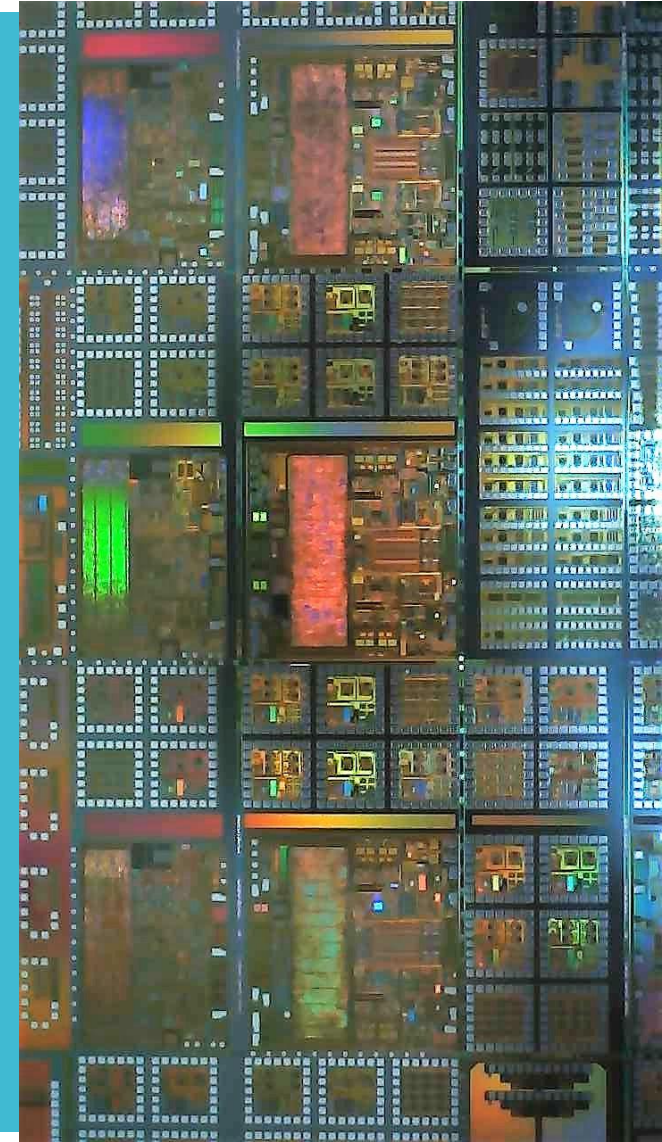


Diseño Analógico

2024



Calendario

Capítulo 1: Introducción

- Clase 1: Transistores Bipolar y MOS. Pequeña señal. Circuitos monoetapas
- Clase 2: Cadence - Introducción y Circuitos monoetapas
- Clase 3: Par diferencial. Amplificador diferencial. Implementación básica

Capítulo 2: Respuesta en Frecuencia y Estabilización

- Clase 4: Amplificador operacional: Respuesta en frecuencia, estabilidad. Capacidades asociadas al transistor MOS
- Clase 5: Cadence - Amplificador operacional. Operación en DC, offset sistemático, ganancia
- Clase 6: Estabilización, Miller, cero asociado, compensaciones avanzadas
- Clase 7: Cadence - Amplificador operacional. Respuesta en frecuencia, estabilidad

Calendario

Capítulo 3: Amplificadores Avanzados

- Clase 8: Amplificadores avanzados. Current mirror opamp, cascode, folded amplifier, folded cascode.
- Clase 9: Amplificadores avanzados. Push-pull output, Diff-diff, CMFB
- Clase 10: Cadence - Amplificadores avanzados

Capítulo 4: Ruido, offset

- Clase 11: Offset
- Clase 12: Ruido
- Clase 13: Cadence - Diseño con offset y ruido

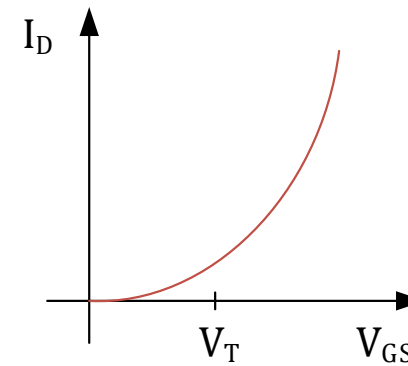
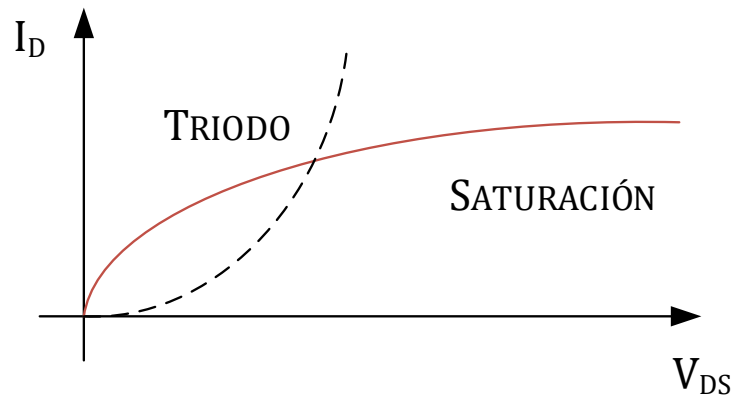
Capítulo 5: Circuitos auxiliares

- Clase 14: Circuitos auxiliares. Referencias, bandgap, osciladores
- Clases 15/16: Extra. Diseño físico de semiconductores (layout)

Capítulo 1: Introducción

• 1.1 Transistor MOS

1.1.1 Transferencias



1.1.2 Modos de Operación

- Subthreshold

$$0V < V_{GS} < V_T$$

- Triodo

$$V_{GS} > V_T \quad , \quad V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

$$I_D = K_p \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

Capítulo 1: Introducción

- Saturación

$$V_{GS} > V_T, \quad V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$I_D = \frac{1}{2} K_p \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$\text{Si } \lambda V_{DS} \ll 1 \rightarrow$$

$$I_D = \frac{1}{2} K_p \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$K_p = \mu_0 \cdot C_{ox}$$

μ_0 : Zero field mobility

C_{ox} : Gate oxide capacitance per unit area

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

t_{ox} : Gate oxide thickness

ϵ_{ox} : Oxide permittivity

$$\epsilon_{ox} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_r = 3.9 \text{ para SiO}_2$$

Capítulo 1: Introducción

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left[\sqrt{2\phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_f} \right]$$

V_{T0} : Zero bias threshold voltage [V]

γ : Bulk threshold parameter [\sqrt{V}]

$2\phi_f$: Strong inversion surface potential [V]

V_{SB} : Source to Body voltage [V]

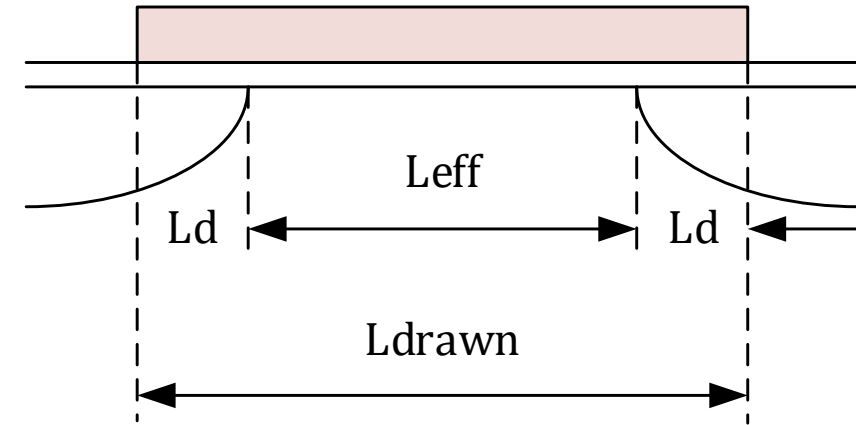
$$\lambda = \frac{1}{V_A} \quad V_A: \text{Early voltage [V]}$$

$$\lambda = \frac{1}{L_{\text{eff}}} \frac{dX_d}{dV_{DS}}$$

$$L_{\text{eff}} = L_{\text{drawn}} - 2L_d - X_d$$

L_d : Lateral diffusion

X_d : Depletion layer width

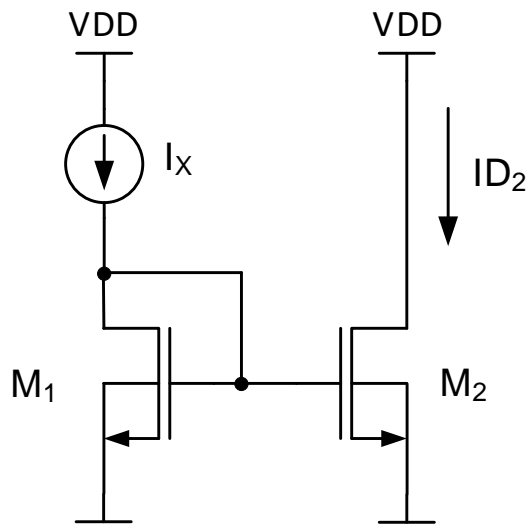


La variación de X_d con el voltaje V_{DS} es compleja, por el hecho de que la distribución del campo en la región desierta del drain no es unidimensional. Por consiguiente, el cálculo de λ a partir de la estructura del dispositivo es difícil.

El valor de λ se suele obtener de datos experimentales.

Capítulo 1: Introducción

Ejemplo: Espejo de corriente



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

$$V_{DS1} = V_{GS1} \rightarrow V_{GS1} \text{ será tal que } ID_1 = I_x$$

$$ID_1 = \frac{1}{2} K_p \frac{W_1}{L_1} (V_{GS1} - V_T)^2 \rightarrow V_{GS1} = \sqrt{\frac{2 \cdot ID_1}{K_p \frac{W_1}{L_1}}} + V_T$$

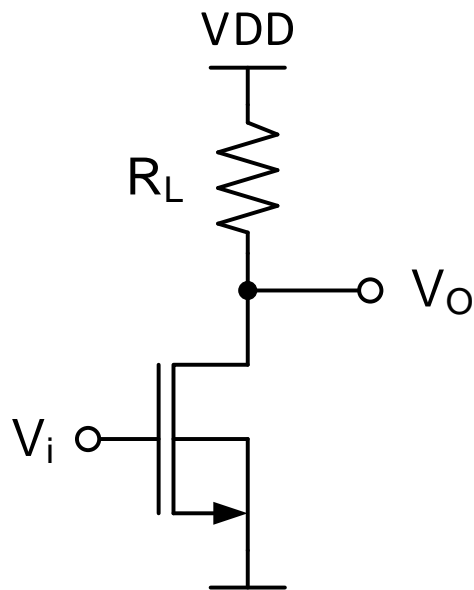
$$ID_2 = \frac{1}{2} K_p \frac{W_2}{L_2} \left(\sqrt{\frac{2 \cdot ID_1}{K_p \frac{W_1}{L_1}}} + V_T - V_T \right)^2$$

$$ID_2 = \frac{W_2}{L_2} \frac{L_1}{W_1} ID_1$$

$$\text{Si } L_1 = L_2 \rightarrow ID_2 = \frac{W_2}{W_1} ID_1$$

Capítulo 1: Introducción

Ejemplo: Ganancia de señal



$$K_p = 120\mu\text{A}/\text{V}^2, \quad R_L = 100\text{k}\Omega, \quad I_D = 10\mu\text{A}$$

$$V_{DD} = 3\text{V}, \quad W = 10\mu\text{m}, \quad L = 5\mu\text{m}, \quad V_T = 0.7\text{V}$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = ?$$

Primero es necesario calcular el punto Q

$$V_o = V_{DD} - I_D \cdot R_L$$

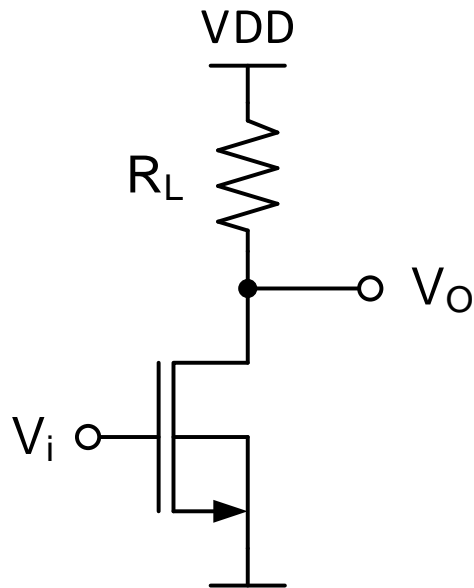
$$V_o = V_{DD} - R_L \cdot \frac{1}{2} K_p \frac{W}{L} (V_i - V_T)^2$$

$$V_i = ?$$

$$V_i = V_T + \sqrt{\frac{2 \cdot I_D}{K_p W/L}}$$

Capítulo 1: Introducción

Ejemplo: Ganancia de señal



$$K_p = 120\mu\text{A}/\text{V}^2, \quad R_L = 100\text{k}\Omega, \quad I_D = 10\mu\text{A}$$

$$V_{DD} = 3\text{V}, \quad W = 10\mu\text{m}, \quad L = 5\mu\text{m}, \quad V_T = 0.7\text{V}$$

$$V_i = 0.7\text{V} + \sqrt{\frac{2 \times 10\mu\text{A}}{120\mu\text{A}/\text{V}^2 \frac{10\mu\text{m}}{5\mu\text{m}}}}$$

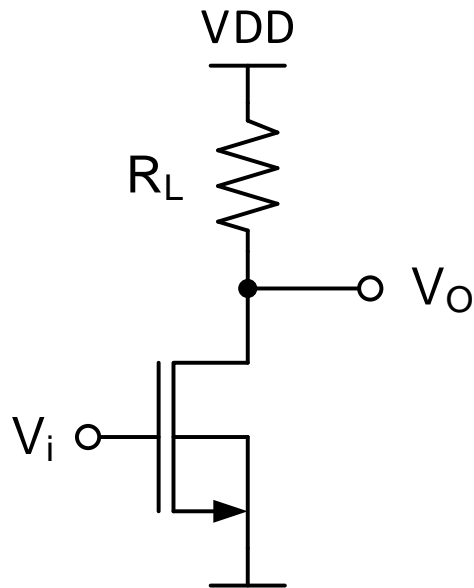
$$V_i = 0.7\text{V} + 0.289\text{V} = 0.989\text{V}$$

$$V_o = 3\text{V} - 100\text{k}\Omega \cdot \frac{1}{2} 120\mu\text{A}/\text{V}^2 \frac{10\mu\text{m}}{5\mu\text{m}} (0.989\text{V} - 0.7\text{V})^2$$

$$V_o = 1.998\text{V}$$

Capítulo 1: Introducción

Ejemplo: Ganancia de señal



$$K_p = 120\mu\text{A}/\text{V}^2, \quad R_L = 100\text{k}\Omega, \quad I_D = 10\mu\text{A}$$

$$V_{DD} = 3\text{V}, \quad W = 10\mu\text{m}, \quad L = 5\mu\text{m}, \quad V_T = 0.7\text{V}$$

$$\text{Defino: } \Delta V_i = 10\text{mV} \rightarrow$$

$$V_{i2} = 0.999\text{V} \rightarrow$$

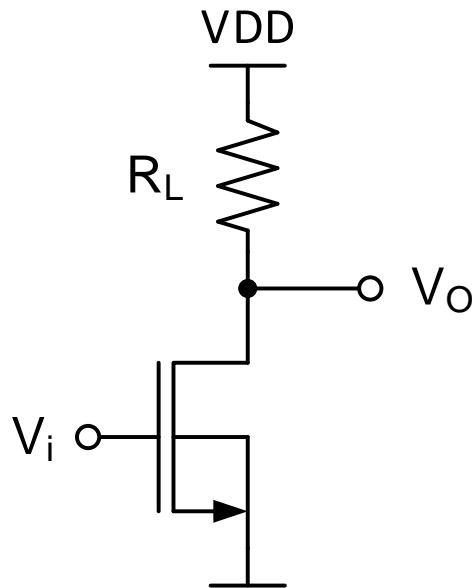
$$V_{o2} = 1.927\text{V}$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{1.927\text{V} - 1.998\text{V}}{0.999\text{V} - 0.989\text{V}}$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = -7.1 \text{ V/V}$$

Capítulo 1: Introducción

Ejemplo: Ganancia de señal



$$K_p = 120\mu\text{A}/\text{V}^2, \quad R_L = 100\text{k}\Omega, \quad I_D = 10\mu\text{A}$$

$$V_{DD} = 3\text{V}, \quad W = 10\mu\text{m}, \quad L = 5\mu\text{m}, \quad V_T = 0.7\text{V}$$

Defino: $\Delta V_i = 1\text{mV}$ \rightarrow

$$V_{i2} = 0.99\text{V} \quad \rightarrow$$

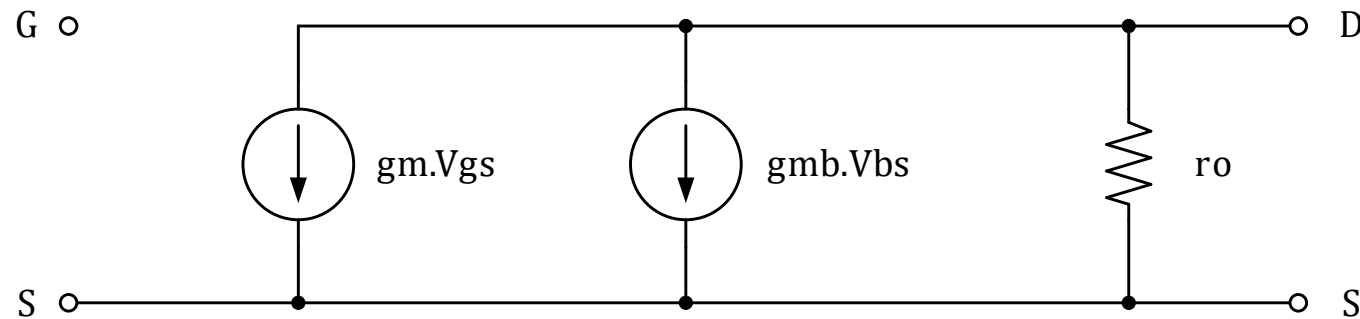
$$V_{o2} = 1.991\text{V}$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{1.991\text{V} - 1.998\text{V}}{0.99\text{V} - 0.989\text{V}}$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = -7.0 \text{ V/V}$$

Capítulo 1: Introducción

1.1.3 Pequeña Señal



$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} = K_p \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)(1 + \lambda V_{DS})$$

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

$$g_m = k_p \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) = \sqrt{2K_p \frac{W}{L} I_D}$$

Capítulo 1: Introducción

$$g_{mb} = \frac{dI_D}{dV_{BS}} = -K_p \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)(1 + \lambda V_{DS}) \frac{dV_T}{dV_{BS}}$$

$$\frac{dV_T}{dV_{BS}} = -\frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_f + V_{SB}}} = -\chi$$

$$g_{mb} = \gamma \cdot K_p \frac{W}{L} \frac{V_{GS} - V_T}{2\sqrt{2\phi_f + V_{SB}}} (1 + \lambda V_{DS})$$

$$\frac{g_{mb}}{g_m} = \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_f + V_{SB}}} = \chi$$

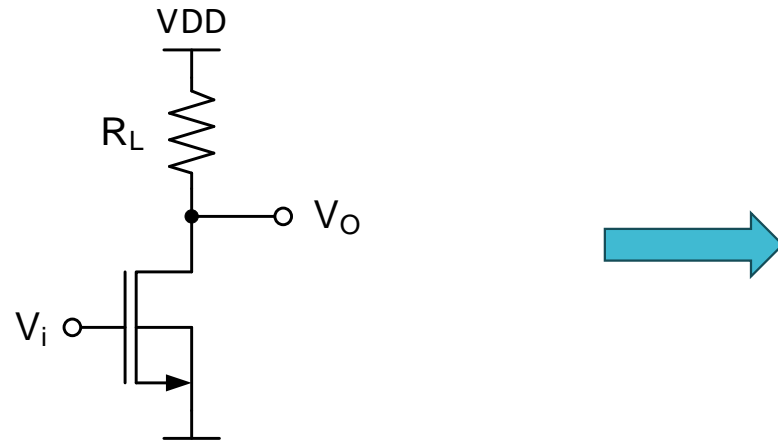
*Típicamente χ vale 0.1 a 0.3 \rightarrow
 g_m es 3 a 10 veces más grande que g_{mb}*

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{1}{\lambda I_D}$$

$$r_o \propto L_{eff}$$

Capítulo 1: Introducción

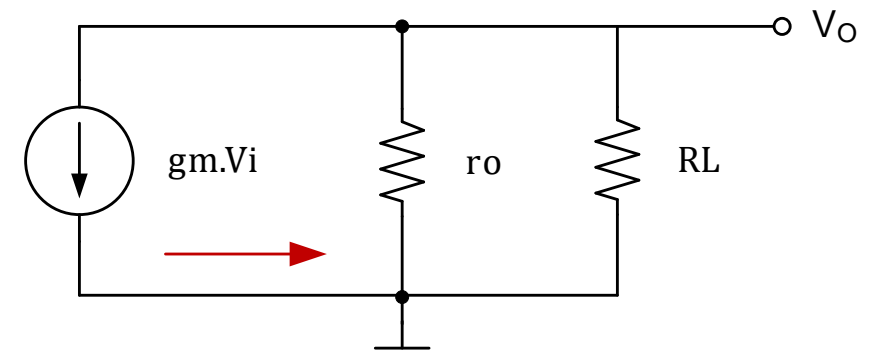
Ejemplo de Ganancia - Continuación



$$g_m = \sqrt{2K_p \frac{W}{L} I_D} = \sqrt{2 \times 120 \mu\text{A}/\text{V}^2 \frac{10 \mu\text{m}}{5 \mu\text{m}} 10 \mu\text{A}}$$

$$g_m = 69.36 \mu\text{S}$$

V_i o



$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = -g_m \cdot (r_o // R_L)$$

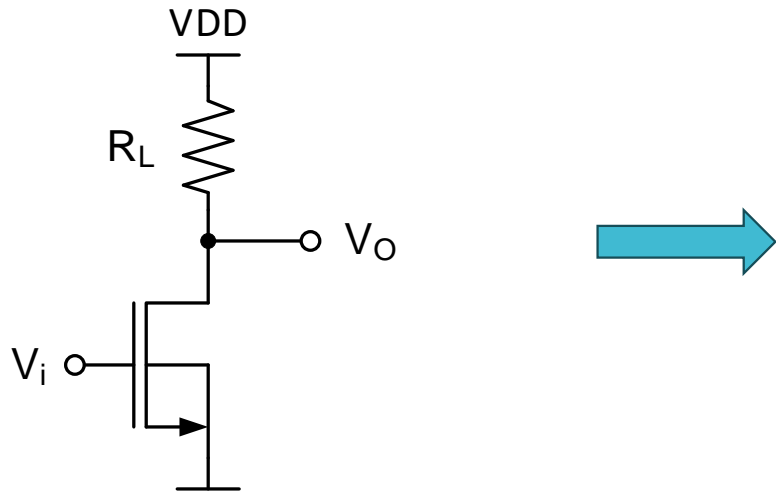
$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$$

$$\lambda = 0.01 \text{ 1/V}$$

$$r_o = 10 \text{ M}\Omega$$

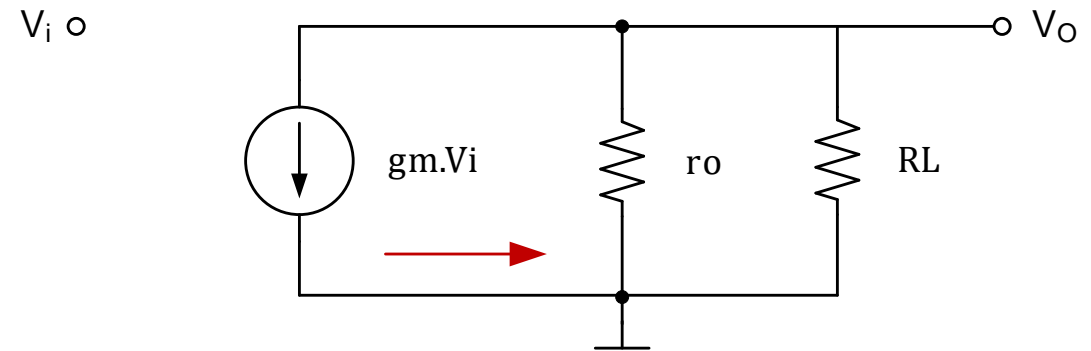
Capítulo 1: Introducción

Ejemplo de Ganancia - Continuación



$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = -69.36 \mu S \cdot (10 M\Omega // 100 k\Omega)$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = -6.9 V/V$$



$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = -7.1 V/V \quad (\Delta V_i = 10 mV)$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = -7.0 V/V \quad (\Delta V_i = 1 mV)$$

Capítulo 1: Introducción

Valores típicos, NMOS

$$K_p = 100 \mu\text{A}/\text{V}^2, \quad I_D = 10 \mu\text{A}$$

$$W = 10 \mu\text{m}, \quad L = 5 \mu\text{m}, \quad \lambda = 0.01 \text{ 1/V}$$

$$g_m = \sqrt{2K_p \frac{W}{L} I_D} = 63.25 \mu\text{S}$$

$$\frac{1}{g_m} = 15.81 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = 10 \text{ M}\Omega$$

$$r_o \gg \frac{1}{g_m}$$

$$g_m \cdot r_o = 632.5 \gg 1$$

Valores típicos, PMOS

$$K_p = 30 \mu\text{A}/\text{V}^2, \quad I_D = 10 \mu\text{A}$$

$$W = 10 \mu\text{m}, \quad L = 5 \mu\text{m}, \quad \lambda = 0.02 \text{ 1/V}$$

$$g_m = \sqrt{2K_p \frac{W}{L} I_D} = 34.64 \mu\text{S}$$

$$\frac{1}{g_m} = 28.87 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = 5 \text{ M}\Omega$$

$$r_o \gg \frac{1}{g_m}$$

$$g_m \cdot r_o = 173.2 \gg 1$$

Capítulo 1: Introducción

- **1.2 Transistor Bipolar**

1.2.1 Operación en DC

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

$$I_S = \frac{q \cdot A \cdot D_n \cdot n_i^2}{W_B \cdot N_A} \quad (\text{NPN}) \quad I_S \text{ típico de } 10^{-16} \text{ a } 10^{-14} \text{ A}$$

A: Cross-sectional emitter area

N_A : Base doping density

n_i : Silicon intrinsic carrier concentration

D_n : Electron diffusion parameter in the base

W_B : Base width

Capítulo 1: Introducción

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q}$$

$$\text{Si } \frac{V_{CE}}{V_A} \ll 1 \rightarrow I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B}$$

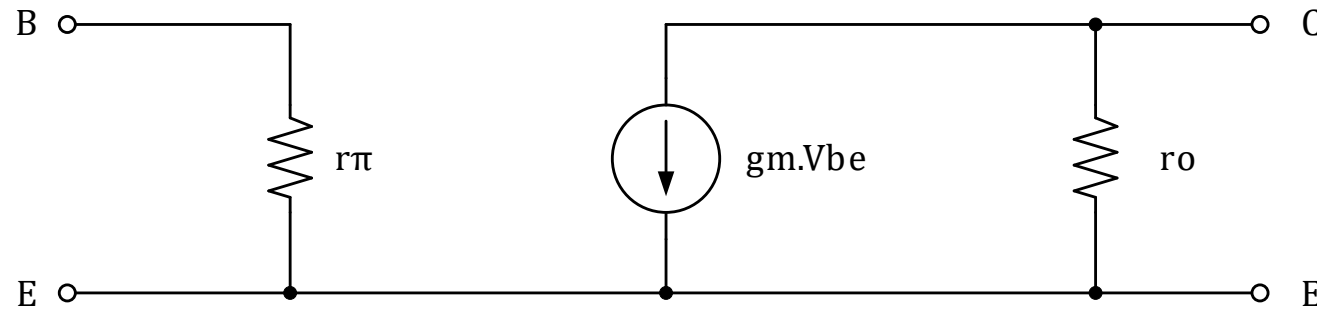
$$|I_E| = I_C + I_B$$

$$|I_E| = \frac{I_C}{\alpha_F}$$

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F} \rightarrow \alpha_F < 1 \quad (I_C < I_E)$$

Capítulo 1: Introducción

1.2.2 Pequeña Señal



$$g_m = \frac{dI_C}{dV_{BE}}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$r_\pi = \frac{v_i}{i_b} = \frac{v_i}{i_c} \beta_o$$

β_o : Small signal current gain

Capítulo 1: Introducción

Si β_F es constante $\rightarrow \beta_F = \beta_o$ En general $\beta_F \approx \beta_F \approx \beta$

$$r_{\pi} = \frac{v_i}{i_b} = \frac{v_i}{i_c} \beta = \frac{\beta}{g_m}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta \cdot V_T}{I_C}$$

$$\beta = r_{\pi} \cdot g_m$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

V_A : Early voltage

$$r_o = \frac{1}{\eta \cdot g_m}$$

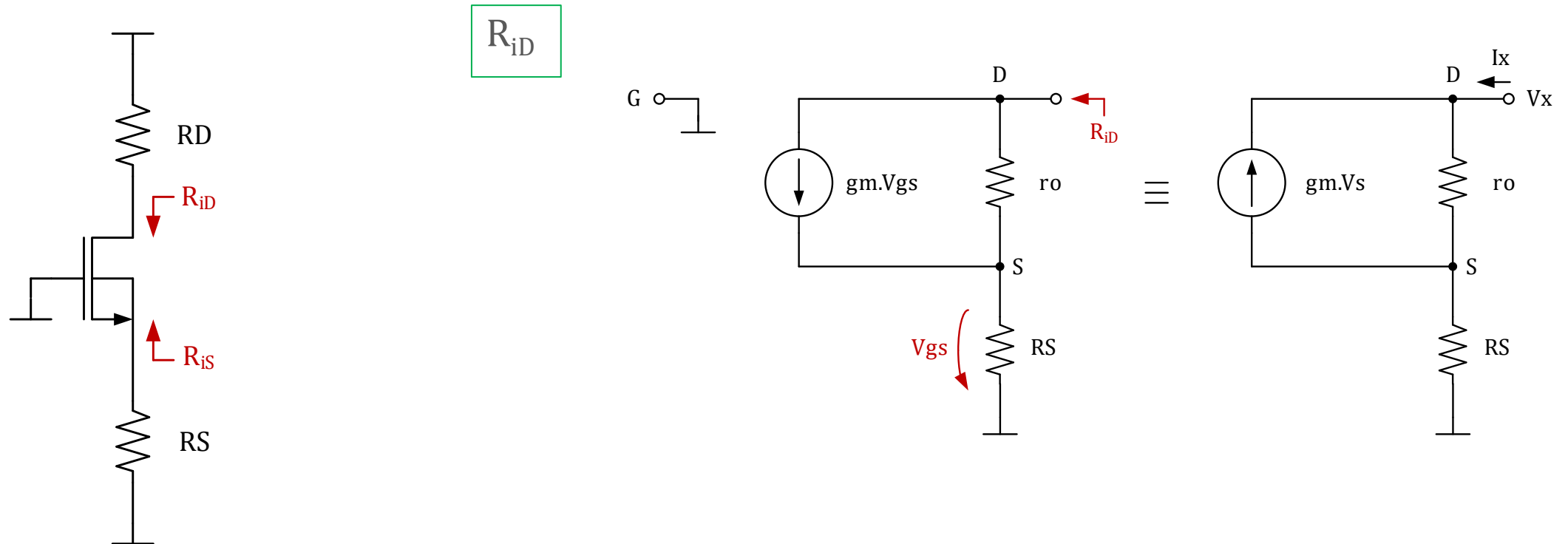
$$\eta = \frac{k \cdot T}{q \cdot V_A}$$

Capítulo 1: Introducción

• 1.3 Cálculo de Parámetros de Pequeña Señal en Transistores MOS

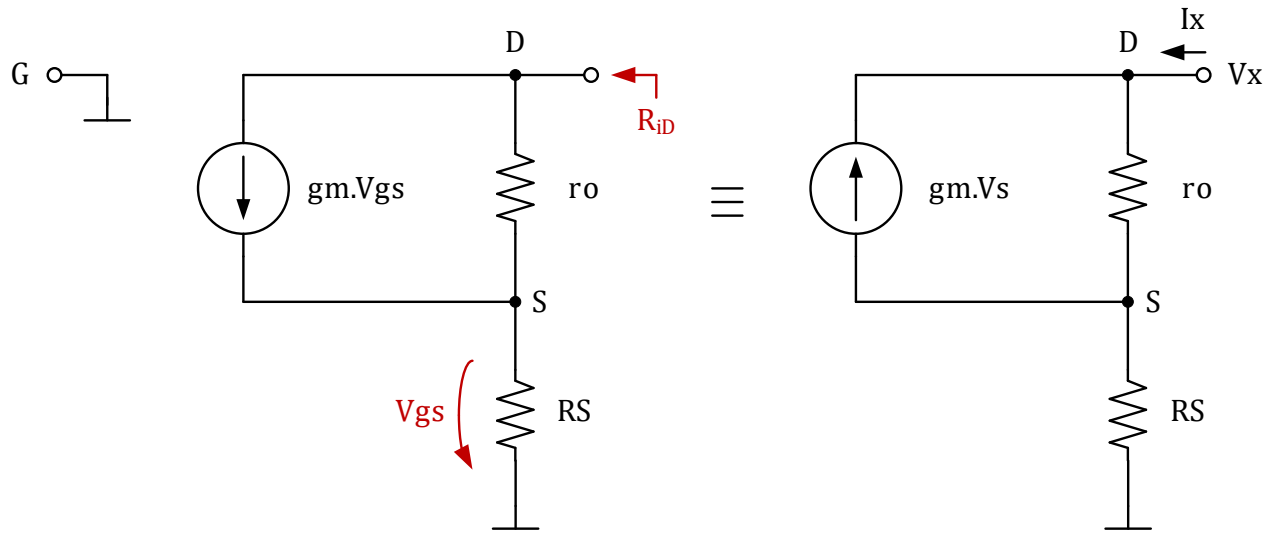
El objetivo de esta sección es definir una metodología para simplificar el cálculo de transferencias de pequeña señal. Para eso obtendremos las impedancias y ganancias típicas del transistor MOS

1.3.1 Impedancias



Capítulo 1: Introducción

R_{iD}



$$V_X = I_X \cdot R_S + (I_X + g_m \cdot V_S) \cdot r_o$$

$$V_S = I_X \cdot R_S$$

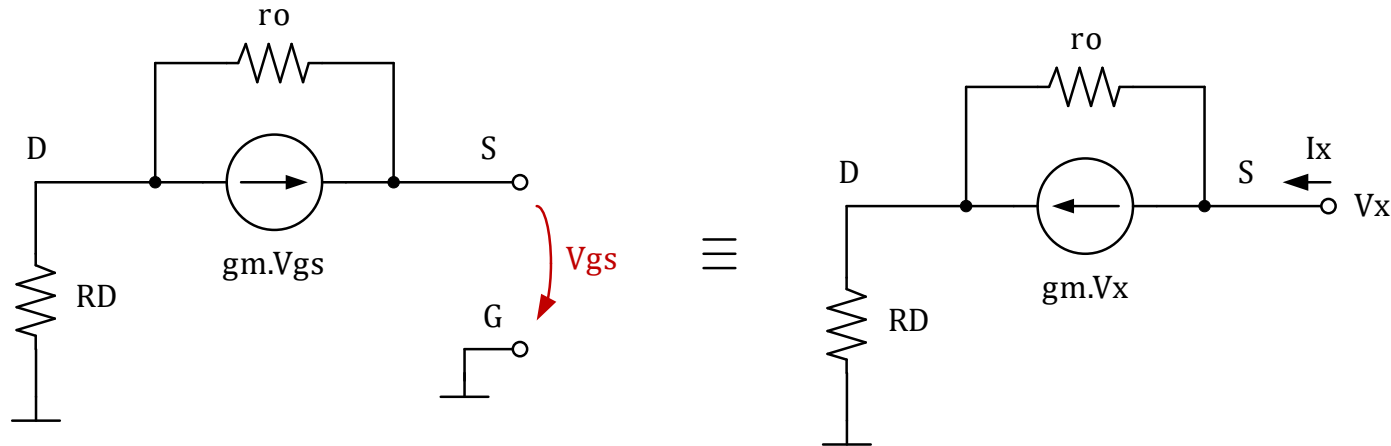
$$V_X = I_X \cdot R_S + I_X \cdot r_o + I_X \cdot g_m \cdot r_o \cdot R_S$$

$$R_{iD} = g_m \cdot r_o \cdot R_S + r_o + R_S$$

$$\text{Si } R_S = 0 \rightarrow R_{iD} = r_o$$

Capítulo 1: Introducción

$$R_{iS}$$



$$V_x = I_x R_D + (I_x - g_m V_x) r_o$$

$$V_x (1 + g_m r_o) = I_x (R_D + r_o)$$

$$R_{iS} = \frac{R_D + r_o}{1 + g_m r_o}$$

$$R_{iS} \approx \frac{R_D + r_o}{g_m r_o}$$

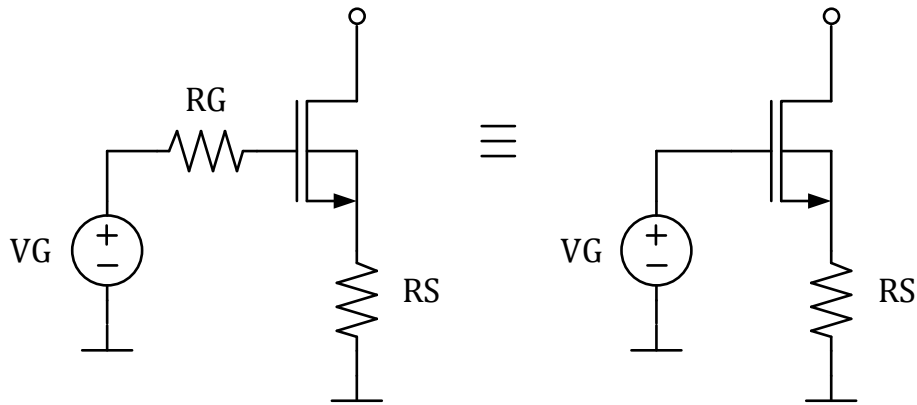
$$\text{Si } R_D = 0 \rightarrow R_{iS} = 1 / g_m$$

Capítulo 1: Introducción

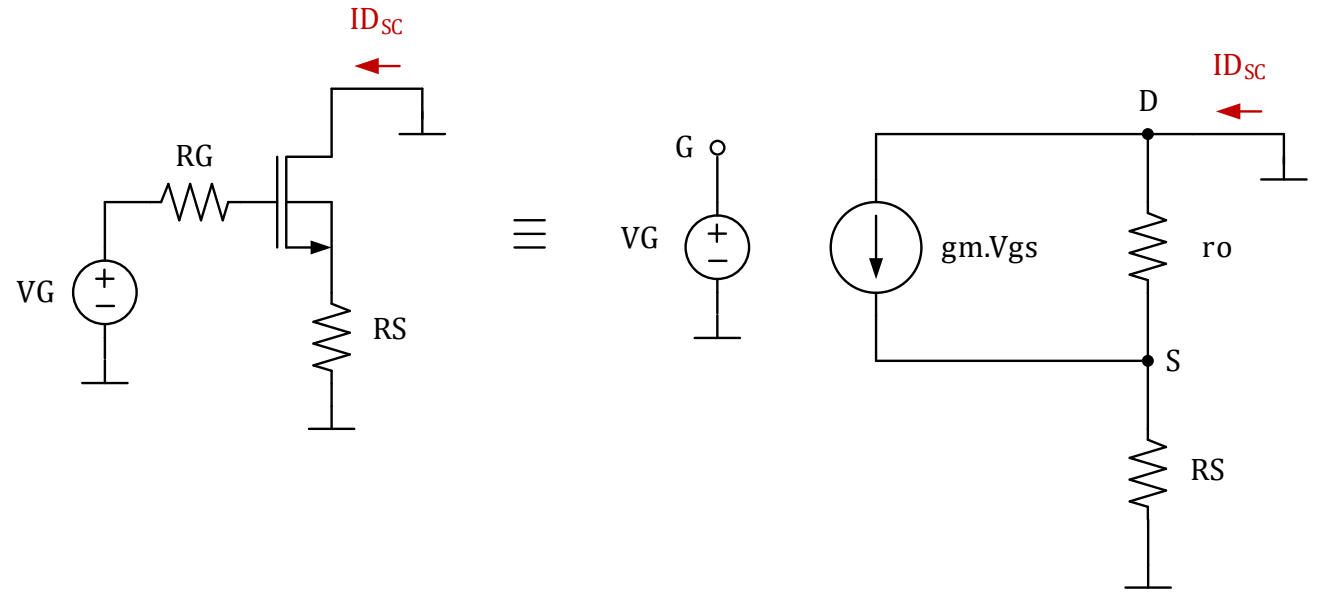
1.3.2 Ganancias

$I_{D_{sc}}$

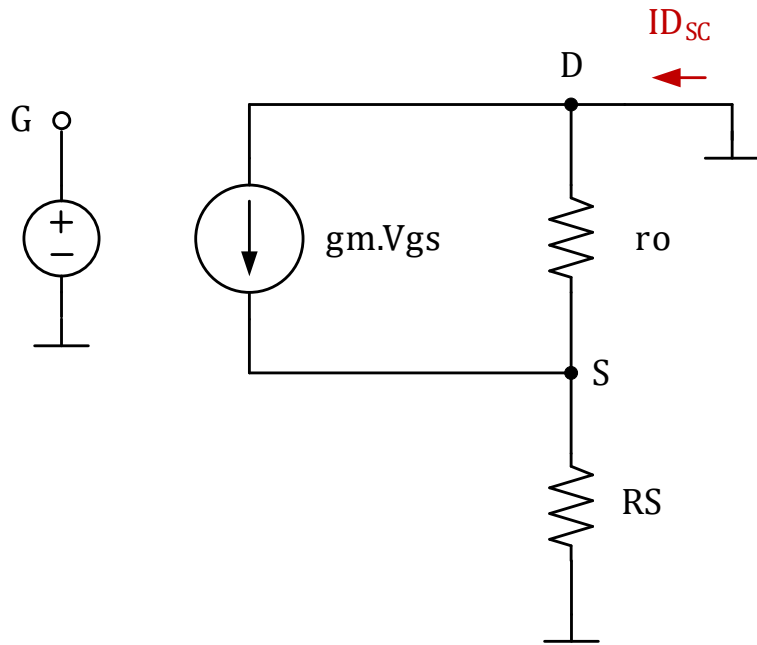
(Corriente de drain de cortocircuito)



Equivalente de Norton



Capítulo 1: Introducción



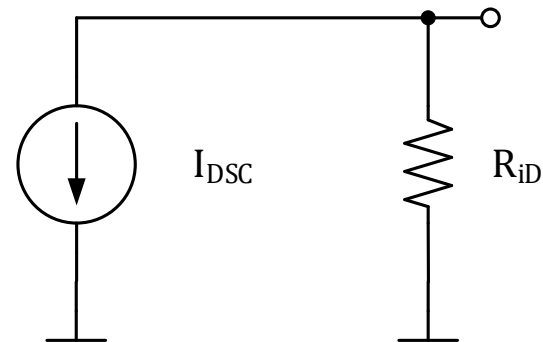
$$V_{gs} = V_G - I_{DSC} \cdot R_S$$

$$I_{DSC} \cdot R_S + (I_{DSC} - g_m V_{gs}) \cdot r_o = 0$$

$$I_{DSC} \cdot R_S + I_{DSC} \cdot r_o = g_m V_G r_o - I_{DSC} \cdot R_S \cdot g_m r_o$$

$$I_{DSC} = V_G \frac{g_m \cdot r_o}{g_m \cdot r_o \cdot R_S + R_S}$$

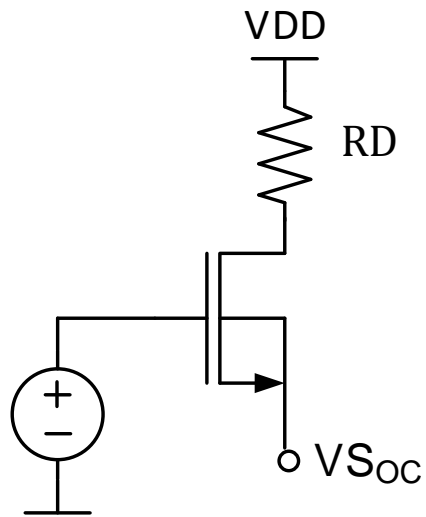
$$\text{Si } R_S = 0 \rightarrow I_{DSC} = V_G \cdot g_m$$



Capítulo 1: Introducción

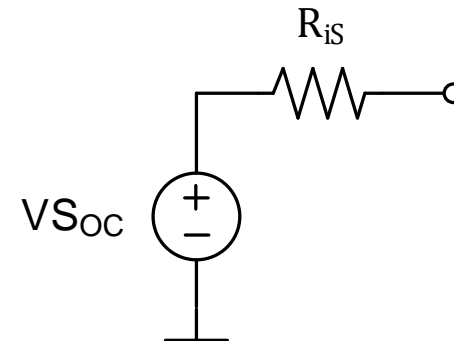
$V_{S_{OC}}$

(Tensión de source de circuito abierto)



$$V_{S_{SC}} = V_G \frac{g_m \cdot r_o}{1 + g_m \cdot r_o}$$

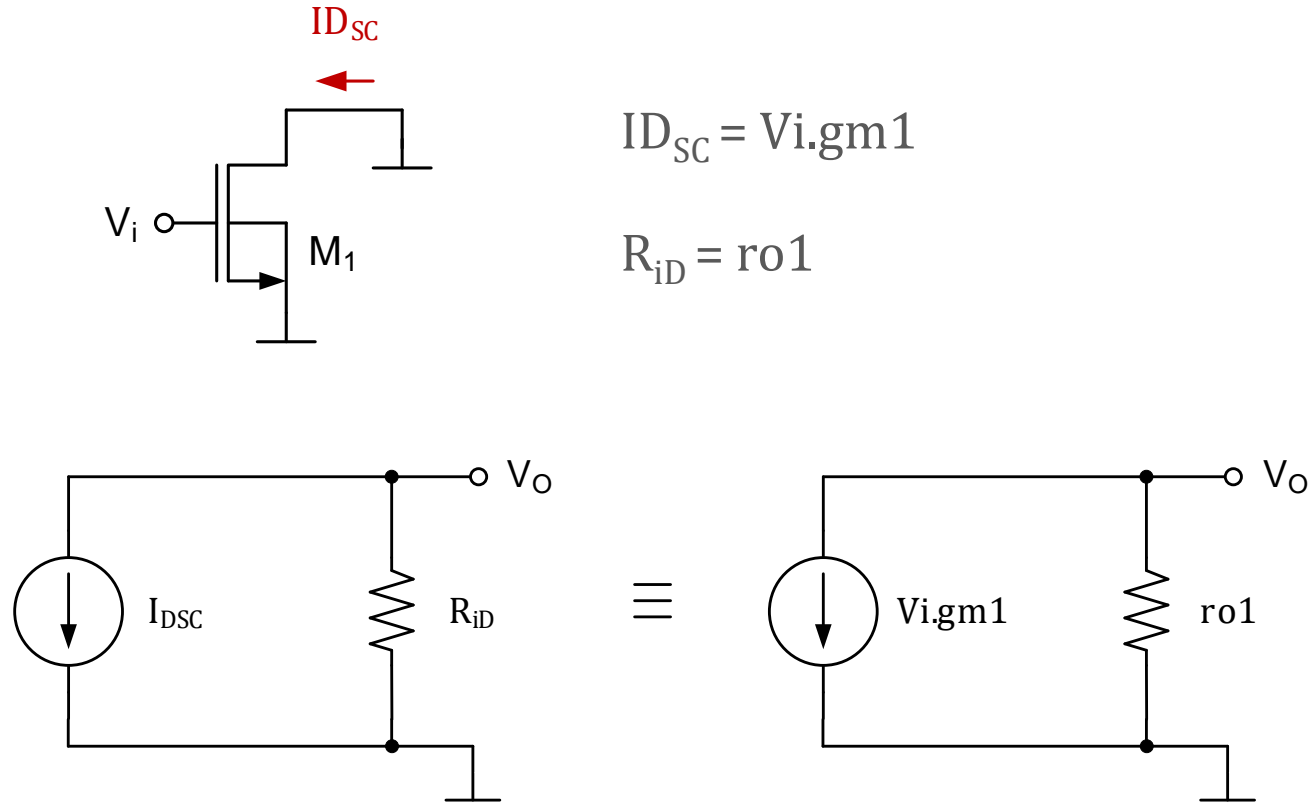
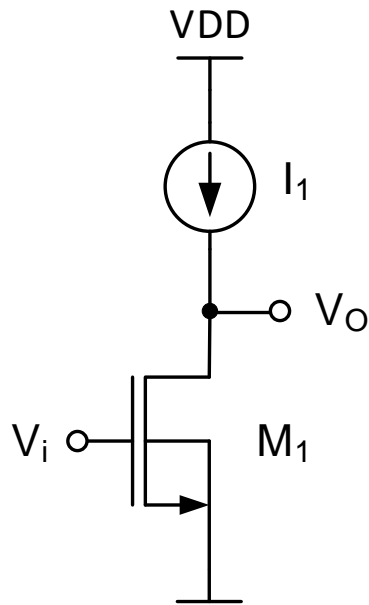
$$\rightarrow V_{S_{OC}} \approx V_G$$



Capítulo 1: Introducción

• 1.4 Circuitos Monoetapas

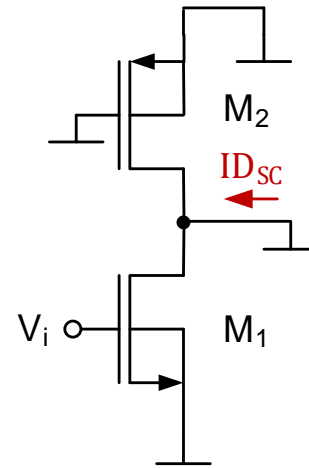
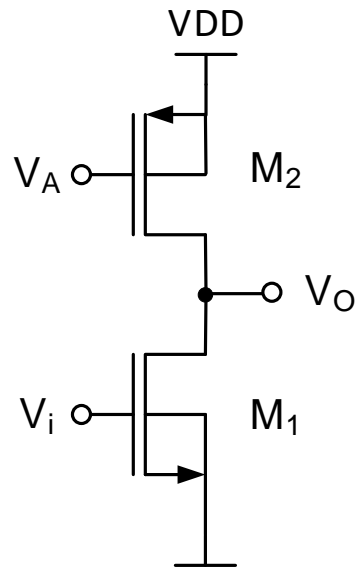
1.4.1 Carga Ideal



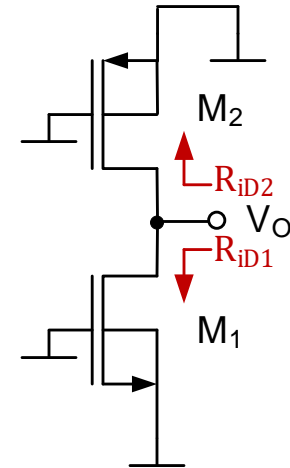
$$V_O = -V_i \cdot g_{m1} \cdot r_{o1}$$

Capítulo 1: Introducción

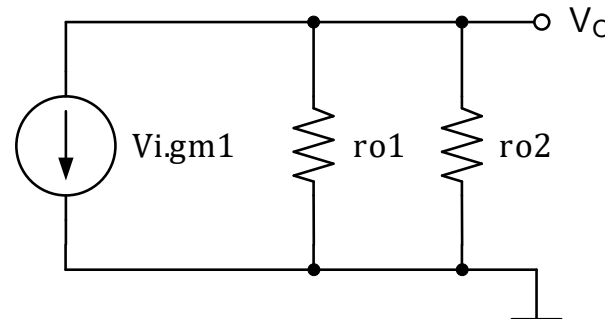
1.4.2 Carga Activa



$$I_{DSC} = V_i \cdot g_{m1}$$



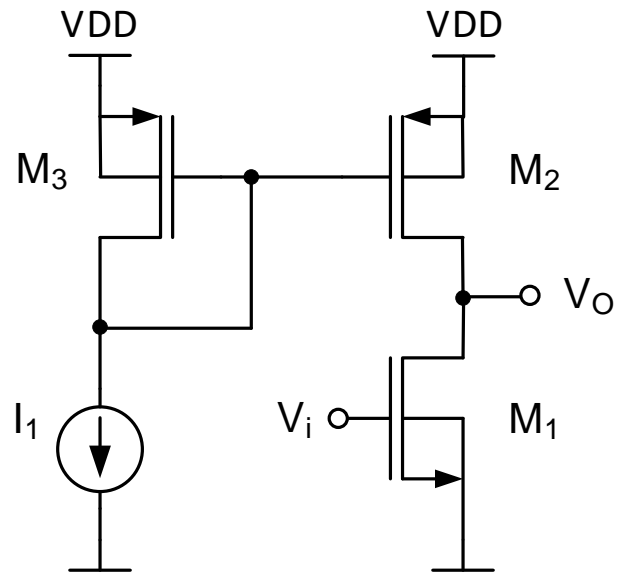
$$R_{iD} = r_{o1} // r_{o2}$$



$$V_O = -V_i \cdot g_{m1} \cdot (r_{o1} // r_{o2})$$

Capítulo 1: Introducción

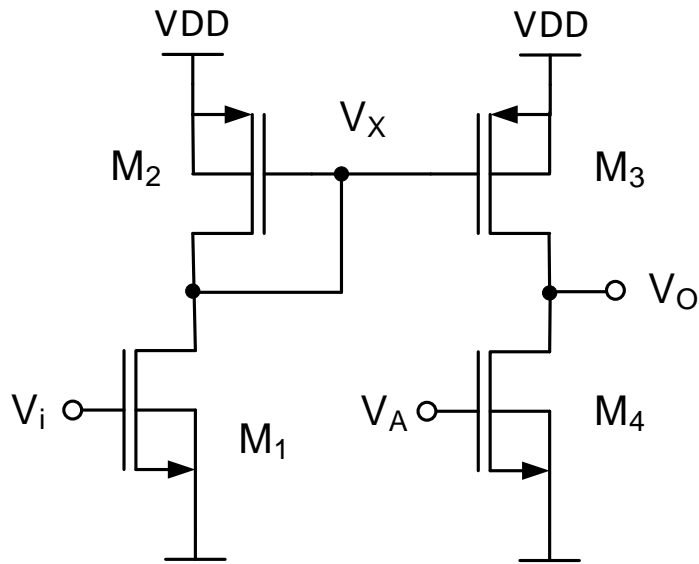
1.4.3 Carga Activa v2



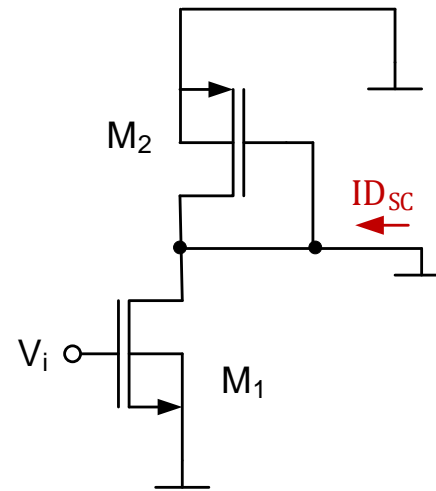
$$V_o = - V_i \cdot g_{m1} \cdot (r_{o1} // r_{o2})$$

Capítulo 1: Introducción

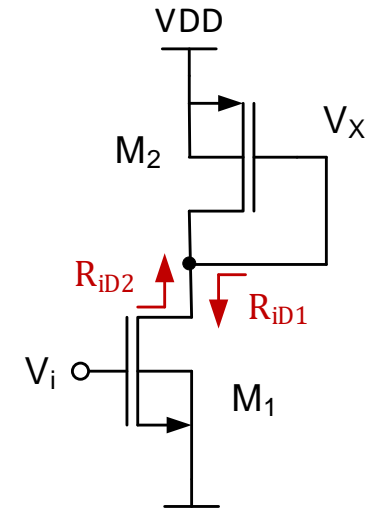
1.4.4 Carga Activa v3



- V_x / V_i



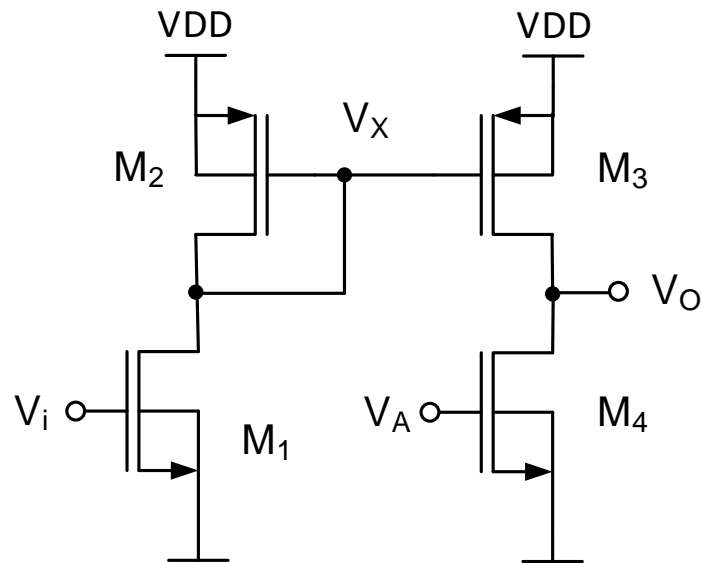
$$ID_{SC} = Vi.gm1$$



$$R_{iD} = r_{o1} // (1/g_{m2}) \approx 1/g_{m2}$$

$$V_X = -V_i \frac{g_{m1}}{g_{m2}}$$

Capítulo 1: Introducción



- V_O / V_X

$$V_O = -V_X \cdot g_{m3} \cdot (r_{o3} // r_{o4})$$

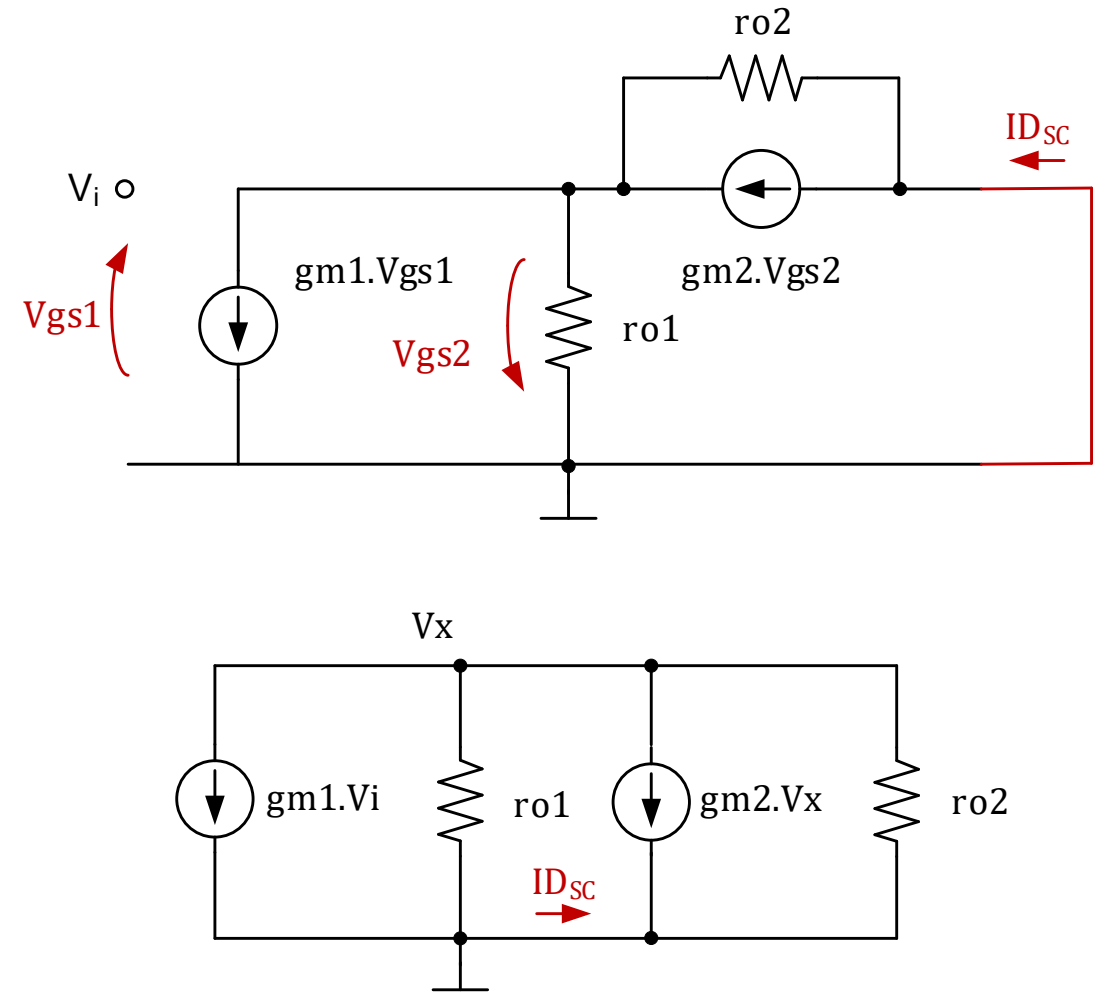
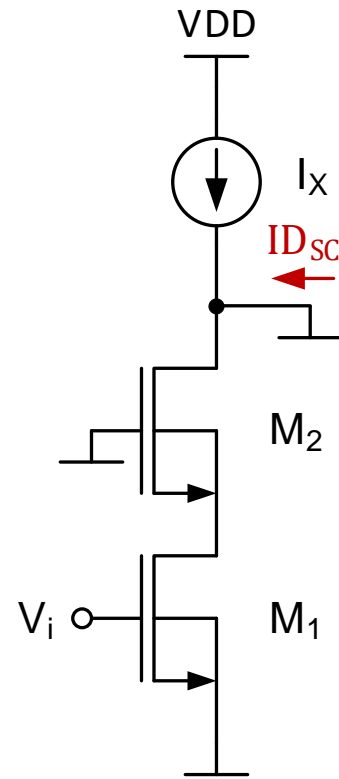
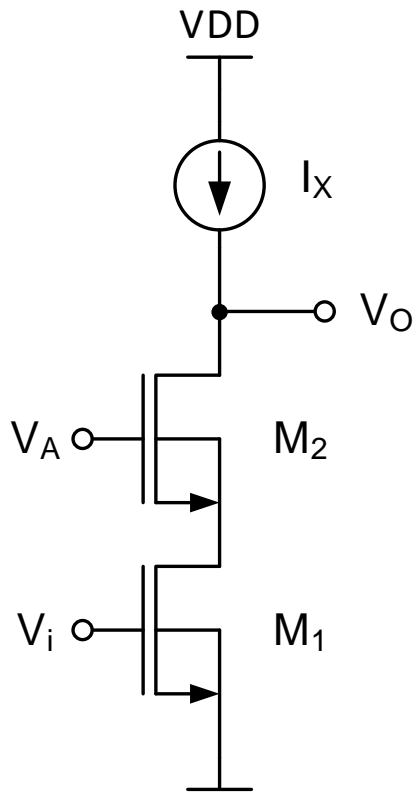
- V_O / V_i

$$V_O = V_i \frac{g_{m3}}{g_{m2}} g_{m1} (r_{o3} // r_{o4}) \quad (\text{Cambio de signo})$$

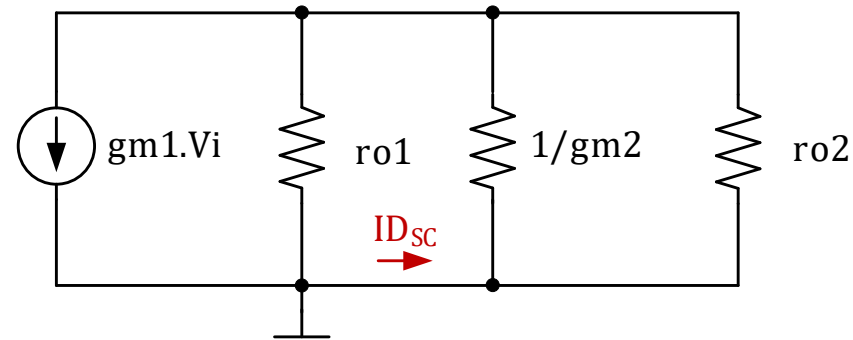
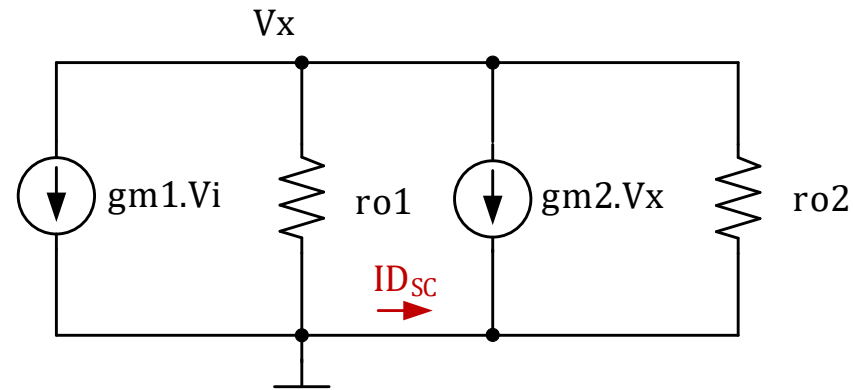
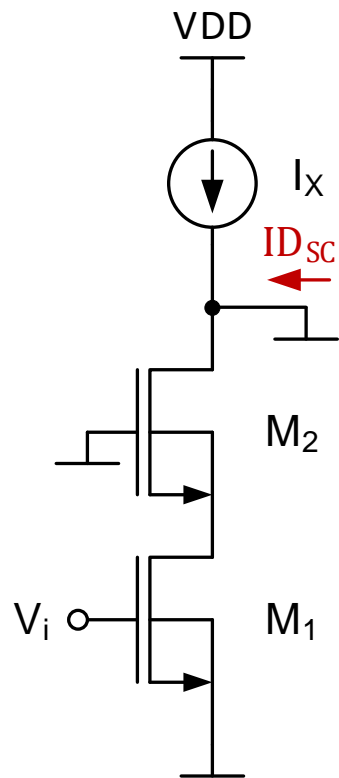
Si $M_2 = M_3 \rightarrow V_O = V_i \cdot g_{m1} \cdot (r_{o3} // r_{o4})$

Capítulo 1: Introducción

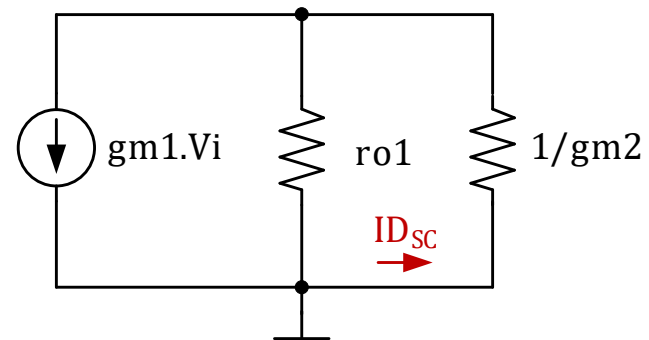
1.4.5 Cascode



Capítulo 1: Introducción



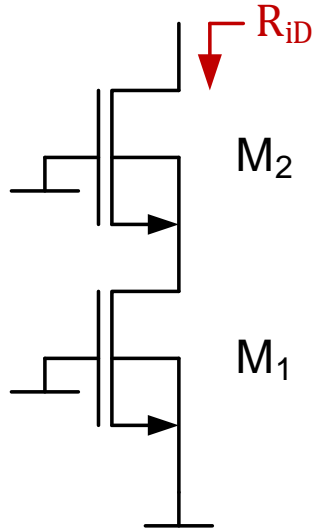
$$1/gm_2 \ll ro_2$$



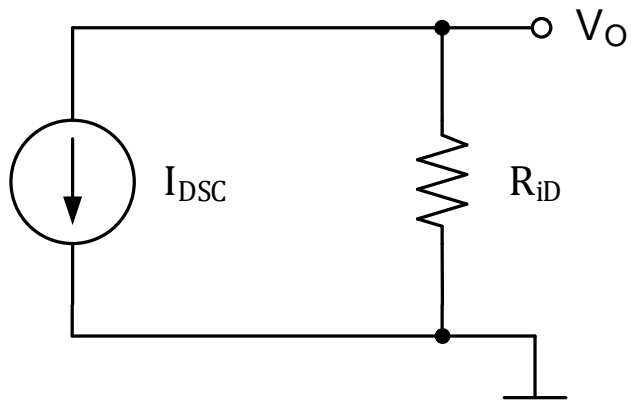
$$1/gm_2 \ll ro_1 \rightarrow$$

$$ID_{SC} \approx V_i.gm_1$$

Capítulo 1: Introducción



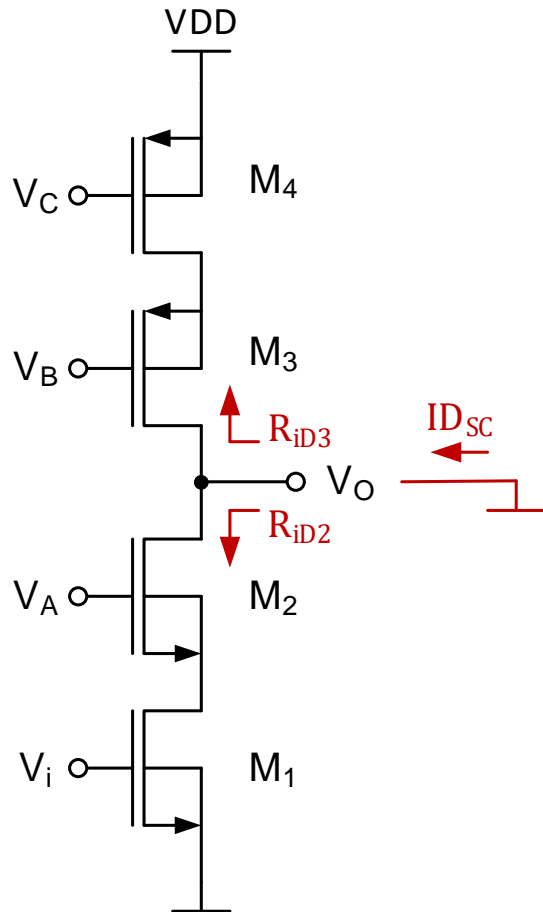
$$R_{iD} = g_{m2}.r_{o2}.r_{o1} + r_{o2} + r_{o1} \approx g_{m2}.r_{o2}.r_{o1}$$



$$V_o = -V_i.g_{m1}.r_{o1}.g_{m2}.r_{o2}$$

Capítulo 1: Introducción

1.4.6 Cascode con carga activa



$$I_{D_{SC}} = V_i \cdot g_{m1}$$

$$R_{iD2} = g_{m2} \cdot r_{o2} \cdot r_{o1}$$

$$R_{iD3} = g_{m3} \cdot r_{o3} \cdot r_{o4}$$

$$V_o = - V_i \cdot g_{m1} \cdot (g_{m2} \cdot r_{o2} \cdot r_{o1}) // (g_{m3} \cdot r_{o3} \cdot r_{o4})$$