

Tema 3 - Amplificadores de Una Etapa MOS

Asignatura: Electronica General - 2o GIERM

Objetivos

1. **Comprender** las cuatro configuraciones basicas de amplificadores MOS con carga pasiva: CS, CD, CG y CM.
2. **Calcular** ganancia de tension (A_v), resistencia de entrada (r_{in}) y resistencia de salida (r_{out}) para cada configuracion.
3. **Comparar** cada configuracion con su amplificador ideal equivalente (tension, buffer, corriente, espejo).
4. **Analizar** el efecto de la carga activa y las combinaciones de etapas (cascode, buffer).

Valores tipicos de referencia

Parametro	Valor
g_{m1}	1 mA/V
g_{mb1}	0.1 mA/V
r_{o1}	40 k Ω
R_L	5 k Ω
V_{EFF}	0.2 V
I_D	100 μ A

Entorno cargado correctamente.

gm1=1.0 mA/V, gmb1=0.1 mA/V, ro1=40 kohm, RL=5 kohm

Formulario - Amplificadores de 1 Etapa MOS (Carga Pasiva)

Config	A_v	r_{in}	r_{out}	Tipo ideal
CS (Source Comun)	$\frac{-g_{m1}}{(r_{o1} \parallel R_L)}$	∞	r_{o1}	Amp. de tension

Config	A_v	r_{in}	r_{out}	Tipo ideal
CD (Drain Comun)	$\frac{g_{m1}}{g_{m1} + g_{mb1} + \frac{1}{r_{o1}} + \frac{1}{R_L}}$ ≈ 1	∞	$\frac{1}{g_{m1} + g_{mb1} + \frac{1}{r_{o1}}}$	Buffer de tension
CG (Gate Comun)	$\frac{r_{in}}{r_{in} + R_S}$ $(g_{m1} + g_{mb1} + \frac{1}{r_{o1}})$ $(r_{o1} R_L)$	$\frac{1}{g_{m1} + g_{mb1} + \frac{1}{r_{o1}}} \left(1 + \frac{R_L}{r_{o1}}\right)$	$r_{o1} + [1 + (g_{m1} + g_{mb1})r_{o1}]R_S$	Amp. de corriente
CM (Espejo)	--	$\frac{1}{g_{m1} + \frac{1}{r_{o1}}} \approx \frac{1}{g_{m1}}$	r_{o2}	Espejo de corriente

Nota: En CG, r_{out} exhibe el **efecto cascode**: la resistencia de salida se amplifica por $(g_m r_o)$, lo que resulta en valores muy altos.

VALORES NUMERICOS CON PARAMETROS TIPICOS

```
--- CS (Source Comun) ---
  ro1 || RL = 4.444 kohm
  Av = -4.444
  rin = infinito (puerta MOS)
  rout = 40 kohm

--- CD (Drain Comun / Source Follower) ---
  Av = 0.7547
  rin = infinito (puerta MOS)
  rout = 0.889 kohm

--- CG (Gate Comun) con RS = 100 ohm ---
  rin = 1.000 kohm
  rout = 44.5 kohm (efecto cascode!)
  Av = 4.545

--- CM (Espejo de Corriente) ---
  rin = 0.976 kohm = 1/gm1 aprox 1.000 kohm
  rout = 40 kohm
```

1. CS - Source Comun (Common Source)

El amplificador **CS** es la configuracion mas comun. Funciona como **amplificador de tension inversor**.

Caracteristicas clave:

- **Ganancia de tension** $A_v = -g_{m1}(r_{o1} || R_L)$ (negativa = inversora)
- **Resistencia de entrada** $r_{in} = \infty$ (puerta MOS aislada)
- **Resistencia de salida** $r_{out} = r_{o1}$
- Analogia: equivalente al **emisor comun** (EC) en BJT

Aplicacion: Etapa de ganancia de tension en amplificadores multietapa.

V_{in} 

```
-----
AttributeError                                Traceback (most recent call last)
Cell In[3], line 10
      7 d += elm.Line().right(1.5)
      9 # Transistor NMOS
--> 10 M = d.add(elm.MosfetN().right().anchor('gate').label('$M_1$', 'right'))
     12 # VDD arriba
     13 d += elm.Line().at(M.drain).up(1)

AttributeError: module 'schemdraw.elements' has no attribute 'MosfetN'
```

Comparacion CS vs Amplificador de Tension Ideal

Parametro	Ideal	CS Real
A_v	$-\infty$ (finito con realim.)	$-g_{m1}(r_{o1} R_L) \approx -4.44$
r_{in}	∞	∞ (cumple!)
r_{out}	0	$r_{o1} = 40\text{ k}\Omega$ (no cumple)
Inversion	Si	Si

El CS tiene r_{in} ideal pero r_{out} alta. Para reducir r_{out} se anade una etapa **CD** (buffer) a la salida.

2. CD - Drain Comun (Common Drain / Source Follower)

El amplificador **CD** es un **buffer de tension** (seguidor de source).

Caracteristicas clave:

- Ganancia de tension** $A_v = \frac{g_{m1}}{g_{m1} + g_{mb1} + \frac{1}{r_{o1}} + \frac{1}{R_L}} \approx 1$ (no inversora)
- Resistencia de entrada** $r_{in} = \infty$
- Resistencia de salida** $r_{out} = \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1} + \frac{1}{r_{o1}}} \approx 0.889\text{ k}\Omega$
- Analogia: equivalente al **colector comun** (CC) en BJT

Aplicacion: Etapa de salida para reducir la impedancia de salida de otra etapa.

Comparacion CD vs Buffer de Tension Ideal

Parametro	Ideal	CD Real
A_v	1	≈ 0.83 (con g_{mb})
r_{in}	∞	∞ (cumple!)
r_{out}	0	$\approx 889\ \Omega$ (mucho menor que CS)

Parametro	Ideal	CD Real
Inversion	No	No (cumple!)

El efecto de body (g_{mb}) reduce ligeramente la ganancia. Sin body effect: $A_v \rightarrow 1$.

3. CG - Gate Comun (Common Gate)

El amplificador **CG** es un **amplificador de corriente** (baja r_{in} , alta r_{out}).

Características clave:

- **Ganancia de tension** $A_v = \frac{r_{in}}{r_{in} + R_S} \left(g_{m1} + g_{mb1} + \frac{1}{r_{o1}} \right) (r_{o1} || R_L)$
- **Resistencia de entrada** $r_{in} = \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1} + \frac{1}{r_{o1}}} \left(1 + \frac{R_L}{r_{o1}} \right)$
- **Resistencia de salida** $r_{out} = r_{o1} + [1 + (g_{m1} + g_{mb1})r_{o1}]R_S \approx (g_m r_o)R_S$ (**efecto cascode**)
- Analogía: equivalente a la **base comun** (BC) en BJT

Aplicacion: Segunda etapa en configuraciones **cascode** (CS + CG) para aumentar r_{out} drásticamente.

Comparacion CG vs Amplificador de Corriente Ideal

Parametro	Ideal	CG Real
A_v	$\frac{R_L}{R_S}$	Depende de g_m, r_o
r_{in}	0	$\approx 1 \text{ k}\Omega$ (baja, cercano a ideal)
r_{out}	∞	$\approx 4.5 \text{ M}\Omega$ (muy alta, efecto cascode!)
Inversion	No	No (cumple!)

Efecto cascode: $r_{out} \approx (g_m r_o)R_S$. Con $g_m r_o = 40$, la resistencia de salida se multiplica por 40 respecto a r_{o1} solo.

4. CM - Espejo de Corriente (Current Mirror)

El **espejo de corriente** copia la corriente de referencia a la salida con alta impedancia.

Características clave:

- **Ganancia de corriente** $A_i = \frac{g_{m2}}{g_{m1} + \frac{1}{r_{o1}}} \cdot \frac{r_{o2} \parallel R_L}{R_L}$
- **Resistencia de entrada** $r_{in} = \frac{1}{g_{m1} + \frac{1}{r_{o1}}} \approx \frac{1}{g_{m1}}$
- **Resistencia de salida** $r_{out} = r_{o2}$
- Si $M_1 = M_2$ (mismas dimensiones): $A_i \approx 1$

Aplicacion: Fuente de corriente, carga activa, referencia de polarizacion.

Comparacion CM vs Espejo de Corriente Ideal

Parametro	Ideal	CM Real
A_i	1 (copia exacta)	≈ 0.997 (error por r_o finito)
r_{in}	0	$\approx 1/g_{m1}$ $= 1\text{ k}\Omega$
r_{out}	∞	$r_{o2} = 40\text{ k}\Omega$

Para mejorar r_{out} se usa el espejo **cascade**: se anade un CG en la salida.

5. Carga Activa vs Carga Pasiva

Aspecto	Carga Pasiva (R_L)	Carga Activa (Espejo PMOS)
Ganancia CS	$-g_m(r_{o1} \parallel R_L)$	$-g_m(r_{o1} \parallel r_{o2})$
Valor tipico	≈ -4.4	≈ -20 (mucho mayor!)
Caída de tensión	$I_D \cdot R_L$ (problemas de headroom)	Minima (V_{EFF})
Consumo	Potencia en resistencia	Solo corriente de polarización
Area en IC	Resistencias grandes	Transistores pequeños

En circuitos integrados siempre se usa carga activa. La carga pasiva solo se usa en circuitos discretos o para simplificar el analisis.

6. Combinaciones de Etapas

6.1 Cascode (CS + CG)

Apila un CS y un CG para obtener **altísima resistencia de salida**:

$$r_{out,cascode} = (g_m r_o)^2 \cdot R_S \quad (\text{telescopica})$$

Ventajas:

- r_{out} enormemente amplificada (efecto cascode al cuadrado)
- Mejor ganancia con carga activa: $A_v = -g_m \cdot [(g_m r_o) r_o \parallel (g_m r_o) r_o]$
- Menos efecto Miller

Desventaja: Reduce el rango de señal de salida (headroom).

6.2 CS + CD (Buffer de salida)

Añade un CD (source follower) a la salida del CS:

- **CS** proporciona la ganancia de tensión
- **CD** reduce r_{out} a $\approx 1/g_m$

$$A_v = A_{v,CS} \cdot A_{v,CD} \approx -g_m (r_o \parallel R_L) \cdot 1$$

Aplicación: Cuando se necesita manejar cargas de baja impedancia.

7. Ejercicios Resueltos

Ejercicio 1: Amplificador CS

Datos: $g_m = 2 \text{ mA/V}$, $r_o = 50 \text{ k}\Omega$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$

Calcular: A_v , r_{in} , r_{out}

Ejercicio 2: Buffer CD (Source Follower)

Datos: $g_m = 1 \text{ mA/V}$, $g_{mb} = 0.1 \text{ mA/V}$, $r_o = 40 \text{ k}\Omega$, $R_L = 5 \text{ k}\Omega$

Calcular: A_v , r_{out} . Cuando se usa esta configuración?

Ejercicio 3: Amplificador CG con efecto Cascode

Datos: $g_m = 1 \text{ mA/V}$, $g_{mb} = 0.1 \text{ mA/V}$, $r_o = 40 \text{ k}\Omega$, $R_S = 100 \Omega$, $R_L = 5 \text{ k}\Omega$

Calcular: r_{in} , r_{out} (demostrar efecto cascode), A_v

Ejercicio 4: Espejo de Corriente

Datos: $g_{m1} = g_{m2} = 1 \text{ mA/V}$, $r_{o1} = r_{o2} = 40 \text{ k}\Omega$, $R_L = 5 \text{ k}\Omega$

Calcular: A_i , r_{in} , r_{out}

8. Catalogo de Ejercicios

#	Tipo	Descripcion	Dificultad
1	CS basico	Calcular A_v , r_{in} , r_{out} dados g_m , r_o , R_L	Baja
2	CD buffer	Calcular A_v , r_{out} incluyendo efecto body (g_{mb})	Baja
3	CG cascode	Demostrar efecto cascode en r_{out} , calcular A_v	Media
4	CM espejo	Calcular A_i , error de copia, r_{in} , r_{out}	Media
5	CS + CD	Calcular parametros de amplificador de 2 etapas con buffer	Media-Alta
6	Cascode completo	CS + CG con carga activa cascode, calcular r_{out} , A_v	Alta

Metodologia general de resolucion

1. **Identificar** la configuracion (CS, CD, CG, CM)
2. **Dibujar** el modelo de pequena senal (fuentes $g_m v_{gs}$, $g_{mb} v_{bs}$, r_o)
3. **Aplicar** las formulas del formulario
4. **Verificar** coherencia: CS invierte, CD no invierte, CG baja r_{in} , etc.

9. Tabla Resumen Comparativa

	CS	CD	CG	CM
Funcion	Amp. tension	Buffer tension	Amp. corriente	Espejo corriente
A_v	$-g_m(r_o R_L)$	≈ 1	Depende de R_S	--
r_{in}	∞	∞	$\approx 1/g_m$ (baja)	$\approx 1/g_m$

		CS	CD	CG	CM
r_{out}	r_o (alta)		$\approx 1/g_m$ (baja)	$(g_m r_o) R_S$ (muy alta)	r_o
Invierte	Si		No	No	--
Uso tipico	Ganancia		Etapas salida	Cascode	Polarizacion
Equivalente BJT	EC		CC	BC	Espejo BJT

Reglas rapidas de disenno

- **Necesitas ganancia?** $\rightarrow$ CS
- **Necesitas baja impedancia de salida?** $\rightarrow$ CD (buffer)
- **Necesitas alta impedancia de salida?** $\rightarrow$ CG (cascode)
- **Necesitas copiar corriente?** $\rightarrow$ CM (espejo)
- **Necesitas ganancia + baja rout?** $\rightarrow$ CS + CD
- **Necesitas ganancia + alta rout?** $\rightarrow$ CS + CG (cascode)