

Tema 7: Polarización.

Contenidos

7.1 Objetivos

7.2 Introducción

7.3 Zona de Seguridad

7.4 Influencia de la temperatura sobre el Punto de Operación

7.5 Circuitos y Técnicas Básicas de Polarización

7.6 Espejos de Corriente

7.7 Espejos de Corriente NMOS

7.8 Fuentes de Baja Sensibilidad a V_{cc}

7.9 Variantes de Espejos de Corriente

7.1 Objetivos

Una vez aprendidos los elementos básicos de la electrónica (transistores y diodos)

El objetivo de este tema es aprender a analizar y diseñar estructuras para polarizar a los dispositivos electrónicos en el punto de operación deseado

Aprenderemos a diseñar:

- **Circuitos de polarización diseñados con resistencias**
- **Fuentes de intensidad (circuitos muy usados para polarizar)**

7.2 Introducción

Definición

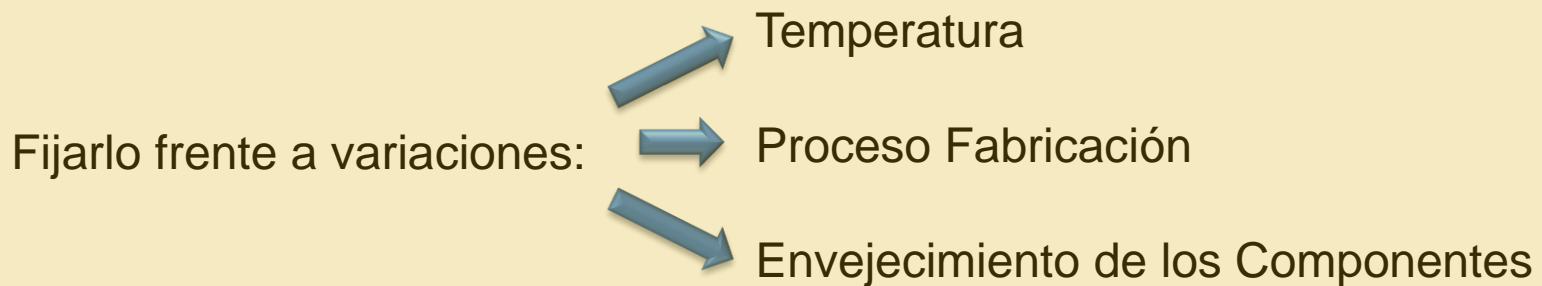
Punto de Operación:

Conjunto de valores de Intensidades y tensiones que caracterizan el funcionamiento de un dispositivo:

I_C , I_B , I_E , V_{BE} , V_{CE} (transistor bipolar)

I_{DS} , V_{DS} , V_{GS} (transistor FET, MOS)

Nuestro objetivo es aprender a establecer un punto de operación



7.2 Introducción

Limitaciones del Punto de Operación:

- Puede encontrarse en distintas zonas de operación (ecuaciones diferentes)
- Limitaciones físicas del Transistor: **Zona de Seguridad**

Una vez elegido hay que mantenerlo, para lo que se utilizan técnicas de **Estabilización** y **Compensación** (evitar que varíen sus valores)

Nos centraremos en este tema en las técnicas de Estabilización

7.3 Zona de Seguridad

Potencia Consumida por un dispositivo:

$$P = \sum_i I_i \cdot V_i$$

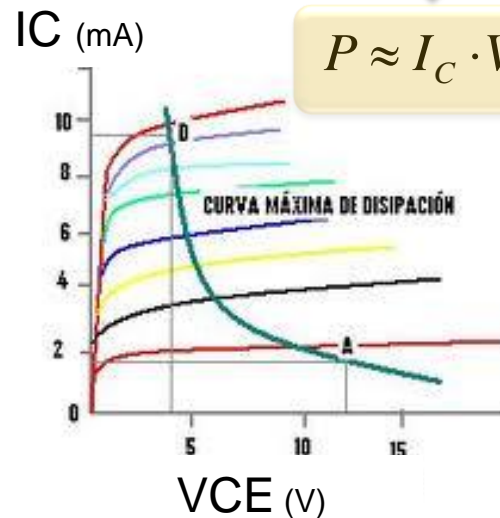
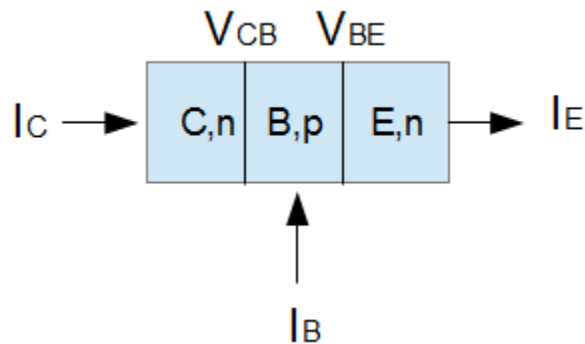
Esta potencia se transforma en calor que puede **destruir** al dispositivo:

Para un transistor NPN: $P = I_C \cdot V_{CB} + I_C \cdot V_{BE} + I_B \cdot V_{BE} = I_C \cdot V_{CE} + I_B \cdot V_{BE}$

en Zona Activa:

↓

$$P \approx I_C \cdot V_{CE} \quad (\text{Parábola})$$

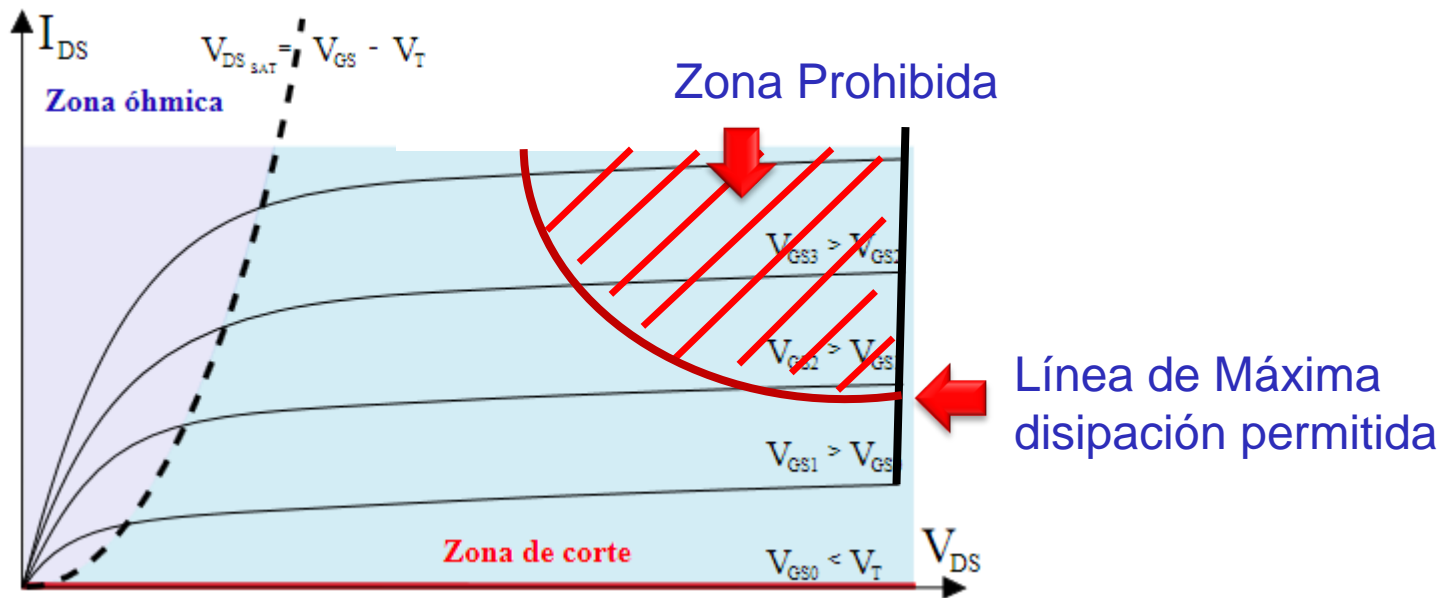


7.3 Zona de Seguridad

Para un transistor NMOS:



$$P = I_G \cdot V_{GS} + I_D \cdot V_{DS} = I_D \cdot V_{DS} \quad (\text{Parábola})$$

independientemente de la zona en la que opere



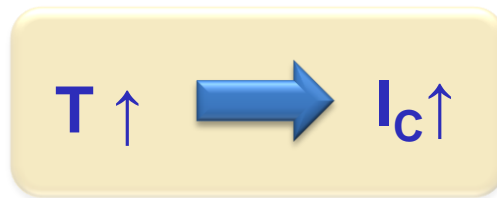
7.4 Influencia de la temperatura sobre el Punto de Operación

T afecta a todas las características de los dispositivos electrónicos pero especialmente a:

Transistores Bipolares:	{	$I_{CO} \quad I_{CO} = I_{CO1} e^{K(T-T_1)}$	$K = 0.075 \text{ } ^\circ K^{-1} \text{ (Ge),}$ $K = 0.13 \text{ } ^\circ K^{-1} \text{ (Si)}$
		$V_{BE} \quad \frac{dV_{BE}}{dT} = -2.5 \frac{mV}{^\circ K}$	
		$\beta \quad \beta = \beta_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{XTB} \quad XTB \approx 1.7$	
Diodos:		$V_D \quad \frac{dV_{BE}}{dT} = -2.5 \frac{mV}{^\circ K}$	
Transistores FET:	{	$\mu \quad \mu = \mu_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{3/2}$	
		$V_T \quad V_T = V_{T_0} - a \cdot (T - T_0) \quad a \in [0.5, 5] \frac{mV}{^\circ K}$	

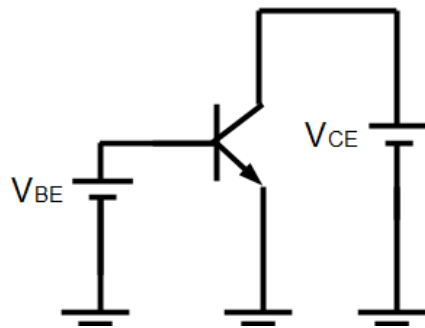
7.4 Influencia de la temperatura sobre el Punto de Operación

Teniendo en cuenta en qué sentido afecta un cambio de temperatura a los parámetros de los dispositivos:



7.5 Circuitos y Técnicas Básicas de Polarización

Un transistor bipolar o FET lo podríamos polarizar con 2 fuentes de tensión de los valores concretos que deseamos:

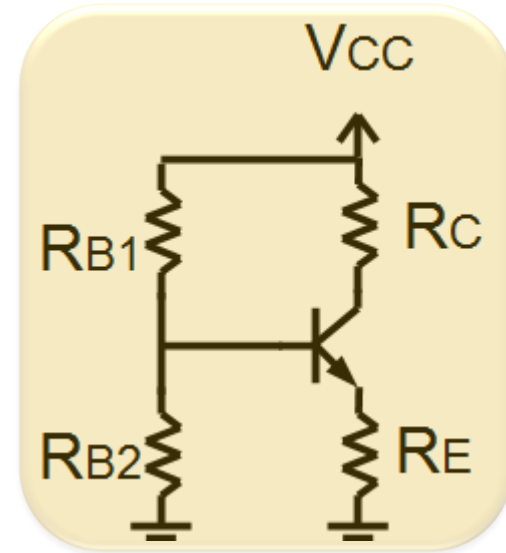
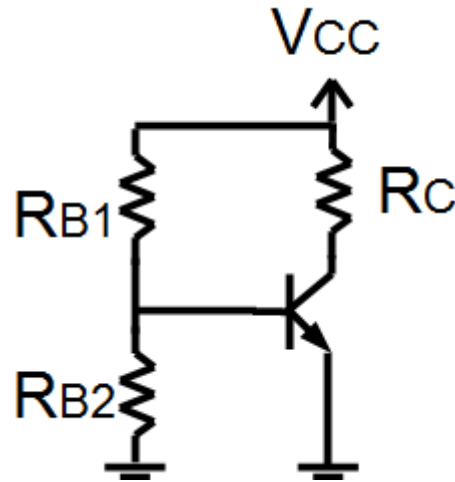
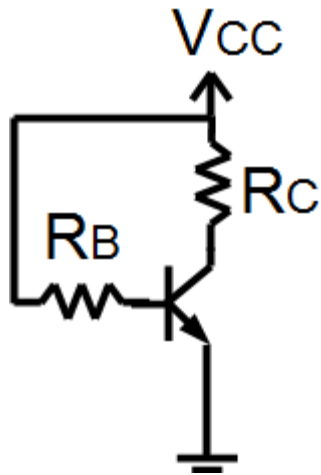


Sin embargo, esto **NO es práctico** por los siguientes motivos:

- Casi nunca disponemos de fuentes de tensión del valor adecuado (y no digamos de más de una)
- Las curvas características nos dan una idea de la forma I-V pero debido a T, procesos de fabricación y envejecimiento existen variaciones

Podemos usar **resistencias** para evitar estos problemas

7.5.2 Configuraciones Básicas con Resistencias



Circuito de Autopolarización

Consideraciones a tener en cuenta:

- Cuántos elementos utiliza
- Cómo de bien estabiliza el punto de Operación



Factores de Estabilidad

7.5.3 Factores de Estabilidad

Definición

Sensibilidad de y
con respecto a su variable x :

$$S_x^y \equiv \frac{\partial y}{\partial x}$$

Sensibilidad Incremental o Factor de Estabilidad de y
con respecto a su variable x :

$$E_x^y \equiv \frac{x}{y} \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln x}$$

Para qué las utilizamos:

$$I_C = I_C(I_{C0}, V_{BE}, \beta)$$

$$\Delta I_C \approx \frac{\partial I_C}{\partial I_{C0}} \Delta I_{C0} + \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \Delta V_{BE} + \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \Delta \beta$$

$$\Delta I_C \approx S_{I_{C0}}^{I_C} \cdot \Delta I_{C0} + S_{V_{BE}}^{I_C} \cdot \Delta V_{BE} + S_{\beta}^{I_C} \cdot \Delta \beta$$

¿Qué mide cada una?

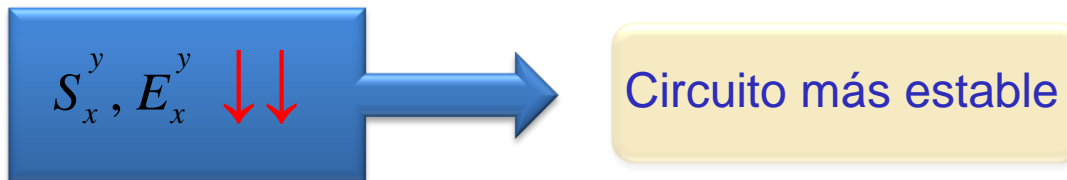
7.5.3 Factores de Estabilidad

Para qué las utilizamos:

$$I_C = I_C(I_{C0}, V_{BE}, \beta)$$

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} \approx \frac{I_{C0}}{I_C} \frac{\partial I_C}{\partial I_{C0}} \frac{\Delta I_{C0}}{I_{C0}} + \frac{V_{BE}}{I_C} \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \frac{\Delta V_{BE}}{V_{BE}} + \frac{\beta}{I_C} \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \frac{\Delta \beta}{\beta}$$

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} \approx E_{I_{C0}}^{I_C} \frac{\Delta I_{C0}}{I_{C0}} + E_{V_{BE}}^{I_C} \cdot \frac{\Delta V_{BE}}{V_{BE}} + E_{\beta}^{I_C} \cdot \frac{\Delta \beta}{\beta}$$



Las sensibilidades y factores de estabilidad más importantes son los asociados a β (mayores valores)

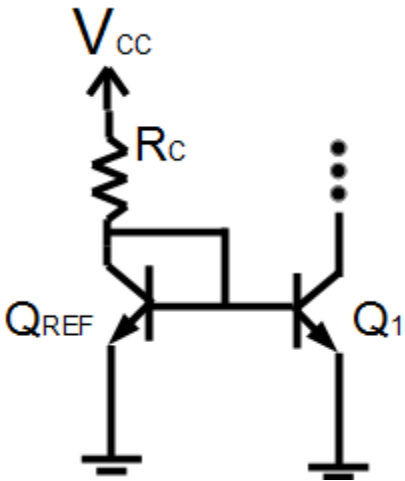
Ahora tenemos un criterio para saber que circuito es mejor

7.6 Espejos de Corriente. Circuito Widlar

- En circuitos integrados hay que reducir el nº de resistencias (ocupan mucha área)
- El tamaño de un transistor es bastante menor que el de una resistencia



Usemos transistores para polarizar a otros transistores
Creando un circuito que podemos usar como una
fuente de intensidad



- El circuito formado por V_{CC} , R_C y Q_{REF} polariza al transistor Q_1
- Condiciones necesarias: Q_1 y Q_{REF} deben ser del **mismo tipo** y **operar en Z. Activa Lineal**

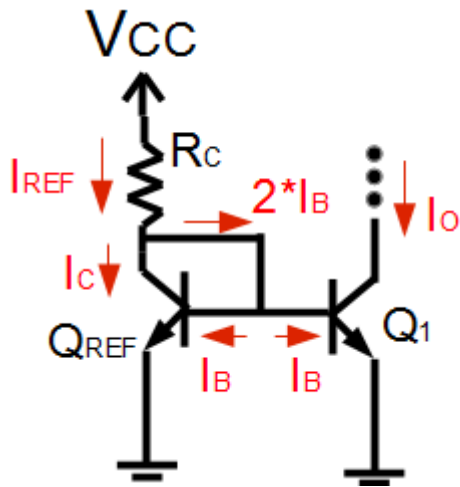
(por lo tanto, lo que se conecte a Q_1 debe hacer que se cumpla esta condición)

- Como $V_{BE,REF} = V_{BE1}$ y los dos en Z. Activa $\rightarrow I_{C,REF} \sim I_{C1}$

7.6 Espejos de Corriente. Circuito Widlar

Análisis del Circuito

•El circuito funciona como una fuente de intensidad de valor I_o



•Como $V_{BE1} = V_{BE2}$ y los dos en Z. Activa $\rightarrow I_{B1} \sim I_{B2} = I_B$

$$\left. \begin{aligned} I_{REF} &= I_C + 2 \cdot I_B \\ I_B &= \frac{I_O}{\beta} \\ I_C &\approx I_O \end{aligned} \right\} \frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{\beta}{\beta + 2}$$

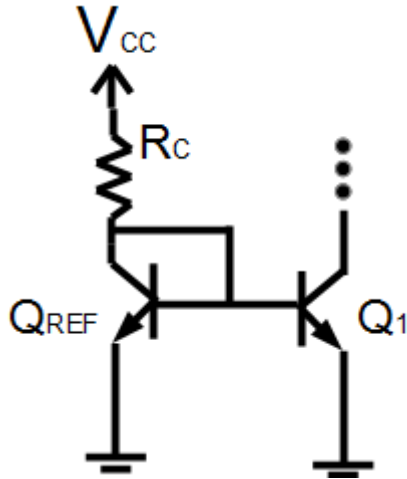
$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C}$$



$$I_O = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C} \cdot \frac{\beta}{\beta + 2}$$

7.6 Espejos de Corriente. Circuito Widlar

Factores de Estabilidad



$$E_{\beta}^{I_O} = \frac{1}{1 + \beta} \quad \Downarrow\Downarrow$$

$$E_{R_C}^{I_O} = 1$$

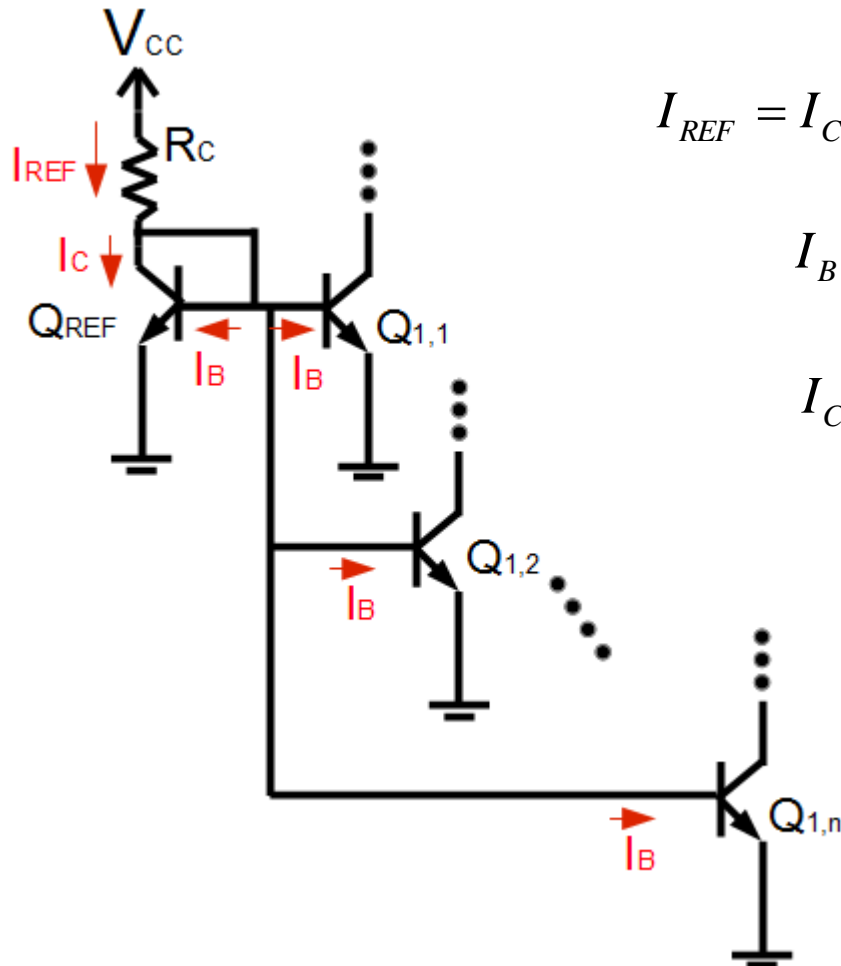
$$E_{V_{CC}}^{I_O} = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{BE}} (\approx 1)$$

$$E_{V_{BE}}^{I_O} = \frac{-V_{BE}}{V_{CC} - V_{BE}} (\ll 1)$$



$$I_O = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C} \cdot \frac{\beta}{\beta + 2}$$

7.6.2 Circuito Widlar de Múltiples salidas



$$I_{REF} = I_C + (n+1) \cdot I_B$$

$$I_B = \frac{I_O}{\beta}$$

$$I_C \approx I_O$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{\beta}{\beta + n + 1}$$

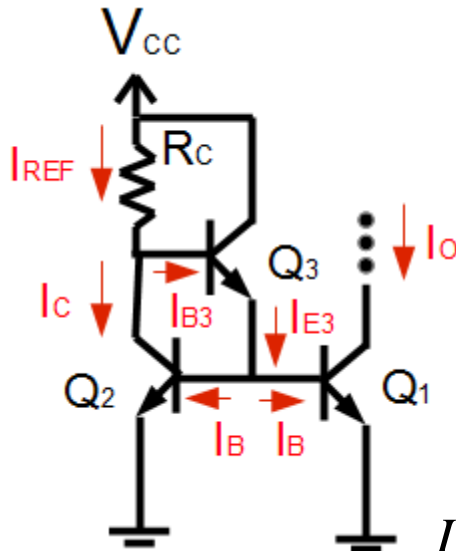
Problema:
Si β no es grande
 I_O e I_{REF} empiezan a diferenciarse

7.6.2 Circuito Widlar Modificado

- En situaciones en las que β no es muy grande

Condiciones de funcionamiento:

- Transistores idénticos
- Zona Activa



$$I_{B3} = \frac{I_{C3}}{\beta} = \frac{I_{E3}}{\beta(1 + \frac{1}{\beta})} = \frac{2I_B}{\beta + 1} = \frac{2I_O}{\beta(\beta + 1)}$$

$$I_{REF} = I_C + I_{B3}$$

$$I_{E3} = 2 \cdot I_B$$

$$I_C \approx I_O$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{\beta^2 + \beta}{\beta^2 + \beta + 2}$$

siendo I_{REF}

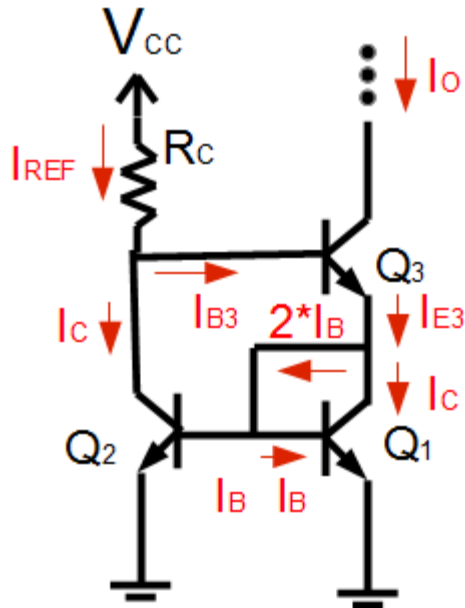
$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - 2 \cdot V_{BE}}{R_C}$$

Si conectamos n transistores:

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{\beta^2 + \beta}{\beta^2 + \beta + n + 1}$$

7.6.3 Circuito Wilson

- Otra alternativa para situaciones en las que β no es muy grande



Condiciones de funcionamiento:

- Transistores idénticos
- Zona Activa

$$I_{REF} = I_C + I_{B3}$$

$$I_{B3} = \frac{I_O}{\beta}$$

$$2I_B + I_C = I_{E3} = \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right) I_O$$

$$\left(\frac{2}{\beta} + 1 \right) I_C = \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right) I_O$$

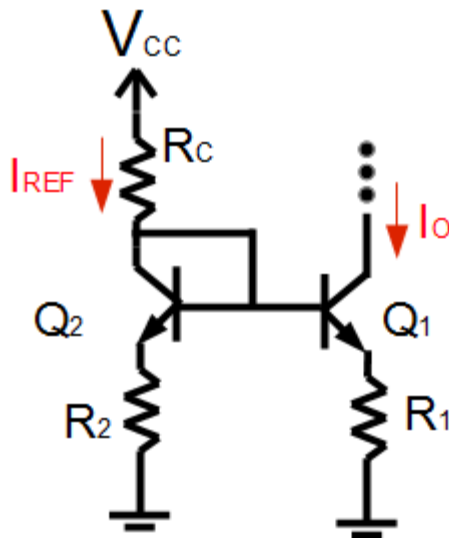
$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{\beta^2 + 2\beta}{\beta^2 + 2\beta + 2}$$

siendo I_{REF}

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - 2 \cdot V_{BE}}{R_C}$$

7.6.4 Espejo para relaciones distintas a 1

- Otra alternativa para situaciones en las que I_O/I_{REF} distinto a 1



Condiciones de funcionamiento:

- Transistores idénticos
- Zona Activa

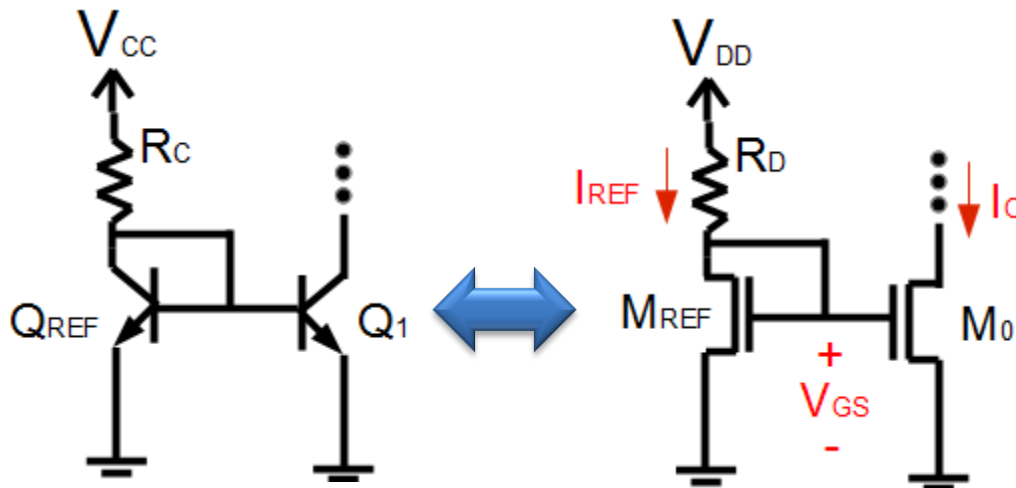
- Si en este circuito $\beta \uparrow \uparrow$, hacemos un análisis de $\beta = \infty$ ($I_B = 0$)
- Además $V_{BE1} \sim V_{BE2}$ (diferencias de miliVolts)

$$V_{BE2} + I_{REF} \cdot R_2 = V_{BE1} + I_O \cdot R_1$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{R_2}{R_1}$$

7.7 Espejos de corriente NMOS. Espejo Widlar NMOS

- Cada espejo de corriente realizado con transistores NPN admite una versión con transistores NMOS



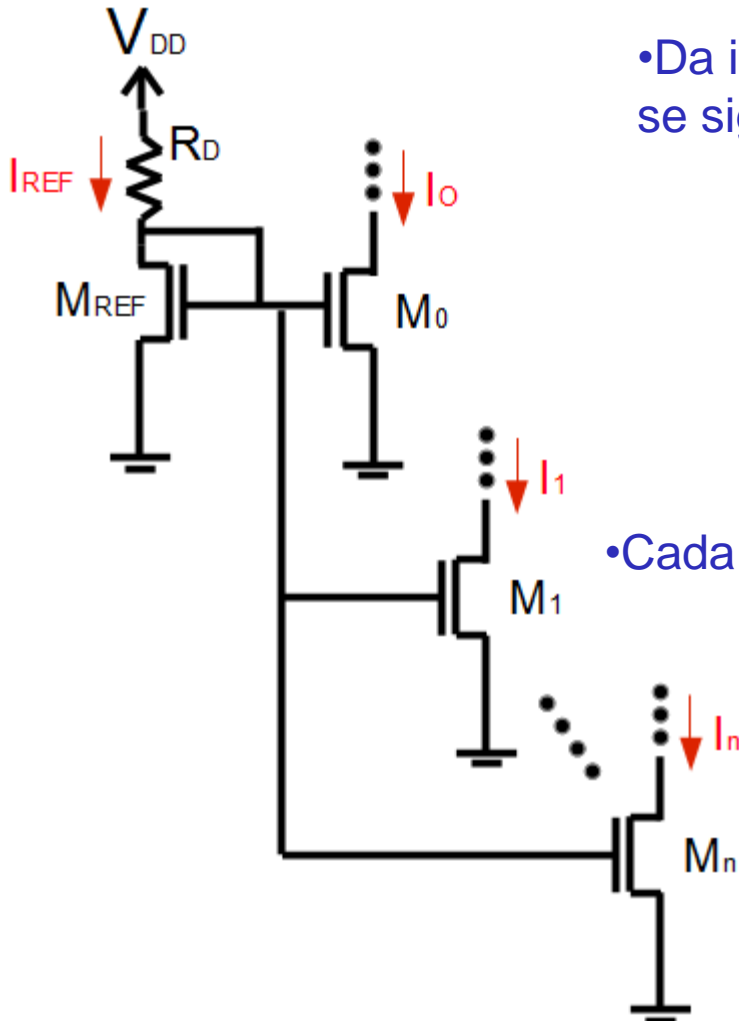
Condiciones de funcionamiento:

- Zona SATURACIÓN
- Iguales V_{T0}

$$\left. \begin{aligned} I_{REF} &= \frac{\beta_{REF}}{2} (V_{GS} - V_{T0})^2 \\ I_O &= \frac{\beta_0}{2} (V_{GS} - V_{T0})^2 \end{aligned} \right\} \frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{\beta_0}{\beta_{REF}}$$

Podemos tener el valor que queramos ajustando las betas de cada trans.

7.7.2 Espejo NMOS de múltiples salidas



• Da igual cuantos transistores conectemos, como $I_G=0$ se sigue cumpliendo la misma ecuación:

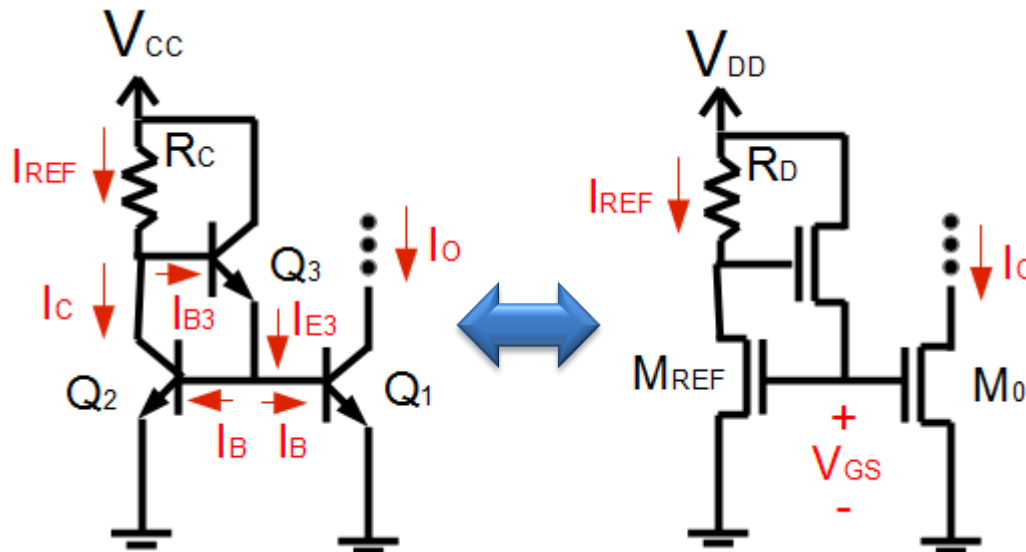
$$\frac{I_i}{I_{REF}} = \frac{\beta_i}{\beta_{REF}}$$

• Cada transistor puede tener una intensidad diferente

Condiciones de funcionamiento:

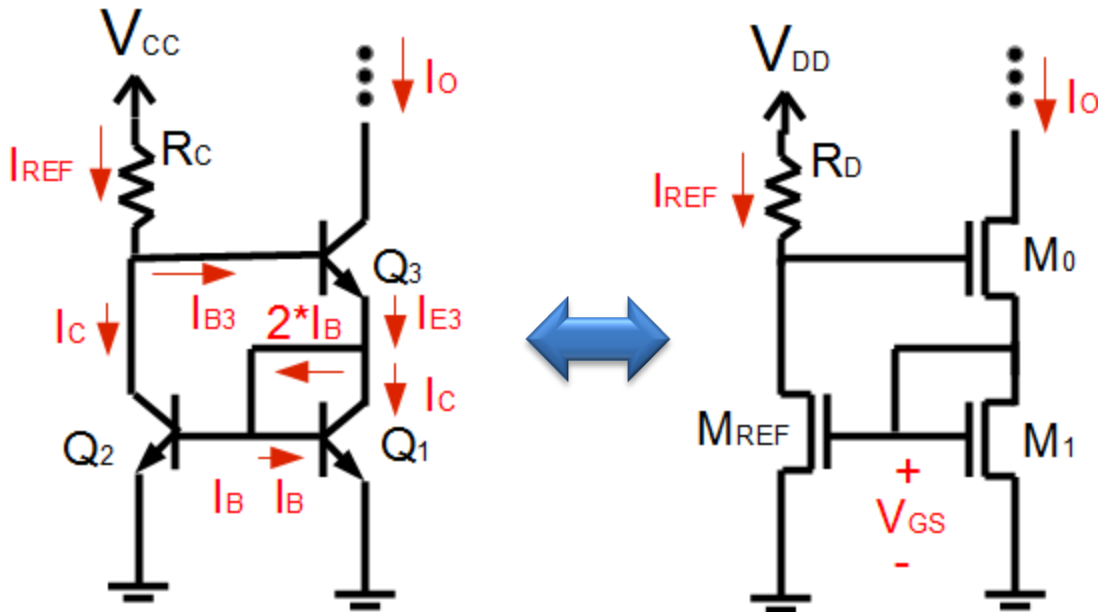
- Zona SATURACIÓN
- Iguales V_{T0}

7.7.3 Espejo NMOS Widlar Modificado



- Podemos construir la versión NMOS de un Espejo Widlar Modificado
- Sin embargo, en este caso no tiene sentido ($I_G = 0$)

7.7.4 Espejo NMOS Wilson



• Si las β son iguales las cond. de funcionamiento son:

• M1 conduce y M0 SAT :

Ya que de ahí se deriva:

• M1 SAT

• MREF SAT

$$V_{DS,REF} = V_{GS,0} + V_{GS,1} = 2 \cdot V_{GS,0}$$

$$V_{GS,REF} = V_{GS,0}$$

$$V_{DS,REF} > V_{GS,REF} - V_{T0}$$

← MREF SAT

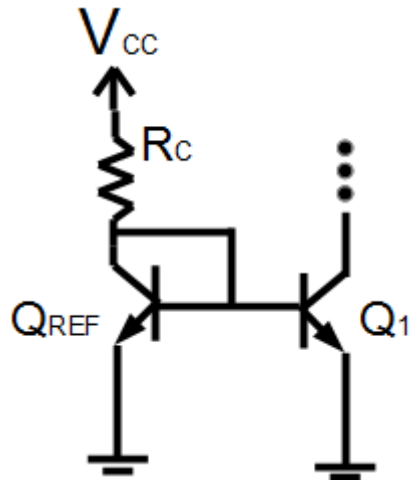
• Desde el punto de vista de un espejo de corriente tampoco aporta ventajas

• Sin embargo, como se podrá deducir en los siguientes temas,

Ro de este espejo es mucho mayor → Mucho mejor fuente de intensidad

7.8 Fuentes con baja sensibilidad a V_{CC}

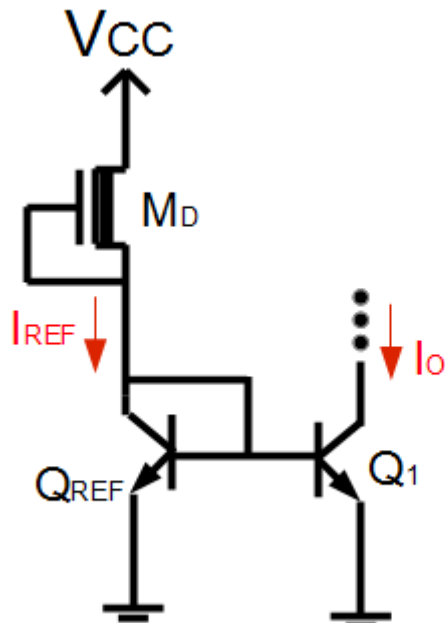
- Un gran inconveniente que presentan las fuentes de intensidad NPN que hemos estudiado es una elevada sensibilidad-estabilidad a V_{CC} . (valores aproximadamente = 1)
- Esto hace que estos circuitos no sean convenientes en dispositivos portátiles donde la tensión de alimentación (batería) suele variar bastante.



$$E_{V_{CC}}^{I_o} = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{BE}} (\approx 1)$$

7.8 Fuentes con baja sensibilidad a V_{CC} . Fuente con transistores NMOS de deplexión

- Para evitar este inconveniente sustituimos la resistencia de un espejo Widlar por un transistor NMOS de deplexión



$$I_O = I_{REF} \cdot \frac{\beta}{\beta + 2}$$

$$I_{REF} = \frac{\beta_D}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS})$$

$$V_{DS} = V_{CC} - V_{BE}$$

$$I_O = \frac{\beta_D}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \cdot (1 + \lambda \cdot (V_{CC} - V_{BE})) \cdot \frac{\beta}{\beta + 2}$$

$$E_{V_{CC}}^{I_O} = \frac{V_{CC}}{I_O} \frac{\partial I_O}{\partial V_{CC}} = \frac{\lambda \cdot V_{CC}}{1 + \lambda(V_{CC} - V_{BE})} = \frac{V_{CC}}{V_A + V_{CC} - V_{BE}}$$

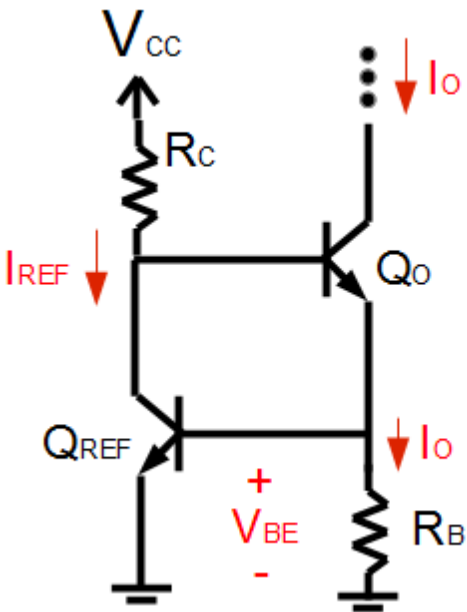
$$V_A \uparrow \uparrow$$

$$E_{V_{CC}}^{I_O} \ll 1$$

7.8.2 Fuente con referencia a V_{BE}

•Podemos tomar tensiones de referencia para generar I_O distintas a V_{CC}

•En el siguiente circuito tomamos como referencia V_{BE} , ya que, haciendo análisis de $\beta \rightarrow \infty$ tenemos que: \Rightarrow ① $I_O = \frac{V_{BE}}{R_B}$



•Además tenemos las siguientes 2 ecuaciones:

②
$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - 2 \cdot V_{BE}}{R_C}$$

③
$$V_{BE} \approx V_{Te} \ln \left(\frac{I_{REF}}{\alpha_F I_{ES}} \right)$$
 ← Ecuación de Ebers-Moll

Introduciendo 2 en 3 y el resultado en 1:

$$I_O = \frac{V_{Te}}{R_B} \ln \left(\frac{V_{CC} - 2 \cdot V_{BE}}{\alpha_F I_{ES} R_C} \right)$$

Ya podemos calcular el factor de estabilidad:

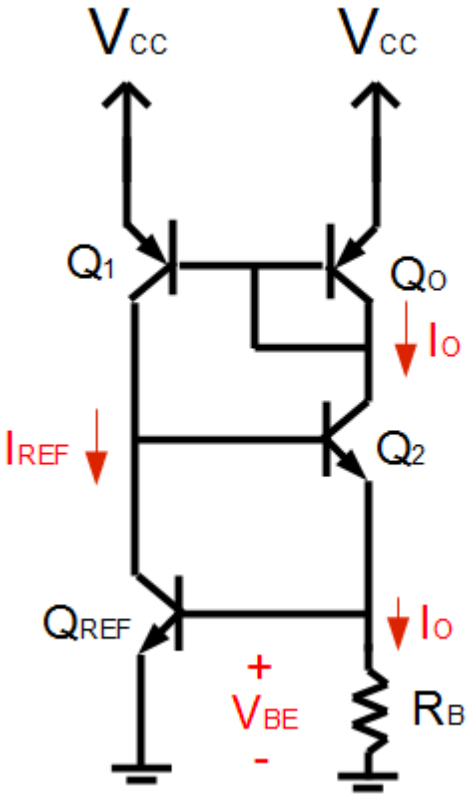
$$E_{V_{CC}}^{I_O} = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{BE}} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{V_{CC} - 2 \cdot V_{BE}}{\alpha_F I_{ES} R_C} \right)}$$

$\alpha_F \cdot I_{ES} \downarrow \downarrow$

$$E_{V_{CC}}^{I_O} \downarrow \downarrow$$

7.8.3 Fuente Bootstrap

• Es una mejor opción que el circuito anterior aunque más complejo



• En el siguiente circuito también tomamos como referencia V_{BE} , ya que, haciendo análisis de $\beta \rightarrow \infty$ tenemos que:

➔ **1** $I_O = \frac{V_{BE}}{R_B}$

• Además como Q_0 y Q_1 forman un espejo de corriente:

2 $I_{REF} \approx I_O$

3 $V_{BE} \approx V_{Te} \ln\left(\frac{I_{REF}}{\alpha_F I_{ES}}\right)$ ←

Ecuación de Ebers-Moll

$$I_O = \frac{V_{Te}}{R_B} \ln\left(\frac{I_O}{\alpha_F I_{ES}}\right)$$

Introduciendo 2 en 3 y el resultado en 1:

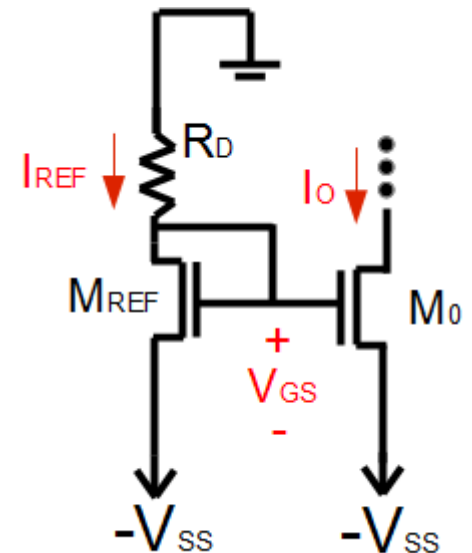
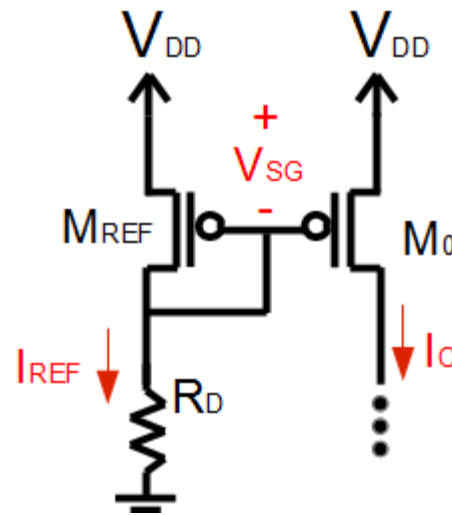
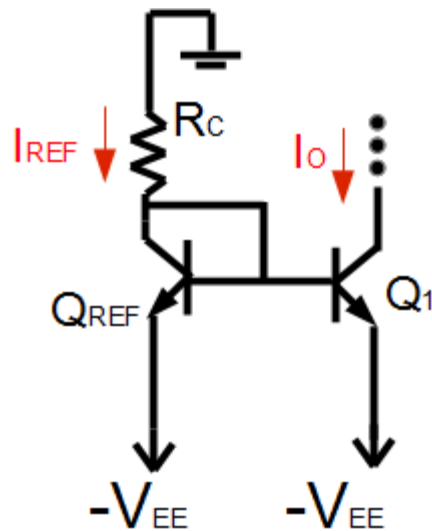
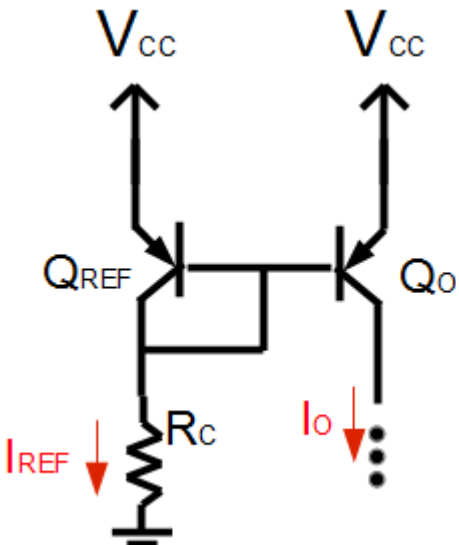
Como I_O no depende de V_{CC} ➔

$$E_{V_{CC}}^{I_O} = 0$$

7.9 Variantes de Espejos de Corriente

Podemos construir los mismos tipos de espejos de corriente pero variando:

- Tipo de Transistores
- Colocación de las Fuentes de Alimentación



7.9.2 Espejos Paralelos

Podemos construir fuentes de tensión para polarizar distintos tipos de transistores simultáneamente

