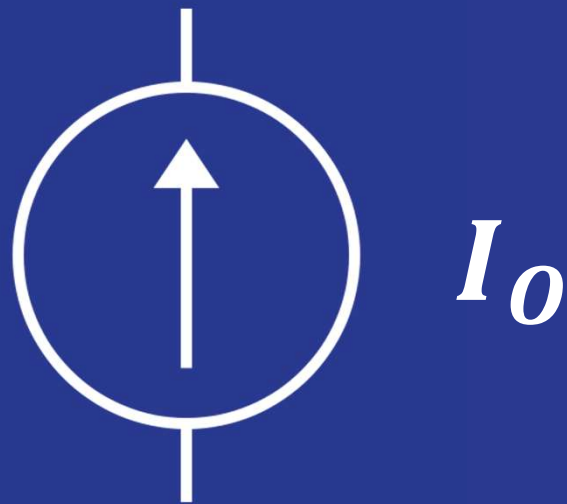
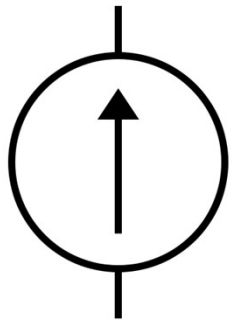


# FUENTES DE CORRIENTE

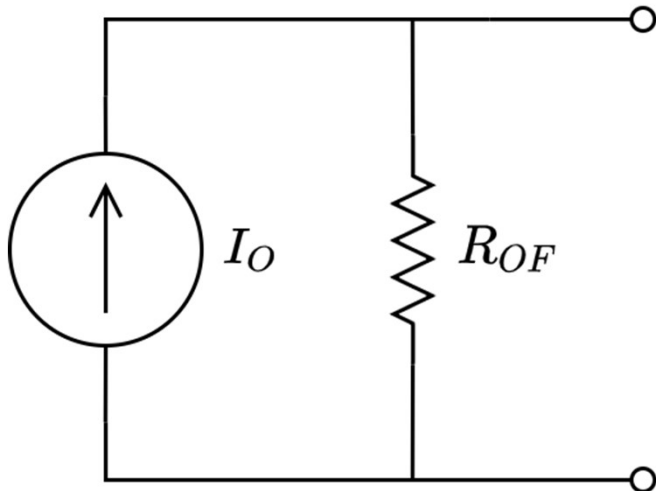
22.11 – Electrónica I – 2021



## Motivación



La **FUENTE DE CORRIENTE IDEAL** entrega una corriente constante independientemente de la tensión entre sus bornes.



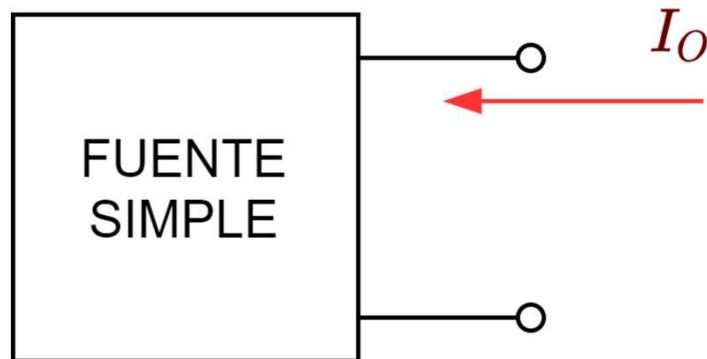
## Usos

- **Polarización:** usar una fuente de corriente para polarizar una o varias etapas. Mejora la estabilidad y la sensibilidad frente a cambios de tensión y temperatura.
- **Mejorar la impedancia de salida.**
- **Carga Activa:** La carga que ve el amplificador ahora entrega energía.
- **Acople entre etapas.**
- **Generar señales triangulares**

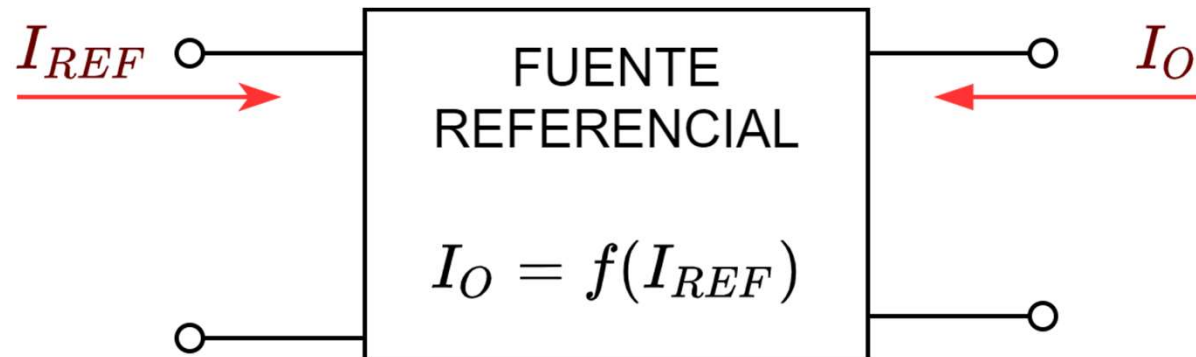
# Características

- $I_O$ : Qué corriente entrega.
- $[V_{mín}, V_{máx}]$ : Rango de tensión de funcionamiento.
- Respuesta en frecuencia (buscamos conocer el lugar de raíces)
- $R_{O_F}$ : Impedancia de salida

## Tipos de fuentes de corriente

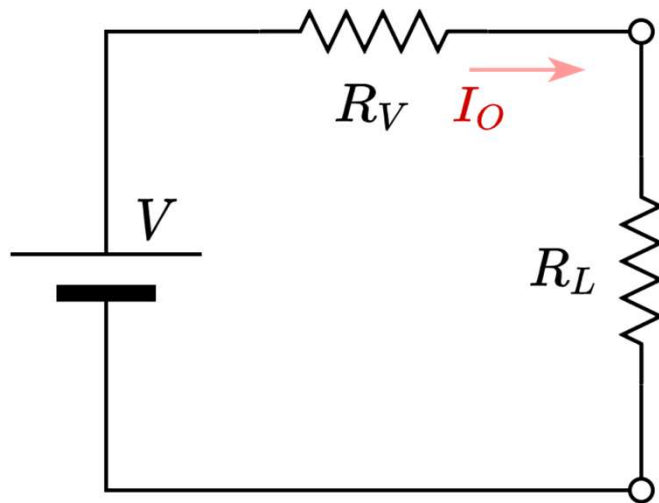


En las fuentes simples, el valor de la corriente esta fijo por la polarización.

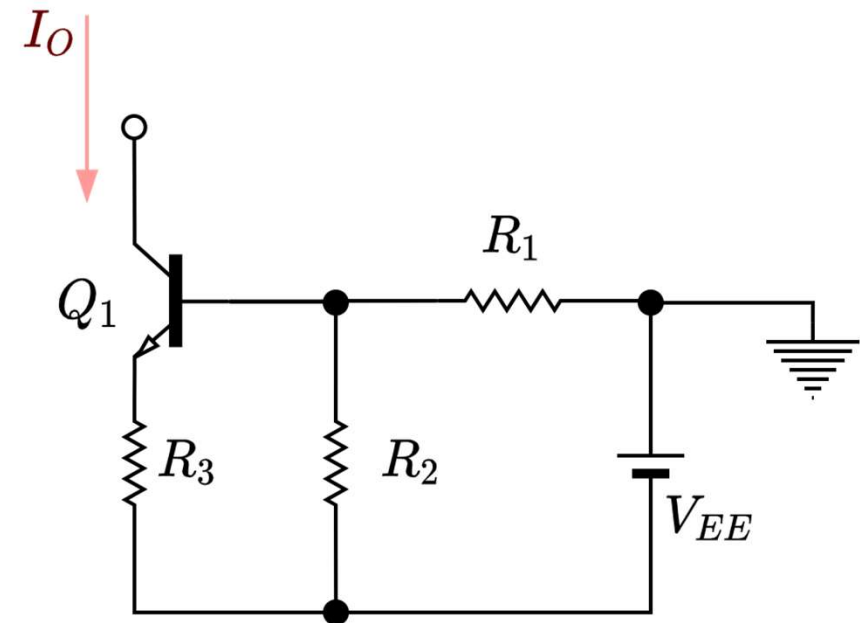


En las fuentes referenciales, el valor de corriente es función del valor de otra corriente denominada corriente de referencia

# TOPOLOGIAS – Fuentes Simples

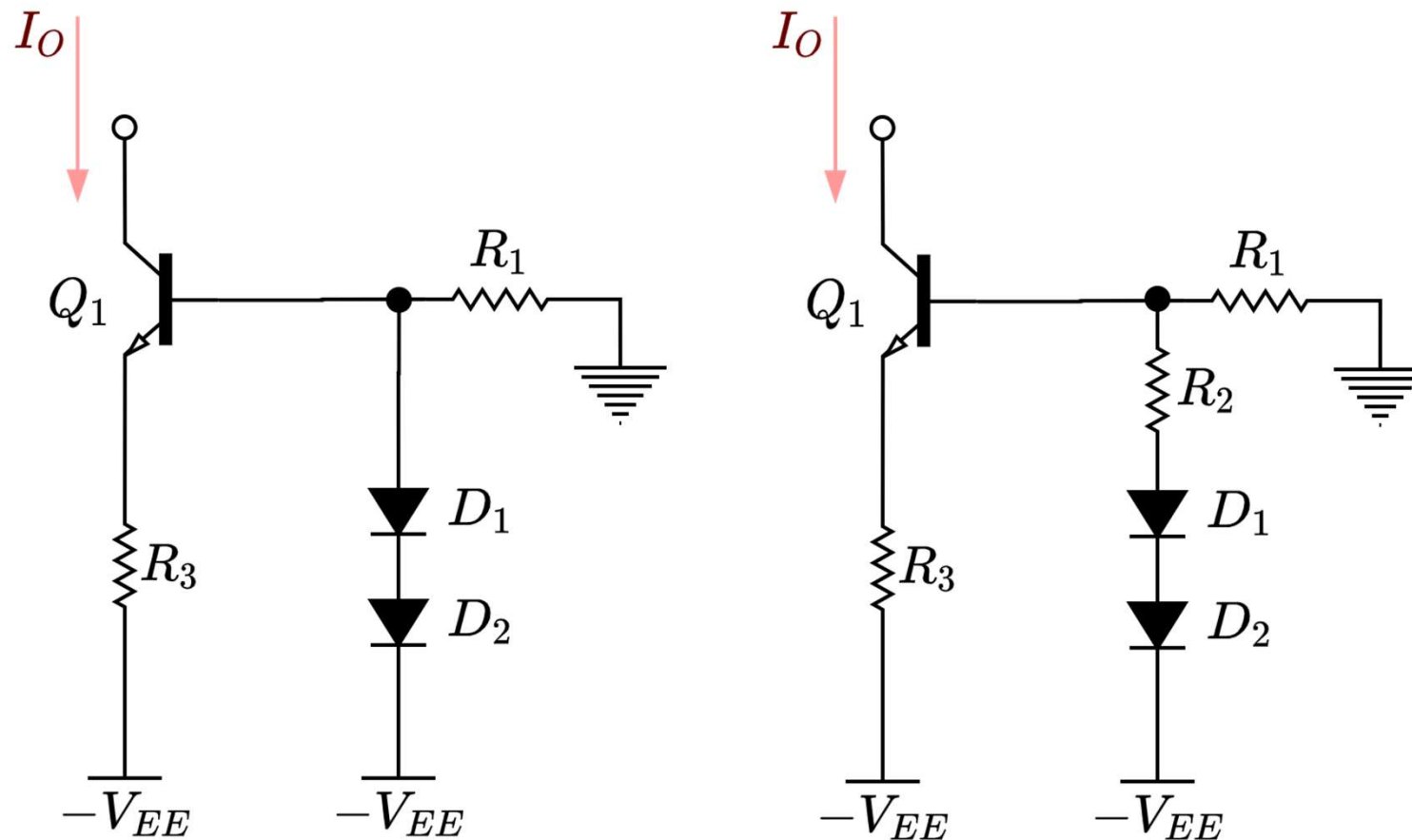


**“La fuente más simple que hay”**



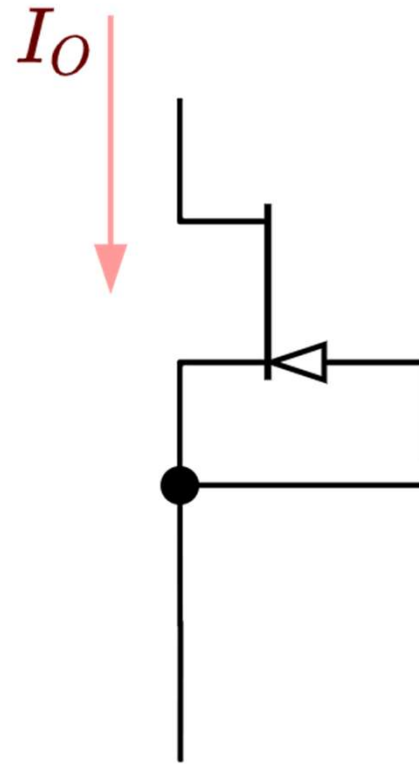
**Fuente simple con transistor**

# TOPOLOGIAS – Fuentes Simples



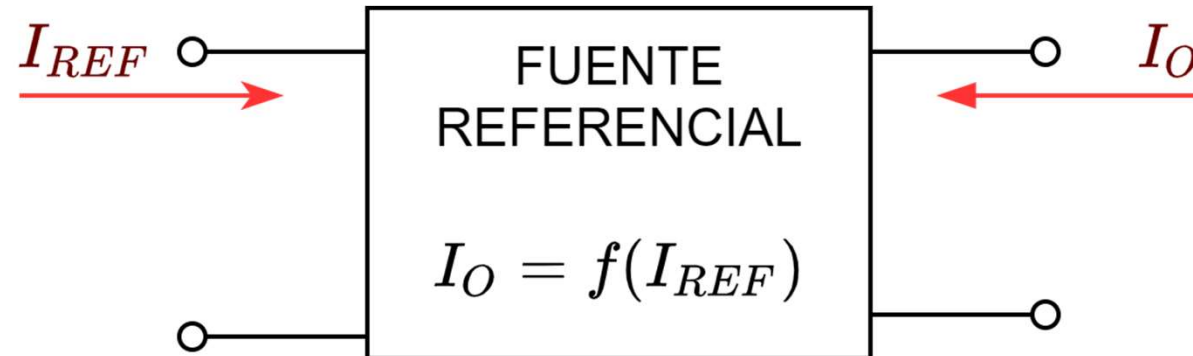
**Fuentes simples compensadas**

# TOPOLOGIAS – Fuentes Simples



**Fuentes simples con JFET**

# TOPOLOGIAS – Fuentes Referenciales

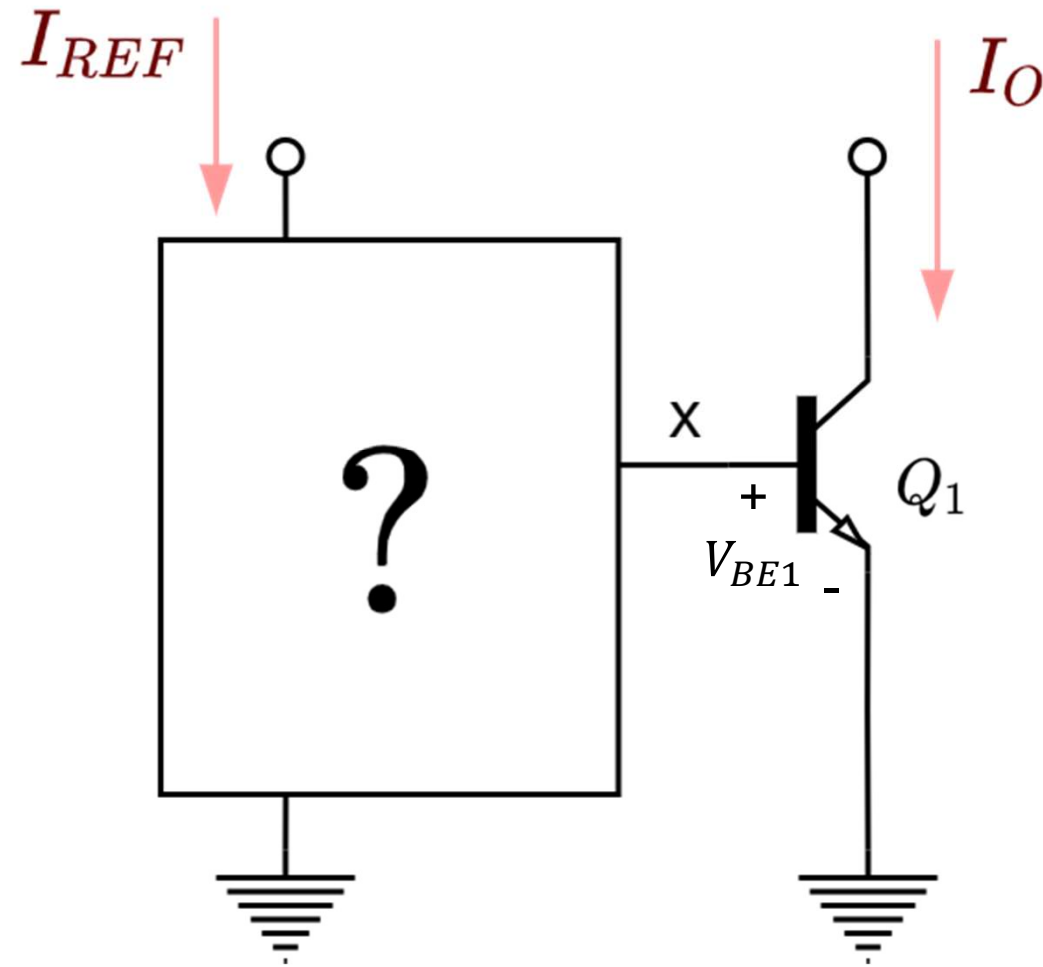




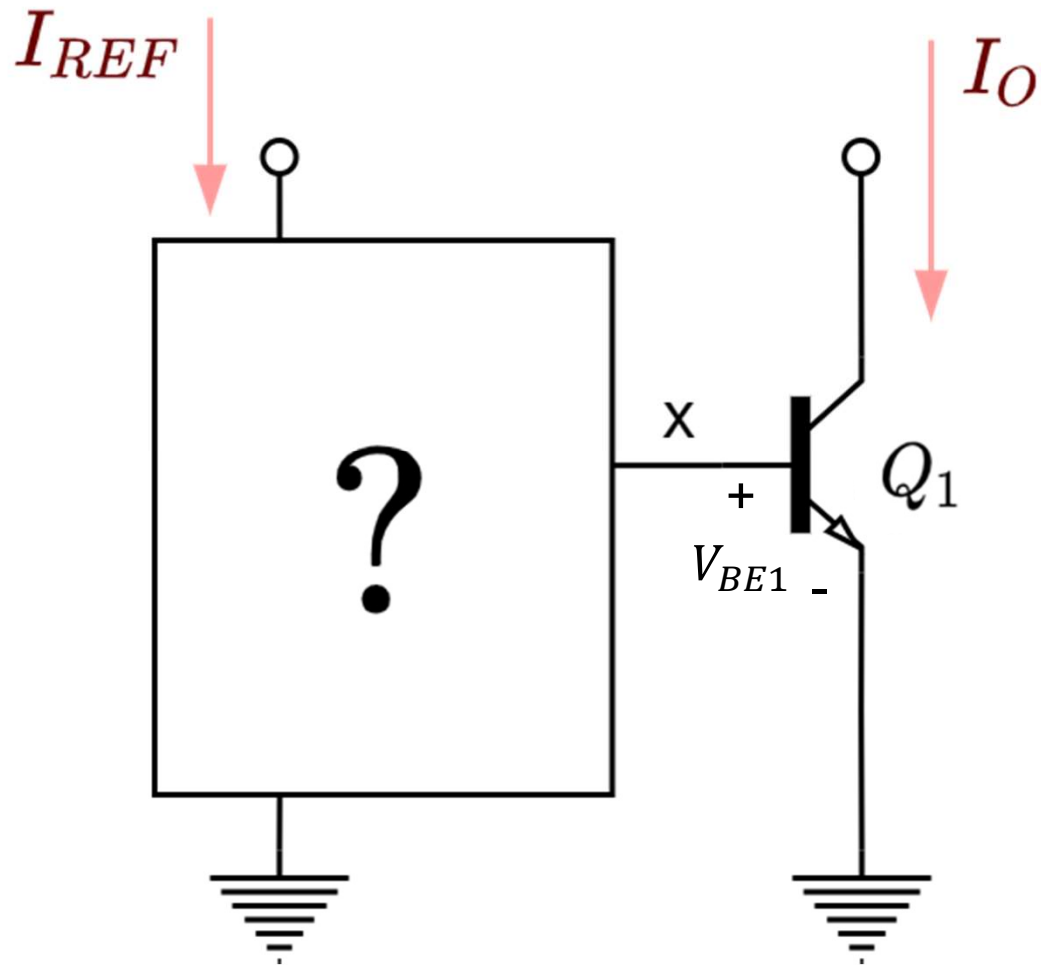
# Análisis

- 1° APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$
- 2° APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \not\gg 1$
- 3° APROXIMACIÓN  $V_A \not\rightarrow \infty$   $\beta \not\gg 1$

# FUENTE ESPEJO



# FUENTE ESPEJO



¿Cómo debe ser el circuito interno para que  $I_O = I_{REF}$  ?

$$I_{REF} = I_O = I_{S1} \cdot e^{\frac{V_{BE1}}{V_T}} = I_{S1} \cdot e^{\frac{V_X}{V_T}}$$

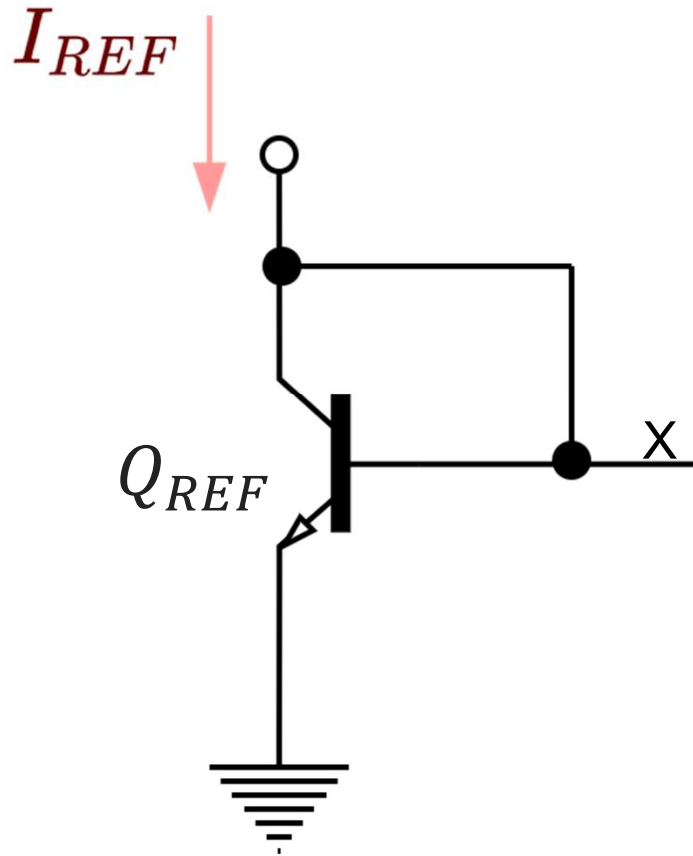
$$V_X = V_T \cdot \ln \frac{I_{REF}}{I_{S1}}$$

Debemos buscar un circuito cuya tensión de salida sea proporcional al logaritmo natural de su entrada.

¿Alguna idea?

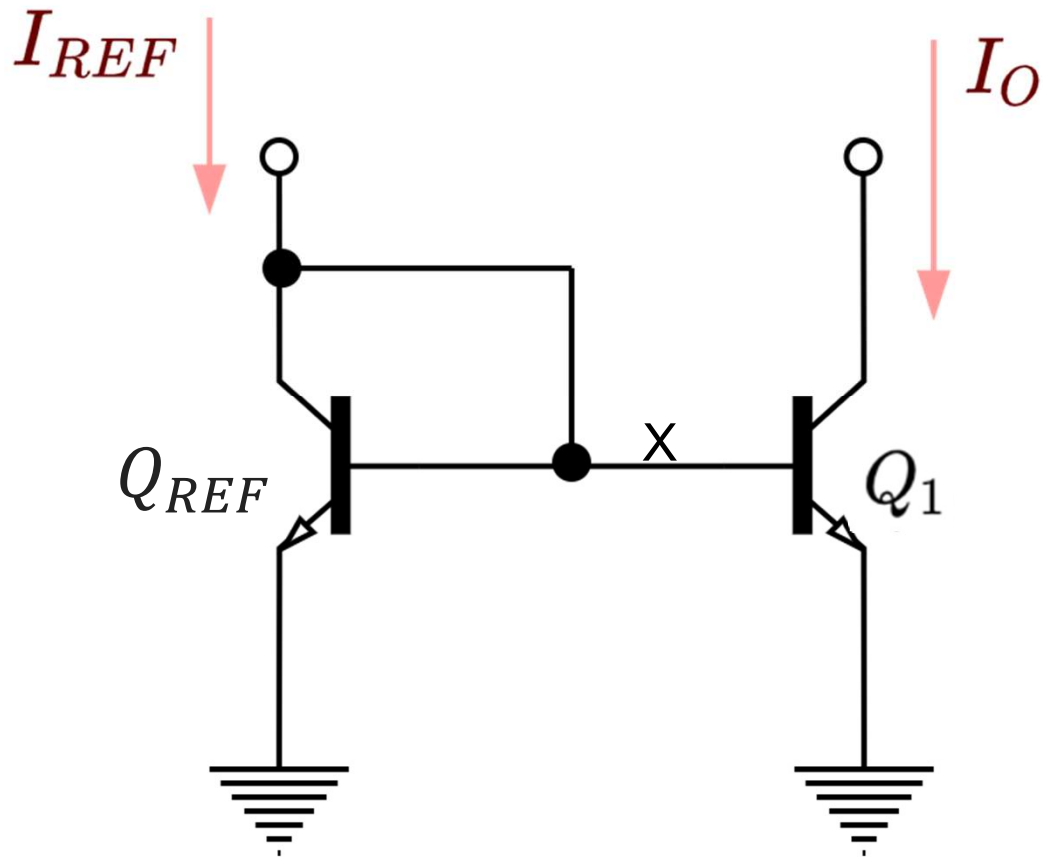
# FUENTE ESPEJO

Podemos conseguir esto conectando el transistor como diodo:



$$I_{REF} = I_{S_{REF}} \cdot e^{\frac{V_X}{V_T}}$$

# FUENTE ESPEJO



Podemos conseguir esto conectando el transistor como diodo:

$$I_{REF} = I_{S_{REF}} \cdot e^{\frac{V_X}{V_T}}$$

$$I_O = I_{S_1} \cdot e^{\frac{V_X}{V_T}}$$



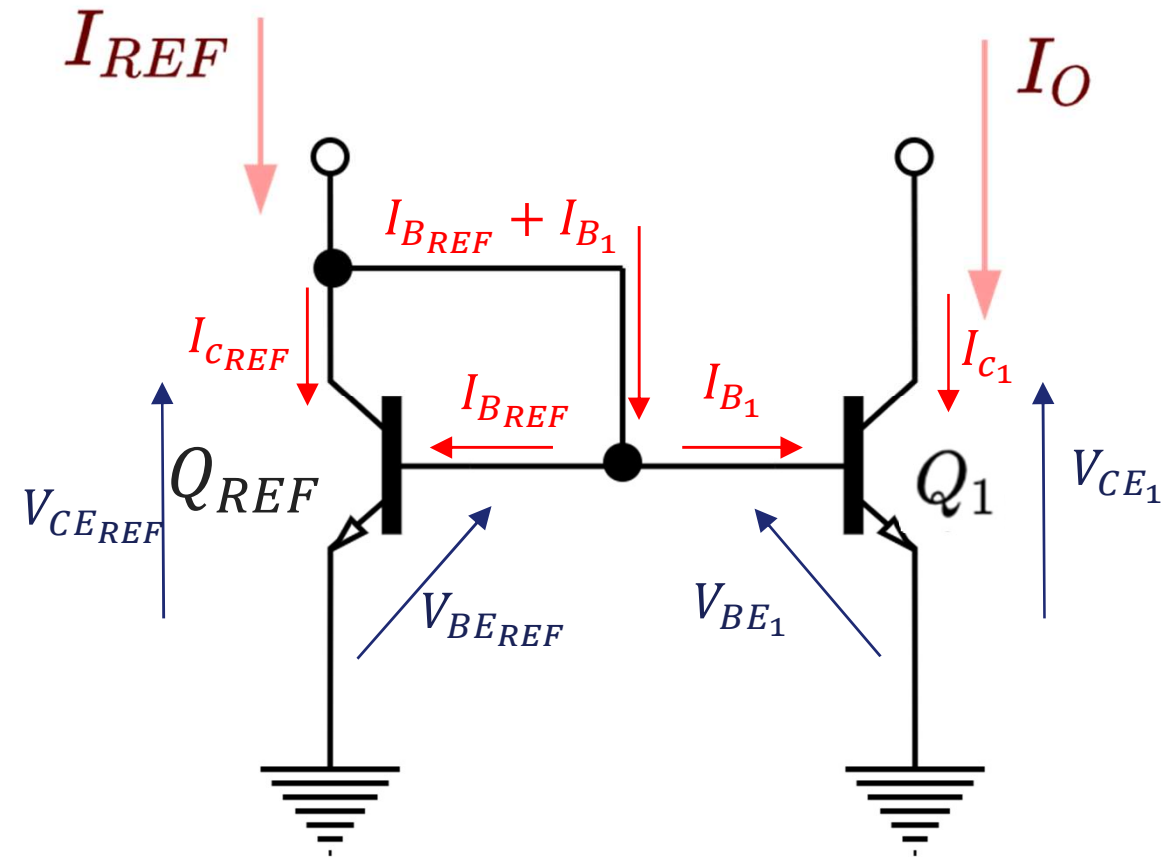
$$I_O = \frac{I_{S_1}}{I_{S_{REF}}} I_{REF}$$

Si ambos transistores son iguales

$$I_O = I_{REF}$$

1º APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$

# FUENTE ESPEJO



2° APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$

$$V_{BE_{REF}} = V_{BE_1} \Rightarrow I_{B_{REF}} = I_{B_1} = \frac{I_{C_1}}{\beta}$$

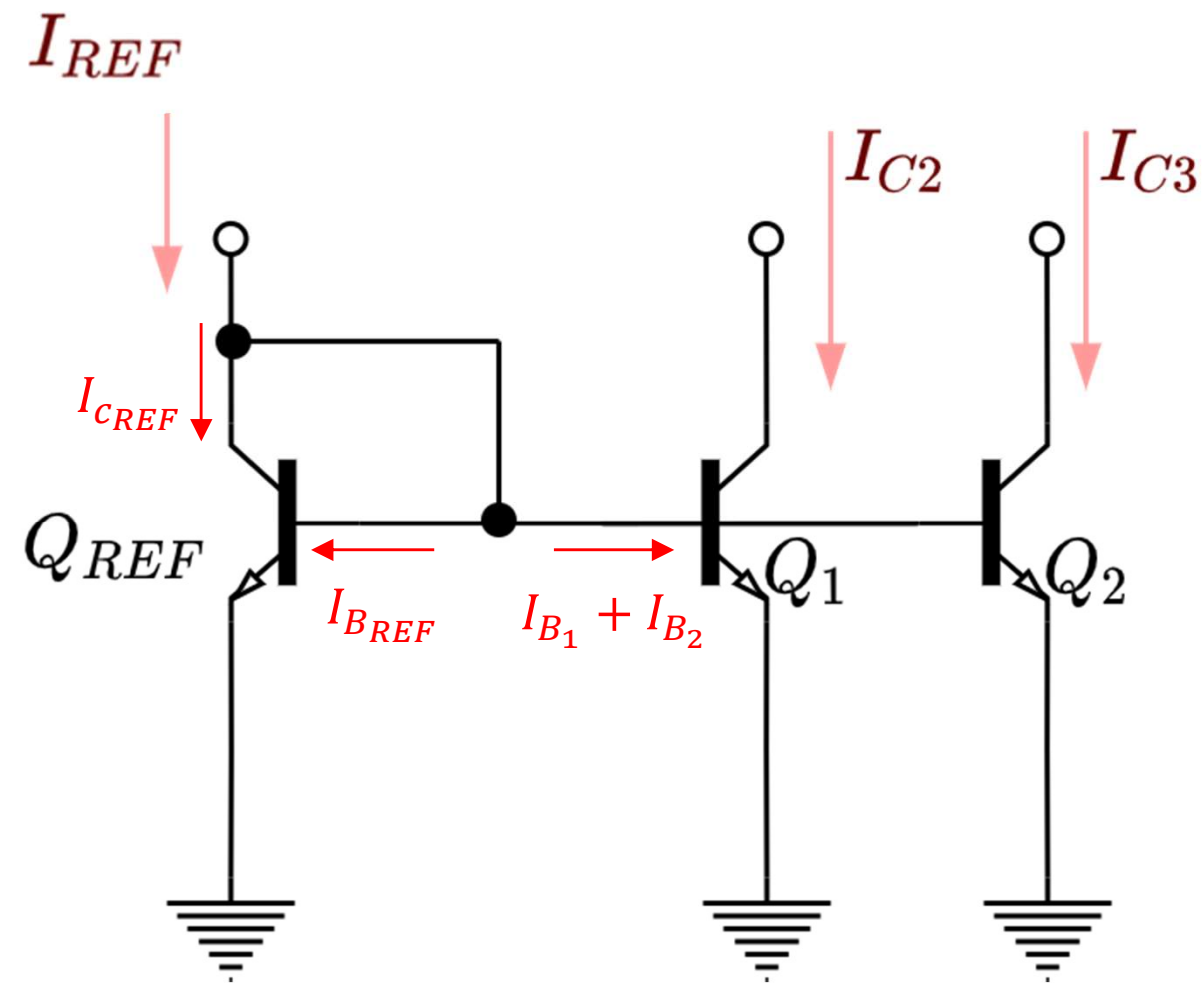
$$I_{C_{REF}} = I_{REF} - (I_{B_{REF}} + I_{B_1})$$

$$I_{C_{REF}} = I_{REF} - 2 \cdot I_{B_{REF}} = I_{REF} - 2 \cdot \frac{I_{C_{REF}}}{\beta}$$

$$I_{C_{REF}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) = I_{REF}$$

$$\Rightarrow I_O = I_{C_1} = I_{C_{REF}} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

# FUENTE ESPEJO



2° APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$

$$I_{CREF} = I_{REF} - (I_{BREF} + I_{B1} + I_{B2})$$

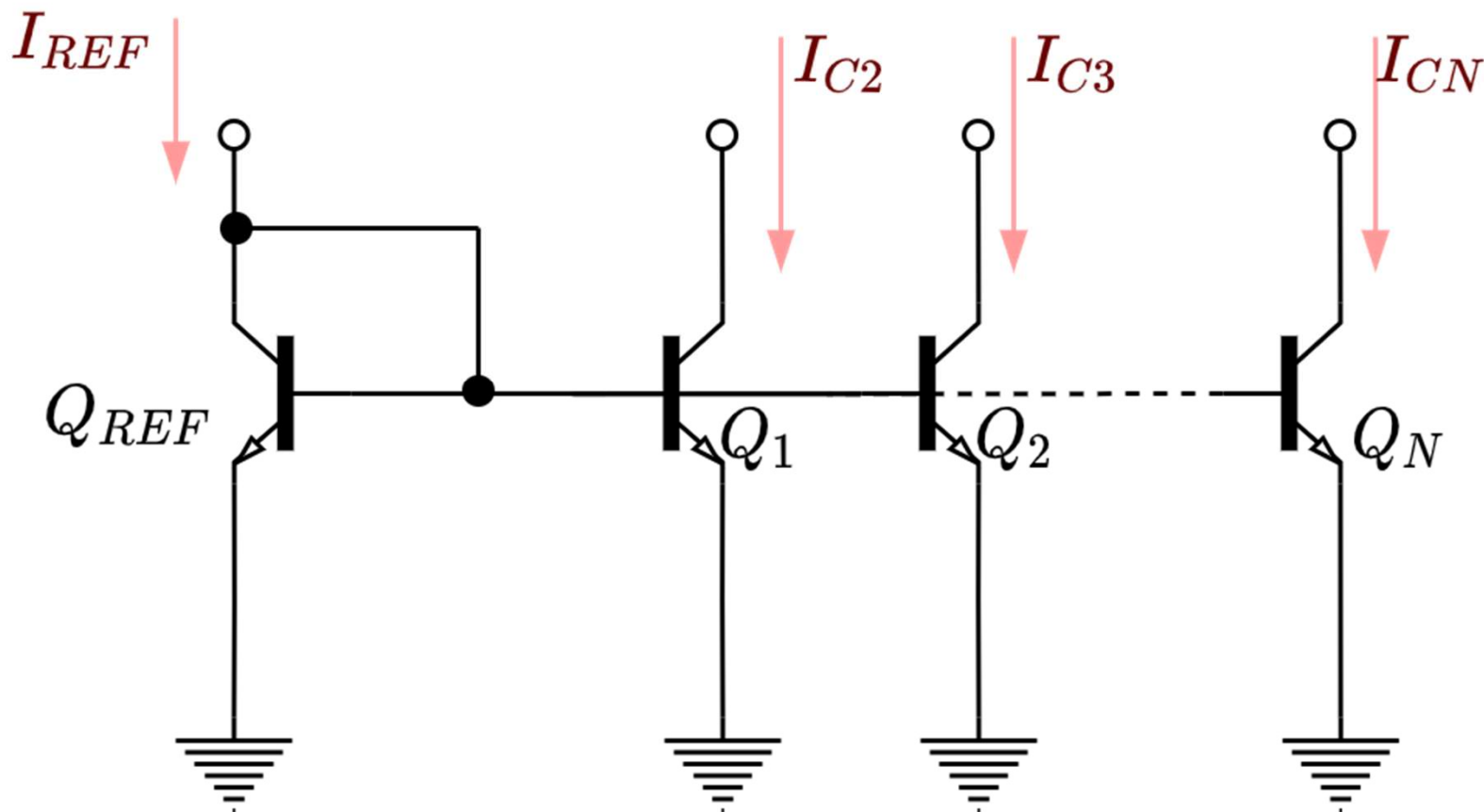
$$I_{CREF} = I_{REF} - 3 \cdot I_{BREF} = I_{REF} - 3 \cdot \frac{I_{CREF}}{\beta}$$

$$I_{CREF} \cdot \left(1 + \frac{3}{\beta}\right) = I_{REF}$$

$$\Rightarrow I_O = I_{C1} = I_{C2} = I_{CREF} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{3}{\beta}}$$

# FUENTE ESPEJO

2° APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$



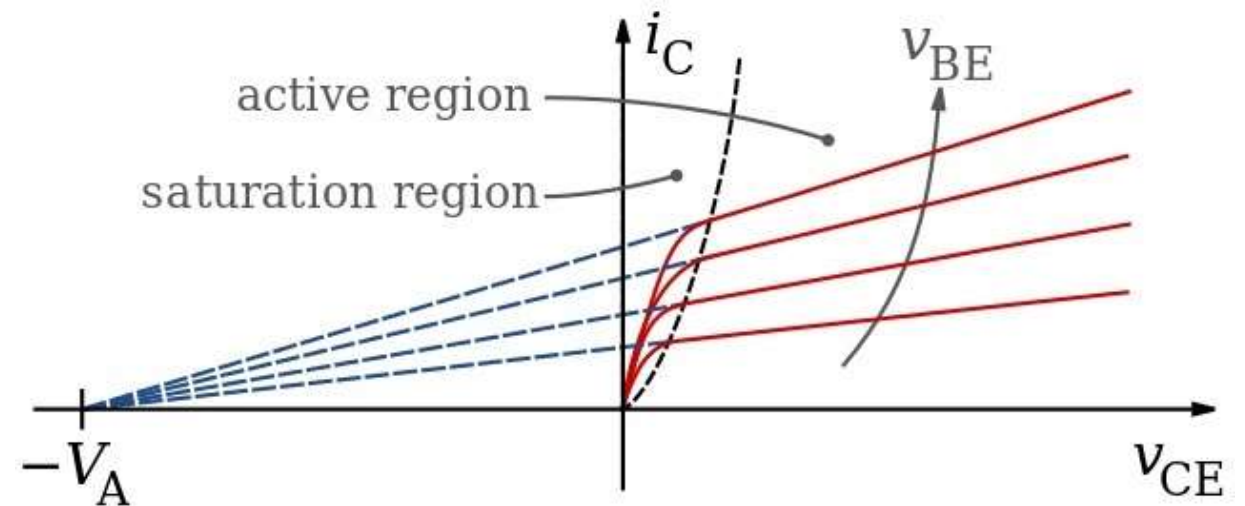
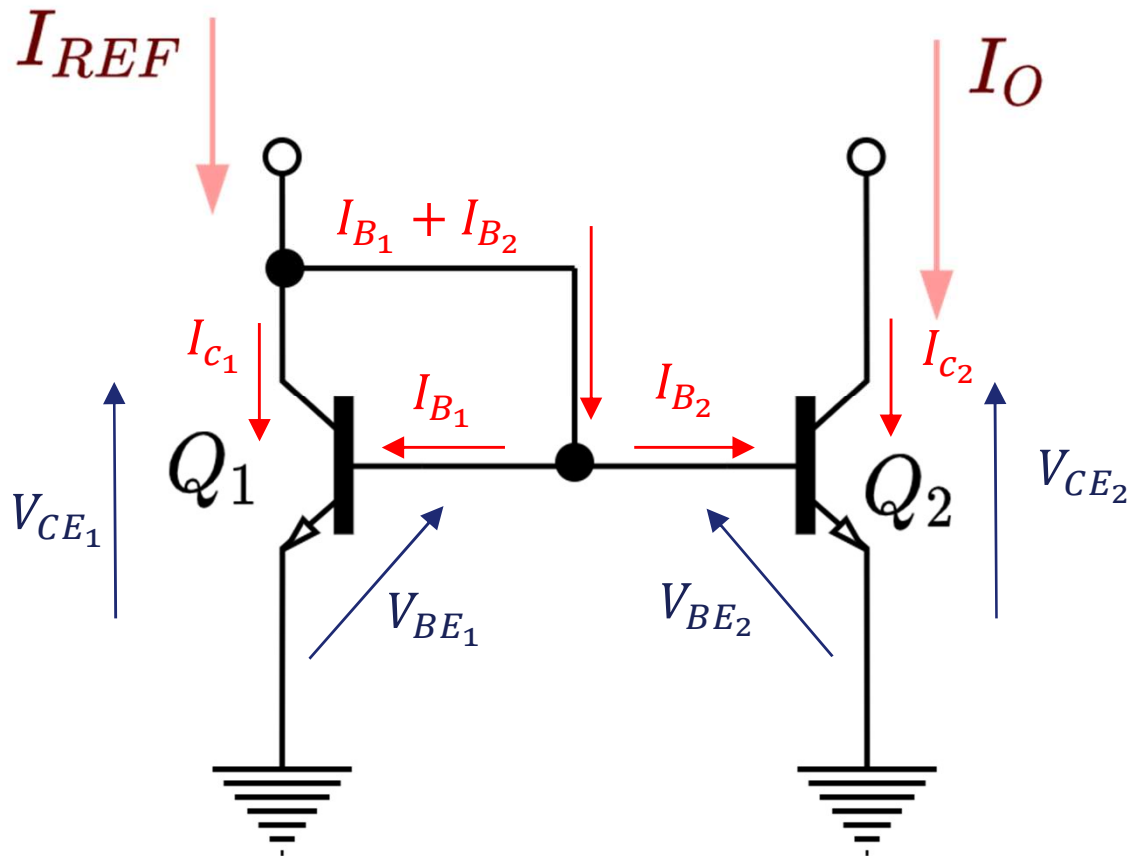
$$\Rightarrow I_O = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{N+1}{\beta}}$$



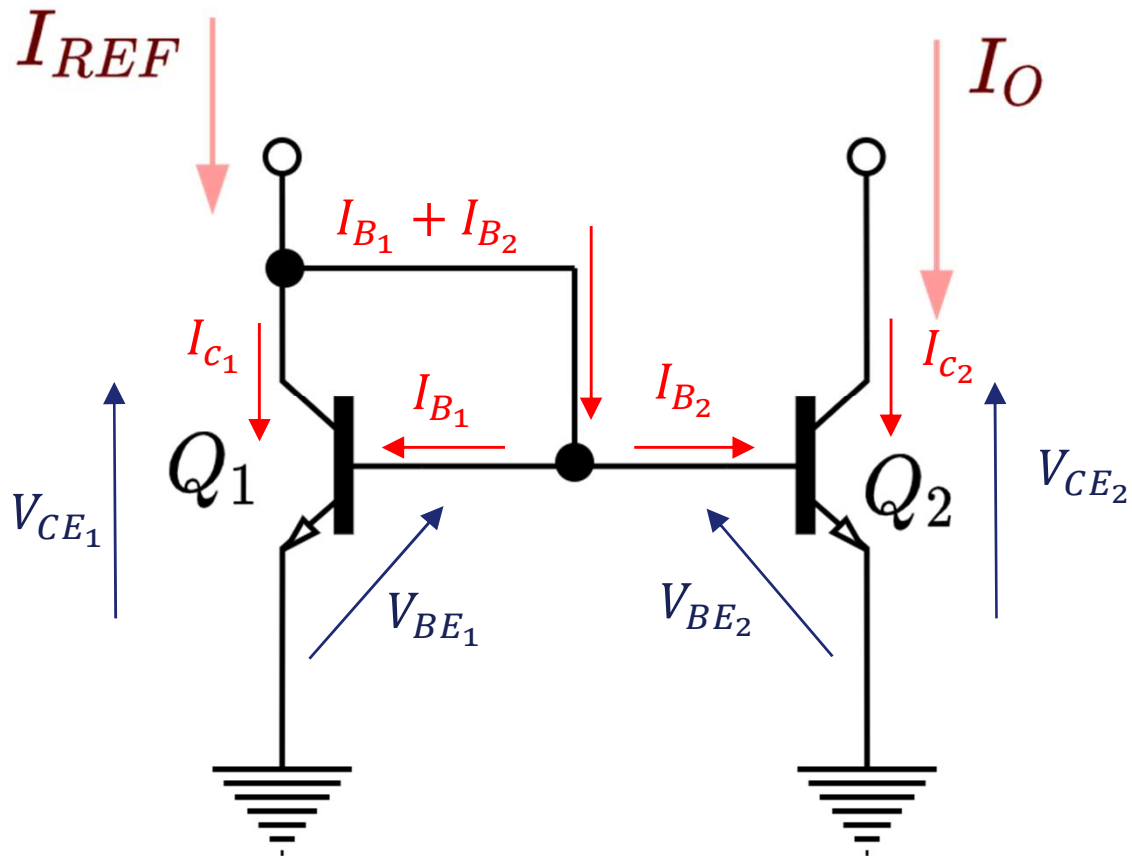
# FUENTE ESPEJO

3° APROXIMACIÓN  $V_A \not\rightarrow \infty$   $\beta \not\gg 1$

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \cdot \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$



# FUENTE ESPEJO



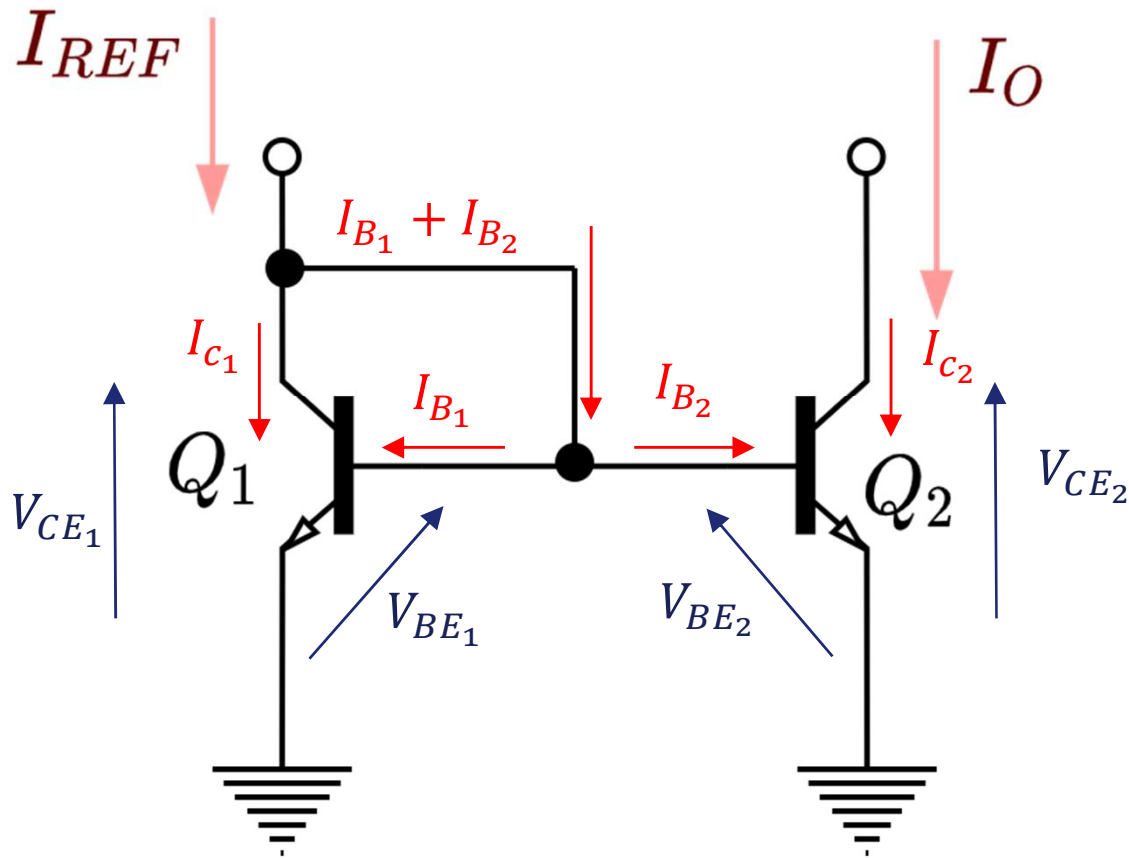
3° APROXIMACIÓN  $V_A \not\rightarrow \infty$   $\beta \not\gg 1$

$$\frac{I_{C_2} = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE_2}}{V_T}} \cdot \left(1 + \frac{V_{CE_2}}{V_A}\right)}{I_{C_1} = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE_1}}{V_T}} \cdot \left(1 + \frac{V_{CE_1}}{V_A}\right)} = K$$

Se define el **factor K** como la proporción entre las corrientes de colector, y depende esencialmente de cómo se cargan los circuitos (diferencia de  $V_{CE}$ ).

$$K = \frac{I_{C_2}}{I_{C_1}}$$

# FUENTE ESPEJO



3° APROXIMACIÓN  $V_A \not\rightarrow \infty$   $\beta \not\gg 1$

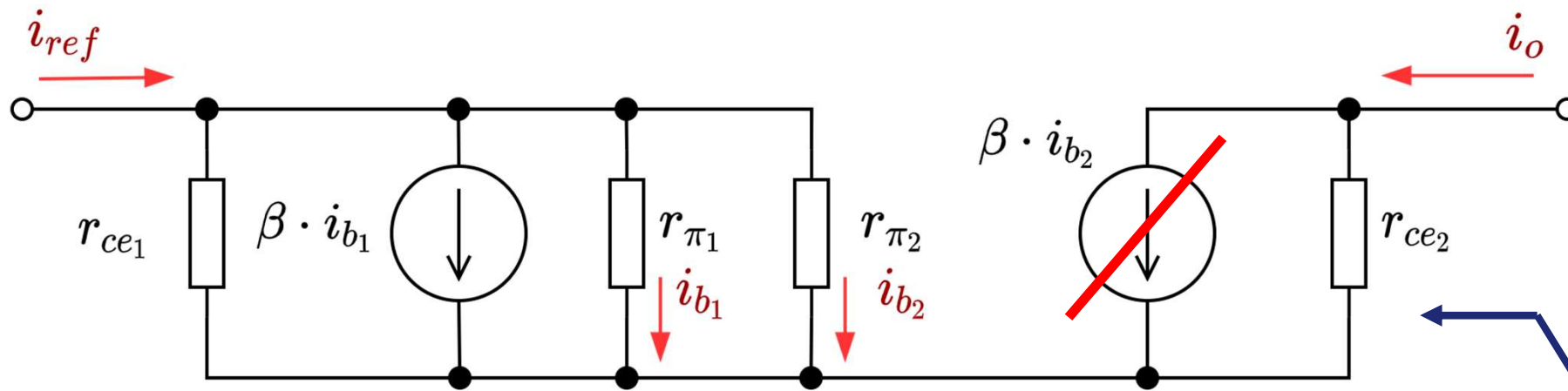
$$I_{REF} = I_{C_1} + I_{B_1} + I_{B_2}$$

$$I_{REF} = I_{C_1} + \frac{I_{C_1}}{\beta} + \frac{I_{C_1} \cdot K}{\beta}$$

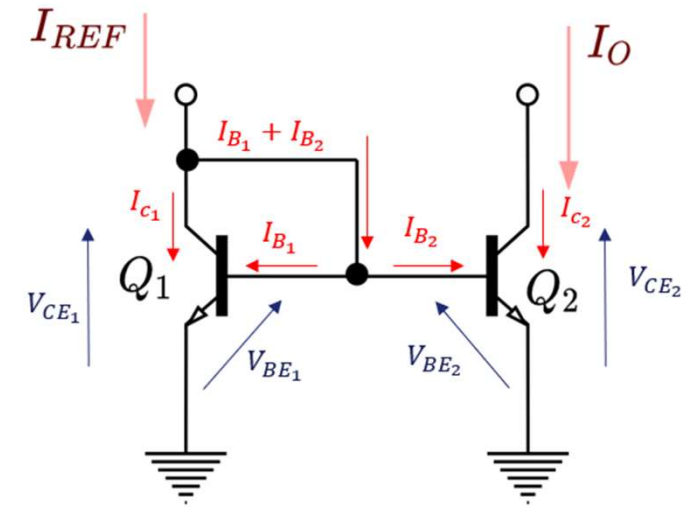
$$I_{REF} = I_{C_1} \cdot \left( 1 + \frac{K + 1}{\beta} \right)$$

$$\Rightarrow I_O = I_{C_2} = K \cdot I_{C_1} = \frac{I_{REF} \cdot K}{\left( 1 + \frac{K + 1}{\beta} \right)}$$

# FUENTE ESPEJO

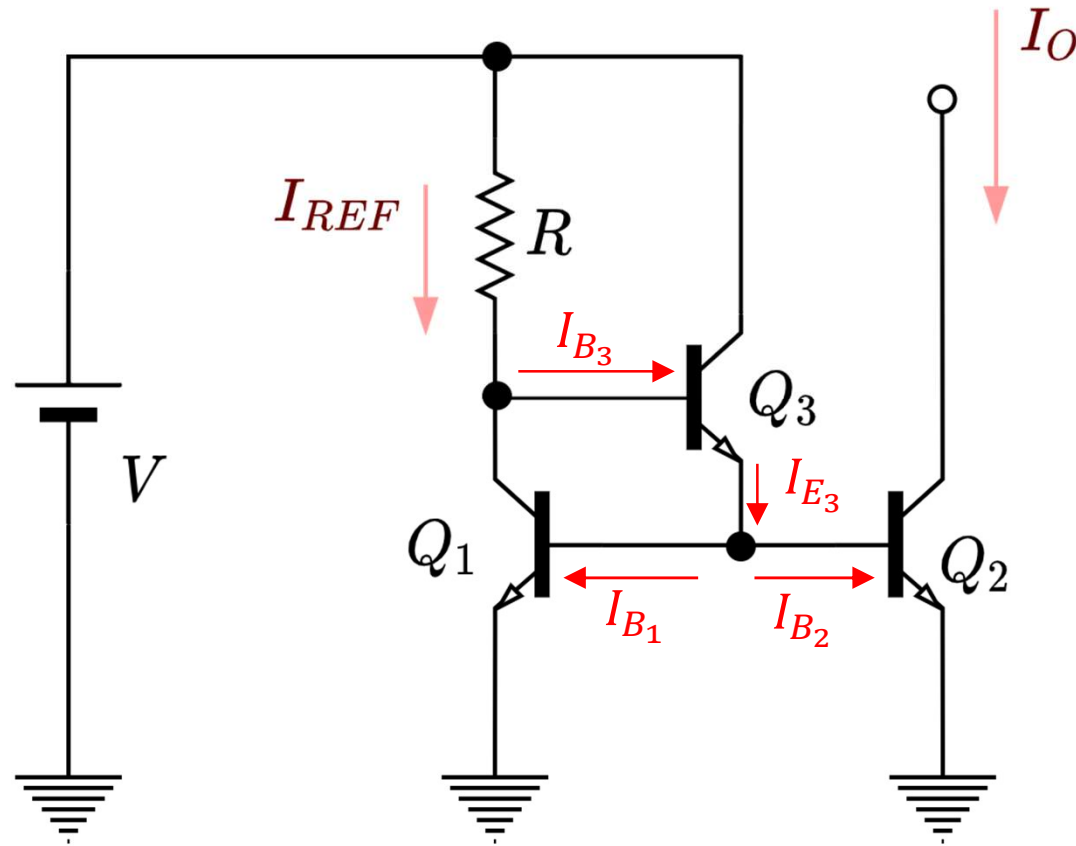


$$R_{OF} = r_{ce2}$$



# FUENTE ESPEJO MEJORADA

2° APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \not\gg 1$



$$V_{BE_1} = V_{BE_2} \Rightarrow I_{B_1} = I_{B_2} = \frac{I_{C_1}}{\beta}$$

$$I_{C_1} = I_{REF} - I_{B_3} = I_{REF} - \frac{I_{B_1} + I_{B_2}}{\beta + 1}$$

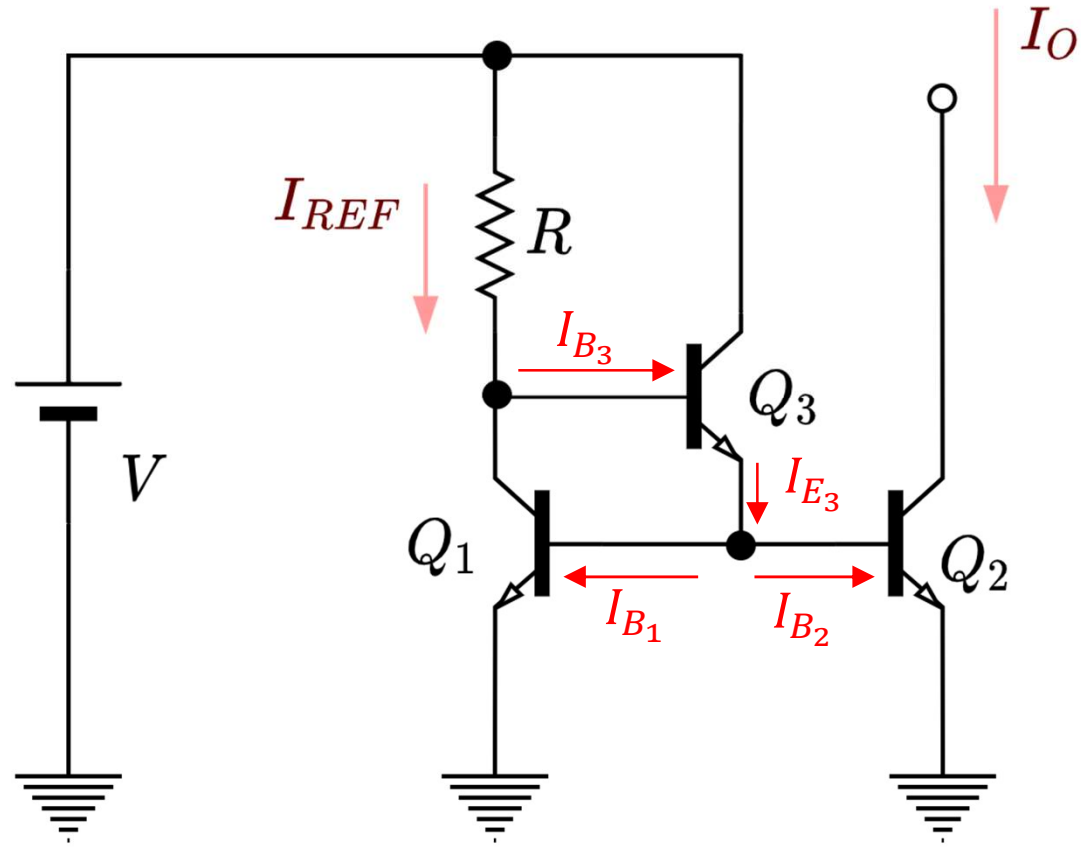
$$I_{C_1} = I_{REF} - 2 \cdot \frac{I_{C_1}}{\beta} \cdot \left( \frac{1}{\beta + 1} \right)$$

$$I_{C_1} \cdot \left( 1 + \frac{2}{\beta \cdot (1 + \beta)} \right) = I_{REF}$$

# FUENTE ESPEJO MEJORADA

## 2° APROXIMACIÓN $V_A \rightarrow \infty$ $\beta \not\gg 1$

$$\Rightarrow I_O = I_{C_2} = I_{C_1} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta \cdot (1 + \beta)}}$$

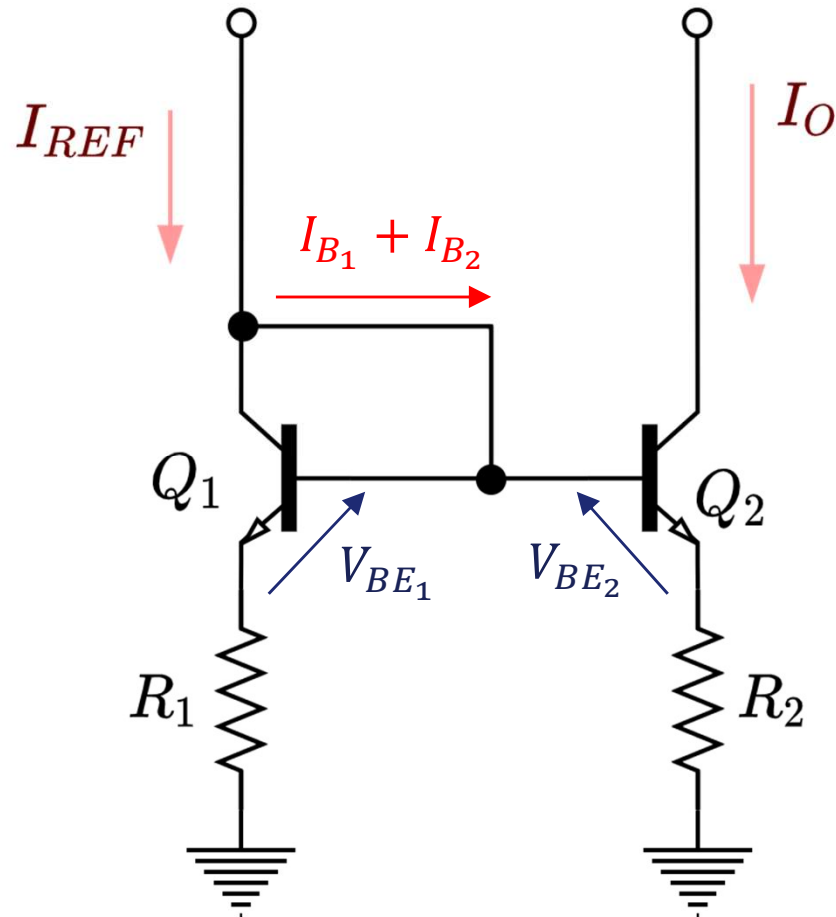


## ¿Qué es lo que se mejora?

## ¿Cambia la impedancia de salida?

# FUENTE ESPEJO PROPORCIONAL

1º APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$



$$I_{REF} = I_{C_1} \quad I_O = I_{C_2}$$

$$V_{BE_1} + R_1 \cdot I_{C_1} = V_{BE_2} + R_2 \cdot I_{C_2}$$

$$\begin{cases} V_{BE_1} = V_{BE_{ON}} + \Delta V_{BE_1} \\ V_{BE_2} = V_{BE_{ON}} + \Delta V_{BE_2} \end{cases}$$

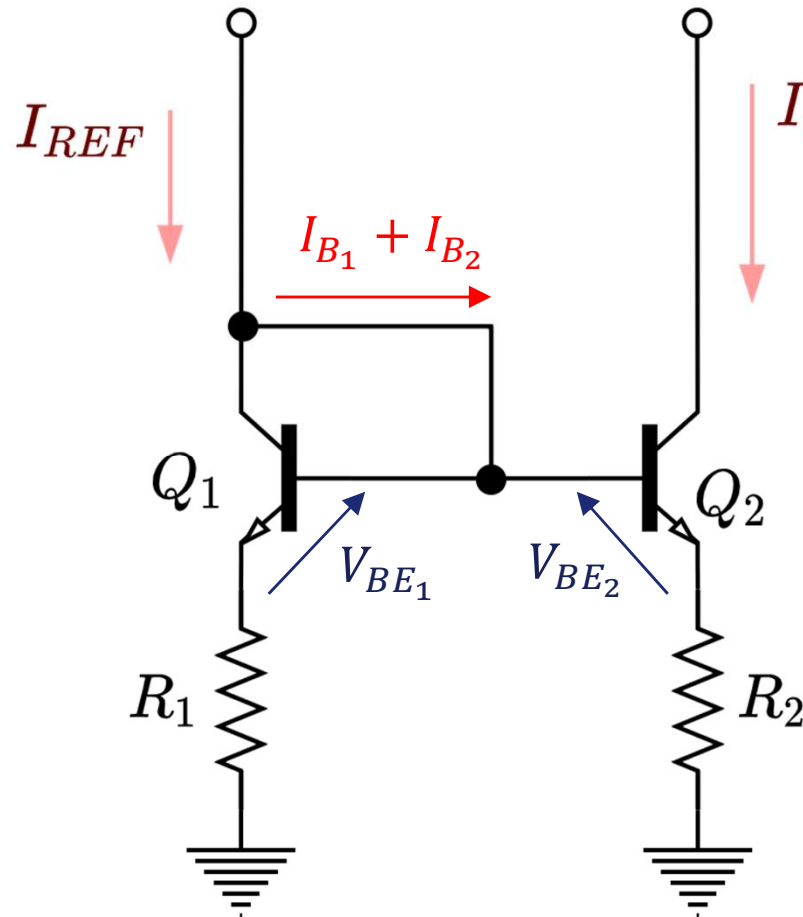
Esta es justamente lo que solemos hacer siempre, pero acá es importante hacer **énfasis** en el concepto! Supongamos que en realidad,

$$V_{BE_1} = 0,65V = \mathbf{0,7V} - 0,05V$$

$$V_{BE_2} = 0,73V = \mathbf{0,7V} + 0,03V$$

# FUENTE ESPEJO PROPORCIONAL

1º APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$



$$I_{REF} = I_{C_1} \quad I_O = I_{C_2}$$

$$V_{BE_1} + R_1 \cdot I_{C_1} = V_{BE_2} + R_2 \cdot I_{C_2}$$

$$(\cancel{V_{BE_{ON}}} + \Delta V_{BE_1}) + R_1 \cdot I_{C_1} = (\cancel{V_{BE_{ON}}} + \Delta V_{BE_2}) + R_2 \cdot I_{C_2}$$

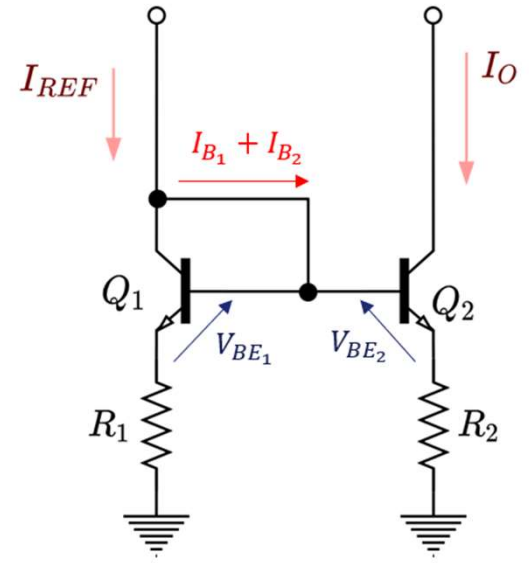
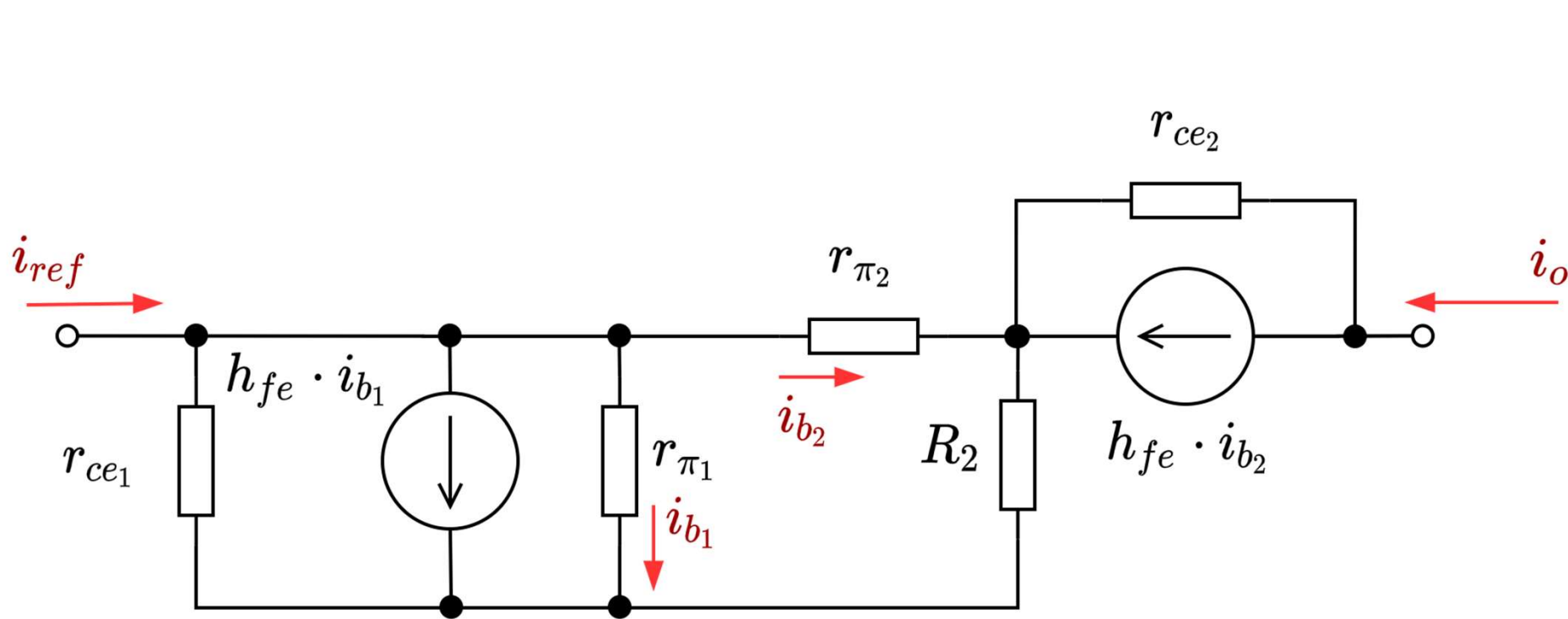
$$\Delta V_{BE_1} + R_1 \cdot I_{C_1} = \Delta V_{BE_2} + R_2 \cdot I_{C_2}$$

$$\Delta V_{BE_i} \ll R_i \cdot I_{C_i} \Rightarrow \Delta V_{BE_i} + R_i \cdot I_{C_i} \approx R_i \cdot I_{C_i}$$

$$R_1 \cdot I_{C_1} \approx R_2 \cdot I_{C_2} \quad \Rightarrow \quad I_O \approx I_{REF} \cdot \left( \frac{R_1}{R_2} \right)$$



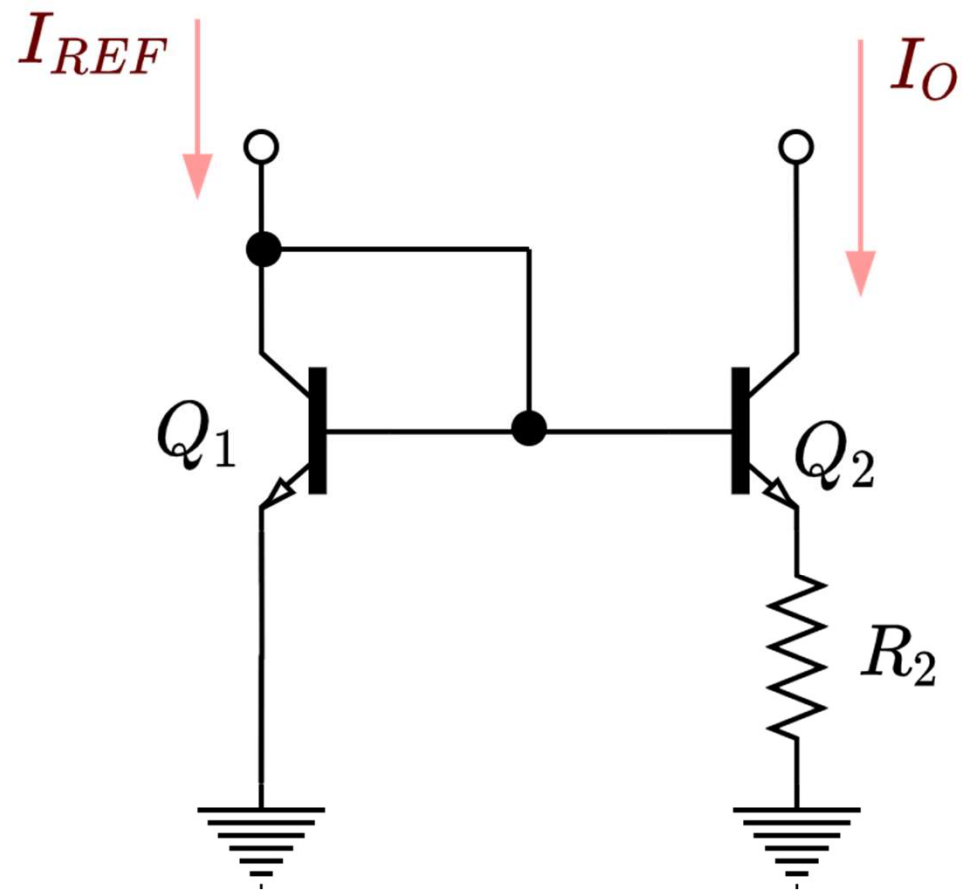
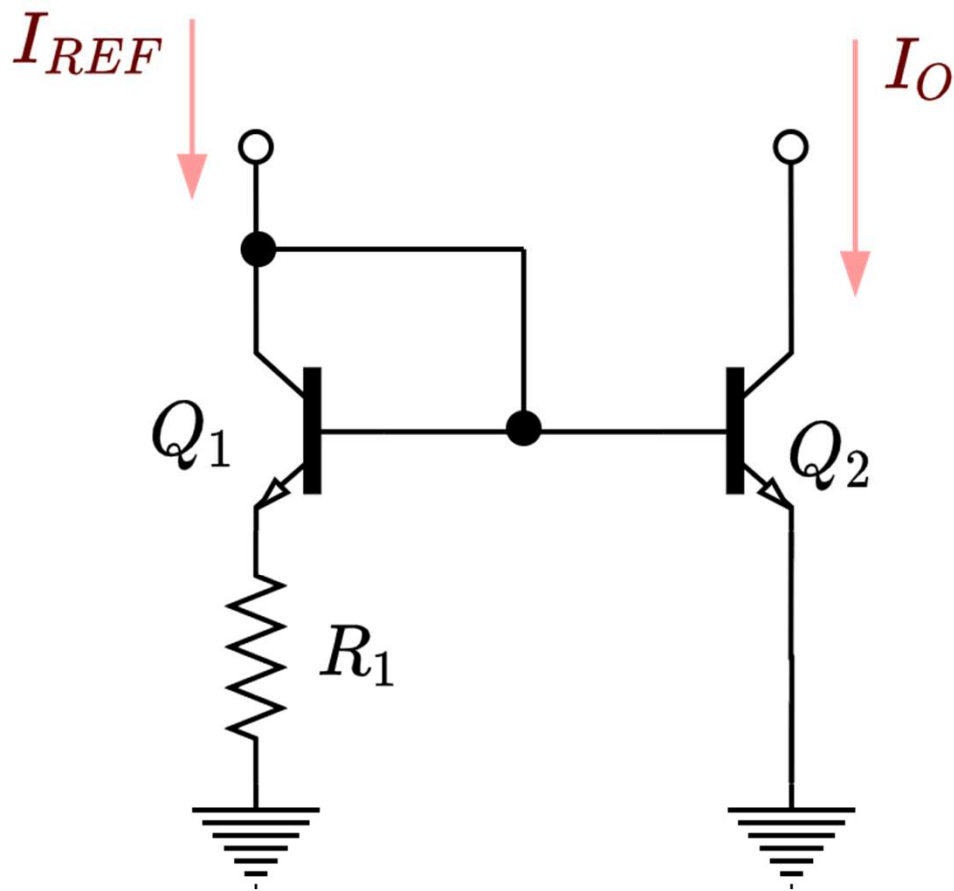
# FUENTE ESPEJO PROPORCIONAL



$$R_{OF} \approx r_{ce2} \cdot (1 + h_{fe}^*)$$

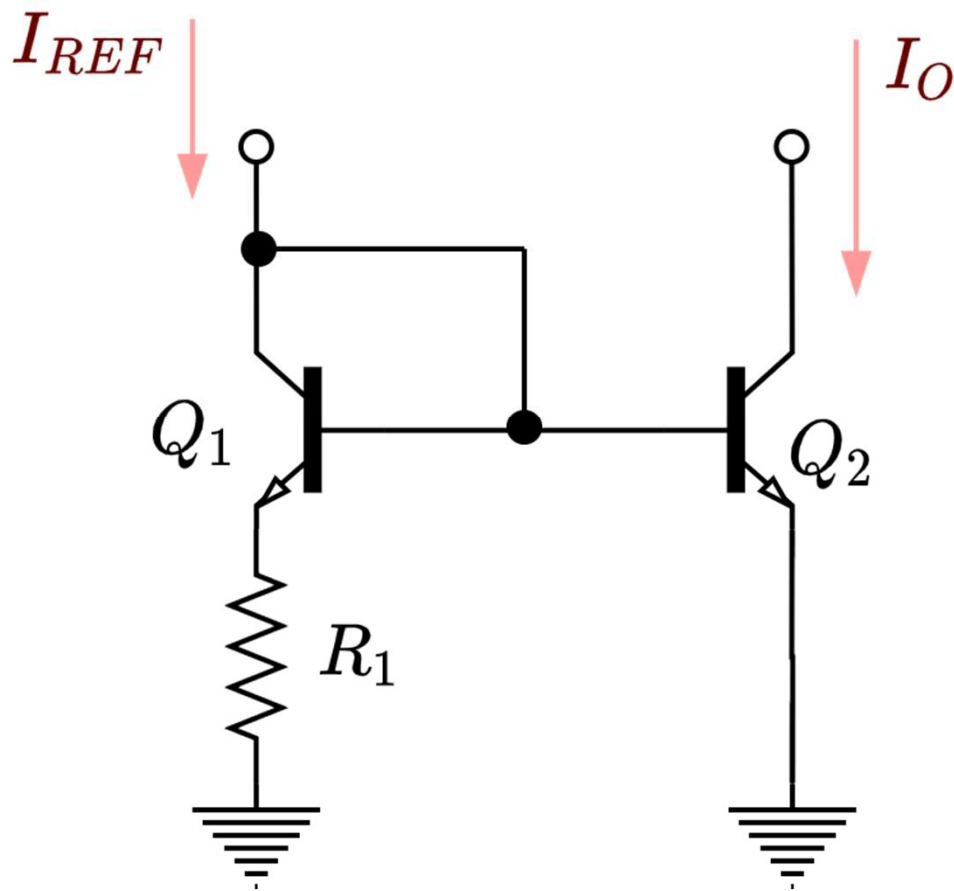
# FUENTE WIDLAR

*Respecto de la configuración fuente espejo simple, agrega una resistencia en el emisor de alguno de las mallas, referencia o salida.*



# FUENTE WIDLAR

*Respecto de la configuración fuente espejo simple, agrega una resistencia en el emisor de alguno de las mallas, referencia o salida.*

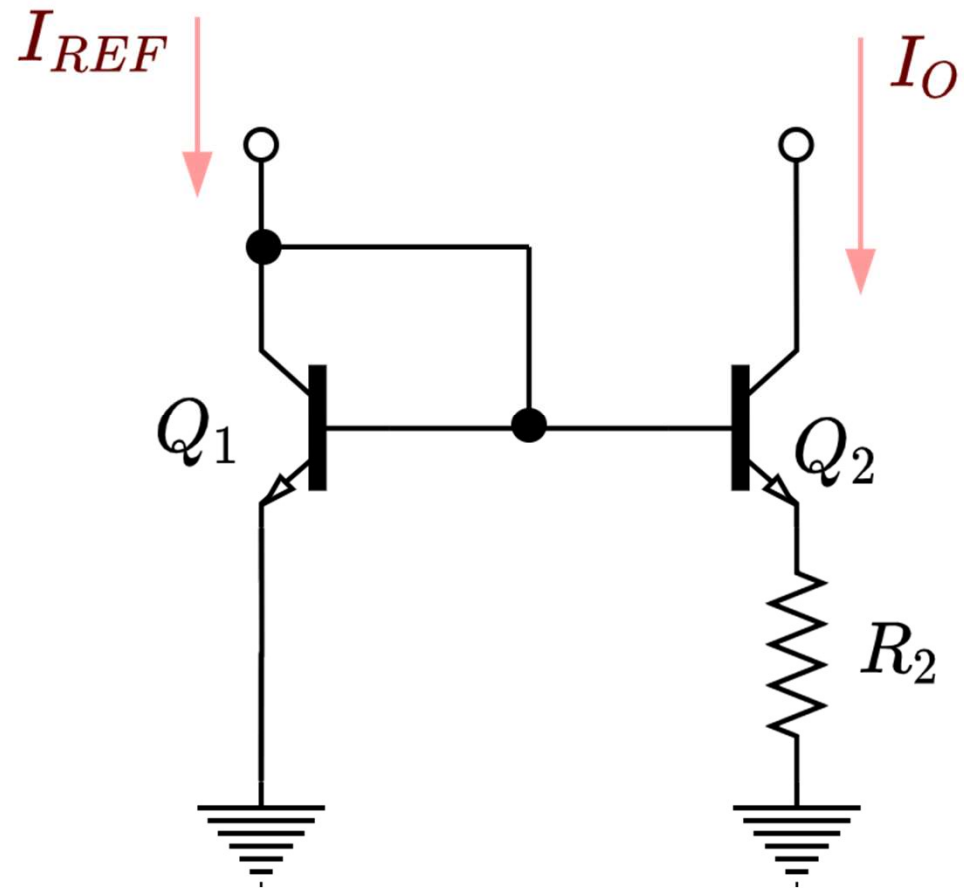


La tensión  $V_{BE}$  del transistor con la resistencia en el emisor, será menor que la del otro. En consecuencia, [...], su corriente es menor.

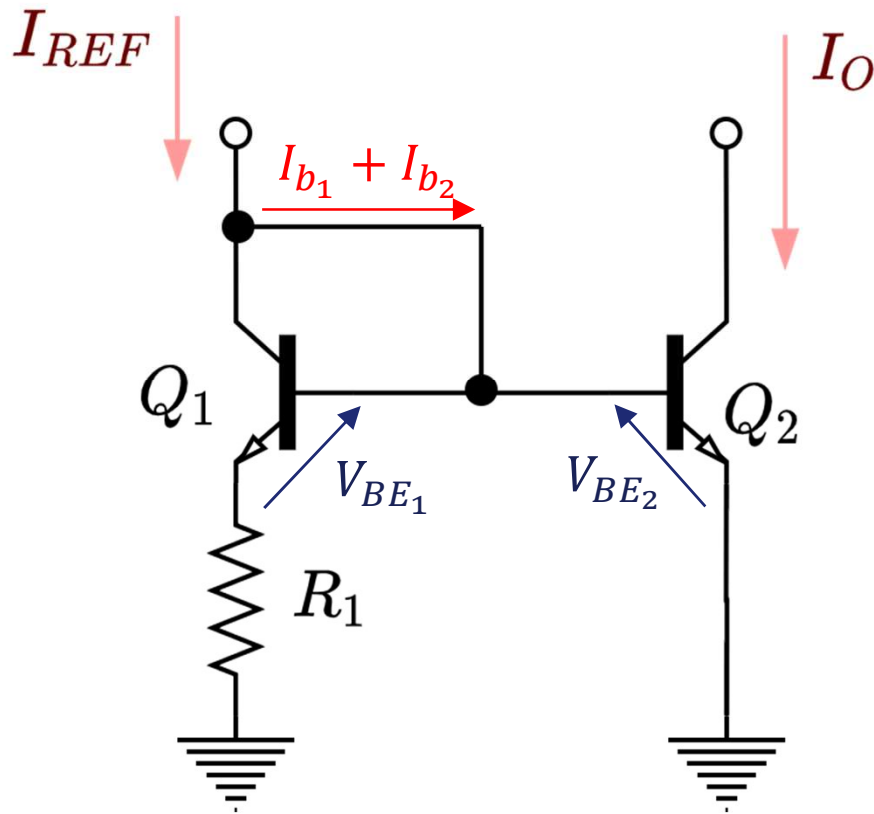
# FUENTE WIDLAR

*Respecto de la configuración fuente espejo simple, agrega una resistencia en el emisor de alguno de las mallas, referencia o salida.*

Cuando la resistencia en el emisor está en la rama salida, la impedancia de salida crece como vimos con la fuente proporcional.



# FUENTE WIDLAR



1º APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$

$$I_{REF} = I_{C1} \quad I_O = I_{C2}$$

$$V_{BE2} = V_{BE1} + R_1 \cdot I_{C1}$$

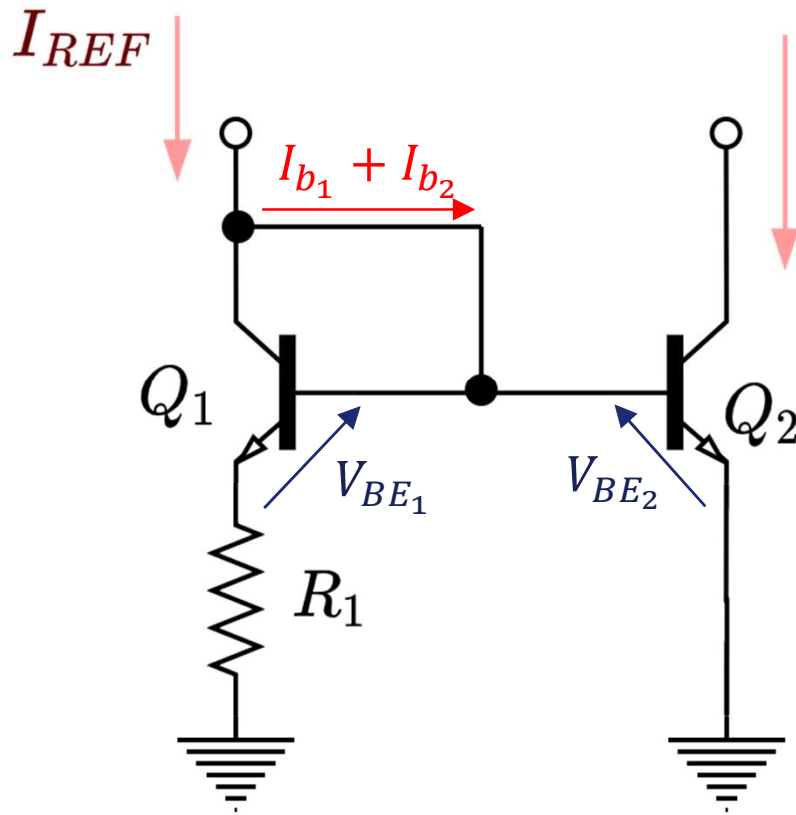
$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad \Rightarrow V_{BE} = V_T \cdot \ln \left( \frac{I_C}{I_S} \right)$$

$$V_T \cdot \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_S} \right) = V_T \cdot \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_S} \right) + R_1 \cdot I_{C1}$$

$$V_T \cdot \left[ \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_S} \right) - \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_S} \right) \right] = R_1 \cdot I_{C1}$$

# FUENTE WIDLAR

1º APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$

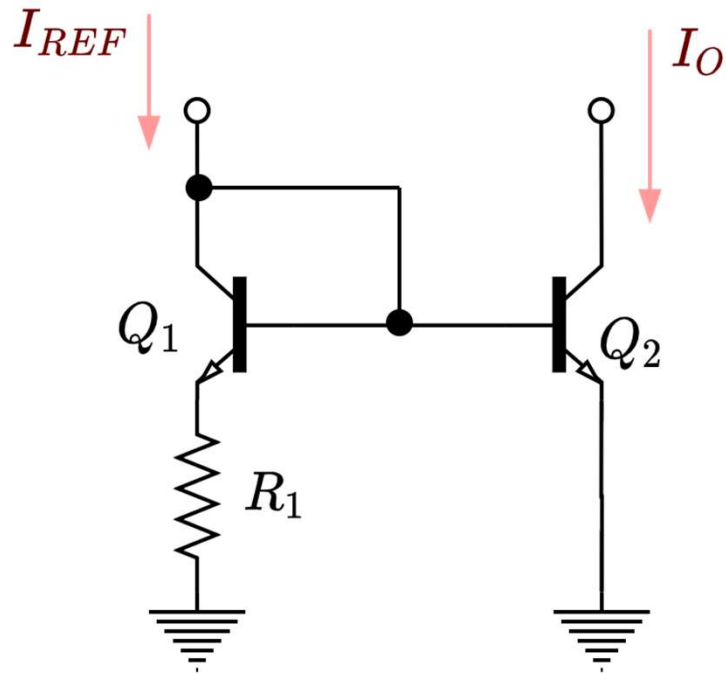


$$V_T \cdot \left[ \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_S} \right) - \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_S} \right) \right] = R_1 \cdot I_{C1}$$

$$\Rightarrow V_T \cdot \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_{C1}} \right) = R_1 \cdot I_{C1}$$

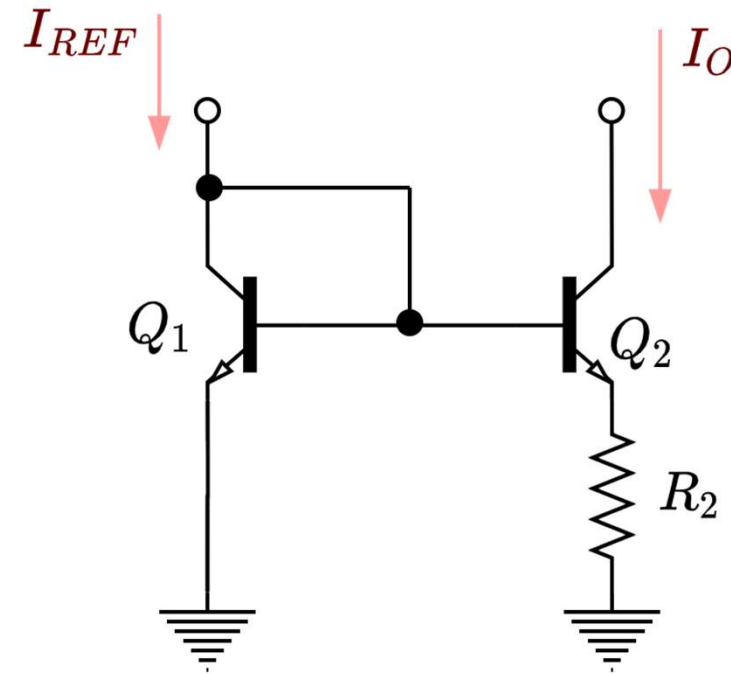
$$\Rightarrow \left( \frac{V_T}{R_1} \right) \cdot \ln \left( \frac{I_O}{I_{REF}} \right) = I_{REF}$$

# FUENTE WIDLAR



$$\left(\frac{V_T}{R_1}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_O}{I_{REF}}\right) = I_{REF}$$

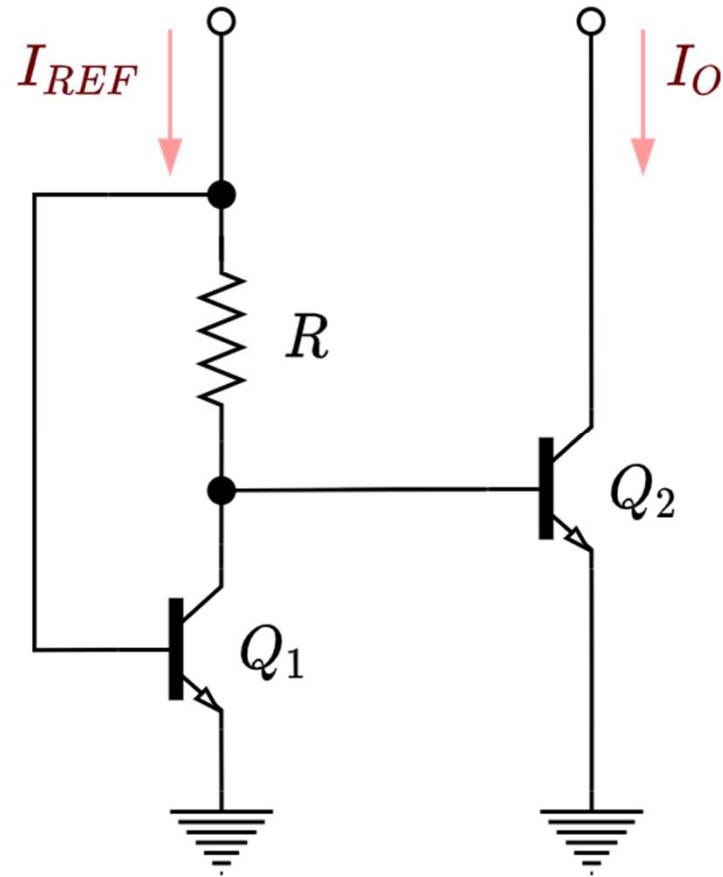
$$R_{OF} = r_{ce2}$$



$$\left(\frac{V_T}{R_1}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{REF}}{I_O}\right) = I_O$$

$$R_{OF} \approx r_{ce2} \cdot (1 + h_{fe}^*)$$

# FUENTE PEAK CURRENT



1º APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$

$$I_{REF} = I_{C1} \quad I_O = I_{C2}$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} + R \cdot I_{C1}$$

$$V_T \cdot \left[ \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_S} \right) - \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_S} \right) \right] = R \cdot I_{C1}$$

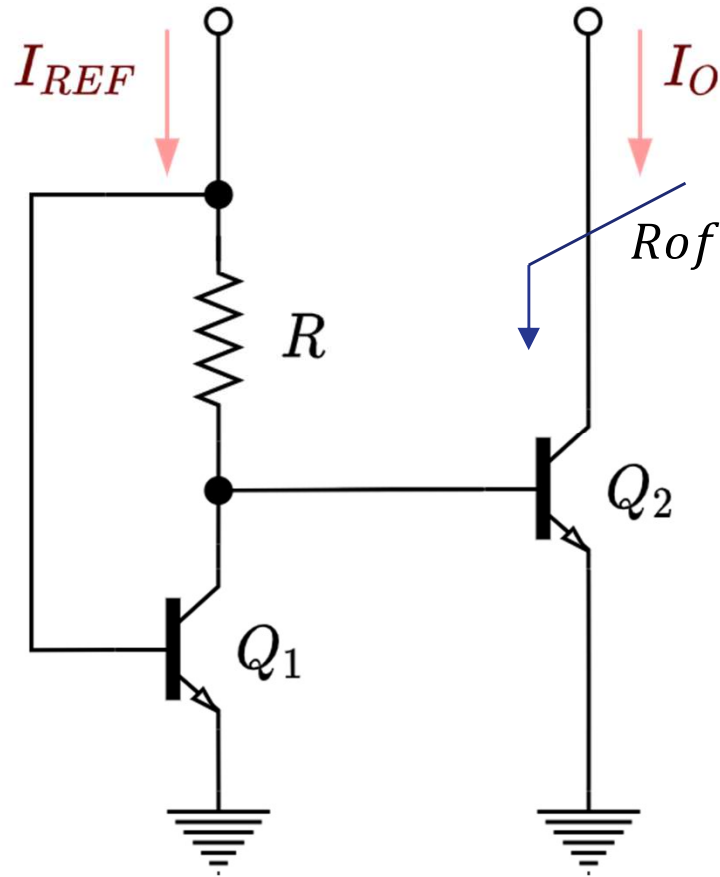
$$\Rightarrow V_T \cdot \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right) = R \cdot I_{C1}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{V_T}{R} \right) \cdot \ln \left( \frac{I_{REF}}{I_O} \right) = I_{REF}$$



# FUENTE PEAK CURRENT

1º APROXIMACIÓN  $V_A \rightarrow \infty$   $\beta \gg 1$



$$\Rightarrow \left( \frac{V_T}{R} \right) \cdot \ln \left( \frac{I_{REF}}{I_O} \right) = I_{REF}$$

$$\Rightarrow I_O = I_{REF} \cdot e^{-\frac{I_{REF} \cdot R}{V_T}}$$

$$R_{OF} = r_{ce2}$$

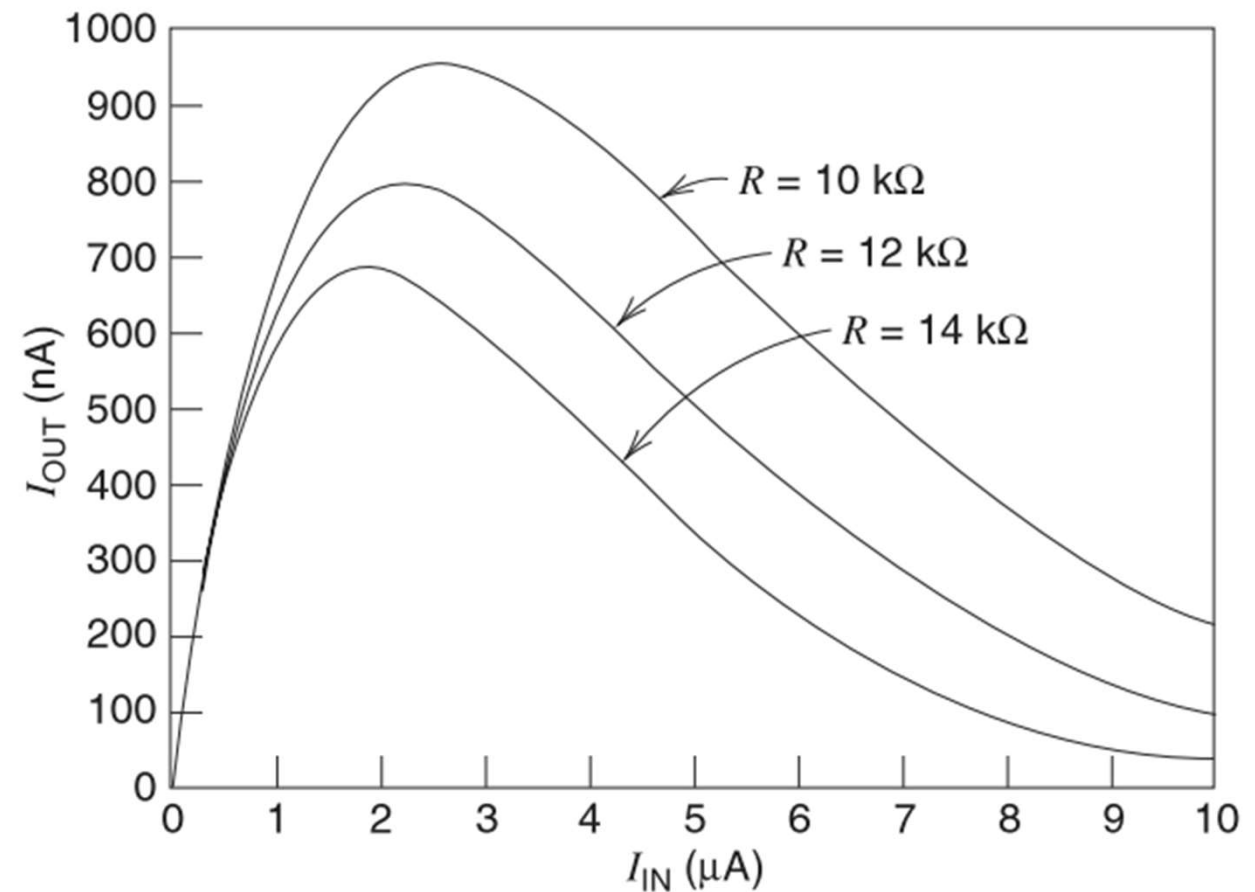
# FUENTE PEAK CURRENT

$$I_O = I_{REF} \cdot e^{-\frac{I_{REF} \cdot R}{V_T}}$$

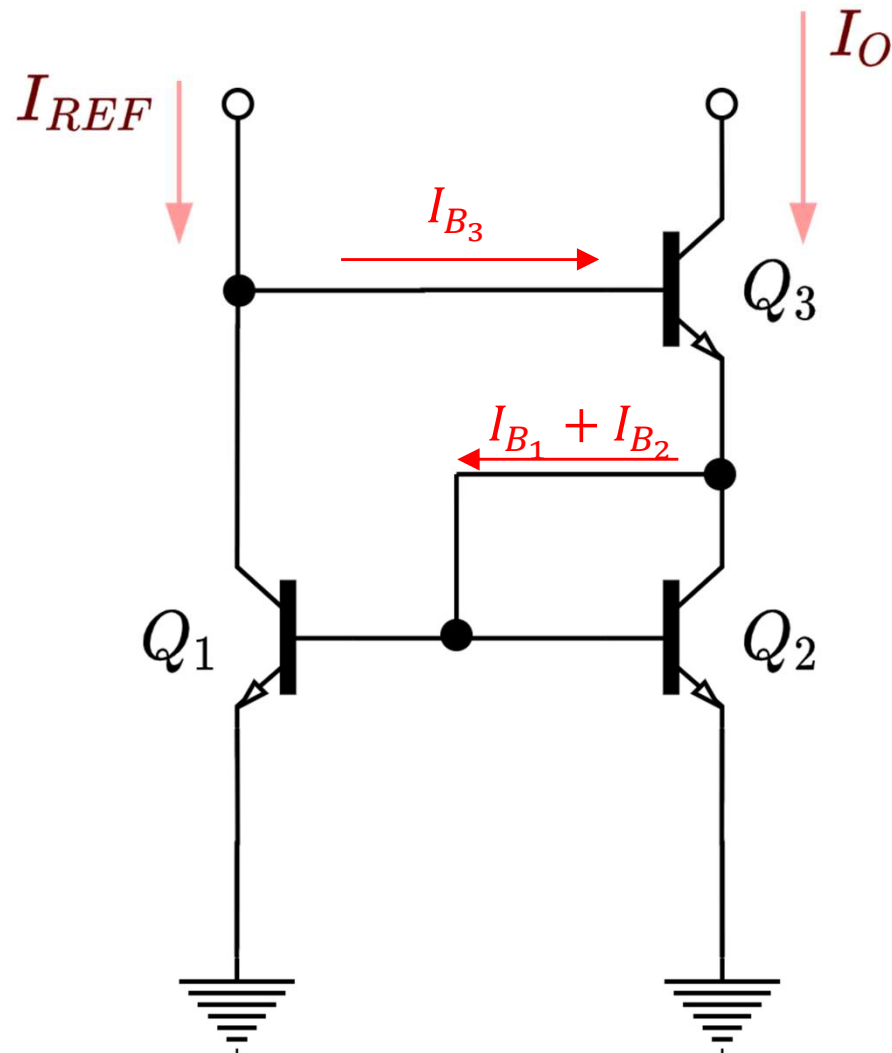
¿Qué beneficios trae esta fuente?

$$\frac{\partial I_O}{\partial I_{REF}} = 0$$

$$I_{REF} = \frac{V_T}{R} \quad I_O = I_{REF} \cdot e^{-1}$$



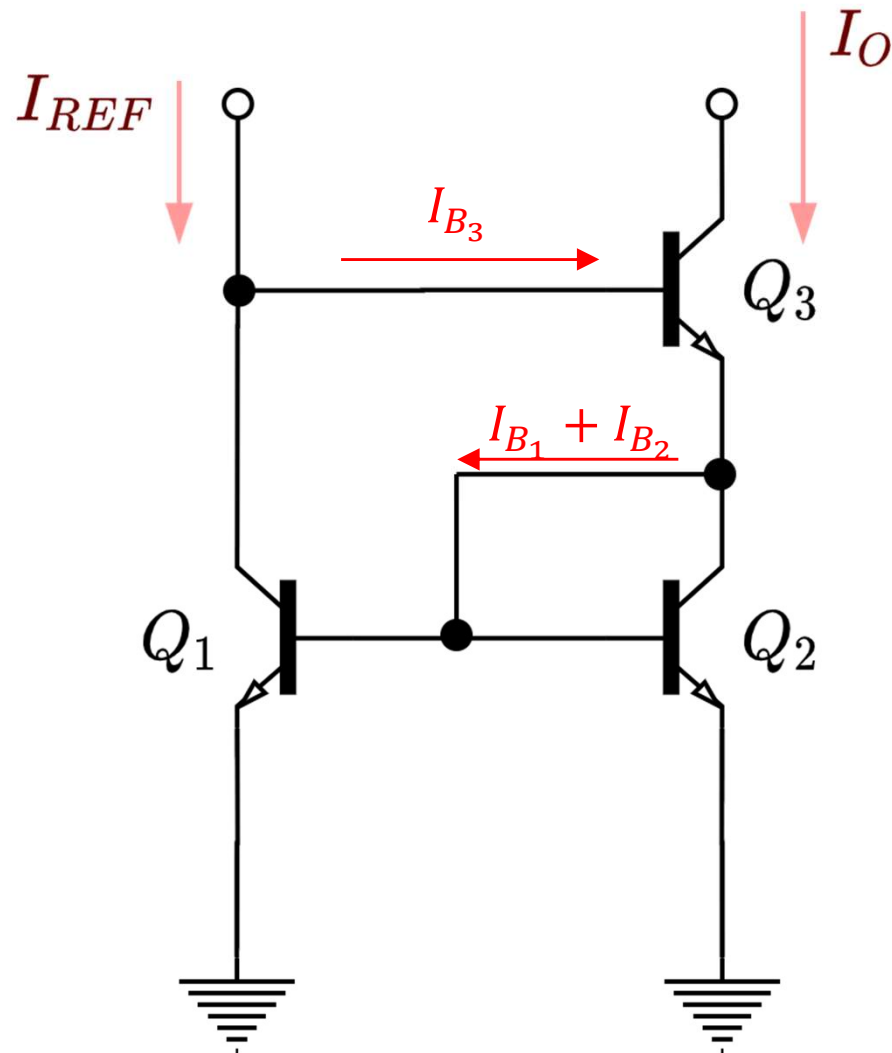
# FUENTE WILSON



(1) En 1º aproximación, [...], como fuente de corriente relacional posee las mismas características que una fuente de corriente espejo, no nos debería sorprender **pues no modificamos la malla de polarización.**

$$I_O \approx I_{REF}$$

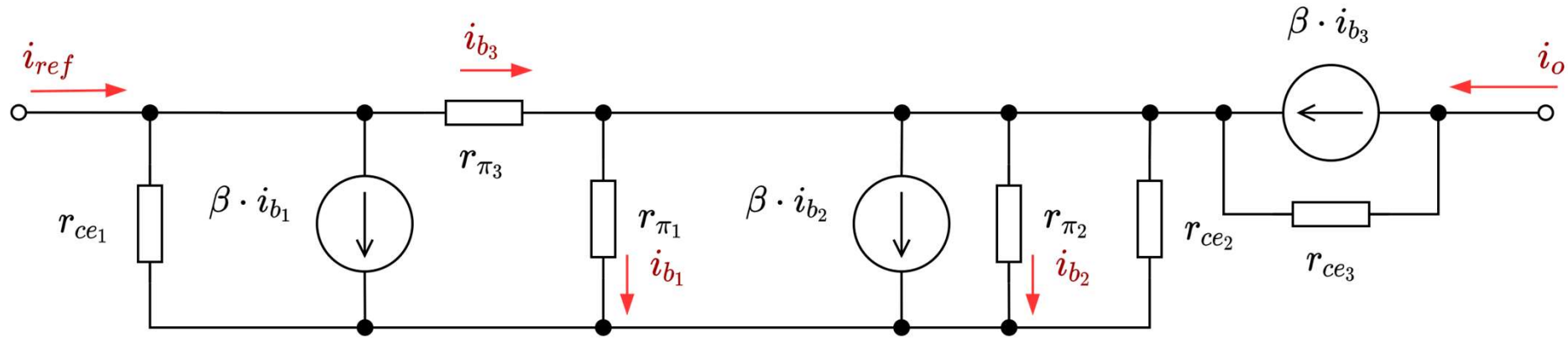
# FUENTE WILSON



(2) En 2° aproximación, [...], como fuente de corriente relacional posee un menor error de copia por la cascada de amplificación de corriente.

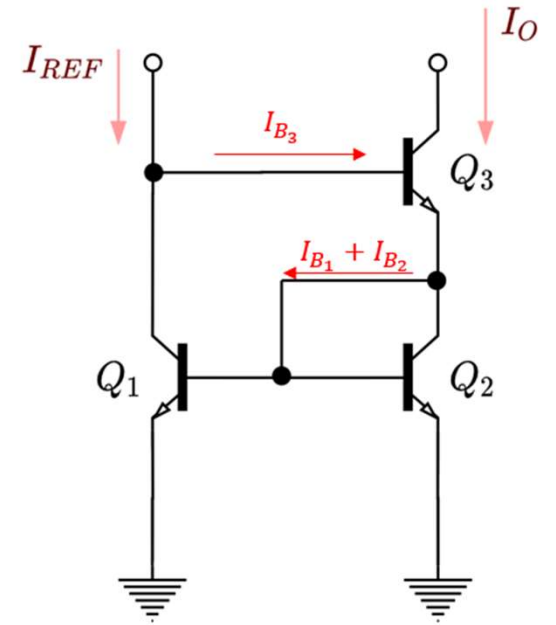
$$I_O \approx I_{REF} \cdot \left[ 1 - \frac{2}{\beta^2 + 2 \cdot \beta + 2} \right]$$

# FUENTE WILSON



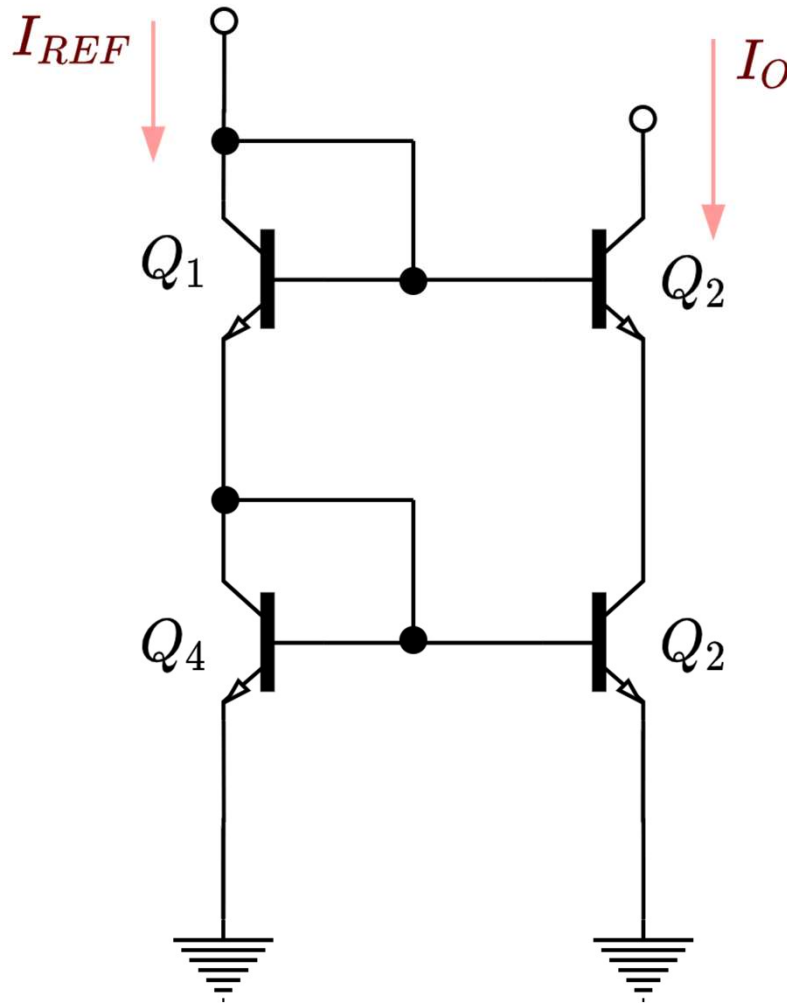
PROTIP, considerar que  $r_{\pi_1} = r_{\pi_2} = r_{\pi_3} = r_{\pi}$  y despreciar  $r_{ce1}, r_{ce2}$

$$R_{OF} \approx \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot r_{ce3}$$



# FUENTE CASCODE

Con los mismos criterios y aproximaciones que con la fuente Wilson, de acá se puede deducir que, en 2° aproximación la corriente se expresa de la siguiente forma, y además su impedancia de salida es,



$$I_O \approx I_{REF} \cdot \left( 1 - \frac{(4 \cdot \beta + 2)}{(\beta^2 + 4 \cdot \beta + 2)} \right)$$

$$R_{OF} \approx \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot r_{ce2}$$

ESPEJO SIMPLE	ESPEJO MEJORADA	ESPEJO PROPORCIONAL	WIDLAR	PCS	WILSON	CASCODE
Impedancia media	Impedancia media	≈ Impedancia alta	≈ Impedancia alta	Impedancia media	Alta Impedancia	Alta Impedancia
Corriente igual	Corriente igual	Corriente proporcional	Corriente exponencial	Corriente estabilizada*	Corriente igual	Corriente igual
Sensible a diferencias de junturas	Sensible a diferencias de junturas	Poco sensible a diferencias de junturas [...]	Sensible a diferencias de junturas	Sensible a diferencias de junturas	Sensible a diferencias de junturas	Sensible a diferencias de junturas
Error de copia con $\beta$	Error de copia con $\beta^2$	Error de copia con $\beta$	Error de copia con $\beta$	Error de copia con $\beta$	Error de copia con $\beta^2$	Error de copia con $\beta$
2 transistores	3 transistores	2 transistores 2 resistencias	2 transistores 1 resistencia	2 transistores 1 resistencia	3 transistores	4 transistores

De menor a mayor sofisticación

