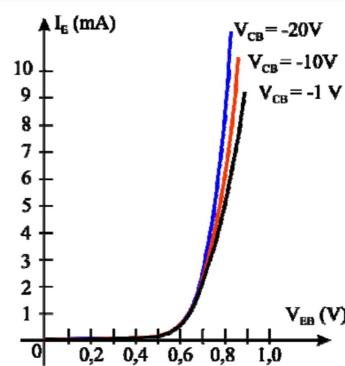


Figura 4.4: Curvas Características de Entrada en Emisor Común para un BJT npn

4.4.2. Curvas características de salida

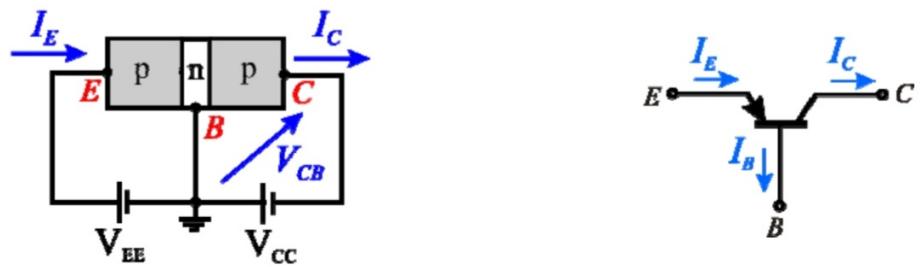


Figura 4.5: Sentido positivo de las variables en la curva característica de salida del BJT

En las características de salida en emisor común se representa

$$I_C = f(V_{CE}, I_C)$$

Los sentidos positivos de tensiones y corrientes son los que aparecen representados en la figura anterior

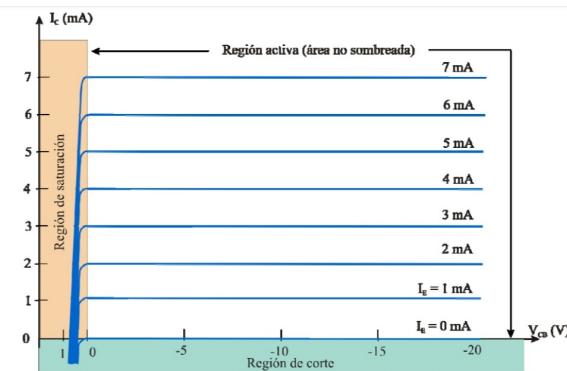


Figura 4.6: Curvas características de salida en Emisor Común en un BJT npn

5. Metodología

5.1. Trabajo Previo al Laboratorio

1. Determine el punto estático de operación y obtenga la tensión en cada uno de los terminales (tensión en el Colector (V_C), tensión en la Base (V_B) y la tensión en el Emisor (V_E)) del BJT, para los circuitos de la Figura 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5. El valor de V_{BE} y β , deben obtenerlo del manual del fabricante según el transistor a utilizar.

5.2. Trabajo de Laboratorio

1. Mida la tensión en cada uno de los terminales del transistor y obtenga el punto estático de operación para el circuito de la Figura 5.1, 5.2 y 5.3.
2. Para el circuito de la Figura 5.4 realice lo siguiente:
 - a) mida la tensión en cada uno de los terminales del transistor y obtenga el punto estático de operación.
 - b) mida la tensión en cada uno de los terminales del transistor y obtenga el punto estático de operación con los siguientes valores de resistencia en el circuito:
 - 1) $RB = 82k\Omega, RC = 2k\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
 - 2) $RB = 36k\Omega, RC = 2k\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
 - 3) $RB = 56k\Omega, RC = 3k\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
 - 4) $RB = 56k\Omega, RC = 1,3k\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
 - 5) $RB = 56k\Omega, RC = 2k\Omega$ y $RE = 300\Omega$.
 - 6) $RB = 56k\Omega, RC = 2k\Omega$ y $RE = 130\Omega$.
3. Para el circuito de la Figura 5.5 realice lo siguiente:
 - a) mida la tensión en cada uno de los terminales del transistor y obtenga el punto estático de operación.
 - b) mida la tensión en cada uno de los terminales del transistor y obtenga el punto estático de operación con los siguientes valores de resistencia en el circuito:
 - 1) $R1 = 82k\Omega, R2 = 10k\Omega, RC = 510\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
 - 2) $R1 = 39k\Omega, R2 = 10k\Omega, RC = 510\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
 - 3) $R1 = 56k\Omega, R2 = 15k\Omega, RC = 510\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
 - 4) $R1 = 56k\Omega, R2 = 6,8k\Omega, RC = 510\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
 - 5) $R1 = 56k\Omega, R2 = 56k\Omega, RC = 750\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
 - 6) $R1 = 56k\Omega, R2 = 56k\Omega, RC = 360\Omega$ y $RE = 200\Omega$.
4. Para el circuito de la Figura 5.6, varíe el potenciómetro de un extremo a otro, observe que ocurre con la tensión en cada uno de los terminales del transistor y el punto estático de operación. Anote en cada extremo la tensión en cada uno de los terminales del transistor y obtenga el punto estático de operación. Coloque el potenciómetro aproximadamente en la mitad de su recorrido y realice las mediciones respectivas.

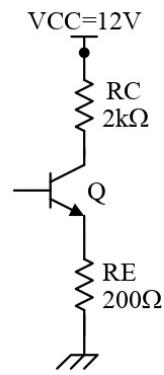


Figura 5.1: Circuito 1

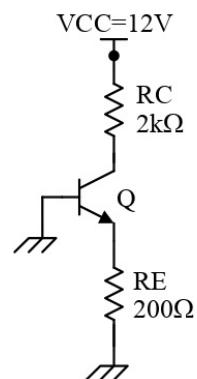


Figura 5.2: Circuito 2

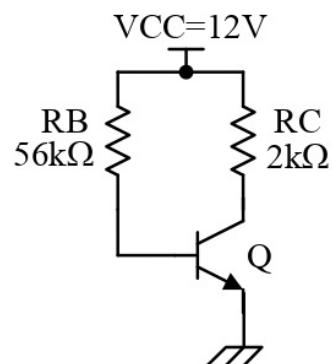


Figura 5.3: Circuito 3

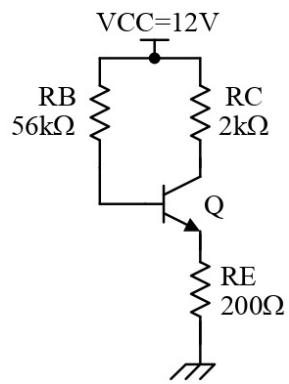


Figura 5.4: Circuito 4

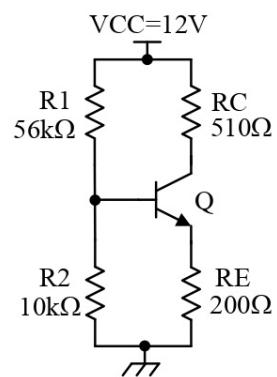


Figura 5.5: Circuito 5

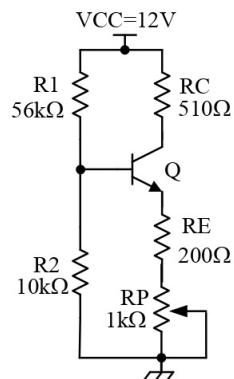


Figura 5.6: Circuito 6

6. Cálculos previos

Se trabajará con el transistor npn PN2222A, el cual posee las siguientes especificaciones:

Tabla 1: Características del transistor PN2222A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_{case} = 25 °C unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I _{CEX}	Collector Cut-off Current (V _{BE} = -3 V)	V _{CE} = 60 V			10	nA
I _{BEX}	Base Cut-off Current (V _{BE} = -3 V)	V _{CE} = 60 V			20	nA
I _{CBO}	Collector Cut-off Current (I _E = 0)	V _{CB} = 75 V V _{CB} = 75 V T _j = 150 °C			10 10	nA μA
I _{EBO}	Emitter Cut-off Current (I _C = 0)	V _{EB} = 3 V			15	nA
V _{(BR)CEO*}	Collector-Emitter Breakdown Voltage (I _B = 0)	I _C = 10 mA	40			V
V _{(BR)CBO}	Collector-Base Breakdown Voltage (I _E = 0)	I _C = 10 μA	75			V
V _{(BR)EBO}	Emitter-Base Breakdown Voltage (I _C = 0)	I _E = 10 μA	6			V
V _{CE(sat)*}	Collector-Emitter Saturation Voltage	I _C = 150 mA I _B = 15 mA I _C = 500 mA I _B = 50 mA			0.3 1	V
V _{BE(sat)*}	Collector-Base Saturation Voltage	I _C = 150 mA I _B = 15 mA I _C = 500 mA I _B = 50 mA	0.6		1.2 2	V
h _{FE*}	DC Current Gain	I _C = 0.1 mA V _{CE} = 10 V I _C = 1 mA V _{CE} = 10 V I _C = 10 mA V _{CE} = 10 V I _C = 150 mA V _{CE} = 10 V I _C = 150 mA V _{CE} = 1 V I _C = 500 mA V _{CE} = 10 V	35 50 75 100 50 40		300	
f _T	Transition Frequency	I _C = 20 mA V _{CE} = 20V f = 100MHz		270		MHz
C _{CBO}	Collector-Base Capacitance	I _E = 0 V _{CB} = 10 V f = 1 MHz		4	8	pF
C _{EBO}	Emitter-Base Capacitance	I _C = 0 V _{EB} = 0.5 V f = 1MHz		20	25	pF
NF	Noise Figure	I _C = 0.1 mA V _{CE} = 10 V f = 1 KHz Δf = 200 Hz R _G = 1 KΩ		4		dB
h _{ie*}	Input Impedance	V _{CE} = 10 V I _C = 1 mA f = 1 KHz V _{CE} = 10 V I _C = 10 mA f = 1 KHz	2 0.25		8 1.25	KΩ KΩ
h _{re*}	Reverse Voltage Ratio	V _{CE} = 10 V I _C = 1 mA f = 1 KHz V _{CE} = 10 V I _C = 10 mA f = 1 KHz			8 4	10 ⁻⁴ 10 ⁻⁴
h _{te*}	Small Signal Current Gain	V _{CE} = 10 V I _C = 1 mA f = 1 KHz V _{CE} = 10 V I _C = 10 mA f = 1 KHz	50 75		300 375	
h _{oe*}	Output Admittance	V _{CE} = 10 V I _C = 1 mA f = 1 KHz V _{CE} = 10 V I _C = 10 mA f = 1 KHz	5 25		35 200	μS μS

* Pulsed: Pulse duration = 300 μs, duty cycle ≤ 2 %

de las cuales se deduce que:

$$\beta = h_{FE} = 100 @ I_C = 150mA; V_{CE} = 10V \text{ (mínimo)}$$

$$V_{BEsat} = 0,6V @ I_C = 150mA; I_B = 15mA \text{ (mínimo)}$$

6.1. Análisis del circuito de la Figura 5.1

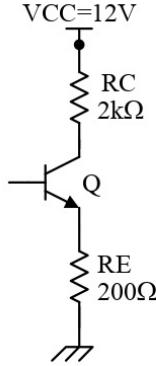


Figura 5.1: Circuito 1

V_B : indeterminado (circuito abierto) \rightarrow asumiendo $V_B = 0V$ Como $I_C = \beta I_B \rightarrow I_C = 0A$, por lo tanto

$$V_C = 12V$$

Además $I_E = (\beta + 1)I_B \rightarrow I_E = 0A$, por lo tanto

$$V_E = 0V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 12V$$

El transistor se encuentra en la zona de corte, entonces el punto de operación de la figura 5.1 es:

$$Q : (12V, 0A) \quad (1)$$

6.2. Análisis del circuito de la Figura 5.2

estimando $V_C > 0 \rightarrow V_B = 0 < V_C$, por tanto el transistor está polarizado inversamente, que indica que se encuentra en su zona de corte, entonces

$$V_B = 0V$$

Como $I_C = \beta I_B \rightarrow I_C = 0A$, por lo tanto

$$V_C = 12V$$

Además $I_E = (\beta + 1)I_B \rightarrow I_E = 0A$, por lo tanto

$$V_E = 0V$$

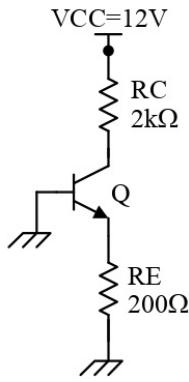


Figura 5.2: Circuito 2

$$V_{CE} = V_C - V_E = 12V$$

El transistor se encuentra en la zona de corte, entonces el punto de operación de la figura 5.2 es:

$$Q : (12V, 0A) \quad (2)$$

6.3. Análisis del circuito de la Figura 5.3

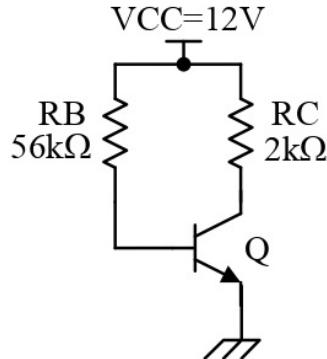


Figura 5.3: Circuito 3

aplicando ley de tensiones de Kirchoff se tiene

$$R_B I_B + V_{BE} = V_{CC}$$

despejando I_B

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

sustituyendo valores

$$I_B = \frac{12V - 0,6V}{56k\Omega} = 0,204mA$$

aplicando ley de tensiones de Kirchoff a la malla faltante

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

sabiendo que $I_C = \beta I_B = 20,4mA$

$$R_C\beta I_B + V_{CE} = V_{CC}$$

despejando V_{CE}

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C\beta I_B \quad (3)$$

sustituyendo valores

$$V_{CE} = 12V - 2k\Omega(100)(0,204mA) = -38,8V$$

El transistor no se encuentra activo, entonces aplicando la lógica de los circuitos 1 y 2:

$$V_C = 12V$$

$$V_B = 12V$$

$$V_E = 0V$$

$$V_{CE} = 12V$$

$$Q : (12V, 0A)$$

por convención de signos los valores que puede llegar a tomar V_{CE} quedan establecidos en $V_{CE} > 0$

por tanto si $V_{CE} = 0$ en 3:

$$0 = 12V - R_C(100)(0,204mA)$$

$$R_C = 588\Omega$$

Entonces se debería cumplir que para $R_C < 588\Omega$ el transistor se encuentra saturado y circula corriente por el circuito

6.4. Análisis del circuito de la Figura 5.4

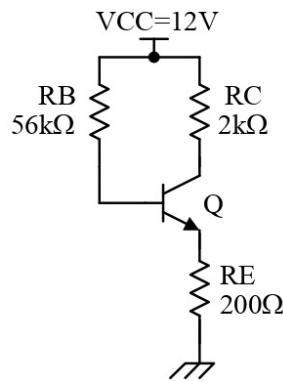


Figura 5.4: Circuito 4

aplicando ley de tensiones de Kirchoff se tiene

$$R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E = V_{CC}$$

sabiendo que $I_E = (\beta + 1)I_B$

$$R_B I_B + V_{BE} + R_E(\beta + 1)I_B = V_{CC}$$

despejando I_B

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta + 1)}$$

sustituyendo valores

$$I_B = \frac{12V - 0,6V}{56k\Omega + 200\Omega(100+1)} = 0,150mA$$

aplicando ley de tensiones de Kirchoff a la malla faltante

$$R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E = V_{CC}$$

sabiendo que $I_C = \beta I_B$ y $I_E = (\beta + 1)I_B$

$$R_C \beta I_B + V_{CE} + R_E(\beta + 1)I_B = V_{CC}$$

despejando V_{CE}

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \beta I_B - R_E(\beta + 1)I_B \quad (2)$$

sustituyendo valores

$$V_{CE} = 12V - 2k\Omega(100)(0,204mA) - 200\Omega(100+1)(0,150mA) = -31,8V$$

El transistor no se encuentra activo, entonces aplicando la lógica de los circuitos 1 y 2:

$$V_C = 12V$$

$$V_B = 12V$$

$$V_E = 0V$$

$$V_{CE} = 12V$$

$$Q : (12V, 0A)$$

por convención de signos los valores que puede llegar a tomar V_{CE} quedan establecidos en $V_{CE} > 0$

por tanto si $V_{CE} = 0$ en (2):

$$0 = 12V - R_C(100)(0,204mA) - R_E(100+1)(0,150mA)$$

$$0,0204R_C + 0,0151R_E < 12$$

Quedando así un sistema compatible indeterminado de una ecuación con dos incógnitas, en el cual se pueden variar los valores de las resistencias de manera que el transistor se sature.

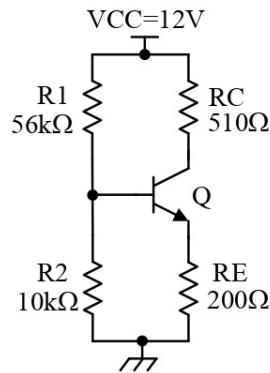


Figura 5.5: Circuito 5

6.5. Análisis del circuito de la Figura 5.5

Calculando equivalente de thevelin entre la base del transistor y la referencia

$$R_{Th} = R_1 // R_2 = 56k\Omega // 10k\Omega = 8,48k\Omega$$

por divisor de voltaje

$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{10k\Omega}{56k\Omega + 10k\Omega} (12V) = 1,81V$$

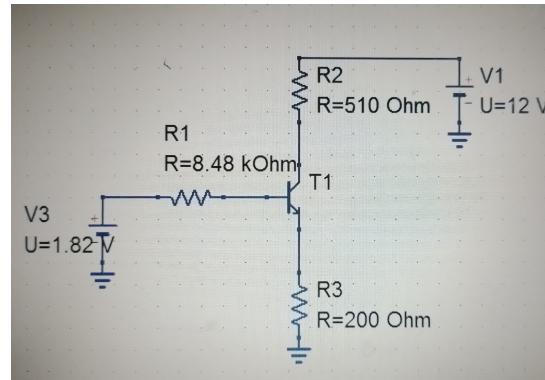


Figura 6.1: Circuito 5 con equivalente de Thevelin

aplicando ley de tensiones de Kirchoff

$$R_{Th}I_B + V_{BE} + R_E I_E = V_{Th}$$

si $I_E = (\beta + 1)I_B$, entonces

$$R_{Th}I_B + V_{BE} + R_E(\beta + 1)I_B = V_{Th}$$

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

Sustituyendo valores

$$I_B = \frac{1,82V - 0,6V}{8,48k\Omega + 200\Omega(100+1)} = 0,043mA$$

sabiendo que $I_C = \beta I_B$

$$I_C = 100(0,043mA) = 4,3mA$$

por otra parte

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (100 + 1)0,043mA = 4,343mA$$

aplicando ley de tensiones de Kirchoff a la otra malla

$$R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E = V_{CC}$$

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

sustituyendo

$$V_{CE} = 12V - 510\Omega(4,3mA) - 200\Omega(4,343mA) = 8,94V$$

por ley de ohm

$$V_E = R_E I_E = 200\Omega(4,343mA) = 0,87V$$

además

$$V_B = V_{BE} + V_E = 0,6V + 0,87V = 1,47V$$

$$V_C = V_{CE} + V_E = 8,94V + 0,87V = 9,81V$$

punto de operacion

$$Q = (8,94V, 4,30mA) \quad (2)$$

El transistor se encuentra activo

6.6. Análisis del circuito de la Figura 5.6

Se aplicará una lógica semejante al circuito anterior, donde:

$$R_{Ecircuito5} = R_{Ecircuito6} + R_P$$

Calculando equivalente de thevelin entre la base del transistor y la referencia

$$R_{Th} = R_1 // R_2 = 56k\Omega // 10k\Omega = 8,48k\Omega$$

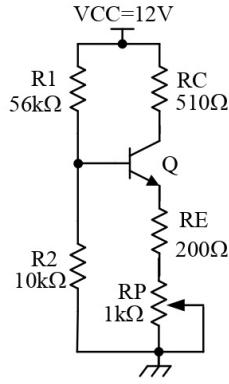


Figura 5.6: Circuito 6

por divisor de voltaje

$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{10k\Omega}{56k\Omega + 10k\Omega} (12V) = 1,81V$$

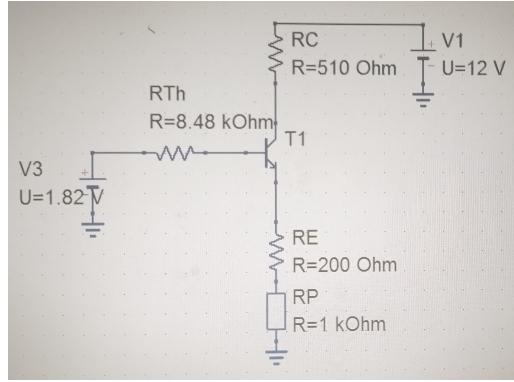


Figura 6.2: Circuito 6 con equivalente de Thevelin

aplicando ley de tensiones de Kirchoff

$$R_{Th}I_B + V_{BE} + (R_E + R_P)I_E = V_{Th}$$

si $I_E = (\beta + 1)I_B$, entonces

$$R_{Th}I_B + V_{BE} + (R_E + R_P)(\beta + 1)I_B = V_{Th}$$

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (R_E + R_P)(\beta + 1)}$$

Sustituyendo valores

$$I_B = \frac{1,82V - 0,6V}{8,48k\Omega + (200\Omega + R_P)(100 + 1)} = \frac{1,22}{28680 + 101R_P} A$$

sabiendo que $I_C = \beta I_B$

$$I_C = 100 \left(\frac{1,22}{28680 + 101R_P} \right) A = \frac{122}{28680 + 101R_P} A$$

por otra parte

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (100 + 1)\left(\frac{1,22}{28680 + 101R_P}\right)A = \frac{123,22}{28680 + 101R_P}A$$

aplicando ley de tensiones de Kirchoff a la otra malla

$$R_CI_C + V_{CE} + R_EI_E = V_{CC}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_CI_C - R_EI_E$$

sustituyendo

$$\begin{aligned} V_{CE} &= 12V - 510\Omega\left(\frac{122}{28680 + 101R_P}A\right) - 200\Omega\left(\frac{123,22}{28680 + 101R_P}A\right) \\ V_{CE} &= \left(12 - \frac{86864}{28680 + 101R_P}\right)V \end{aligned}$$

para caso extremo $R_P = 1k\Omega$

$$V_{CE} = \left(12 - \frac{86864}{28680 + 101(1000)}\right)V = 11,33V$$

por ley de ohm

$$V_E = R_EI_E = 200\Omega(0,950mA) = 0,19V$$

además

$$V_B = V_{BE} + V_E = 0,7V + 0,19V = 0,89V$$

$$V_C = V_{CE} + V_E = 11,33V + 0,19V = 11,52V$$

punto de operacion

$$Q = (11,33V, 0,940mA) \quad (3)$$

El transistor se encuentra activo, casi en zona de corte

6.7. Resumen Puntos de Operación estáticos

Tabla 2: Puntos de operación estáticos teóricos

	V_{CE}	I_C
Q_1	12V	0mA
Q_2	12V	0mA
Q_3	12V	0mA
Q_4	12V	0mA
Q_5	8.94V	4.30mA
Q_6	11.33V	0.940mA

7. Materiales e Instrumentos

Tabla 3: Equipos o instrumentos

Equipo	Marca	Modelo
Osciloscopio	UNI-T	UTD2102CEX+
Fuente de alimentacion DC	UNI-T	UTP3305-II

Tabla 4: Componentes y materiales

Referecia	Descripcion	Especificaciones
$RB = 82k\Omega$	Resistencia	1/2 W
$RB = 36k\Omega$	Resistencia	1/4 W
$RB = 56k\Omega$	Resistencia	1/8 W
$RC = 2k\Omega$	Resistencia	1/4 W
$RC = 3k\Omega$	Resistencia	1/4 W
$RC = 1,3k\Omega$	Resistencia	1/4 W
$RC = 510\Omega$	Resistencia	1/8 W
$RC = 750\Omega$	Resistencia	1/4 W
$RC = 360\Omega$	Resistencia	1/4 W
$RE = 200\Omega$	Resistencia	1/4 W
$RE = 300\Omega$	Resistencia	1/4 W
$RE = 130\Omega$	Resistencia	1/4 W
$R1 = 39k\Omega$	Resistencia	1/4 W
$R2 = 10k\Omega$	Resistencia	1/4 W
$R2 = 15k\Omega$	Resistencia	1/4 W
$R2 = 6,8 k\Omega$	Resistencia	1/4 W
T = 2N2222	Tansistor BJT NPN	

8. Presentación de Resultados

Tabla 5: Resultados experimentales del trabajo de laboratorio 1 y punto de operación obtenido

1	V_B [V]	V_C [V]	V_E [V]	I_C [mA]	V_{CE} [V]	operacion
Circuito 1	0 ± 0	12 ± 1	0 ± 0	0 ± 0	12 ± 1	corte
Circuito 2	0 ± 0	12 ± 1	0 ± 0	0 ± 0	12 ± 1	corte
Circuito 3	$0,6 \pm 0,04$	$0,09 \pm 0,01$	0 ± 0	$5,95 \pm 1,10$	$0,09 \pm 0,01$	saturado

Tabla 6: Resultados experimentales del trabajo de laboratorio 2 y punto de operación obtenido

2	V_B [V]	V_C [V]	V_E [V]	I_C [mA]	V_{CE} [V]	operación
2a	$1,9 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$	$5,35 \pm 1,08$	$0,1 \pm 0,2$	saturado
2b1	$1,9 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$	$5,35 \pm 1,08$	$0,1 \pm 0,2$	saturado
2b2	$1,9 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$	$5,35 \pm 1,08$	$0,1 \pm 0,2$	saturado
2b3	$1,5 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$	$3,70 \pm 0,73$	$0,1 \pm 0,2$	saturado
2b4	$3 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$	$7,53 \pm 1,67$	$0,2 \pm 0,4$	saturado
2b5	$2,4 \pm 0,2$	$1,7 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,1$	$5,15 \pm 1,06$	$0,1 \pm 0,2$	saturado
2b6	$1,3 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,04$	$0,6 \pm 0,04$	$5,66 \pm 1,08$	$0,08 \pm 0,08$	saturado

Tabla 7: Resultados experimentales del trabajo de laboratorio 3 y punto de operación obtenido

3	V_B [V]	V_C [V]	V_E [V]	I_C [mA]	V_{CE} [V]	operación
3a	$1,5 \pm 0,1$	9 ± 1	$1,0 \pm 0,1$	$5,88 \pm 4,50$	$8 \pm 1,1$	Activo
3b1	$1,2 \pm 0,1$	11 ± 1	$0,58 \pm 0,04$	$1,96 \pm 4,11$	$10,42 \pm 1,04$	Activo-Corte
3b2	$2,4 \pm 0,2$	7 ± 1	$1,8 \pm 0,2$	$9,80 \pm 4,90$	$5,2 \pm 1,2$	Activo
3b3	$2,2 \pm 0,2$	8 ± 1	$1,5 \pm 0,1$	$7,84 \pm 4,70$	$6,5 \pm 1,1$	Activo
3b4	$1,2 \pm 0,1$	11 ± 1	$0,58 \pm 0,04$	$1,96 \pm 4,11$	$10,42 \pm 1,04$	Activo-corte
3b5	$3,2 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,2$	$12,26 \pm 2,82$	$0,2 \pm 0,4$	Saturado
3b6	$3,8 \pm 0,4$	$6 \pm 0,44$	$3,2 \pm 0,2$	$16,67 \pm 5,55$	$2,8 \pm 0,6$	Saturado

Tabla 8: Resultados experimentales del trabajo de laboratorio 4 y punto de operación obtenido

RP [■]	V_B [V]	V_C [V]	V_E [V]	I_C [mA]	V_{CE} [V]	operación
1000	$1,7 \pm 0,1$	12 ± 1	$1,1 \pm 0,1$	$0 \pm 3,92$	$10,9 \pm 1,1$	Corte
500	$1,7 \pm 0,1$	11 ± 1	$1,1 \pm 0,1$	$1,96 \pm 4,11$	$9,9 \pm 1,1$	Activo-corte
10	$1,6 \pm 0,1$	10 ± 1	$1,0 \pm 0,1$	$3,92 \pm 4,31$	$9,0 \pm 1,1$	Activo

Observación: Para el cálculo del punto de operación se utilizan las fórmulas 2, 2, 2, 3 en los anexos.

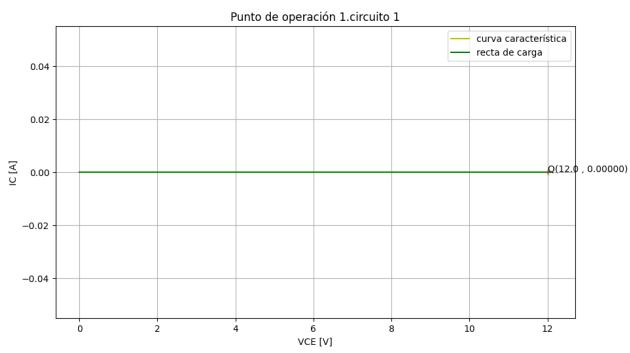


Figura 8.1: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.1

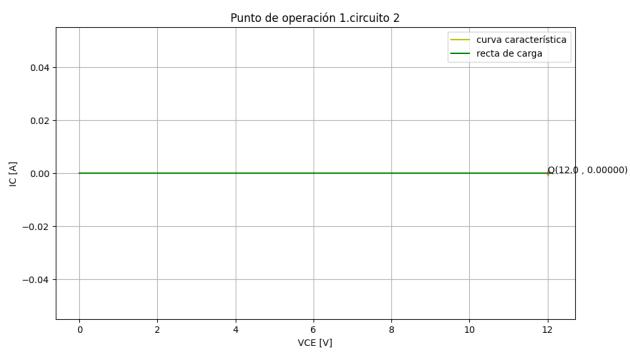


Figura 8.2: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.2

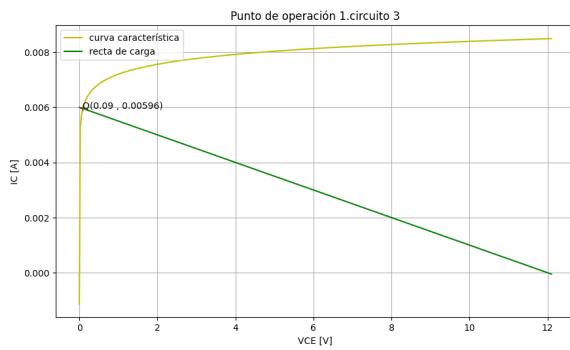


Figura 8.3: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.3

Tabla 9: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 2a

RB	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$2k\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

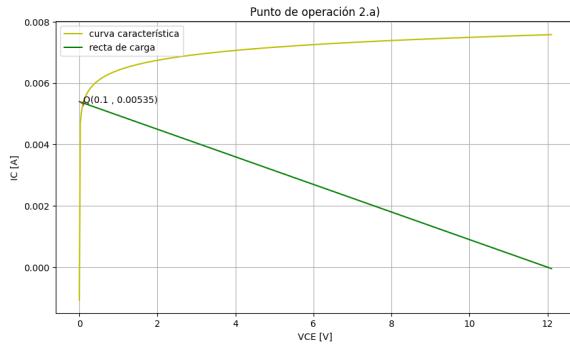


Figura 8.4: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.4, con valores de resistencias expresados en 9

Tabla 10: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 2b1

RB	RC	RE
$82k\Omega \pm 10\%$	$2k\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

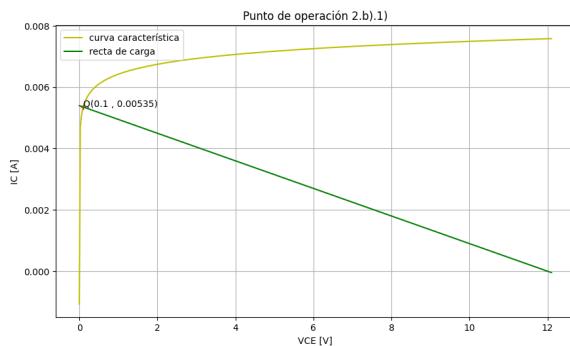


Figura 8.5: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.4, con valores de resistencias expresados en 10

Tabla 11: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 2b2

RB	RC	RE
$36k\Omega \pm 10\%$	$2k\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

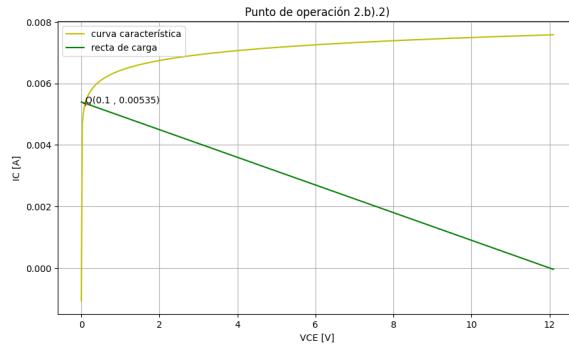


Figura 8.6: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.4, con valores de resistencias expresados en 11

Tabla 12: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 2b3

RB	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$3k\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

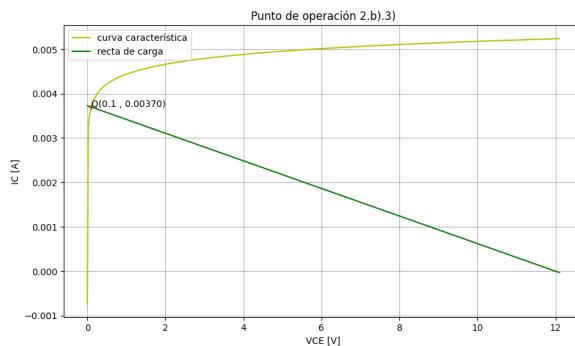


Figura 8.7: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.4, con valores de resistencias expresados en 12

Tabla 13: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 2b4

RB	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$1,3k\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

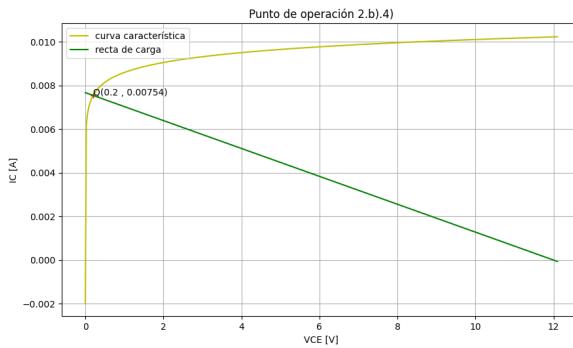


Figura 8.8: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.4, con valores de resistencias expresados en 13

Tabla 14: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 2b5

RB	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$2k\Omega \pm 10\%$	$300\Omega \pm 10\%$

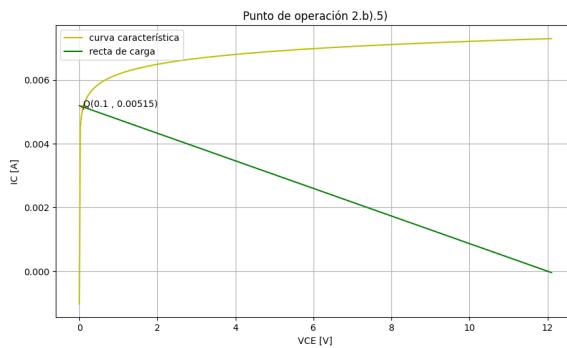


Figura 8.9: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.4, con valores de resistencias expresados en 14

Tabla 15: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 2b6

RB	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$2k\Omega \pm 10\%$	$130\Omega \pm 10\%$

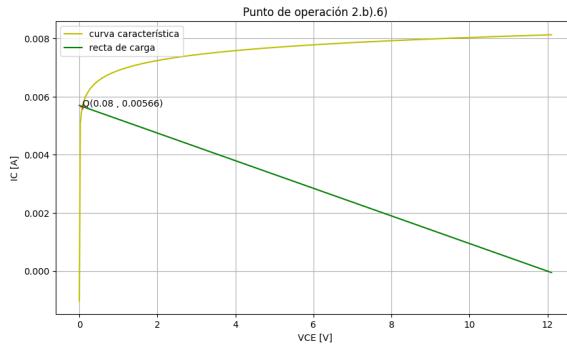


Figura 8.10: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.4, con valores de resistencias expresados en 15

Tabla 16: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 3a

R1	R2	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$10k\Omega \pm 10\%$	$510\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

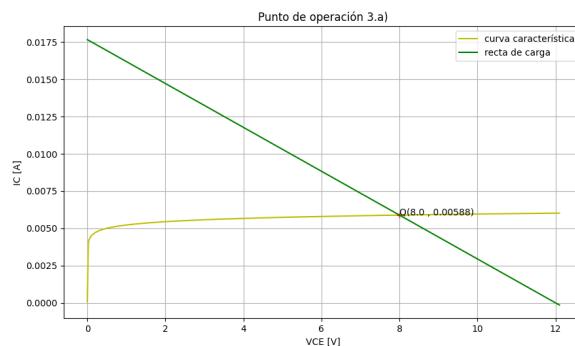


Figura 8.11: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.5, con valores de resistencias expresados en 16

Tabla 17: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 3b1

R1	R2	RC	RE
$82k\Omega \pm 10\%$	$10k\Omega \pm 10\%$	$510\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

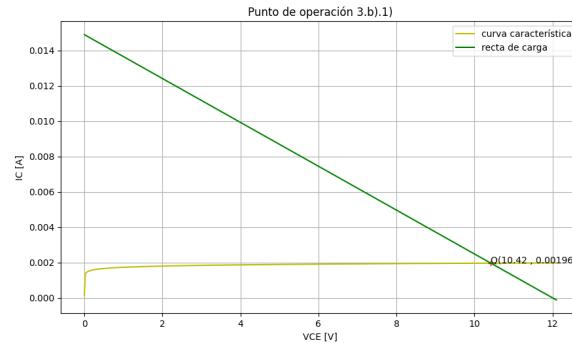


Figura 8.12: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.5, con valores de resistencias expresados en 17

Tabla 18: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 3b2

R1	R2	RC	RE
$39k\Omega \pm 10\%$	$10k\Omega \pm 10\%$	$510\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

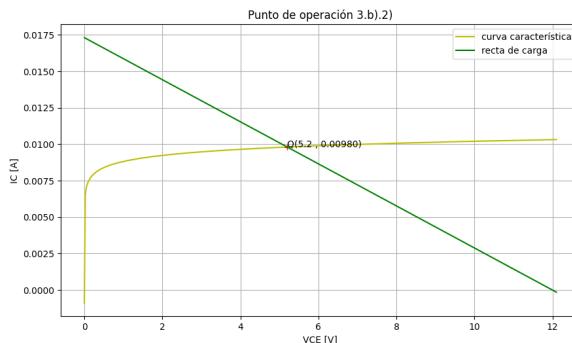


Figura 8.13: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.5, con valores de resistencias expresados en 18

Tabla 19: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 3b3

R1	R2	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$15k\Omega \pm 10\%$	$510\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

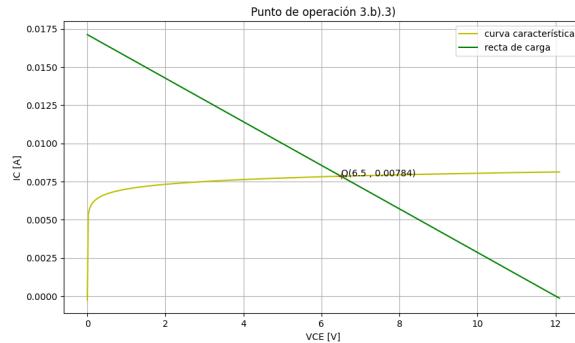


Figura 8.14: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.5, con valores de resistencias expresados en 19

Tabla 20: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 3b4

R1	R2	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$6,8k\Omega \pm 10\%$	$510\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

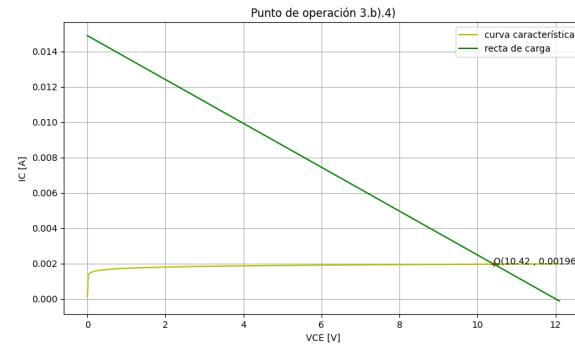


Figura 8.15: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.5, con valores de resistencias expresados en 20

Tabla 21: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 3b5

R1	R2	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$56k\Omega \pm 10\%$	$750\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

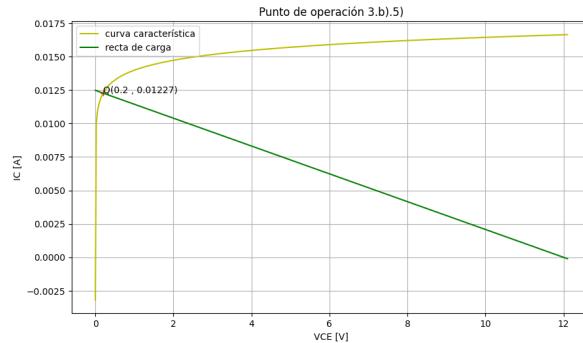


Figura 8.16: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.5, con valores de resistencias expresados en 21

Tabla 22: Valores de resistencia para la prueba de laboratorio 3b6

R1	R2	RC	RE
$56k\Omega \pm 10\%$	$56k\Omega \pm 10\%$	$360\Omega \pm 10\%$	$200\Omega \pm 10\%$

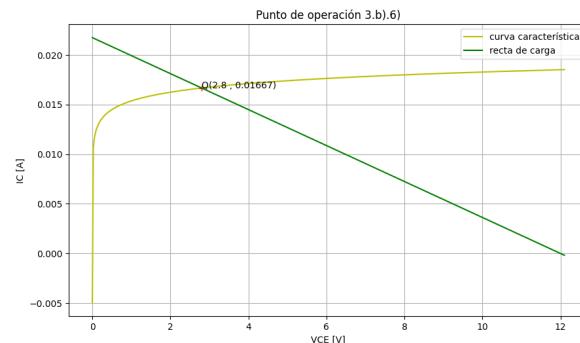


Figura 8.17: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.5, con valores de resistencias expresados en 22

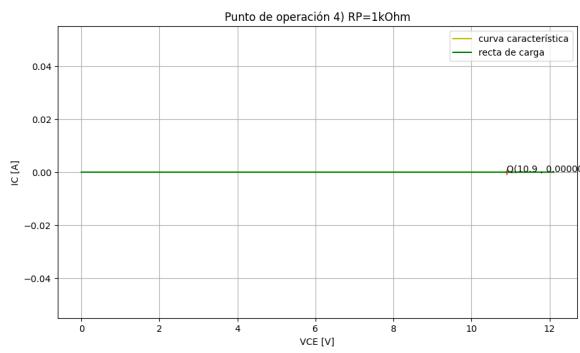


Figura 8.18: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.6, con $RP = 1K\Omega$

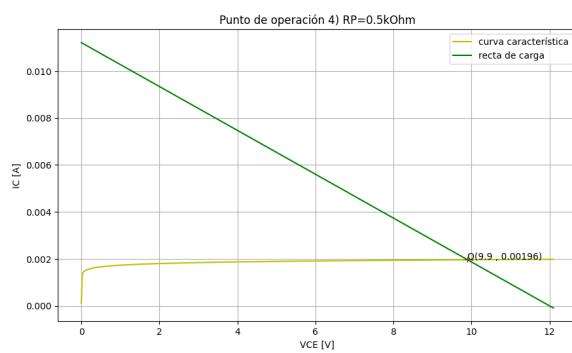


Figura 8.19: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.6, con $RP = 0.5K\Omega$

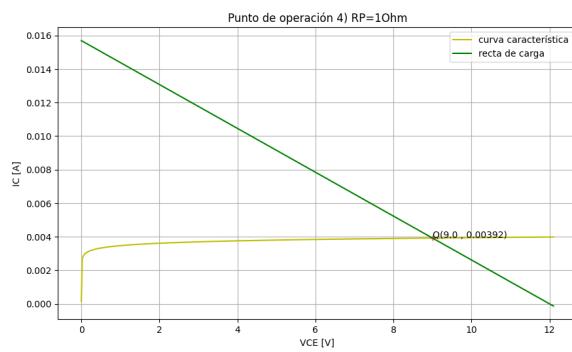


Figura 8.20: Curva Característica, recta de carga y punto de operación del circuito de la figura 5.6, con $RP = 1\Omega$

9. Análisis de Resultados

En la tabla 5 es notable que los puntos de operación estáticos experimentales de los circuitos 5.1 y 5.2 son iguales a los ya calculados teóricamente en 2. En particular, cabe señalar que esto es debido a la ausencia de polarización en la unión base-emisor del transistor. No obstante, el punto estático de operación de la tabla 5 para el circuito de la figura 5.3 no coincide con los valores teóricos de la otra tabla mencionada, sin embargo, al recordar que, teóricamente, se obtuvo una tensión colector emisor alta en módulo y negativa; y observando la gráfica 8.3 donde la tensión alcanza un valor sumamente bajo, se puede decir que el transistor se encuentra saturado. Esto último debido a que, a diferencia de los circuitos anteriores existe una polarización directa en la unión base emisor.

Para el circuito de la figura 5.4 el punto de operación estático tiene un comportamiento similar que el del circuito de la figura ??, ya explicado en el párrafo anterior. Por añadidura de RE y observando la gráfica 8.4 el transistor se encuentra saturado, aunque es notable que la V_{CE} incrementó 10mV.

Al analizar la figura 5.5 y comparando el primer valor de la tabla 7 y el Q_5 de la tabla 2 es notable que se realizó una buena aproximación del punto estático de operación, vinculado a la zona activa del transistor, con un error que puede estar relacionado a la toma del valor h_{FE} por debajo de lo establecido por las condiciones del circuito planteado, esto se deduce debido a que la gráfica 8.11 posee un Q con una intensidad de colector de poco más de 5mA, mayor que la calculada teóricamente.

Cabe destacar en la figura 5.4 que al calcular los puntos de operación estáticos referente al trabajo de laboratorio 2, todos quedaron vinculados a la zona de saturación, esto debido a que tiene un comportamiento de polarización solamente, semejante a lo ocurrido con el Q de la figura ??, ocasiones leves variaciones en la corriente de colector que entran en el rango de los 3.70 mA hasta los 7.53 mA, donde existe una media de 5.44 mA que se mantiene en las pruebas. Sin embargo, se hace notar en la prueba 2b4 un cambio poco significativo que tiende a la zona activa, sin llegar a acercarse lo suficiente como para que el transistor trabaje en la zona activa. Las gráficas que representan el comportamiento del circuito se asocian a las figuras desde la 8.5 hasta 8.10.

En el circuito de la figura 5.5 se puede generalizar que los puntos de operación estáticos se encuentran en la zona activa de la curva característica del transistor o entre sus límites, según la tabla 7, sin importar las distintas variaciones de resistencias, que según la aplicación del transistor se puede modificar Q de manera que tienda a la zona de corte o saturación. Este hecho es debido a la presencia de R2 en el circuito comparado con el anterior. No obstante, para particularizar cuando R1 Y R2 son altas respecto a los valores de RC y RE, como es el caso de las pruebas 3b5 y 3b6 el transistor trabaja casi en zona de saturación; también se observa en las pruebas donde R1 es sumamente alta con respecto a las demás resistencias que el transistor puede llegar a corte, esto debido a la poca tensión que se obtendría entre base y emisor, siendo el caso de las pruebas 3b1 y 3b4. Las gráficas que representan el comportamiento del circuito se asocian a las figuras desde la 8.12 hasta 8.17.

Por último, para estudiar el efecto de la resistencia equivalente en el emisor se implementó la figura 5.6, donde al poseer una RE_{eq} alta el transistor, como en la prueba 1 de la tabla 8 se encuentra en zona de corte, lo cual tiene sentido ya que se sabe $I_E = I_C + I_B$ que es la corriente neta que circula por el transistor, al limitarla el punto de operación desciende a $I_C = 0$. Al ir disminuyendo la resistencia RP en el emisor el transistor tiende a operar en la zona activa, notable en las gráficas de las figura 8.18, 8.19 y 8.20.

10. Conclusiones y Recomendaciones

Este laboratorio nos ha permitido conocer y comparar las distintas topologías para polarizar un BJT, así como los factores que influyen en su punto de operación. Conocer el punto de operación de un transistor es importante porque determina el comportamiento y el rendimiento del transistor en un circuito. El punto de operación es el conjunto de valores de corriente y tensión que el transistor tiene cuando no se aplica ninguna señal de entrada. Este punto se puede ubicar en diferentes regiones del transistor, como la de corte, la de saturación o la de activa, según el tipo de aplicación que se le quiera dar al transistor. También se ha observado que algunas topologías son más estables que otras, y que el valor de las resistencias de base, colector y emisor determina la posición del punto de operación sobre la recta de carga y la característica del transistor.

Se puede observar que algunas topologías son más sensibles a las variaciones de las resistencias, lo que puede llevar al transistor a zonas no deseadas, como la de corte o la de saturación, dependiendo de su aplicación. También se ha analizado cómo las resistencias de base, colector y emisor modifican la recta de carga y la posición del punto de operación sobre la característica del transistor. La recta de carga estática en un transistor es importante porque permite determinar el punto de operación del transistor en la región activa, donde el transistor puede amplificar correctamente la señal de entrada sin distorsiones. La recta de carga estática representa todos los posibles puntos de polarización que el circuito externo le impone al transistor, y se puede graficar sobre las curvas características del transistor. La posición del punto de operación sobre la recta de carga estática depende de los valores de las resistencias y la fuente de alimentación del circuito de polarización. También se ha aprendido que se pueden diseñar circuitos que cumpla con nuestros requisitos, eligiendo adecuadamente los valores de las resistencias y los parámetros del transistor, como I_C y V_{BE} . También se ha comprobado que los resultados experimentales se ajustan bastante a los resultados teóricos, lo que nos indica que el modelo teórico es válido y que hemos realizado las mediciones correctamente.

11. Bibliografía

Referencias

- [1] Sedra Adel. “Circuitos Microelectrónicos”. En: *OXFORD University Press* 4 (2002).

12. Anexos

Para el cálculo del punto de operación en las tablas 5, 6, 7 y 8:

Sabiendo que $V_{CC} = 12 \pm 1[V]$

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (2)$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C} \quad (2)$$

Para el cálculo de sus respectivas incertidumbres:

$$\Delta V_{CE} = \Delta V_C + \Delta V_E \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_C &= \left| \frac{\partial I_C}{\partial V_{CC}} \right| \Delta V_{CC} + \left| \frac{\partial I_C}{\partial V_C} \right| \Delta V_C + \left| \frac{\partial I_C}{\partial R_C} \right| \Delta R_C \\ &= \frac{1}{R_C} \Delta V_{CC} + \frac{1}{R_C} \Delta V_C + \frac{V_{CC} - V_C}{R_C^2} \Delta R_C \end{aligned} \quad (3)$$

Para el 2.1 $V_C = 9.2 \pm 1 V$

	V_B [V]	V_C [V]	V_E [V]	I_C [mA]
Circuito 1	0V $\pm 1V$	12V $\pm 1V$	0V $\pm 1V$	<input checked="" type="checkbox"/>
Circuito 2	0V $\pm 1V$	12V $\pm 1V$	0V $\pm 1V$	<input checked="" type="checkbox"/>
Circuito 3	680mV $\pm 40mV$	90mV $\pm 10mV$	0mV $\pm 10mV$	Saturado

Para el 2.2

	$V_{B\text{C}}$	V_C	V_E	Q
a)	1900mV $\pm 100mV$	1500mV $\pm 100mV$	1200mV $\pm 100mV$	
b. 1)	3,9 $\pm 0,1$ [V]	1,3 $\pm 0,1$ [V]	1,2 $\pm 0,1$ [V]	
b. 2)	1,9 $\pm 0,1$ [V]	1,3 $\pm 0,1$ [V]	1,2 $\pm 0,1$ [V]	
b. 3)	1,5 $\pm 0,1$ [V]	6,9 $\pm 0,1$ [V]	0,8 $\pm 0,1$ [V]	
b. 4)	3 $\pm 0,2$ [V]	2,2 $\pm 0,2$ [V]	2,1 $\pm 0,2$ [V]	
b. 5)	1,4 $\pm 0,2$ [V]	1,7 $\pm 0,1$ [V]	1,6 $\pm 0,1$ [V]	
b. 6)	3,5 $\pm 0,1$ [V]	680 ± 40 [mV]	600 ± 40 [mV]	

2.1)	V_C	12V $\pm 1V$
	V_B	0V $\pm 1V$
	V_E	0 $\pm 1V$

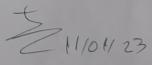
 11/01/23

Figura 12.1: hoja de datos 1

Hojas de datos que contienen los valores experimentales recopilados en el laboratorio.

Para el 2.3

	V_C	V_B	V_E	Q
a	9 ± 1 V	$1,5 \pm 0,1$ V	$1 \pm 0,1$ V	
b ₁	11 ± 1 V	$1,2 \pm 0,1$ V	$5,80 \pm 40$ mV	
b ₂	7 ± 1 V	$2,4 \pm 0,2$ V	$1,8 \pm 0,2$ V	
b ₃	8 ± 1 V	$2,2 \pm 0,2$ V	$1,5 \pm 0,1$ V	
b ₄	11 ± 1 V	$1,2 \pm 0,1$ V	$5,80 \pm 40$ mV	
b ₅	$3,8 \pm 0,2$ V	$3,2 \pm 0,2$ V	$2,6 \pm 0,2$ V	
b ₆	$6 \pm 0,4$ V	$3,8 \pm 0,4$ V	$3,2 \pm 0,2$ V	
Figura 6				

$1k\Omega$	12 ± 1 V	$1,8 \pm 0,2$ V	$1,4 \pm 0,1$ V	
$0,5k\Omega$	12 ± 1 V	$1,8 \pm 0,1$ V	$1,4 \pm 0,2$ V	$V_{fuente} 12 \pm 1$ V
0Ω	10 ± 1 V	$1,6 \pm 0,1$ V	$1 \pm 0,1$ V	

Prueba 2

$1K\Omega$	12 ± 1 V	$1,7 \pm 0,1$ V	$1,1 \pm 0,1$ V	
$0,5K\Omega$	11 ± 1 V	$1,7 \pm 0,1$ V	$1,1 \pm 0,1$ V	
0Ω	10 ± 1 V	$1,6 \pm 0,1$ V	$1 \pm 0,1$ V	

J
28/01/29

Figura 12.2: hoja de datos 2