

# 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

7.9 Variantes de

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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)**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 7.2 Introducción

## Definición

### Punto de Operación:

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

IC, IB, IE, VBE, VCE (transistor bipolar)

IDS, VDS, VGS (transistor FET, MOS)

Nuestro objetivo es aprender a establecer un punto de operación

Fijarlo frente a variaciones:



Temperatura

Proceso Fabricación

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 7.3 Zona de Seguridad

Potencia Consumida por un dispositivo:

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

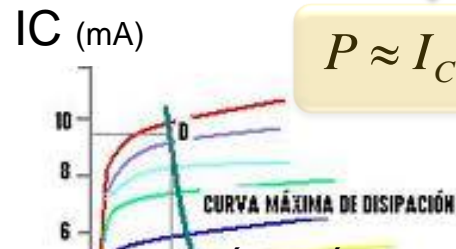
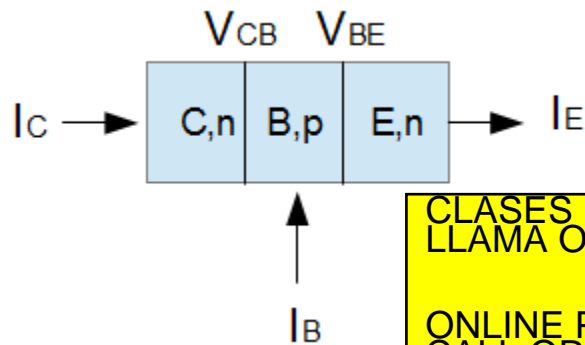
Esta potencia se transforma en calor que puede **destruir** al dispositivo:

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:

↓

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



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

VCE (V)

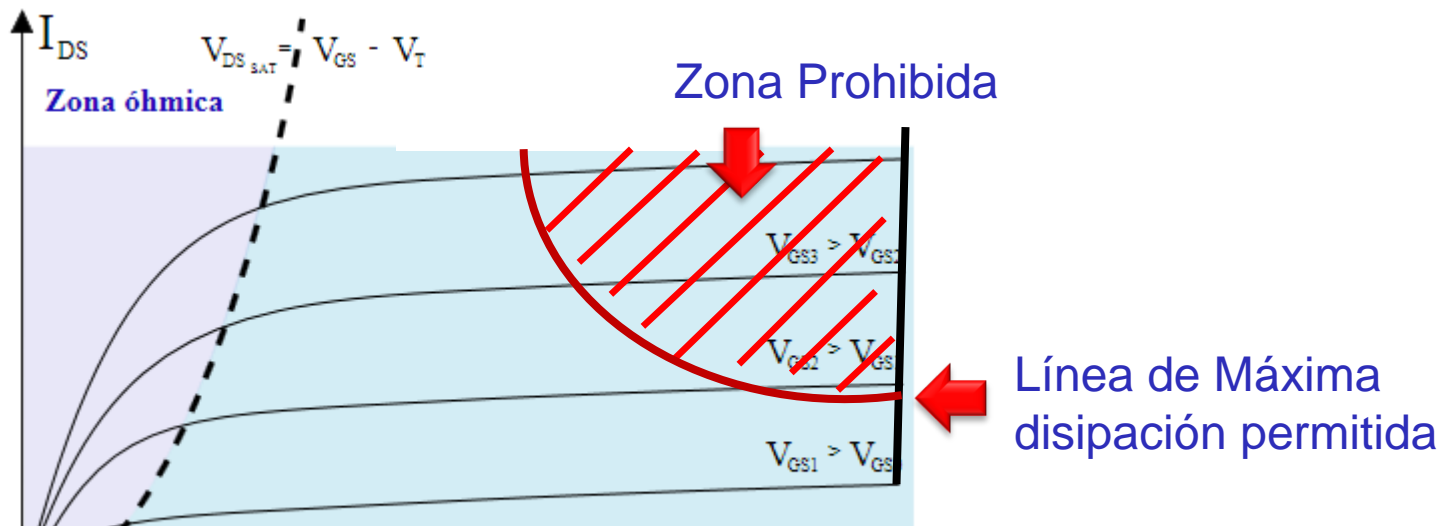
# 7.3 Zona de Seguridad

Para un transistor NMOS:

$$P = I_G \cdot V_{GS} + I_D \cdot V_{DS} = I_D \cdot V_{DS}$$

(Parábola)

independientemente de la zona en la que opere



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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:

$$\left( T_0 \right)^{3/2}$$

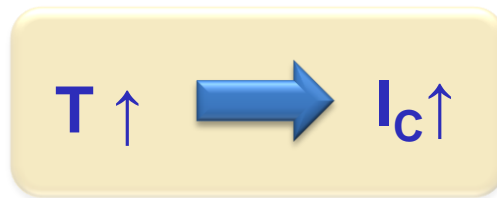
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 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:



Depende del punto de operación

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

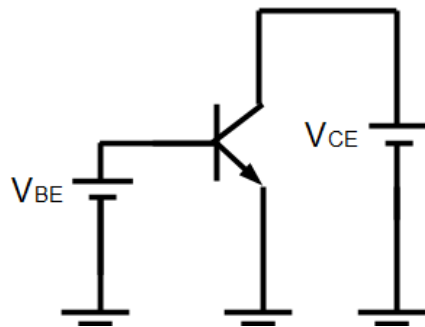
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# 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

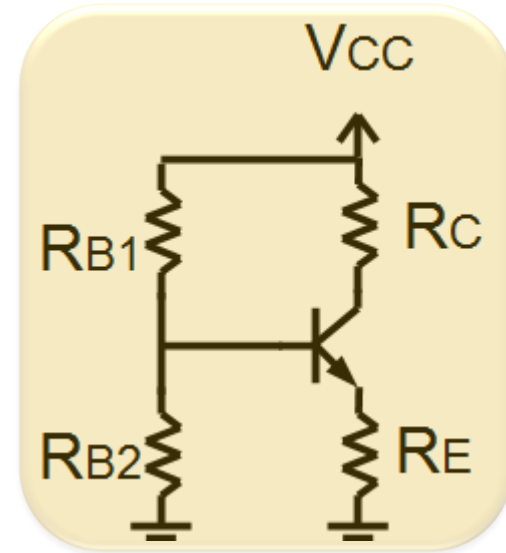
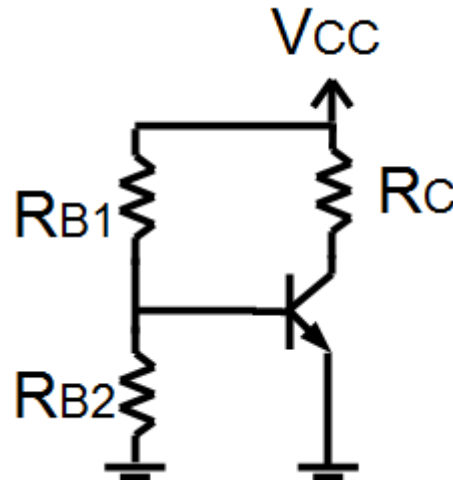
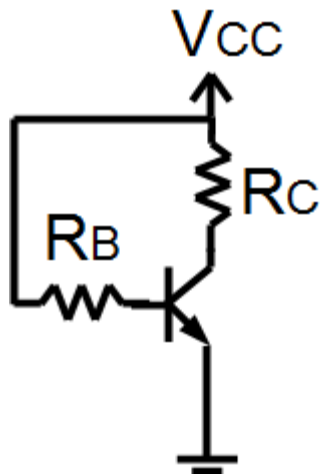
Podemos usar re

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 7.5.2 Configuraciones Básicas con Resistencias



Circuito de Autopolarización

Consideraciones a tener en cuenta:

- Cuántos elementos utiliza
- Cómo de bien funciona
- De Operación

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

## 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:

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

¿Qué mide cada una?

Para qué las utilizamos:

$$I_C = I_C(I_{C0}, V_{BE}, \beta)$$
$$\Delta I_C \approx \frac{\partial I_C}{\partial I_{C0}} \Delta I_{C0} + \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \Delta V_{BE} + \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \Delta \beta$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

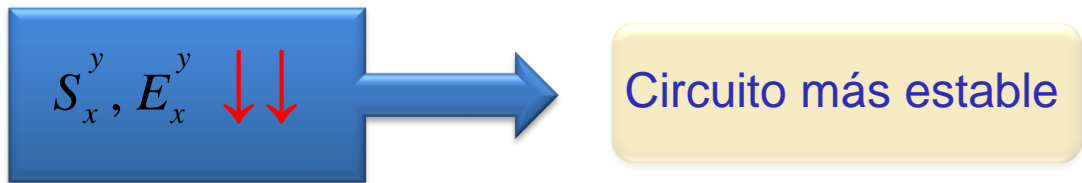
# 7.5.3 Factores de Estabilidad

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

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

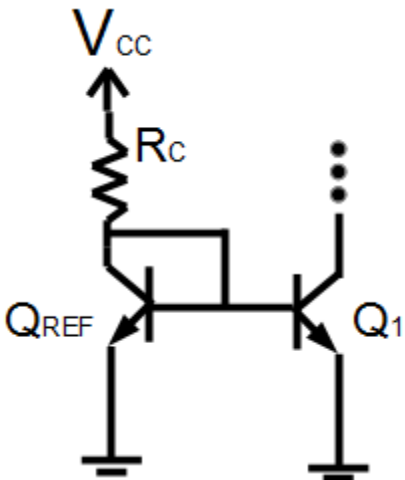
Ahora tenemos un

# 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  
hacer que

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

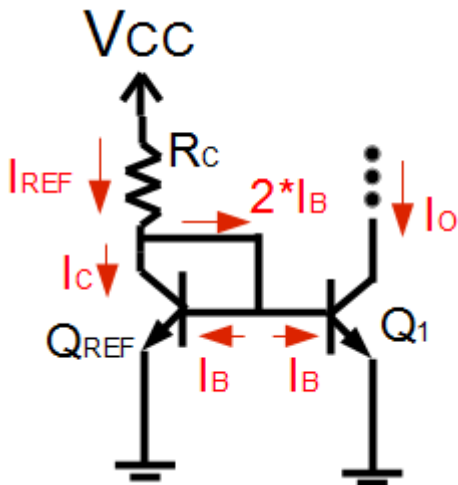
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

- 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  $\rightarrow I_{B1} \sim I_{B2} = I_B$

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

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

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

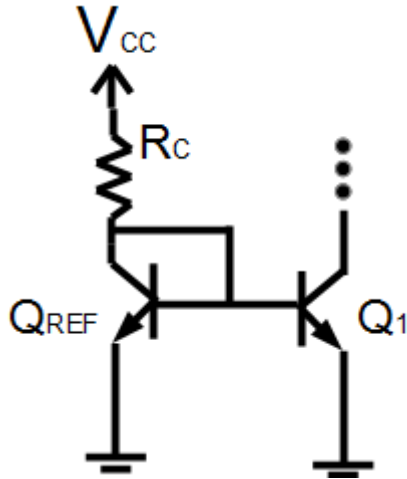
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# 7.6 Espejos de Corriente. Circuito Widlar

## Factores de Estabilidad



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

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

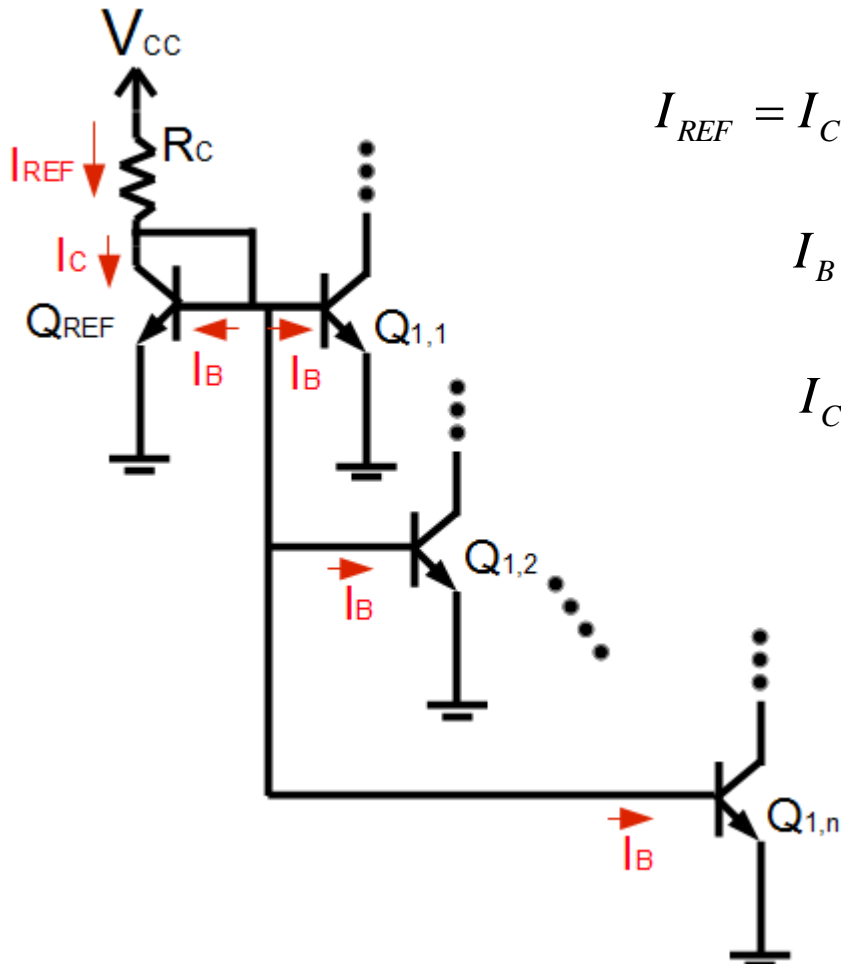
$$E_{V_{CC}}^{I_o} = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{BE}} (\approx 1)$$

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



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

## 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  $\beta$  no es grande  
 $I_O$  e  $I_{REF}$  empiezan a diferenciarse

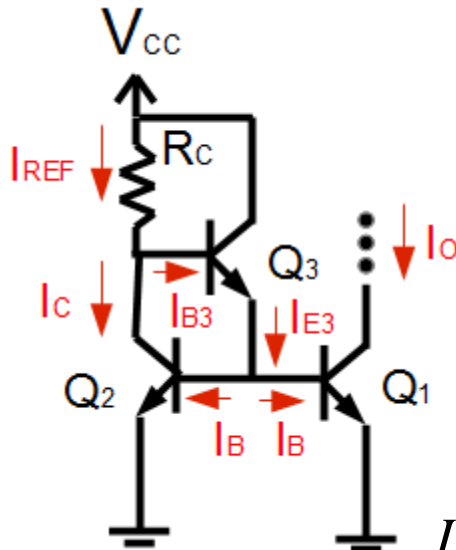


## 7.6.2 Circuito Widlar Modificado

- En situaciones en las que  $\beta$  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  $I_{REF}$

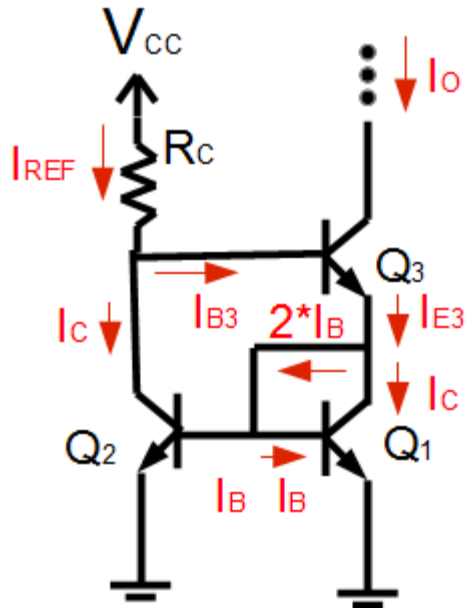
$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - 2 \cdot V_{BE}}{R_C}$$

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  $\beta$  no es muy grande



Condiciones de funcionamiento:

- Transistores idénticos
- Zona Activa

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

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

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

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

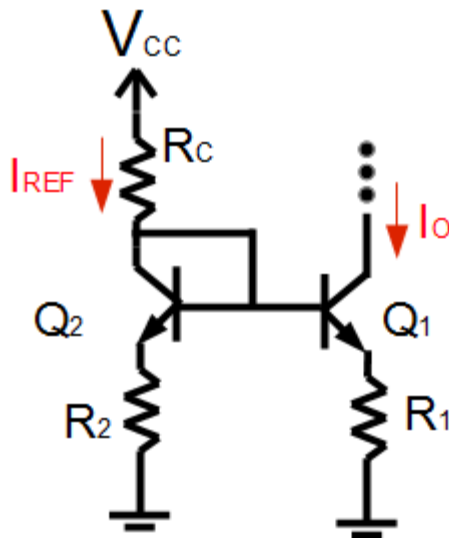
$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{\beta^2 + 2\beta}{\beta^2 + 2\beta + 2}$$

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

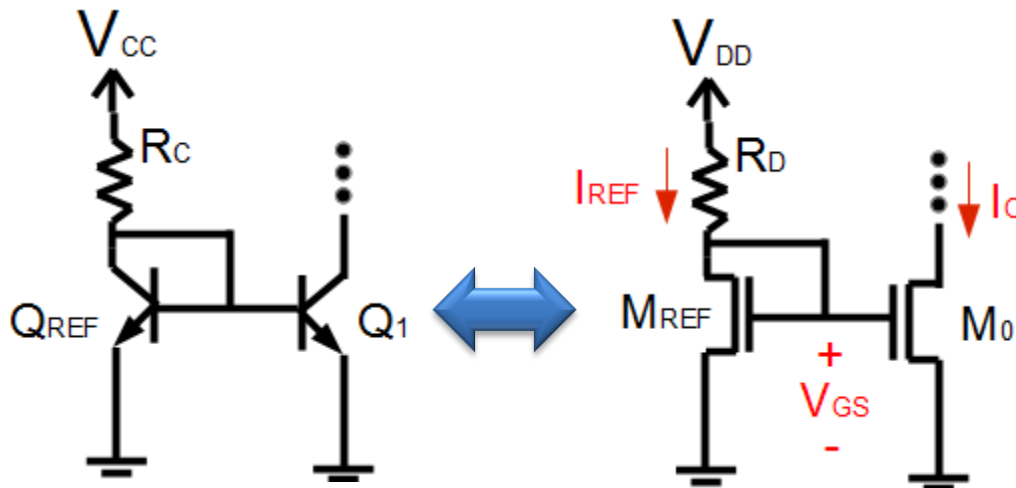
- Si en este circuito  $\beta \uparrow \uparrow$ , hacemos un análisis de  $\beta = \infty$  ( $I_B = 0$ )
- Además  $V_{BE1} \sim V_{BE2}$  (diferencias de miliVolts)

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

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

# 7.7 Espejos de corriente NMOS. Espejo Widlar NMOS

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



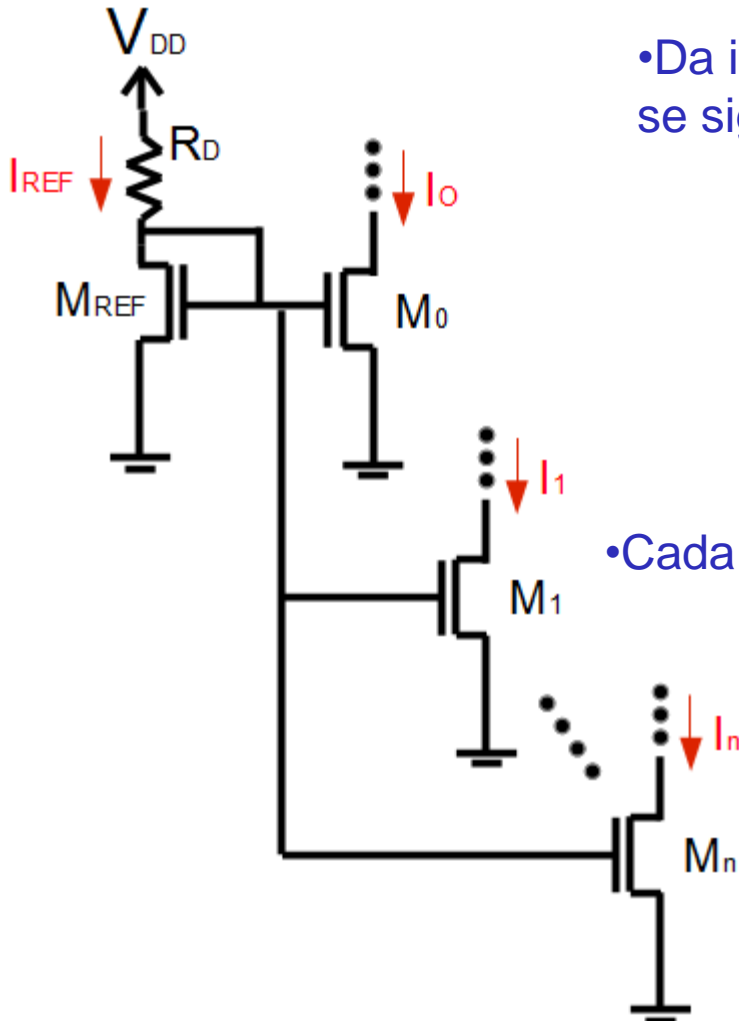
Condiciones de funcionamiento:

- 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:

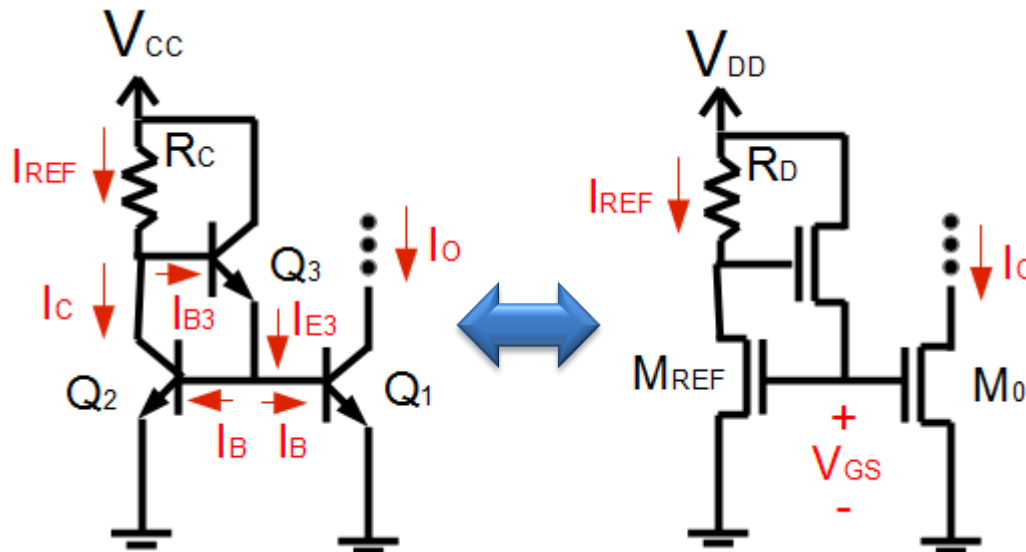
$$\frac{I_i}{I_{REF}} = \frac{\beta_i}{\beta_{REF}}$$

• Cada transistor puede tener una intensidad diferente

Condiciones de funcionamiento:

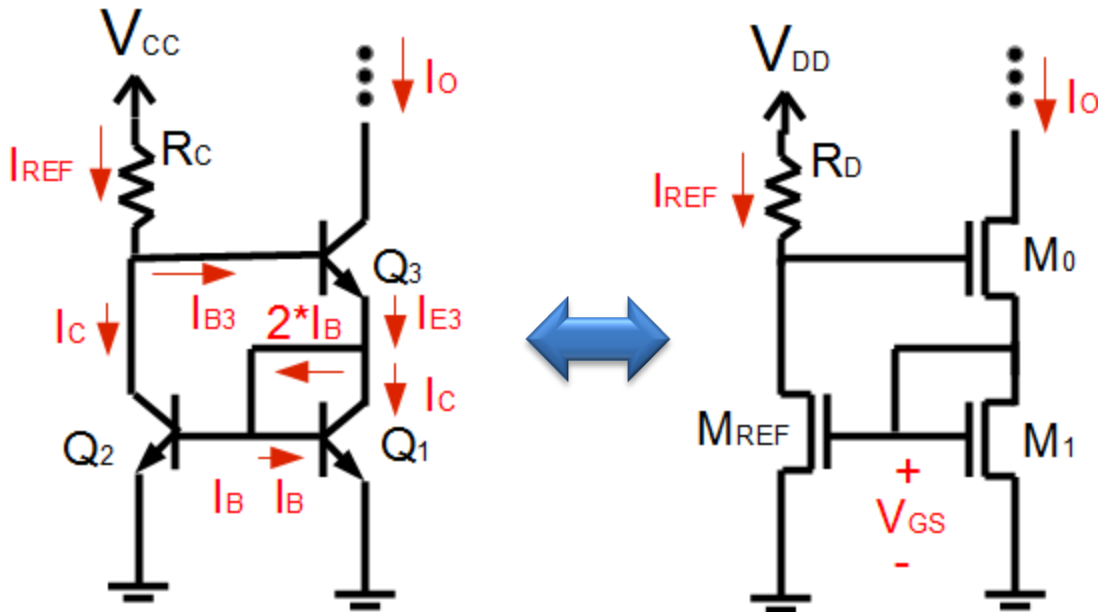
- Zona SATURACIÓN
- Iguales  $V_{T0}$

## 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  $\beta$  son iguales las cond. de funcionamiento son:

• M1 conduce y M0 SAT :

Ya que de ahí se deriva:

• M1 SAT

• MREF SAT

$$\left. \begin{aligned} V_{DS,REF} &= V_{GS,0} + V_{GS,1} = 2 \cdot V_{GS,0} \\ V_{GS,REF} &= V_{GS,0} \end{aligned} \right\}$$

$$V_{DS,REF} > V_{GS,REF} - V_{T0} \quad \leftarrow \text{MREF SAT}$$

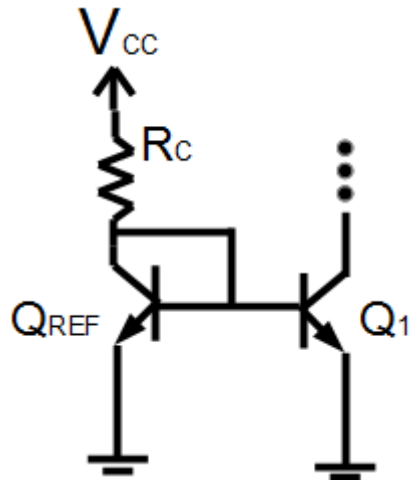
• Desde el punto de vista de un espejo de corriente tampoco aporta ventajas

• 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.

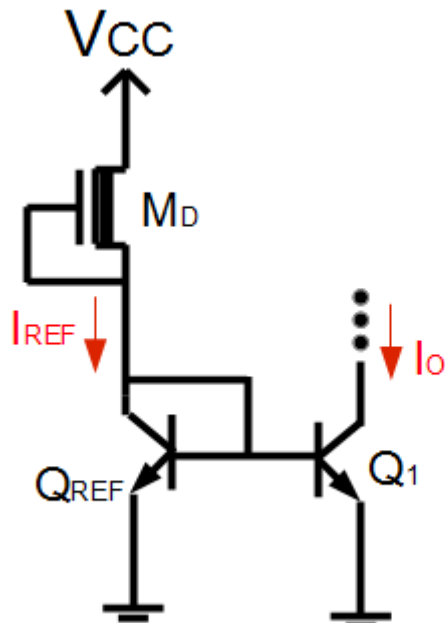


$$E_{V_{CC}}^{I_o} = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{BE}} (\approx 1)$$



# 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



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

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

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

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

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

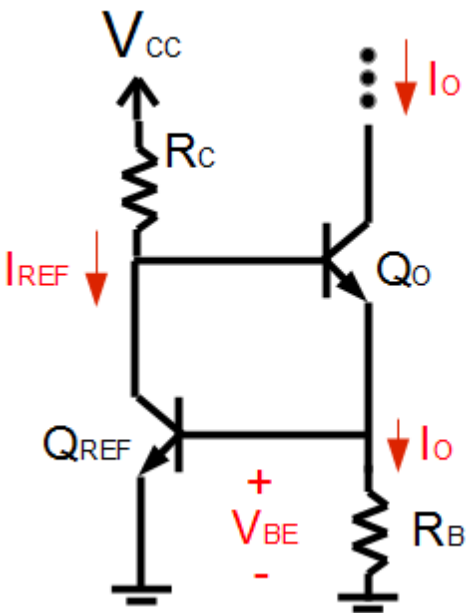
$$V_A \uparrow \uparrow$$

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

## 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:

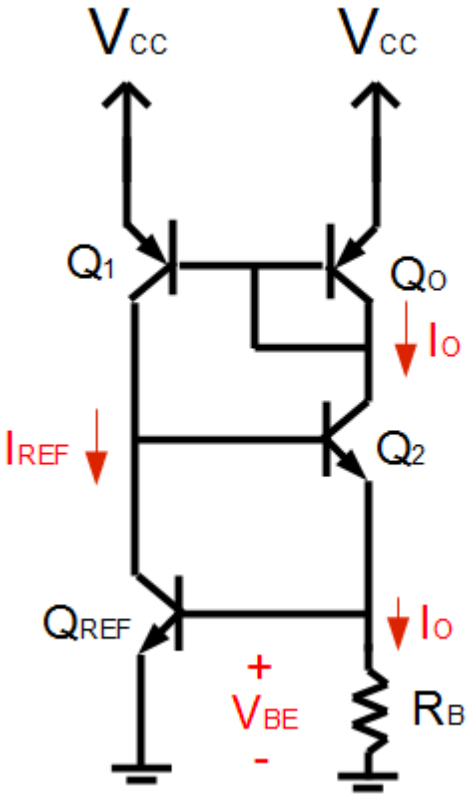
$$E_{V_{CC}}^{I_O} = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{BE}} \cdot \frac{1}{\ln \left( \frac{V_{CC} - 2 \cdot V_{BE}}{\alpha_F I_{ES} R_C} \right)}$$

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

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

# 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**  $I_{REF} \approx I_0$

**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:

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

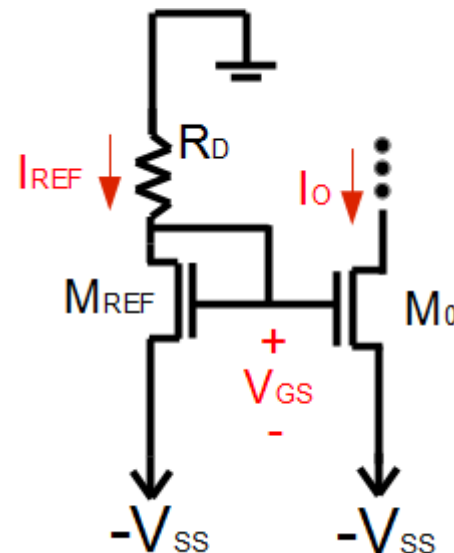
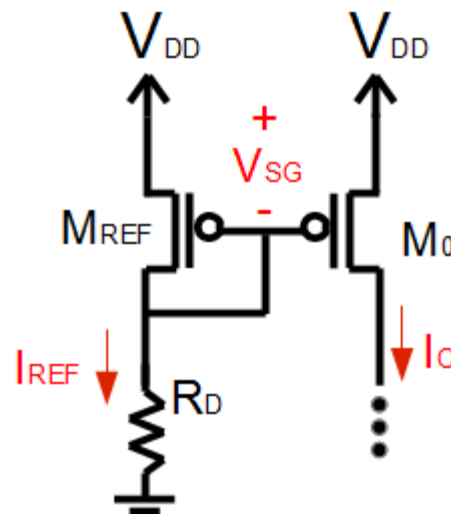
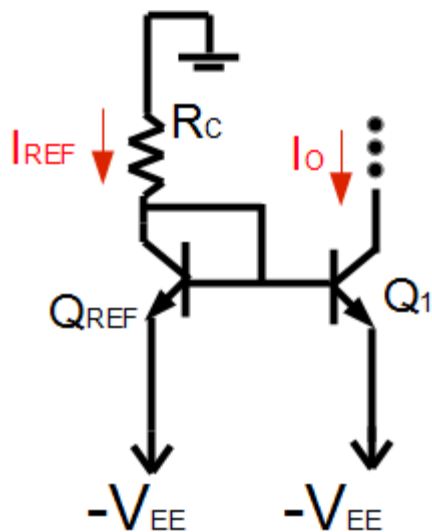
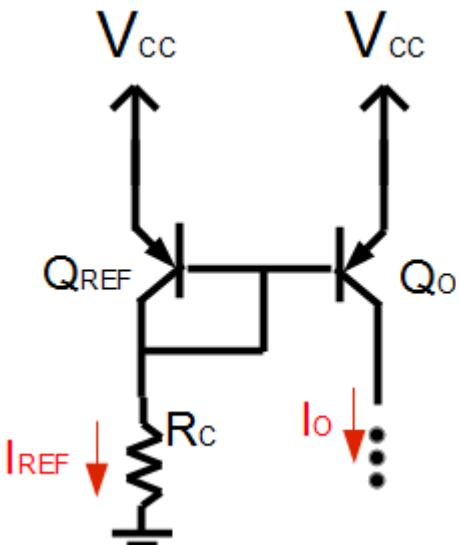
Como  $I_O$  no depende de  $V_{CC}$  ➔

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

# 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

