



Tecnología Electrónica

Capítulo 2: Transistores. Polarización. Estabilidad de Q.





Polarización de transistores

Índice



- ❑ Polarización de transistores
 - **Introducción**
 - **Análisis: determinación de la zona de trabajo**
 - Diseño: área de funcionamiento segura de los transistores
 - Sensibilidad
 - *Definición*
 - *Sensibilidad a varios parámetros*
 - *Ejemplo cálculo de sensibilidad*
 - *Circuito de polarización fija y estabilizada con BJT*
 - *Circuito de polarización fija y estabilizada con FET*
 - Circuitos de polarización
 - *Polarización con fuentes de tensión*
 - *Polarización con fuentes de corriente*



Polarización de Transistores

Introducción



- ❑ Dependiendo de la aplicación, interesa usar el TRT en una o varias de sus zonas de trabajo útiles.
- ❑ Aplicaciones analógicas
 - Circuitos electrónicos lineales: amplificadores, filtros...
 - Los TRTs trabajan en su **zona activa** y las señales son variaciones continuas con el tiempo de tensiones y corrientes.
- ❑ Aplicaciones en conmutación (ctos. digitales, potencia)
 - Conmutador → TRTs en estado: **abierto** (OFF) ó **cerrado** (ON)
 - En BJT's: OFF= **corte**, ON= **saturación**
 - En FET's: OFF= **corte**, ON= **zona óhmica**
- ❑ **Punto de trabajo** → **punto Q**: variables que lo definen:
 - Transistores bipolares: salida (I_{CQ} , V_{CEQ}), entrada (I_{BQ} , V_{BEQ})
 - Transistores unipolares: salida (I_{DQ} , V_{DSQ}), entrada V_{GSQ}

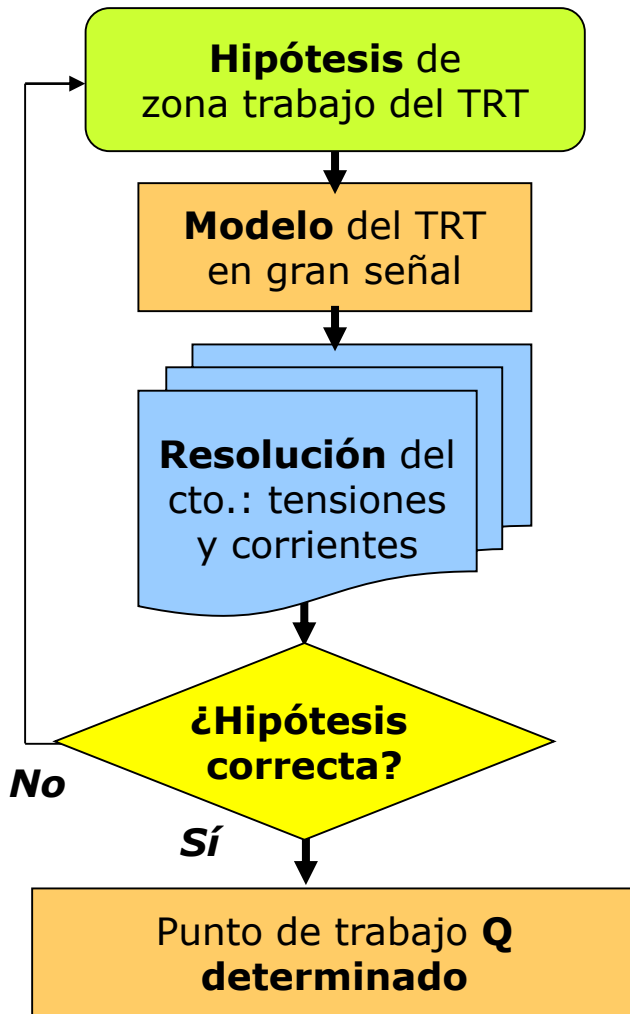


Polarización de transistores

Determinación de la zona de trabajo: punto Q

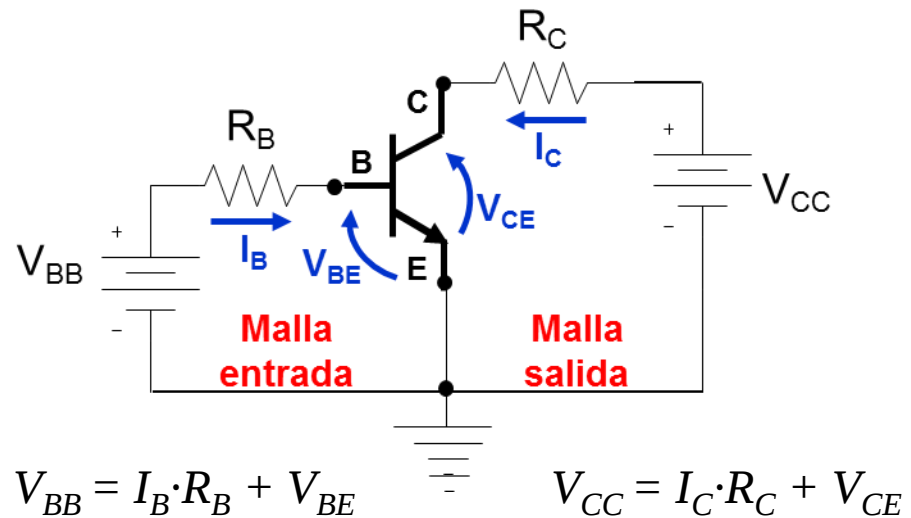


❑ Análisis del punto Q: **hipótesis** → **verificación** → **solución**



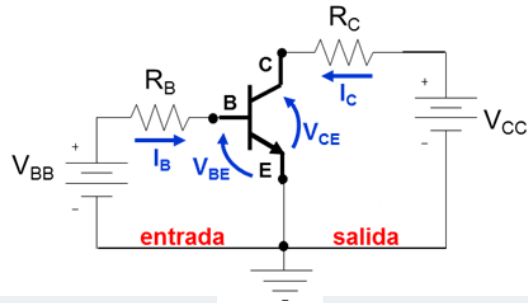
■ Ejemplo con BJT

Saturación: $V_{BE} \approx V_\gamma$; $V_{CE} \approx V_{CEsat}$,, $i_C \leq \beta_F \cdot i_B$
Activa: $V_{BE} \approx V_\gamma$,, $V_{CE} \geq V_{CEsat}$,, $i_C = \beta_F \cdot i_B$
Corte: $V_{BE} \leq V_\gamma$,, $V_{BC} \leq V_\gamma - V_{CEsat}$,, $i_C = i_B = 0$





Rectas de carga en el BJT

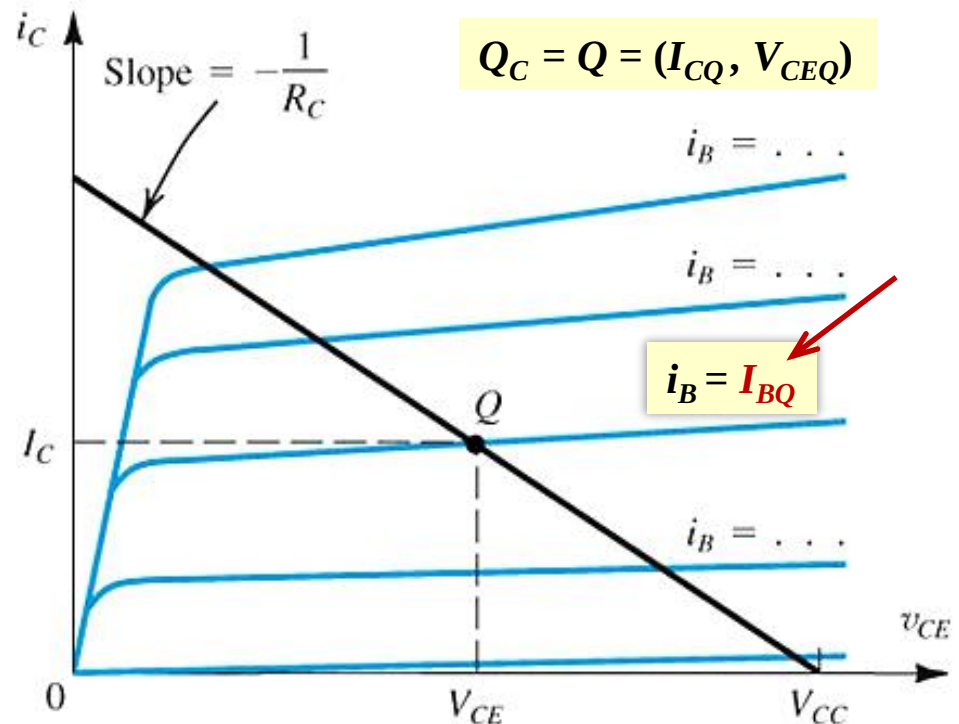
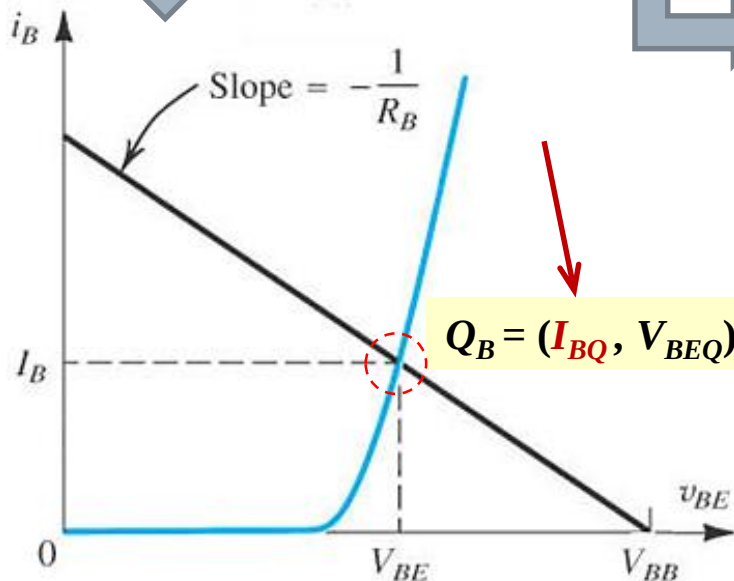


❑ Los *puntos de trabajo* en **entrada** y **salida** del BJT están sobre las rectas de carga correspondientes.

■ En **activa**, I_B es la clave $\rightarrow I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ}$

$$V_{BB} = i_B \cdot R_B + v_{BE}$$

$$V_{CC} = i_C \cdot R_C + v_{CE}$$



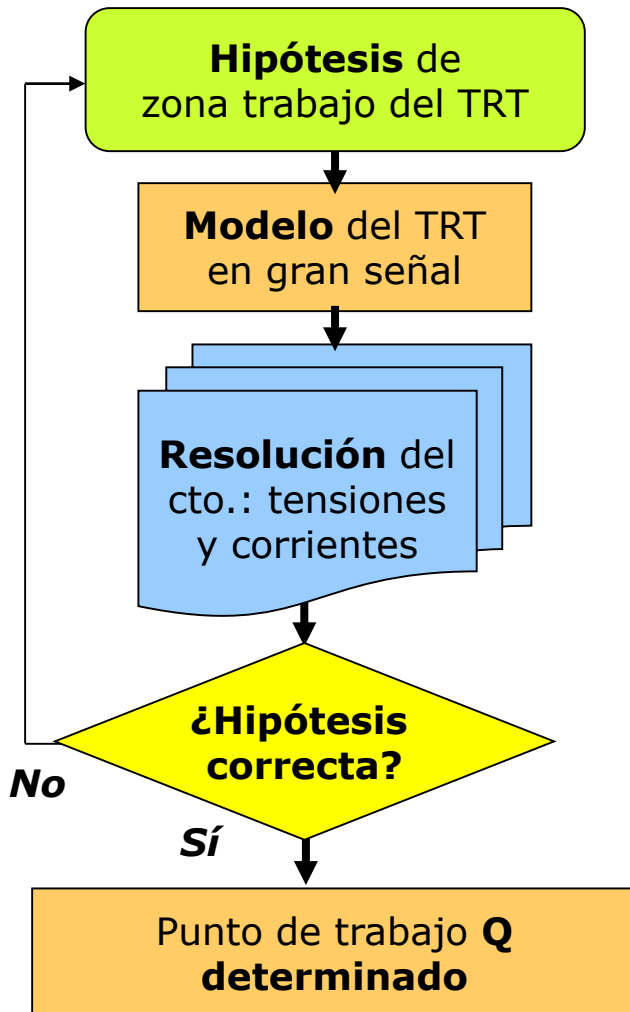


Polarización de transistores

Determinación de la zona de trabajo: punto Q



❑ Análisis del punto Q: **hipótesis** → **verificación** → **solución**



■ Ejemplo con FET

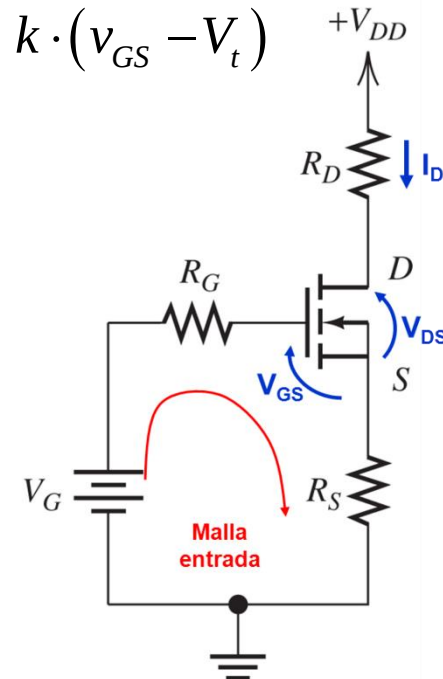
$$\left\{ \begin{array}{l} \textbf{Saturación: } i_{Dsat} = \frac{k}{2} (v_{GS} - V_t)^2 \\ \textbf{Óhmica: } i_D = \frac{v_{DS}}{R_{DSon}} \quad R_{DSon} \approx \frac{v_{DS1}}{i_{DS1}} = \frac{1}{k \cdot (v_{GS} - V_t)} \\ \textbf{Corte: } i_D = 0 \end{array} \right.$$

- Malla de salida:

$$V_{DD} = i_D \cdot (R_D + R_S) + v_{DS}$$

- Malla de entrada:

$$V_G = i_D \cdot R_S + v_{GS}$$





Rectas de carga: trts. Unipolares (1)

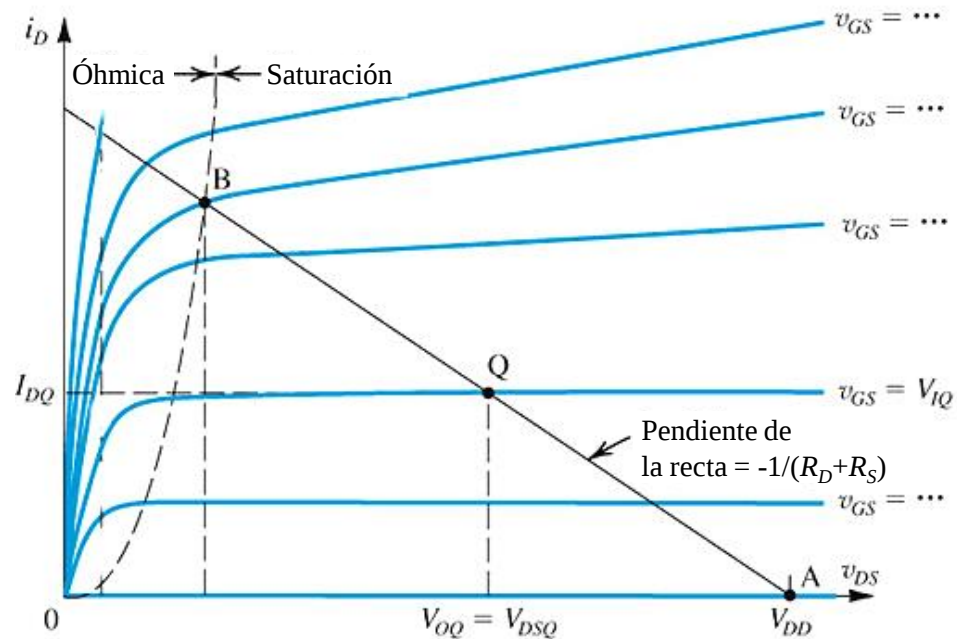
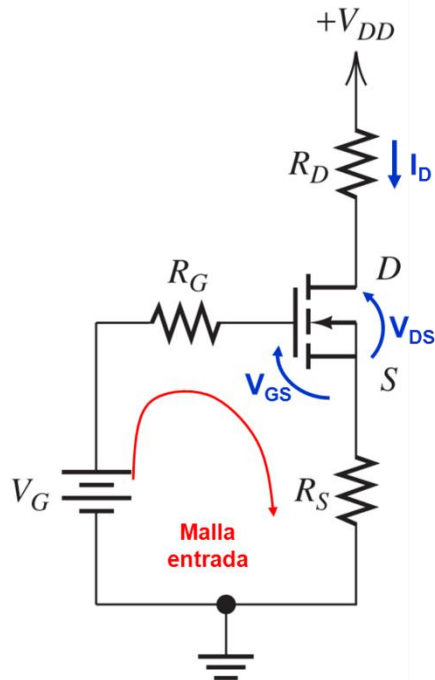
❑ Sobre las curvas de salida

- La *recta de carga de salida* nos permite visualizar cómodamente la zona de trabajo a partir de la ecuación de la **mallla de salida**:

$$V_{DD} = i_D \cdot (R_D + R_S) + v_{DS}$$



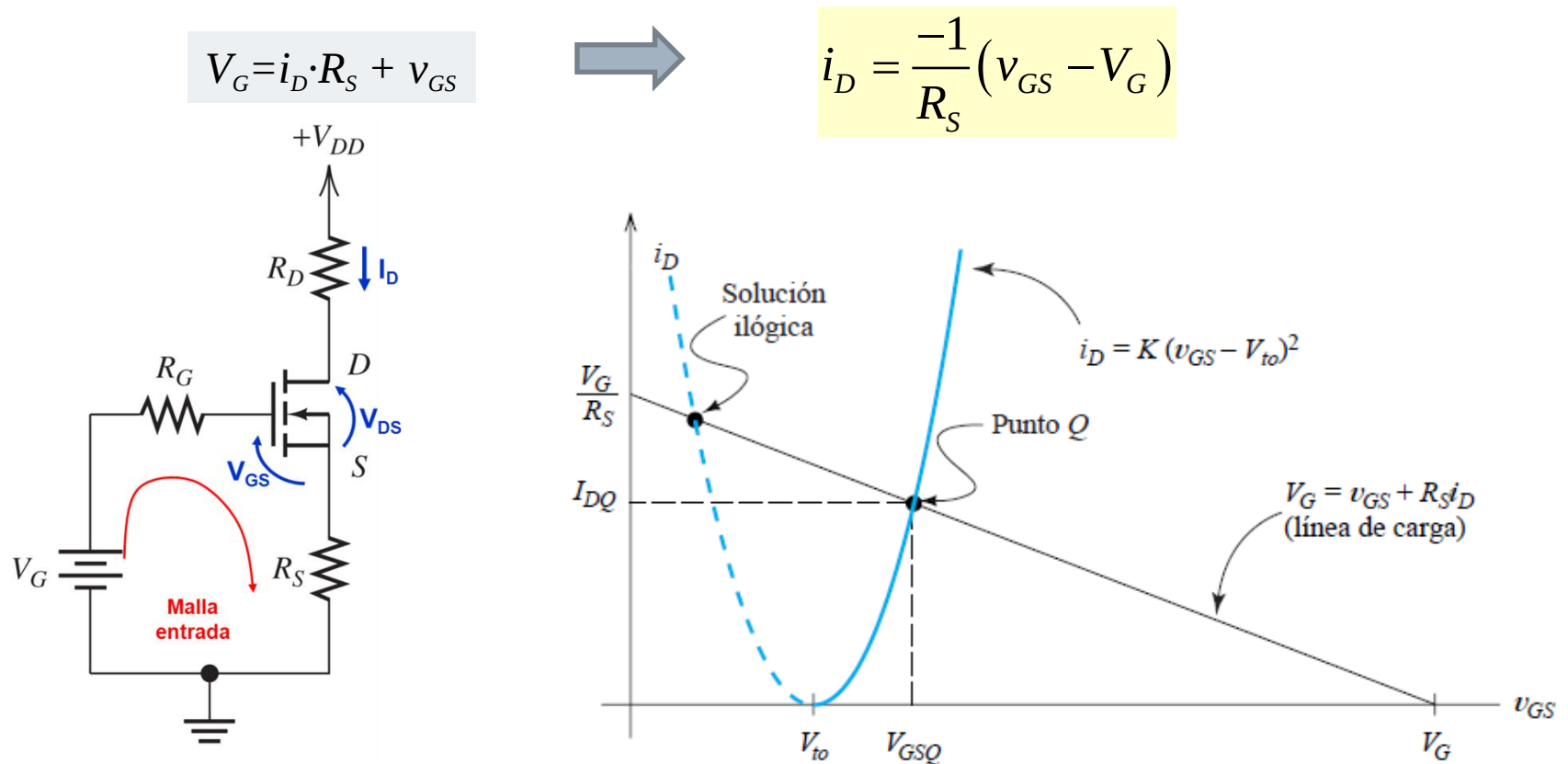
$$i_D = \frac{-1}{R_D + R_S} (v_{DS} - V_{DD})$$





Rectas de carga: trts. Unipolares (2)

- ❑ La ecuación de la *mallla de entrada* se proyecta sobre la **curva de transferencia**: $i_D = f(v_{GS})$
- Esto es así porque en los Unipolares no hay corriente de entrada...



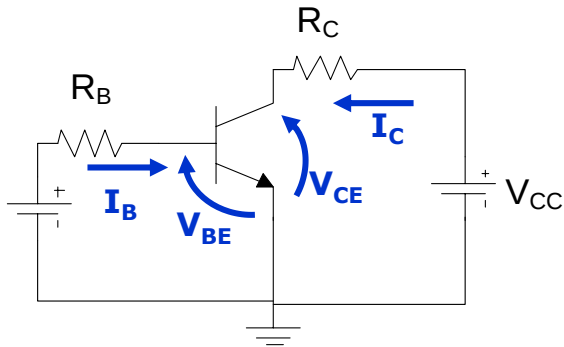


Polarización de transistores

Análisis del punto Q



- ❑ Ejemplo 1: encontrar la zona de trabajo del BJT de la figura

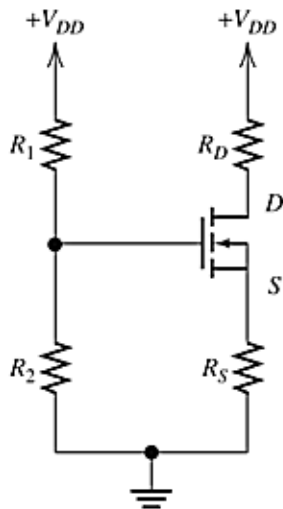


Datos

$V_{BE\gamma} = 0,6 \text{ V}$
 $V_{CEsat} = 0,2 \text{ V}$
 $\beta_F = 200$
 $V_{BB} = 5 \text{ V}$
 $V_{CC} = 10 \text{ V}$
 $R_B = 1 \text{ k}\Omega$ $R_C = 10 \text{ k}\Omega$

Solución:
Saturado, con
 $I_B = 4,4 \text{ mA}$, $I_C = 0,98 \text{ mA}$

- ❑ Ejemplo 2: determinar el punto Q del MOSFET de la figura



Datos:

$R_1 = 3 \text{ M}\Omega$ $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$
 $R_D = 4,7 \text{ k}\Omega$ $R_S = 2,7 \text{ k}\Omega$
 $V_{DD} = 20 \text{ V}$ $k = 2 \text{ mA/V}^2$
 $V_t = 2 \text{ V}$

[Hambley©Ejemplo5.3,pg.310](#)

Solución:
En activa (sat.), con
 $V_{GS} = 2,89 \text{ V}$, $I_D = 0,79 \text{ mA}$, y
 $V_{DS} = 14,2 \text{ V}$



Polarización de transistores

BJT: análisis con aproximación de $(\beta \gg)$



❑ Problema a resolver:

- En circuitos con muchos TRTs el análisis exhaustivo del punto Q para cada dispositivo puede ser inabordable manualmente.
- La aproximación de $(\beta \gg)$ permite obtener rápidamente una cierta estimación del punto Q de cada BJT

❑ Justificación:

- En los BJT en activa, la corriente de base I_B de cada transistor es mucho más pequeña que su I_C .

❑ Procedimiento:

- Suponemos todos los BJTs en activa.
- Si $(\beta \gg)$ se tiene que I_B puede despreciarse en los análisis iniciales.
- Una vez hallados todos los puntos Q, verificamos que efectivamente los BJTs estén en activa.
- Esta primera aproximación luego puede refinarse usando los modelos apropiados a los puntos Q hallados o por simulación.



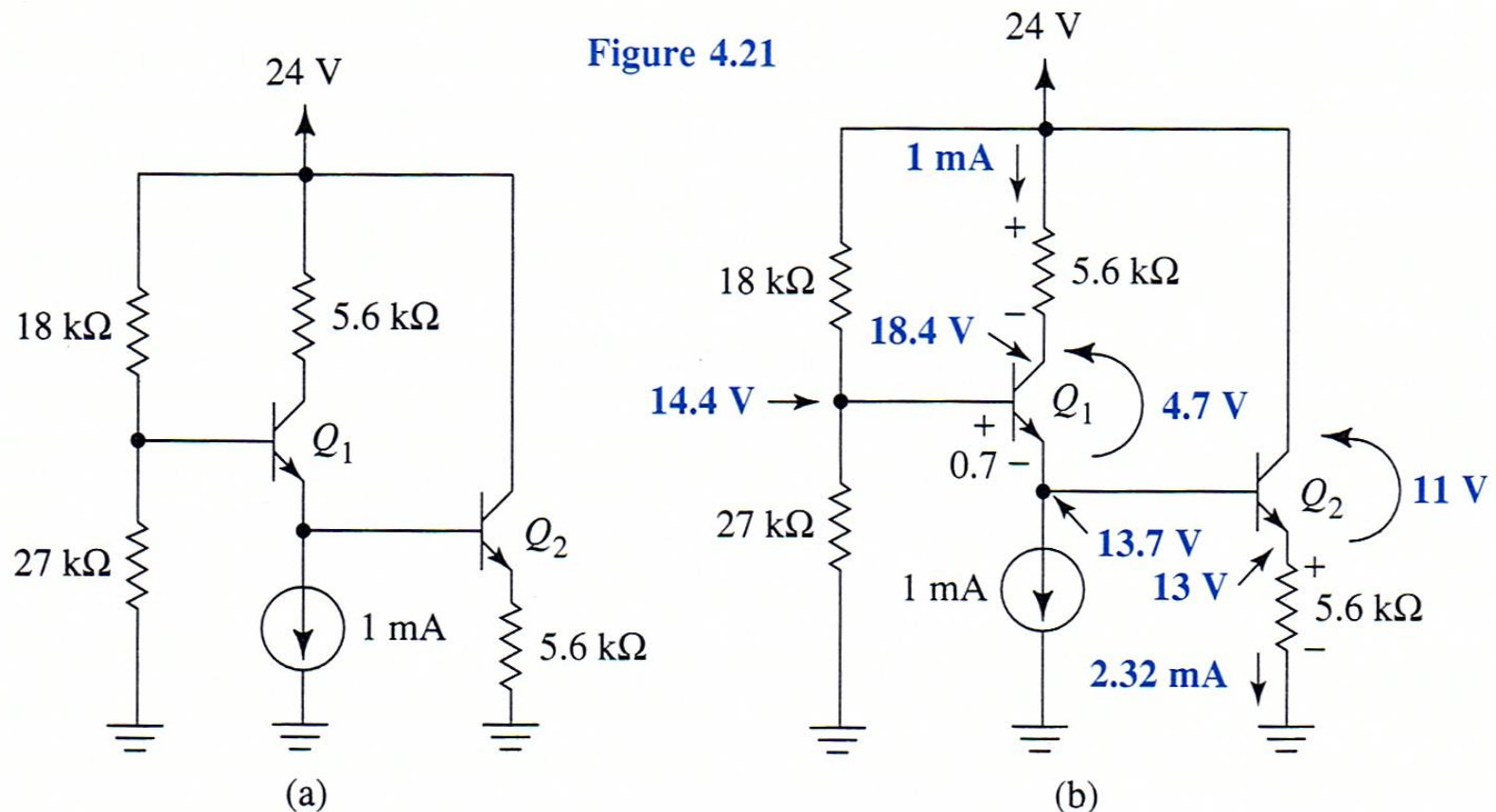
Polarización de transistores

BJT: análisis con aproximación de ($\beta \gg$)



■ Ejemplo:

- Determinar el punto Q de los BJTs del cto. de la figura (Malik, pág. 244)





Polarización de transistores

Índice



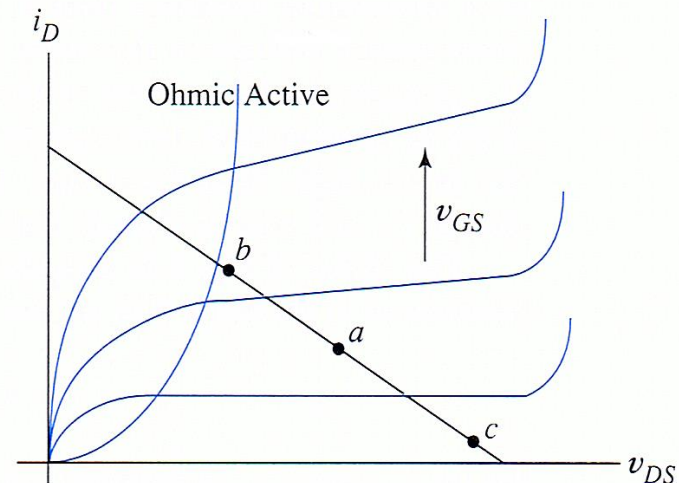
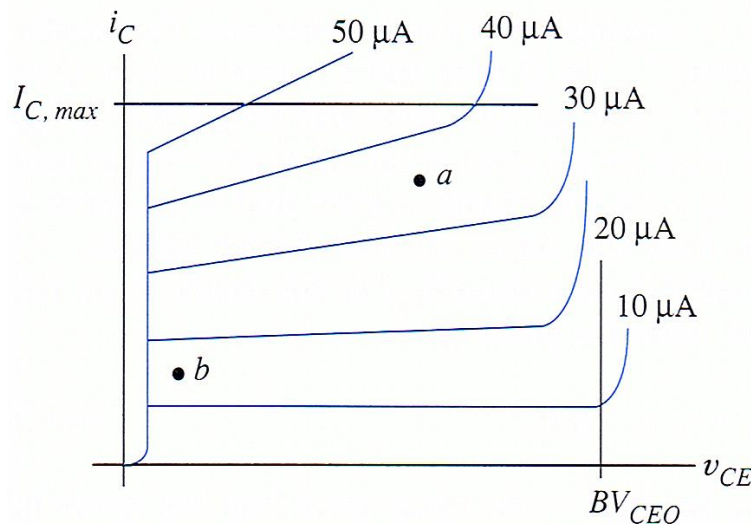
- ❑ Polarización de transistores
 - Introducción
 - Análisis: determinación de la zona de trabajo
 - **Diseño: área de funcionamiento segura de los transistores**
 - Sensibilidad
 - *Definición*
 - *Sensibilidad a varios parámetros*
 - *Ejemplo cálculo de sensibilidad*
 - *Circuito de polarización fija y estabilizada con BJT*
 - *Circuito de polarización fija y estabilizada con FET*
 - Circuitos de polarización
 - *Polarización con fuentes de tensión*
 - *Polarización con fuentes de corriente*



Polarización de Transistores

Criterios de diseño

- ❑ Desde el punto de vista del diseño, la polarización ha de establecer la ubicación idónea del punto de trabajo Q del TRT.
 - El punto Q idóneo es dependiente de la aplicación.
 - **En amplificación:** *en zona activa, con márgenes de tensiones y corrientes definidos por el nivel de la señal, etc.*
 - **En conmutación:** *dos puntos (ON y OFF), importan la velocidad de conmutación entre ellos, las resistencias en ON, corrientes máximas, etc.*
 - Estos criterios serán objeto de estudio en su momento





Polarización de Transistores

Área de funcionamiento segura (SOA)

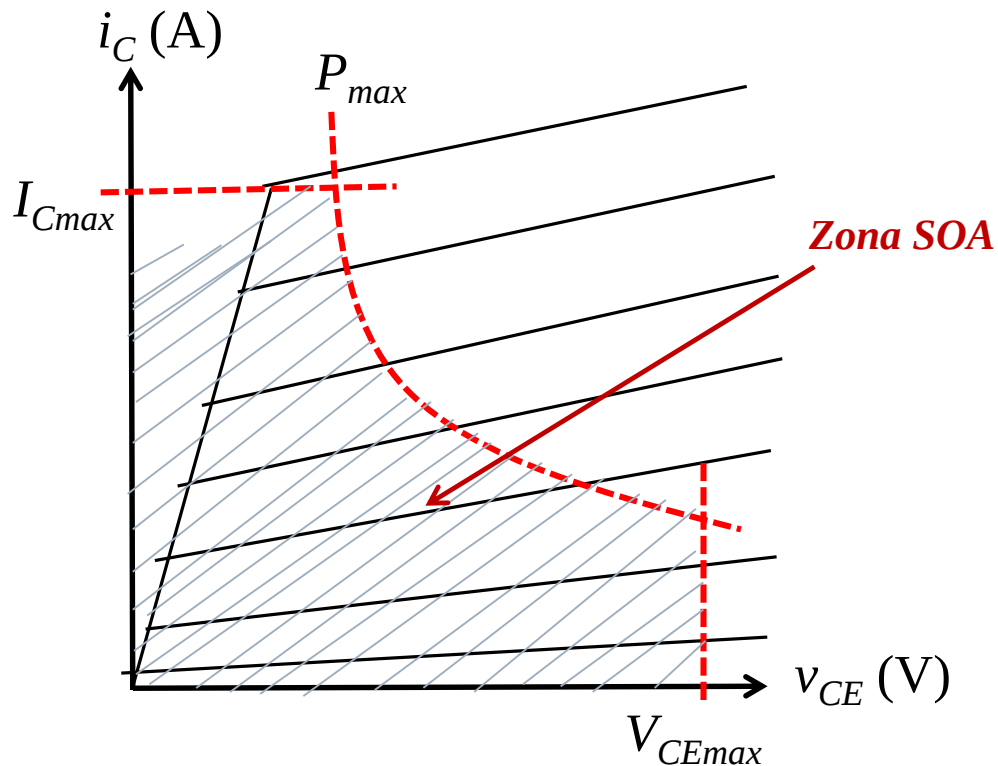
- ❑ Un criterio fundamental es asegurar la **supervivencia** del TRT.
- ❑ El fabricante informa de los límites de funcionamiento de los transistores. Suelen estar marcados por:
 - Potencia máxima de funcionamiento: P_{MAX}
 - Tensión de ruptura:
 - V_{CE-MAX} *para bipolares*, V_{DS-MAX} *para unipolares*
 - Corriente máxima de salida
 - *De colector para bipolares (I_{C-MAX}), de drenador para unipolares (I_{D-MAX})*
- ❑ Sobrepasar los límites establecidos implica un **mal funcionamiento** del dispositivo, incluso su **destrucción**.
 - Estos límites deben ser conocidos y respetados
 - Alguno de ellos (p.e.: la P_{MAX}) depende de las condiciones particulares de la aplicación (tipo y forma de las señales).



Polarización de Transistores

Área de funcionamiento segura: BJT

- ❑ El transistor debe funcionar dentro de la **zona segura** (espacio sombreado): **SOA** (*Safe Operating Area*)
 - La limitación en potencia está dada por la hipérbola P_{max}
 - Otros límites: tensión y corriente máxima, y cuadrante (z. activa)



Potencia del transistor trabajando en activa:

$$P_D = i_C \cdot v_{CE} + i_B \cdot v_{BE} \approx i_C \cdot v_{CE}$$

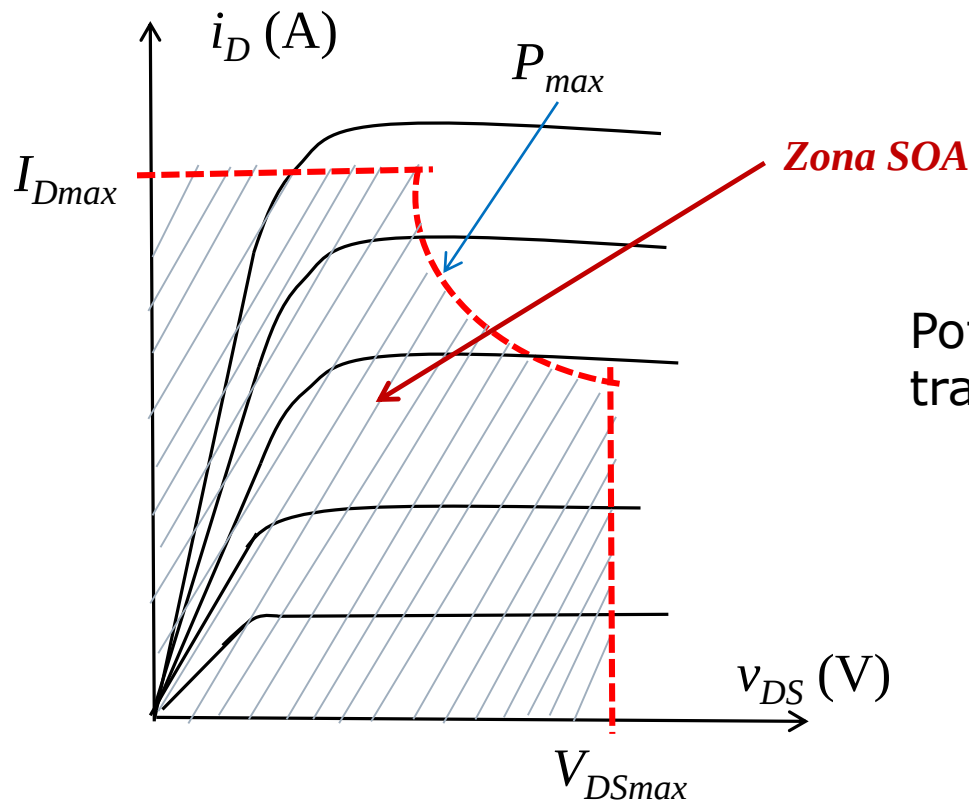


Polarización de Transistores

Área de funcionamiento segura: FET



- ❑ En los transistores unipolares las condiciones límite de la SOA son las mismas que en los bipolares



Potencia máxima del transistor unipolar:

$$P \approx i_D \cdot v_{DS}$$



Polarización de transistores

Índice



❑ Polarización de transistores

- Introducción
- Análisis: determinación de la zona de trabajo
- Diseño: área de funcionamiento segura de los transistores
- **Sensibilidad**
 - ***Definición***
 - ***Sensibilidad a varios parámetros***
 - ***Ejemplo cálculo de sensibilidad***
 - ***Circuito de polarización fija y estabilizada con BJT***
 - ***Circuito de polarización fija y estabilizada con FET***
- Circuitos de polarización
 - *Polarización con fuentes de tensión*
 - *Polarización con fuentes de corriente*



Polarización de transistores

Sensibilidad



- ❑ El punto de trabajo en continua (Q) de un transistor puede variar dependiendo de las condiciones de funcionamiento:
 - Ambientales (temperatura, T), variación de valores de resistencias, tolerancias, etc...
- ❑ Sin embargo es fundamental que Q se mantenga fijo:
 - El comportamiento del transistor, sobre todo en amplificación, depende de Q .
- ❑ El circuito de polarización debe cumplir los siguientes objetivos:
 - Ubicar el punto Q en el lugar adecuado de las curvas del dispositivo (principalmente, en salida).
 - Mantener constante los valores de tensión y corriente deseados, dentro de unas determinadas condiciones de funcionamiento.
 - Tratar de evitar la influencia sobre el punto Q de los cambios en T o en otros parámetros de los elementos y dispositivos del circuito.



Polarización de transistores

Sensibilidad: variaciones en los TRTs



□ Dependencias importantes en los TRTs:

□ Parámetros de los BJT que varían significativamente:

- $\beta \rightarrow$ varía **mucho**: con T , con I_C , e incluso entre dispositivos "iguales"
- $|V_{BE}| \rightarrow$ disminuye con la T del orden de -2 mV/C
- $I_{CO} \rightarrow$ duplica su valor cada 10° C

□ Igualmente, hablando de los FET:

- $I_{DSS} \rightarrow$ disminuye con la T
- $k \rightarrow$ disminuye con la T
- $V_t \rightarrow$ disminuye con la T

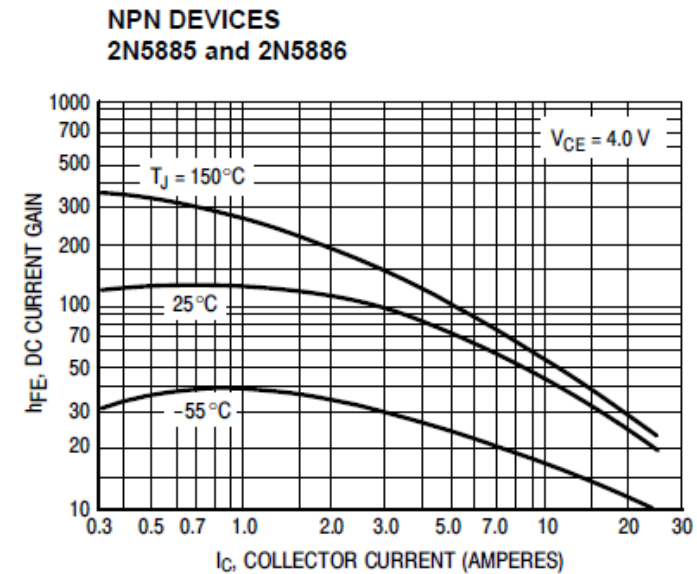


Figure 9. DC Current Gain



Polarización de transistores

Sensibilidad: una valoración objetiva



- ❑ Otras causas de variación:
 - **Tolerancias:** tanto los elementos *activos* (transistores) como los *pasivos* (resistencias, etc.), están sujetos a ciertas *variaciones aleatorias* en sus parámetros durante los procesos de fabricación.
 - **Alimentaciones:** en funcionamiento, pueden variar por diversas razones (pilas en descarga, ruidos, transitorios,...)
 - **Degradaciones:** otras variaciones se deben a las *condiciones ambientales* y el *envejecimiento* de los componentes.
- ❑ Valoración objetiva → evaluación de la **sensibilidad**
 - La función de “*sensibilidad*” es una herramienta de análisis que permite identificar los parámetros críticos de un problema dado y determinar si el resultado es satisfactorio.
 - En nuestro caso, valora cuantitativamente la dependencia del punto Q ante variación de los diferentes parámetros en un circuito dado.



Polarización de transistores

Sensibilidad: formulación



Sensibilidad: la sensibilidad de una función $X=f(P)$ respecto al parámetro P se define:



$$S_P^X = \frac{\frac{dX}{dP}}{\frac{X}{P}} = \frac{P}{X} \cdot \frac{dX}{dP}$$

Haciendo una aproximación incremental para la derivada, se tiene:

$$S_P^X = \frac{\Delta X}{X} \cdot \frac{P}{\Delta P} = \frac{\Delta X / X}{\Delta P / P} \leftarrow \left(\frac{\text{variación relativa de } X}{\text{variación relativa de } P} \right)$$

Nota: Para variaciones relativas mayores del 10% o el 20% se debería trabajar con el valor de la derivada, en lugar de con incrementos.

Interesa que S sea muy bajo para que la función varíe poco al variar sus parámetros → ***se desean sensibilidades de pequeño valor.***

El signo de S denota el *sentido* de la variación, p.e. si la sensibilidad es negativa un incremento en P resulta en una disminución en X .



Polarización de transistores

Sensibilidad



□ Sensibilidad a varios parámetros: $X = X(p_1, p_2, \dots, p_n)$

- Si los parámetros no varían demasiado, el cambio total en ΔX puede determinarse por la regla de la cadena:

$$\Delta X = \frac{\partial X}{\partial p_1} \Delta p_1 + \dots + \frac{\partial X}{\partial p_n} \Delta p_n$$

- Dividiendo por X y multiplicando cada término por (p_i/p_i) , se puede escribir la ecuación en función de las sensibilidades particulares:

$$\frac{\Delta X}{X} = S_{p_1}^X \frac{\Delta p_1}{p_1} + \dots + S_{p_n}^X \frac{\Delta p_n}{p_n} = \sum_{i=1}^n S_{p_i}^X \frac{\Delta p_i}{p_i}$$

Para pequeñas variaciones de los parámetros, la variación relativa de X es igual a la variación relativa de los parámetros individuales, ponderada por la sensibilidad de X al parámetro.

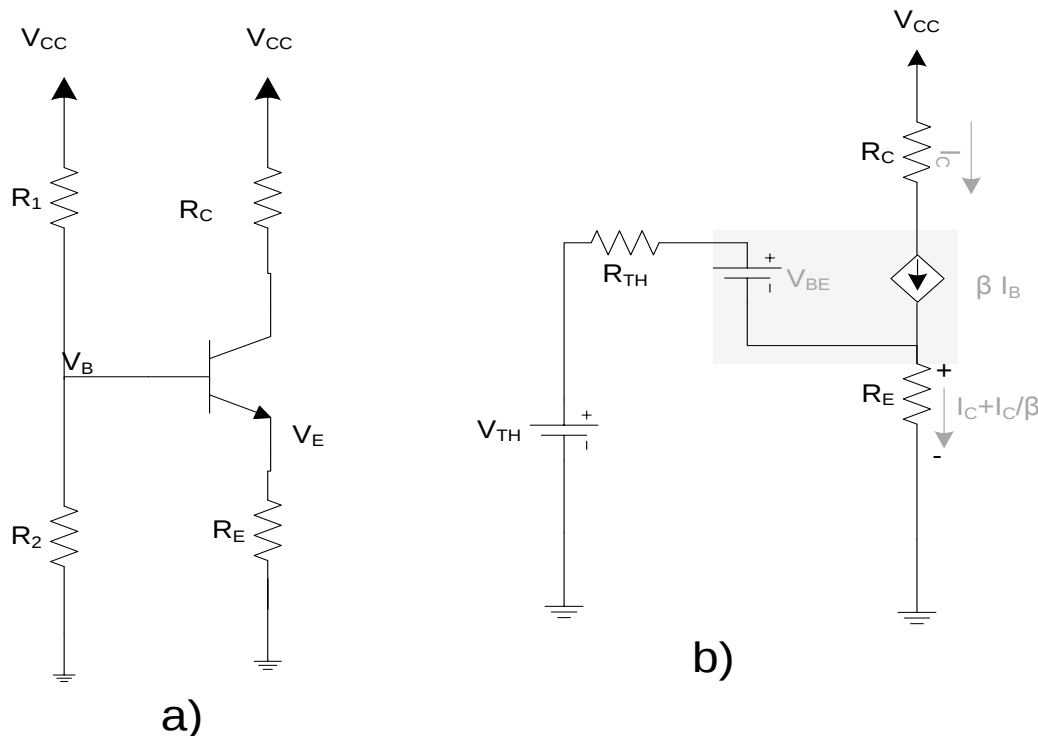


Polarización de transistores

Sensibilidad en un circuito con BJT



- ❑ **Ejemplo de cálculo de sensibilidad:** Dado el circuito de la figura, suponiendo el BJT en activa, obténgase la variación relativa de I_C ($\Delta I_C/I_C$) en función de las variaciones relativas de β ($\Delta\beta/\beta$) y V_{BE} ($\Delta V_{BE}/V_{BE}$). Las variaciones relativas se suelen dar en tanto por ciento.



1. Cálculo de I_C : del análisis del circuito se obtiene:

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

2. Se busca:

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = S_{\beta}^{I_C} \frac{\Delta\beta}{\beta} + S_{V_{BE}}^{I_C} \frac{\Delta V_{BE}}{V_{BE}}$$



Polarización de transistores

Sensibilidad en un circuito con BJT



■ Ejemplo de cálculo de sensibilidad:

3. Los valores de las diferentes sensibilidades son:

■ Sensibilidad de I_C respecto a V_{BE} :

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

$$S_{V_{BE}}^{I_C} = \frac{V_{BE}}{I_C} \cdot \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{V_{BE}}{\beta} \cdot \frac{\frac{V_{BE}}{I_C}}{(V_{TH} - V_{BE})} \cdot \frac{\frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}}}{(R_{TH} + (\beta + 1) \cdot R_E)} = \frac{-V_{BE}}{V_{TH} - V_{BE}}$$

Conclusiones:

- *Interesa que el denominador se reduzca. No podemos poner V_{TH} de valores próximos a $V_{BE} \rightarrow$ la sensibilidad aumenta mucho.*
- *Observe, en todo caso, que a 27°C la variación porcentual de V_{BE} por cada grado C es de sólo: $(\Delta V_{BE}/V_{BE}) \cdot 100 \approx (-2\text{mV}/700\text{mV}) \cdot 100 \approx \mathbf{0,3\%}$*



Polarización de transistores

Sensibilidad en un circuito con BJT



❑ Ejemplo de cálculo de sensibilidad:

3. Los valores de las diferentes sensibilidades son:

■ Sensibilidad de I_C respecto β :

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

$$S_{\beta}^{I_C} = \frac{\beta}{I_C} \cdot \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = \frac{\overbrace{R_{TH} + (\beta + 1) \cdot R_E}^{\frac{\beta}{I_C}}}{(V_{TH} - V_{BE})} \cdot \frac{\overbrace{(V_{TH} - V_{BE})[R_{TH} + (\beta + 1) \cdot R_E - \beta \cdot R_E]}^{\frac{\partial I_C}{\partial \beta}}}{(R_{TH} + (\beta + 1) \cdot R_E)^2} = \frac{[R_{TH} + R_E]}{(R_{TH} + (\beta + 1) \cdot R_E)}$$

Conclusiones:

- ❑ R_E tiene un efecto muy notable en la reducción de la sensibilidad al aparecer multiplicada por $(\beta + 1)$ en el denominador.
- ❑ Si no existiese R_E , la sensibilidad sería 1, lo que es muy perjudicial pues las variaciones porcentuales de β son muy grandes.
- ❑ Desde el punto de vista funcional, R_E es un elemento de **Realimentación** en continua (en configuración S-S) que contribuye a minimizar las variaciones en I_C debidas a las variaciones de la β_F del transistor.



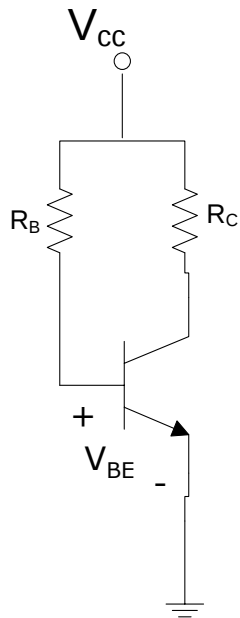
Polarización de transistores

Sensibilidad en un circuito con BJT



❑ Circuitos de polarización fija: BJT

- Se llaman de polarización fija pues V_{BE} no depende de I_C .
- El punto Q tiene una pobre estabilidad: pequeñas variaciones de β o de la temperatura cambian significativamente el punto de trabajo.



$$S_{\beta}^{I_C} = \frac{\beta}{I_C} \cdot \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = 1$$

$$S_{V_{BE}}^{I_C} = \frac{V_{BE}}{I_C} \cdot \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{-V_{BE}}{V_{CC} - V_{BE}}$$

$$T \uparrow \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_{CO} \uparrow \\ \beta \uparrow \\ V_{BEQ} \downarrow \Rightarrow I_{BQ} \uparrow \end{array} \right\} \Rightarrow I_{CQ} \uparrow \Rightarrow V_{CEQ} \downarrow \Rightarrow I_{CQ} \uparrow$$



No se utiliza porque no está compensado.



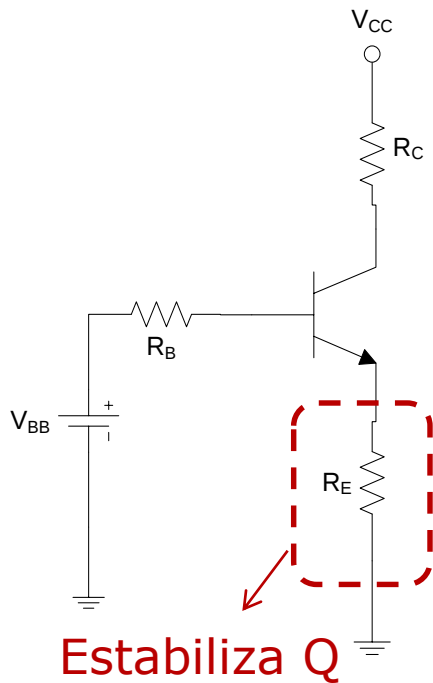
Polarización de transistores

Sensibilidad en un circuito con BJT



■ Circuitos de polarización estabilizada: BJT

- El aumento de la temperatura influye mucho menos en variar la corriente de colector $\rightarrow$ fenómeno de **compensación**.
- Con resistores de un orden similar ($R_B \approx R_E$), si se cumple que: $(\beta+1)R_E \gg R_B \rightarrow$ entonces la I_{CQ} es casi independiente de β (ejercicio para el alumno: supuesto $\beta \approx 100$ demostrar esto).



$$S_{\beta}^{I_C} = \frac{\beta}{I_C} \cdot \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = \frac{[R_B + R_E]}{(R_B + (\beta + 1) \cdot R_E)}$$

$$S_{V_{BE}}^{I_C} = \frac{V_{BE}}{I_C} \cdot \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{-V_{BE}}{V_{BB} - V_{BE}}$$

$$T \uparrow \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} I_{CO} \uparrow \\ \beta \uparrow \end{matrix} \right\} \Rightarrow \textcircled{I_{CQ} \uparrow} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} V_{BEQ} \downarrow \\ V_{RE} \uparrow \uparrow \end{matrix} \right\} \Rightarrow I_{BQ} \downarrow \Rightarrow \textcircled{I_{CQ} \downarrow} \Rightarrow V_{CEQ} \approx cte$$



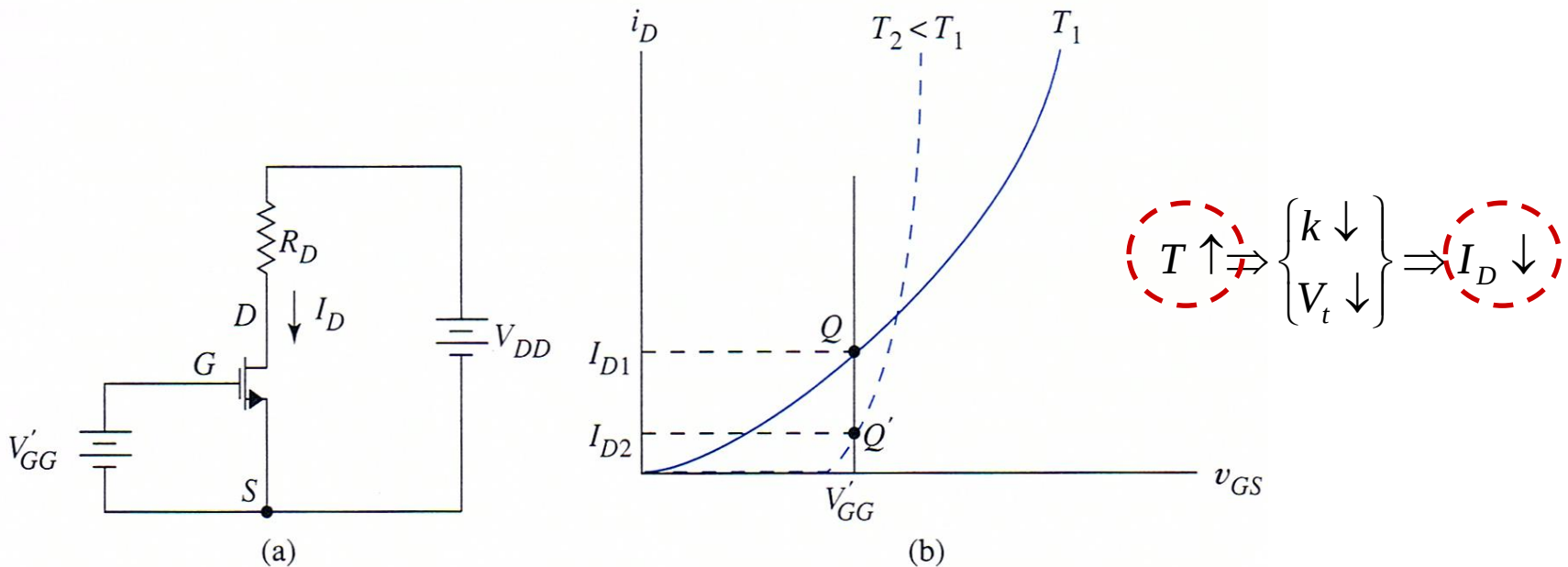
Polarización de transistores

Sensibilidad en un circuito con FET



❑ Circuitos de polarización fija: FET

Suponiendo el MOS en activa (saturación) si variase la T^a se tiene:



Con los cambios de la temperatura se sufren fuertes variaciones de $I_D \Rightarrow$ cambios indeseados en $Q \Rightarrow$ **no es conveniente**.



Polarización de transistores

Índice



- ❑ Polarización de transistores
 - Introducción
 - Análisis: determinación de la zona de trabajo
 - Diseño: área de funcionamiento segura de los transistores
 - Sensibilidad
 - *Definición.*
 - *Sensibilidad a varios parámetros*
 - *Ejemplo cálculo de sensibilidad*
 - *Circuito de polarización fija y estabilizada con BJT*
 - *Circuito de polarización fija y estabilizada con FET*
 - **Circuitos de polarización**
 - ***Polarización con fuentes de tensión***
 - ***Polarización con fuentes de corriente***



Polarización de transistores

Circuitos de polarización: con tensiones.

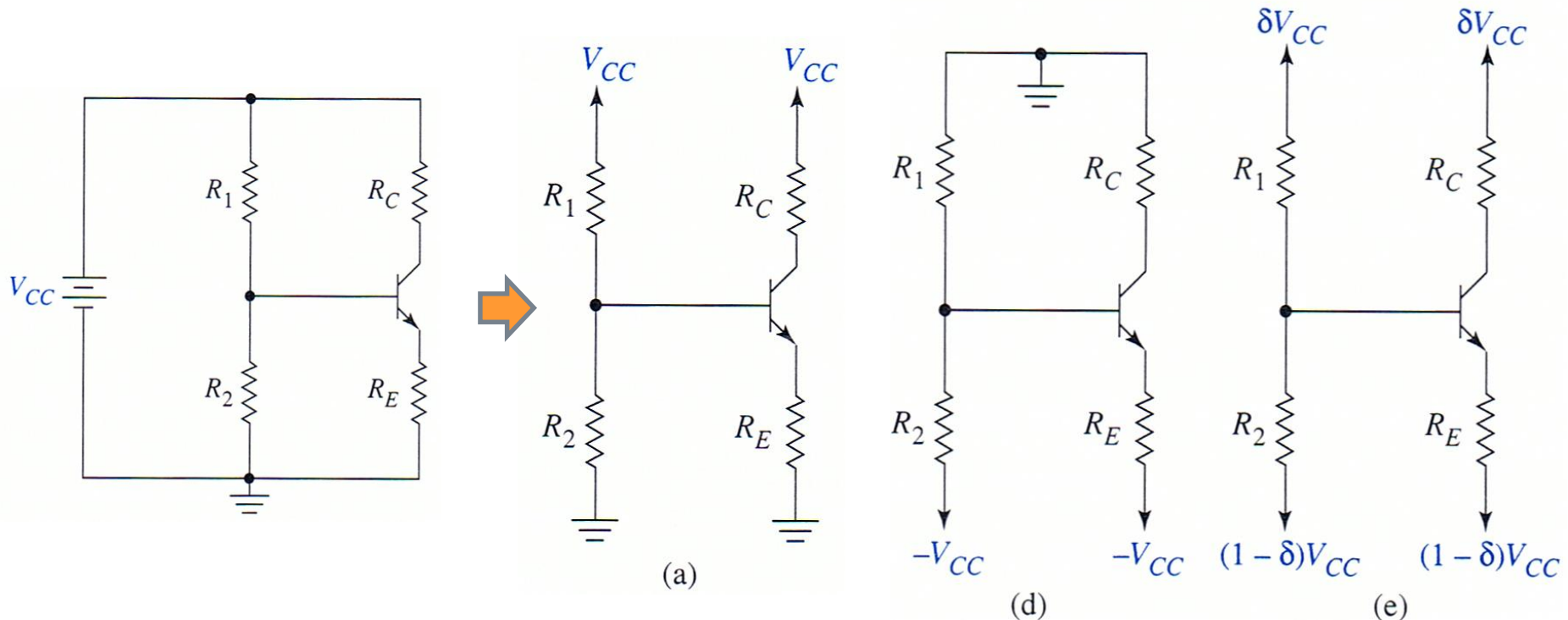


■ Circuitos de polarización prácticos.

■ Fuentes de tensión + resistores:

■ La configuración más usada es **una** sola tensión y **cuatro** resistores

■ Observe la *aparente* diferencia de las tensiones de alimentación:



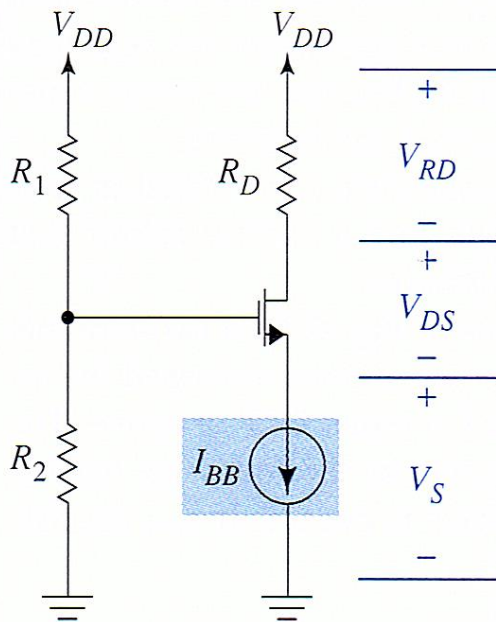


Polarización de transistores

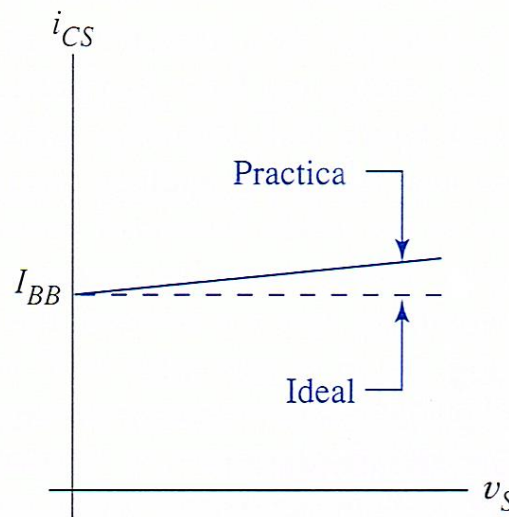
Fuentes de corriente



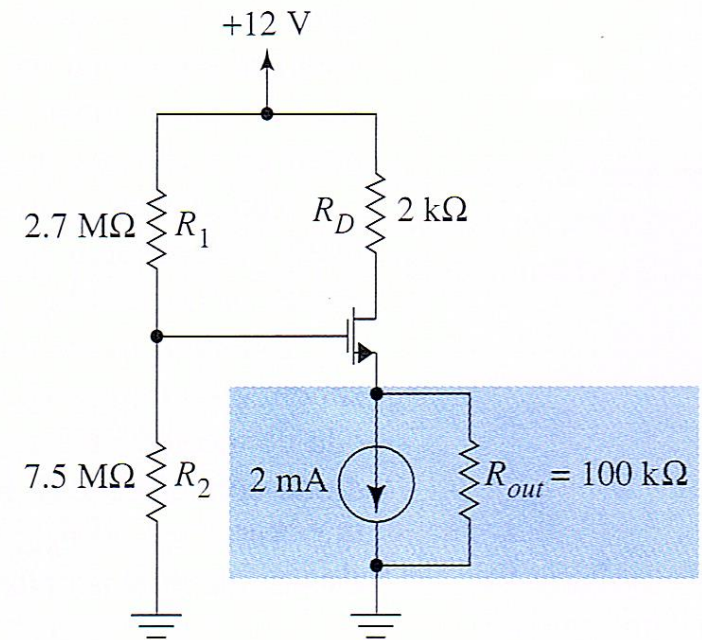
- Una forma de polarización muy frecuente, sobre todo en CI's, es mediante **fuentes de corriente**
 - Inyectan la corriente deseada (definida por el punto de trabajo, Q) directamente al dispositivo a polarizar.
 - **Se construyen**, a su vez, empleando circuitos activos con TRTs



(a)



(b)



(c)



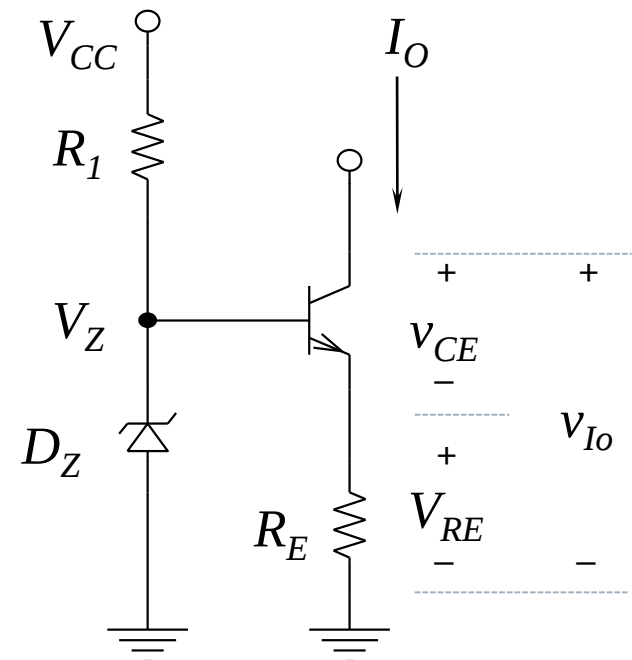
Polarización de transistores

Fuentes de corriente: construcción



- ❑ **Idea básica** para *construir* una fuente de corriente:
 - Un TRT con excitación de **entrada constante**, entrega una **corriente constante** en su salida... mientras esté en **activa** (!)
 - A diferencia de una fuente ideal, la construida (real) tiene dicho límite de funcionamiento: **la zona activa del dispositivo usado.**
- ❑ Caso discreto: TRT polarizado con una entrada constante.
 - Un diodo zener mantiene la tensión de base en $V_B = V_Z$
 - La corriente de salida se ajusta mediante la R_E
 - La fuente deja de funcionar si el BJT se satura, por tanto:

$$V_{I_{O-\min}} = V_{CEsat} + V_{RE} = V_{CEsat} + I_O \cdot R_E$$





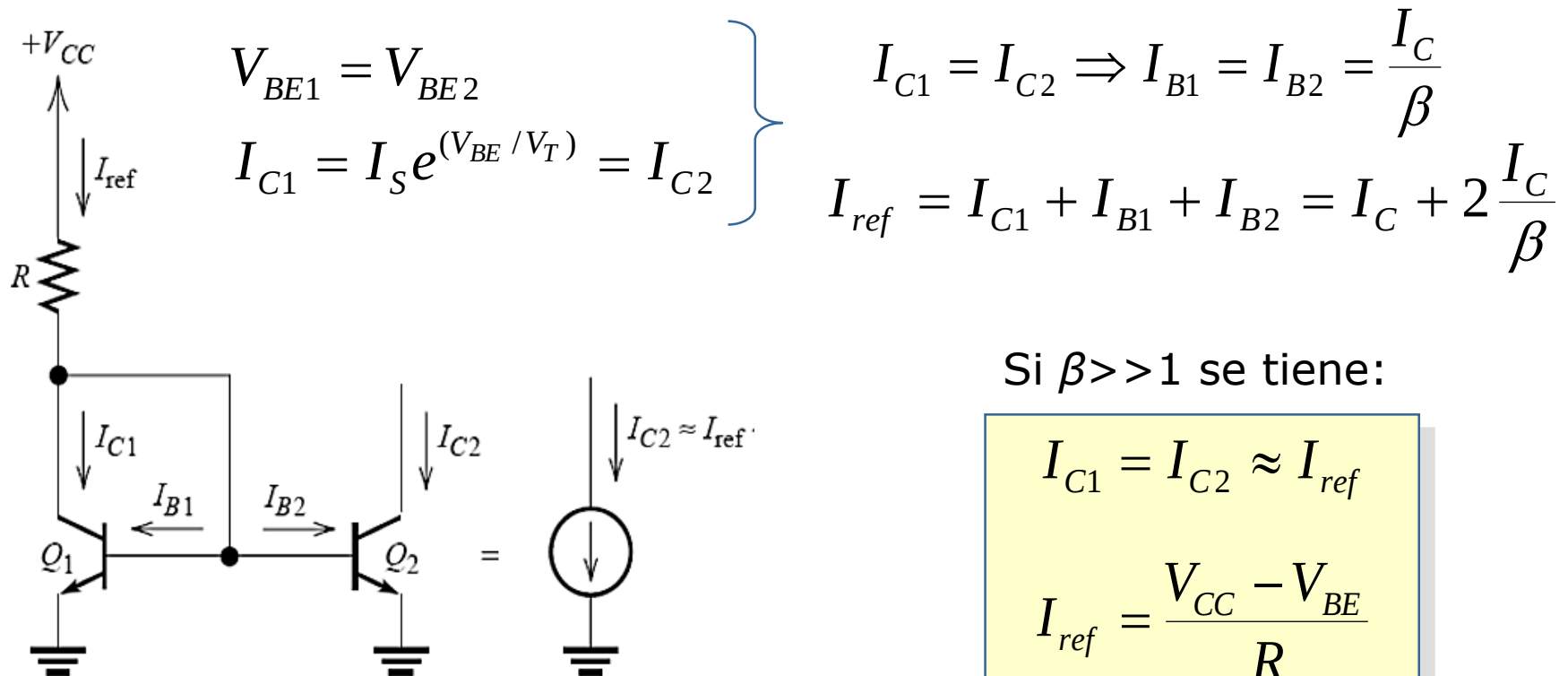
Polarización de transistores

Fuentes de corriente: espejo de corriente



- ❑ El **espejo de corriente** es la configuración preferida en CI's(*)
 - El transistor de salida (Q_2) **copia** la I_C del de referencia (Q_1)

(*) En un CI: Q_1 y Q_2 son **idénticos** y están a la **misma temperatura T**





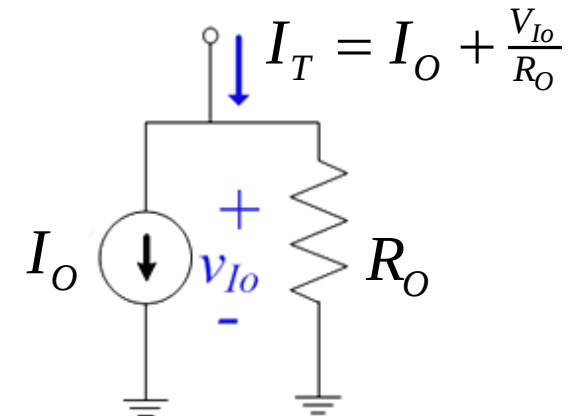
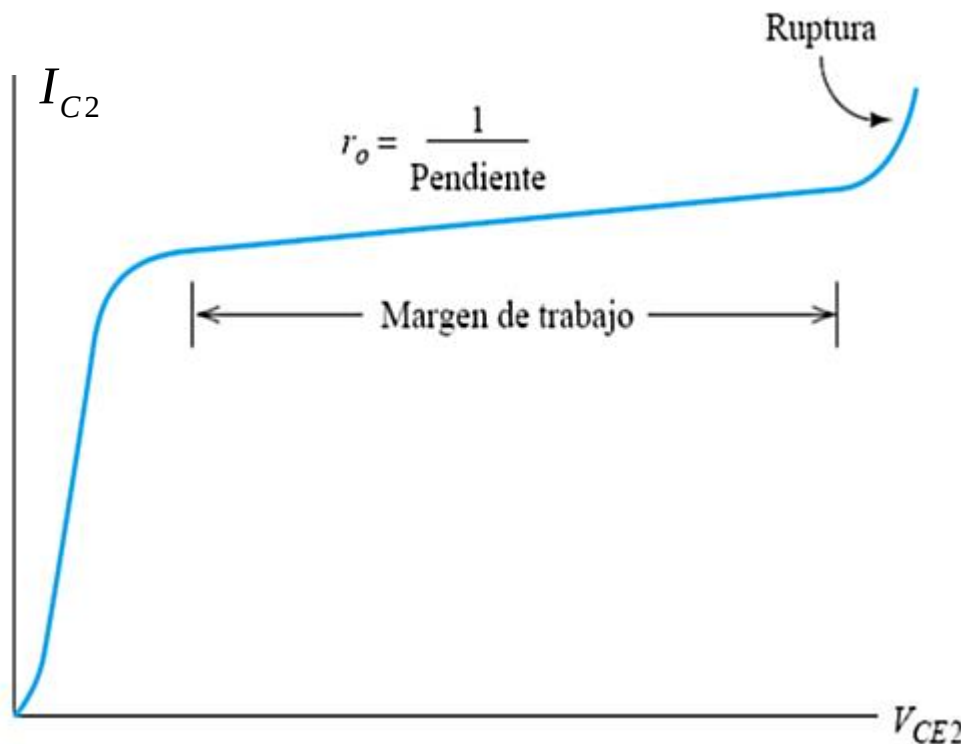
Polarización de transistores

Fuentes de corriente: espejo de corriente



❑ Márgenes de trabajo y modelo real de la fuente (I_O , R_O)

- La salida v_{I_O} de esta fuente es v_{CE2}
- El margen de trabajo de la fuente y su r_o interna vienen dadas por las curvas de Q_2



Tensión mínima de trabajo:

$$v_{I_O} = v_{CE2} \geq V_{CEsat}$$

Resistencia interna de la fuente (entre C y E de Q_2):

$$R_O = r_{CE2} = r_o = \frac{V_A}{I_O}$$



Transistores

Bibliografía



■ Básica:

- Allan R. Hambley. Electrónica, 2º edición. Ed. Prentice Hall 2008 (Capítulos 4 y 5).
- Sedra-Smith. Circuitos Microelectrónicos. Capítulos 4 y 5.
- Norbert R. Malik. CIRCUITOS ELECTRÓNICOS: Análisis, simulación y diseño. Ed. Prentice Hall. 1996 (Capítulos 4 y 5).



Control de revisiones



- 2017-01-26. Versión inicial.