

Tema 4 - El Transistor Bipolar de Unión (BJT)

Fundamentos de Electrónica - 2º GIERM

Objetivos de aprendizaje

- Comprender la estructura física y el funcionamiento del transistor BJT (NPN y PNP)
- Dominar todas las fórmulas fundamentales y saber cuándo aplicar cada una
- Interpretar las curvas características de entrada y salida
- Conocer los modelos de Ebers-Moll y los modelos linealizados de gran señal
- Aplicar una metodología sistemática para resolver circuitos con transistores
- Resolver ejercicios de polarización tanto para transistores NPN como PNP

Requirement already satisfied: schemdraw in /home/danielmf31/Documentos/Documentos_Trabajo/Ingenieria/Programacion/VSCode/Proyectos_personales/Ciencia_Datos/.venv/lib/python3.12/site-packages (0.22)
Configuración lista.

1. Introducción: ¿Qué es un transistor BJT?

El **Transistor Bipolar de Unión** (BJT, del inglés *Bipolar Junction Transistor*) es un dispositivo semiconductor formado por **dos uniones pn**, que funciona como una **fuentes de corriente dependiente de corriente**.

Si un **diodo** es como una **válvula antirretorno**, el **transistor** es como un **grifo**: el caudal de agua (I_C) se controla girando la llave (I_B). Una señal pequeña controla un flujo grande.

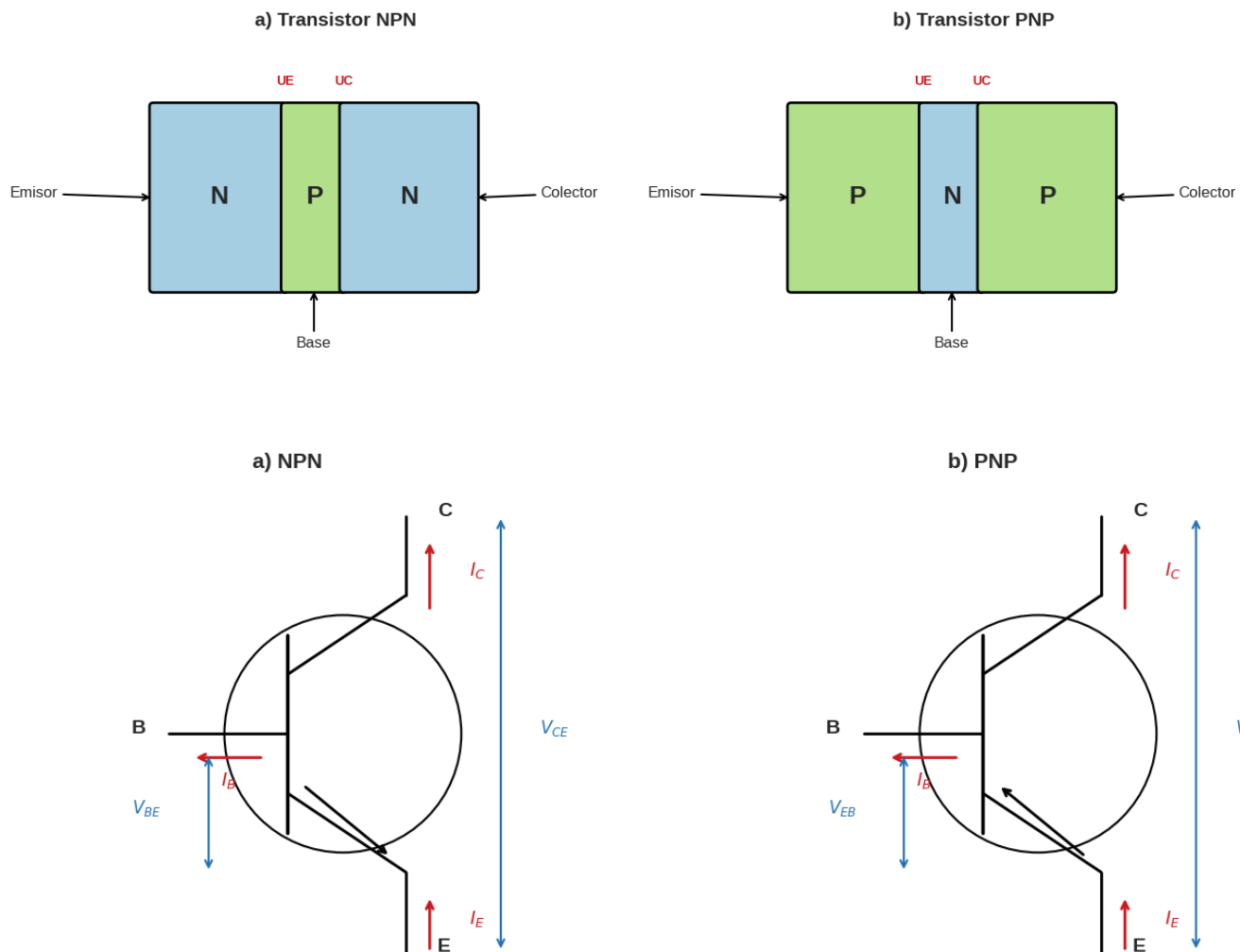
1.1 Estructura del BJT: NPN y PNP

Existen dos tipos según el orden de las capas semiconductoras:

- **NPN**: capas N - P - N (el más común)
- **PNP**: capas P - N - P

Tres terminales: **Emisor (E)**, **Base (B)** (capa estrecha intermedia) y **Colector (C)**.

Dos uniones pn: **Unión de Emisor (UE)** y **Unión de Colector (UC)**.



2. Formulario completo del transistor BJT

2.1 Ganancias de corriente

Fórmula	Descripción
$\alpha = \frac{I(\phi'_{ap})}{I_E}$	Ganancia en base común. Siempre $\alpha < 1$, típicamente 0.95 - 0.99.
$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$	Ganancia en emisor común. Valores

Fórmula	Descripción
	típicos entre 50 y 300.

2.2 Relaciones entre corrientes

Fórmula	Uso
$I_C = \alpha$ $\cdot I_E$ $+ I_{CB0}$	Exacta en base común
$I_C = \beta$ $\cdot I_B$ $+ I_{CE0}$	Exacta en emisor común
$I_C \approx \beta$ $\cdot I_B$	Aproximación más usada
I_E $= I_B$ $+ I_C$	Kirchhoff (siempre)

2.3 Característica de entrada

$$I_B = I_{B0} \cdot (e^{V_{BE}/\phi_T} - 1) \quad \phi_T \approx 26 \text{ mV a } 25^\circ \text{C}$$

2.4 Zona activa con efecto Early

$$I_C = \beta \cdot I_B \cdot (1 + \frac{V_{CE}}{V_A})$$

V_A : tensión Early (50-300 V). Las rectas de la familia de salida convergen en $V_{CE} = -V_A$.

2.5 Ecuaciones de Ebers-Moll (Modelo de Transporte)

$$I_E = I_{DE0} \cdot (e^{V_{EB}/\phi_T} - 1) - \alpha_R \cdot I_{DC0} \cdot (e^{V_{CB}/\phi_T} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F \cdot I_{DE0} \cdot (e^{V_{EB}/\phi_T} - 1) - I_{DC0} \cdot (e^{V_{CB}/\phi_T} - 1)$$

$$I_B = I_E - I_C$$

2.6 Recta de carga y mallas de polarización

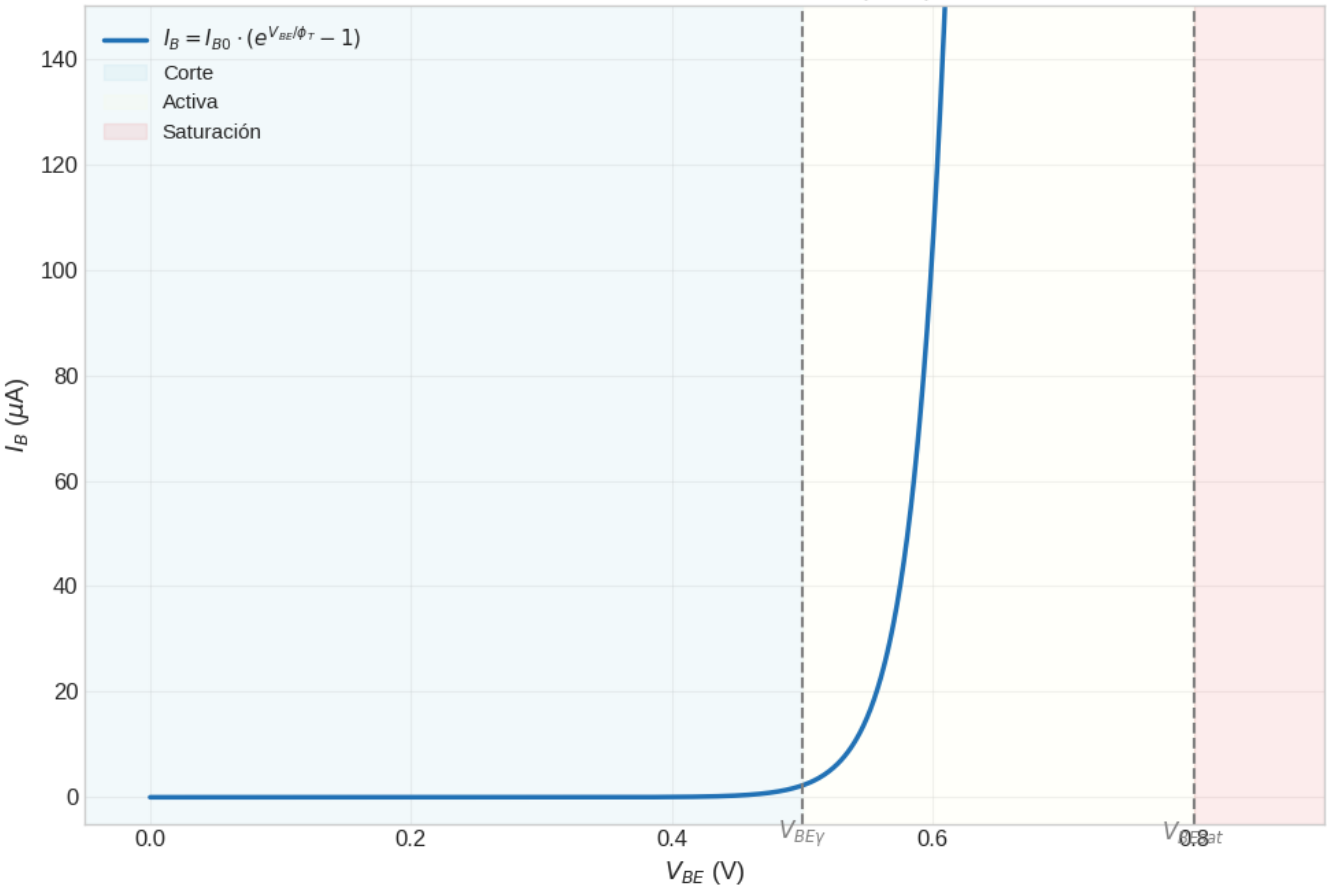
Fórmula	Descripción
$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C}$	Recta de carga (corta eje X en V_{CC} , eje Y en V_{CC}/R_C)
$I_B = \frac{V_1 - V_{BE}}{R_B}$	Malla de base simple
$I_B = \frac{V_1 - V_{BE}}{R_B + R_E (\beta + 1)}$	Malla de base con R_E

3. Zonas de funcionamiento

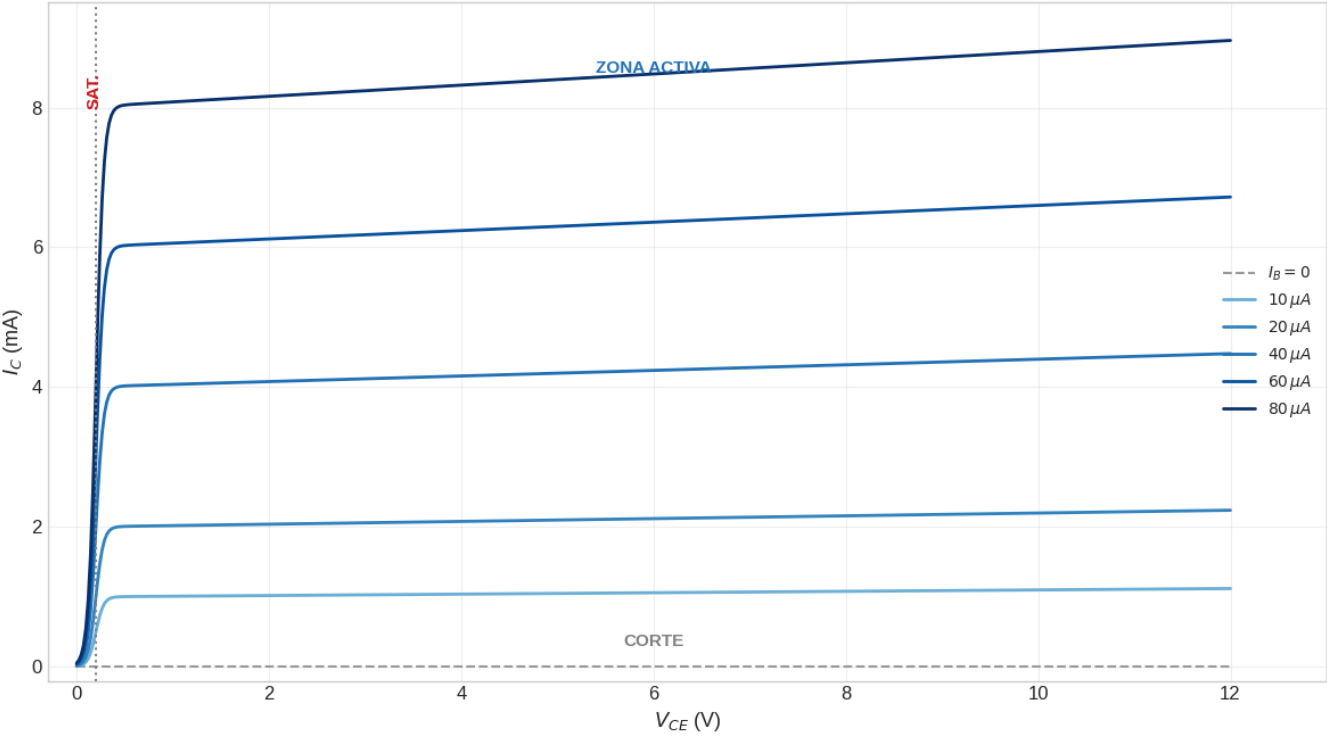
	UC Pol. Directa	UC Pol. Inversa
UE Pol. Directa	Saturación	Activa
UE Pol. Inversa	Activa inversa	Corte

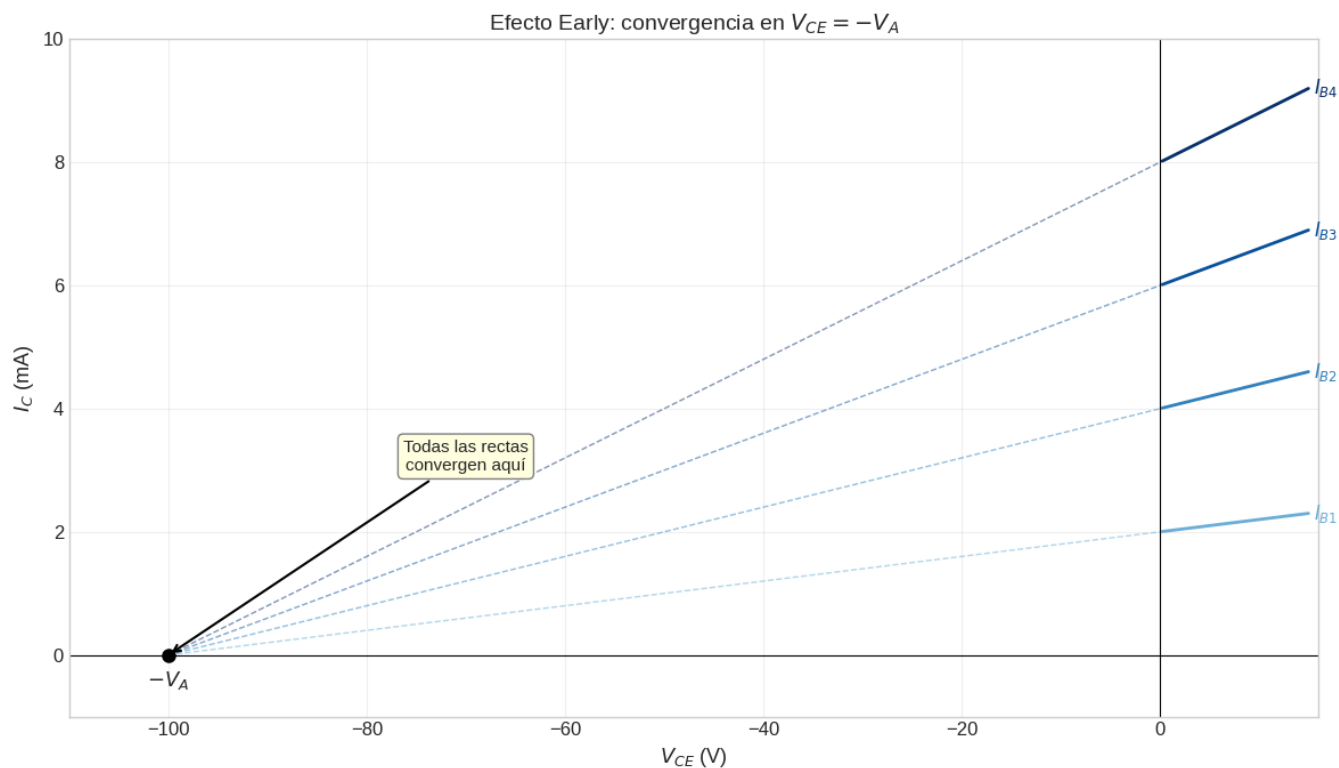
- **Activa:** $I_C = \beta \cdot I_B$, $V_{CE} > V_{CE_{sat}}$. El transistor amplifica.
- **Corte:** $I_B = 0$, $I_C \approx 0$. Circuito abierto.
- **Saturación:** $V_{CE} = V_{CE_{sat}}$, $I_C < \beta \cdot I_B$. Cortocircuito con pequeña caída.
- **Activa inversa:** raramente usada.

Curva característica de entrada (NPN)



Curva característica de salida (NPN)





4. Modelos de gran señal linealizados

Para resolver circuitos a mano, se sustituye el transistor por un **modelo simplificado** según su zona.

4.1 Transistor NPN

Corte

Entrada	Salida	Modelo
$I_B = 0$	$I_C = 0$	Todo abierto
$V_{BE} < V_{BE\gamma}$		

Activa

Entrada	Salida	Modelo
$I_B > 0$	$I_C = \beta \cdot I_B$	B-E: fuente 0.7 V

Entrada	Salida	Modelo
V_{BE} $= V_{BE_{act}}$ ≈ 0.7 V	V_{CE} $> V_{CE_{sat}}$	C-E: fuente de corriente βI_B

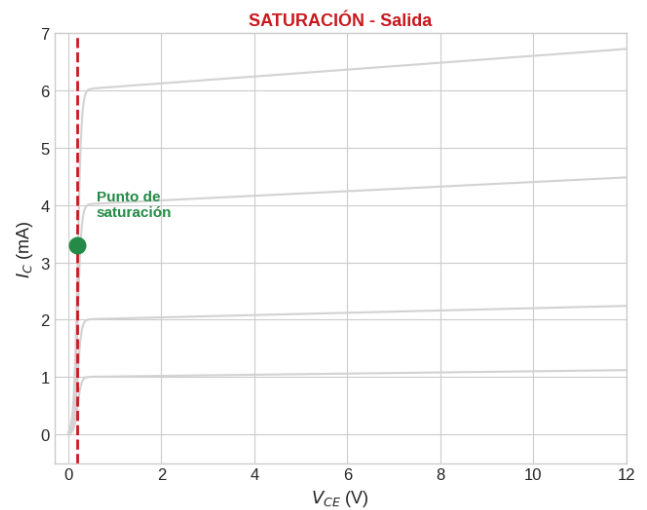
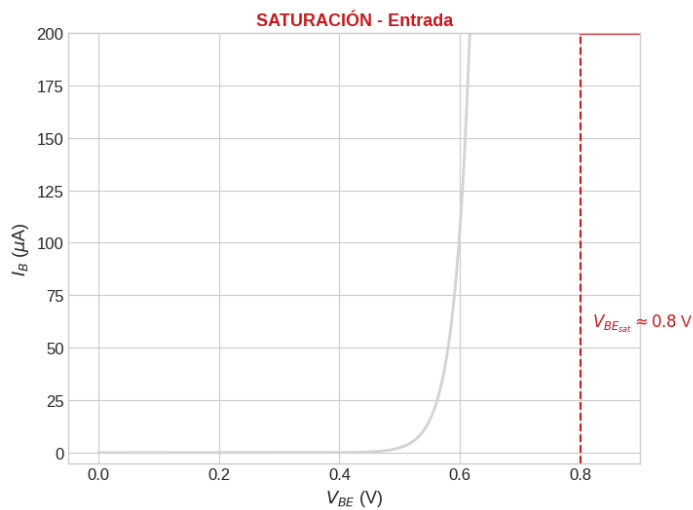
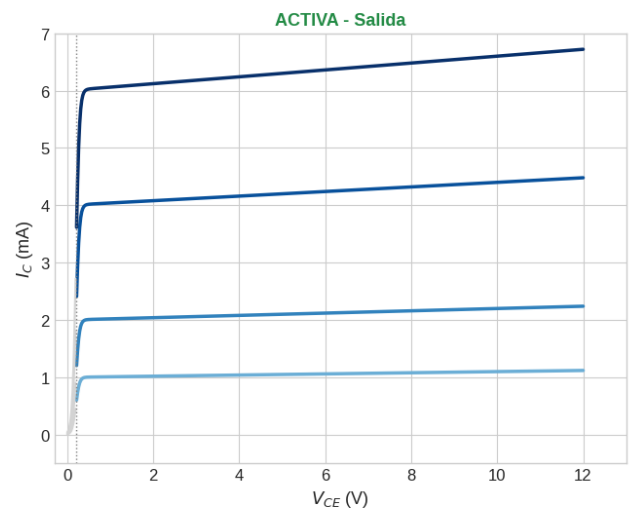
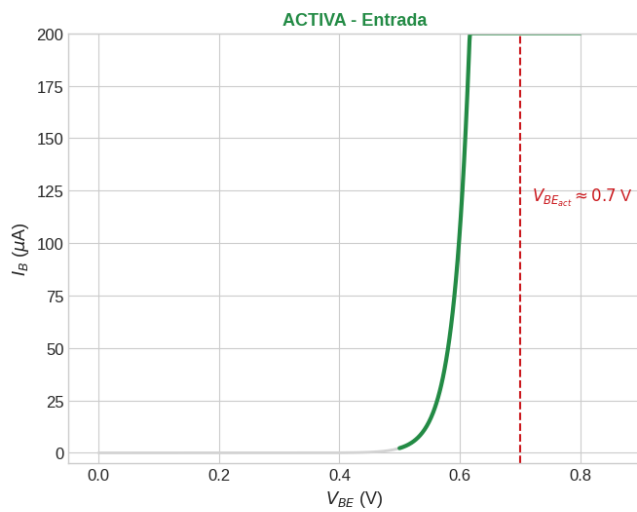
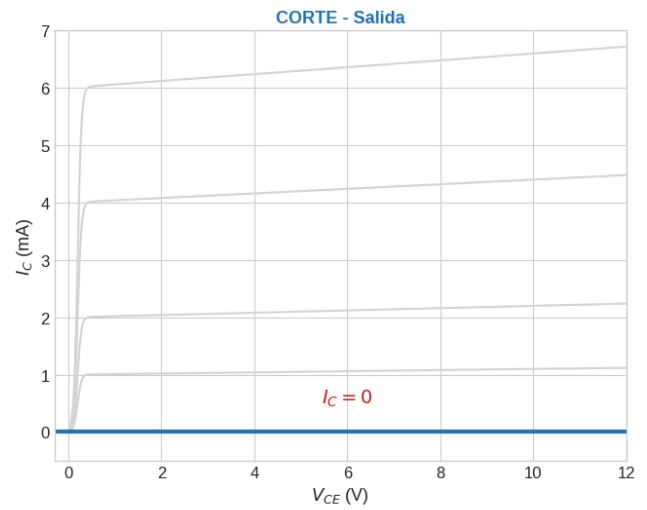
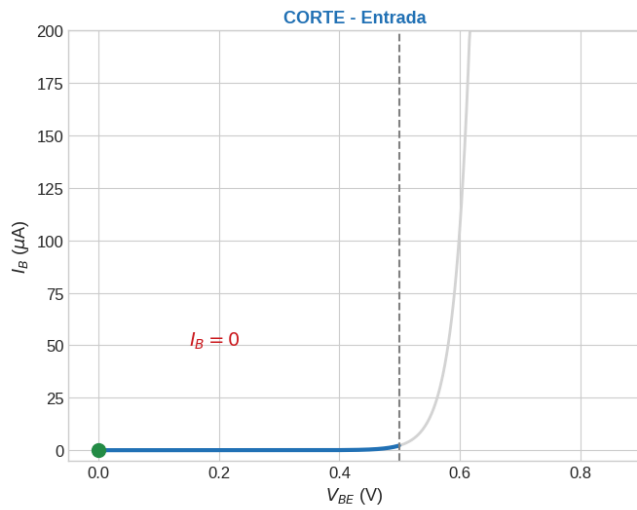
Saturación

Entrada	Salida	Modelo
$I_B > 0$	I_C $< \beta$ $\cdot I_B$	B-E: fuente 0.8 V
V_{BE} $= V_{BE_{sat}}$ ≈ 0.8 V	V_{CE} $= V_{CE_{sat}}$ ≈ 0.2 V	C-E: fuente 0.2 V

4.2 Transistor PNP

Mismas ecuaciones pero con V_{EB} y V_{EC} :

- **Corte:** $I_B = 0$, $V_{EB} < V_{EB\gamma}$
- **Activa:** $V_{EB} = 0.7$ V, $I_C = \beta \cdot I_B$, $V_{EC} > V_{EC_{sat}}$
- **Saturación:** $V_{EB} = 0.8$ V, $V_{EC} = 0.2$ V, $I_C < \beta \cdot I_B$



5. Metodología de resolución de ejercicios

Paso 0: Truco rápido para predecir el estado (30 segundos)

Antes de resolver, puedes saber el estado del transistor con este método universal de **3 pasos**:

1. Calcular I_B suponiendo activa (usando la fórmula del tipo de circuito correspondiente)

2. Calcular la corriente máxima que permite el circuito:

$$I_{C_{max}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

3. Comparar $\beta \cdot I_B$ con $I_{C_{max}}$:

$$\beta \cdot I_B < I_{C_{max}} \rightarrow \text{ACTIVA} \quad \beta \cdot I_B > I_{C_{max}} \rightarrow \text{SATURACIÓN}$$

Esto funciona para TODOS los tipos de circuitos porque no depende de dónde está conectada R_B . La fórmula de I_B ya incluye la topología.

Atajo aún más rápido (solo para polarización fija)

En polarización fija (R_B conectada a V_{CC}), los V_{CC} se cancelan y queda:

$$\frac{R_B}{R_C} < \beta \rightarrow \text{Saturación} \quad \frac{R_B}{R_C} > \beta \rightarrow \text{Activa}$$

Ojo: este atajo **NO funciona** para retroalimentación de colector (Tipo 4), porque R_B no está conectada a un punto de tensión fija. En ese caso, usar siempre el método universal.

Los 5 pasos de resolución

Paso 1: Fijar referencias

Establecer V_{BE} , V_{CE} (NPN) o V_{EB} , V_{EC} (PNP) y las corrientes I_B , I_C , I_E .

Paso 2: Suponer un estado

Usar el **Paso 0** para elegir el estado inicial (activa o saturación). Si no estás seguro, empezar suponiendo **Activa**.

Paso 3: Sustituir por el modelo

- **Activa:** B-E = fuente de 0.7 V, C-E = fuente de corriente $\beta \cdot I_B$
- **Saturación:** B-E = fuente de 0.8 V, C-E = fuente de 0.2 V
- **Corte:** todo abierto

Paso 4: Resolver las ecuaciones

Aplicar KVL a las mallas del circuito.

Paso 5: Verificar la hipótesis

- **Activa:** comprobar $V_{CE} > V_{CE_{sat}}$ y $I_B > 0$
- **Saturación:** comprobar $I_C < \beta \cdot I_B$
- **Corte:** comprobar $V_{BE} < V_{BE\gamma}$

Si falla, volver al Paso 2 con otro estado.

6. Ejemplo resuelto: Transistor NPN (2N2222)

Datos del circuito

$$V_1 = 5 \text{ V}, V_{CC} = 10 \text{ V}, R_B = 100 \text{ k}\Omega, R_C = 1.1 \text{ k}\Omega, \beta = 100$$

Resolución paso a paso

Paso 1-2: Suponemos zona **Activa** ($V_{BE} = 0.7 \text{ V}$)

Paso 3-4: Malla de base (KVL):

$$-V_1 + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0 \implies I_B = \frac{V_1 - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{100 \text{ k}\Omega} = 43 \mu\text{A}$$

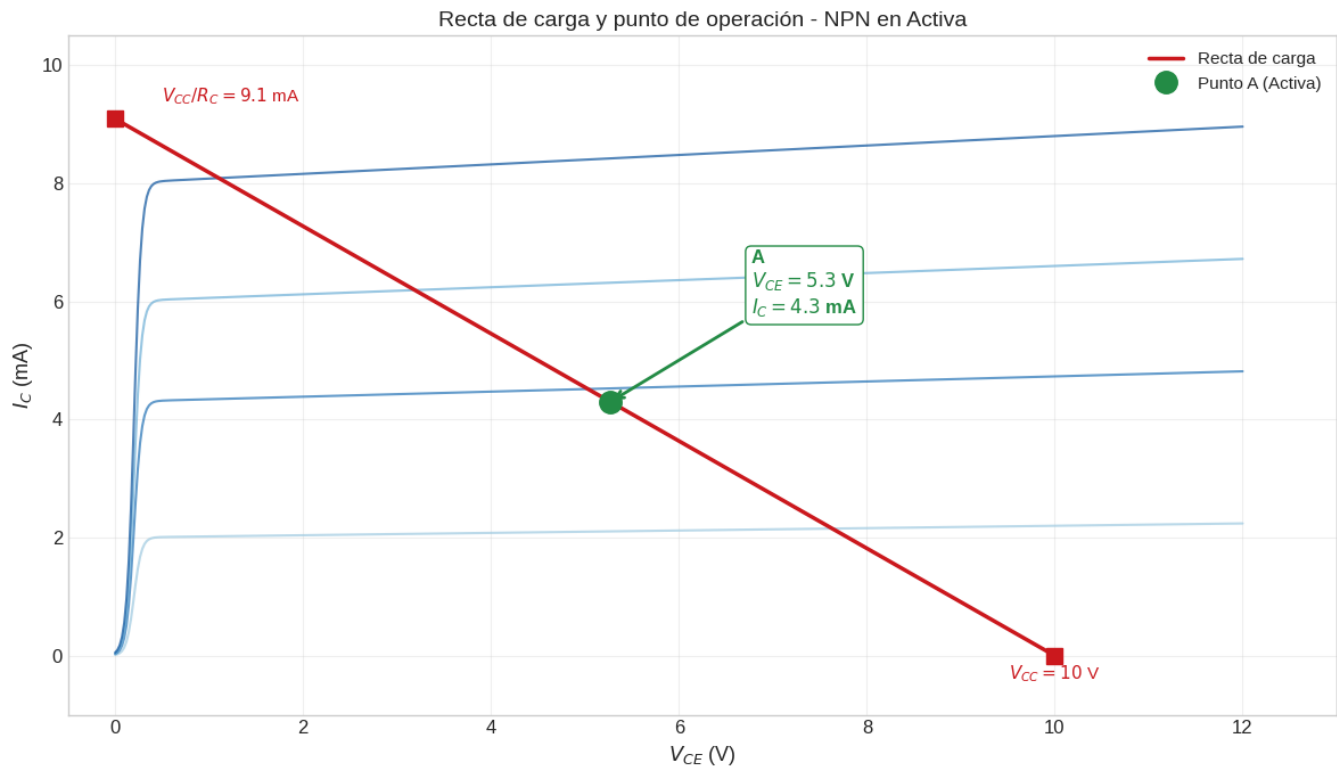
Corriente de colector:

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \times 43 \mu\text{A} = 4.30 \text{ mA}$$

Malla de colector (KVL):

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 10 - 1.1 \text{ k}\Omega \times 4.30 \text{ mA} = 5.27 \text{ V}$$

Paso 5: Verificar: $V_{CE} = 5.27 \text{ V} > V_{CE_{sat}} = 0.2 \text{ V}$. **ACTIVA confirmada.**



6.1 Variación: $R_C = 3 \text{ k}\Omega$ (entra en saturación)

Al aumentar R_C , la pendiente de la recta de carga disminuye y el punto de operación se desplaza hacia la zona de saturación. Veamos qué ocurre:

Intento 1: suponer Activa

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{100 \text{ k}\Omega} = 43 \text{ }\mu\text{A} \quad I_C = 100 \times 43 \text{ }\mu\text{A} = 4.3 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 10 - 3 \text{ k}\Omega \times 4.3 \text{ mA} = 10 - 12.9 = -2.9 \text{ V}$$

V_{CE} es **negativo**, lo cual es imposible. La hipótesis de activa **falla**.

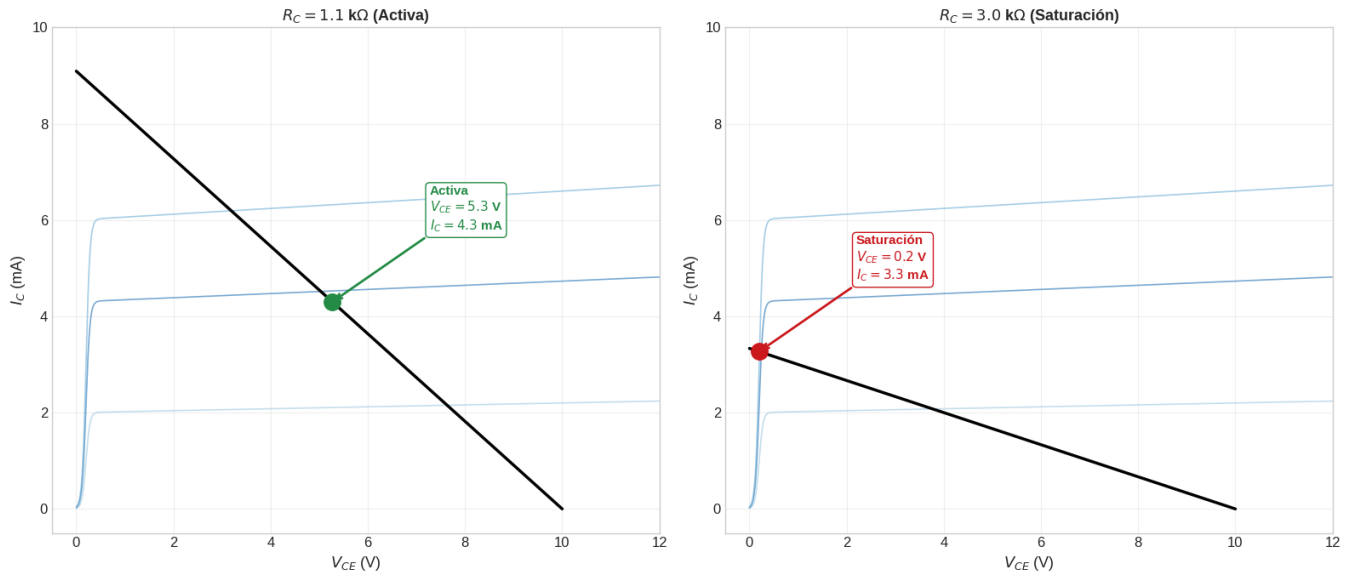
Intento 2: suponer Saturación ($V_{BE} = 0.8 \text{ V}$, $V_{CE} = 0.2 \text{ V}$)

$$I_B = \frac{5 - 0.8}{100 \text{ k}\Omega} = 42 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{R_C} = \frac{10 - 0.2}{3 \text{ k}\Omega} = 3.27 \text{ mA}$$

Verificar: $I_C = 3.27 \text{ mA} < \beta \cdot I_B = 100 \times 42 \text{ }\mu\text{A} = 4.2 \text{ mA}$. **SATURACIÓN confirmada.**

Conclusión: al aumentar R_C , la caída de tensión en ella es tan grande que "absorbe" toda la tensión V_{CC} y el transistor no puede mantener $V_{CE} > V_{CE_{sat}}$. El punto de operación cae en la zona de saturación.



7. Ejemplo resuelto: Transistor PNP

Datos del circuito

$V_{CC} = 10 \text{ V}$ (al emisor), $V_1 = 5 \text{ V}$ (base), $R_B = 100 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1.1 \text{ k}\Omega$, $\beta = 100$

Resolución paso a paso

Paso 1: En un PNP, las referencias son V_{EB} y V_{EC} . La corriente principal entra por el emisor.

Paso 2: Suponemos **Activa** ($V_{EB} = 0.7 \text{ V}$)

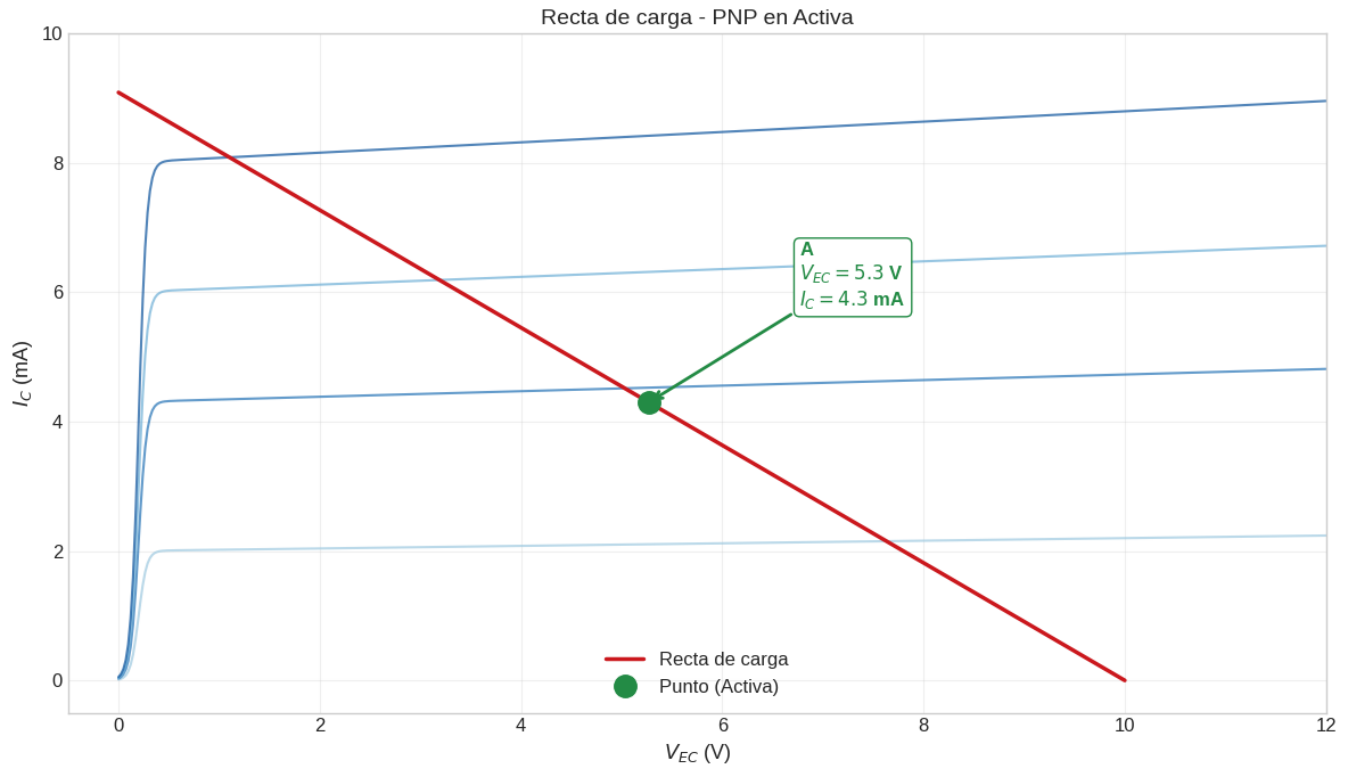
Paso 3-4: Malla de base:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB} - V_1}{R_B} = \frac{10 - 0.7 - 5}{100\text{k}\Omega} = 43 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \times 43 \mu\text{A} = 4.30 \text{ mA}$$

$$V_{EC} = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 10 - 1.1\text{k}\Omega \times 4.30 \text{ mA} = 5.27 \text{ V}$$

Paso 5: $V_{EC} = 5.27 \text{ V} > 0.2 \text{ V}$. **ACTIVA confirmada.**



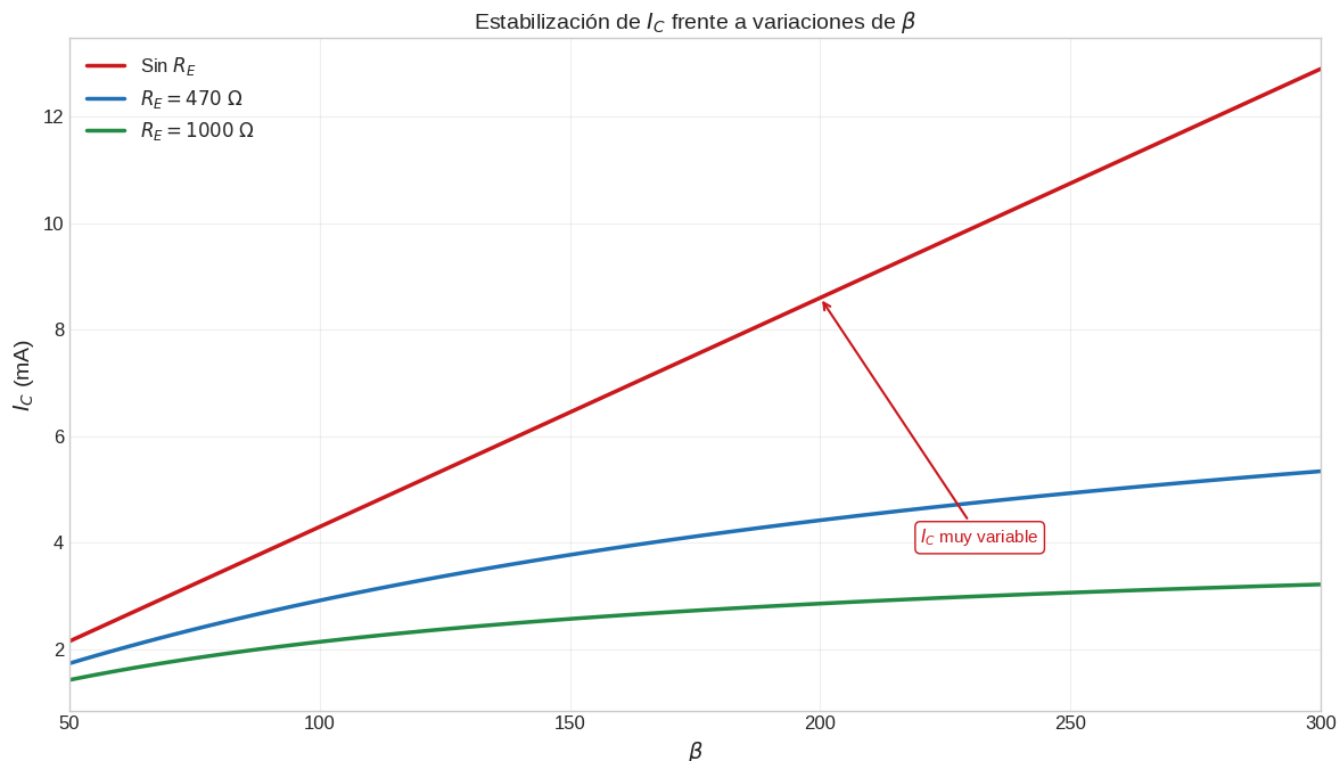
8. Estabilización con resistencia de emisor (R_E)

El parámetro β varía mucho entre transistores y con la temperatura. La resistencia R_E crea **realimentación negativa** que estabiliza I_C :

1. Si I_C sube $\rightarrow I_E$ sube $\rightarrow V_{R_E}$ sube $\rightarrow V_{BE}$ efectiva baja $\rightarrow I_B$ baja $\rightarrow I_C$ se corrige

$$I_B = \frac{V_1 - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta + 1)} \quad I_C = \beta \cdot I_B$$

Para β muy grande: $I_C \approx \frac{V_1 - V_{BE}}{R_E}$ (independiente de β).



9. Resumen visual: NPN vs PNP

Concepto	NPN	PNP
Estructura	N - P - N	P - N - P
Flecha emisor	Sale	Entra
Tensiones	V_{BE}, V_{CE}	V_{EB}, V_{EC}
Corrientes	Entran por B y C	Salen por B y C
Activa: entrada	$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$	$V_{EB} = 0.7 \text{ V}$
Activa: salida	$I_C = \beta \cdot I_B$	$I_C = \beta \cdot I_B$
Saturación	$V_{CE} = V_{CEsat}$	$V_{EC} = V_{ECsat}$
Corte	$I_B = 0, I_C = 0$	$I_B = 0, I_C = 0$

10. Catálogo de circuitos de polarización: todos los tipos de ejercicios

Conocer los **patrones de circuitos** es la clave para resolver cualquier ejercicio. La metodología de 5 pasos siempre es la misma; lo que cambia es **cómo se plantean las ecuaciones de malla**.

#	Tipo	Componentes	Estabilidad	Dificultad
1	Polarización fija	$R_B + R_C$	Muy baja	Baja
2	Dos fuentes	$R_B + R_C + V_{BB} + V_{CC}$	Baja	Baja
3	Con R_E	$R_B + R_C + R_E$	Media	Media
4	Realimentación de colector	R_B (de C a B) + R_C	Media-alta	Media
5	Divisor de tensión	$R_1 + R_2 + R_C + R_E$	Alta	Media
6	PNP (cualquier topología)	Varía	Varía	+1 nivel
7	Circuitos combinados	Múltiples elementos	Varía	Alta

Regla de oro: En todos los casos, la fórmula de I_B tiene la misma estructura:

$$I_B = \frac{\text{Tensión disponible} - V_{BE}}{\text{Resistencia vista desde la base}}$$

Lo que cambia entre tipos es **qué resistencia "ve" la base**.

10.1 Tipo 1: Polarización fija ($R_B + R_C$)

El circuito **más simple**. Una sola fuente V_{CC} alimenta tanto la malla de base (a través de R_B) como la de colector (R_C).

$$\boxed{I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}} \quad I_C = \beta \cdot I_B \quad V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$

Cómo afectan las resistencias al punto de operación:

- Si R_B **aumenta** $\rightarrow I_B$ disminuye $\rightarrow I_C$ disminuye $\rightarrow V_{CE}$ aumenta (se aleja de saturación)
- Si R_B **disminuye** $\rightarrow I_B$ aumenta $\rightarrow I_C$ aumenta $\rightarrow V_{CE}$ disminuye (se acerca a saturación)
- Si R_C **aumenta** $\rightarrow$ la caída $R_C \cdot I_C$ aumenta $\rightarrow V_{CE}$ disminuye (puede entrar en saturación)
- Si R_C **disminuye** $\rightarrow V_{CE}$ aumenta

Problema: I_C depende directamente de β . Si β varía (por temperatura o dispersión), el punto de operación se desplaza. **No se usa en la práctica.**

Ejercicio resuelto: Tipo 1

Datos: $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_B = 240 \text{ k}\Omega$, $R_C = 2.2 \text{ k}\Omega$, $\beta = 100$

Paso 1-2: Suponer Activa ($V_{BE} = 0.7 \text{ V}$)

Paso 3-4:

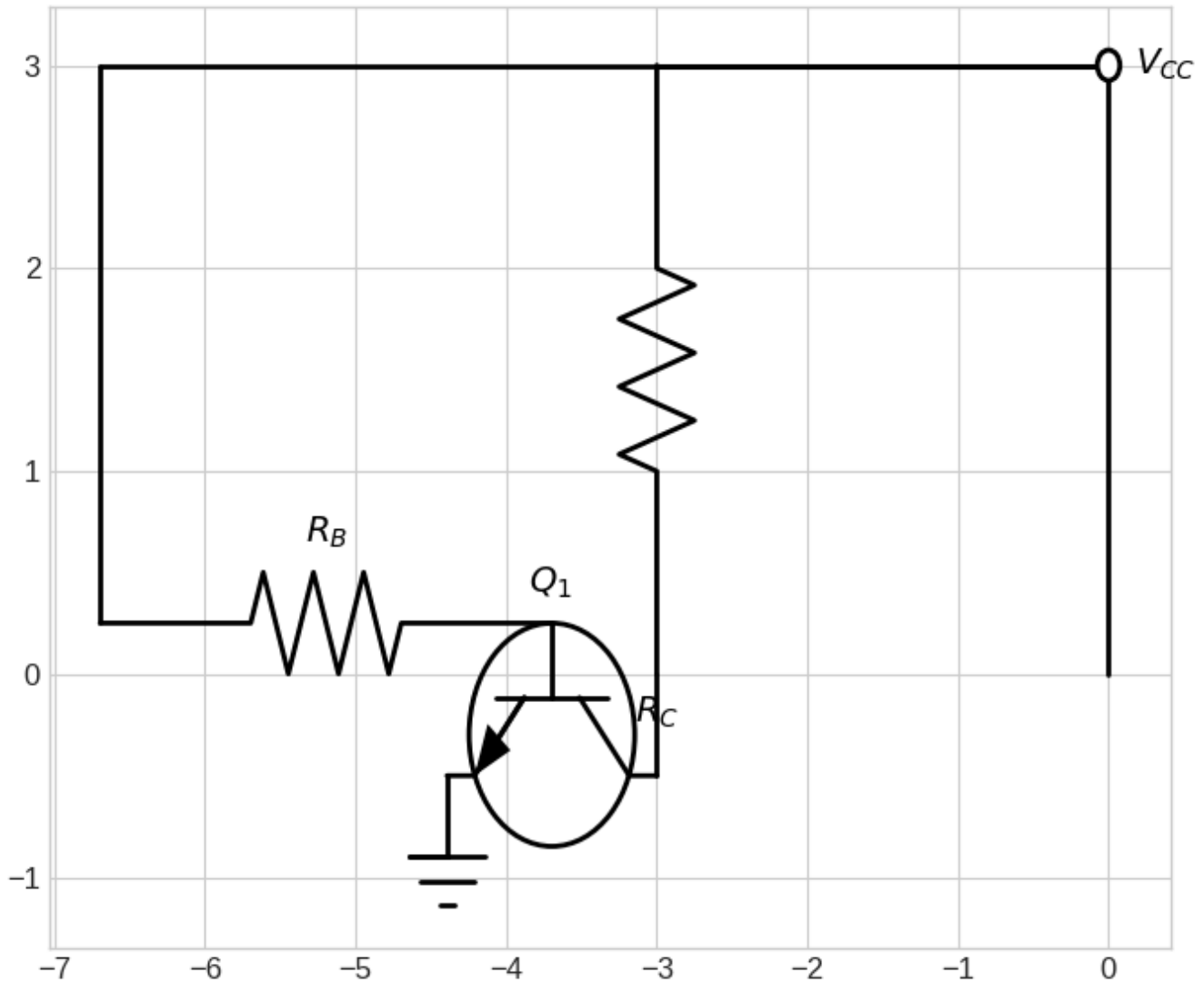
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{240 \text{ k}\Omega} = 47.08 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \times 47.08 = 4.71 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 12 - 2.2 \text{ k} \times 4.71 = 1.64 \text{ V}$$

Paso 5: $V_{CE} = 1.64 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \rightarrow$ **ACTIVA confirmada.**

Tipo 1: Polarización fija



10.2 Tipo 2: Dos fuentes ($V_{BB} + V_{CC}$)

Fuentes independientes para base y colector. Es el circuito de los ejemplos del tema.

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad I_C = \beta \cdot I_B \quad V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$

Cómo afectan los parámetros:

- V_{BB} **controla** I_B (y por tanto I_C): al aumentar V_{BB} , aumenta I_B y el punto de operación se acerca a saturación.
- V_{CC} **desplaza la recta de carga horizontalmente**: al aumentar V_{CC} , el corte con el eje X se desplaza a la derecha, alejando el punto de operación de la saturación.
- R_C **cambia la pendiente** de la recta de carga: mayor R_C = menor pendiente = más fácil entrar en saturación.

Las mallas son **independientes**: la corriente I_B no depende de V_{CC} ni de R_C .

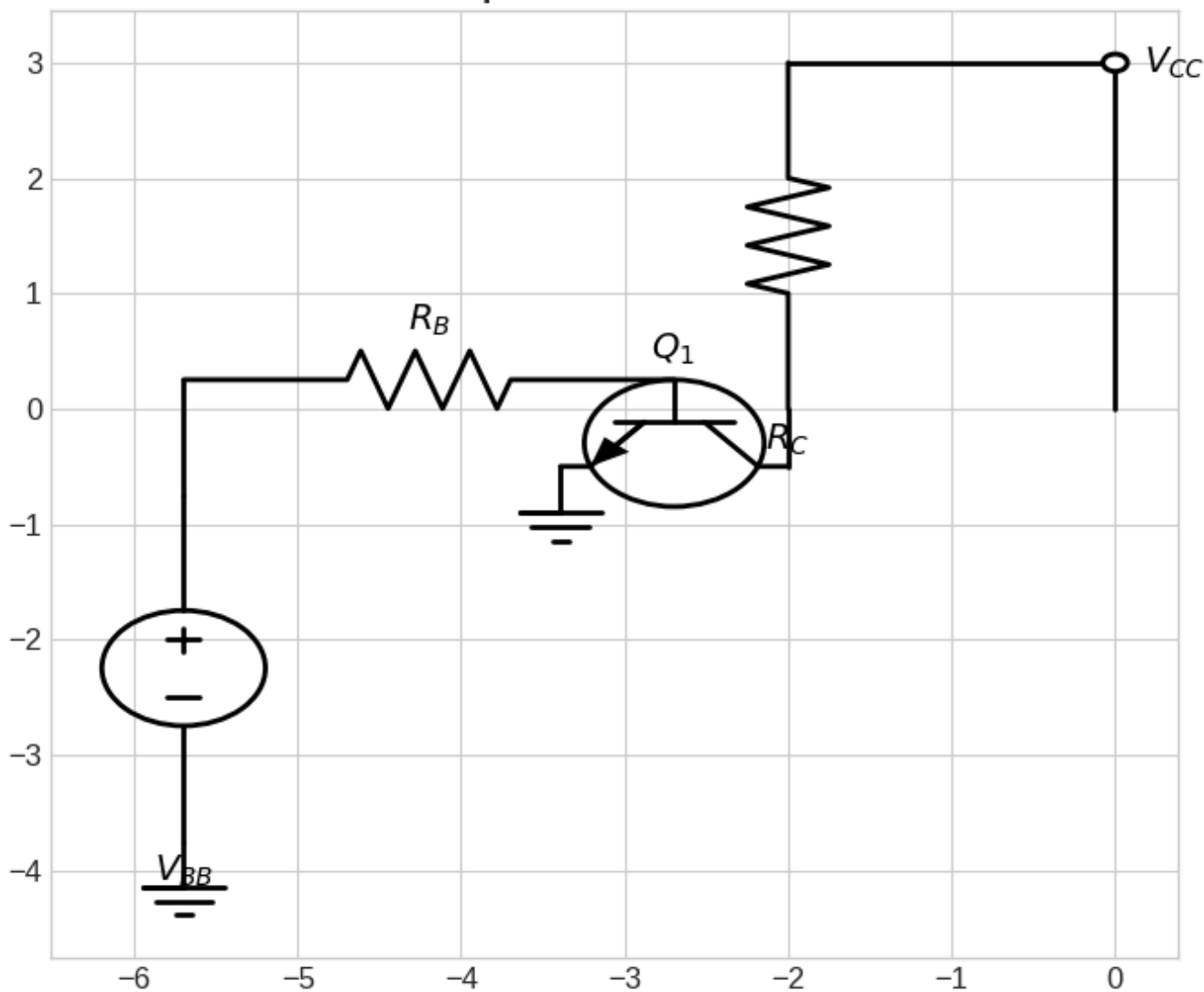
Ejercicio resuelto: Tipo 2

Datos: $V_{BB} = 5\text{ V}$, $V_{CC} = 10\text{ V}$, $R_B = 100\text{ k}\Omega$, $R_C = 1.1\text{ k}\Omega$, $\beta = 100$

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{100\text{k}} = 43\text{ }\mu\text{A} \quad I_C = 100 \times 43 = 4.30\text{ mA} \quad V_{CE} = 10 - 1.1\text{k} \times 4.30 = 5.27\text{ V}$$

$V_{CE} = 5.27\text{ V} > 0.2\text{ V} \rightarrow \text{ACTIVA.}$

Tipo 2: Dos fuentes



10.3 Tipo 3: Con R_E (estabilización por emisor)

Se añade R_E en el emisor. La malla de base incluye ahora la caída en R_E :

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

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

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

Cómo afecta R_E :

- R_E aparece **multiplicada por** $(\beta + 1)$ en el denominador. Esto significa que incluso una R_E pequeña tiene un efecto enorme en I_B .
- Si R_E es lo suficientemente grande, el denominador está dominado por $R_E \cdot (\beta + 1)$ y los cambios en β apenas afectan a I_B .
- **Compromiso:** una R_E grande estabiliza pero también reduce I_C y "desperdicia" tensión ($V_{R_E} = R_E \cdot I_E$), dejando menos margen para V_{CE} .

Error frecuente en exámenes: Olvidar que por R_E circula $I_E = (\beta + 1) \cdot I_B$, no I_C .

Ejercicio resuelto: Tipo 3

Datos: $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_B = 200 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, $R_E = 500 \text{ }\Omega$, $\beta = 100$

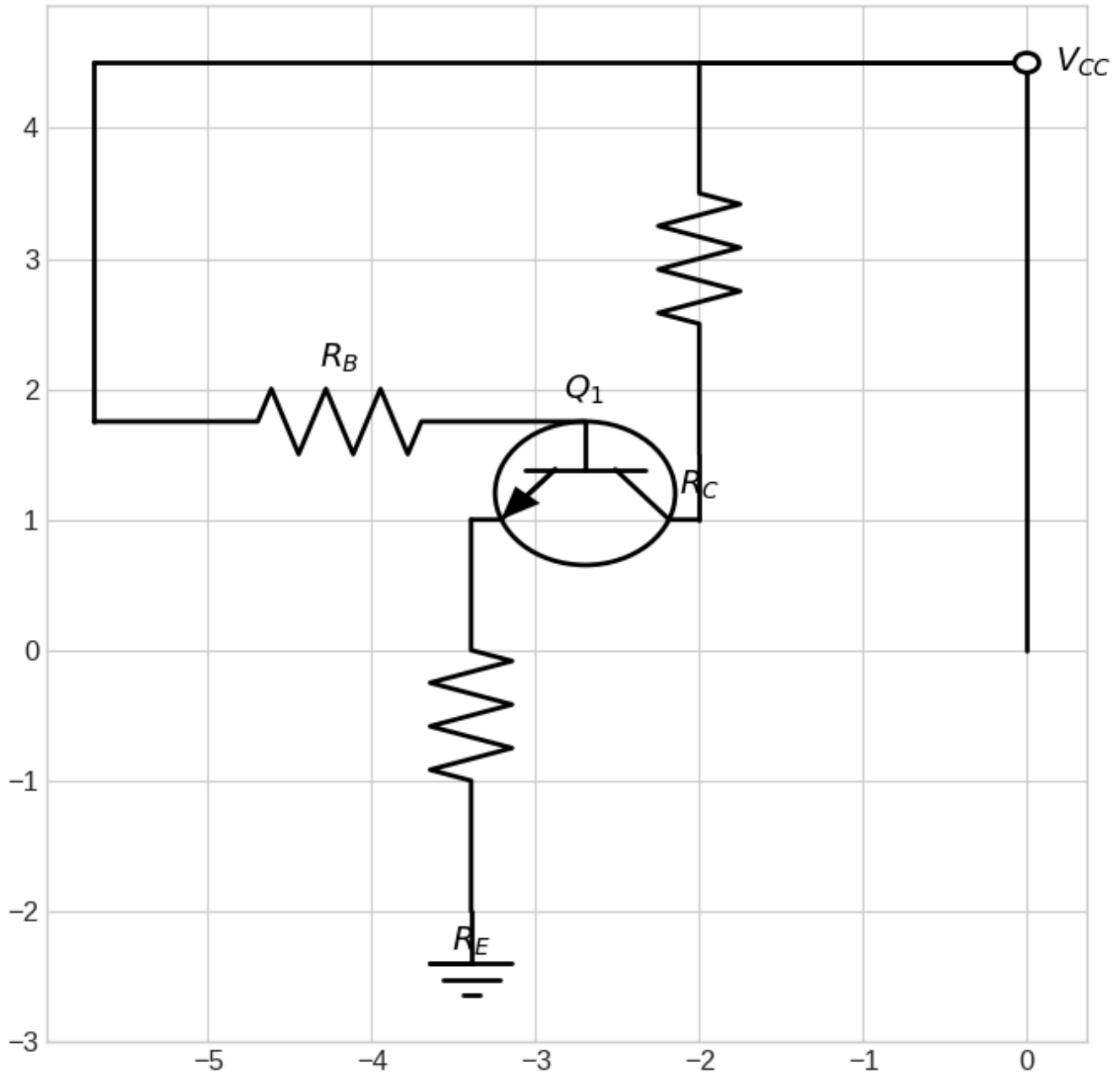
$$I_B = \frac{12 - 0.7}{200\text{k} + 500 \times 101} = \frac{11.3}{250500} = 45.11 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = 100 \times 45.11 = 4.51 \text{ mA} \quad I_E = 101 \times 45.11 = 4.56 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 12 - 1\text{k} \times 4.51 - 500 \times 4.56 = 12 - 4.51 - 2.28 = 5.21 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 5.21 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \rightarrow \text{ACTIVA.}$$

Tipo 3: Con R_E



10.4 Tipo 4: Realimentación de colector (R_B de C a B)

R_B se conecta desde el **colector** hasta la **base** (no desde V_{CC}). Esto crea realimentación automática.

Por R_C circula $I_C + I_B$ (no solo I_C), porque la corriente de base también pasa por R_C .

$$V_{CC} = R_C \cdot (I_C + I_B) + R_B \cdot I_B + V_{BE}$$

Sustituyendo $I_C = \beta \cdot I_B$:

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

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot (I_C + I_B)$$

Por qué se autoestabiliza: Si I_C sube $\rightarrow V_C = V_{CC} - R_C(I_C + I_B)$ baja $\rightarrow$ como R_B está conectada a V_C , la tensión disponible para I_B baja $\rightarrow I_B$ baja $\rightarrow I_C$ se corrige.

Observa que la fórmula de I_B es idéntica al Tipo 3 pero con R_C en vez de R_E .

Ejercicio resuelto: Tipo 4

Datos: $V_{CC} = 10 \text{ V}$, $R_B = 200 \text{ k}\Omega$ (de C a B), $R_C = 2 \text{ k}\Omega$, $\beta = 150$

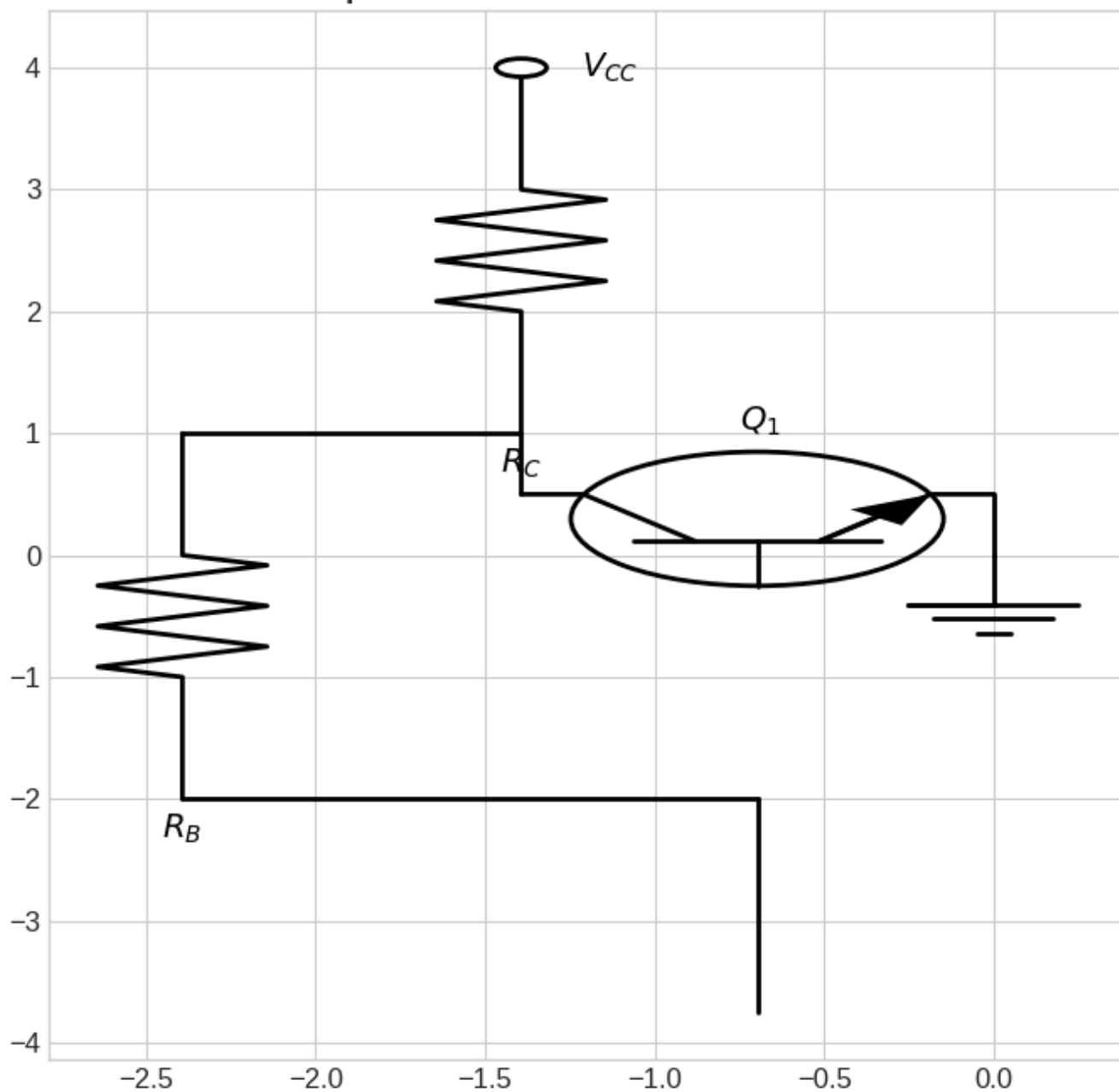
$$I_B = \frac{10 - 0.7}{200\text{k} + 2\text{k} \times 151} = \frac{9.3}{502\,000} = 18.53 \mu\text{A}$$

$$I_C = 150 \times 18.53 = 2.78 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 10 - 2\text{k} \times (2.78 + 0.0185) = 10 - 5.60 = 4.40 \text{ V}$$

$V_{CE} = 4.40 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \rightarrow$ **ACTIVA.**

Tipo 4: Realimentación de colector



10.5 Tipo 5: Divisor de tensión ($R_1 + R_2 + R_C + R_E$)

El circuito **más estable** y **más usado**. Un divisor R_1 - R_2 fija la tensión de base.

Método: equivalente de Thévenin en la base:

$$V_{TH} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad R_{TH} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

El circuito queda como un **Tipo 3** con V_{TH} y R_{TH} :

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E(\beta + 1)} \quad V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_E \cdot I_E$$

Si β es grande: $I_C \approx \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E}$ (ya no depende de β).

Cómo afectan las resistencias:

- R_1 y R_2 fijan V_{TH} . Si $R_2/(R_1 + R_2)$ es grande, V_{TH} es alto y I_C aumenta.
- R_E **estabiliza**: cuanto mayor, más estable pero menos V_{CE} disponible.
- R_C **afecta solo a V_{CE}** : mayor $R_C \rightarrow$ menor V_{CE} , más riesgo de saturación.
- **Para máxima estabilidad**: elegir $R_{TH} \ll R_E \cdot \beta$.

Ejercicio resuelto: Tipo 5

Datos: $V_{CC} = 12\text{ V}$, $R_1 = 47\text{ k}\Omega$, $R_2 = 10\text{ k}\Omega$, $R_C = 2.2\text{ k}\Omega$, $R_E = 1\text{ k}\Omega$, $\beta = 200$

Thévenin:

$$V_{TH} = 12 \times \frac{10}{47 + 10} = 2.11\text{ V} \quad R_{TH} = \frac{47 \times 10}{47 + 10} = 8.25\text{ k}\Omega$$

Resolver:

$$I_B = \frac{2.11 - 0.7}{8.25\text{k} + 1\text{k} \times 201} = \frac{1.41}{209\,250} = 6.72\text{ }\mu\text{A}$$

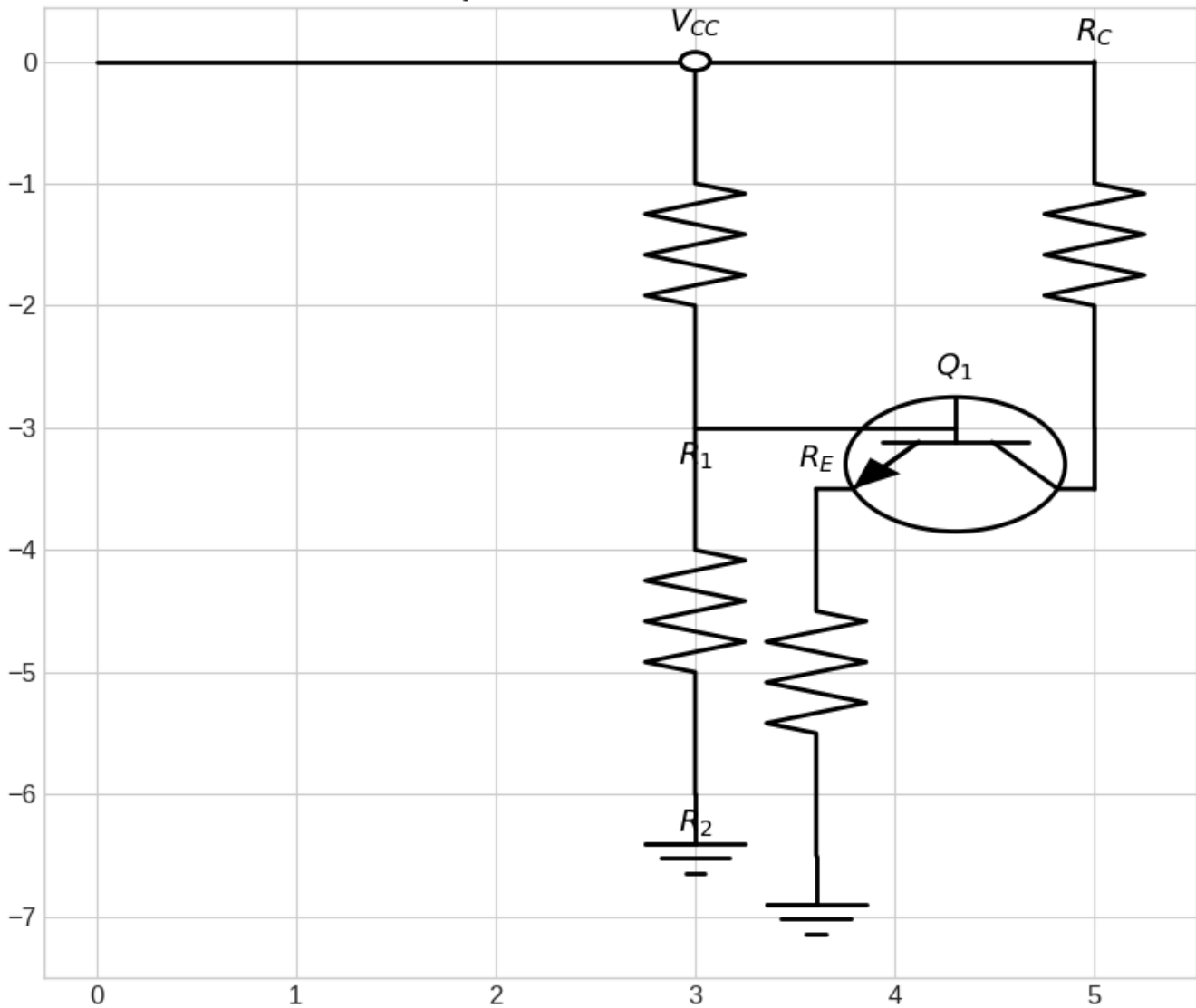
$$I_C = 200 \times 6.72 = 1.34\text{ mA} \quad I_E = 201 \times 6.72 = 1.35\text{ mA}$$

$$V_{CE} = 12 - 2.2\text{k} \times 1.34 - 1\text{k} \times 1.35 = 12 - 2.96 - 1.35 = 7.69\text{ V}$$

$V_{CE} = 7.69\text{ V} > 0.2\text{ V} \rightarrow$ **ACTIVA.**

Aproximación $\beta \rightarrow \infty$: $I_C \approx (2.11 - 0.7)/1\text{k} = 1.41\text{ mA}$ (error solo 5%).

Tipo 5: Divisor de tensión



10.6 Tipo 6: Circuitos PNP

Cualquier topología anterior puede usarse con PNP. Las reglas:

1. V_{CC} se conecta al **emisor** (referencia invertida)
2. Tensiones: V_{EB} y V_{EC} en lugar de V_{BE} y V_{CE}
3. Las corrientes cambian de sentido
4. **Las fórmulas son idénticas en magnitud**

Ejercicio resuelto: PNP con divisor de tensión

Datos: $V_{CC} = 12\text{ V}$, $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ (arriba), $R_2 = 47\text{ k}\Omega$ (abajo), $R_C = 2.2\text{ k}\Omega$, $R_E = 1\text{ k}\Omega$, $\beta = 100$

$$V_B = 12 \times \frac{47}{10 + 47} = 9.89\text{ V} \quad R_{TH} = \frac{10 \times 47}{10 + 47} = 8.25\text{ k}\Omega$$

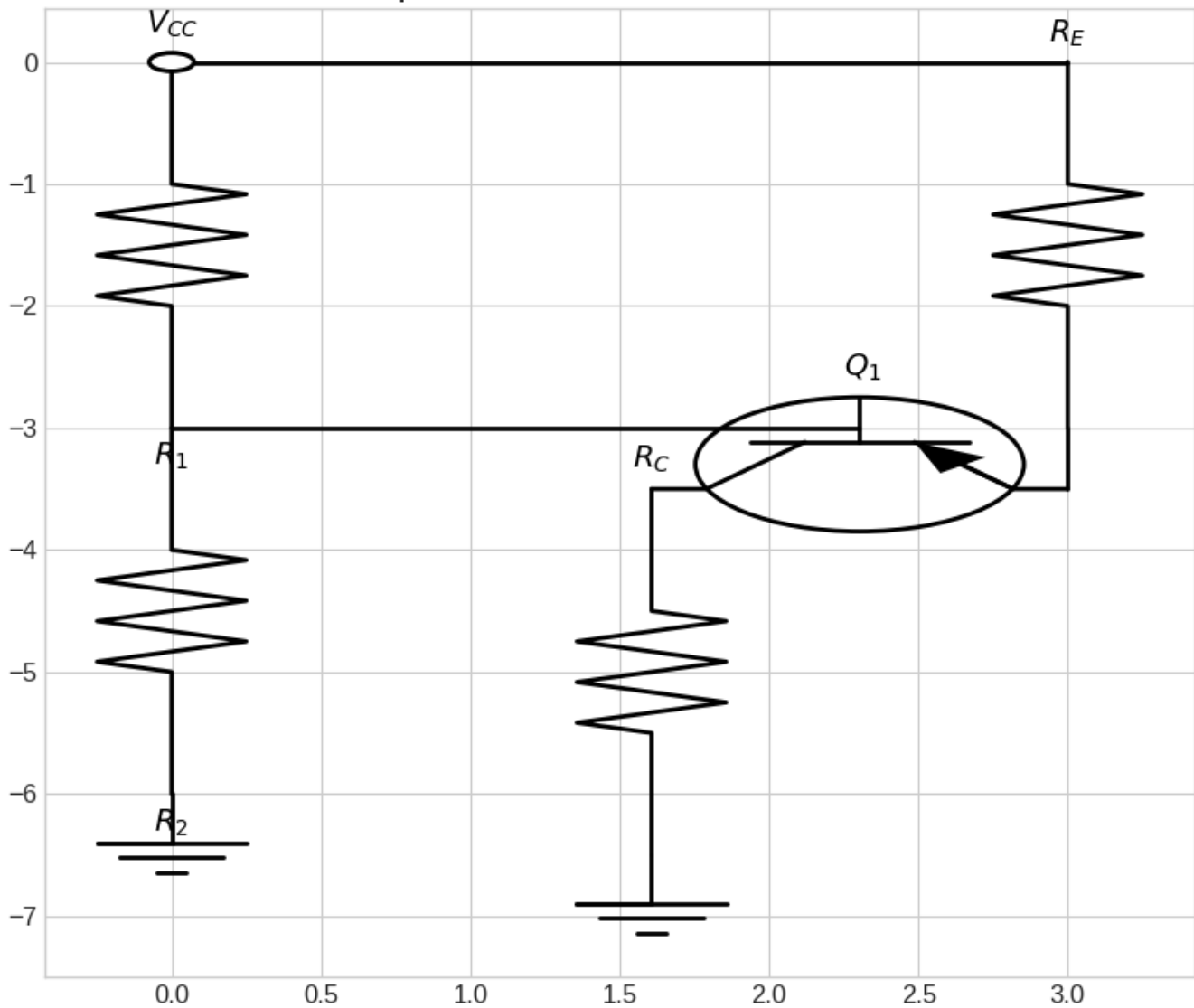
Diferencia emisor-base: $V_{CC} - V_B = 12 - 9.89 = 2.11 \text{ V}$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_B - V_{EB}}{R_{TH} + R_E(\beta + 1)} = \frac{2.11 - 0.7}{8.25\text{k} + 1\text{k} \times 101} = \frac{1.41}{109\,250} = 12.91 \mu\text{A}$$

$$I_C = 100 \times 12.91 = 1.29 \text{ mA} \quad V_{EC} = 12 - 1\text{k} \times 1.30 - 2.2\text{k} \times 1.29 = 7.86 \text{ V}$$

$V_{EC} = 7.86 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \rightarrow \text{ACTIVA.}$

Tipo 6: PNP con divisor de tensión



10.7 Tipo 7: Circuitos combinados

En exámenes aparecen combinaciones de los tipos anteriores. **La metodología es siempre la misma:** plantear KVL en las mallas, sustituir el modelo, resolver y verificar.

7a: Dos fuentes + R_E

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta + 1)} \quad V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_E \cdot I_E$$

7b: Realimentación de colector + R_E

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (R_C + R_E)(\beta + 1)} \quad V_{CE} = V_{CC} - R_C(I_C + I_B) - R_E \cdot I_E$$

Ejercicio resuelto: Tipo 7a (dos fuentes + R_E)

Datos: $V_{BB} = 4 \text{ V}$, $V_{CC} = 15 \text{ V}$, $R_B = 50 \text{ k}\Omega$, $R_C = 2 \text{ k}\Omega$, $R_E = 500 \text{ }\Omega$, $\beta = 80$

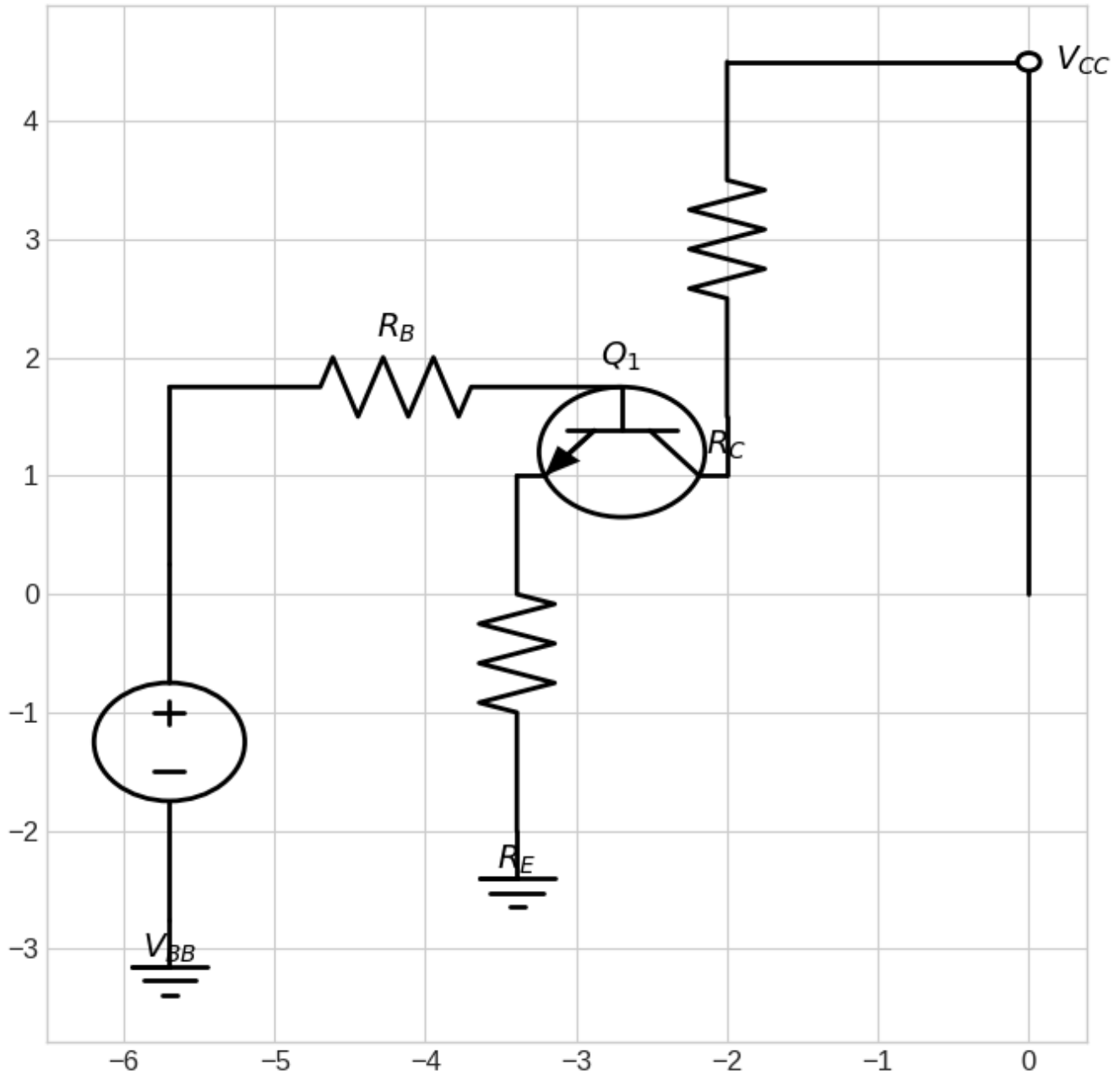
$$I_B = \frac{4 - 0.7}{50\text{k} + 500 \times 81} = \frac{3.3}{90\,500} = 36.46 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = 80 \times 36.46 = 2.92 \text{ mA} \quad I_E = 81 \times 36.46 = 2.95 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 15 - 2\text{k} \times 2.92 - 500 \times 2.95 = 15 - 5.84 - 1.48 = 7.68 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 7.68 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \rightarrow \text{ACTIVA.}$$

Tipo 7a: Dos fuentes + R_E



10.8 Ejercicios adicionales

Ejercicio: Divisor de tensión que entra en saturación

Datos: $V_{CC} = 10\text{ V}$, $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$, $R_C = 5\text{ k}\Omega$, $R_E = 1\text{ k}\Omega$, $\beta = 150$

Thévenin: $V_{TH} = 5\text{ V}$, $R_{TH} = 5\text{ k}\Omega$

Intento 1 (Activa):

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{5k + 1k \times 151} = \frac{4.3}{156\,000} = 27.56 \mu A$$

$$I_C = 150 \times 27.56 = 4.13 \text{ mA} \quad I_E = 151 \times 27.56 = 4.16 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 10 - 5k \times 4.13 - 1k \times 4.16 = 10 - 20.66 - 4.16 = -14.82 \text{ V}$$

V_{CE} es **negativo** $\rightarrow$ imposible $\rightarrow$ **la hipótesis de activa falla.**

Intento 2 (Saturación): $V_{BE} = 0.8 \text{ V}$, $V_{CE} = 0.2 \text{ V}$

En saturación hay que resolver el sistema de dos mallas porque $I_C \neq \beta \cdot I_B$:

- Malla base: $V_{TH} = R_{TH} \cdot I_B + V_{BE_{sat}} + R_E \cdot (I_B + I_C)$
- Malla colector: $V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE_{sat}} + R_E \cdot (I_B + I_C)$

De la malla de colector:
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}} - R_E \cdot I_B}{R_C + R_E} = \frac{10 - 0.2 - 1k \cdot I_B}{6k}$$

Sustituyendo en la malla de base y resolviendo: $I_B = 440 \mu A$, $I_C = 1.56 \text{ mA}$.

Verificar: $I_C = 1.56 \text{ mA} < \beta \cdot I_B = 150 \times 0.44 = 66 \text{ mA} \rightarrow$ **SATURACIÓN confirmada.**

Ejercicio: Cálculo del β mínimo para saturación

Datos: $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $R_B = 10 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ (polarización fija)

La corriente de base es fija: $I_B = \frac{5 - 0.7}{10k} = 0.43 \text{ mA}$

En el **límite** de saturación: $V_{CE} = V_{CE_{sat}} = 0.2 \text{ V}$

$$I_{C_{lim}} = \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{R_C} = \frac{5 - 0.2}{1k} = 4.8 \text{ mA}$$

$$\beta_{min} = \frac{I_{C_{lim}}}{I_B} = \frac{4.8}{0.43} = 11.2$$

β	$I_C = \beta \cdot I_B$	V_{CE}	Estado
5	2.15 mA	2.85 V	Activa
10	4.30 mA	0.70 V	Activa
12	5.16 mA	-0.16 V	Saturación
50	saturado	0.2 V	Saturación
100	saturado	0.2 V	Saturación

Para $\beta \geq 12$: el transistor entra en saturación. Con R_B tan baja y R_C moderada, es fácil saturar.

10.9 Resumen: fórmula de I_B según el tipo

Tipo	Fórmula de I_B	Qué ve la base
1. Pol. fija	$\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$	Solo R_B
2. Dos fuentes	$\frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$	Solo R_B
3. Con R_E	$\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta + 1)}$	$R_B + R_E$ amplificada
4. Realim. C	$\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_C(\beta + 1)}$	$R_B + R_C$ amplificada
5. Divisor	$\frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E(\beta + 1)}$	Thévenin + R_E
7b. Realim+ R_E	$\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (R_C + R_E)(\beta + 1)}$	$R_B +$ ambas amplificadas

Patrón general: siempre es $\frac{\text{tensión} - V_{BE}}{\text{resistencia total}}$. Las resistencias que están "después" de la base (entre emisor y tierra, o en la rama de realimentación) aparecen multiplicadas por $(\beta + 1)$ porque por ellas circula I_E , no I_B .

10.10 Método universal: predecir el estado en 30 segundos

Para **cualquier** circuito BJT, el estado se determina comparando $\beta \cdot I_B$ con $I_{C_{max}}$:

Tipo	Fórmula de I_B (suponer activa)	$I_{C_{max}}$	βI_B $> I_{C_{max}}$	Si
1. Pol. fija	$\frac{V_{CC} - 0.7}{R_B}$	$\frac{V_{CC}}{R_C}$		Saturación
2. Dos fuentes	$\frac{V_{BB} - 0.7}{R_B}$	$\frac{V_{CC}}{R_C}$		Saturación
3. Con R_E	$\frac{V_{CC} - 0.7}{R_B + R_E(\beta + 1)}$	$\frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$		Saturación
4. Retroalim. C	$\frac{V_{CC} - 0.7}{R_B + R_C(\beta + 1)}$	$\frac{V_{CC}}{R_C}$		Saturación
5. Divisor	$\frac{V_{TH} - 0.7}{R_{TH} + R_E(\beta + 1)}$	$\frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$		Saturación

Procedimiento:

1. Calcular I_B con la fórmula de la segunda columna
2. Multiplicar por β
3. Comparar con $I_{C_{max}}$ de la tercera columna
4. Si $\beta \cdot I_B > I_{C_{max}}$: **saturación**. Si no: **activa**

¿Por qué el Tipo 4 (retroalimentación) casi nunca satura?

Porque en su fórmula de I_B , el denominador contiene $R_C \cdot (\beta + 1)$, que es un número **enorme**. Esto hace que I_B sea muy pequeña, y por tanto $\beta \cdot I_B$ casi siempre es menor que $I_{C_{max}}$. La realimentación negativa se encarga de mantener el transistor en activa.

Ejemplo: $V_{CC} = 10 \text{ V}$, $R_B = 200 \text{ k}\Omega$, $R_C = 2 \text{ k}\Omega$, $\beta = 150$

$$I_B = \frac{10 - 0.7}{200\text{k} + 2\text{k} \times 151} = 18.5 \mu\text{A} \quad \beta I_B = 2.78 \text{ mA} \quad I_{C_{max}} = \frac{10}{2\text{k}} = 5 \text{ mA}$$

$2.78 < 5 \rightarrow$ **Activa**. Si fuera polarización fija con los mismos valores: $I_B = 50 \mu\text{A}$, $\beta I_B = 7.5 \text{ mA}$
 $> 5 \text{ mA} \rightarrow$ saturaría.

El atajo R_B/R_C vs β y cuándo usarlo

Circuito	¿Funciona el atajo?	Por qué
Pol. fija	Sí	R_B ve tensión fija V_{CC}
Con R_E	Sí, con $(R_C + R_E)$	R_B ve tensión fija

Circuito	¿Funciona el atajo?	Por qué
Dos fuentes	Sí, ajustando por V_{BB}/V_{CC}	Tensión fija
Divisor	Sí, con $R_{TH}/(R_C + R_E)$	V_{TH} es fija
Retroalim. C	No	R_B ve V_C que depende de I_C

Regla: si R_B está conectada a un punto de **tensión fija**, el atajo vale. Si está conectada a un punto que **depende de I_C** , usar el método universal.

10.11 Ejercicios de saturación para cada tipo de circuito

En todos los ejercicios anteriores el transistor quedaba en **zona activa**. Pero en la práctica es muy habitual que con ciertos valores de componentes el transistor **sature**. El procedimiento es siempre:

1. **Suponer activa** ($V_{BE} = 0.7\text{ V}$) y calcular I_B , $I_C = \beta \cdot I_B$, V_{CE}
2. Si $V_{CE} < V_{CE_{sat}} = 0.2\text{ V}$ (o negativo) $\rightarrow$ **la hipótesis falla**
3. **Cambiar a saturación:** $V_{BE} = 0.8\text{ V}$, $V_{CE} = 0.2\text{ V}$, y $I_C \neq \beta \cdot I_B$
4. Resolver las **dos mallas independientes** (base y colector) para obtener I_B e I_C
5. **Verificar:** $I_C < \beta \cdot I_B \rightarrow$ saturación confirmada

Ejercicio de saturación: Tipo 1

Datos: $V_{CC} = 12\text{ V}$, $R_B = 100\text{ k}\Omega$, $R_C = 3\text{ k}\Omega$, $\beta = 200$

Intento 1 (Activa): $V_{BE} = 0.7\text{ V}$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{100\text{k}\Omega} = 113\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 200 \times 113\text{ }\mu\text{A} = 22.6\text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 12 - 3\text{k} \times 22.6 = 12 - 67.8 = -55.8\text{ V}$$

V_{CE} es **negativo** $\rightarrow$ imposible $\rightarrow$ **la hipótesis de activa falla**.

Intento 2 (Saturación): $V_{BE} = 0.8\text{ V}$, $V_{CE} = 0.2\text{ V}$

En el Tipo 1 sin R_E , las dos mallas son **independientes**:

- **Malla base:** $V_{CC} = R_B \cdot I_B + V_{BE_{sat}}$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE_{sat}}}{R_B} = \frac{12 - 0.8}{100\text{k}} = 112\text{ }\mu\text{A}$$

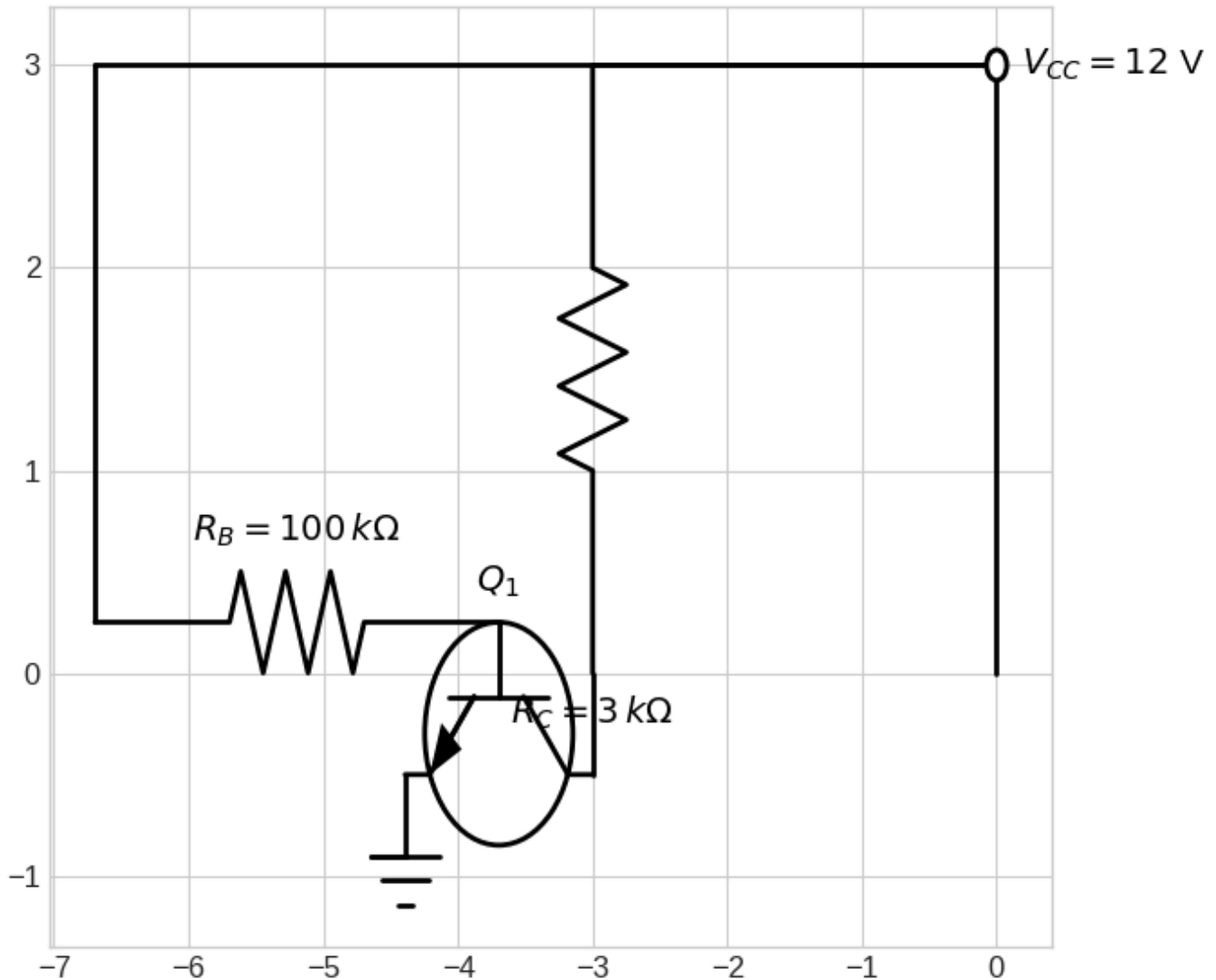
- **Malla colector:** $V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE_{sat}}$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{R_C} = \frac{12 - 0.2}{3k} = 3.93 \text{ mA}$$

Verificación: $I_C = 3.93 \text{ mA} < \beta \cdot I_B = 200 \times 0.112 = 22.4 \text{ mA} \rightarrow \text{SATURACIÓN confirmada.}$

✓

Tipo 1 Saturación: $R_B = 100 \text{ k}\Omega$, $R_C = 3 \text{ k}\Omega$



Ejercicio de saturación: Tipo 2

Datos: $V_{BB} = 5 \text{ V}$, $V_{CC} = 8 \text{ V}$, $R_B = 50 \text{ k}\Omega$, $R_C = 2 \text{ k}\Omega$, $\beta = 150$

Intento 1 (Activa): $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{50k} = 86 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 150 \times 86 \mu\text{A} = 12.9 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 8 - 2k \times 12.9 = 8 - 25.8 = -17.8 \text{ V}$$

V_{CE} es negativo $\rightarrow$ la hipótesis de activa falla.

Intento 2 (Saturación): $V_{BE} = 0.8 \text{ V}$, $V_{CE} = 0.2 \text{ V}$

Las mallas son independientes (no hay R_E compartida):

- **Malla base:** $V_{BB} = R_B \cdot I_B + V_{BE_{sat}}$

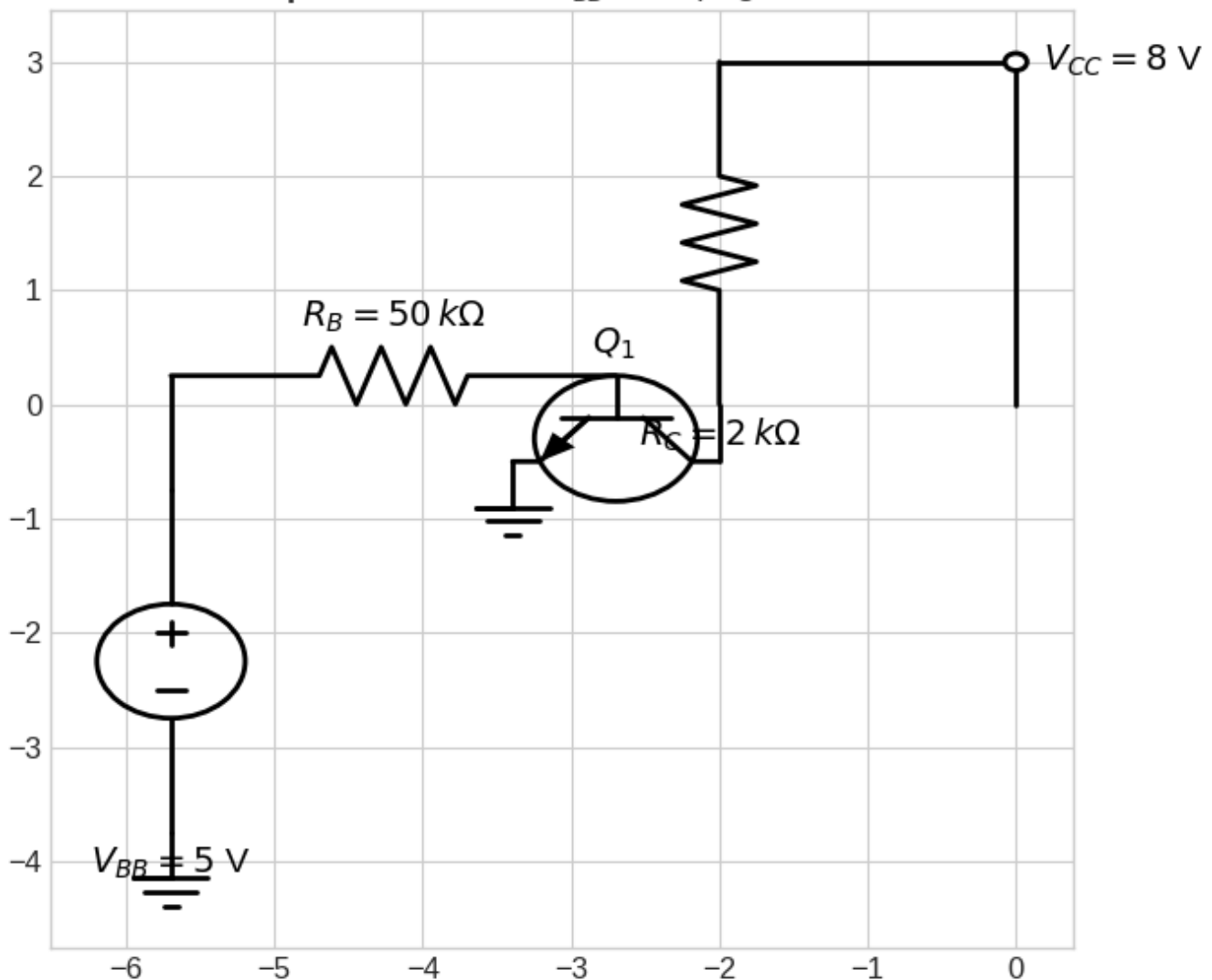
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE_{sat}}}{R_B} = \frac{5 - 0.8}{50\text{k}} = 84 \mu\text{A}$$

- **Malla colector:** $V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE_{sat}}$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{R_C} = \frac{8 - 0.2}{2\text{k}} = 3.9 \text{ mA}$$

Verificación: $I_C = 3.9 \text{ mA} < \beta \cdot I_B = 150 \times 0.084 = 12.6 \text{ mA} \rightarrow$ **SATURACIÓN confirmada.** ✓

Tipo 2 Saturación: $V_{BB} = 5 \text{ V}$, $R_C = 2 \text{ k}\Omega$



Ejercicio de saturación: Tipo 3

Datos: $V_{CC} = 10 \text{ V}$, $R_B = 50 \text{ k}\Omega$, $R_C = 2 \text{ k}\Omega$, $R_E = 500 \Omega$, $\beta = 200$

Intento 1 (Activa): $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta + 1)} = \frac{10 - 0.7}{50\text{k} + 500 \times 201} = \frac{9.3}{150\,500} = 61.8 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 200 \times 61.8 \mu\text{A} = 12.36 \text{ mA}$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 201 \times 61.8 \mu\text{A} = 12.42 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_E \cdot I_E = 10 - 2\text{k} \times 12.36 - 500 \times 12.42 = 10 - 24.72 - 6.21 = -20.93 \text{ V}$$

V_{CE} es **negativo** $\rightarrow$ la hipótesis de activa falla.

Intento 2 (Saturación): $V_{BE} = 0.8 \text{ V}$, $V_{CE} = 0.2 \text{ V}$

Con R_E las mallas están **acopladas** a través de $I_E = I_B + I_C$. Hay que resolver un sistema 2x2:

- **Malla base:** $V_{CC} = R_B \cdot I_B + V_{BE_{sat}} + R_E \cdot (I_B + I_C)$

$$10 = 50\text{k} \cdot I_B + 0.8 + 500 \cdot (I_B + I_C)$$

$$9.2 = 50,500 \cdot I_B + 500 \cdot I_C \quad \dots (1)$$

- **Malla colector:** $V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE_{sat}} + R_E \cdot (I_B + I_C)$

$$10 = 2\text{k} \cdot I_C + 0.2 + 500 \cdot (I_B + I_C)$$

$$9.8 = 500 \cdot I_B + 2,500 \cdot I_C \quad \dots (2)$$

Resolviendo el sistema:

$$\text{De (2): } I_B = \frac{9.8 - 2,500 \cdot I_C}{500} = 19.6 \times 10^{-3} - 5 \cdot I_C$$

Sustituyendo en (1):

$$9.2 = 50,500 \cdot (19.6 \times 10^{-3} - 5 \cdot I_C) + 500 \cdot I_C$$

$$9.2 = 989.8 - 252,500 \cdot I_C + 500 \cdot I_C$$

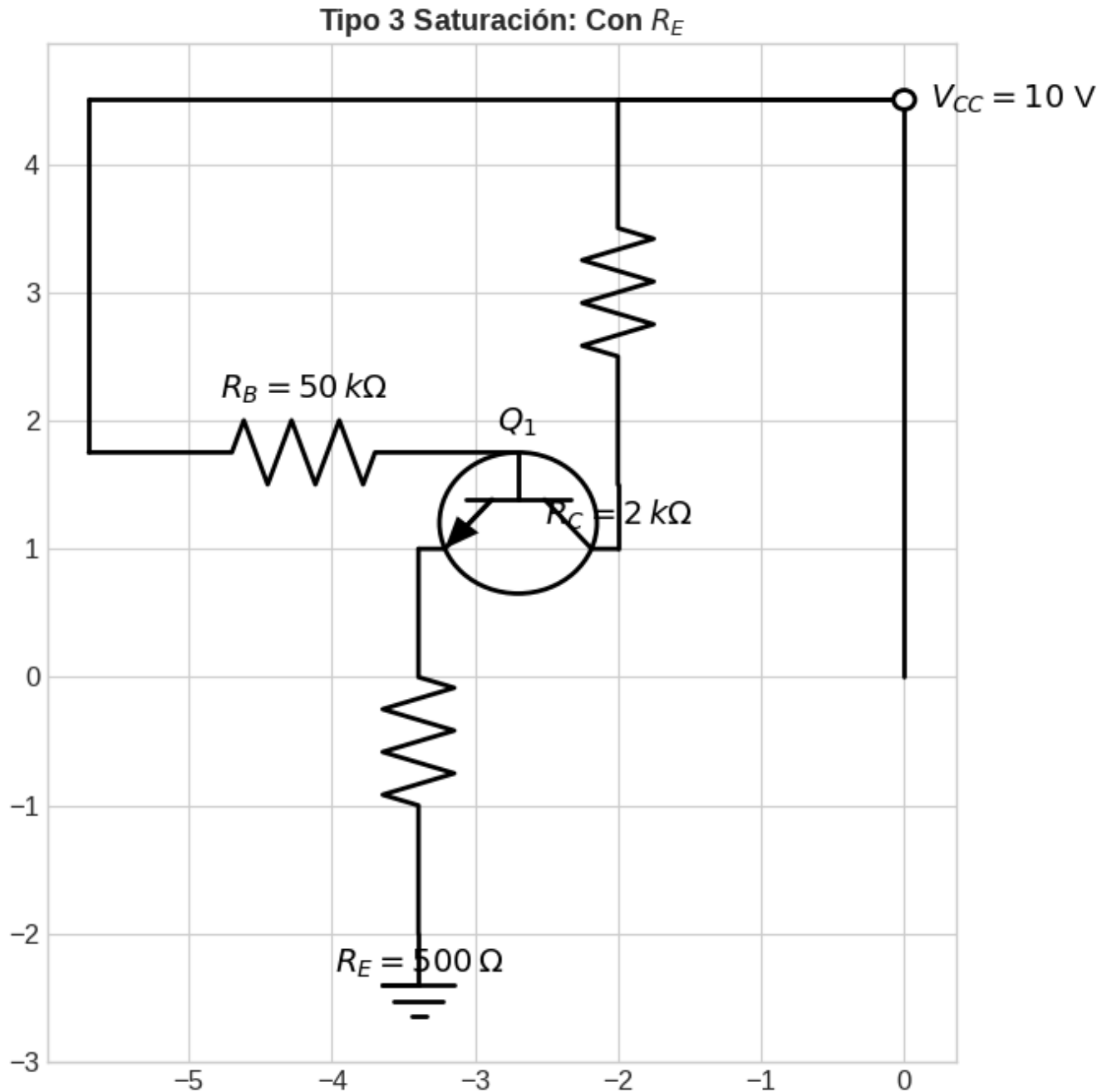
$$252,000 \cdot I_C = 980.6$$

$$I_C = \frac{980.6}{252,000} = 3.89 \text{ mA}$$

$$I_B = 19.6 \times 10^{-3} - 5 \times 3.89 \times 10^{-3} = 0.15 \times 10^{-3} = 150 \mu\text{A}$$

Verificación: $I_C = 3.89 \text{ mA} < \beta \cdot I_B = 200 \times 0.150 = 30 \text{ mA} \rightarrow$ **SATURACIÓN confirmada.** ✓

Nota: Cuando hay R_E , la saturación siempre requiere resolver el sistema 2×2 . No se puede obtener I_C directamente de una sola malla.



Ejercicio de saturación: Tipo 4

Datos: $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $R_B = 50 \text{ k}\Omega$, $R_C = 2 \text{ k}\Omega$, $\beta = 200$

Nota: La realimentación de colector **dificulta** la saturación porque al bajar V_{CE} , baja la tensión disponible para R_B y se reduce I_B . Pero con β alto y R_B pequeño, puede ocurrir.

Intento 1 (Activa): $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$

En Tipo 4: R_B va de colector a base, por lo que la malla de base pasa por R_C :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_C(\beta + 1)} = \frac{5 - 0.7}{50\text{k} + 2\text{k} \times 201} = \frac{4.3}{452\text{k}} = 9.51 \mu\text{A}$$

$$I_C = 200 \times 9.51 = 1.90 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot (I_C + I_B) = 5 - 2\text{k} \times (1.90 + 0.00951) = 5 - 3.82 = 1.18 \text{ V}$$

$V_{CE} = 1.18 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \rightarrow$ en este caso **ACTIVA confirmada**.

Veamos qué pasa si reducimos R_B :

Nuevo dato: $R_B = 10 \text{ k}\Omega$ (todo lo demás igual)

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{10\text{k} + 2\text{k} \times 201} = \frac{4.3}{412\text{k}} = 10.44 \mu\text{A}$$

$$I_C = 200 \times 10.44 = 2.088 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 5 - 2\text{k} \times (2.088 + 0.01044) = 5 - 4.20 = 0.80 \text{ V}$$

Todavía activa. Probemos con $R_B = 5 \text{ k}\Omega$:

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{5\text{k} + 402\text{k}} = \frac{4.3}{407\text{k}} = 10.56 \mu\text{A}$$

La realimentación estabiliza mucho. Para forzar saturación usemos $R_C = 4 \text{ k}\Omega$, $R_B = 10 \text{ k}\Omega$:

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{10\text{k} + 4\text{k} \times 201} = \frac{4.3}{814\text{k}} = 5.28 \mu\text{A}$$

$$I_C = 200 \times 5.28 = 1.056 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 5 - 4\text{k} \times (1.056 + 0.00528) = 5 - 4.25 = 0.75 \text{ V}$$

Sigue activa. Esto demuestra que **el Tipo 4 es muy resistente a la saturación**, que es justamente su ventaja. Para un ejercicio de saturación genuino con este tipo usaremos valores extremos:

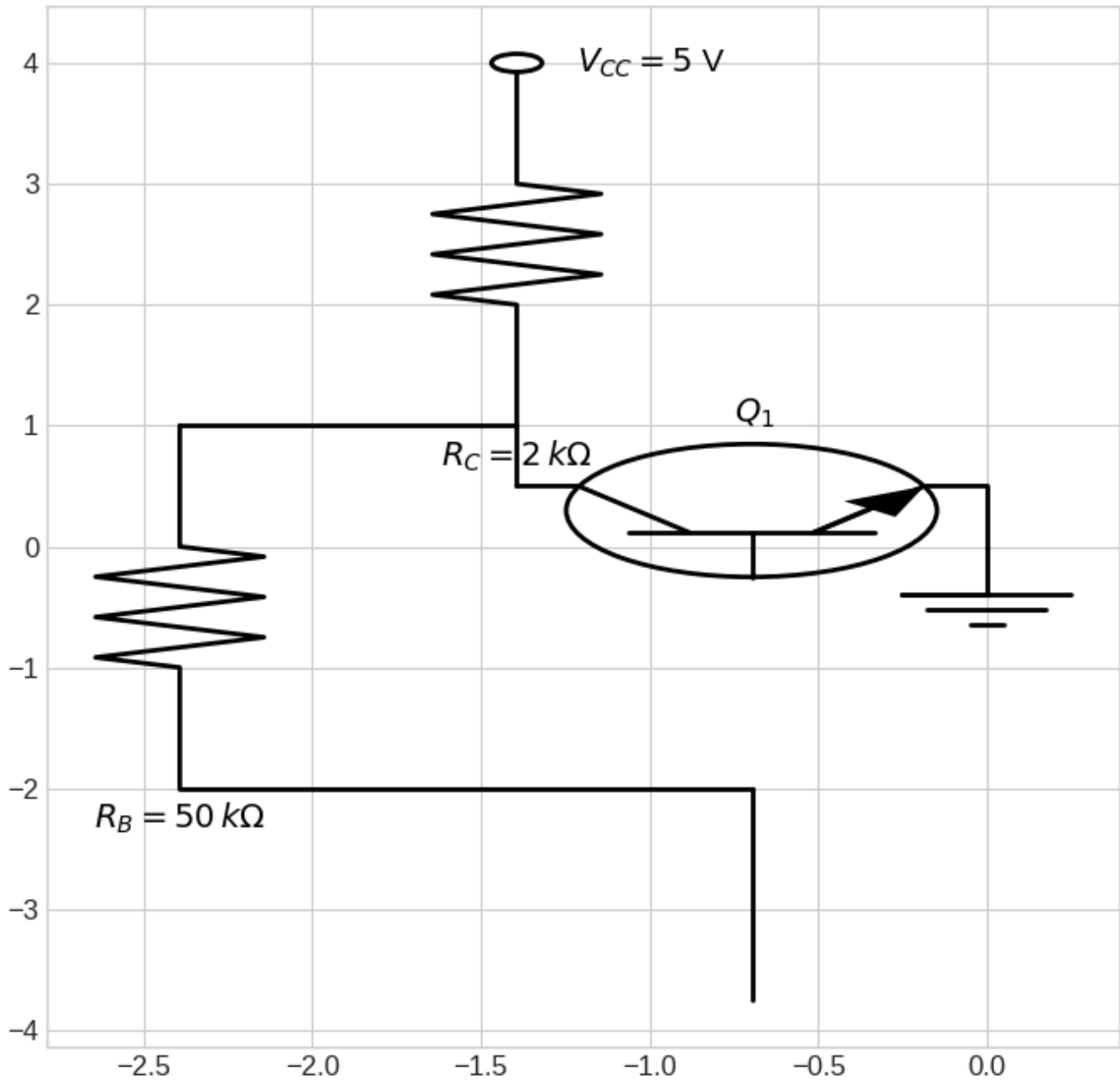
Datos forzados: $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $R_B = 5 \text{ k}\Omega$, $R_C = 10 \text{ k}\Omega$, $\beta = 200$

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{5\text{k} + 10\text{k} \times 201} = \frac{4.3}{2,015\text{k}} = 2.13 \mu\text{A}$$

$$I_C = 200 \times 2.13 = 0.427 \text{ mA} \quad V_{CE} = 5 - 10\text{k} \times 0.429 = 0.71 \text{ V}$$

Aún activa. **Conclusión para el examen:** el Tipo 4 prácticamente **nunca satura** en condiciones razonables. Si te dan un Tipo 4 en el examen, lo más probable es que esté en activa.

Tipo 4: Realimentación de colector (R_B pequeño)



Ejercicio de saturación: Tipo 5

Datos: $V_{CC} = 10\text{ V}$, $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$, $R_C = 5\text{ k}\Omega$, $R_E = 1\text{ k}\Omega$, $\beta = 150$

Thévenin en la base:

$$V_{TH} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \times \frac{10\text{k}}{20\text{k}} = 5\text{ V}$$

$$R_{TH} = R_1 || R_2 = \frac{10\text{k} \times 10\text{k}}{20\text{k}} = 5\text{ k}\Omega$$

Intento 1 (Activa): $V_{BE} = 0.7\text{ V}$

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E(\beta + 1)} = \frac{5 - 0.7}{5k + 1k \times 151} = \frac{4.3}{156k} = 27.56 \mu A$$

$$I_C = 150 \times 27.56 = 4.13 \text{ mA} \quad I_E = 151 \times 27.56 = 4.16 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_E \cdot I_E = 10 - 5k \times 4.13 - 1k \times 4.16 = 10 - 20.66 - 4.16 = -14.82$$

V_{CE} es **negativo** $\rightarrow$ la hipótesis de activa falla.

Intento 2 (Saturación): $V_{BE} = 0.8 \text{ V}$, $V_{CE} = 0.2 \text{ V}$

Usando el equivalente Thévenin, el sistema 2x2 es:

- **Malla base:** $V_{TH} = R_{TH} \cdot I_B + V_{BE_{sat}} + R_E \cdot (I_B + I_C)$

$$5 = 5k \cdot I_B + 0.8 + 1k \cdot (I_B + I_C)$$

$$4.2 = 6k \cdot I_B + 1k \cdot I_C \quad \dots (1)$$

- **Malla colector:** $V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE_{sat}} + R_E \cdot (I_B + I_C)$

$$10 = 5k \cdot I_C + 0.2 + 1k \cdot (I_B + I_C)$$

$$9.8 = 1k \cdot I_B + 6k \cdot I_C \quad \dots (2)$$

Resolviendo el sistema:

De (1): $I_B = \frac{4.2 - 1k \cdot I_C}{6k} = 0.7 \times 10^{-3} - \frac{I_C}{6}$

Sustituyendo en (2):

$$9.8 = 1k \cdot (0.7 \times 10^{-3} - \frac{I_C}{6}) + 6k \cdot I_C$$

$$9.8 = 0.7 - \frac{1k}{6} \cdot I_C + 6k \cdot I_C$$

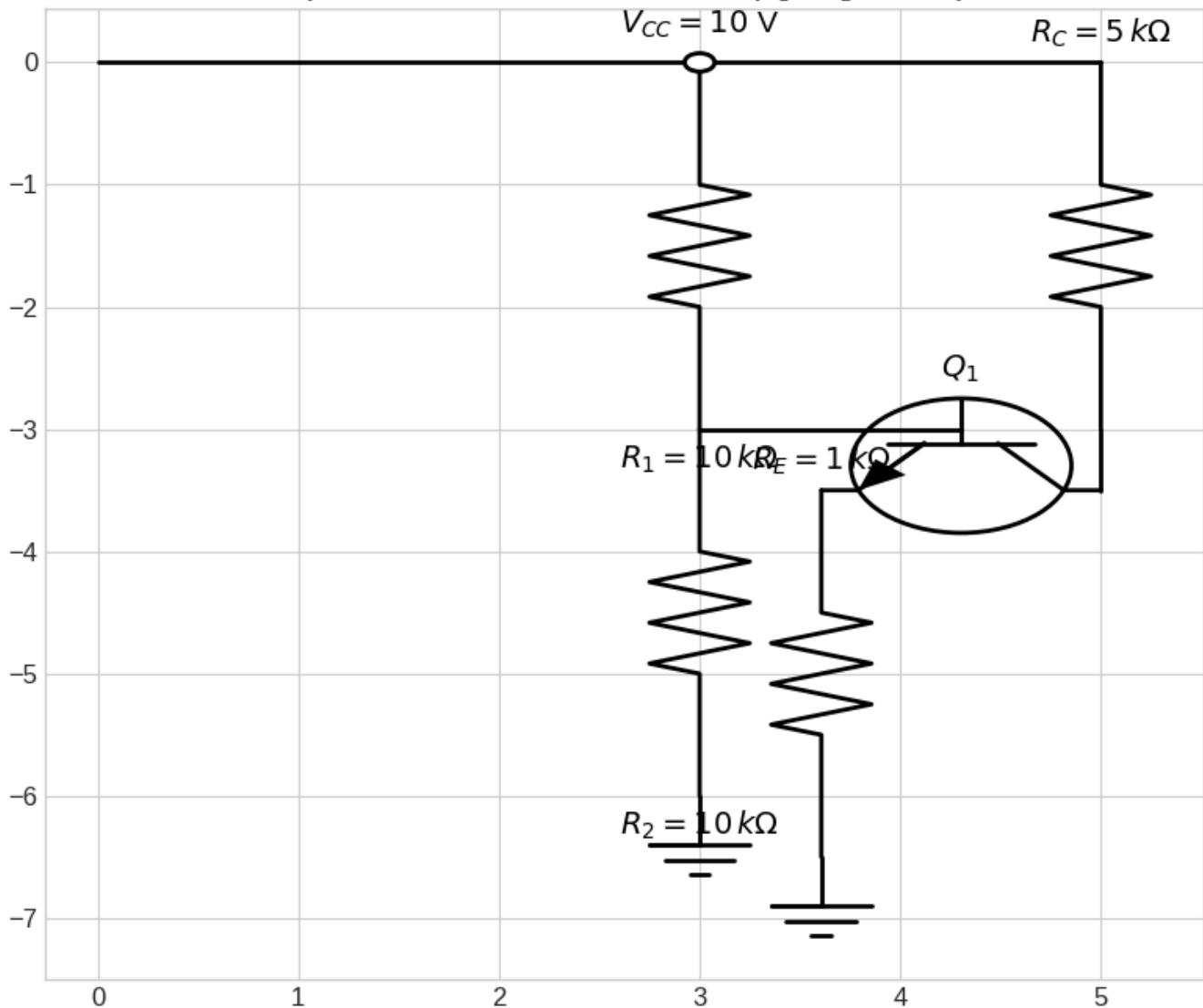
$$9.1 = (6k - \frac{1k}{6}) \cdot I_C = \frac{35k}{6} \cdot I_C$$

$$I_C = \frac{9.1 \times 6}{35k} = \frac{54.6}{35,000} = 1.56 \text{ mA}$$

$$I_B = 0.7 \times 10^{-3} - \frac{1.56 \times 10^{-3}}{6} = 0.7 \times 10^{-3} - 0.26 \times 10^{-3} = 0.44 \times 10^{-3} = 440 \mu A$$

Verificación: $I_C = 1.56 \text{ mA} < \beta \cdot I_B = 150 \times 0.44 = 66 \text{ mA} \rightarrow$ **SATURACIÓN confirmada.** ✓

Tipo 5 Saturación: Divisor de tensión ($R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$)



Ejercicio de saturación: Tipo 7 (dos fuentes + R_E)

Datos: $V_{BB} = 6\text{ V}$, $V_{CC} = 10\text{ V}$, $R_B = 30\text{ k}\Omega$, $R_C = 2\text{ k}\Omega$, $R_E = 500\text{ }\Omega$, $\beta = 150$

Intento 1 (Activa): $V_{BE} = 0.7\text{ V}$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta + 1)} = \frac{6 - 0.7}{30\text{k} + 500 \times 151} = \frac{5.3}{105,500} = 50.24\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = 150 \times 50.24 = 7.54\text{ mA} \quad I_E = 151 \times 50.24 = 7.59\text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_E \cdot I_E = 10 - 2\text{k} \times 7.54 - 500 \times 7.59 = 10 - 15.08 - 3.79 = -8.87$$

V_{CE} es **negativo** $\rightarrow$ la hipótesis de activa falla.

Intento 2 (Saturación): $V_{BE} = 0.8\text{ V}$, $V_{CE} = 0.2\text{ V}$

Sistema 2×2 con $I_E = I_B + I_C$:

- **Malla base:** $V_{BB} = R_B \cdot I_B + V_{BE_{sat}} + R_E \cdot (I_B + I_C)$

$$6 = 30k \cdot I_B + 0.8 + 500 \cdot (I_B + I_C)$$

$$5.2 = 30,500 \cdot I_B + 500 \cdot I_C \quad \dots (1)$$

- **Malla colector:** $V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE_{sat}} + R_E \cdot (I_B + I_C)$

$$10 = 2k \cdot I_C + 0.2 + 500 \cdot (I_B + I_C)$$

$$9.8 = 500 \cdot I_B + 2,500 \cdot I_C \quad \dots (2)$$

Resolviendo el sistema:

$$\text{De (2): } I_B = \frac{9.8 - 2,500 \cdot I_C}{500} = 19.6 \times 10^{-3} - 5 \cdot I_C$$

Sustituyendo en (1):

$$5.2 = 30,500 \cdot (19.6 \times 10^{-3} - 5 \cdot I_C) + 500 \cdot I_C$$

$$5.2 = 597.8 - 152,500 \cdot I_C + 500 \cdot I_C$$

$$152,000 \cdot I_C = 592.6$$

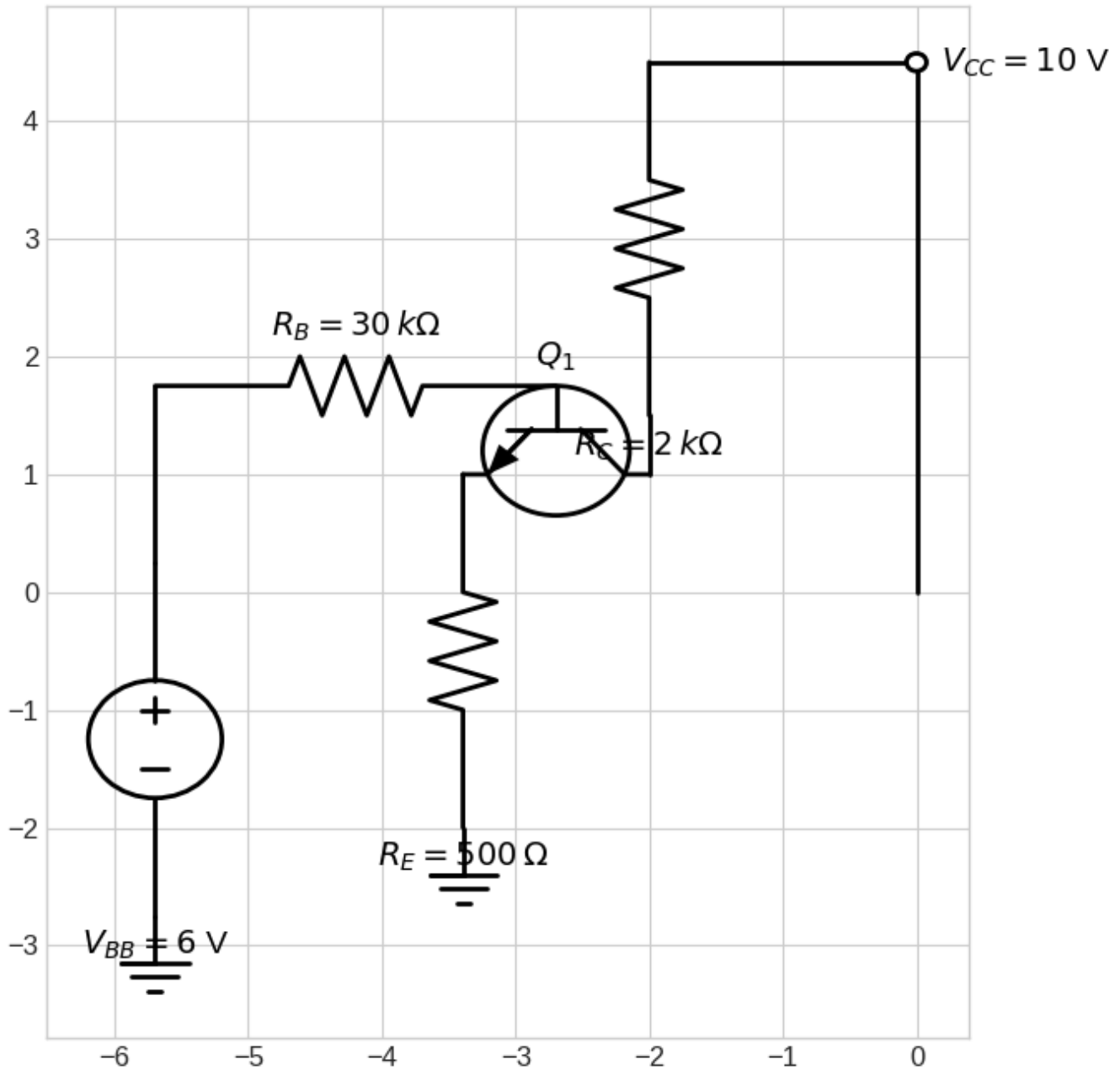
$$I_C = \frac{592.6}{152,000} = 3.90 \text{ mA}$$

$$I_B = 19.6 \times 10^{-3} - 5 \times 3.90 \times 10^{-3} = 19.6 \times 10^{-3} - 19.5 \times 10^{-3} = 0.1 \times 10^{-3} = 100 \mu\text{A}$$

$$I_E = I_B + I_C = 0.1 + 3.9 = 4.0 \text{ mA}$$

Verificación: $I_C = 3.90 \text{ mA} < \beta \cdot I_B = 150 \times 0.1 = 15 \text{ mA} \rightarrow \text{SATURACIÓN confirmada. } \checkmark$

Tipo 7 Saturación: Dos fuentes + R_E



10.12 Ejercicios con transistor PNP para cada tipo de circuito

En un transistor **PNP**, las corrientes y tensiones se invierten respecto al NPN:

- $V_{EB} = 0.7\text{ V}$ (activa) o 0.8 V (saturación) — el **emisor** es más positivo que la base
- $V_{EC} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$ (en vez de V_{CE})
- $V_{EC_{sat}} = 0.2\text{ V}$
- Las corrientes **entran** por el emisor y **salen** por base y colector
- V_{CC} se conecta al **emisor** (arriba) y R_C va al **colector** (abajo, hacia GND)

Las fórmulas de I_B son **idénticas** a las del NPN correspondiente, sustituyendo V_{BE} por V_{EB} .

Ejercicio PNP: Tipo 1

Datos: $V_{CC} = 12\text{ V}$, $R_B = 240\text{ k}\Omega$, $R_C = 2.2\text{ k}\Omega$, $\beta = 100$

Paso 1-2: Suponer Activa ($V_{EB} = 0.7\text{ V}$)

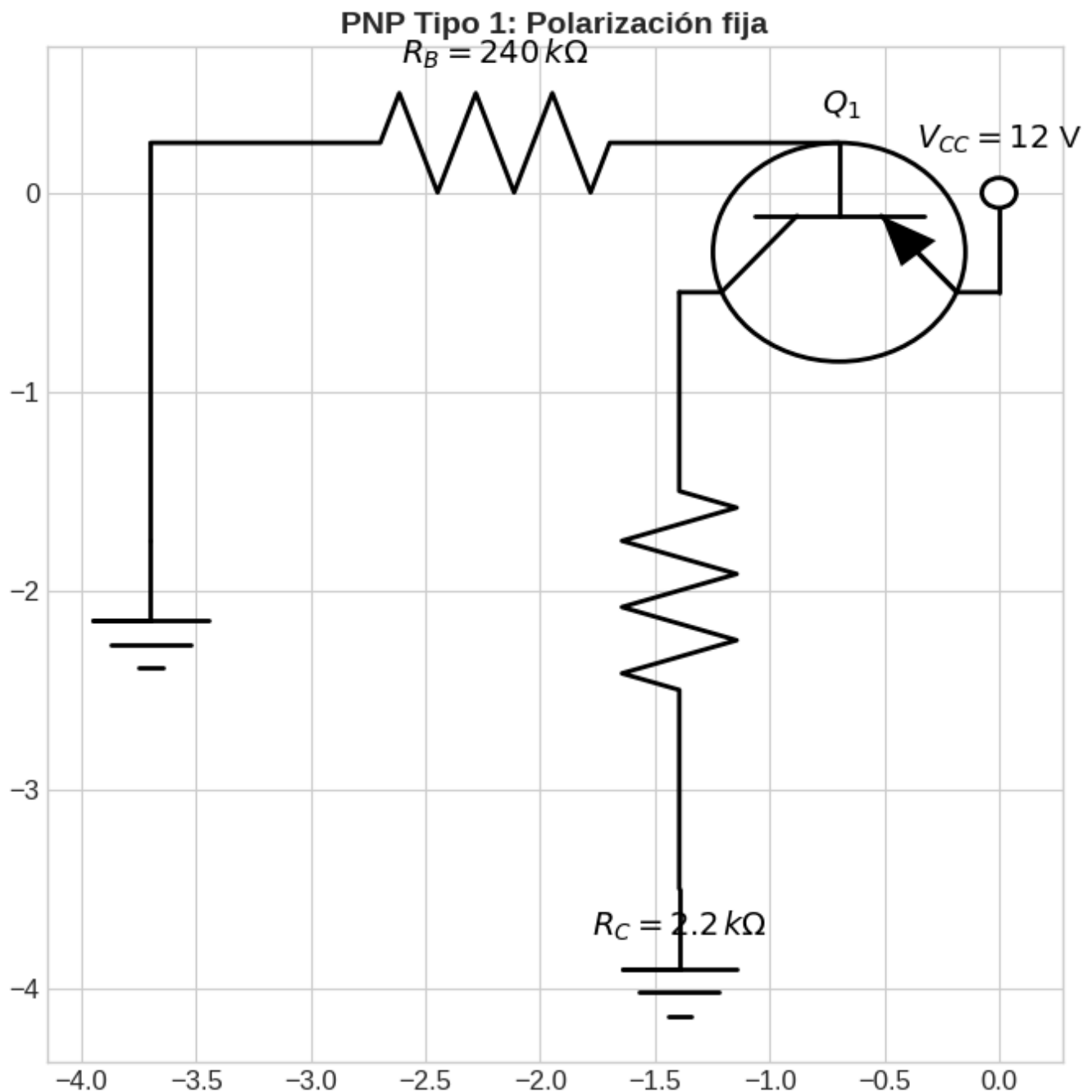
Paso 3-4: La base se conecta a GND a través de R_B . La corriente de base sale por la base hacia GND:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{240\text{k}\Omega} = 47.08\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \times 47.08 = 4.71\text{ mA}$$

$$V_{EC} = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 12 - 2.2\text{k} \times 4.71 = 12 - 10.36 = 1.64\text{ V}$$

Paso 5: $V_{EC} = 1.64\text{ V} > 0.2\text{ V} \rightarrow$ **ACTIVA confirmada.**



Ejercicio PNP: Tipo 2

Datos: $V_{CC} = 10\text{ V}$, $V_{BB} = 4\text{ V}$, $R_B = 100\text{ k}\Omega$, $R_C = 1.5\text{ k}\Omega$, $\beta = 80$

Paso 1-2: Suponer Activa ($V_{EB} = 0.7\text{ V}$)

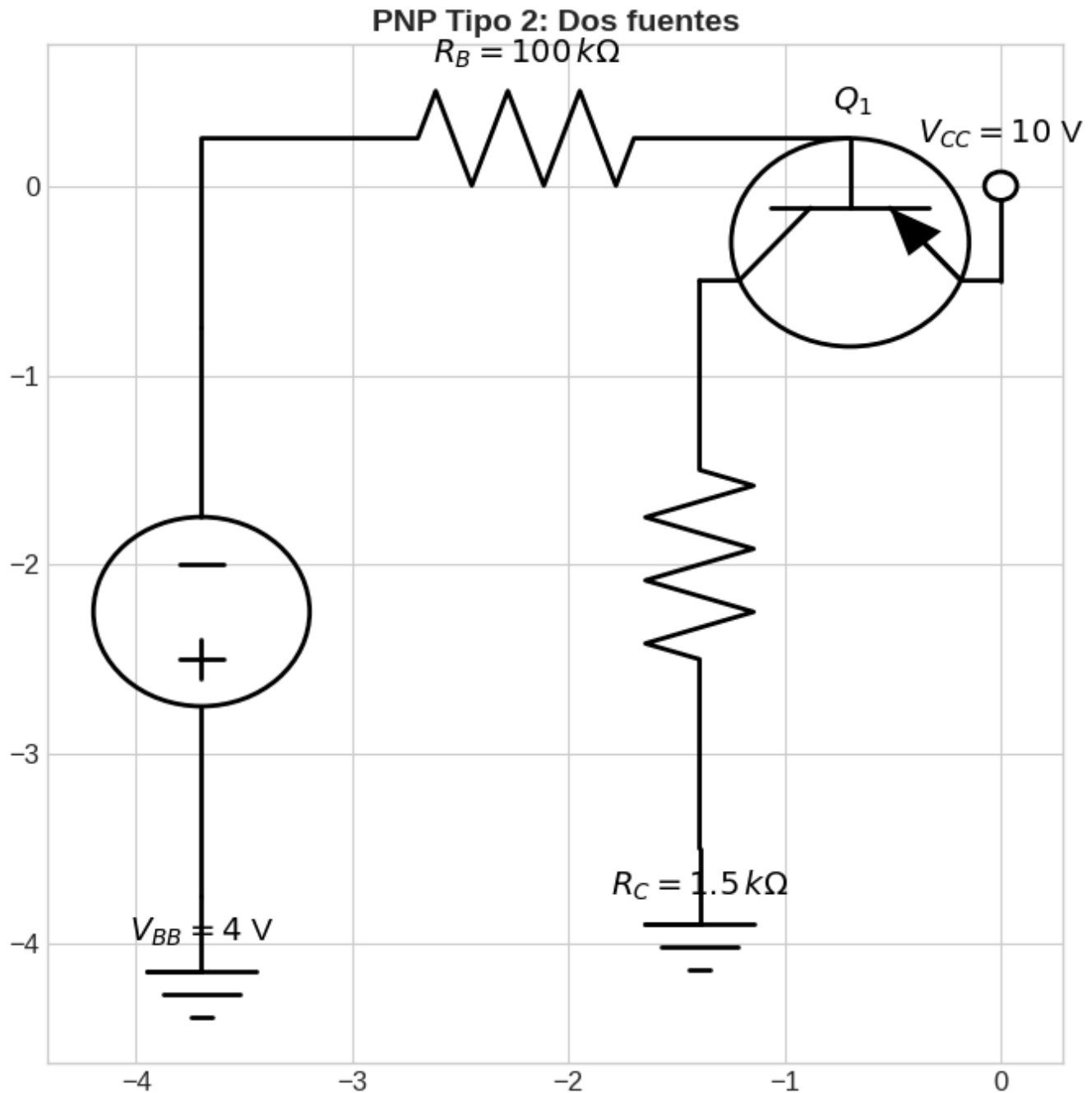
La fuente V_{BB} polariza la base. La corriente de base va de la base hacia V_{BB} :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB} - V_{BB}}{R_B} = \frac{10 - 0.7 - 4}{100\text{k}} = \frac{5.3}{100\text{k}} = 53\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 80 \times 53 = 4.24\text{ mA}$$

$$V_{EC} = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 10 - 1.5\text{k} \times 4.24 = 10 - 6.36 = 3.64\text{ V}$$

Paso 5: $V_{EC} = 3.64 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \rightarrow \text{ACTIVA confirmada.}$



Ejercicio PNP: Tipo 3 (con R_E)

Datos: $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_B = 200 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, $R_E = 500 \Omega$, $\beta = 100$

Paso 1-2: Suponer Activa ($V_{EB} = 0.7 \text{ V}$)

En el PNP Tipo 3, R_E va del emisor (arriba) a V_{CC} y R_C va del colector a GND. La malla base:

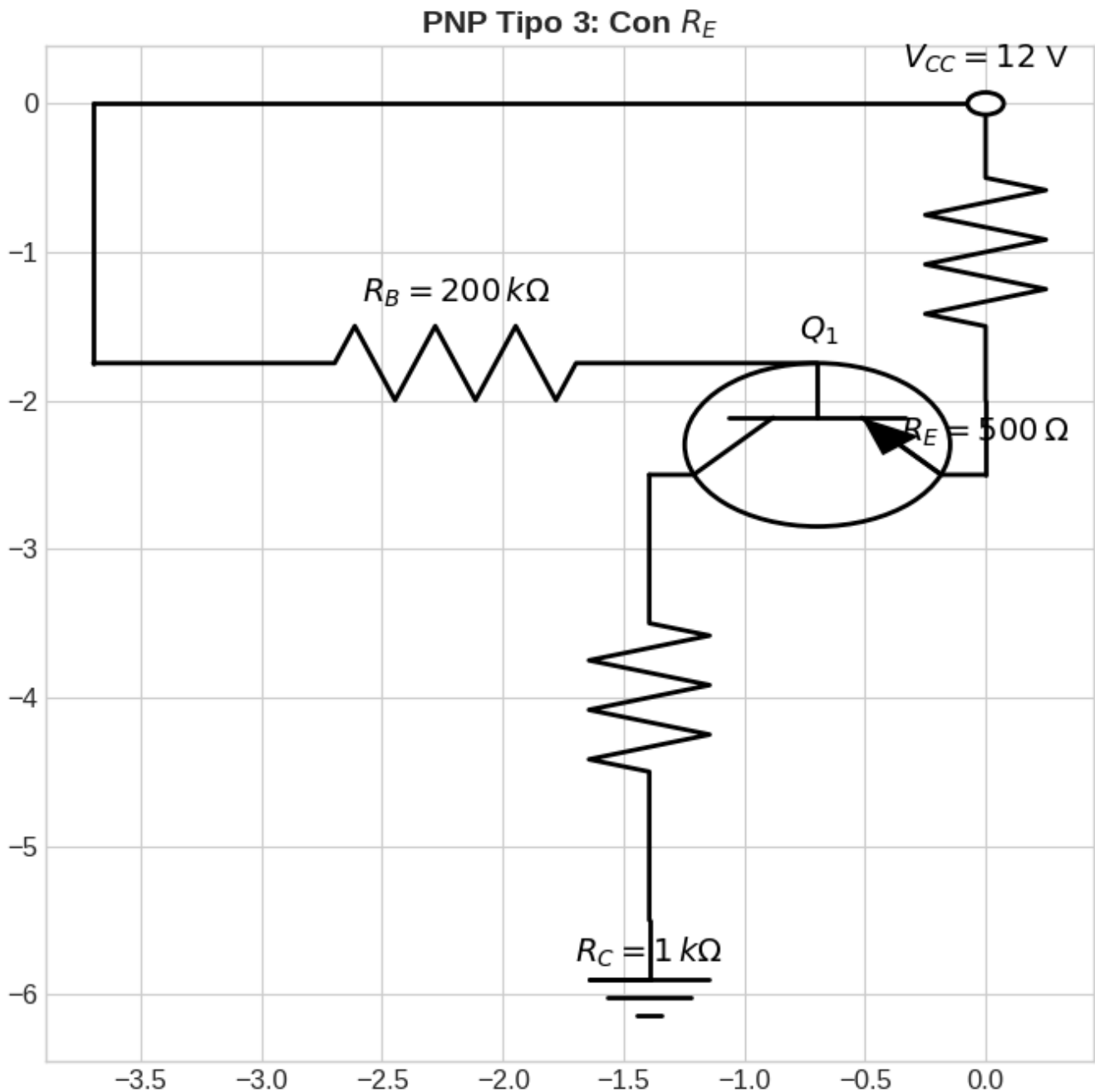
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_B + R_E(\beta + 1)} = \frac{12 - 0.7}{200\text{k} + 500 \times 101} = \frac{11.3}{250,500} = 45.11 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \times 45.11 = 4.51 \text{ mA}$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 101 \times 45.11 = 4.56 \text{ mA}$$

$$V_{EC} = V_{CC} - R_E \cdot I_E - R_C \cdot I_C = 12 - 500 \times 4.56 - 1\text{k} \times 4.51 = 12 - 2.28 - 4.51 = 5.21 \text{ V}$$

Paso 5: $V_{EC} = 5.21 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \rightarrow$ **ACTIVA confirmada.**



Ejercicio PNP: Tipo 4 (realimentación de colector)

Datos: $V_{CC} = 10 \text{ V}$, $R_B = 300 \text{ k}\Omega$, $R_C = 2 \text{ k}\Omega$, $\beta = 100$

En el PNP Tipo 4, R_B conecta el **colector** con la **base** (realimentación). V_{CC} va al emisor directamente y R_C va del colector a GND.

Paso 1-2: Suponer Activa ($V_{EB} = 0.7 \text{ V}$)

La malla pasa por R_C (donde cae $I_C + I_B$) y luego R_B (donde cae I_B):

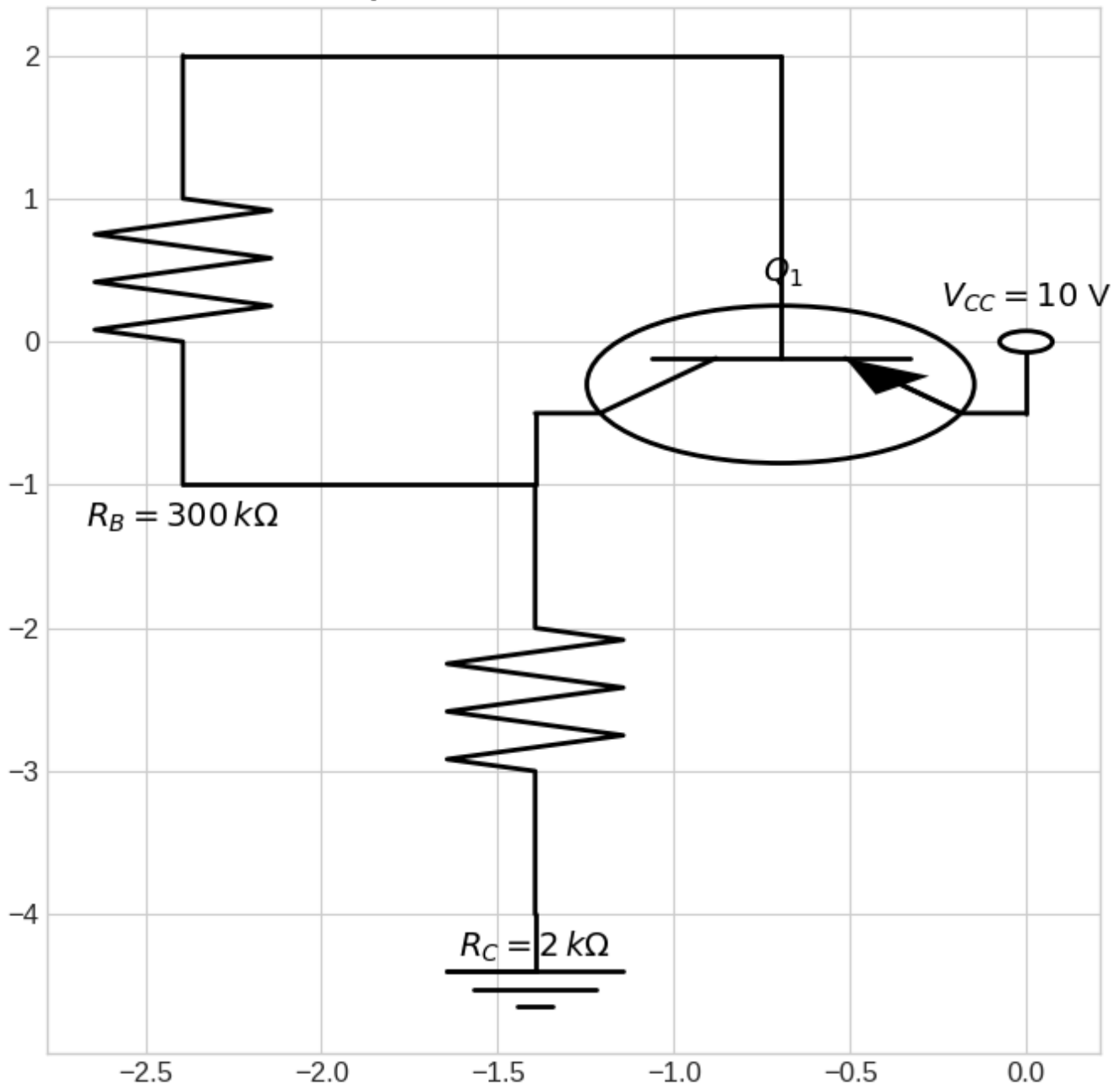
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_B + R_C(\beta + 1)} = \frac{10 - 0.7}{300\text{k} + 2\text{k} \times 101} = \frac{9.3}{502\text{k}} = 18.53 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \times 18.53 = 1.85 \text{ mA}$$

$$V_{EC} = V_{CC} - R_C \cdot (I_C + I_B) = 10 - 2\text{k} \times (1.85 + 0.01853) = 10 - 3.74 = 6.26 \text{ V}$$

Paso 5: $V_{EC} = 6.26 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \rightarrow$ **ACTIVA confirmada.**

PNP Tipo 4: Realimentación de colector



Ejercicio PNP: Tipo 5 (divisor de tensión)

Datos: $V_{CC} = 12\text{ V}$, $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ (inferior, a GND), $R_2 = 47\text{ k}\Omega$ (superior, a V_{CC}), $R_C = 2.2\text{ k}\Omega$, $R_E = 1\text{ k}\Omega$, $\beta = 100$

Nota PNP: En el divisor PNP, R_2 (la de arriba, conectada a V_{CC}) y R_1 (la de abajo, a GND). La tensión en la base es:

$$V_B = V_{CC} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 12 \times \frac{10\text{k}}{57\text{k}} = 2.11\text{ V}$$

Thévenin:

$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2 = \frac{10\text{k} \times 47\text{k}}{57\text{k}} = 8.25\text{ k}\Omega$$

Paso 1-2: Suponer Activa ($V_{EB} = 0.7\text{ V}$)

El emisor está a $V_{CC} - R_E \cdot I_E$. La tensión $V_{EB} = V_E - V_B$, donde $V_E = V_{CC} - R_E \cdot I_E$:

$$V_{EB} = (V_{CC} - R_E \cdot I_E) - V_B = 0.7\text{ V}$$

Usando Thévenin desde la base:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB} - V_B \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}}{R_{TH} + \dots}$$

Forma más directa: la caída desde V_{CC} hasta la base pasando por R_E y la unión EB:

$$V_{CC} - R_E \cdot I_E - V_{EB} = V_B$$

$$12 - 1\text{k} \cdot I_E - 0.7 = 2.11$$

$$I_E = \frac{12 - 0.7 - 2.11}{1\text{k}} = \frac{9.19}{1\text{k}} = 9.19\text{ mA}$$

Pero esto ignora la corriente del divisor. Usando el **método Thévenin completo** para PNP:

La tensión Thévenin vista desde la base hacia V_{CC} por el emisor:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB} - V_{TH}}{R_E(\beta + 1) + R_{TH}} = \frac{12 - 0.7 - 2.11}{1\text{k} \times 101 + 8.25\text{k}} = \frac{9.19}{109,250} = 84.12\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = 100 \times 84.12 = 8.41\text{ mA}$$

$$I_E = 101 \times 84.12 = 8.50\text{ mA}$$

$$V_{EC} = V_{CC} - R_E \cdot I_E - R_C \cdot I_C = 12 - 1\text{k} \times 8.50 - 2.2\text{k} \times 8.41 = 12 - 8.50 - 18.50 = -15.0\text{ V}$$

V_{EC} es **negativo** $\rightarrow$ la hipótesis de activa falla.

Intento 2 (Saturación): $V_{EB} = 0.8\text{ V}$, $V_{EC} = 0.2\text{ V}$

Sistema 2×2:

- **Malla base (emisor-base):** $V_{CC} - V_{TH} = R_E \cdot (I_B + I_C) + V_{EB_{sat}} + R_{TH} \cdot I_B$

$$12 - 2.11 = 1\text{k} \cdot (I_B + I_C) + 0.8 + 8.25\text{k} \cdot I_B$$

$$9.09 = 9.25\text{k} \cdot I_B + 1\text{k} \cdot I_C \quad \dots (1)$$

- **Malla colector:** $V_{CC} = R_E \cdot (I_B + I_C) + V_{EC_{sat}} + R_C \cdot I_C$

$$12 = 1\text{k} \cdot (I_B + I_C) + 0.2 + 2.2\text{k} \cdot I_C$$

$$11.8 = 1\text{k} \cdot I_B + 3.2\text{k} \cdot I_C \quad \dots (2)$$

$$\text{De (2): } I_B = \frac{11.8 - 3.2\text{k} \cdot I_C}{1\text{k}} = 11.8 \times 10^{-3} - 3.2 \cdot I_C$$

Sustituyendo en (1):

$$9.09 = 9.25\text{k} \cdot (11.8 \times 10^{-3} - 3.2 \cdot I_C) + 1\text{k} \cdot I_C$$

$$9.09 = 109.15 - 29,600 \cdot I_C + 1\text{k} \cdot I_C$$

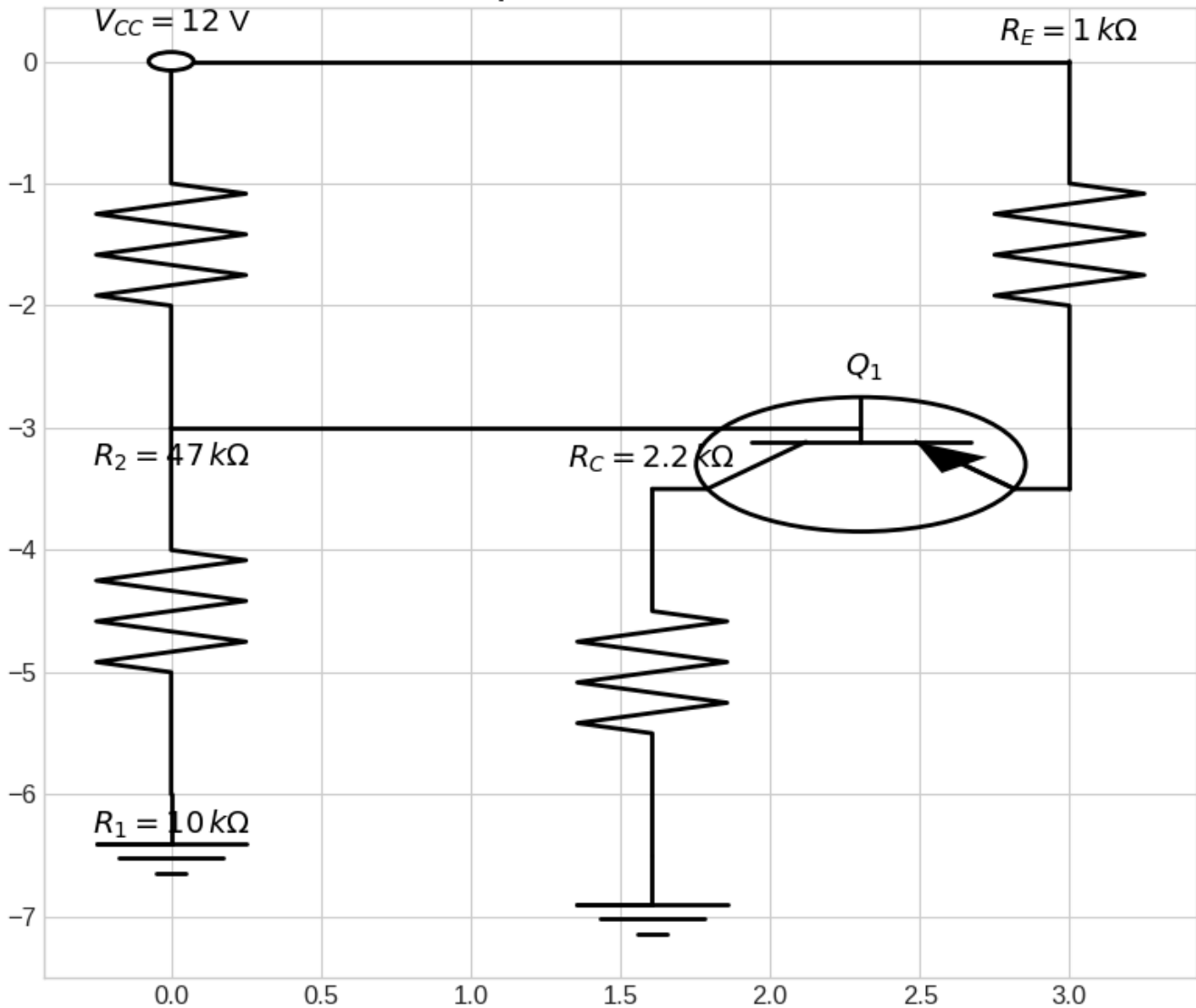
$$28,600 \cdot I_C = 100.06$$

$$I_C = \frac{100.06}{28,600} = 3.50 \text{ mA}$$

$$I_B = 11.8 \times 10^{-3} - 3.2 \times 3.50 \times 10^{-3} = 11.8 \times 10^{-3} - 11.2 \times 10^{-3} = 0.6 \times 10^{-3} = 600 \mu\text{A}$$

Verificación: $I_C = 3.50 \text{ mA} < \beta \cdot I_B = 100 \times 0.6 = 60 \text{ mA} \rightarrow \text{SATURACIÓN confirmada. } \checkmark$

PNP Tipo 5: Divisor de tensión



11. Resumen y conclusiones

1. El BJT es una fuente de corriente controlada por corriente: $I_C = \beta \cdot I_B$
2. Tres zonas: Corte ($I_B = I_C = 0$), Activa ($I_C = \beta I_B$), Saturación ($V_{CE} = V_{CEsat}$, $I_C < \beta I_B$)
3. Modelos linealizados permiten resolver circuitos sustituyendo el transistor por fuentes
4. Metodología: suponer estado $\rightarrow$ resolver $\rightarrow$ verificar $\rightarrow$ repetir si falla
5. NPN vs PNP: mismas ecuaciones, cambian $V_{BE} \leftrightarrow V_{EB}$ y $V_{CE} \leftrightarrow V_{EC}$
6. R_E estabiliza el punto de operación frente a variaciones de β
7. Divisor de tensión es el circuito más estable: $I_C \approx (V_{TH} - V_{BE})/R_E$

Fórmula clave	Uso
$I_C = \beta \cdot I_B$	Relación fundamental en activa
$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B$	Kirchhoff en el transistor
$I_C = \frac{-V_{CE}}{R_C + V_{CC}}$	Recta de carga
$I_B = \frac{(V_1 - V_{BE})}{R_B}$	Malla de base simple
$I_B = \frac{(V_1 - V_{BE})}{(R_B + R_E(\beta + 1))}$	Malla de base con R_E