

# **ELECTRONICA APLICADA I**

Profesor Titular Dr Ing. Guillermo Riva

Profesor Adjunto Ing. Martin Guido

## **Fuentes de corriente y cargas activas con transistores bipolares.**

- **Introducción.**
- **Fuente de Corriente Básica con BJT.**
- **Fuente de Corriente Básica modificada con BJT.**
- **Fuente de corriente Widlar con BJT.**
- **Fuente de corriente Cascode.**
- **Fuente de corriente Wilson con BJT.**
- **Fuente de corriente Múltiple con BJT.**
- **Fuente de corriente JFET y BJT.**

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

## *Introducción*

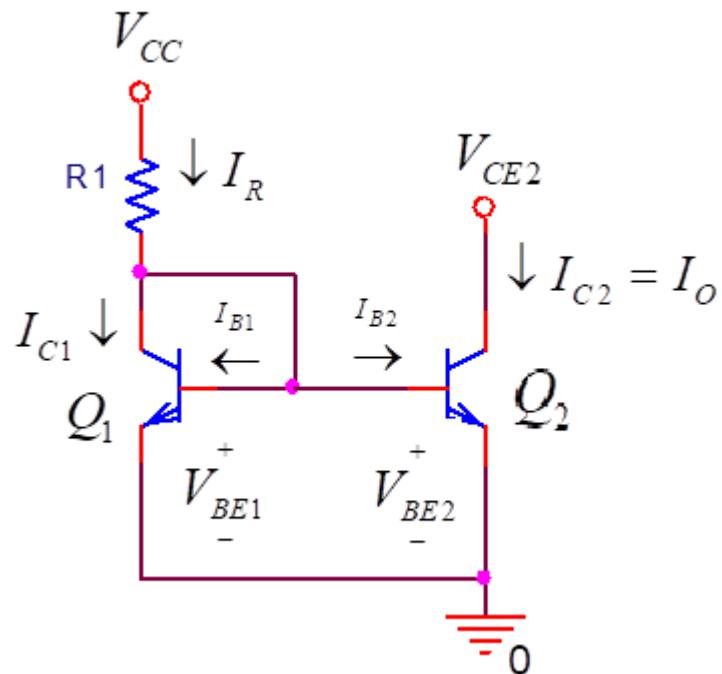
*Los circuitos integrados analógicos utilizan fuentes de corriente de transistores como elemento de polarización y como carga.*

*Son menos sensibles a las variaciones de la fuente de alimentación y a la temperatura que los resistores.*

*Son mas economicas que los resistores ya que estos últimos requieren una mayor superficie en el oblea de silicio*

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente básica.*



$$Q_1 = Q_2$$

Dado que  $V_{BE1} = V_{BE2}$

$$I_{B1} = I_{B2}$$

$$I_{C1} = I_{C2}$$

$I_R$  : corriente de Referencia

$I_O$  : corriente de Salida

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente básica.*

$$I_R = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + 2I_{B1}$$

$$I_{C1} = \beta I_{B1} \Rightarrow I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta}$$

$$I_R = I_{C1} + 2 \frac{I_{C1}}{\beta} = I_{C1} \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right)$$

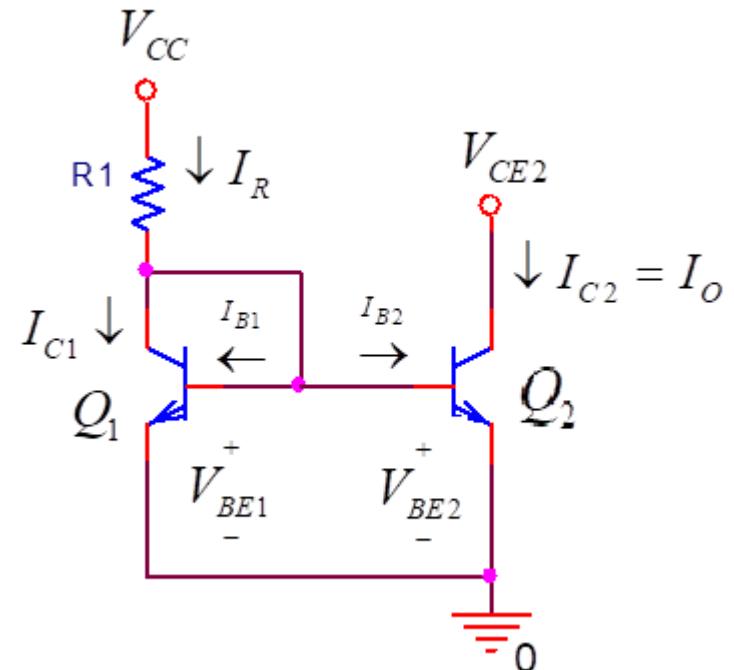
$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

$$\text{Donde } I_R = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_1}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_1} \times \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

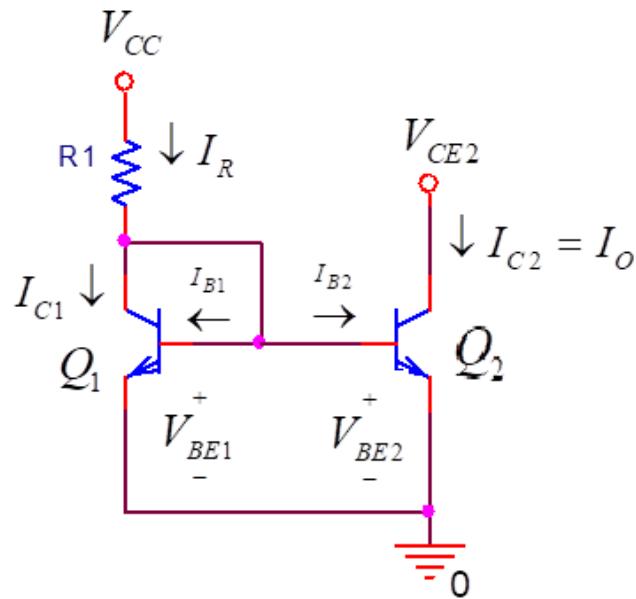
Si  $\beta \gg 2$

$$2025 \quad I_{C1} = I_{C2} \cong I_R$$



# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente básica.*



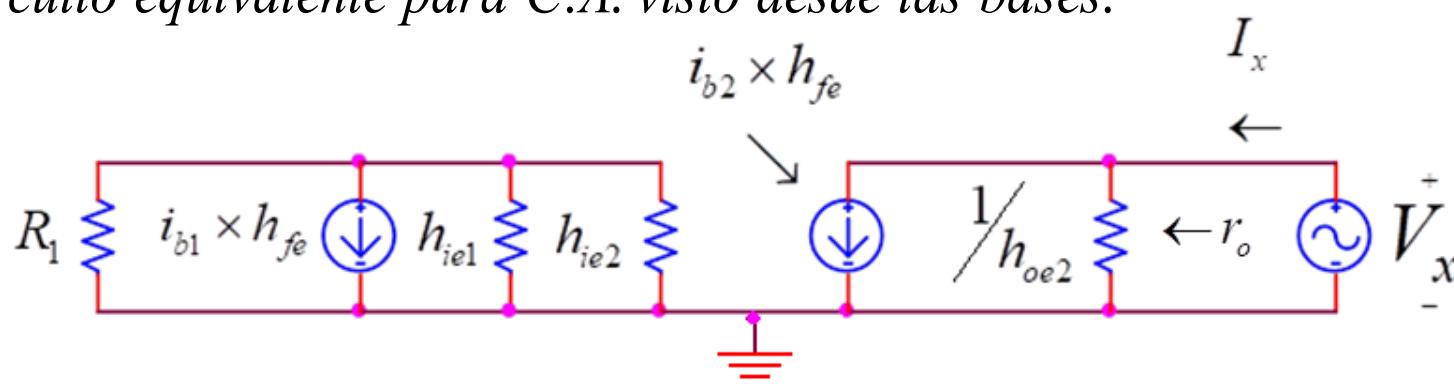
*Resistencia de salida*

$$r_o = \frac{V_x}{I_x} = \frac{1}{h_{oe2}} = \frac{V_A + V_{CE2}}{I_{C2}}$$

$V_A$ : Tensión de Early

$$50 \leq V_A \leq 300$$

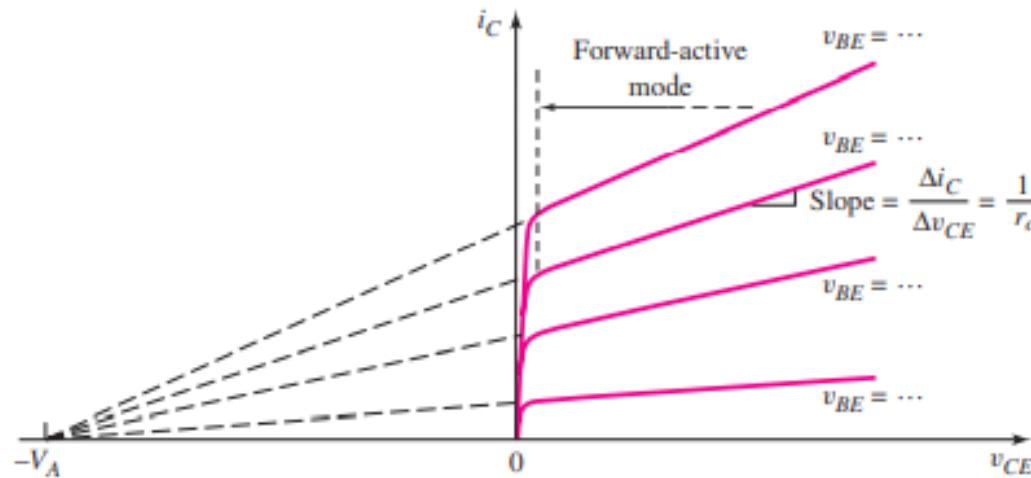
*Circuito equivalente para C.A. visto desde las bases.*



# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente basica. Efecto Early.*

*Determinacion resistencia de salida.*



$$i_C = I_s e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \quad i_C \text{ sin considerar el efecto de la } \Delta v_{CE}$$

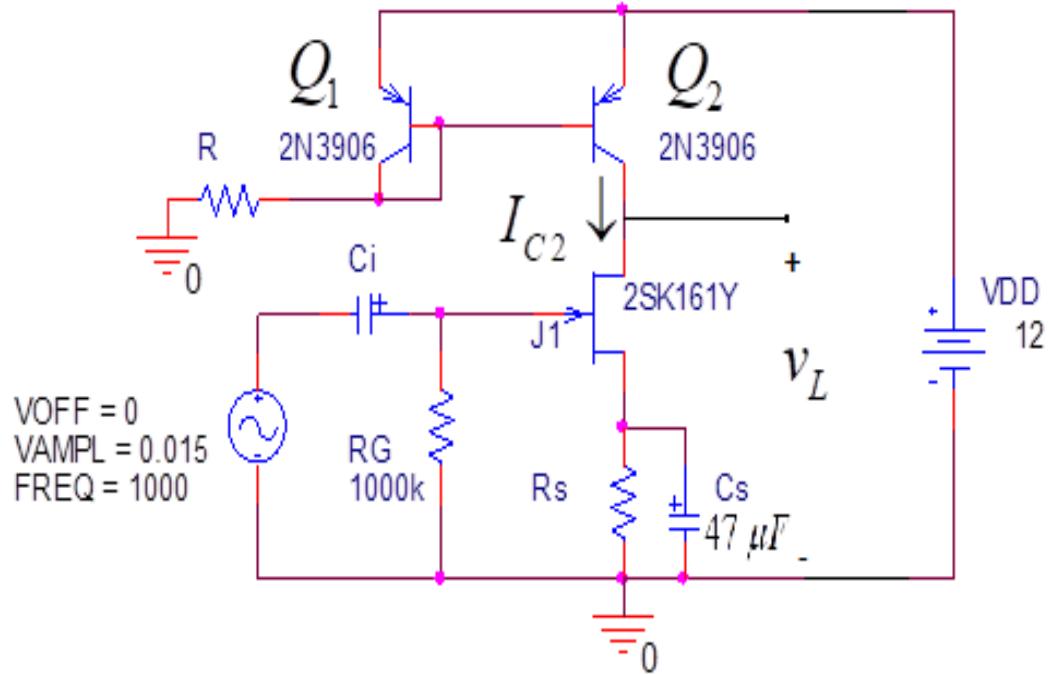
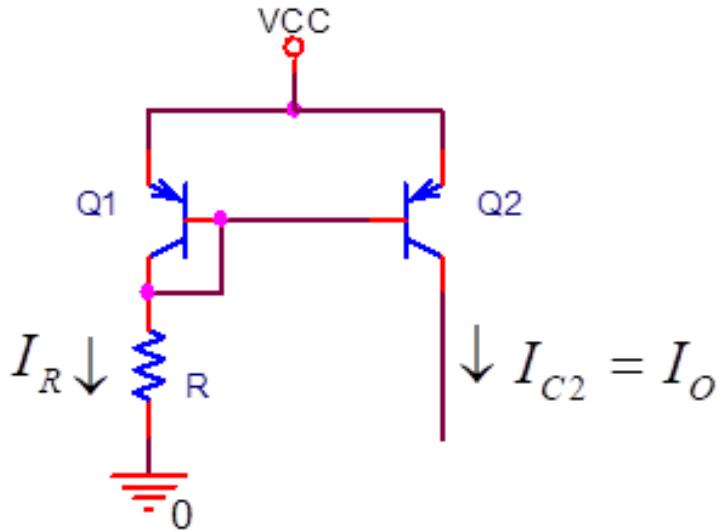
$$i_C = I_s e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \left( 1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right) \quad \Delta i_C \text{ manteniendo cte la } v_{BE} \text{ considerando el efecto } \Delta v_{CE}$$

$$\frac{1}{r_o} = h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{v_{BE} = \text{cte}} = \frac{I_C}{V_A + V_{CE}} \quad \Rightarrow \quad r_o = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} \cong \frac{V_A}{I_C}$$

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente basica con transistores PNP.*

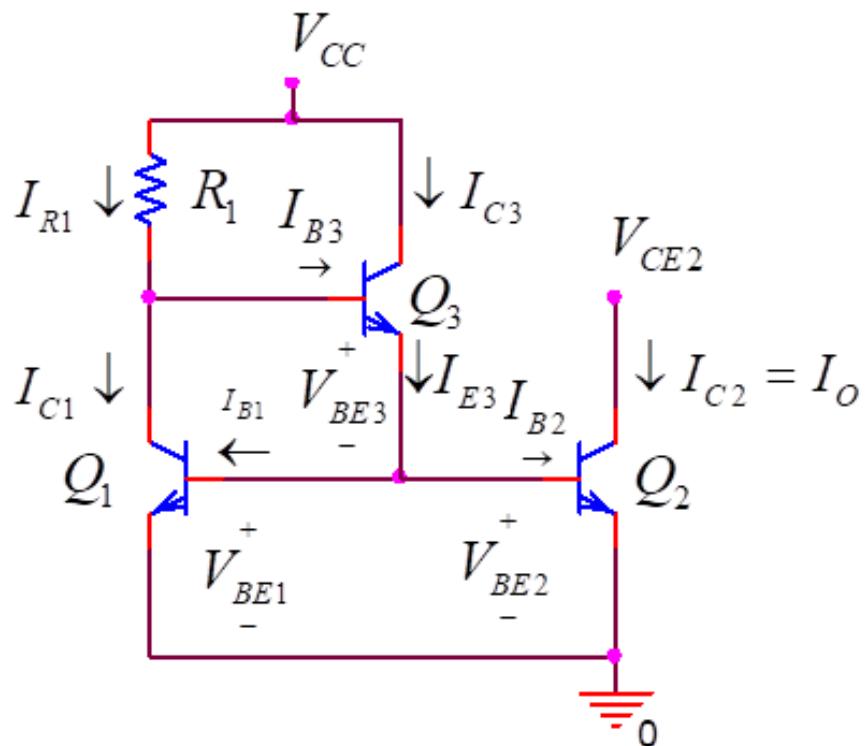
*Ejemplo de aplicacion.*



# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente basica modificada.*

En la fuente basica  $I_O$  difiere de la  $I_R$  esta reduce este error.



$$Q_1 = Q_2$$

## *Entonces*

$$I_{B1} = I_{B2}$$

$$I_{C1} = I_{C2}$$

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente básica modificada.*

$$I_{E3} = I_{B1} + I_{B2} = \frac{I_{C1}}{\beta} + \frac{I_{C2}}{\beta}$$

$$\text{Como } V_{BE1} = V_{BE2} \Rightarrow I_{C1} = I_{C2}$$

$$I_{E3} = \frac{I_{C2}}{\beta} + \frac{I_{C2}}{\beta} = 2 \frac{I_{C2}}{\beta}$$

$$I_{B3} = \frac{I_{E3}}{1+\beta} = \frac{1}{1+\beta} \times 2 \frac{I_{C2}}{\beta} = \frac{2}{\beta(1+\beta)} \times I_{C2}$$

$$I_{R1} = I_{C1} + I_{B3} = I_{C1} + \frac{2}{\beta(1+\beta)} \times I_{C2} = I_{C2} + \frac{2}{\beta(1+\beta)} \times I_{C2} = I_{C2} \left( 1 + \frac{2}{(\beta + \beta^2)} \right)$$

$$I_O = I_{C2} = \frac{I_{R1}}{1 + \frac{2}{(\beta + \beta^2)}}$$

$$\text{Donde } I_{R1} = \frac{V_{CC} - V_{BE3} - V_{BE1}}{R_1}$$

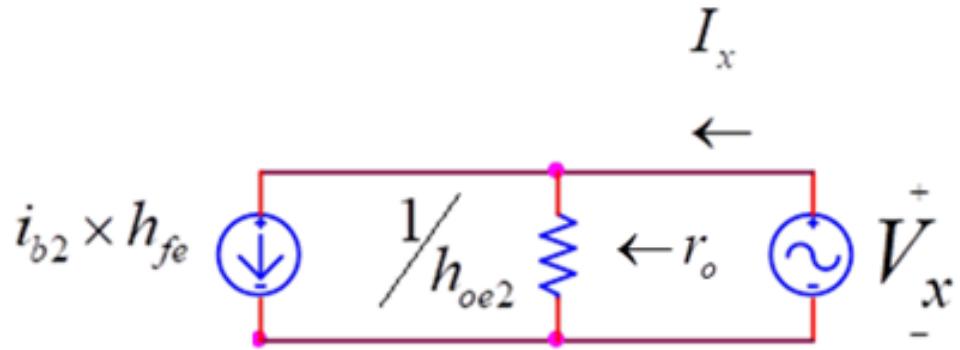
$$I_O = I_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{BE3} - V_{BE1}}{R_1} \times \frac{1}{1 + \frac{2}{(\beta + \beta^2)}}$$

$$\text{Si } \beta \gg 1$$

$$I_O = I_{C2} \cong I_{R1} = \frac{V_{CC} - V_{BE3} - V_{BE1}}{R_1}$$

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente básica modificada. Resistencia de salida  
Circuito equivalente de salida*

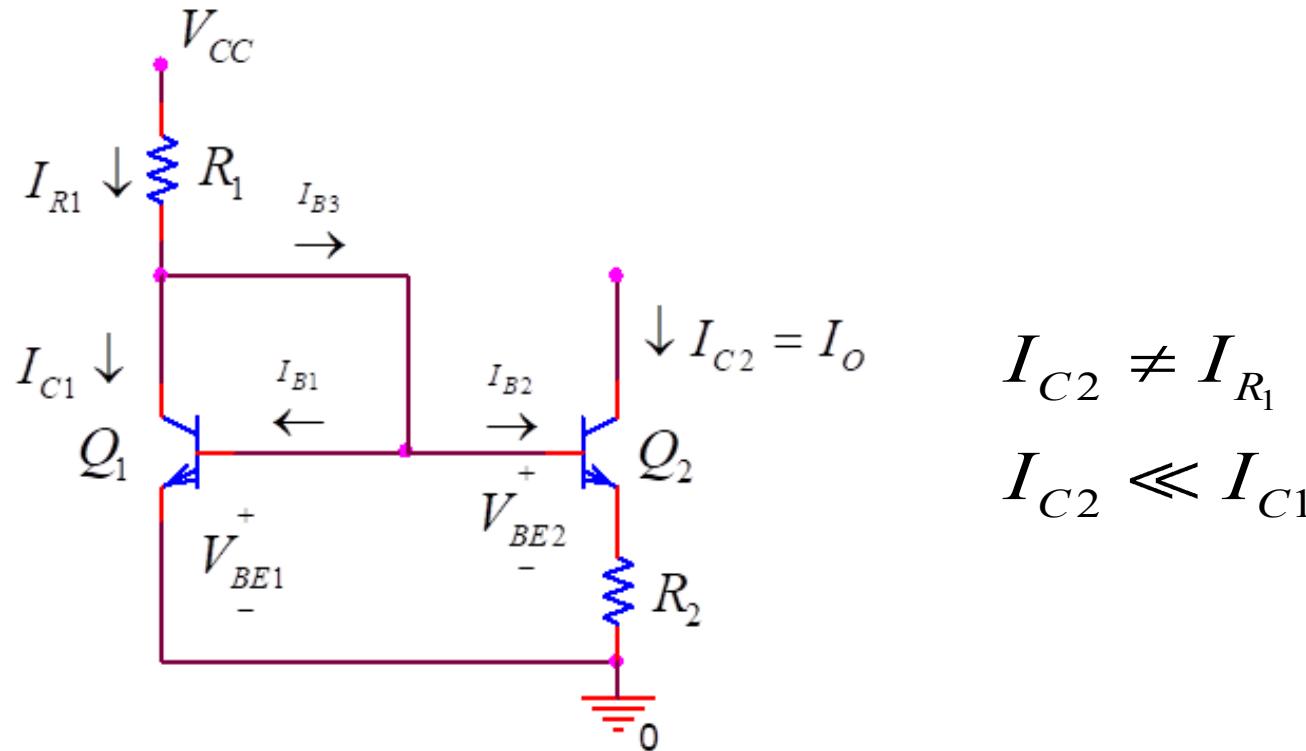


$$r_o = \frac{V_x}{I_x} = \frac{1}{h_{oe2}} = \frac{V_A + V_{CE2}}{I_{C2}}$$

$V_A$ : Tension de Early

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente Widlar permite obtener corrientes de baja magnitud insertando  $R_2$*



# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente Widlar*

$$V_{BE1} - V_{BE2} - (I_{C2} + I_{B2})R_2 = 0$$

$$V_{BE1} - V_{BE2} - \left( I_{C2} + \frac{I_{C2}}{\beta} \right) R_2 = 0$$

$$V_{BE1} - V_{BE2} - I_{C2}R_2 \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) = 0$$

$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \Rightarrow Lni_C = LnI_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \Rightarrow Lni_C = LnI_S + Lne^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \Rightarrow Lni_C - LnI_S = \frac{v_{BE}}{V_T} Lne^{=1}$$

$$Ln \frac{i_C}{I_S} = \frac{v_{BE}}{V_T} \Rightarrow v_{BE} = V_T \ln \frac{i_C}{I_S}$$

$$\underbrace{V_T \ln \frac{i_{C1}}{I_{S1}}}_{V_{BE1}} - \underbrace{V_T \ln \frac{i_{C2}}{I_{S2}}}_{V_{BE2}} - \underbrace{I_{C2}R_2}_{Desprecia \frac{1}{\beta}} = 0 \Rightarrow V_T \ln \frac{\frac{i_{C1}}{I_{S1}}}{\frac{i_{C2}}{I_{S2}}} - I_{C2}R_2 = 0$$

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente Widlar*

$$V_T \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_{S1}} \times \frac{I_{S2}}{I_{C2}} \right) - I_{C2}R_2 = 0 \Rightarrow V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} - I_{C2}R_2 = 0$$

$$V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} = I_{C2}R_2 \Rightarrow \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_{C2}R_2}{V_T} \Rightarrow e^{\ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}}} = e^{\frac{I_{C2}R_2}{V_T}} \Rightarrow I_{C1} = I_{C2} \times e^{\frac{I_{C2}R_2}{V_T}}$$

$$I_R = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_1}$$

$$I_R = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta} + I_{B2} = I_{C1} \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) + \frac{I_{C2}}{\beta}$$

$$I_R = I_{C2} \times e^{\frac{I_{C2}R_2}{V_T}} \times \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) + \frac{I_{C2}}{\beta}$$

$I_{C2}$  es una función no lineal de  $I_R$  y  $R_2$ .

A fines de diseño  $I_{C2}$  y  $I_R$  se conocen y solo se debe calcular  $R_2$ .

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente Widlar.*

*Resistencia de salida*

$$r_o = r_{o2} \left( 1 + \frac{I_{C2} R_2}{V_T} \right) = r_{o2} + r_{o2} \times \frac{I_{C2} R_2}{V_T}$$

$$r_{o2} = \frac{1}{h_{oe2}}$$

$I_{C2} R_2$  : Caida de voltaje en  $R_2$

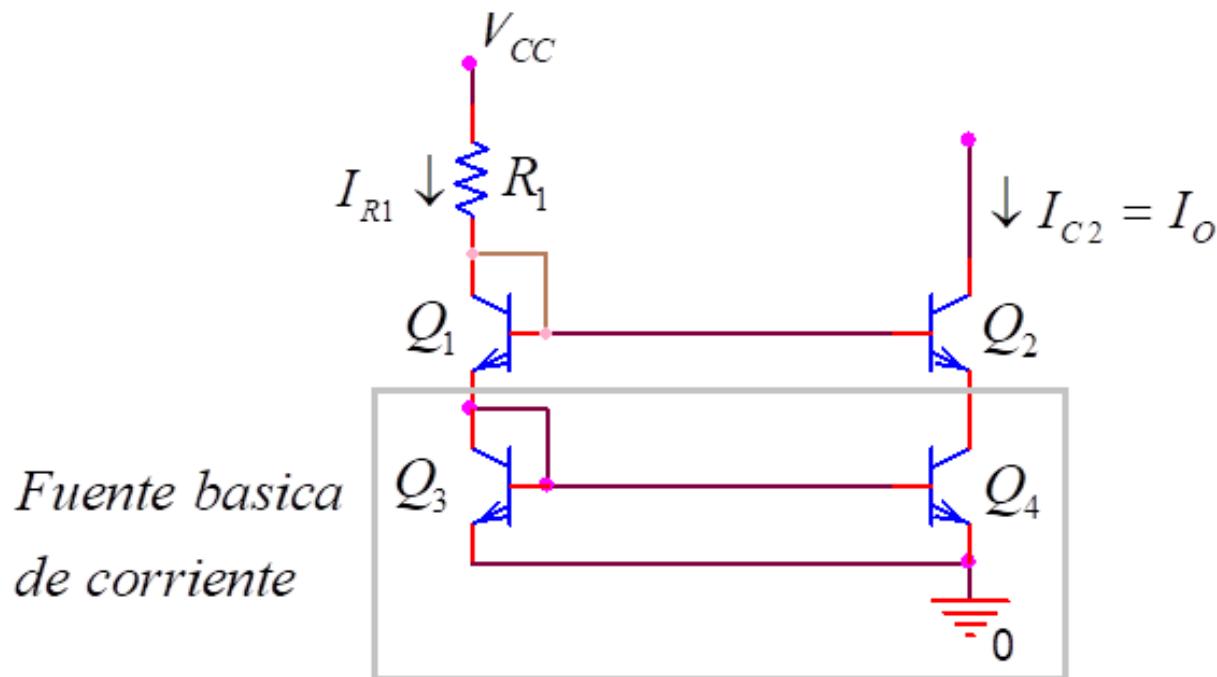
$V_T$  : voltaje termico

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente cascode.*

*La  $R_2$  de la fuente Widlar puede ser reemplazada por una fuente básica formada por los transistores  $Q_3$  y  $Q_4$ .*

*Esta configuración dará una resistencia de salida más grande.*



# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente cascode.*

*Resistencia de salida.*

$$R_o = r_{o2} (1 + \beta) = r_{o2} + r_{o2} \times \beta$$

$$r_{o2} = \frac{1}{h_{oe2}}$$

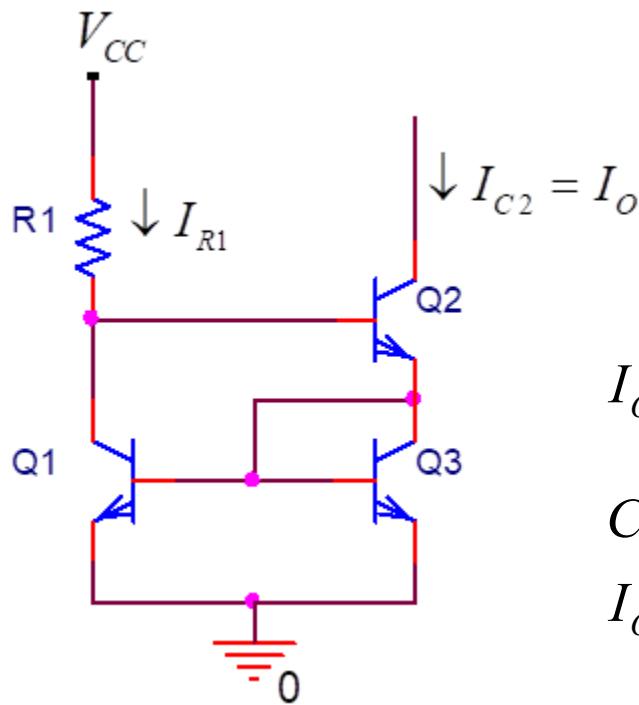
$\beta$ : Ganancia de corriente en emisor común

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente Wilson.*

*Proporciona una resistencia de salida grande.*

*La  $I_O$  es casi igual a la  $I_{R_1}$*



$$I_O = I_{C2} = I_{R_1} \left[ \frac{(2 + \beta)\beta}{\beta^2 + 2\beta + 2} \right] = I_{R_1} \left[ 1 - \frac{2}{\beta^2 + 2\beta + 2} \right]$$

Como  $\beta \gg 1$

$$I_O \approx I_{R_1}$$

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuente de corriente Wilson.*

*Resistencia de salida.*

$$R_o = r_{o2} \left( 1 + \frac{\beta}{2} \right) = r_{o2} + r_{o2} \times \frac{\beta}{2}$$

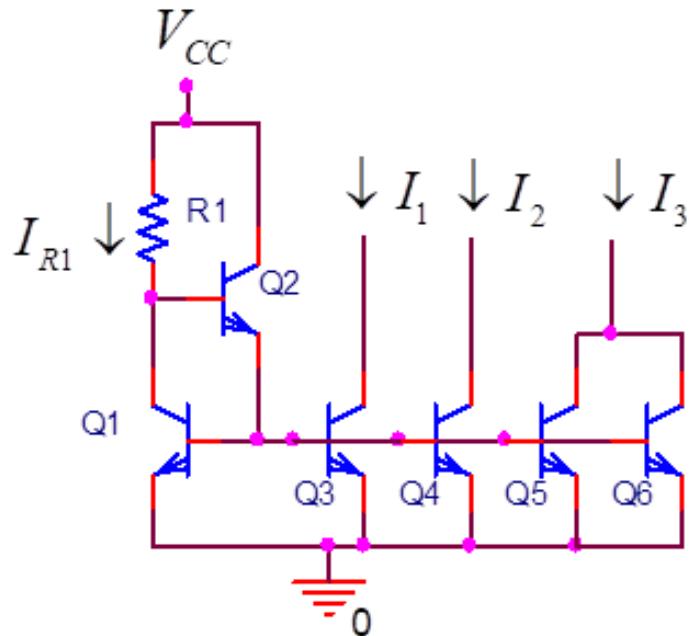
$$r_{o2} = \frac{1}{h_{oe2}}$$

$\beta$  : *Ganancia de corriente en emisor comun*

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT.

*Fuentes de corriente multiple.*

*En los circuitos integrados puede generarse una  $I_{R_1}$  en un lugar y reproducirse en otro para polarizar circuitos de amplificacion.*



$$I_1 = I_{R_1}$$

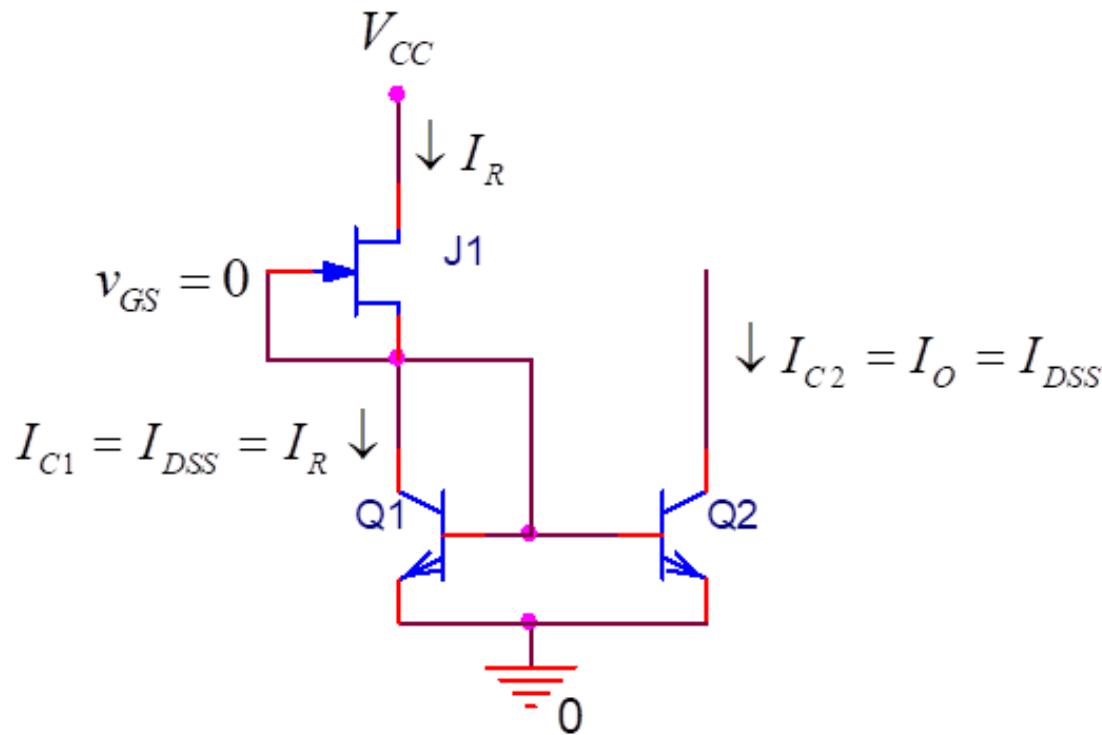
$$I_2 = I_{R_1}$$

$$I_3 = 2I_{R_1} \quad (Q_5 \text{ y } Q_6 \text{ estan en paralelo})$$

# Fuente de corriente y cargas activas con BJT y JFET.

*Fuentes de corriente JFET.*

*Se puede remplazar la  $R$  de referencia por un JFET haciendo  $V_{GS} = 0$  por lo que va circular una  $i_D = I_{DSS}$  como corriente de referencia.*



# ELECTRONICA APLICADA I

Profesor Titular Dr Ing. Guillermo Riva

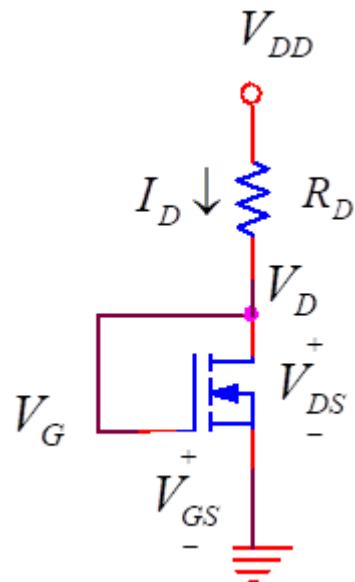
Profesor Adjunto Ing Martin Guido

## Fuentes de corriente y cargas activas con MOSFET

- Polarización del MOSFET con retroalimentación.
- Fuente de corriente Básica con MOSFET.
- Fuente de corriente Básica con MOSFET sin resistencia.
- Fuente de corriente Múltiple con MOSFET.
- Fuente de corriente Cascode con MOSFET.
- Fuente de corriente Wilson con MOSFET.
- Fuente corriente Wilson mejorada con MOSFET.

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Polarización del MOSFET con retroalimentación.*



$$V_D = V_G$$

$$V_{DS} = V_{GS}$$

Del circuito de salida tenemos :

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

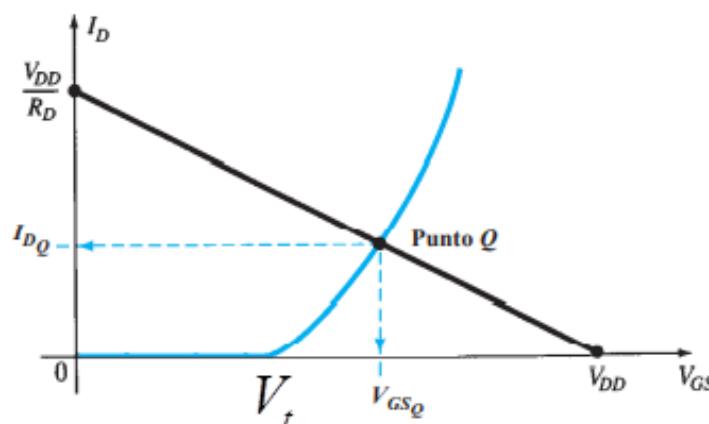
$$V_{GS} = V_{DD} - I_D R_D$$

Tenemos la ecuación que relaciona  $i_D = f_{(GS)}$

$$I_D = k(V_{GS} - V_t)^2$$

Son dos ecuaciones que relacionan las mismas variables.

Solución Gráfica



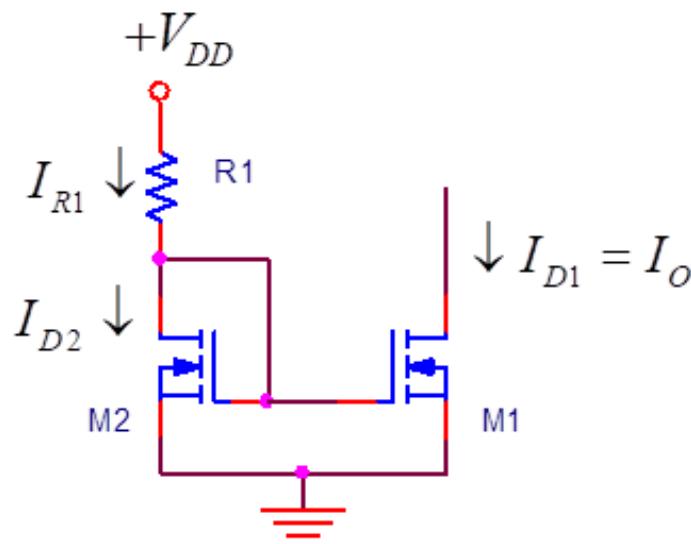
# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuente de corriente básica con MOSFET.*

$M_1$  y  $M_2$  son idénticos

Entonces  $V_{GS1} = V_{GS2}$

Por lo que  $I_{D1} = I_{D2}$



$$I_D = \frac{WK_x}{L} (V_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$I_D = K_p (V_{GS} - V_t)^2 \left( 1 + \frac{V_{DS}}{V_M} \right)$$

$V_t$  : voltaje de umbral

$W$  : ancho del canal

$L$  : Longitud del canal

$\lambda$  : longitud de modulación del canal

$V_M = \frac{1}{\lambda}$  : voltaje de modulación del canal

$K_x = \mu_x c_{ox}$  : constante del canal

$\mu_x$  : movilidad de los electrones en el canal

$c_{ox}$  : capacidad por unidad de área debida al óxido de compuerta

$$K_p = \frac{WK_x}{L}$$

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuentes de corriente básica con MOSFET.*

La corriente de salida es la corriente de drenaje de  $M_1$ .

$$I_{D1} = I_O = K_{p_1} (V_{GS1} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS1})$$

La corriente de drenaje  $I_{D2}$  es la de referencia  $I_R$ .

$$I_{D2} = I_R = K_{p_2} (V_{GS2} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS2})$$

Los componentes están en un mismo circuito integrado por lo que los parámetros físicos son iguales.

La relación de  $I_O$  con  $I_R$  es

$$\frac{I_O}{I_R} = \frac{K_{p_1} (1 + \lambda V_{DS1})}{K_{p_2} (1 + \lambda V_{DS2})} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_1 \times K_X}{\left(\frac{W}{L}\right)_2 \times K_X} \times \frac{(1 + \lambda V_{DS1})}{(1 + \lambda V_{DS2})}$$

$$\lambda V_{DS} \ll 1$$

$$\frac{I_O}{I_R} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_1}{\left(\frac{W}{L}\right)_2}$$

Al controlar la relación  $\frac{W}{L}$  es posible modificar  $I_O$ .

Por lo general  $L$  se mantiene fija y  $W$  varía de un dispositivo a otro para dar la relación deseada de  $\frac{I_O}{I_R}$ .

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuente de corriente básica con MOSFET*

*Resistencia de salida :*

$$\frac{1}{r_{ds1}} = \left. \frac{\partial i_{D1}}{\partial v_{DS1}} \right|_Q = \frac{\partial \left[ K_P (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS1}) \right]}{\partial v_{DS1}}$$

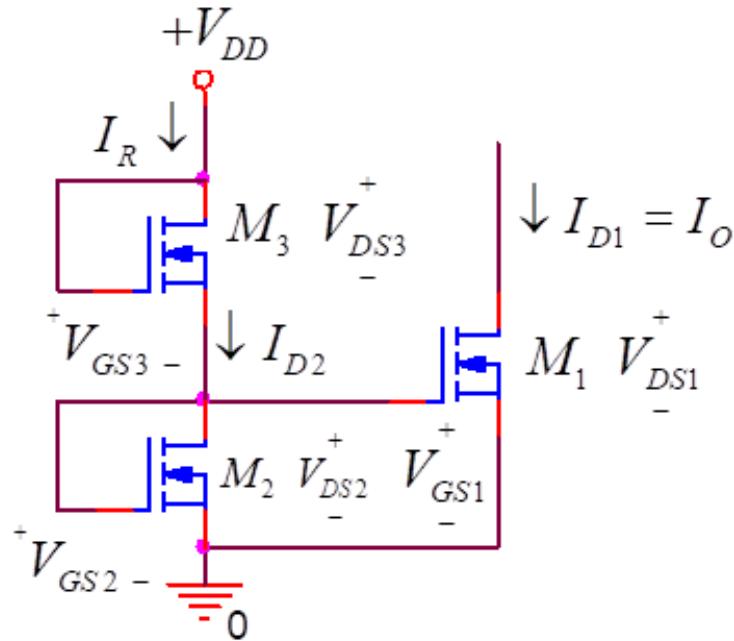
$$\frac{1}{r_{ds1}} = \frac{\partial \left[ K_P (v_{GS} - V_t)^2 + K_P (v_{GS} - V_t)^2 \lambda v_{DS1} \right]}{\partial v_{DS1}} = \overbrace{K_P (v_{GSQ} - V_t)^2}^{I_{D1}} \lambda = \frac{I_{D1}}{V_M}$$

$$R_o = r_{ds1} = \frac{V_M}{I_{D1}}$$

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuente de corriente básica con MOSFET sin resistencia.*

*La resistencia de referencia puede reemplazarse por otro MOSFET.*



*Los MOSFET  $M_2$  y  $M_3$  se utilizan como divisores de voltaje para controlar la tensión  $V_{GS1}$ .*

*Si  $M_1$  y  $M_2$  son identicos la  $I_O$  reproduce exactamente la corriente que circula por  $M_2$  y  $M_3$ .*

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuentes de corriente básica con MOSFET sin resistencia.*

*La resistencia de referencia puede reemplazarse por otro MOSFET.*

$$I_{D2} = I_R = K_{P2} (V_{GS2} - V_{t2})^2 (1 + \lambda V_{DS2})$$

*Como*  $V_{DS2} = V_{GS2}$

$$I_{D2} = I_R = K_{P2} (V_{GS2} - V_{t2})^2 (1 + \lambda V_{GS2})$$

$$I_{D3} = I_R = K_{P3} (V_{GS3} - V_{t2})^2 (1 + \lambda V_{DS3})$$

*Pero*  $V_{GS3} = V_{DD} - V_{GS2}$

$$I_{D3} = I_R = K_{P3} (V_{DD} - V_{GS2} - V_{t2})^2 [1 + \lambda(V_{DD} - V_{GS2})]$$

*Dado que*  $I_{D2} = I_{D3} = I_R$

$$\frac{K_{P2} (V_{GS2} - V_{t2})^2 (1 + \lambda V_{GS2})}{K_{P3} (V_{DD} - V_{GS2} - V_{t2})^2 [1 + \lambda(V_{DD} - V_{GS2})]} = 1$$

*Controlando*  $K_{P2}$  y  $K_{P3}$  *se puede obtener el valor deseado de*  $V_{GS2}$  *que es igual*  $V_{GS1}$  *la cual dará la corriente de salida deseada.*

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuentes de corriente básica con MOSFET sin resistencia.*

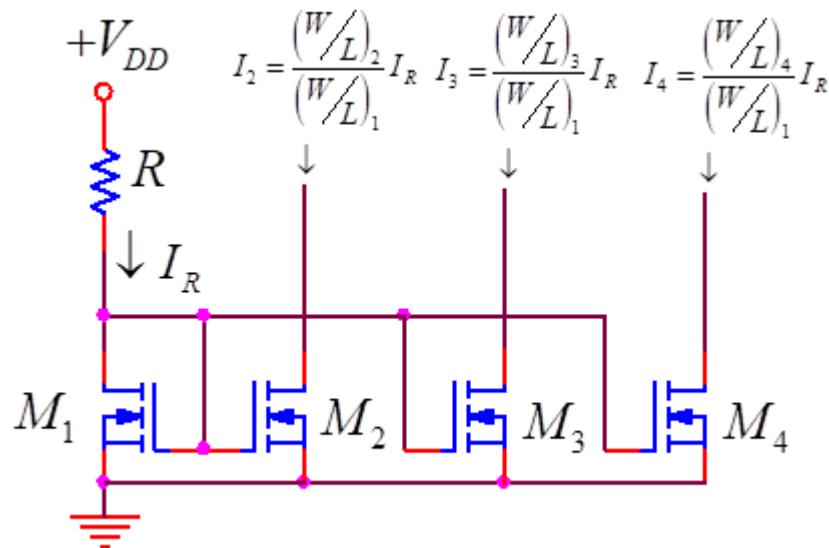
*Resistencia de salida :*

$$\frac{1}{r_{ds1}} = \frac{\partial i_{D1}}{\partial v_{DS1}} = \frac{I_{D1}}{V_M}$$

$$R_O = r_{ds1} = \frac{V_M}{I_{D1}}$$

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuentes de corriente multiples con MOSFET.*



En un MOSFET  $I_G = 0$  por lo que se le pueden conectar varios MOSFET a uno solo de referencia  $M_1$ .

Se puede obtener diferentes  $I$  de salida ajustando la relacion W/L del canal.

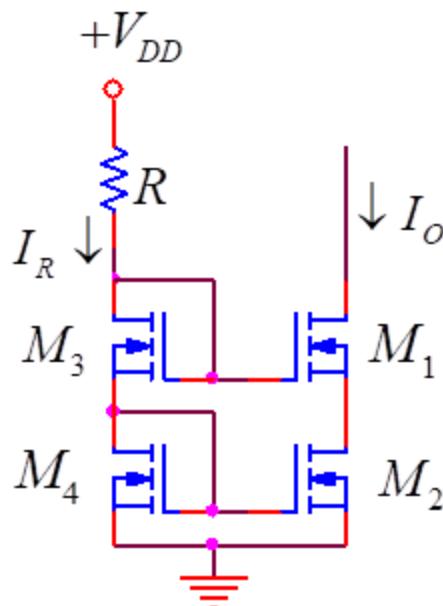
En la práctica  $L$  se mantiene constante y solo se varia  $W$  para obtener las  $I$  de salida deseadas.

$$I_2 = \left( \frac{W_2}{W_1} \right) I_R, \quad I_3 = \left( \frac{W_3}{W_1} \right) I_R, \quad I_4 = \left( \frac{W_4}{W_1} \right) I_R$$

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuente de corriente Cascode con MOSFET.*

*Si a la fuente básica se le agrega dos MOSFET mas, se logra incrementar la resistencia de salida.*



*Resistencia de salida :*

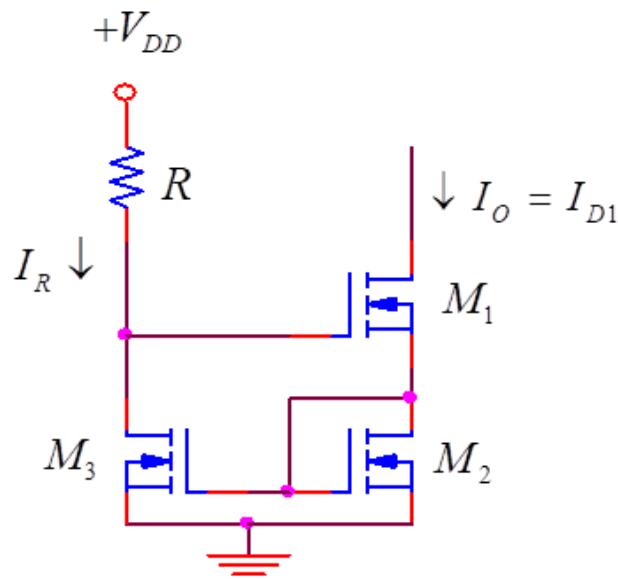
$$R_o = r_{ds_1} + g_{m_1} r_{ds_1} r_{ds_2} + r_{ds_2}$$

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuente de corriente Wilson con MOSFET.*

*Resistencia de salida :*

$$R_o = r_{ds1} + \frac{1}{g_{m1}} + \frac{g_{m1}}{g_{m2}} r_{ds1} + \frac{g_{m1} g_{m3}}{g_{m2}} r_{ds3}$$

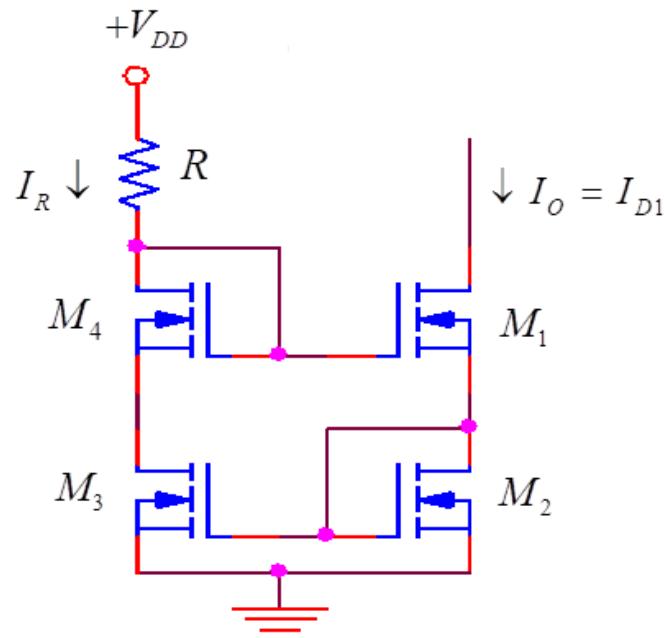


*Problemas que presenta este circuito :*

$$V_{D1} \neq V_{D3} \quad \Rightarrow \quad I_{D1} \neq I_{D3}$$

# Fuente de corriente y cargas activas con MOSFET.

*Fuente de corriente Wilson mejorada con MOSFET.*



*Agregando el MOSFET  $M_4$  se asegura que los voltajes de  $M_1$  y  $M_3$  sean iguales por lo tanto sus corrientes tambien.*

# Bibliografía.

- **Circuitos Microelectrónicos.**  
**Análisis y Diseño**  
**Muhammad H. Rashid**  
**Capítulo 13 : Fuentes activas y amplificadores diferenciales.**
- **Dispositivos y circuitos electrónicos.**  
**Donald A. Neamen**