

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

Cartagena99

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)

The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, green, serif font. The '99' is significantly larger and more prominent than the 'Cartagena' part. The text is set against a light blue and white background with a subtle gradient and a soft shadow effect.

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

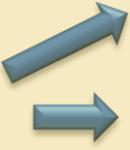
Punto de Operación:

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

Cartagena99

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

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

The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, green, serif font. The '99' is significantly larger and more prominent than the 'Cartagena' part. The text is set against a light blue and orange gradient background that resembles a stylized wave or a banner.

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:

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

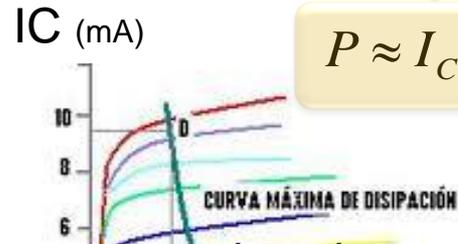
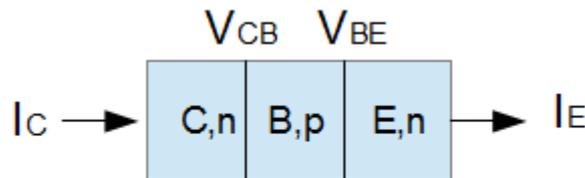
Esta potencia se transforma en calor que puede **destruir** al dispositivo:

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

Cartagena99

VCE (V)

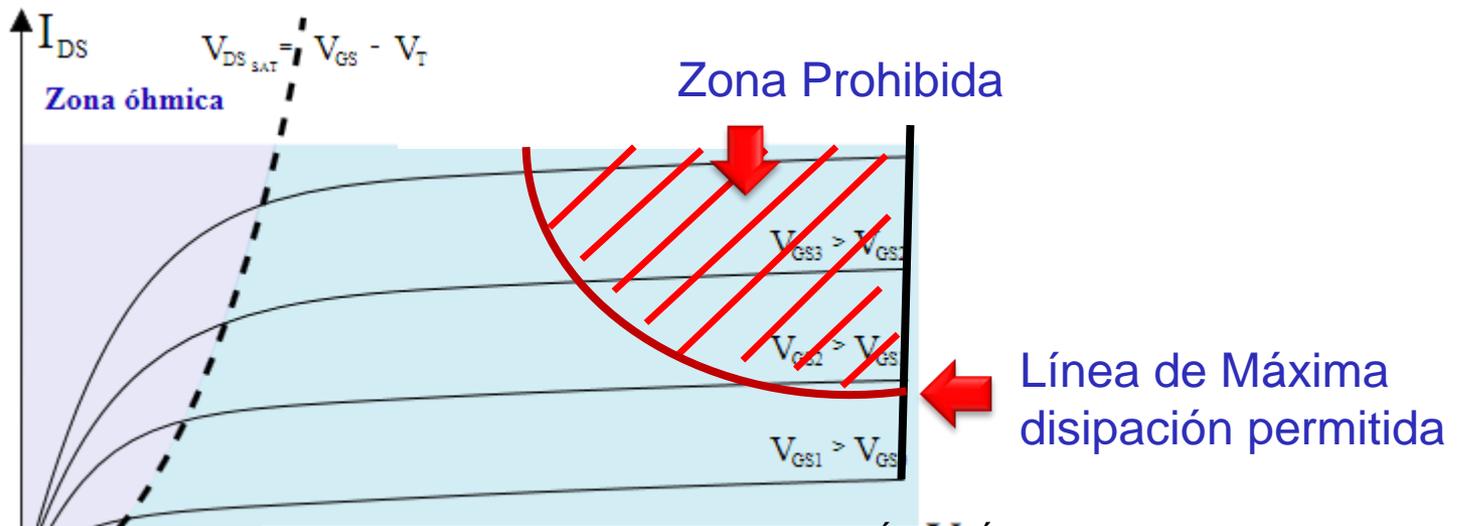
7.3 Zona de Seguridad

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



Cartagena99

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:

$$V_D \quad \frac{dV_{BE}}{dT} = -2.5 \frac{mV}{^\circ K}$$



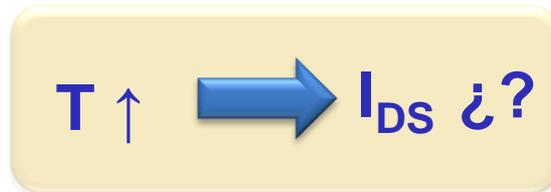
Cartagena99

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

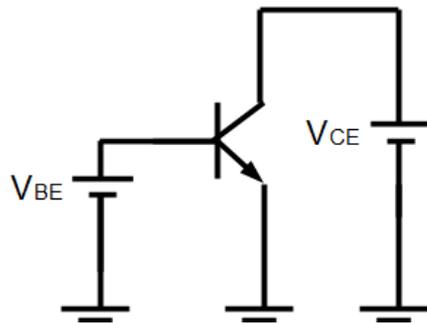
Cartagena99

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:

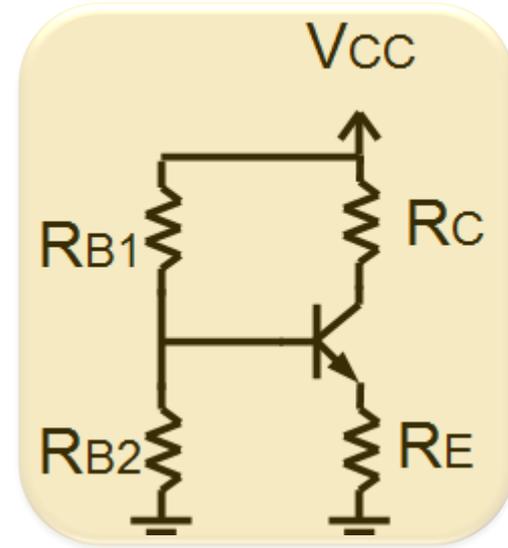
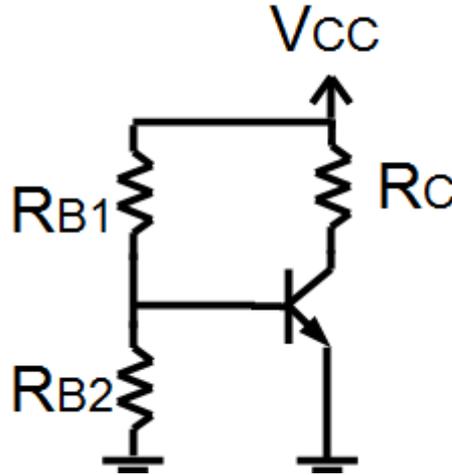
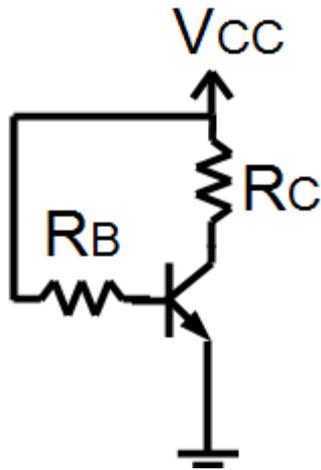
- Casi nunca disponemos de fuentes de tensión del valor adecuado (y no digamos de más de una)
- Las curvas características nos dan una idea de la forma I-V pero debido a T, procesos de fabricación y envejecimiento existen variaciones

Cartagena99

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

Cartagena99

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:

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

Cartagena99

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

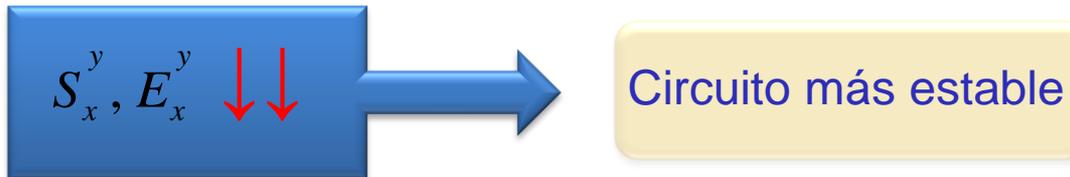
7.5.3 Factores de Estabilidad

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

Cartagena99

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

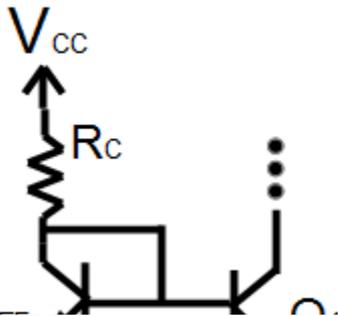
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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**

Cartagena99

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

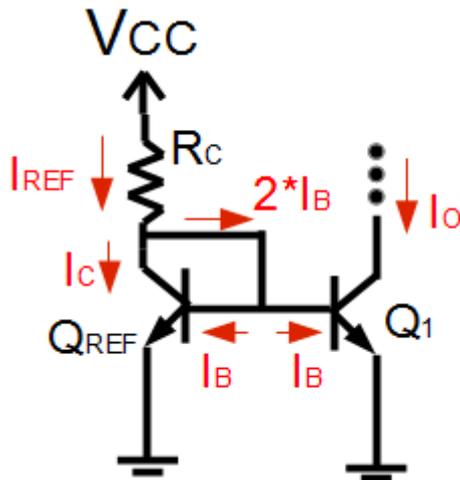
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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

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

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

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

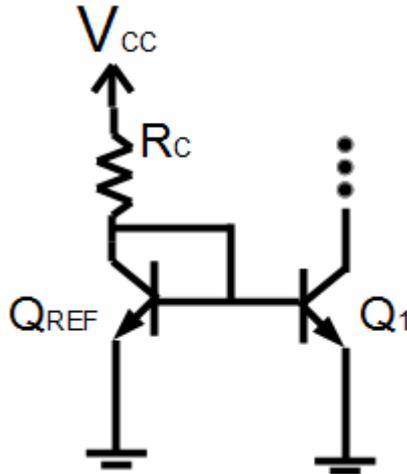
Cartagena99

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



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

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

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

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



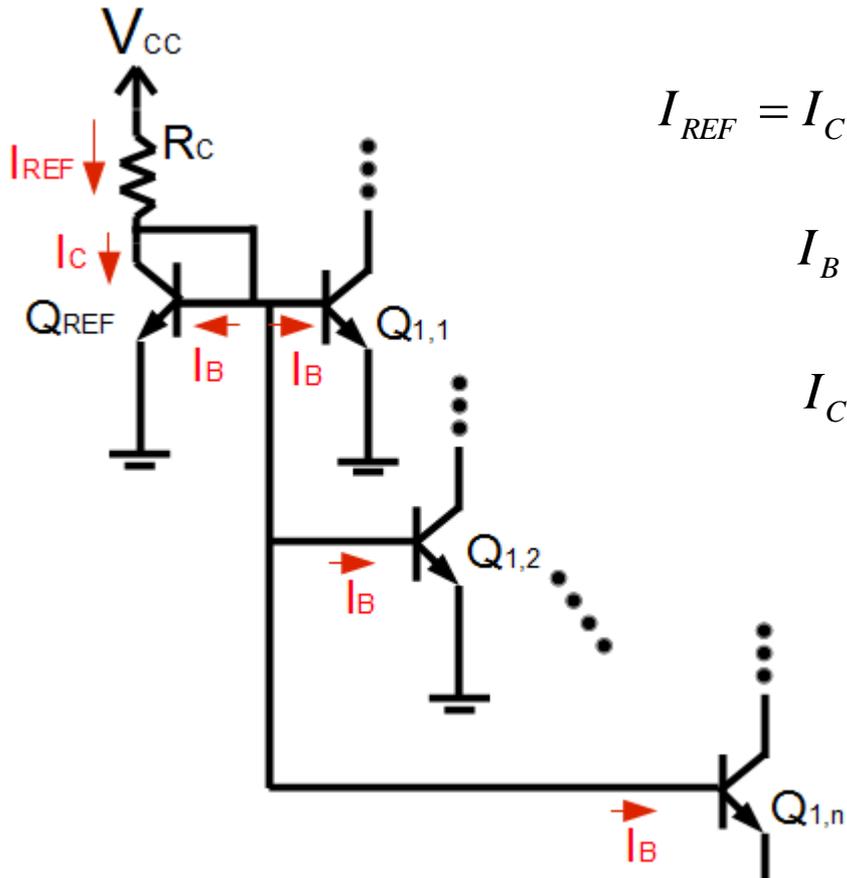
$$I_o = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C} \cdot \frac{\beta}{\beta + 2}$$

Cartagena99

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

7.6.2 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
 lo e IREF empiezan a diferenciarse

Cartagena99

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

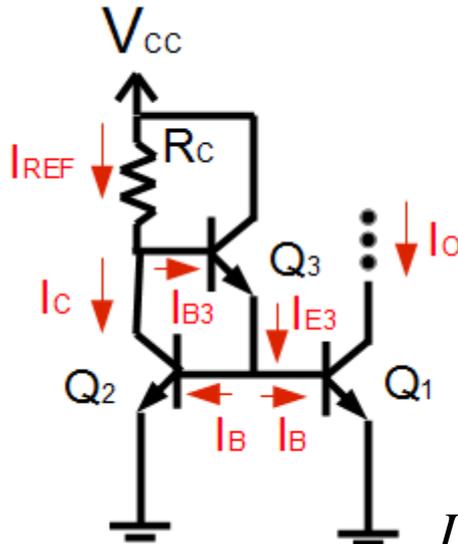
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

7.6.2 Circuito Widlar Modificado

- En situaciones en las que β no es muy grande

Condiciones de funcionamiento:

- Transistores idénticos
- Zona Activa



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

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

$$I_C \approx I_O$$

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

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

siendo I_{REF}

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

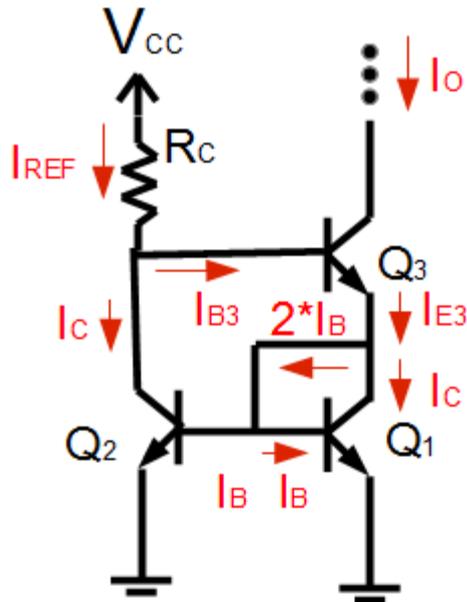
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

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

Cartagena99

7.6.3 Circuito Wilson

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



Condiciones de funcionamiento:

- Transistores idénticos
- Zona Activa

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

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

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

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

Cartagena99

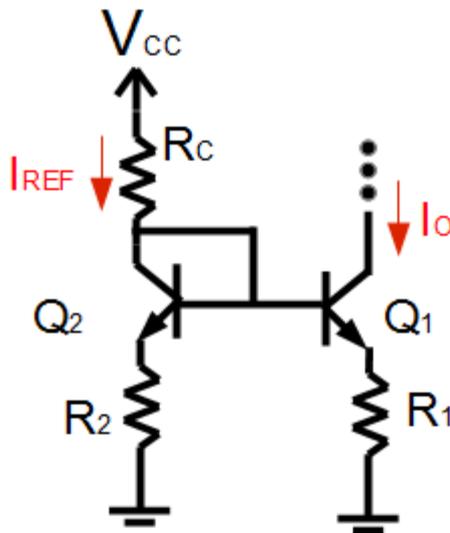
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

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

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)

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

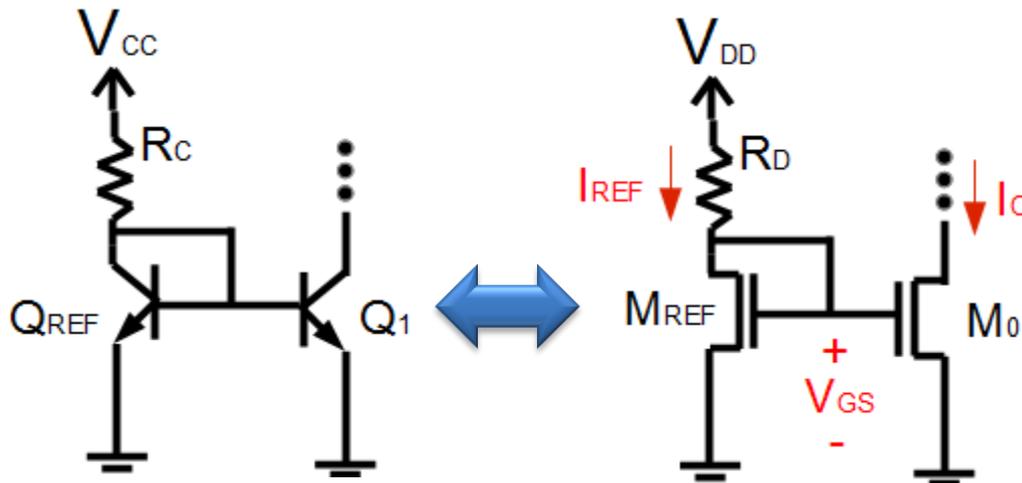
Cartagena99

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

7.7 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}

$$I_{REF} = \frac{\beta_{REF}}{2} (V_{GS} - V_{T0})^2$$

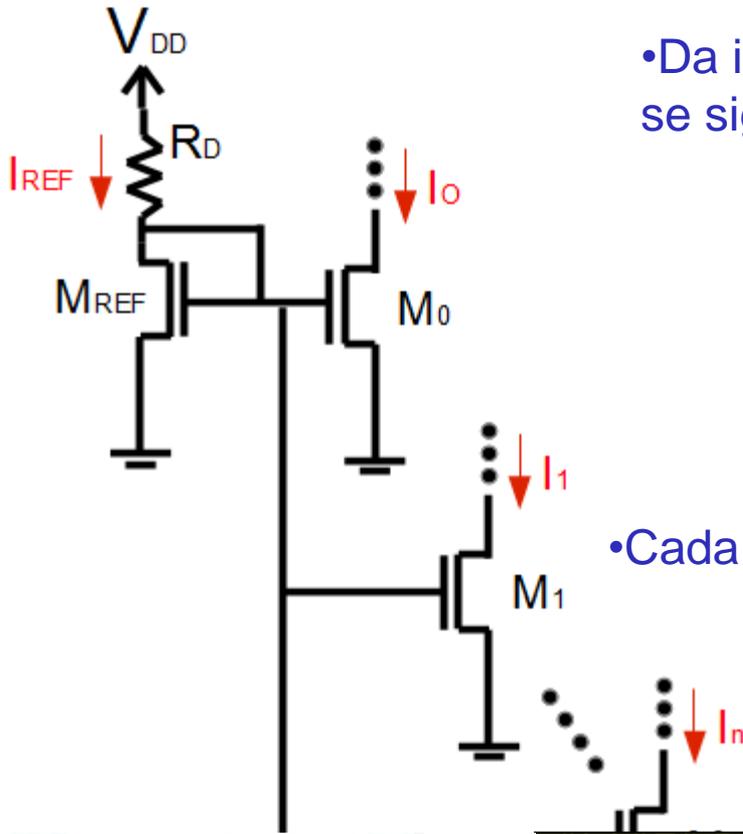
$$I_o = \frac{\beta_o}{2} (V_{GS} - V_{T0})^2$$

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

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

Cartagena99

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:

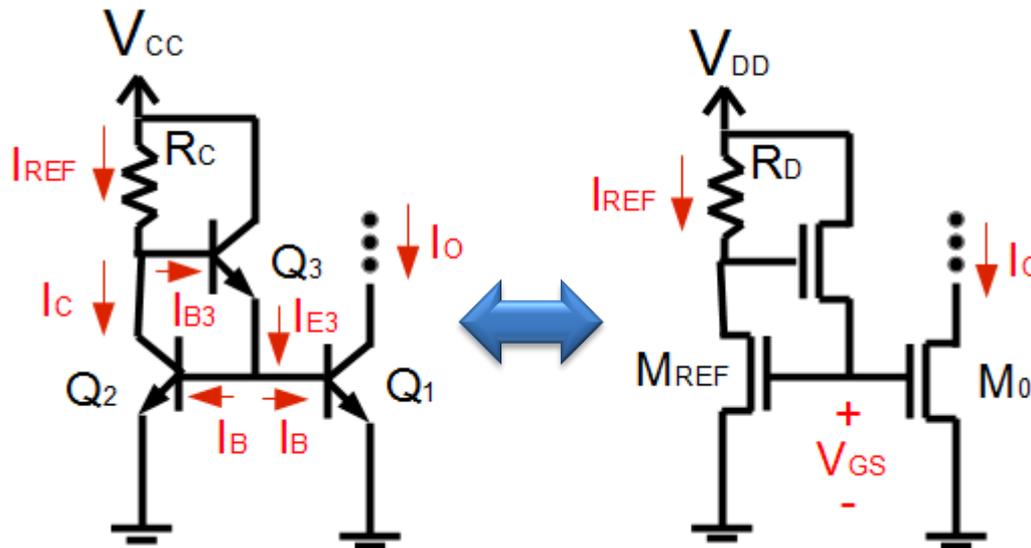
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

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

Cartagena99

Iguales Vio

7.7.3 Espejo NMOS Widlar Modificado



•Podemos construir la versión NMOS de un Espejo Widlar Modificado

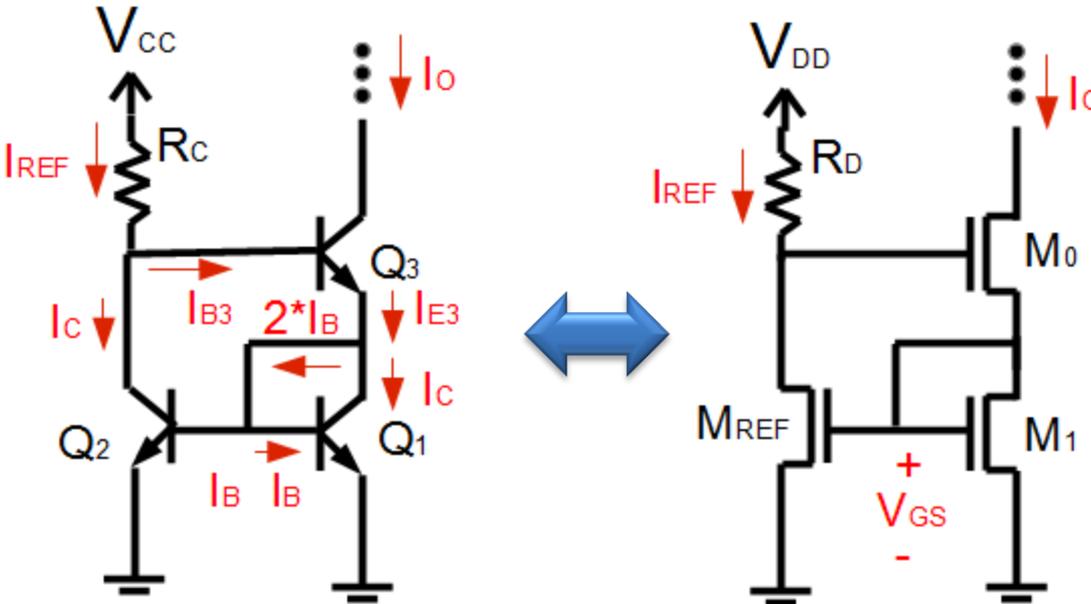
•Sin embargo, en este caso no tiene sentido ($I_C = 0$)

Cartagena99

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

7.7.4 Espejo NMOS Wilson



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

• M1 conduce y M0 SAT :

Ya que de ahí se deriva:

• M1 SAT

• MREF SAT

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

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

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

Cartagena99

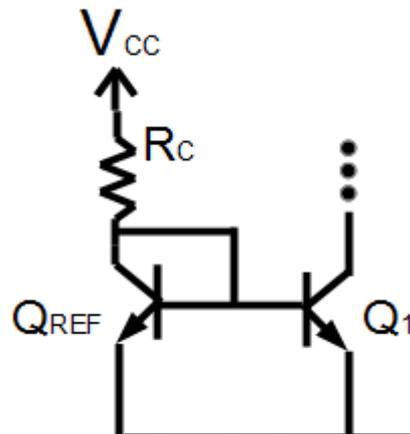
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

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

Por de este espejo es mucho mayor \rightarrow Mucho mejor fuente de intensidad

7.8 Fuentes con baja sensibilidad a Vcc

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



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

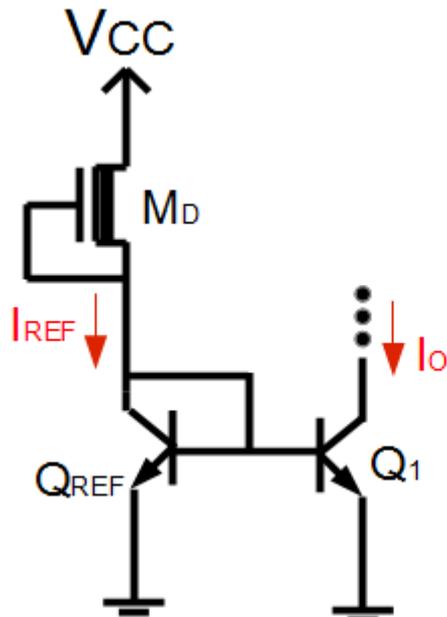
Cartagena99

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

7.8 Fuentes con baja sensibilidad a Vcc. Fuente con transistores NMOS de deplexión

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



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

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

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

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

Cartagena99

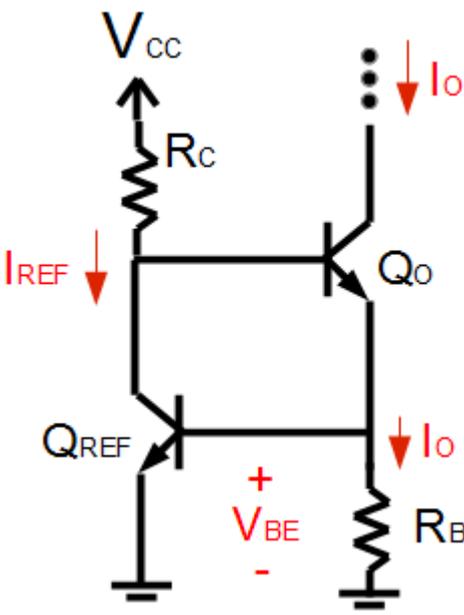
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

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

7.8.2 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 β[∞] tenemos que: ➔ 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:

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

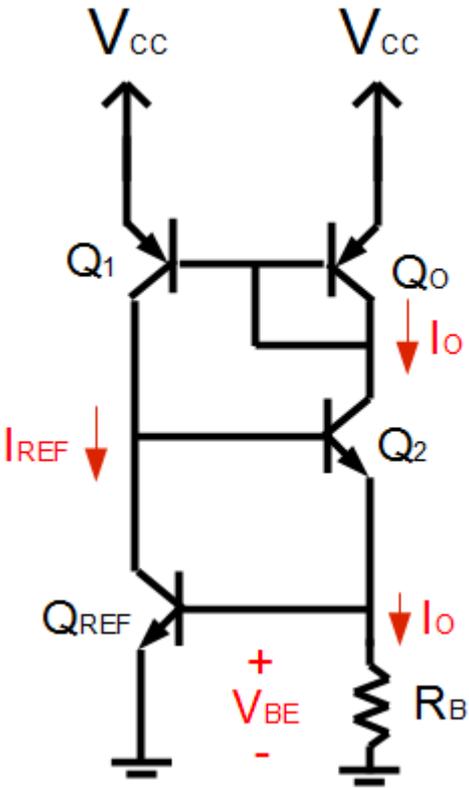
Cartagena99

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

7.8.3 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 $\beta \infty$ tenemos que:

$$\Rightarrow \textcircled{1} \quad I_O = \frac{V_{BE}}{R_B}$$

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

$$\textcircled{2} \quad I_{REF} \approx I_0$$

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

Introduciendo 2 en 3 y el resultado en 1:

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

Cartagena99

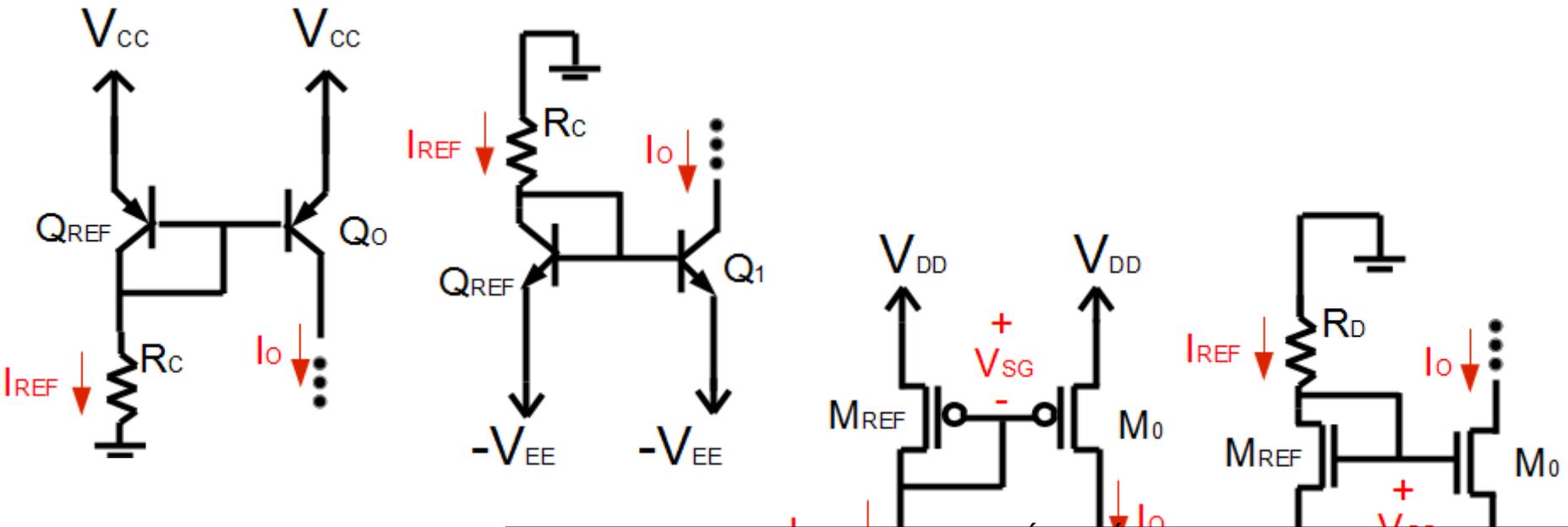
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

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

7.9 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



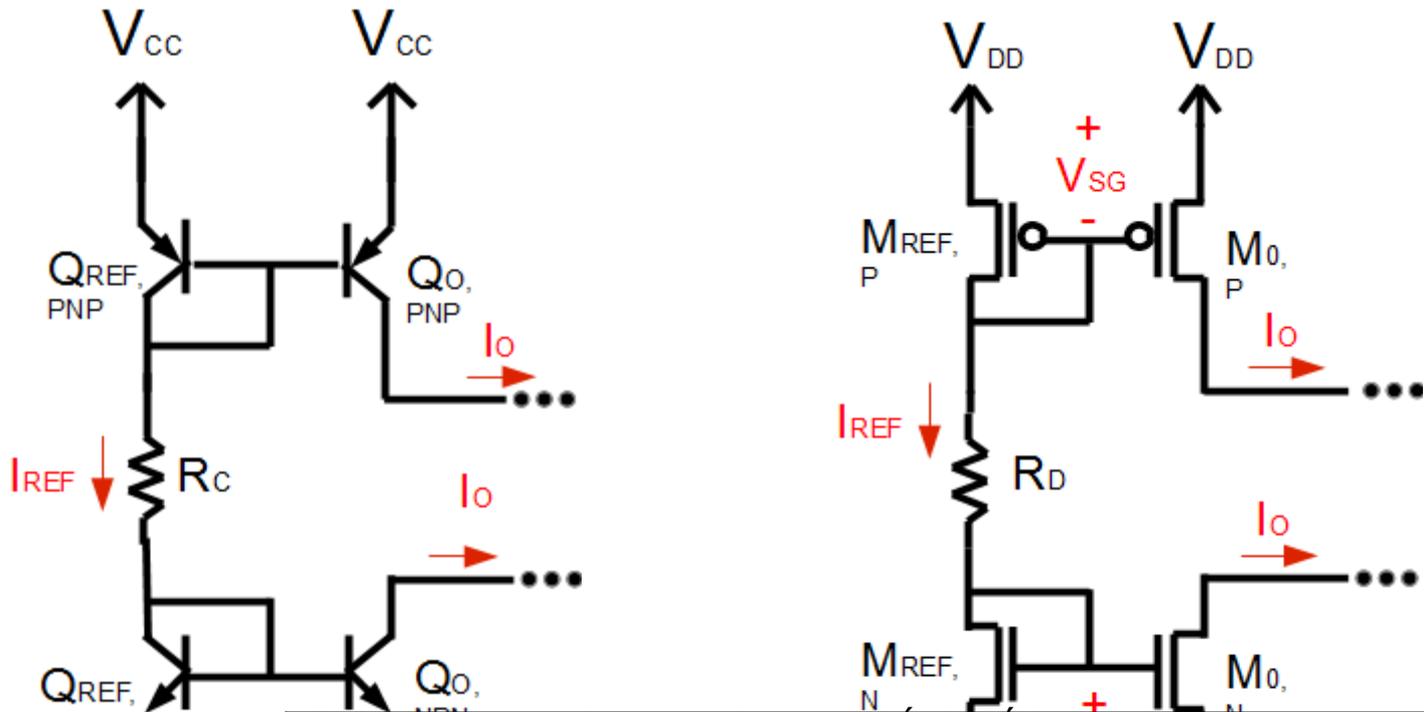
Cartagena99

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

7.9.2 Espejos Paralelos

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



Cartagena99

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