

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 19: Circuitos Amplificadores Lineales (7)

Patricio Parada
pparada@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

15 de Octubre de 2009

Amplificadores Multietapa

- Interconexión de Amplificadores

- Amplificadores en Cascada

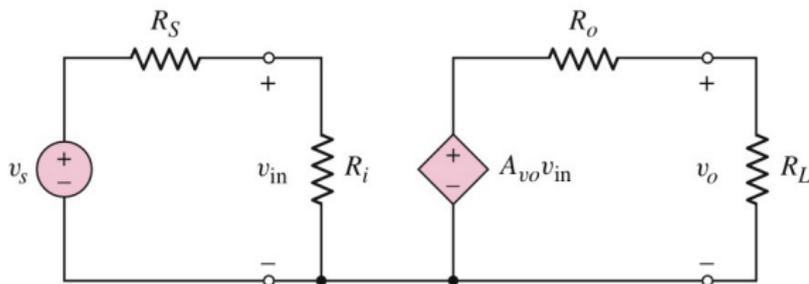
- Amplificador Darlington

- Amplificador Cascodo

- ▶ Existen diversas aplicaciones en las que las especificaciones de un transistor no se pueden cumplir con un circuito amplificador basado en un solo transistor.
- ▶ Vamos a construir un circuito amplificador utilizando como bloques las configuraciones vistas en este curso.
- ▶ La interconexión puede ser en serie o **cascada**, o en paralelo o **shunt**.
- ▶ La ganancia total que se obtiene al interconectar estos bloques fundamentales dependerá de la ganancia de voltaje de cada uno de ellas, así como de las impedancias de entrada y salida de cada módulo.

Amplificador Multietapas de Voltaje I

- ▶ Consideremos el amplificador multietapas de voltaje mostrado en la figura



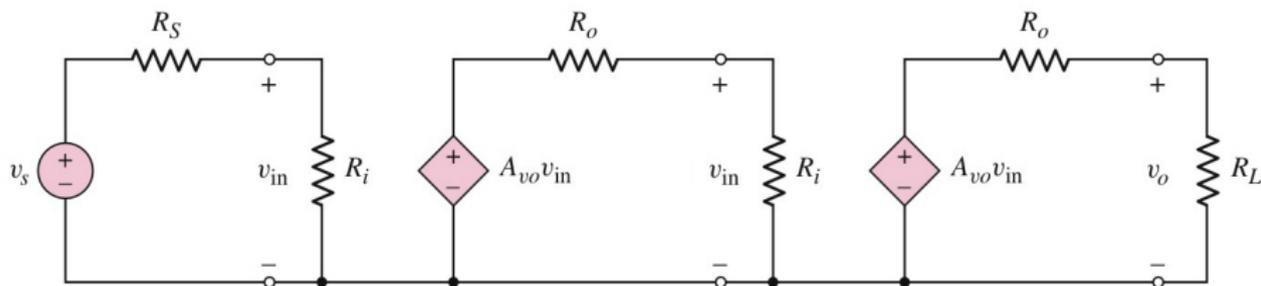
- ▶ Consideremos que la fuente del circuito está caracterizado por V_s y R_S .
- ▶ De la misma forma la carga del circuito es de tipo resistivo y de valor R_L .
- ▶ Cada etapa está caracterizada por una ganancia nominal A_{vo} y las resistencias R_i y R_o .

Amplificador Multietapas de Voltaje II

- ▶ La ganancia de voltaje del circuito amplificador de una etapa es

$$A_v = \frac{R_i}{R_S + R_i} \frac{R_L}{R_o + R_L} A_{vo}. \quad (1)$$

- ▶ Si utilizamos una segunda etapa de amplificación tendremos



- ▶ La ganancia de voltaje del circuito amplificador de dos etapas es

$$A_v = \frac{R_i}{R_S + R_i} \frac{R_L}{R_o + R_L} (A_{vo})^2 \frac{R_i}{R_o + R_i}. \quad (2)$$

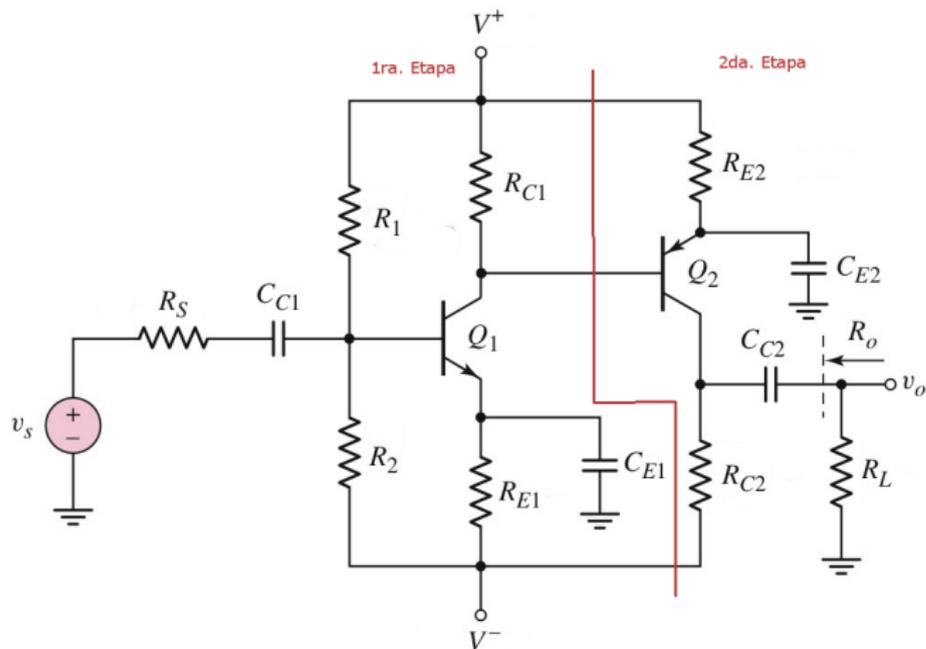
- ▶ En general, la conexión de n etapas en cascada se traduce en un aumento de la ganancia de voltaje igual a

$$A_v = \frac{R_i}{R_S + R_i} \frac{R_L}{R_o + R_L} (A_{vo})^n \left(\frac{R_i}{R_o + R_i} \right)^{n-1}. \quad (3)$$

- ▶ La conexión en cascada tiene un efecto sobre la ganancia neta de voltaje, pero no sobre las resistencias de entrada y salida del circuito.

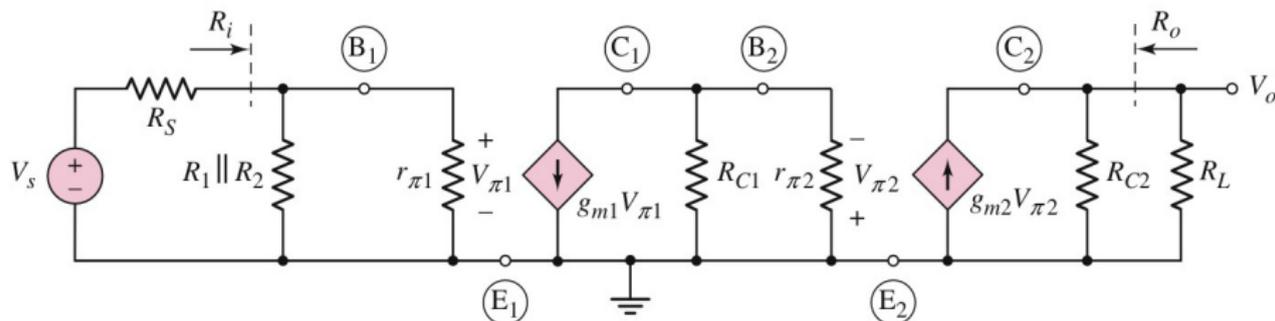
Amplificadores en Cascada I

- Consideremos el amplificador bipolar de la figura:



Amplificadores en Cascada II

- ▶ Ambos transistores están en la configuración de fuente común.
- ▶ El circuito equivalente para pequeña señal es el siguiente



- ▶ Recordamos que la ganancia nominal de cada etapa es

$$A_{vo} = g_m R_o$$

donde R_o es la impedancia de salida del circuito amplificador básico.

- ▶ La ganancia real de voltaje queda dada por

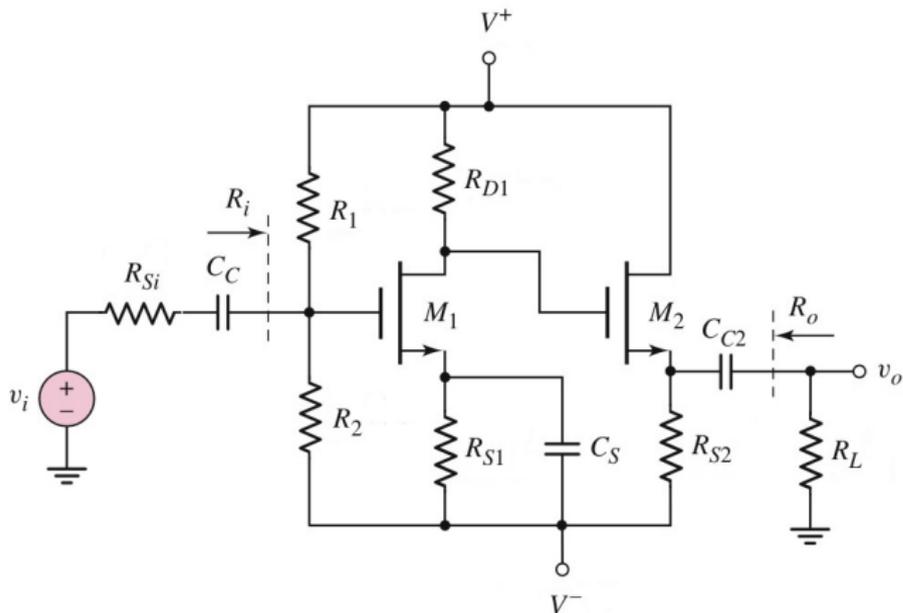
$$A_v = g_{m1}g_{m2}(R_{C1} \parallel r_{\pi2})(R_{C2} \parallel R_L) \frac{R_i}{R_i + R_s} \quad (4)$$

donde $R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{\pi1}$.

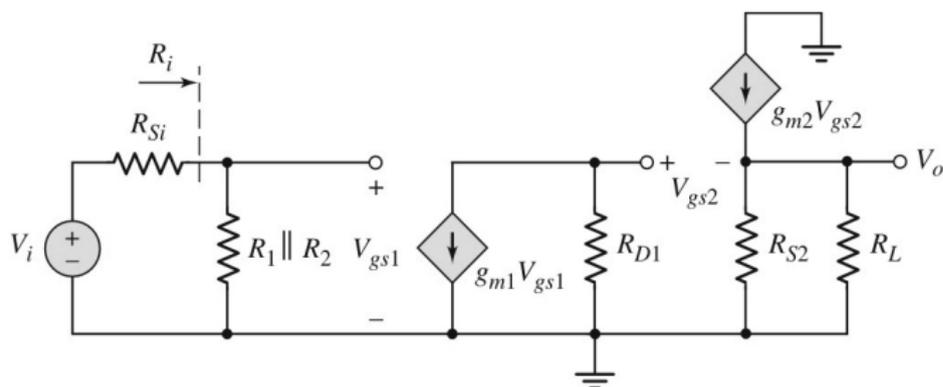
- ▶ La resistencia de salida del circuito sigue siendo $R_o = R_{C2}$.
- ▶ Un segundo tipo de conexión bastante utilizado corresponde al par Darlington (o simplee

Amplificadores en Cascada IV

- Una implementación equivalente puede realizarse utilizando transistores MOSFET.



- El circuito equivalente para pequeña señal es



- Vemos que la ganancia de voltaje se puede determinar fácilmente:

$$V_{gs2} = \frac{V_o}{g_{m2}(R_{S2} \parallel R_L)}$$

$$-g_{m1}V_{gs2}R_{D1} = V_{gs2} + V_o = \frac{1 + g_{m2}R_{S2} \parallel R_L}{g_{m2}R_{S2} \parallel R_L} V_o$$

$$V_{gs1} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + R_{Si}} V_i.$$

► Luego

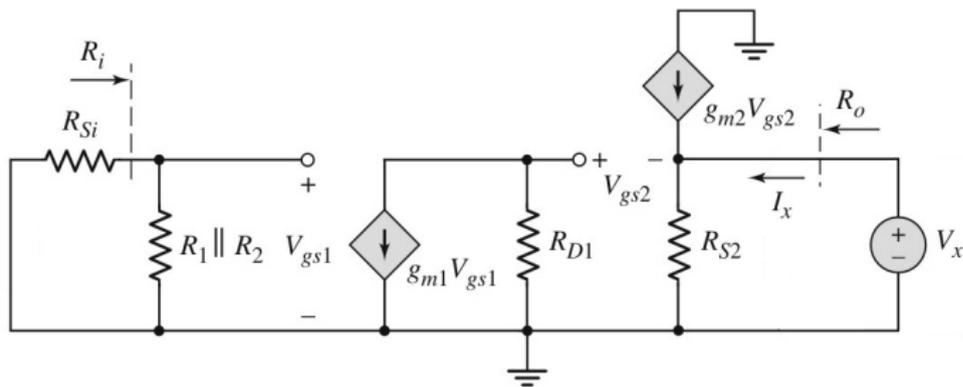
$$A_v = -\frac{g_{m1}g_{m2}R_{D1}(R_{S2} \parallel R_L)}{1 + g_{m2}R_{S2} \parallel R_L} \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + R_{Si}} \quad (5)$$

► La impedancia de entrada del circuito sigue siendo

$$R_i = R_1 \parallel R_2. \quad (6)$$

Amplificadores en Cascada VI

- ▶ La impedancia de salida la obtenemos relajando la fuente V_i y aplicando una fuente V_x en la salida (reemplazamos la carga R_L por esta fuente).



- ▶ Dado que $V_{gs1} = 0$ entonces $V_{gs2} = -V_x$.

► Por otro lado,

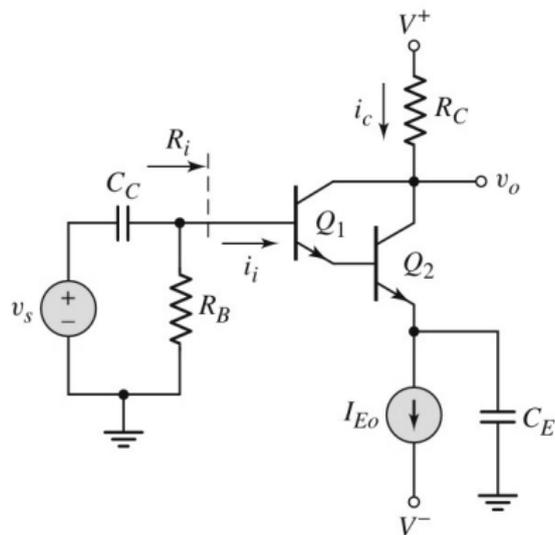
$$I_x + g_{m2}V_{gs2} = \frac{V_x}{R_{S2}}.$$

► Luego,

$$R_o = R_{S2} \parallel \frac{1}{g_{m2}}. \quad (7)$$

Amplificador Darlington I

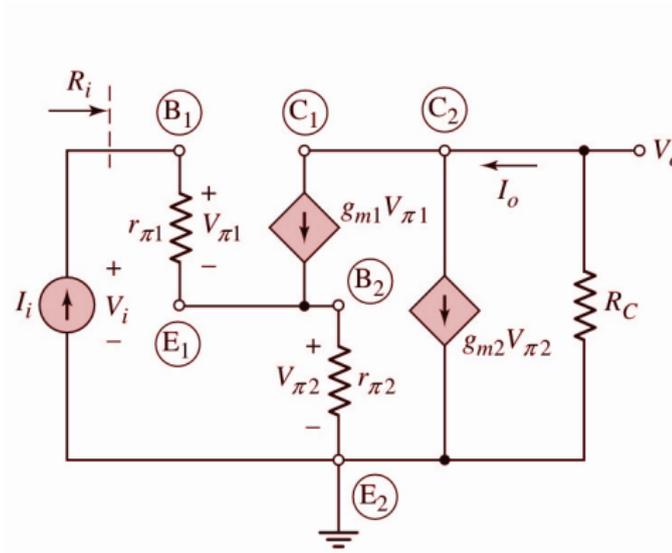
- Un caso especial de amplificador en cascada corresponde a la utilización de un par Darlington como elemento central del amplificador.



- Esta configuración resulta útil en amplificación de corriente.

Amplificador Darlington II

- El circuito equivalente para pequeña señal es el siguiente



- ▶ La ganancia de voltaje la podemos obtener planteado

$$V_i = V_{\pi 1} + V_{\pi 2}$$

$$\text{LCK (B2)} : \frac{V_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} = \frac{V_{\pi 1}}{r_{\pi 1}} + g_{m1} V_{\pi 1}$$

$$\text{LCK (C2)} : \frac{V_o}{R_C} = -g_{m2} V_{\pi 2} - g_{m1} V_{\pi 1}$$

- ▶ Recordando que $\beta = r_{\pi} g_m$ obtenemos

$$V_{\pi 1} = \frac{r_{\pi 1}}{r_{\pi 1} + (1 + \beta_1) r_{\pi 2}} V_i$$

- ▶ Similarmente

$$V_o = -(\beta_2(1 + \beta_1) + \beta_1) \frac{R_C}{r_{\pi 1}} V_{\pi 1}.$$

Amplificador Darlington IV

- ▶ La ganancia de voltaje resultante es

$$A_v = -\frac{(\beta_2(1 + \beta_1) + \beta_1)R_C}{r_{\pi 1} + (1 + \beta_1)r_{\pi 2}}$$

- ▶ La ganancia de corriente resulta directo de determinar:

$$A_i = \beta_1 + \beta_2(1 + \beta_1) \approx \beta_1\beta_2.$$

- ▶ La resistencia de entrada es

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = r_{\pi 1} + (1 + \beta_1)r_{\pi 2}. \quad (8)$$

- ▶ Recordar que $g_m = \frac{V_T}{I_{CQ}}$. Luego

$$I_{CQ1} = \frac{\beta_1 V_T}{r_{\pi 1}}; \quad I_{CQ2} = \frac{\beta_2 V_T}{r_{\pi 2}}$$

Amplificador Darlington V

- ▶ Por otro lado $I_{EQ1} = \alpha_1 I_{CQ1} = I_{BQ2} = \frac{I_{CQ2}}{\beta_2}$. Como $\alpha_1 \approx 1$ tenemos que

$$I_{CQ1} \approx \frac{I_{CQ2}}{\beta_2}$$

- ▶ Finalmente obtenemos que

$$\frac{r_{\pi 1}}{\beta_1} \approx r_{\pi 2}.$$

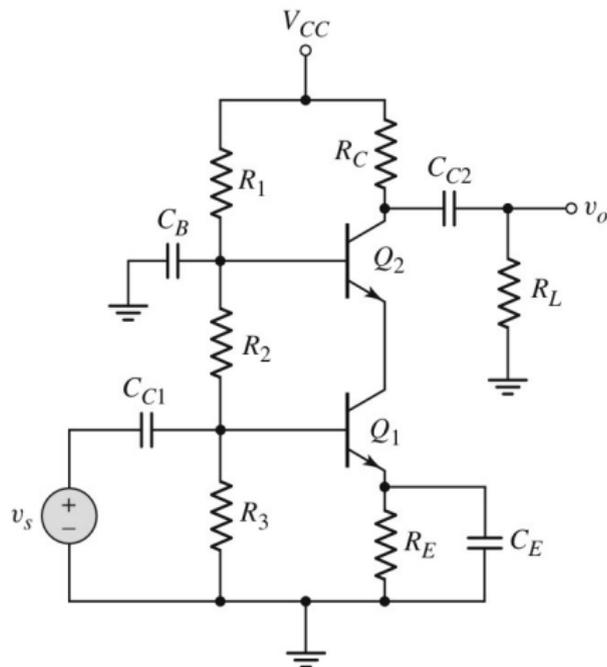
y

$$R_i \approx 2\beta_1 r_{\pi 2}.$$

- ▶ La impedancia de salida del circuito la calculamos utilizando el método habitual.
- ▶ Es posible notar que $V_{\pi 1} = V_{\pi 2} = 0$ y por lo tanto $R_o = R_C$.

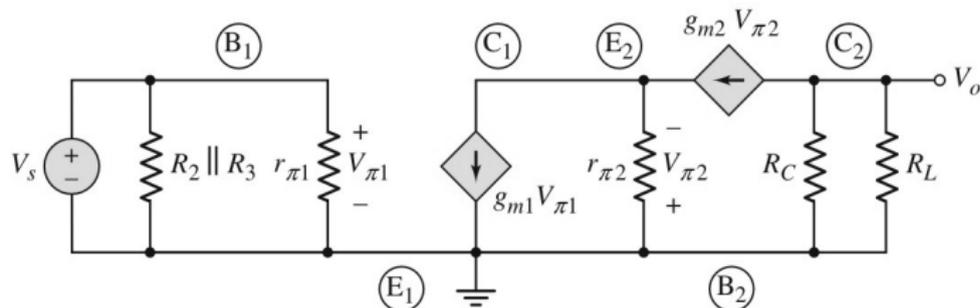
Amplificador Cascodo I

- El amplificador **cascodo** combina un amplificador de emisor común con uno de base común (o sus equivalentes para el caso de implementarlo utilizando transistores MOS).



Amplificador Cascodo II

- El circuito equivalente AC remueve las resistencias R_1 y R_E del circuito. Por lo tanto, el equivalente para pequeña señal es



- Notamos que $V_{\pi 1} = V_s$ y

$$A_v = -g_{m1} \alpha_2 R_C \parallel R_L. \quad (9)$$

- Notar que $\alpha_2 \approx 1$, por lo que la ganancia del circuito completo es esencialmente la de la etapa de emisor común.

Amplificador Cascodo III

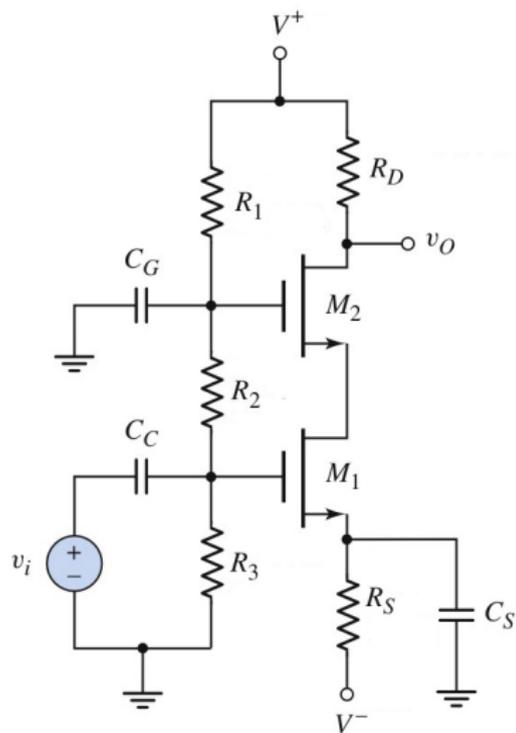
- ▶ La impedancia de entrada es $R_i = R_2 \parallel R_3 \parallel r_{\pi 1}$.
- ▶ La impedancia de salida la determinamos fijando $V_s = 0$.
- ▶ Luego, $V_{\pi 1} = 0$.
- ▶ Por otro lado,

$$\frac{V_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} = g_{m2} V_{\pi 2} = \frac{\beta_2}{r_{\pi 2}} V_{\pi 2}.$$

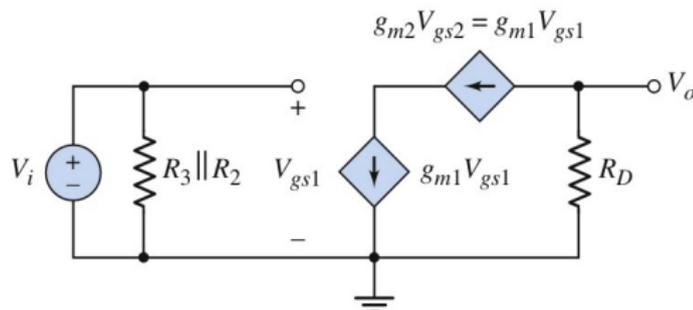
- ▶ Como esta ecuación es válida para cualquier β_2 , la única solución posible es $V_{\pi 2} = 0$.
- ▶ Finalmente, $R_o = R_C$.

Amplificador Cascodo IV

- ▶ El cascode también puede ser implementado utilizando transistores MOS.
- ▶ En este caso el transistor M_1 está conectado en el modo de fuente común, y el transistor M_2 en el modo de compuerta común.
- ▶ Esta configuración tiene una mejor respuesta en frecuencia que cada uno de sus módulos por separado.



- ▶ El modelo equivalente para pequeña señal es



- ▶ La ganancia de voltaje es $A_v = -g_{m1}R_D$.
- ▶ La impedancia de entrada es $R_i = R_3 \parallel R_2$.
- ▶ La impedancia de salida es $R_o = R_D$.