

03_transistor_fet

June 19, 2026

1 Tema 5 - Transistores de Efecto de Campo FET

Fundamentos de Electrónica - 2º GIERM

1.1 Objetivos de aprendizaje

- Comprender la estructura y funcionamiento de los transistores MOSFET y JFET
- Dominar las ecuaciones de corriente en las tres zonas de funcionamiento (corte, óhmica, saturación)
- Interpretar las curvas características de salida y de saturación
- Diferenciar entre los 4 tipos de MOSFET y los 2 de JFET
- Resolver circuitos de polarización para MOSFET y JFET con metodología sistemática
- Conocer la ecuación de Shockley y su relación con las ecuaciones del MOSFET

Configuración lista.

1.2 1. Introducción: FET vs BJT

Los transistores de efecto de campo (**FET**, *Field Effect Transistor*) son dispositivos **unipolares**: la corriente está formada por un solo tipo de portador (electrones o huecos). A diferencia del BJT (bipolar), el FET es controlado por **tensión**, no por corriente.

1.2.1 Diferencias fundamentales

Característica	BJT	FET
Control	Por corriente (I_B)	Por tensión (V_{GS})
Corriente de entrada	$I_B > 0$	$I_G = 0$ (idealmente)
Impedancia de entrada	Media-baja	Muy alta ($\sim M\Omega$)
Tipo	Bipolar	Unipolar
Terminales	Base, Colector, Emisor	Puerta (G), Drenador (D), Fuente (S)
Ecuación en activa/sat.	$I_C = \beta \cdot I_B$ (lineal)	$I_D = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T)^2$ (cuadrática)

1.2.2 Tipos de FET

- **MOSFET** (*Metal-Oxide-Semiconductor FET*): el más usado en electrónica digital (CMOS)
 - Canal N / Canal P
 - Enriquecimiento / Empobrecimiento
- **JFET** (*Junction FET*): más simple, usado en amplificadores de bajo ruido
 - Canal N / Canal P

Ventajas del FET: alta integración, bajo consumo, fabricación barata.

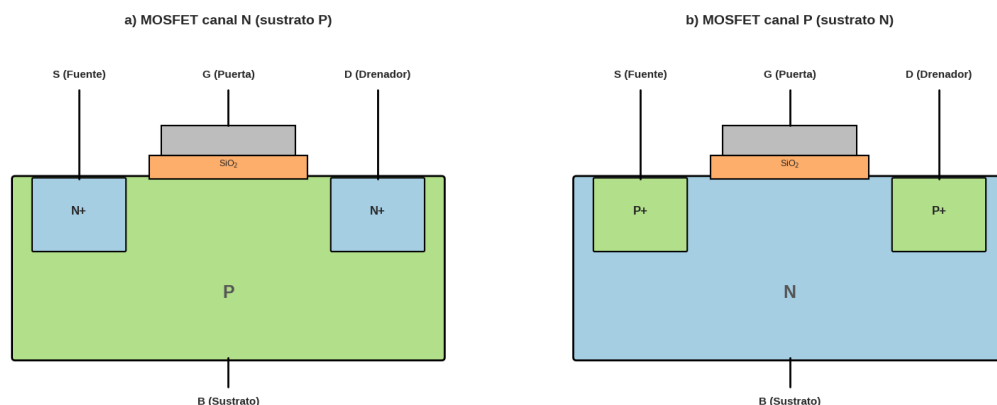
1.3 2. El transistor MOSFET

1.3.1 2.1 Estructura

El MOSFET tiene **4 terminales**: Puerta (G), Drenador (D), Fuente (S) y Sustrato (B). Las siglas MOS hacen referencia a la estructura Metal-Óxido-Semiconductor.

- **Sustrato**: semiconductor tipo p (canal n) o tipo n (canal p)
- **Drenador y Fuente**: pozos de material complementario al sustrato, fuertemente dopados
- **Puerta**: capa de metal sobre óxido de silicio (SiO_2) - actúa como condensador
- **Canal**: se forma por **inversión** debajo del óxido cuando $V_{GS} > V_T$

Propiedad fundamental: la corriente de puerta es siempre nula ($I_G = 0$) porque el óxido es aislante. La corriente de sustrato también es nula ($I_B = 0$) porque las uniones pn están en inversa.



1.3.2 2.2 El MOSFET como interruptor controlado

El MOSFET funciona como un **interruptor controlado por tensión**:

- Si $V_{GS} < V_T$ (tensión umbral): **no hay canal** $\rightarrow I_D = 0 \rightarrow$ **interruptor abierto**
- Si $V_{GS} > V_T$: **se forma un canal conductor** $\rightarrow I_D > 0 \rightarrow$ **interruptor cerrado**

La tensión umbral V_T es el valor mínimo de V_{GS} necesario para crear el canal. Su valor típico está entre 1 y 3 V para transistores de enriquecimiento.

Dos hechos fundamentales (siempre se cumplen):

$$I_G = 0 \quad I_B = 0$$

Esto significa que **toda la corriente que entra por el drenador sale por la fuente**: $I_D = I_S$.

1.4 3. Formulario completo del MOSFET

1.4.1 3.1 Ecuaciones simplificadas del MOSFET de canal N

Zona	Condición	Ecuación de I_D
Corte	$V_{GS} \leq V_T$	$I_D = 0$
Óhmica	$V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} < V_{GS} - V_T$	$I_D = K_n \left[(V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$
Saturación	$V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$	$I_D = \frac{K_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2$

1.4.2 3.2 Ecuaciones completas (con modulación de canal y efecto sustrato)

En **saturación** con modulación de longitud de canal:

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

Tensión umbral con efecto sustrato ($V_{SB} \neq 0$):

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{\phi_{H0} + V_{SB}} - \sqrt{\phi_{H0}} \right)$$

1.4.3 3.3 Ecuaciones del MOSFET de canal P (con referencia V_{SG} , V_{SD})

Zona	Condición	Ecuación de I_D
Corte	$V_{SG} \leq V_T$	$I_D = 0$
Óhmica	$V_{SG} > V_T$ y $V_{SD} < V_{SG} - V_T$	$I_D = K_p \left[(V_{SG} - V_T) \cdot V_{SD} - \frac{V_{SD}^2}{2} \right]$
Saturación	$V_{SG} > V_T$ y $V_{SD} \geq V_{SG} - V_T$	$I_D = \frac{K_p}{2} (V_{SG} - V_T)^2$

1.4.4 3.4 Parámetros

Parámetro	Descripción
$K_n = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L}$	Parámetro de transconductancia (canal N)

Parámetro	Descripción
$K_p = \mu_p C_{OX} \frac{W}{L}$	Parámetro de transconductancia (canal P)
V_T	Tensión umbral (positiva enriq. N, negativa empob. N)
λ	Parámetro de modulación de longitud de canal
W/L	Relación de aspecto (anchura/longitud del canal)
μ_n, μ_p	Movilidad de electrones y huecos
C_{OX}	Capacidad del óxido de puerta
γ	Parámetro de efecto sustrato
ϕ_{H0}	Potencial de inversión fuerte

1.4.5 3.5 MOSFET como resistencia variable (zona óhmica, V_{DS} pequeña)

$$I_D \approx K_n (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} = \frac{V_{DS}}{R_{DS}}$$

$$R_{DS} = \frac{1}{K_n (V_{GS} - V_T)}$$

1.4.6 3.6 Recta de carga y mallas de polarización

$$V_{DS} = V_{CC} - R_D \cdot I_D \quad (\text{malla de drenador})$$

$$V_{GS} = V_G - R_S \cdot I_D \quad (\text{con } R_S \text{ en fuente})$$

1.5 4. Zonas de funcionamiento del MOSFET

El MOSFET de canal N tiene **tres zonas** de funcionamiento, definidas por las tensiones V_{GS} y V_{DS} :

1.5.1 Corte ($V_{GS} \leq V_T$)

- No existe canal conductor $\rightarrow I_D = 0$
- El transistor está **apagado**
- Funciona como **circuito abierto** entre D y S

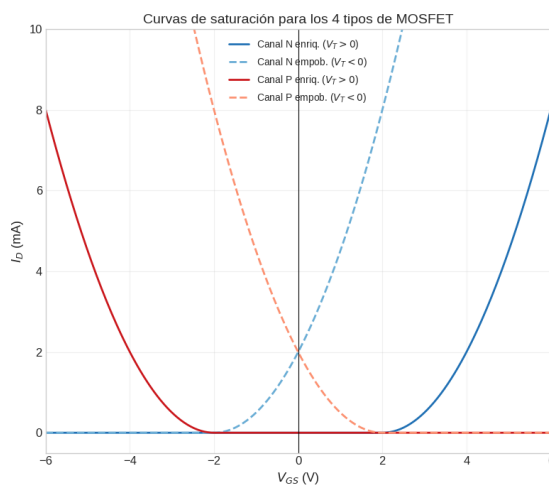
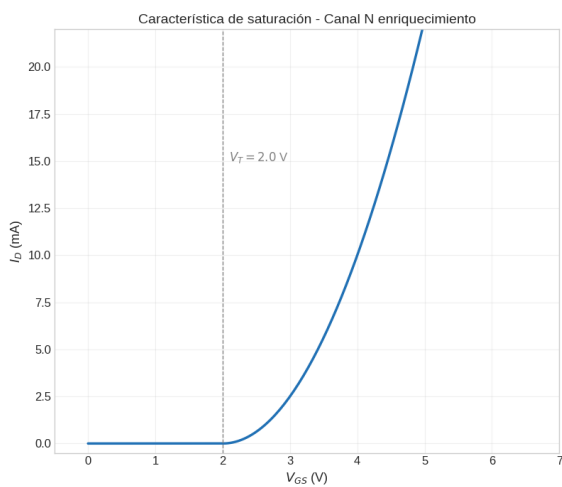
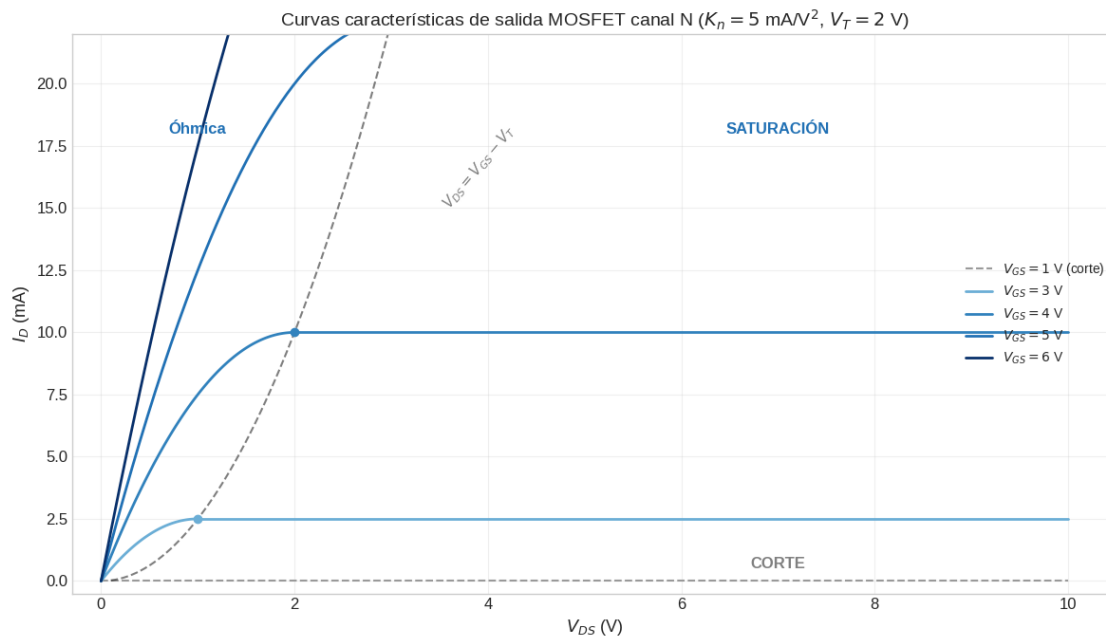
1.5.2 Zona Óhmica o Lineal ($V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} < V_{GS} - V_T$)

- El canal existe y **no está estrangulado**
- I_D depende tanto de V_{GS} como de V_{DS}
- Para V_{DS} pequeños: comportamiento de **resistencia** ($I_D \propto V_{DS}$)
- Frontera con saturación en $V_{DS} = V_{GS} - V_T$

1.5.3 Saturación ($V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$)

- El canal está **estrangulado** cerca del drenador
- I_D depende **solo de** V_{GS} (idealmente): $I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_T)^2$
- Funciona como **fuerza de corriente controlada por tensión**
- Es la zona de operación normal para amplificadores

Diferencia clave con el BJT: en el BJT “saturación” = transistor completamente encendido (interruptor cerrado). En el MOSFET “saturación” = zona de amplificación (fuente de corriente). ¡No confundir!



1.6 5. Símbolos eléctricos del MOSFET

Existen 4 tipos de MOSFET según el tipo de canal y el modo de operación:

Tipo	Canal	V_T	Canal a $V_{GS} = 0$
Canal N enriquecimiento	N	$V_T > 0$	No existe (necesita $V_{GS} > V_T$)
Canal N empobrecimiento	N	$V_T < 0$	Ya existe
Canal P enriquecimiento	P	$V_T > 0$ (con V_{SG})	No existe
Canal P empobrecimiento	P	$V_T < 0$ (con V_{SG})	Ya existe

Cómo distinguirlos en el símbolo: - **Enriquecimiento:** canal dibujado con **línea discontinua** (no existe a $V_{GS} = 0$) - **Empobrecimiento:** canal dibujado con **línea continua** (ya existe) - **Canal N:** flecha del sustrato **apunta hacia el canal** (hacia N) - **Canal P:** flecha del sustrato **sale del canal** (sale de P)

En transistores discretos (3 terminales), fuente y sustrato están cortocircuitados internamente.

1.7 6. Metodología de resolución para MOSFET

La resolución de circuitos MOSFET sigue una metodología análoga a la del BJT, pero con diferencias importantes:

1.7.1 Paso 1: Fijar referencias

V_{GS} , V_{DS} y I_D para canal N. V_{SG} , V_{SD} y I_D para canal P.

1.7.2 Paso 2: Suponer un estado

Normalmente se empieza suponiendo **saturación** (la zona más usada en amplificadores).

1.7.3 Paso 3: Sustituir por el modelo

- **Saturación:** $I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_T)^2$, $I_G = 0$
- **Óhmica:** $I_D = K_n[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2/2]$, $I_G = 0$
- **Corte:** $I_D = 0$, $I_G = 0$

1.7.4 Paso 4: Resolver las ecuaciones

Como $I_G = 0$, la malla de puerta suele ser trivial. La ecuación de saturación es cuadrática.

1.7.5 Paso 5: Verificar la hipótesis

- **Saturación:** comprobar $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ y $V_{GS} > V_T$
- **Óhmica:** comprobar $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ y $V_{GS} > V_T$
- **Corte:** comprobar $V_{GS} \leq V_T$

Diferencia con el BJT: en el MOSFET las ecuaciones son **cuadráticas** (no lineales), por lo que a menudo hay que resolver una ecuación de segundo grado.

1.8 7. Circuitos de polarización del MOSFET

A diferencia del BJT, la polarización del MOSFET se facilita por la ausencia de corriente de puerta ($I_G = 0$), pero las ecuaciones son más complejas (cuadráticas).

1.8.1 7.1 Tipo 1: Polarización básica (dos fuentes)

La red más sencilla: una fuente V_i fija V_{GS} y otra V_{CC} fija V_{DS} .

Como $I_G = 0$: $V_{GS} = V_i$ directamente. La recta de carga es **vertical**: $V_{DS} = V_{CC}$.

$$I_D = \frac{K_n}{2}(V_i - V_T)^2 \quad V_{DS} = V_{CC}$$

Verificar saturación: $V_{DS} = V_{CC} \geq V_{GS} - V_T = V_i - V_T$

Ejercicio resuelto: MOSFET polarización básica Datos: $V_i = 4$ V, $V_{CC} = 10$ V, $K_n = 5$ mA/V², $V_T = 2$ V

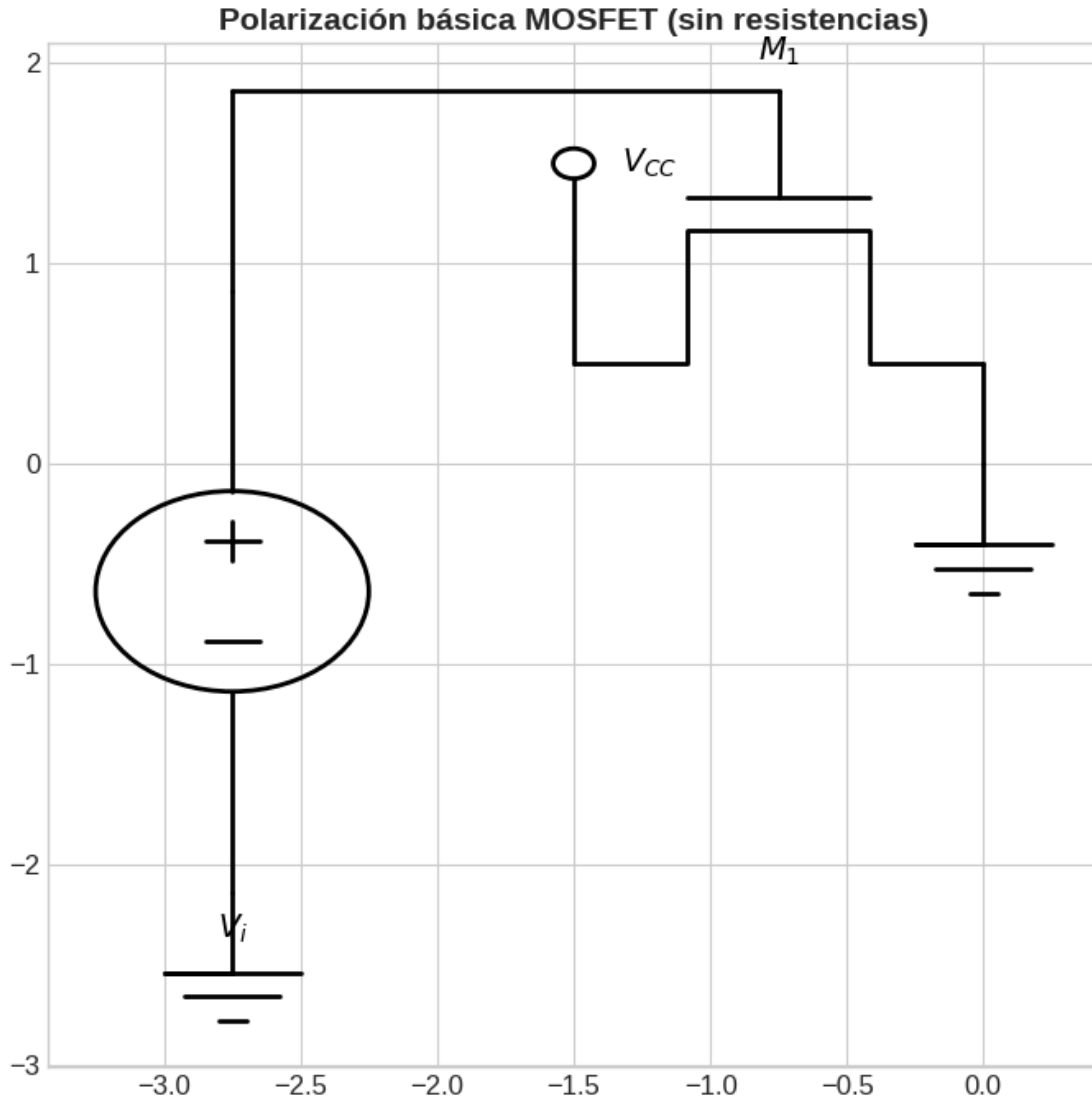
Paso 1-2: Suponer saturación.

Paso 3-4: Como $I_G = 0$: $V_{GS} = V_i = 4$ V

$$I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_T)^2 = \frac{5 \times 10^{-3}}{2}(4 - 2)^2 = 10 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = V_{CC} = 10 \text{ V}$$

Paso 5: $V_{DS} = 10 \text{ V} \geq V_{GS} - V_T = 4 - 2 = 2 \text{ V} \rightarrow$ **Saturación confirmada.**



1.8.2 7.2 Tipo 2: Polarización por retroalimentación (R_G de D a G)

Drenador y puerta conectados a través de R_G . Como $I_G = 0$, la caída en R_G es nula:

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

Combinando con la ecuación de saturación y la recta de carga:

$$I_D = \frac{K_n}{2}(V_{DS} - V_T)^2 \quad V_{DS} = V_{CC} - R_D \cdot I_D$$

Esto produce una ecuación cuadrática en V_{DS} que se resuelve sustituyendo.

Ejercicio resuelto: MOSFET retroalimentación Datos: $V_{CC} = 10 \text{ V}$, $R_D = 2 \text{ k}\Omega$, $R_G = 1 \text{ M}\Omega$, $K_n = 2 \text{ mA/V}^2$, $V_T = 2 \text{ V}$

Paso 1-2: Suponer saturación. Como $I_G = 0$: $V_{GS} = V_{DS}$

Paso 3-4: Sustituyendo I_D en la recta de carga:

$$V_{DS} = V_{CC} - R_D \cdot \frac{K_n}{2} (V_{DS} - V_T)^2$$

$$V_{DS} = 10 - 2\text{k} \times \frac{2 \times 10^{-3}}{2} (V_{DS} - 2)^2 = 10 - 2(V_{DS} - 2)^2$$

$$V_{DS} = 10 - 2V_{DS}^2 + 8V_{DS} - 8$$

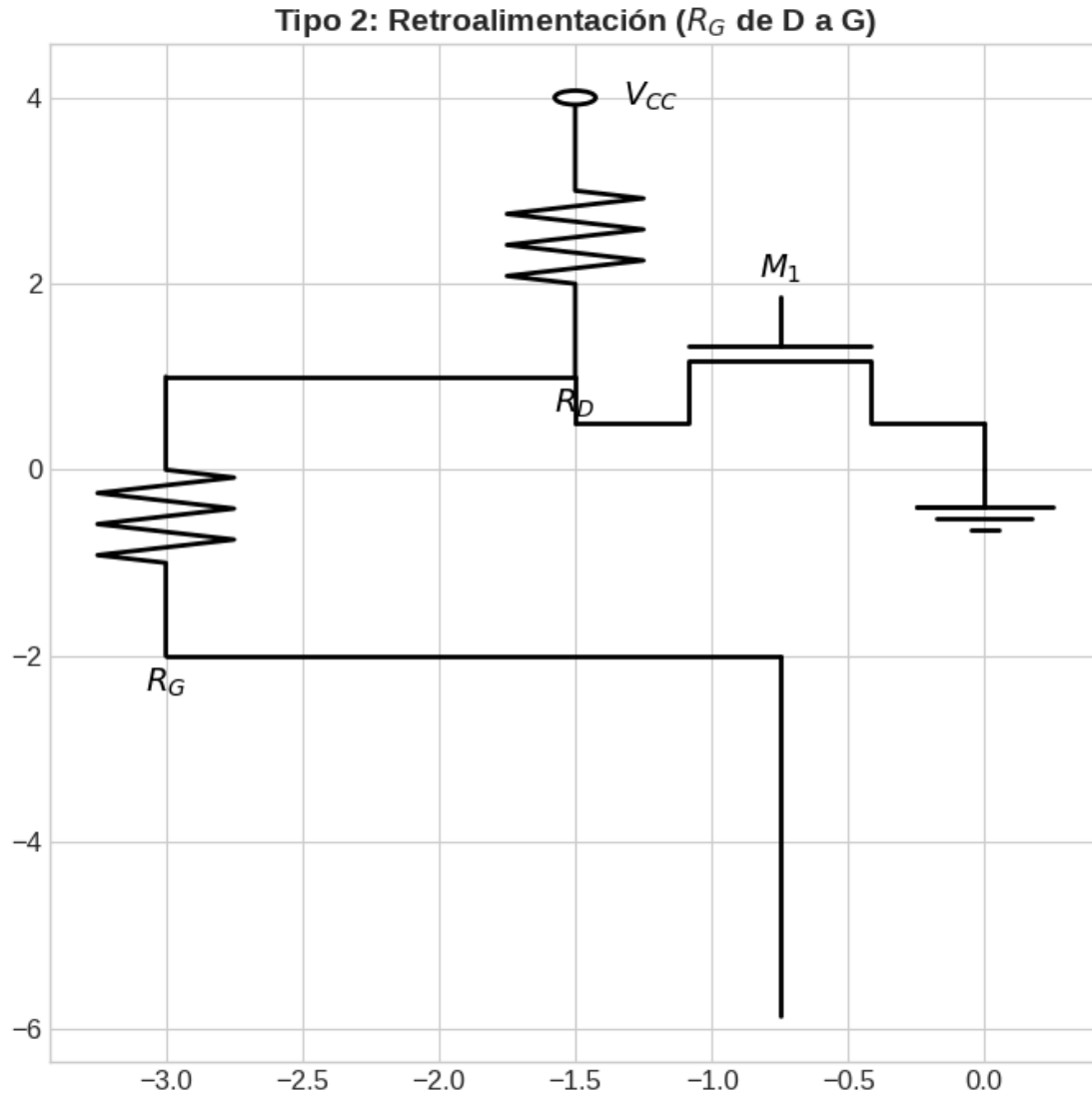
$$2V_{DS}^2 - 7V_{DS} - 2 = 0$$

$$V_{DS} = \frac{7 \pm \sqrt{49 + 16}}{4} = \frac{7 \pm \sqrt{65}}{4}$$

$$V_{DS} = \frac{7 + 8.06}{4} = 3.77 \text{ V} \quad (\text{tomamos la raíz positiva con sentido físico})$$

$$I_D = \frac{K_n}{2} (3.77 - 2)^2 = 1 \times 10^{-3} \times 3.13 = 3.13 \text{ mA}$$

Paso 5: $V_{DS} = 3.77 \text{ V} \geq V_{GS} - V_T = 3.77 - 2 = 1.77 \text{ V} \rightarrow$ **Saturación confirmada.**



1.8.3 7.3 Tipo 3: Polarización por divisor de tensión ($R_1 + R_2 + R_D + R_S$)

El circuito **más estable** para MOSFET. Un divisor R_1 - R_2 fija V_G , y la R_S proporciona estabilización.

Como $I_G = 0$, el divisor no tiene carga:

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

La tensión puerta-fuente:

$$V_{GS} = V_G - R_S \cdot I_D$$

Combinando con la ecuación de saturación ($I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_T)^2$) se obtiene una **ecuación cuadrática** en I_D o en V_{GS} .

Cómo afectan los parámetros: - R_1/R_2 fijan V_G : al aumentar $R_1/(R_1 + R_2)$, V_G sube $\rightarrow V_{GS}$ sube $\rightarrow I_D$ aumenta - R_S estabiliza: si I_D sube $\rightarrow V_S = R_S \cdot I_D$ sube $\rightarrow V_{GS}$ baja $\rightarrow I_D$ se corrige - R_D solo afecta a V_{DS} : mayor $R_D \rightarrow$ menor V_{DS} - A diferencia del BJT, **no necesitamos Thévenin** porque $I_G = 0$ (no hay carga en el divisor)

Ejercicio resuelto: MOSFET divisor de tensión Datos: $V_{CC} = 12$ V, $R_1 = 200$ k Ω (abajo), $R_2 = 400$ k Ω (arriba), $R_D = 2$ k Ω , $R_S = 1$ k Ω , $K_n = 4$ mA/V², $V_T = 1.5$ V

Paso 1: Tensión de puerta (divisor sin carga porque $I_G = 0$):

$$V_G = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} = \frac{200}{200 + 400} \times 12 = 4 \text{ V}$$

Paso 2: Suponer saturación

Paso 3-4: $V_{GS} = V_G - R_S \cdot I_D = 4 - 1\text{k} \cdot I_D$

Sustituyendo en la ecuación de saturación:

$$I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_T)^2 = \frac{4 \times 10^{-3}}{2}(4 - 10^3 I_D - 1.5)^2 = 2 \times 10^{-3}(2.5 - 10^3 I_D)^2$$

Sea $x = I_D$ en mA:

$$x = 2(2.5 - x)^2 = 2(6.25 - 5x + x^2) = 12.5 - 10x + 2x^2$$

$$2x^2 - 11x + 12.5 = 0$$

$$x = \frac{11 \pm \sqrt{121 - 100}}{4} = \frac{11 \pm \sqrt{21}}{4} = \frac{11 \pm 4.58}{4}$$

$$x_1 = 3.90 \text{ mA} \quad x_2 = 1.60 \text{ mA}$$

Verificamos cuál está en saturación. Para $I_D = 1.60$ mA:

$$V_{GS} = 4 - 1\text{k} \times 1.60 = 2.40 \text{ V}$$

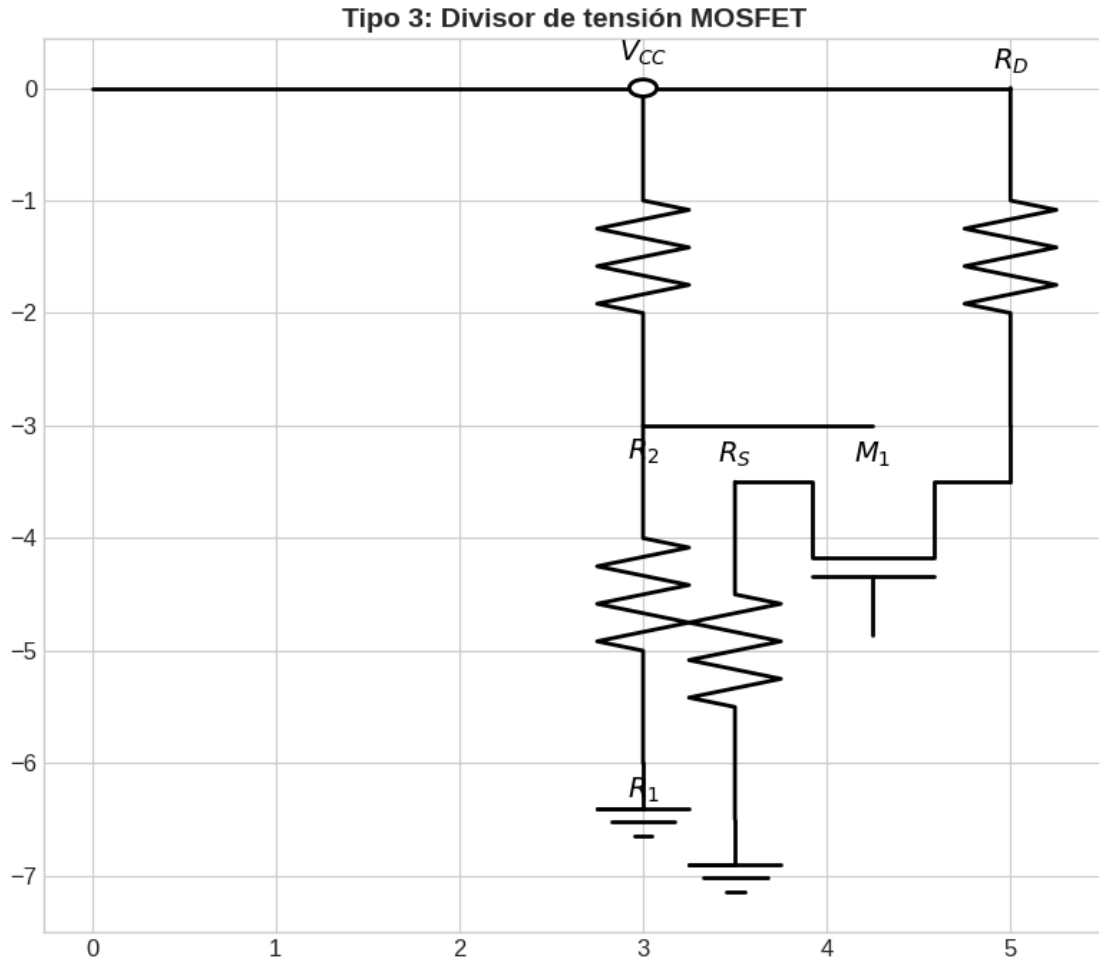
$$V_{DS} = V_{CC} - (R_D + R_S) \cdot I_D = 12 - 3\text{k} \times 1.60 = 7.20 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 7.20 \geq V_{GS} - V_T = 2.40 - 1.5 = 0.90 \text{ V} \rightarrow \text{Saturación OK}$$

Para $I_D = 3.90$ mA:

$$V_{GS} = 4 - 3.90 = 0.10 \text{ V} < V_T = 1.5 \text{ V} \rightarrow \text{Corte (descartada)}$$

Resultado: $I_D = 1.60 \text{ mA}$, $V_{GS} = 2.40 \text{ V}$, $V_{DS} = 7.20 \text{ V}$.



1.9 8. El transistor JFET

El JFET (*Junction Field Effect Transistor*) es el otro miembro de la familia FET. A diferencia del MOSFET, no tiene óxido: el control se realiza mediante una **unión pn polarizada en inversa**.

1.9.1 8.1 Estructura y terminales

- **Canal N:** semiconductor tipo N entre dos zonas P+ (puerta)
- **Canal P:** semiconductor tipo P entre dos zonas N+
- Terminales: **Drenador (D)**, **Fuente (S)**, **Puerta (G)**

1.9.2 8.2 Funcionamiento

- La puerta se polariza en **inversa**: $V_{GS} < 0$ (canal N) o $V_{GS} > 0$ (canal P)
- Al hacer V_{GS} más negativa, la zona de carga espacial crece y **estrangula el canal**
- Cuando $V_{GS} = -V_P$ (tensión de estrangulamiento): canal completamente cerrado $\rightarrow$ **corte**
- A $V_{GS} = 0$: máxima corriente I_{DSS}

Diferencia clave con MOSFET: el JFET **siempre** conduce a $V_{GS} = 0$. Hay que aplicar tensión negativa (canal N) para apagarlo. Es un dispositivo de **empobrecimiento** por naturaleza.

1.10 9. Formulario del JFET

1.10.1 9.1 Ecuaciones del JFET canal N

Zona	Condición	Ecuación
Corte	$V_{GS} \leq -V_P$	$I_D = 0$
Óhmica	$V_{GS} > -V_P$ y $V_{DS} < V_{GS} + V_P$	$I_D = G_d(V_{GS}) \cdot V_{DS}$
Saturación	$V_{GS} > -V_P$ y $V_{DS} \geq V_{GS} + V_P$	$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$

1.10.2 9.2 Ecuación de Shockley (saturación, la más importante)

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Con modulación de canal: $I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 (1 + \lambda V_{DS})$

1.10.3 9.3 Parámetros

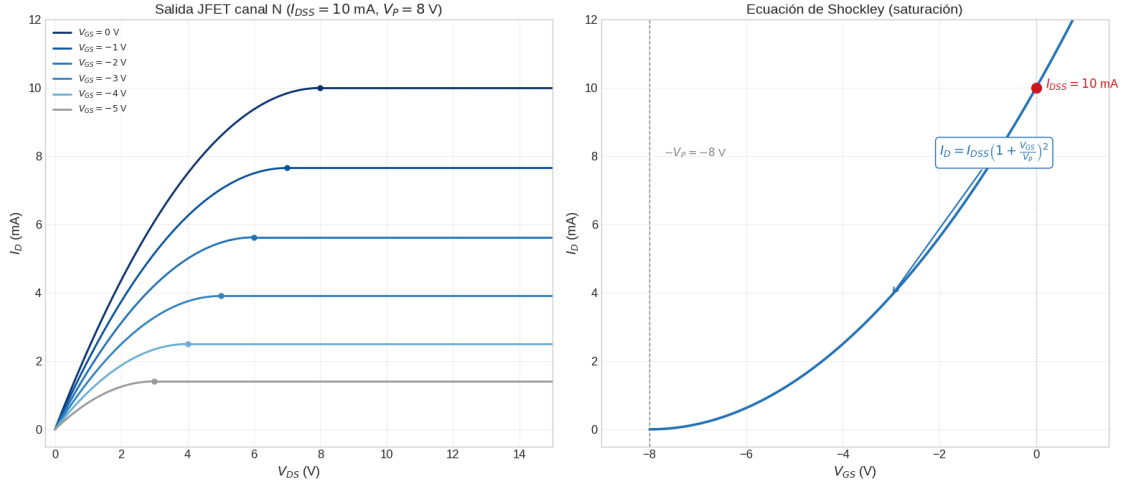
Parámetro	Descripción
I_{DSS}	Corriente de saturación a $V_{GS} = 0$ (máxima corriente)
V_P	Tensión de estrangulamiento (<i>pinch-off</i>). Siempre positiva.
$-V_P$	Tensión de corte: $V_{GS} = -V_P$ apaga el transistor
λ	Parámetro de modulación de longitud de canal

1.10.4 9.4 Relación JFET-MOSFET

La ecuación de Shockley es **idéntica** a la del MOSFET si se define:

$$K_n = \frac{2I_{DSS}}{V_P^2} \quad V_T = -V_P$$

Por eso el JFET de canal N es equivalente a un **MOSFET de canal N de empobrecimiento**.



1.11 10. Polarización del JFET

1.11.1 10.1 Tipo 1: Polarización fija

Una fuente V_1 fija $V_{GS} = -V_1$ directamente (con $I_G = 0$, no hay caída en R_G).

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{-V_1}{V_P} \right)^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_1}{V_P} \right)^2$$

$$V_{DS} = V_{CC} - R_D \cdot I_D$$

Verificar saturación: $V_{DS} > V_{GS} + V_P = -V_1 + V_P$

Ejercicio resuelto: JFET polarización fija Datos: $V_1 = 2 \text{ V}$, $V_{CC} = 15 \text{ V}$, $R_D = 2 \text{ k}\Omega$, $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_P = 8 \text{ V}$

$$V_{GS} = -V_1 = -2 \text{ V}$$

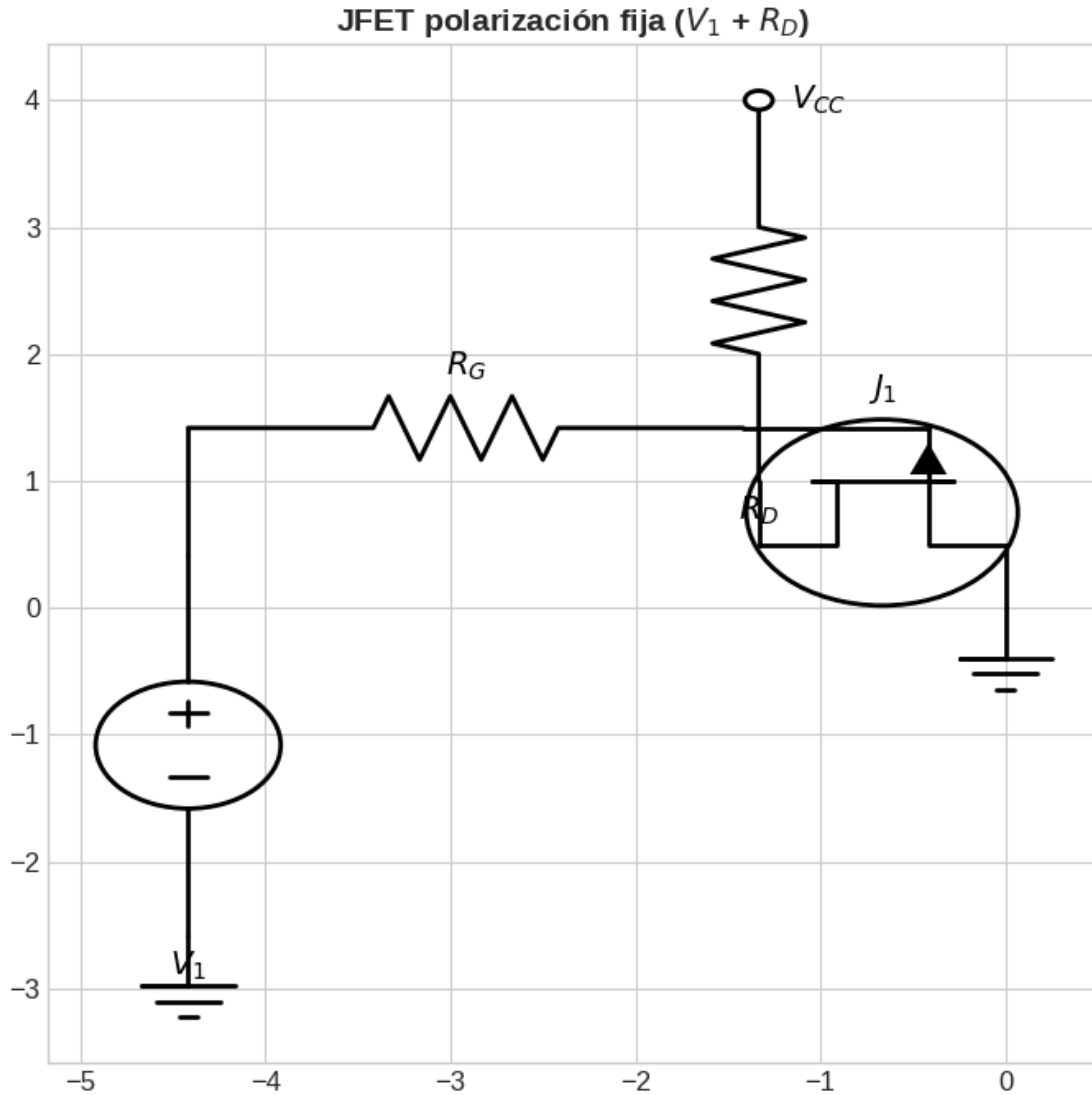
$$I_D = 10 \times \left(1 - \frac{2}{8} \right)^2 = 10 \times 0.75^2 = 10 \times 0.5625 = 5.625 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = 15 - 2\text{k} \times 5.625 = 15 - 11.25 = 3.75 \text{ V}$$

Verificar: $V_{DS} = 3.75 \text{ V} > V_{GS} + V_P = -2 + 8 = 6 \text{ V}?$

$3.75 < 6 \rightarrow$ **NO está en saturación.** Está en zona óhmica.

Habría que recalcular con la ecuación de zona óhmica, o bien aumentar V_{CC} o reducir R_D para que V_{DS} sea suficiente.



1.11.2 10.2 Tipo 2: Autopolarización (R_S en fuente, $V_G = 0$)

No necesita fuente independiente para la puerta. La puerta se conecta a tierra a través de R_G :

$$V_G = 0 \Rightarrow V_{GS} = -R_S \cdot I_D$$

El punto de operación se obtiene gráficamente como la **intersección** de la curva de Shockley con la recta $I_D = -V_{GS}/R_S$.

Cómo afecta R_S : - Si R_S aumenta $\rightarrow$ la pendiente de la recta $-1/R_S$ disminuye $\rightarrow I_D$ disminuye y $|V_{GS}|$ aumenta - Si R_S disminuye $\rightarrow I_D$ se acerca a I_{DSS}

Ejercicio resuelto: JFET autopolarización Datos: $V_{CC} = 15 \text{ V}$, $R_D = 2 \text{ k}\Omega$, $R_S = 500 \Omega$, $R_G = 1 \text{ M}\Omega$, $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_P = 8 \text{ V}$

$V_G = 0$, luego $V_{GS} = -R_S \cdot I_D = -500 \cdot I_D$

Sustituyendo en Shockley: $I_D = 10 \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{-500I_D}{8}\right)^2$

Sea $x = I_D$ en mA, $V_{GS} = -0.5x \text{ V}$:

$$x = 10 \left(1 - \frac{0.5x}{8}\right)^2 = 10 (1 - 0.0625x)^2$$

$$x = 10(1 - 0.125x + 0.00390625x^2)$$

$$x = 10 - 1.25x + 0.0390625x^2$$

$$0.0390625x^2 - 2.25x + 10 = 0$$

$$x = \frac{2.25 \pm \sqrt{5.0625 - 1.5625}}{0.078125} = \frac{2.25 \pm \sqrt{3.5}}{0.078125}$$

$$x = \frac{2.25 \pm 1.871}{0.078125}$$

$$x_1 = 52.7 \text{ mA (descartada, } > I_{DSS}) \quad x_2 = 4.85 \text{ mA}$$

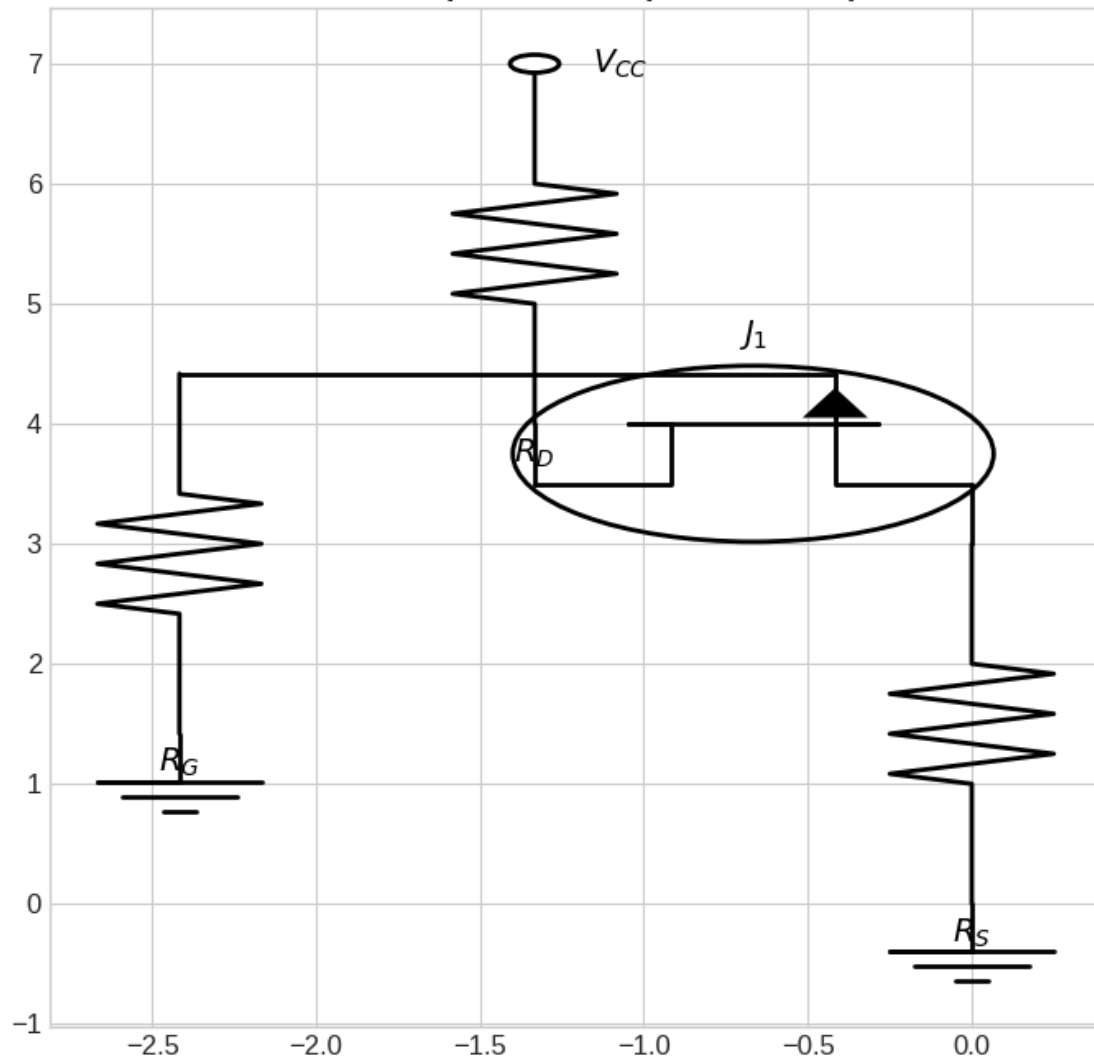
$$V_{GS} = -500 \times 4.85 \times 10^{-3} = -2.43 \text{ V}$$

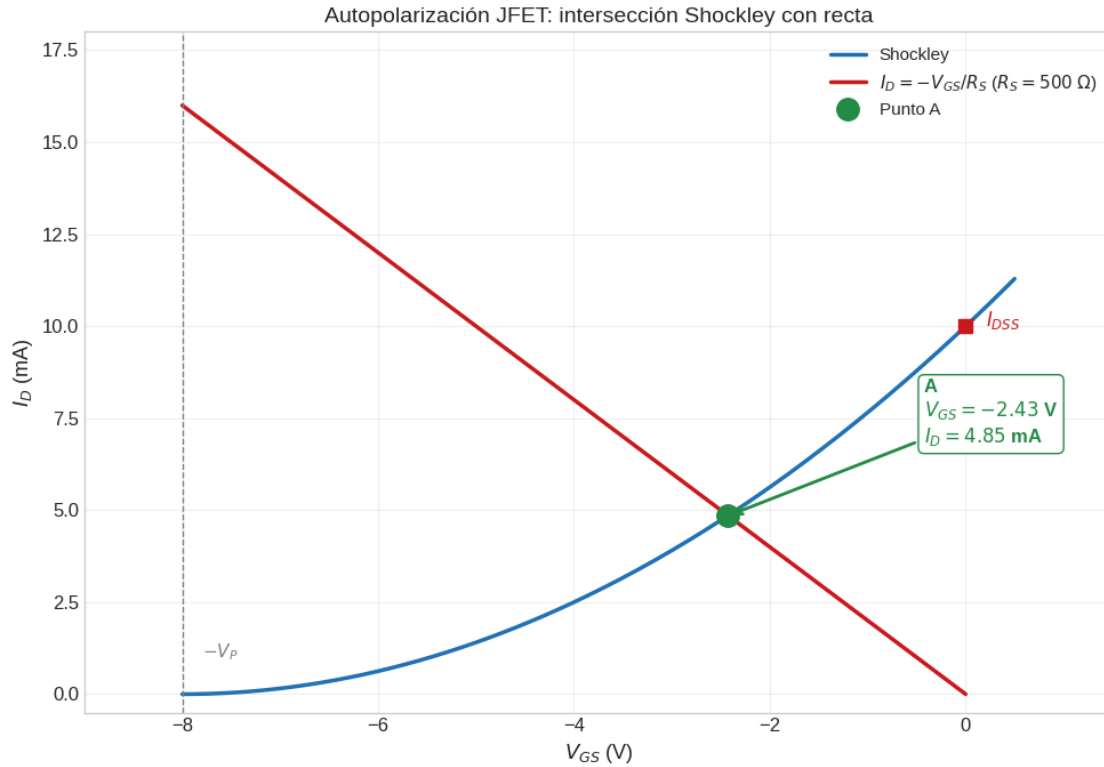
$$V_{DS} = 15 - (2\text{k} + 0.5\text{k}) \times 4.85 = 15 - 12.13 = 2.87 \text{ V}$$

Verificar: $V_{DS} = 2.87 \text{ V} \geq V_{GS} + V_P = -2.43 + 8 = 5.57 \text{ V}$? NO $\rightarrow$ zona óhmica.

Para saturación necesitaríamos mayor V_{CC} o menor R_D .

JFET autopolarización ($R_G + R_D + R_S$)





1.11.3 10.3 Tipo 3: Divisor de tensión ($R_1 + R_2 + R_D + R_S$)

Combina divisor de tensión con resistencia de fuente:

$$V_G = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \quad V_{GS} = V_G - R_S \cdot I_D$$

La recta de carga en el plano I_D - V_{GS} tiene cortes en $(V_G, 0)$ y $(0, V_G/R_S)$.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{V_G - R_S I_D}{V_P} \right)^2$$

Se resuelve como ecuación cuadrática en I_D .

Ejercicio resuelto: JFET divisor de tensión Datos: $V_{CC} = 20 \text{ V}$, $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 400 \text{ k}\Omega$, $R_D = 2 \text{ k}\Omega$, $R_S = 1 \text{ k}\Omega$, $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$, $V_P = 5 \text{ V}$

$$V_G = \frac{200}{200 + 400} \times 20 = 6.67 \text{ V}$$

$$V_{GS} = 6.67 - 10^3 I_D$$

Sustituyendo en Shockley (con I_D en mA, V_{GS} en V):

$$x = 10 \left(1 + \frac{6.67 - x}{5} \right)^2 = 10 \left(\frac{11.67 - x}{5} \right)^2 = \frac{10}{25} (11.67 - x)^2 = 0.4(11.67 - x)^2$$

$$x = 0.4(136.19 - 23.34x + x^2)$$

$$x = 54.48 - 9.34x + 0.4x^2$$

$$0.4x^2 - 10.34x + 54.48 = 0$$

$$x = \frac{10.34 \pm \sqrt{106.9 - 87.2}}{0.8} = \frac{10.34 \pm \sqrt{19.7}}{0.8} = \frac{10.34 \pm 4.44}{0.8}$$

$$x_1 = 18.5 \text{ mA (descartada, } > I_{DSS}) \quad x_2 = 7.38 \text{ mA}$$

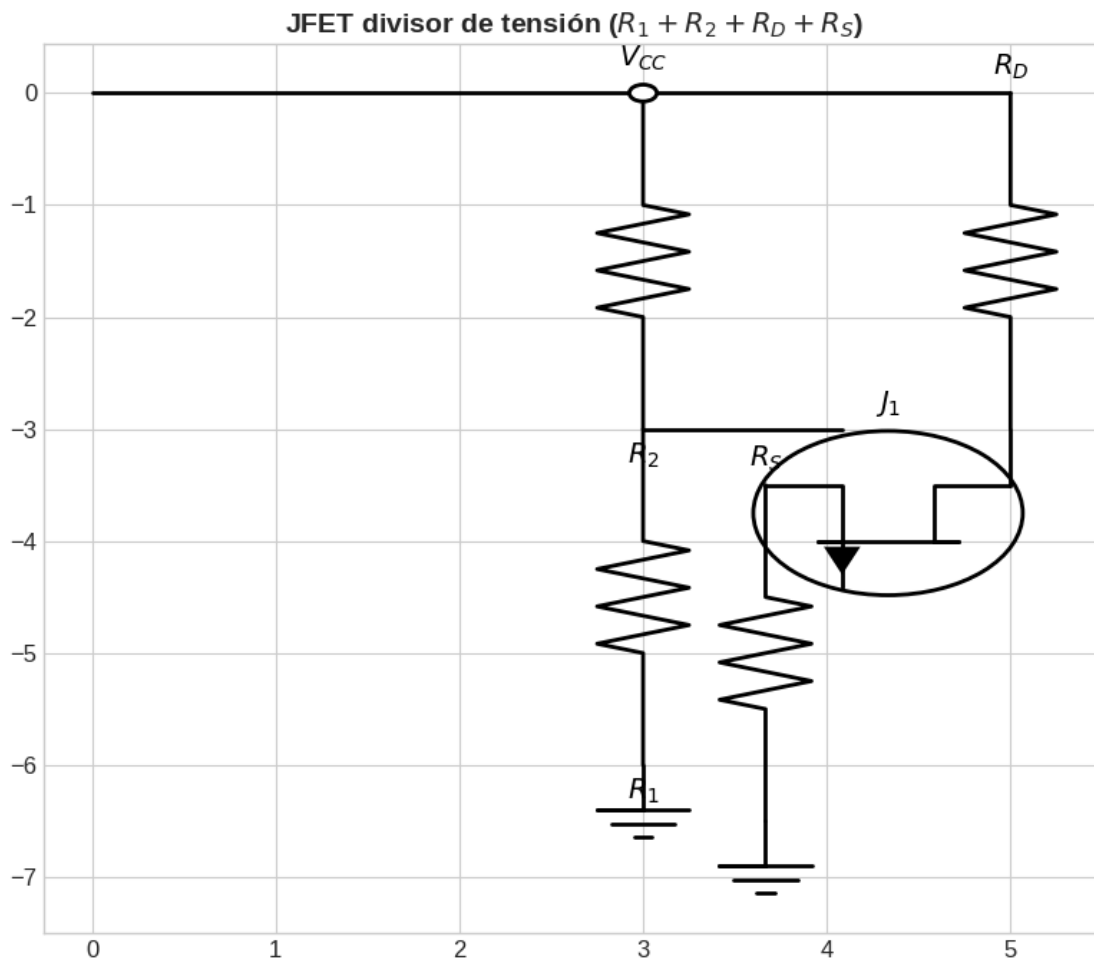
$$V_{GS} = 6.67 - 7.38 = -0.71 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 20 - (2\text{k} + 1\text{k}) \times 7.38 = 20 - 22.1 = -2.1 \text{ V}$$

V_{DS} negativo $\rightarrow$ los valores no son factibles con estos componentes. Habría que reducir R_D o aumentar V_{CC} . Con $R_D = 1 \text{ k}\Omega$:

$$V_{DS} = 20 - (1\text{k} + 1\text{k}) \times 7.38 = 20 - 14.76 = 5.24 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 5.24 \geq V_{GS} + V_P = -0.71 + 5 = 4.29 \rightarrow \textbf{Saturación confirmada.}$$



1.12 12. Catálogo completo de ejercicios FET: todos los patrones

Esta sección clasifica **todos los tipos de ejercicios** que aparecen en los exámenes de transistores FET. Para cada tipo se muestra: el circuito, las ecuaciones, cómo afecta cada componente y un ejercicio resuelto.

Hecho clave que simplifica todo: $I_G = 0$ siempre. Esto significa que: - La tensión de puerta V_G se obtiene directamente del circuito (sin caída en R_G) - La malla de puerta es trivial - Lo difícil es resolver la ecuación cuadrática de la corriente

1.12.1 Tabla resumen de tipos

#	Tipo	Componentes	Ecuación de V_{GS}	Ec. cuadrática
1	Básica MOS- FET	$V_i + V_{CC}$	$V_{GS} = V_i$	No
2	Con R_D solo	$V_{CC} + R_D$	$V_{GS} = V_{CC} - R_D I_D$	Sí
3	Retroalimentación	R_D	$V_{GS} = V_{DS} = V_{CC} - R_D I_D$	Sí
4	Con $R_D + R_S$	$V_{CC} + R_D + R_S$	$V_{GS} = V_G - R_S I_D$	Sí
5	Divisor + $R_D + R_S$	$R_1 + R_2 + R_D + R_S$	$V_{GS} = V_G - R_S I_D$	Sí
6	Canal P	Cualquiera	V_{SG} en vez de V_{GS}	Sí
7	Empobrecido	Cualquiera	$V_T < 0$	Sí
8	JFET fija	$V_1 + R_D$	$V_{GS} = -V_1$	No
9	JFET autopol.	$R_G + R_D + R_S$	$V_{GS} = -R_S I_D$	Sí
10	JFET divisor	$R_1 + R_2 + R_D + R_S$	$V_{GS} = V_G - R_S I_D$	Sí

1.12.2 Regla general para resolver

1. Calcular V_G (trivial porque $I_G = 0$)
2. Expresar V_{GS} en función de I_D : $V_{GS} = V_G - R_S \cdot I_D$
3. Sustituir en la ecuación de saturación $\rightarrow$ ecuación cuadrática en I_D
4. Resolver, descartar raíz sin sentido físico
5. Calcular V_{DS} con la recta de carga y verificar zona

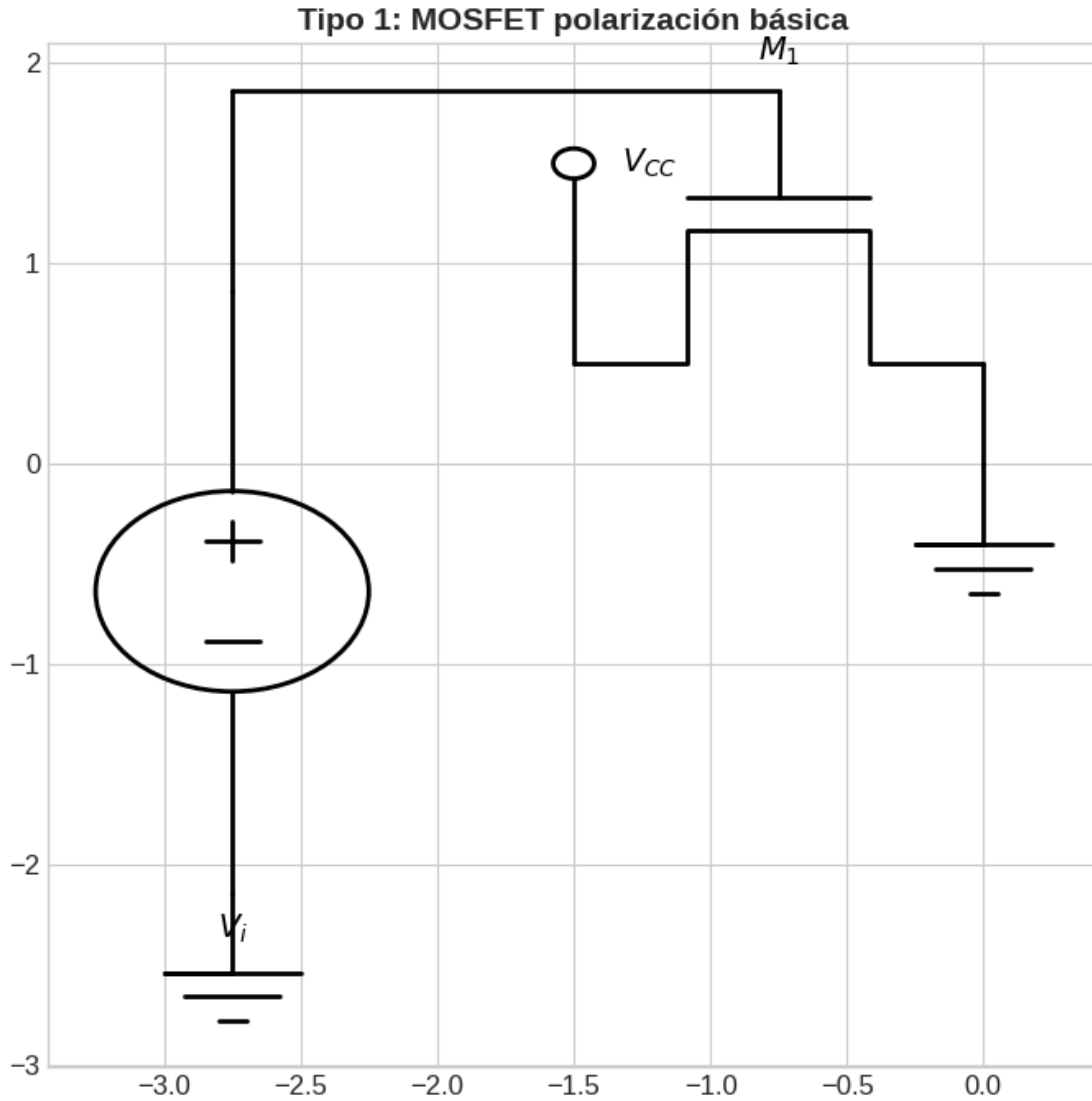
1.12.3 12.1 Tipo 1: MOSFET polarización básica (sin resistencias)

El circuito más simple. Dos fuentes fijan V_{GS} y V_{DS} directamente.

$$V_{GS} = V_i \quad V_{DS} = V_{CC} \quad I_D = \frac{K_n}{2}(V_i - V_T)^2$$

No hay ecuación cuadrática: todo es directo.

Cómo afectan los parámetros: - V_i **controla** I_D cuadráticamente: duplicar $(V_i - V_T)$ cuadruplica I_D - V_{CC} solo afecta a V_{DS} : la recta de carga es vertical - Si $V_i < V_T$: transistor en **corte**, $I_D = 0$ - Si V_i es muy grande: riesgo de superar $V_{GS_{max}}$



1.12.4 12.2 Tipo 2: MOSFET con R_D y fuente en puerta

Una fuente V_i fija $V_{GS} = V_i$, y R_D aparece en la malla de drenador.

$$V_{GS} = V_i \quad I_D = \frac{K_n}{2}(V_i - V_T)^2 \quad V_{DS} = V_{CC} - R_D \cdot I_D$$

Tampoco hay cuadrática porque V_{GS} es independiente de I_D .

Cómo afecta R_D : - R_D **NO** afecta a I_D (porque V_{GS} no depende de R_D) - R_D **sí** afecta a V_{DS} : mayor $R_D \rightarrow$ menor $V_{DS} \rightarrow$ puede pasar de saturación a zona óhmica - **Frontera:** el transistor sale de saturación cuando $V_{DS} < V_{GS} - V_T$, es decir:

$$V_{CC} - R_D \cdot I_D < V_i - V_T \Rightarrow R_D > \frac{V_{CC} - V_i + V_T}{I_D}$$

Ejercicio resuelto: MOSFET con R_D Datos: $V_i = 5\text{ V}$, $V_{CC} = 12\text{ V}$, $R_D = 1\text{ k}\Omega$, $K_n = 4\text{ mA/V}^2$, $V_T = 2\text{ V}$

$$V_{GS} = V_i = 5\text{ V} > V_T = 2\text{ V} \rightarrow \text{conduce}$$

$$I_D = \frac{4 \times 10^{-3}}{2} (5 - 2)^2 = 2 \times 10^{-3} \times 9 = 18\text{ mA}$$

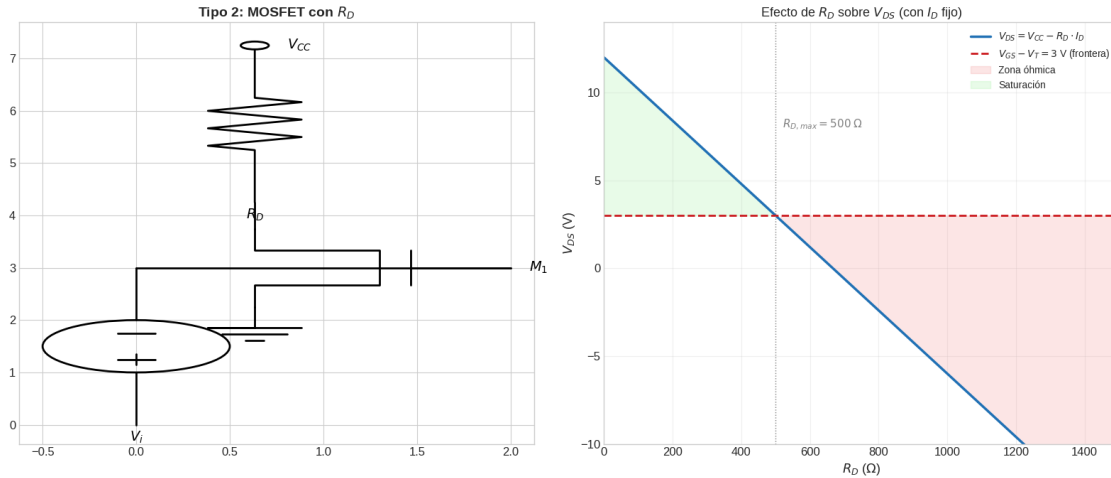
$$V_{DS} = 12 - 1\text{ k} \times 18 = 12 - 18 = -6\text{ V}$$

V_{DS} negativo $\rightarrow$ **no está en saturación**. El transistor está en **zona óhmica**.

Recalculando con la ecuación óhmica (o simplemente con R_D menor, por ejemplo $R_D = 500\ \Omega$):

$$V_{DS} = 12 - 500 \times 18\text{mA} = 12 - 9 = 3\text{ V}$$

$V_{DS} = 3\text{ V} \geq V_{GS} - V_T = 3\text{ V} \rightarrow$ **Justo en la frontera saturación/óhmica**.



1.12.5 12.3 Tipo 3: Retroalimentación (R_G de D a G)

R_G conecta drenador con puerta. Como $I_G = 0$: $V_{GS} = V_{DS}$.

$$V_{DS} = V_{CC} - R_D \cdot I_D \quad I_D = \frac{K_n}{2} (V_{DS} - V_T)^2$$

Sustituyendo: **ecuación cuadrática** en V_{DS} .

Cómo afectan los parámetros: - R_D **aumenta** $\rightarrow V_{DS}$ disminuye $\rightarrow V_{GS}$ disminuye $\rightarrow I_D$ disminuye (autoestabilización) - V_{CC} **aumenta** $\rightarrow V_{DS}$ aumenta $\rightarrow$ más I_D - R_G no afecta al punto de operación (porque $I_G = 0$ y la caída es nula). Solo sirve para aislar la entrada. - K_n **mayor** $\rightarrow$ más I_D para el mismo V_{GS}

Truco: la ecuación se puede escribir como $R_D \cdot \frac{K_n}{2}(V_{DS} - V_T)^2 + V_{DS} - V_{CC} = 0$

1.12.6 12.4 Tipo 4: MOSFET con $R_D + R_S$ y fuente en puerta

La resistencia R_S en la fuente crea una caída $V_S = R_S \cdot I_D$, lo que reduce V_{GS} :

$$V_G = V_i \quad V_{GS} = V_i - R_S \cdot I_D$$

$$I_D = \frac{K_n}{2}(V_i - R_S I_D - V_T)^2$$

Esto produce una **ecuación cuadrática** en I_D .

$$V_{DS} = V_{CC} - (R_D + R_S) \cdot I_D$$

Cómo afecta R_S : - R_S **estabiliza** I_D : si I_D sube $\rightarrow V_S = R_S I_D$ sube $\rightarrow V_{GS}$ baja $\rightarrow I_D$ se corrige - Mismo mecanismo de realimentación negativa que en el BJT - R_S **grande**: menor I_D , más estable, menos V_{DS} disponible - $R_S = 0$: vuelve al Tipo 2 (sin estabilización)

Error frecuente: olvidar que $V_{DS} = V_{CC} - (R_D + R_S) \cdot I_D$, no solo $R_D \cdot I_D$

Ejercicio resuelto: MOSFET con $R_D + R_S$ Datos: $V_i = 6$ V, $V_{CC} = 15$ V, $R_D = 2$ k Ω , $R_S = 1$ k Ω , $K_n = 2$ mA/V², $V_T = 2$ V

Paso 1-2: Suponer saturación. $V_{GS} = V_i - R_S \cdot I_D = 6 - 10^3 I_D$

Paso 3-4: Sea $x = I_D$ en mA:

$$x = \frac{2 \times 10^{-3}}{2}(6 - x - 2)^2 = 10^{-3}(4 - x)^2$$

$$x = 10^{-3}(16 - 8x + x^2) \implies 1000x = 16 - 8x + x^2$$

Ojo, las unidades: I_D en A, R_S en Ω :

$$I_D = 10^{-3}(6 - 10^3 I_D - 2)^2 = 10^{-3}(4 - 10^3 I_D)^2$$

Sea $y = I_D$ en mA:

$$y \times 10^{-3} = 10^{-3}(4 - y)^2 \implies y = (4 - y)^2 = 16 - 8y + y^2$$

$$y^2 - 9y + 16 = 0$$

$$y = \frac{9 \pm \sqrt{81 - 64}}{2} = \frac{9 \pm \sqrt{17}}{2} = \frac{9 \pm 4.12}{2}$$

$$y_1 = 6.56 \text{ mA} \quad y_2 = 2.44 \text{ mA}$$

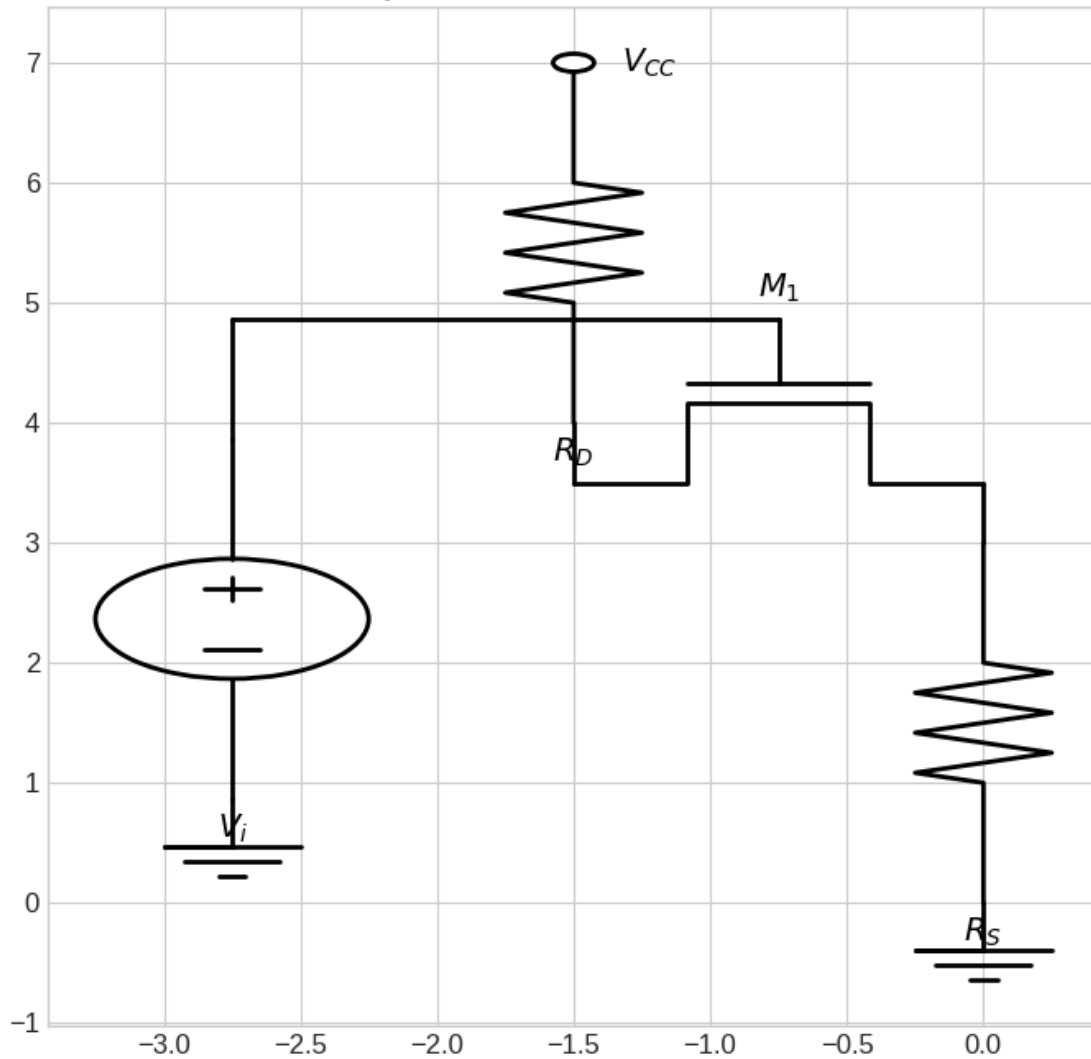
Para $y_2 = 2.44 \text{ mA}$: $V_{GS} = 6 - 2.44 = 3.56 \text{ V} > V_T$ OK

$$V_{DS} = 15 - (2\text{k} + 1\text{k}) \times 2.44 = 15 - 7.32 = 7.68 \text{ V}$$

$V_{DS} = 7.68 \geq V_{GS} - V_T = 3.56 - 2 = 1.56 \rightarrow$ **Saturación OK.**

Para $y_1 = 6.56 \text{ mA}$: $V_{GS} = 6 - 6.56 = -0.56 \text{ V} < V_T \rightarrow$ **Corte (descartada).**

Tipo 4: MOSFET con $R_D + R_S$



1.12.7 12.5 Tipo 5: Divisor de tensión + $R_D + R_S$ (el más completo)

El circuito **más estable** para MOSFET. Ya resuelto en la sección 7.3. Aquí se resumen los efectos de cada componente:

$$V_G = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad V_{GS} = V_G - R_S I_D \quad V_{DS} = V_{CC} - (R_D + R_S) I_D$$

Cómo afecta cada resistencia:

Componente	Efecto al aumentar
$R_1/(R_1 + R_2)$	V_G sube $\rightarrow V_{GS}$ sube $\rightarrow I_D$ sube
R_S	Estabiliza I_D (realimentación negativa). Pendiente de la recta de carga en plano I_D - V_{GS} disminuye
R_D	Solo afecta a V_{DS} : mayor $R_D \rightarrow$ menor $V_{DS} \rightarrow$ riesgo de salir de saturación
V_{CC}	V_G sube (proporcionalmente), V_{DS} sube
K_n	Más I_D para mismo V_{GS} . Cambia la curvatura de la parábola
V_T	Mayor $V_T \rightarrow$ se necesita más V_{GS} para conducir $\rightarrow$ menos I_D

A diferencia del BJT: el divisor no tiene carga ($I_G = 0$), por lo que **no se necesita Thévenin**. V_G se calcula directamente.

1.12.8 12.6 Tipo 6: MOSFET canal P

Para canal P, las reglas cambian respecto al canal N:

Concepto	Canal N	Canal P
Tensión de control	V_{GS}	V_{SG} (invertida)
Tensión de salida	V_{DS}	V_{SD} (invertida)
Condición conducción	$V_{GS} > V_T$	$V_{SG} > V_T$
Ec. saturación	$I_D = \frac{K_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2$	$I_D = \frac{K_p}{2} (V_{SG} - V_T)^2$
Condición saturación	$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$	$V_{SD} \geq V_{SG} - V_T$
V_T (enriquecimiento)	Positivo	Positivo (con V_{SG})
V_{CC} se conecta a	Drenador (arriba)	Fuente (arriba)

Truco: con las referencias V_{SG} y V_{SD} , las ecuaciones del canal P son **idénticas** a las del canal N. Solo cambia la posición del transistor en el circuito.

Ejercicio resuelto: MOSFET canal P con divisor Datos: $V_{CC} = 10$ V, $R_1 = 100$ k Ω (abajo), $R_2 = 200$ k Ω (arriba), $R_D = 1.5$ k Ω , $R_S = 500$ Ω , $K_p = 3$ mA/V², $V_T = 2$ V

Paso 1: $V_G = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{100}{300} \times 10 = 3.33$ V

Paso 2: Para canal P: $V_{SG} = V_S - V_G$. La fuente está conectada a V_{CC} a través de R_S :

$$V_S = V_{CC} - R_S \cdot I_D = 10 - 500I_D$$

$$V_{SG} = V_S - V_G = 10 - 500I_D - 3.33 = 6.67 - 500I_D$$

Paso 3-4: Suponer saturación:

$$I_D = \frac{K_p}{2}(V_{SG} - V_T)^2 = \frac{3 \times 10^{-3}}{2}(6.67 - 500I_D - 2)^2$$

Sea $x = I_D$ en mA:

$$x = 1.5 \times 10^{-3}(4.67 - 0.5x)^2 \times 10^6$$

Esto no simplifica bien. Usemos x en mA y V_{SG} en V:

$$x = 1.5(4.67 - 0.5x)^2 = 1.5(21.81 - 4.67x + 0.25x^2)$$

$$x = 32.72 - 7.005x + 0.375x^2$$

$$0.375x^2 - 8.005x + 32.72 = 0$$

$$x = \frac{8.005 \pm \sqrt{64.08 - 49.08}}{0.75} = \frac{8.005 \pm \sqrt{15.00}}{0.75} = \frac{8.005 \pm 3.873}{0.75}$$

$$x_1 = 15.84 \text{ mA} \quad x_2 = 5.51 \text{ mA}$$

Para $x_2 = 5.51$ mA: $V_{SG} = 6.67 - 0.5 \times 5.51 = 3.92 \text{ V} > V_T$ OK

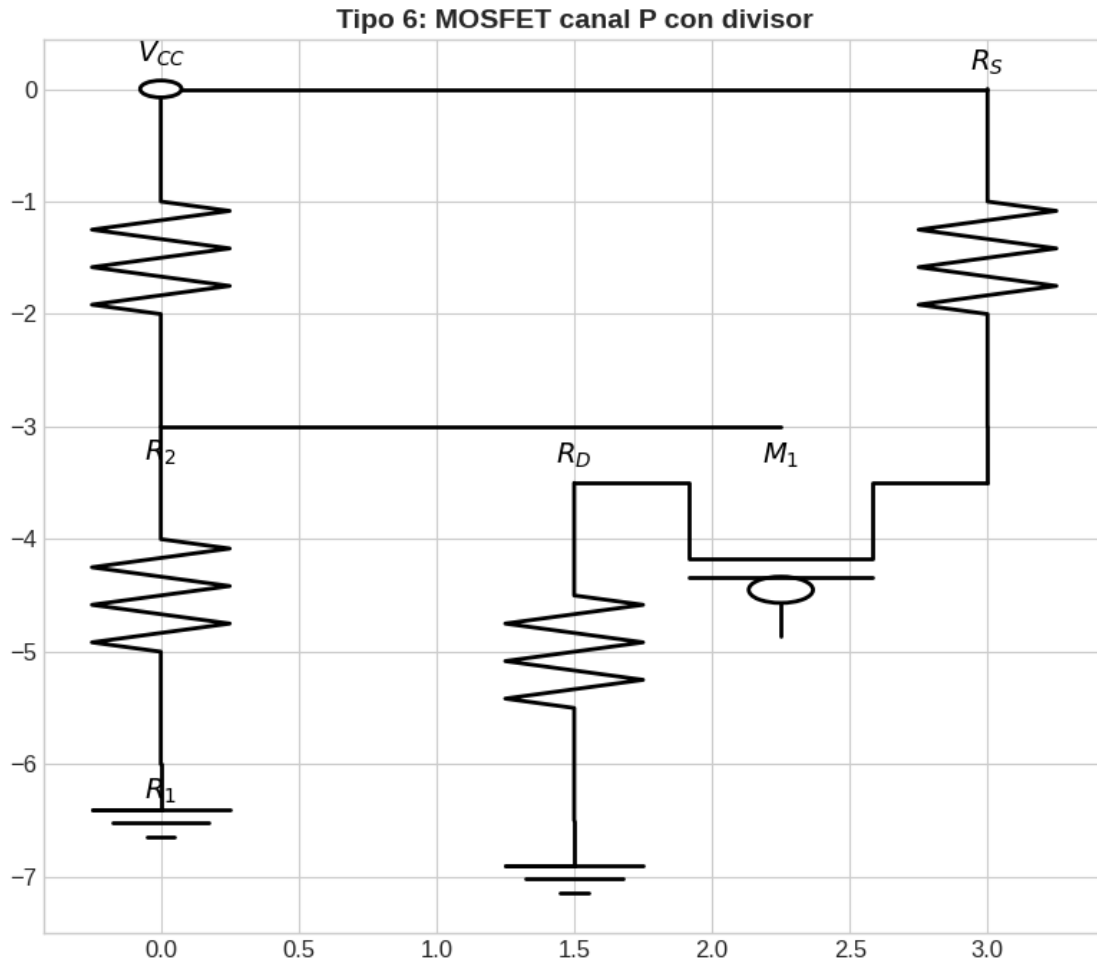
$$V_{SD} = V_{CC} - (R_S + R_D) \cdot I_D = 10 - 2\text{k} \times 5.51 = -1.02 \text{ V}$$

V_{SD} negativo $\rightarrow$ **no es factible**. Necesitamos menor R_D .

Con $R_D = 1 \text{ k}\Omega$: $V_{SD} = 10 - 1.5\text{k} \times 5.51 = 1.74 \text{ V}$.

$V_{SD} = 1.74 \geq V_{SG} - V_T = 3.92 - 2 = 1.92 \text{ V}$? NO $\rightarrow$ zona óhmica (por poco).

Con $R_D = 500 \Omega$: $V_{SD} = 10 - 1\text{k} \times 5.51 = 4.49 \text{ V} \geq 1.92 \rightarrow$ **Saturación OK**.



1.12.9 12.7 Tipo 7: MOSFET de empobrecimiento

Los MOSFET de empobrecimiento tienen $V_T < 0$ (canal N) o $V_T > 0$ (canal P con V_{SG}). Esto significa que **conducen a** $V_{GS} = 0$.

Diferencias con enriquecimiento: - A $V_{GS} = 0$: $I_D = \frac{K_n}{2} V_T^2 \neq 0$ (ya conduce) - Se puede apagar aplicando $V_{GS} < V_T$ (tensión negativa para canal N) - Las ecuaciones son **idénticas**, solo cambia el signo de V_T - Se comportan como un **JFET con aislamiento de óxido**

Ejercicio resuelto: MOSFET empobrecimiento Datos: $V_{CC} = 12\text{ V}$, $R_D = 2\text{ k}\Omega$, puerta a tierra ($V_{GS} = 0$), $K_n = 1\text{ mA/V}^2$, $V_T = -3\text{ V}$

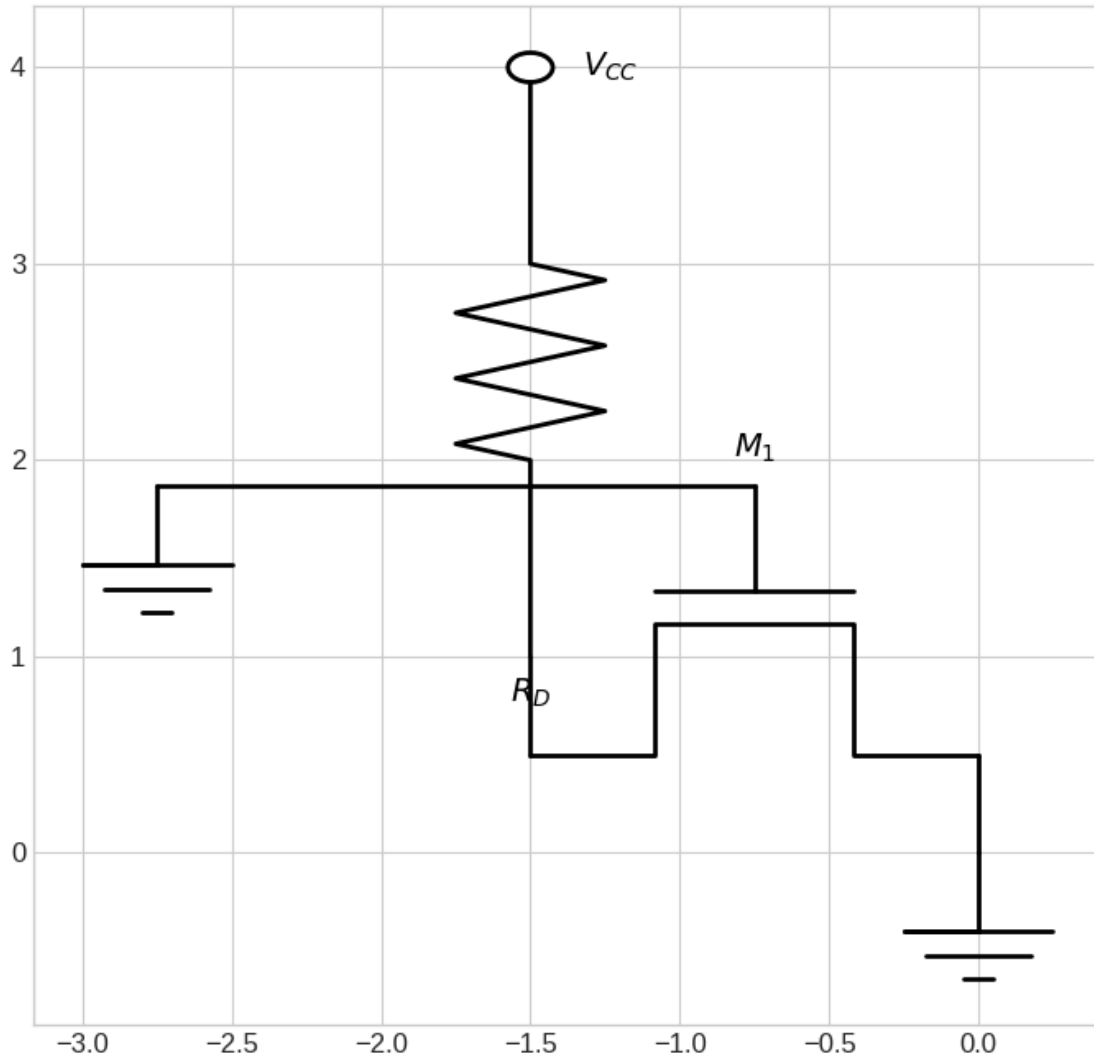
$$V_{GS} = 0\text{ V} > V_T = -3\text{ V} \rightarrow \text{conduce}$$

$$I_D = \frac{K_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{10^{-3}}{2} (0 - (-3))^2 = 0.5 \times 10^{-3} \times 9 = 4.5\text{ mA}$$

$$V_{DS} = 12 - 2k \times 4.5 = 3 \text{ V}$$

$V_{DS} = 3 \geq V_{GS} - V_T = 0 + 3 = 3 \text{ V} \rightarrow$ **Justo en la frontera. Saturación.**

Tipo 7: MOSFET de empobrecimiento ($V_{GS} = 0$)



1.12.10 12.8 Tipo especial: Determinar la zona de funcionamiento

Un ejercicio frecuente es: dado un MOSFET con ciertos valores de V_{GS} , V_{DS} y V_T , **determinar en qué zona está.**

Algoritmo:

1. ¿ $V_{GS} > V_T$?
 NO $\rightarrow$ CORTE ($I_D = 0$)
 SÍ $\rightarrow$ conduce. Ir a paso 2.

2. ¿ $V_{DS} = V_{GS} - V_T$?
 SÍ → SATURACIÓN
 NO → ZONA ÓHMICA

Ejercicio: Identificar zonas

V_{GS}	V_T	V_{DS}	$V_{GS} > V_T$?	$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$?	Zona
3 V	2 V	5 V	Sí	$5 \geq 1$: Sí	Saturación
1 V	2 V	5 V	No	-	Corte
4 V	1 V	2 V	Sí	$2 \geq 3$: No	Óhmica
5 V	2 V	3 V	Sí	$3 \geq 3$: Sí	Frontera sat/óhm
-1 V	-3 V	4 V	Sí ($-1 > -3$)	$4 \geq 2$: Sí	Sat. (empob.)

1.12.11 12.9 Tipo especial: Calcular K_n desde el punto de operación

Si te dan I_D y V_{GS} en saturación, puedes obtener K_n :

$$K_n = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_T)^2}$$

Si te dan I_D para dos valores de V_{GS} , puedes obtener K_n y V_T :

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{(V_{GS1} - V_T)^2}{(V_{GS2} - V_T)^2} \Rightarrow \sqrt{\frac{I_{D1}}{I_{D2}}} = \frac{V_{GS1} - V_T}{V_{GS2} - V_T}$$

Ejercicio: Encontrar K_n y V_T Datos: $I_{D1} = 2 \text{ mA}$ a $V_{GS1} = 4 \text{ V}$; $I_{D2} = 8 \text{ mA}$ a $V_{GS2} = 6 \text{ V}$

$$\sqrt{\frac{2}{8}} = \sqrt{0.25} = 0.5 = \frac{4 - V_T}{6 - V_T}$$

$$0.5(6 - V_T) = 4 - V_T \Rightarrow 3 - 0.5V_T = 4 - V_T$$

$$0.5V_T = 1 \Rightarrow V_T = 2 \text{ V}$$

$$K_n = \frac{2 \times 2 \times 10^{-3}}{(4 - 2)^2} = \frac{4 \times 10^{-3}}{4} = 1 \text{ mA/V}^2$$

1.12.12 12.10 Resumen: fórmulas por tipo de circuito FET

MOSFET

Tipo	V_{GS}	Cuadrática?	Clave
1. Básica	$= V_i$	No	Directo
2. Con R_D	$= V_i$	No	R_D no afecta a I_D
3. Retroalim.	$= V_{CC} - R_D I_D$	Sí	$V_{GS} = V_{DS}$
4. Con R_S	$= V_i - R_S I_D$	Sí	R_S estabiliza
5. Divisor	$= V_G - R_S I_D$	Sí	No hace falta Thévenin
6. Canal P	$V_{SG} = V_S - V_G$	Sí	Invertir referencias
7. Empob.	Igual que enriq.	Depende	$V_T < 0$, conduce a $V_{GS} = 0$

JFET

Tipo	V_{GS}	Cuadrática?	Clave
8. Fija	$= -V_1$	No	Directo con Shockley
9. Autopol.	$= -R_S I_D$	Sí	Intersección gráfica
10. Divisor	$= V_G - R_S I_D$	Sí	Recta corta en $(V_G, 0)$

Patrón universal: siempre que R_S aparece, hay ecuación cuadrática, porque V_{GS} depende de I_D .

Resumen: ¿Cómo se obtiene V_{GS} en cada tipo?

Básica / Con R_D	$V_{GS} = V_i$	Directo, sin cuadrática
Retroalimentación	$V_{GS} = V_{DS} = V_{CC} - R_D I_D$	Cuadrática en V_{DS}
Con R_S	$V_{GS} = V_i - R_S I_D$	Cuadrática en I_D
Divisor + R_S	$V_{GS} = V_G - R_S I_D$	Cuadrática. V_G directo
Canal P	$V_{SG} = V_S - V_G$	Invertir referencias
JFET fija	$V_{GS} = -V_1$	Directo con Shockley
JFET autopol.	$V_{GS} = -R_S I_D$	Cuadrática / gráfica
JFET divisor	$V_{GS} = V_G - R_S I_D$	Cuadrática

1.13 11. Resumen comparativo: MOSFET vs JFET

Característica	MOSFET	JFET
Estructura	Metal-Óxido-Semiconductor	Unión pn
Control de puerta	Por campo eléctrico (capacitivo)	Por unión pn (inversa)
I_G	= 0 (siempre)	= 0 (en operación normal)
Tipos	4 (N/P, enriq./empob.)	2 (N/P)
A $V_{GS} = 0$	Enriq: apagado. Empob: encendido	Siempre encendido ($I_D = I_{DSS}$)
Ec. saturación	$I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_T)^2$	$I_D = I_{DSS}(1 + V_{GS}/V_P)^2$
Relación	K_n, V_T	$K = 2I_{DSS}/V_P^2, V_T = -V_P$

1.13.1 Fórmulas clave

Fórmula	Uso
$I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_T)^2$	MOSFET en saturación
$I_D = I_{DSS}(1 + V_{GS}/V_P)^2$	JFET en saturación (Shockley)
$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$	Condición de saturación MOSFET
$V_{DS} \geq V_{GS} + V_P$	Condición de saturación JFET
$I_G = 0$	Siempre (simplifica malla de puerta)
$R_{DS} = 1/[K_n(V_{GS} - V_T)]$	MOSFET como resistencia (zona óhmica)
$V_{GS} = V_G - R_S \cdot I_D$	Malla de puerta con R_S