

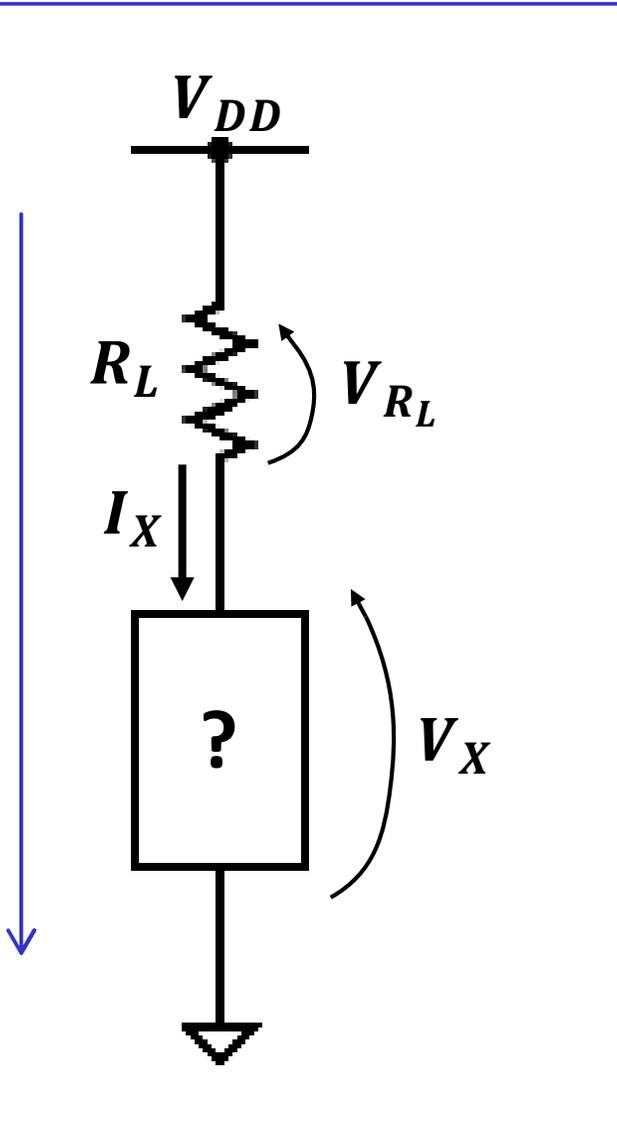
[86.03/66.25] Dispositivos Semiconductores

1er Cuatrimestre de 2020

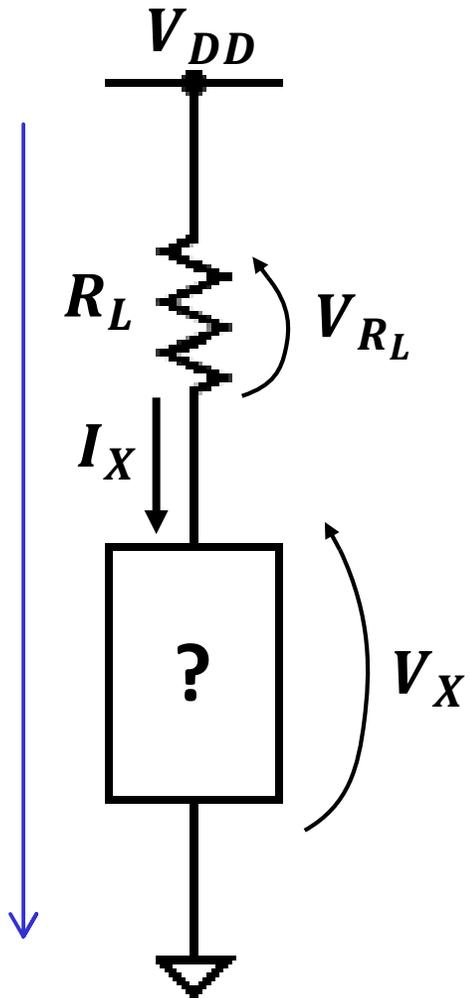
Recta de Carga

¿ Que es la recta de carga?

- La caja negra tiene una relación (V_X, I_X) desconocida
- La resistencia impone ciertas condiciones de tensión/corriente al circuito.



¿ Que es la recta de carga?



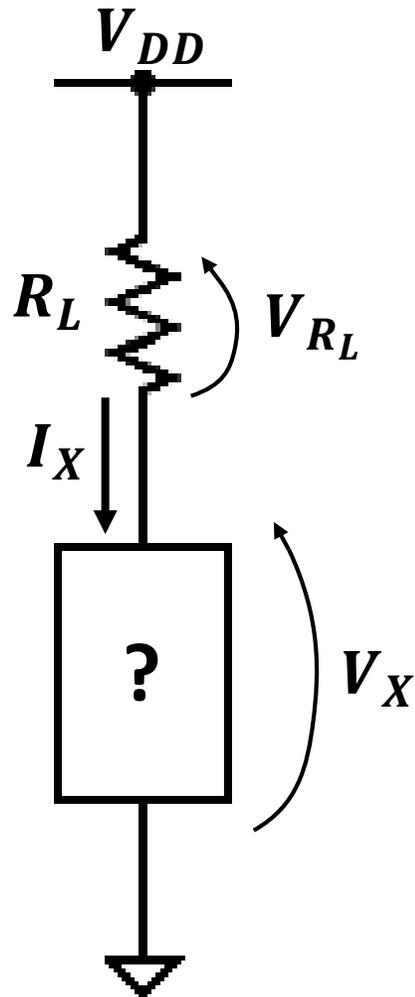
→ La caja negra tiene una relación (V_X, I_X) desconocida

→ La resistencia impone ciertas condiciones de tensión/corriente al circuito.

→ Recorremos la malla para obtener:

$$V_{DD} - I_X R_L - V_X = 0$$

¿ Que es la recta de carga?



- La caja negra tiene una relación (V_X, I_X) desconocida
- La resistencia impone ciertas condiciones de tensión/corriente al circuito.
- Recorremos la malla para obtener:

$$V_{DD} - I_X R_L - V_X = 0$$

- Despejando:

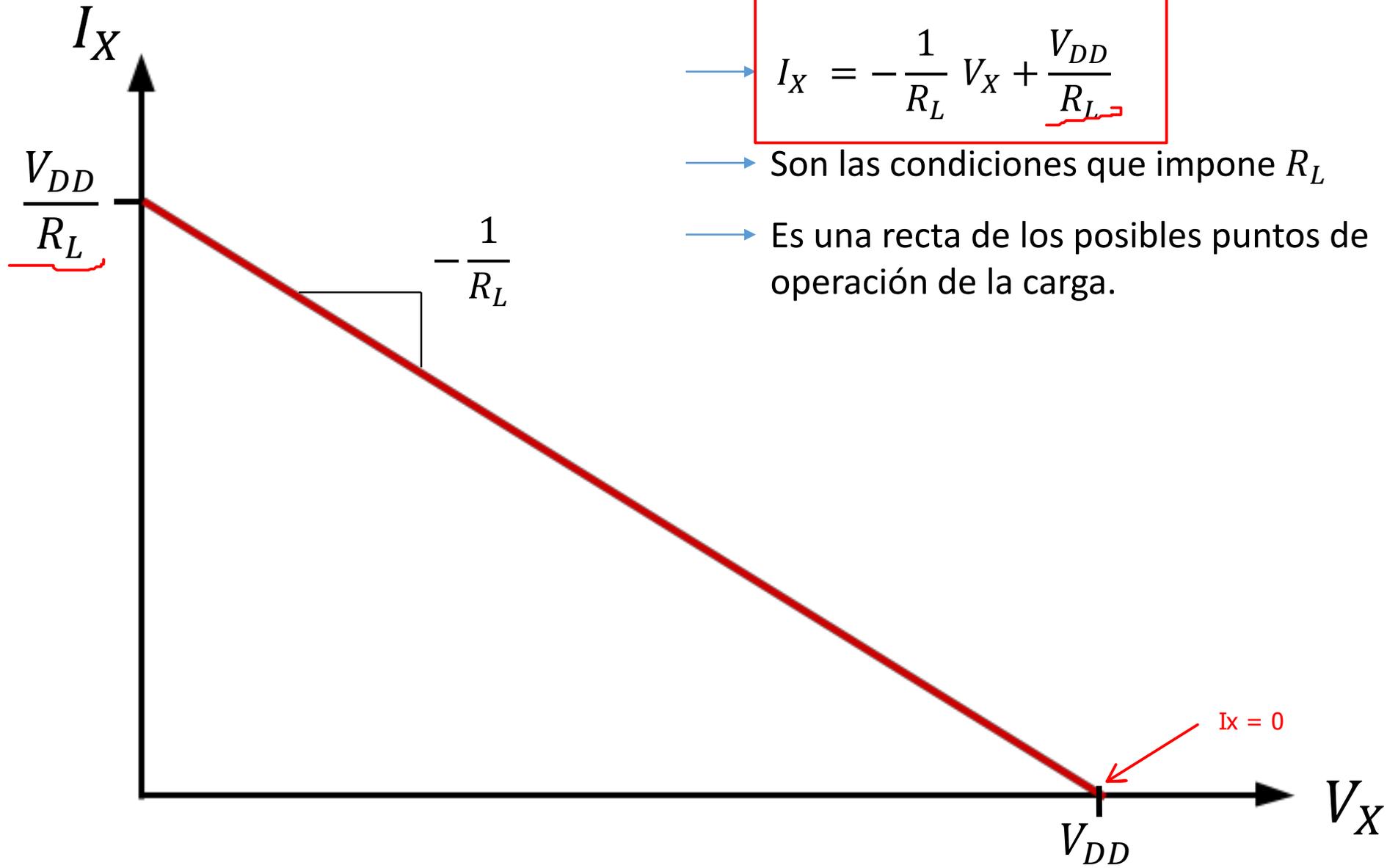
$$I_X = -\frac{1}{R_L} V_X + \frac{V_{DD}}{R_L}$$

→ Ecuación de la recta de carga.

$$y = m * x + b \rightarrow m = -1/R_L, b = V_{DD}/R_L$$

→ La impone únicamente R_L . No depende del dispositivo que pongamos.

Grafiquemos en un plano I_X vs. V_X ...

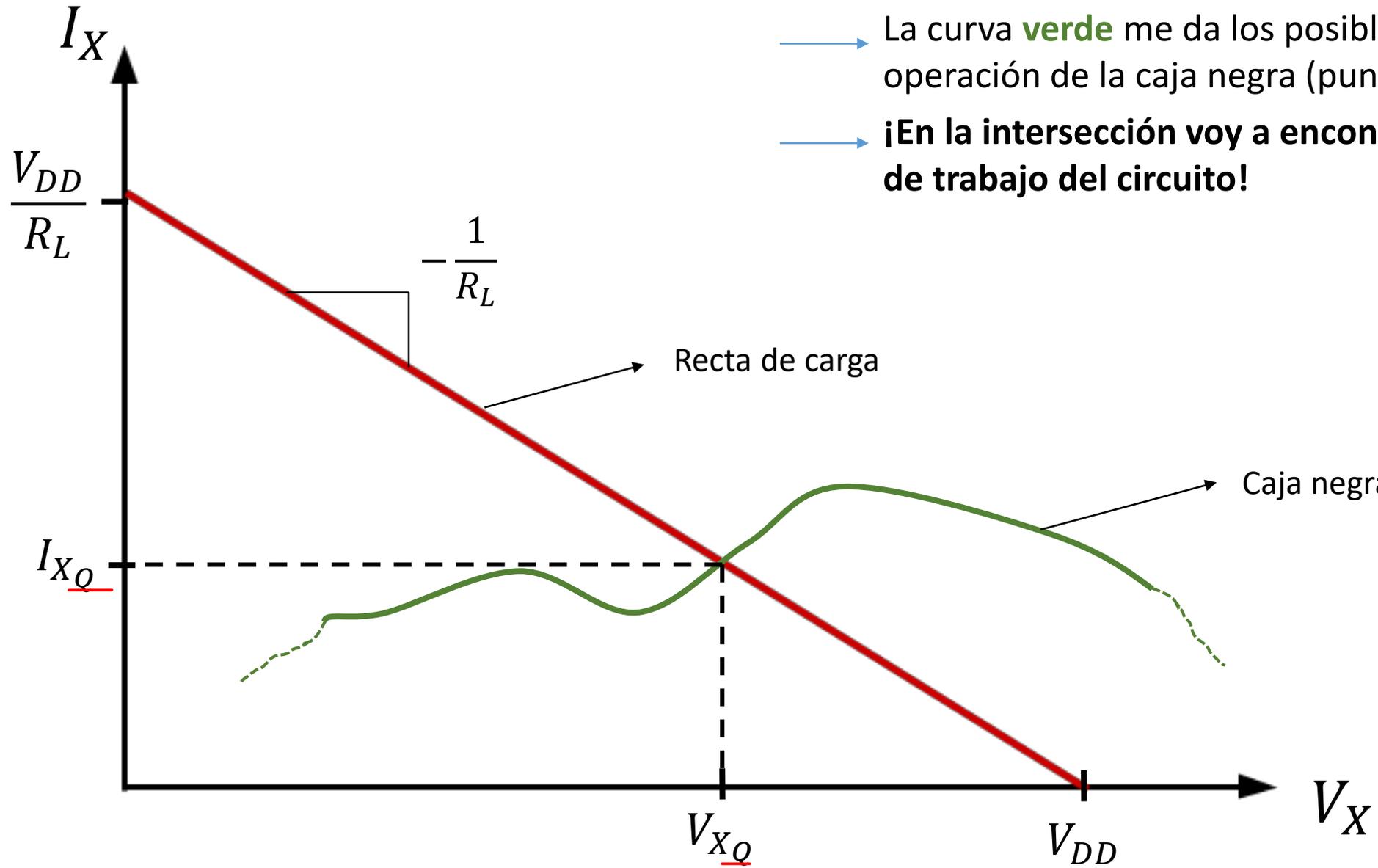


$$I_X = -\frac{1}{R_L} V_X + \frac{V_{DD}}{R_L}$$

→ Son las condiciones que impone R_L

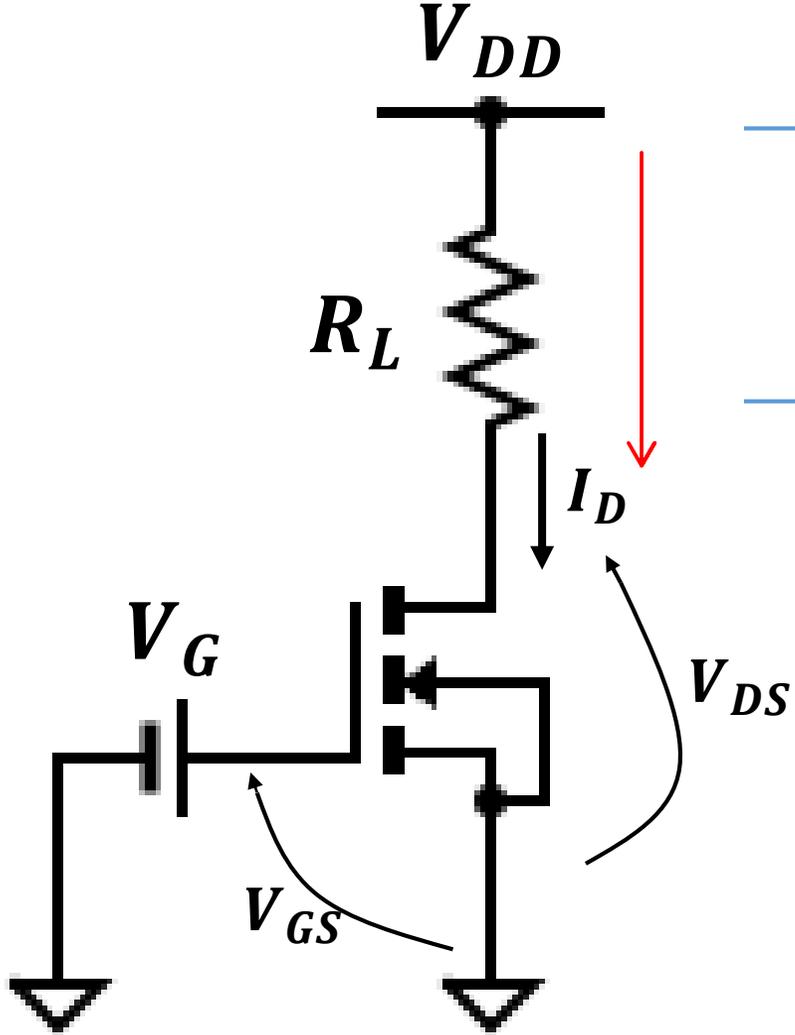
→ Es una recta de los posibles puntos de operación de la carga.

Agregaremos la característica $(V_X; I_X)$



- La curva **verde** me da los posibles puntos de operación de la caja negra (punto Q).
- **¡En la intersección voy a encontrar el punto de trabajo del circuito!**

Reemplazando por un transistor NMOS....



→ Recorriendo la malla de salida obtenemos:

$$V_{DD} - I_D R_L - V_{DS} = 0$$

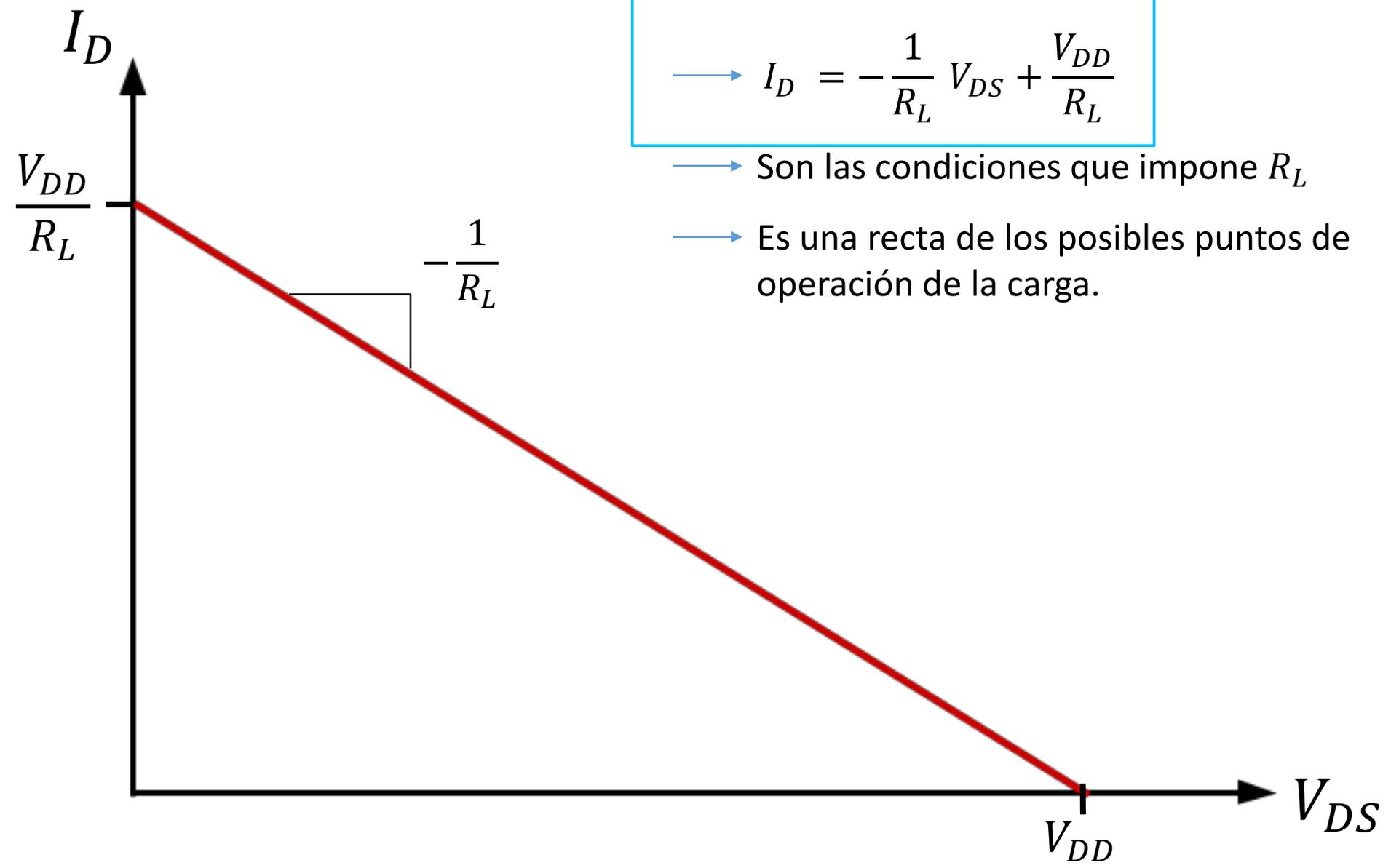
→ Despejando:

$$I_D = -\frac{1}{R_L} V_{DS} + \frac{V_{DD}}{R_L}$$

→ Ecuación de la recta de carga.

Independiente del transistor. Impuesta por factores externos al dispositivo (carga y tensión de alimentación)

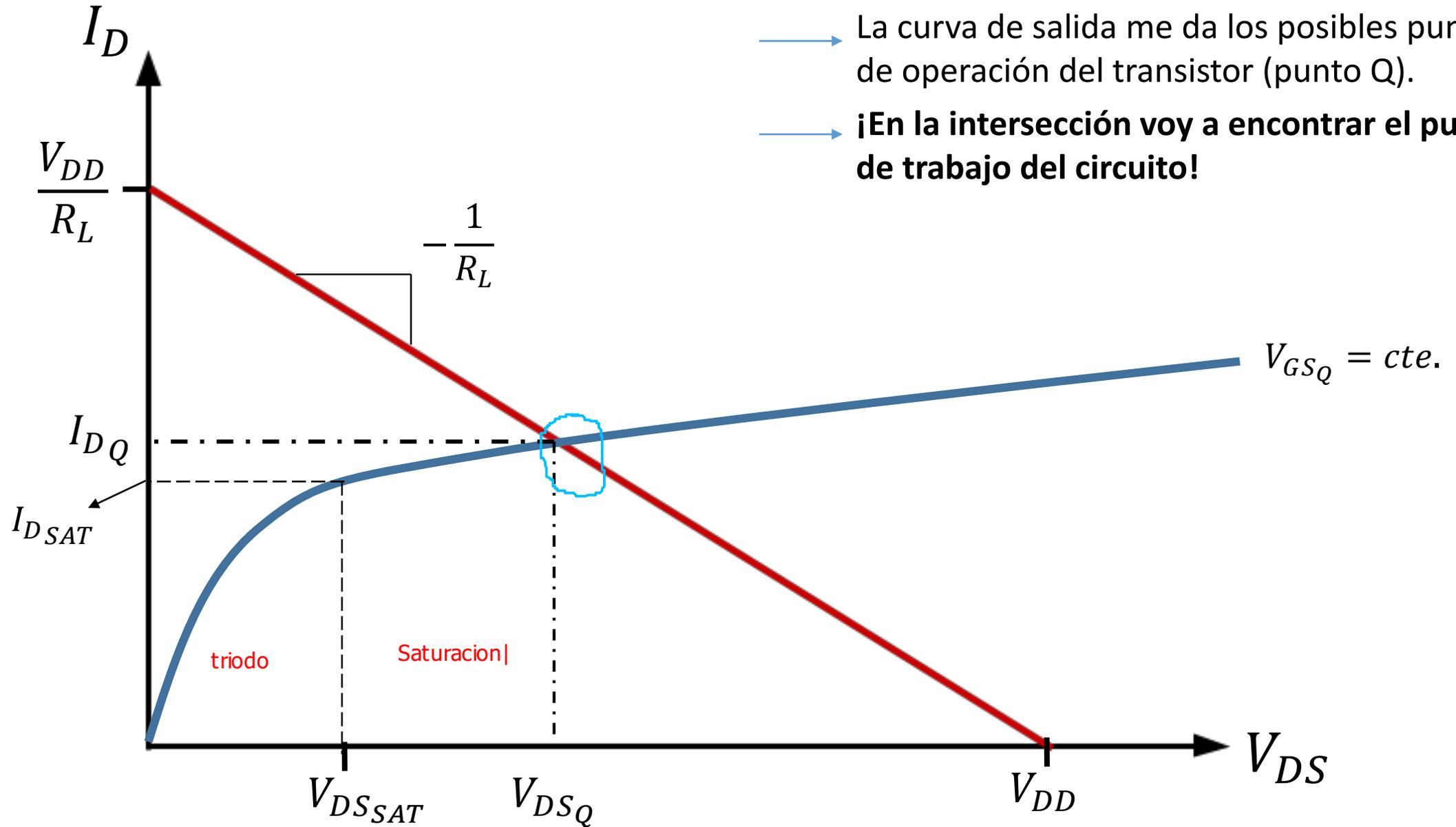
Grafiquemos en un plano I_D vs. V_{DS} ...



$$\rightarrow I_D = -\frac{1}{R_L} V_{DS} + \frac{V_{DD}}{R_L}$$

- Son las condiciones que impone R_L
- Es una recta de los posibles puntos de operación de la carga.

Si dibujamos la curva de salida del transistor...



→ La curva de salida me da los posibles puntos de operación del transistor (punto Q).

→ ¡En la intersección voy a encontrar el punto de trabajo del circuito!

→ La recta de carga nos ayuda a pensar como cambia el punto de trabajo al variar parámetros como R_L y V_{DD} .

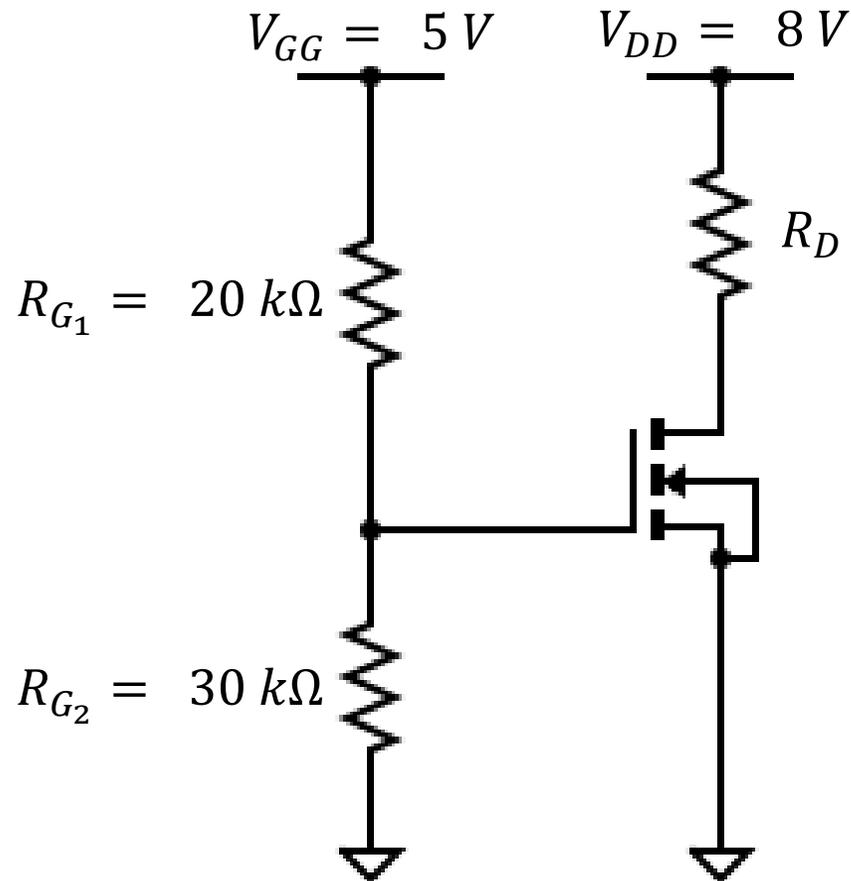
→ ¿Cómo se ve modificada la recta de carga al variar estos valores?

→ Herramienta para jugar: <https://www.desmos.com/calculator/b74ene4slr>

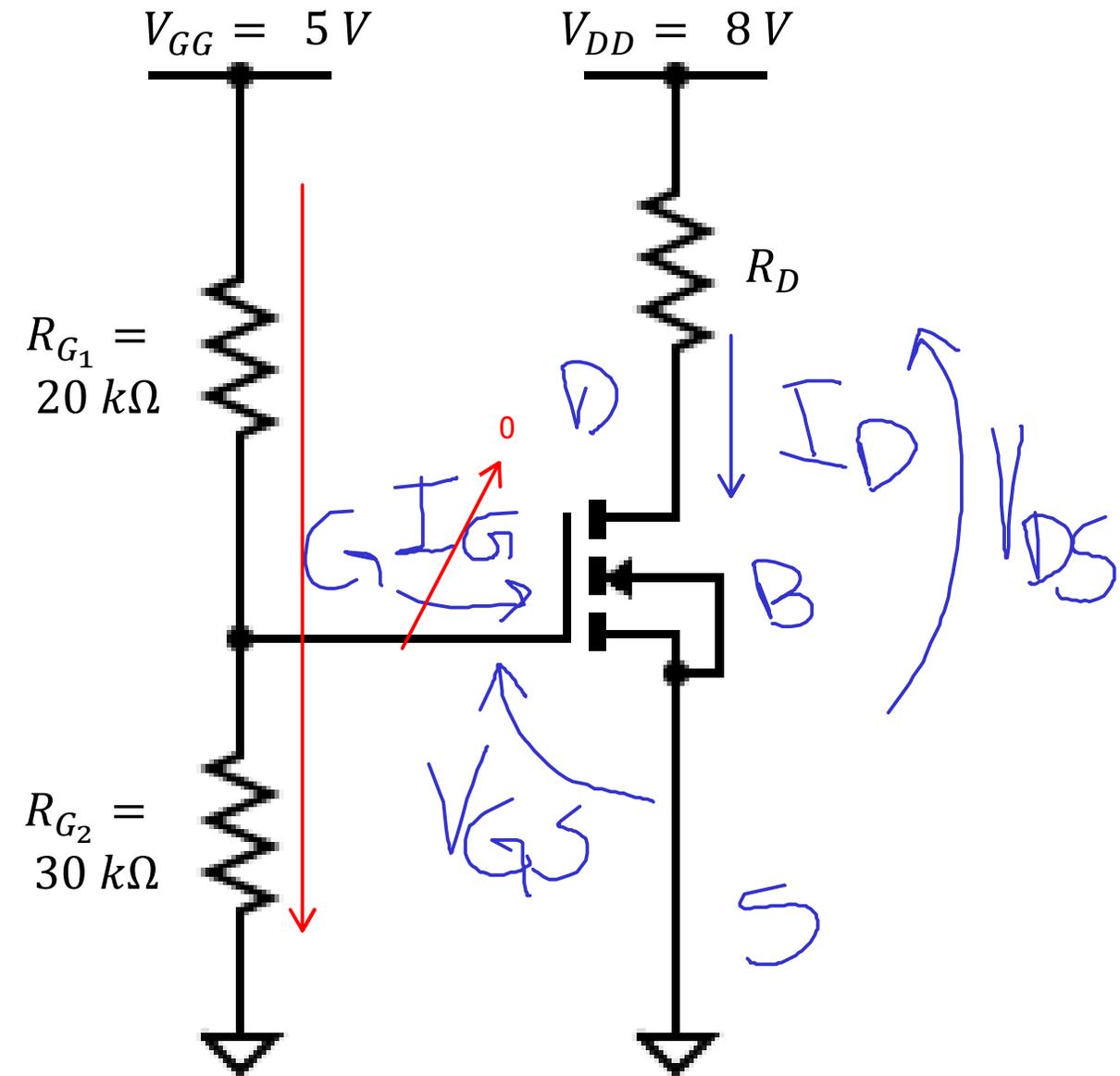
Dado el siguiente circuito donde:

- $\mu_n C'_{OX} = 100 \frac{\mu A}{V^2}$
- $V_T = 1$
- $\lambda \simeq 0$
- $\frac{W}{L} = 20$
- $R_D = 1 \text{ k}\Omega$

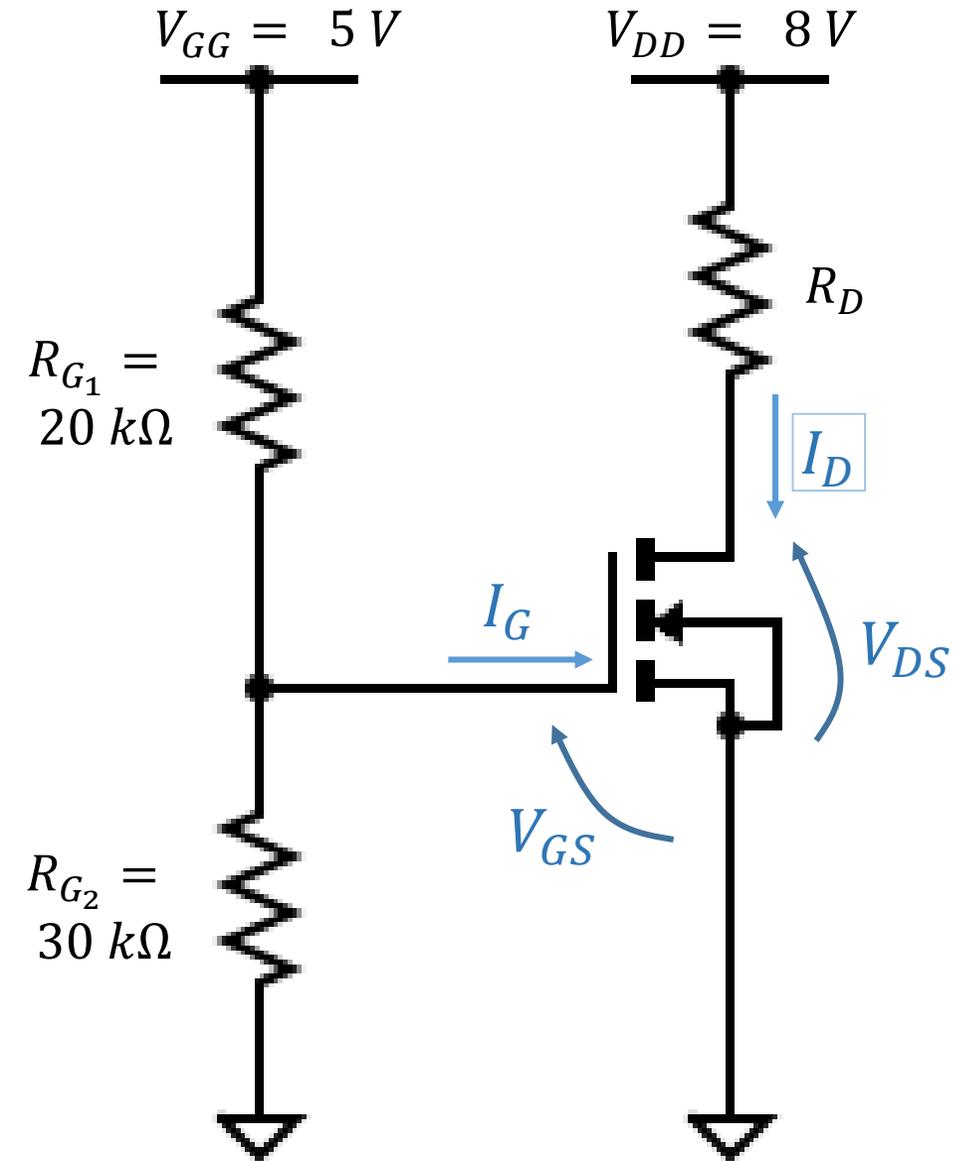
- Hallar la polarización. Graficar la recta de carga
- Encontrar los valores de $R_D \in [R_{D_{MIN}}, R_{D_{MAX}}]$ tal que el dispositivo se mantenga en saturación.
- ¿Qué sucede cuando $R_D = 10 \cdot R_{D_{MAX}}$? Estimar I_D .



a) Hallar la polarización y graficar la recta de carga.



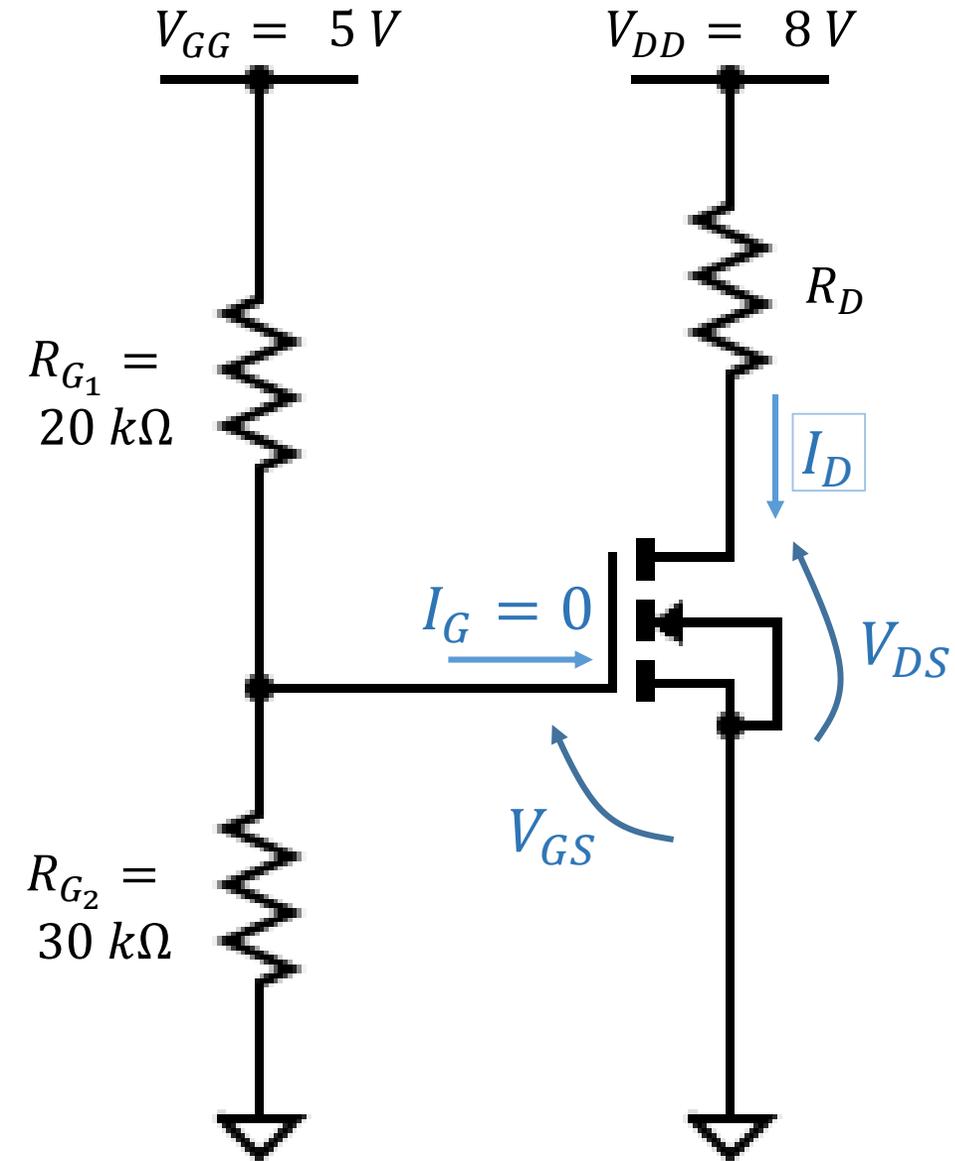
a) Hallar la polarización y graficar la recta de carga.



Como $I_G = 0 \rightarrow$ En el gate tengo un divisor resistivo

$$V_G = V_{GS} = V_{GG} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} = 5\text{ V} \frac{30\text{ k}\Omega}{20\text{ k}\Omega + 30\text{ k}\Omega} = 3\text{ V}$$

a) Hallar la polarización y graficar la recta de carga.



Como $I_G = 0 \rightarrow$ En el gate tengo un divisor resistivo

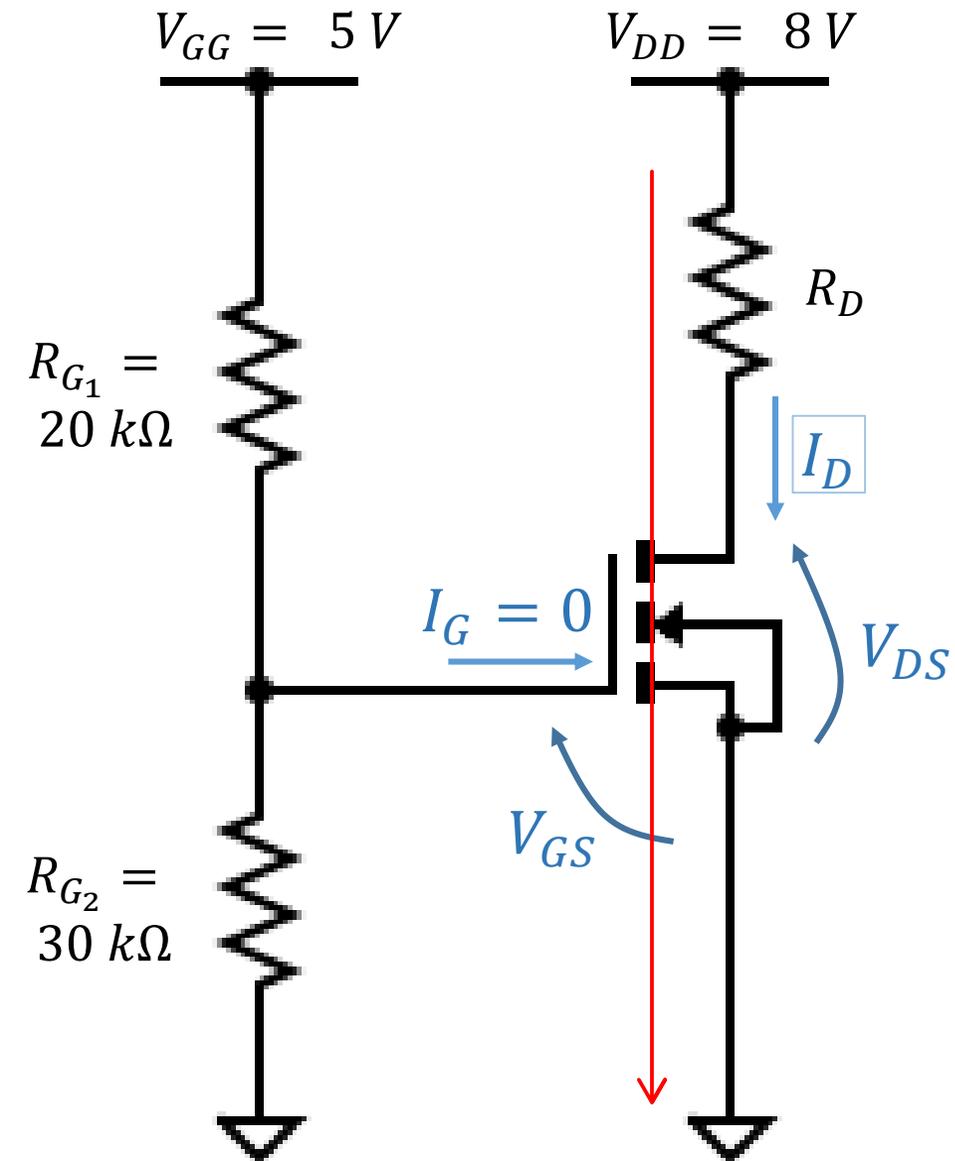
$$V_G = V_{GS} = V_{GG} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} = 5V \frac{30k\Omega}{20k\Omega + 30k\Omega} = 3V$$

Suponemos que estamos en saturación:

$$\text{Saturación: } \begin{cases} V_{GS} > V_T \\ V_{DS} > V_{DS_{SAT}} \end{cases} \rightarrow I_D = \frac{\mu_n C'_{OX} W}{2 L} (V_{GS} - V_T)^2 [1 + \lambda (\dots)]$$

Reemplazando con los datos y $V_{GS} = 3V$ obtenemos: $I_D = 4mA$

a) Hallar la polarización y graficar la recta de carga.



Como $I_G = 0 \rightarrow$ En el gate tengo un divisor resistivo

$$V_G = V_{GS} = V_{GG} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} = 5 V \frac{30 k\Omega}{20 k\Omega + 30 k\Omega} = 3 V$$

Suponemos que estamos en saturación:

$$\text{Saturación: } \begin{cases} V_{GS} > V_T \\ V_{DS} > V_{DS_{SAT}} \end{cases} \rightarrow I_D = \frac{\mu_n C'_{OX} W}{2 L} (V_{GS} - V_T)^2 [1 + \lambda (...)]$$

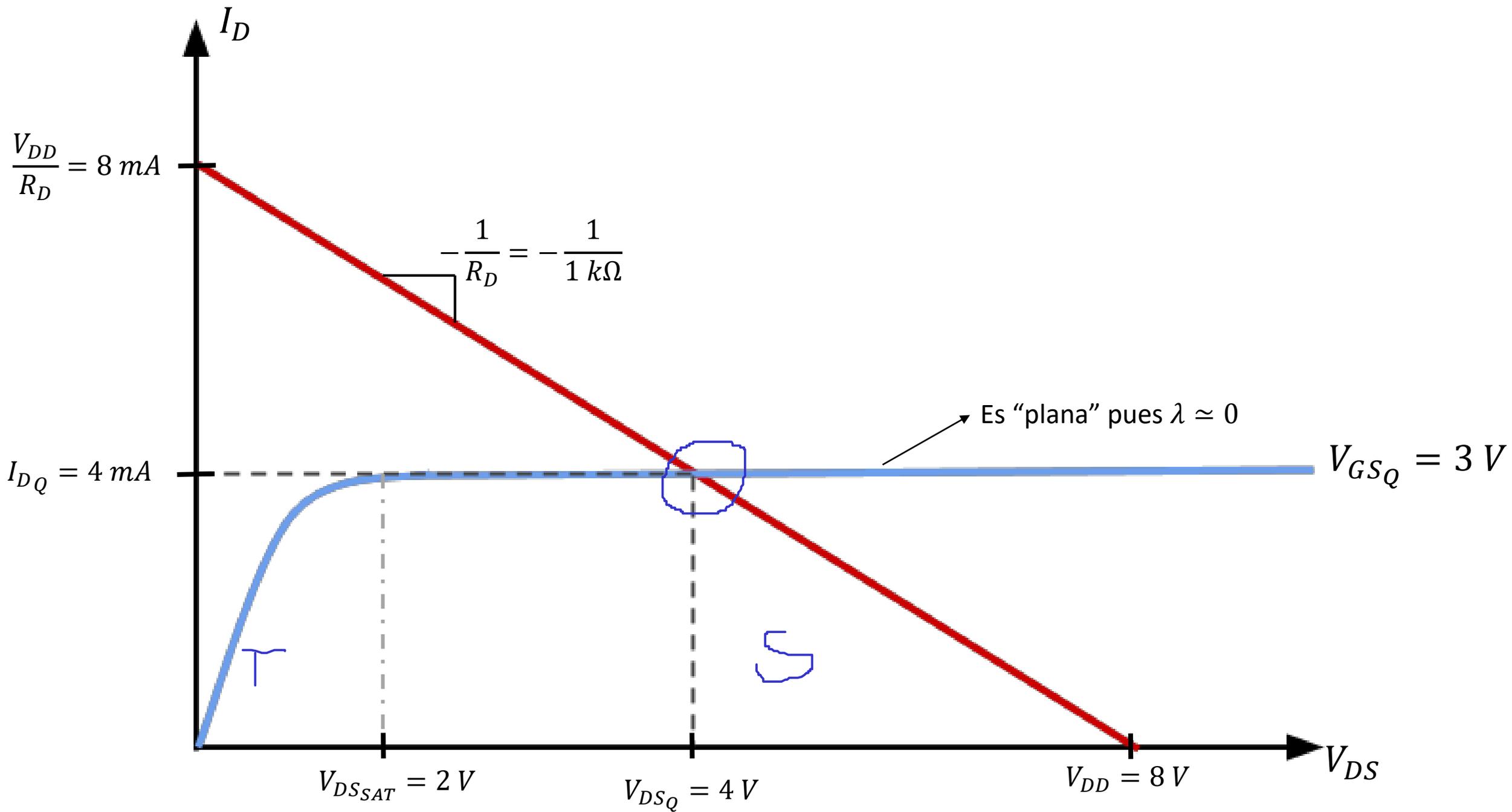
Reemplazando con los datos y $V_{GS} = 3 V$ obtenemos: $I_D = 4 mA$

¿Cómo se si estoy en saturación? Recorremos la malla de salida:

$$\text{Malla de salida: } \underline{V_{DD}} - \underline{I_D R_D} - V_{DS} = 0 \rightarrow \boxed{V_{DS} = 4 V}$$

$$\rightarrow V_{DS} = 4 V > V_{DS_{SAT}} = V_{GS} - V_T = 2 V$$

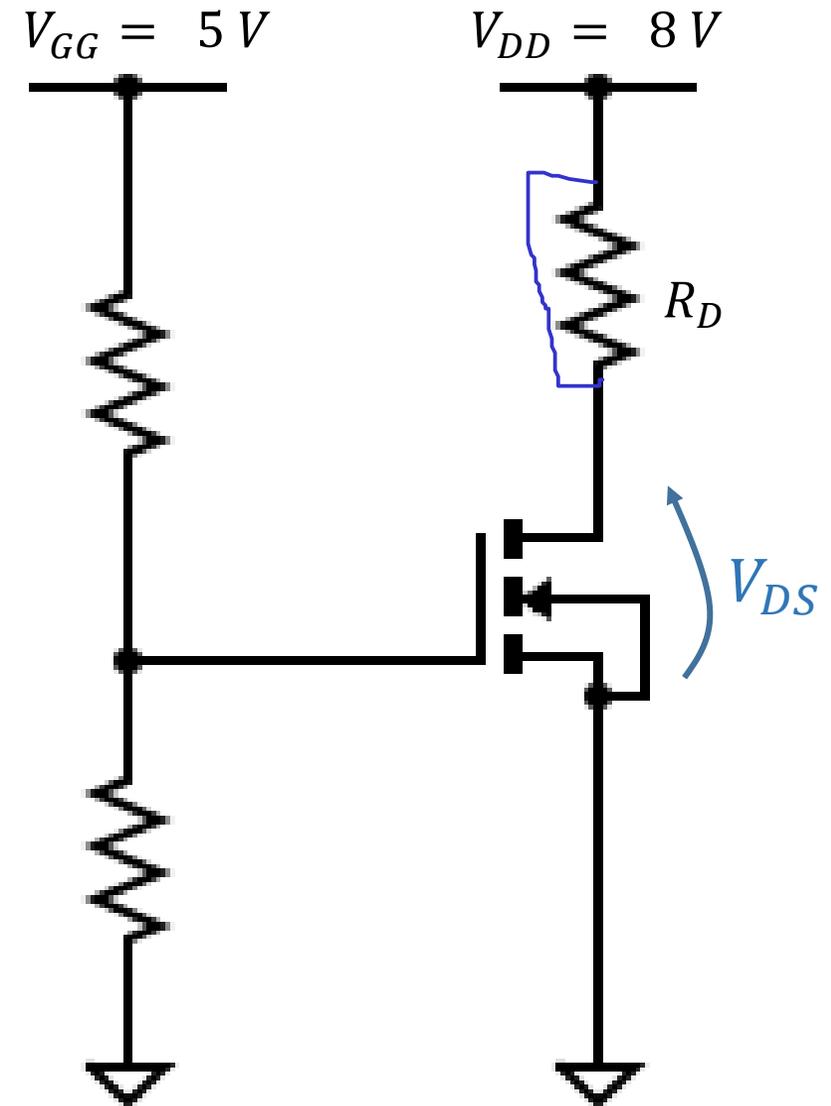
\rightarrow Estoy en SAT!



b) Encontrar los valores de $R_D \in [R_{D_{MIN}}, R_{D_{MAX}}]$ tal que el dispositivo de mantenga en saturación.

→ Comencemos pensando en el valor mínimo... Si $R_D = 0 \rightarrow V_{DS} = V_{DD} = 8V > V_{DS_{SAT}} = 2$

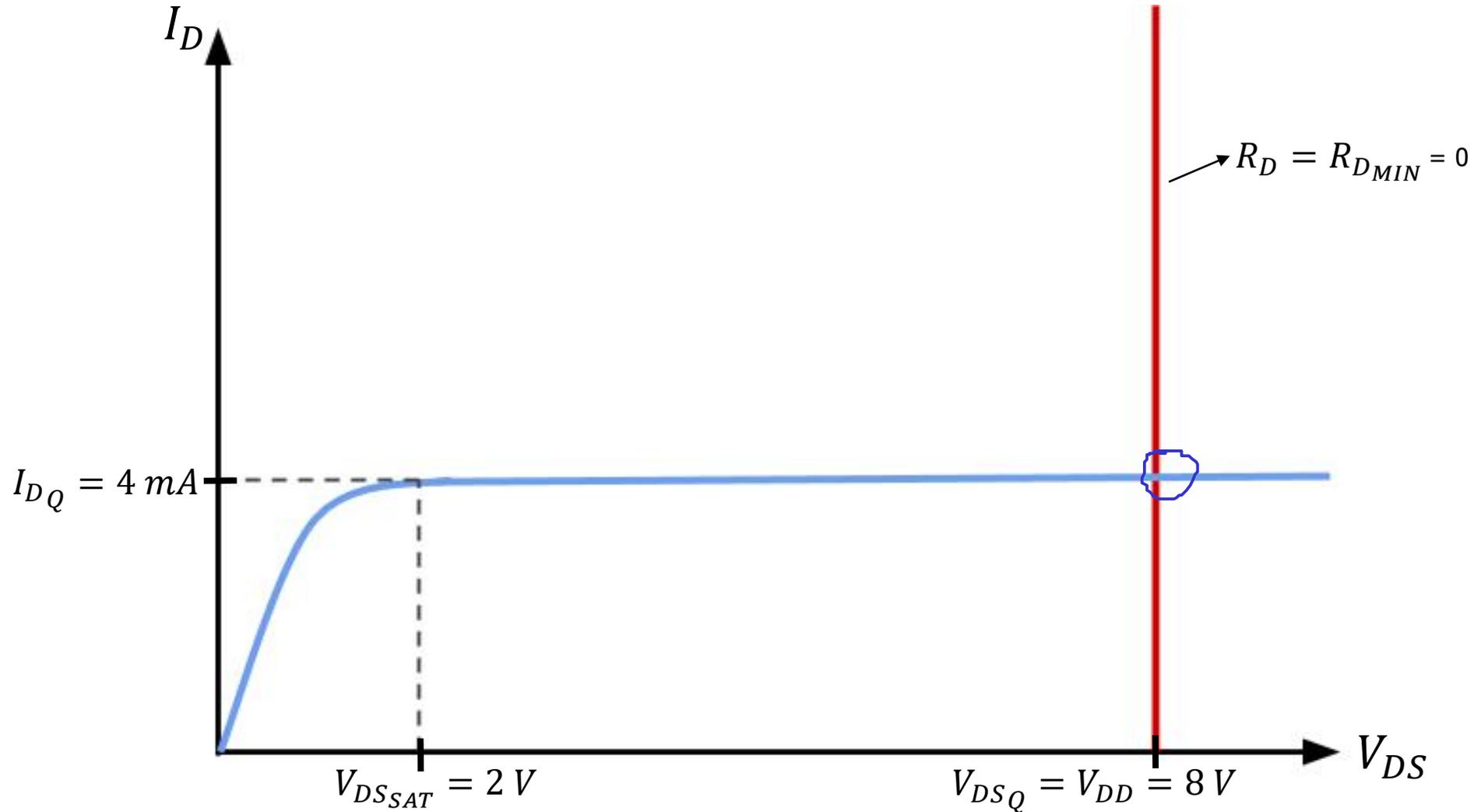
→ Como se ve la recta de carga? En este caso $\frac{1}{R_D} = \infty$...



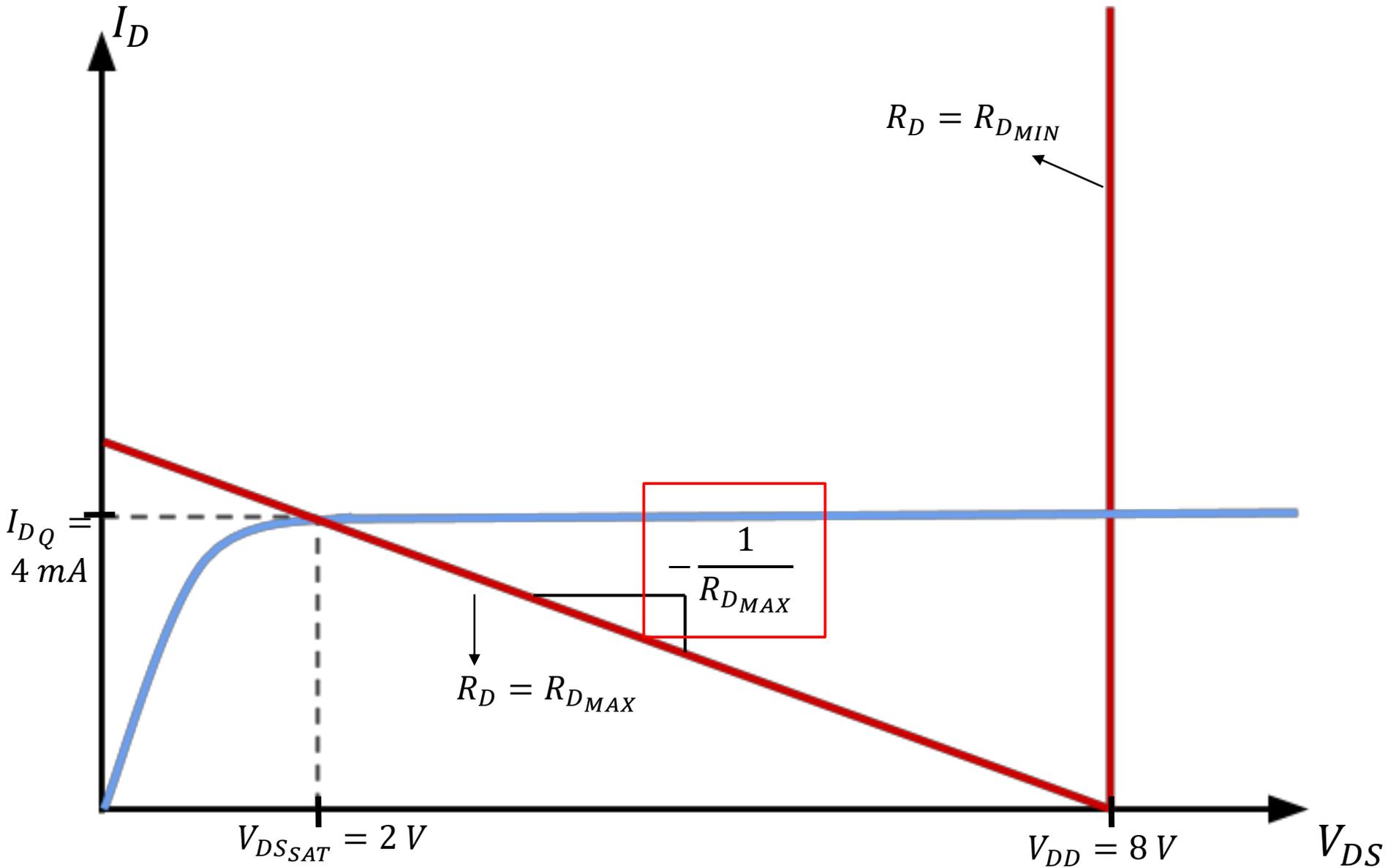
b) Encontrar los valores de $R_D \in [R_{D_{MIN}}, R_{D_{MAX}}]$ tal que el dispositivo se mantenga en saturación.

→ Comencemos pensando en el valor mínimo... Si $R_D = 0 \rightarrow V_{DS} = V_{DD} = 8V > V_{DS_{SAT}}$.

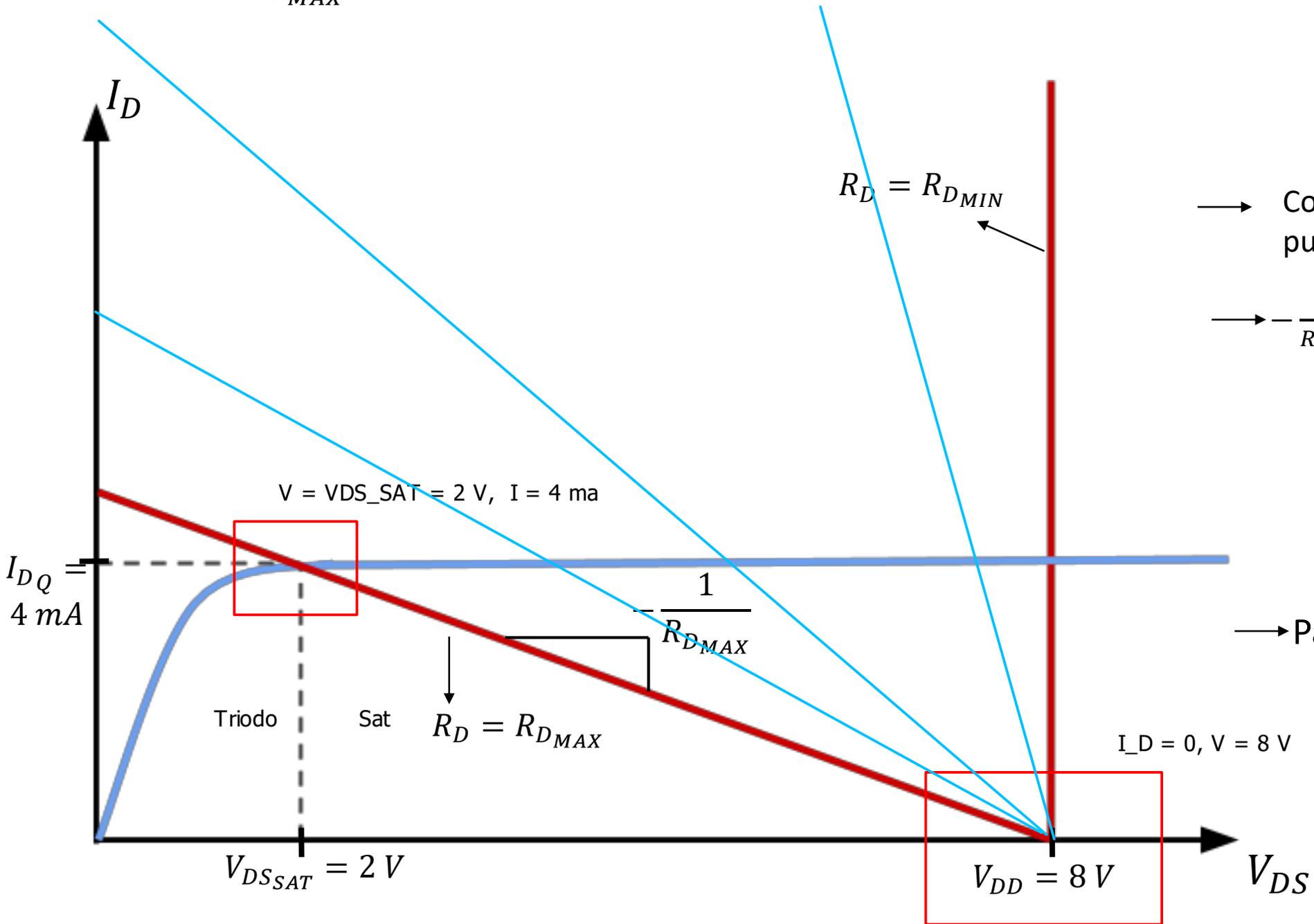
→ Como se ve la recta de carga? En este caso $\frac{1}{R_D} = \infty$...



→ Para hallar $R_{D_{MAX}}$ observemos como sería su recta de carga...



→ Para hallar $R_{D_{MAX}}$ observemos como sería su recta de carga...



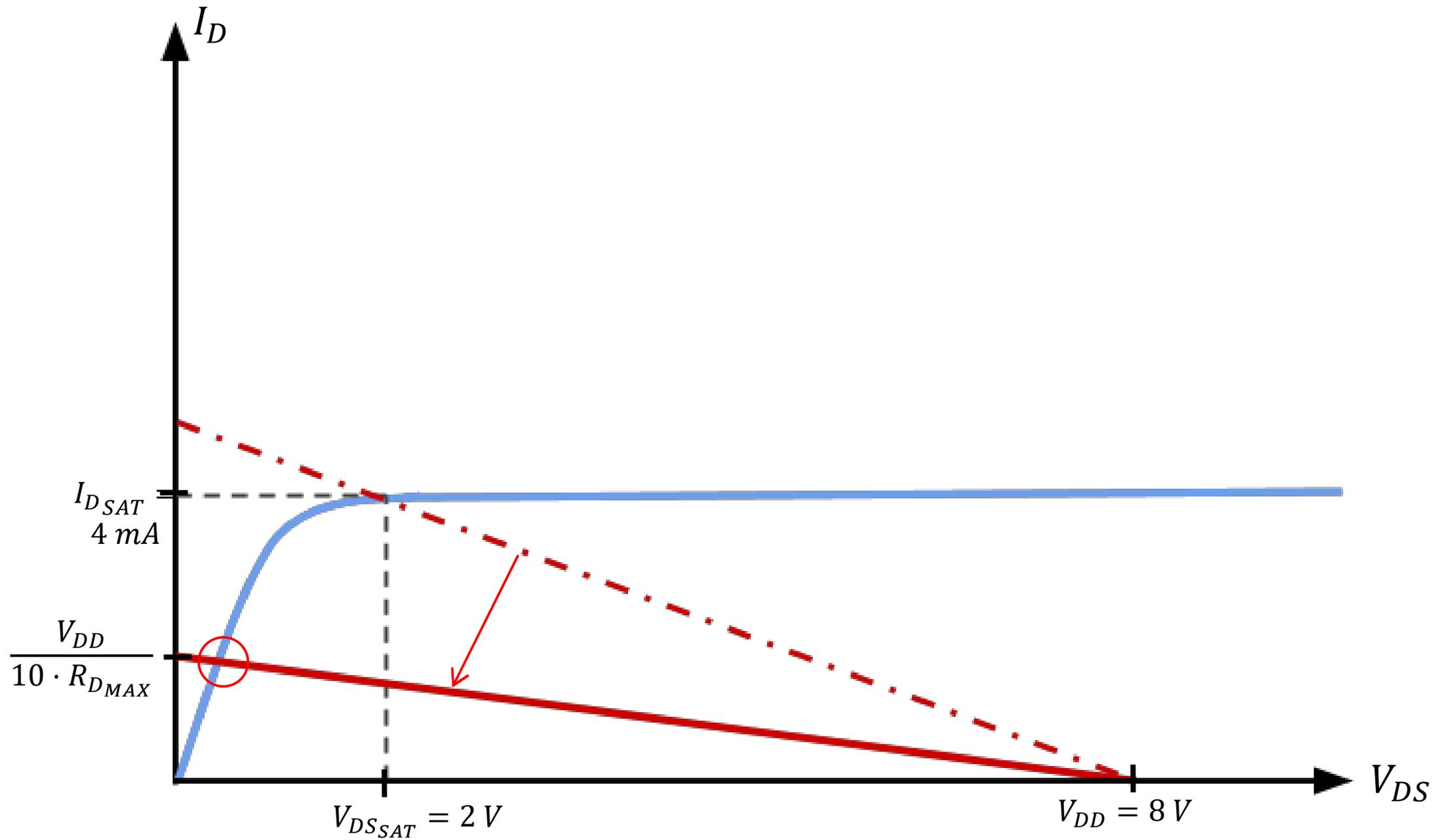
→ Conozco dos puntos de la recta, puedo obtener la pendiente:

$$\rightarrow -\frac{1}{R_{D_{MAX}}} = \frac{0 - I_{DQ}}{V_{DD} - V_{DS_{SAT}}} = -\frac{4 \text{ mA}}{6 \text{ V}}$$

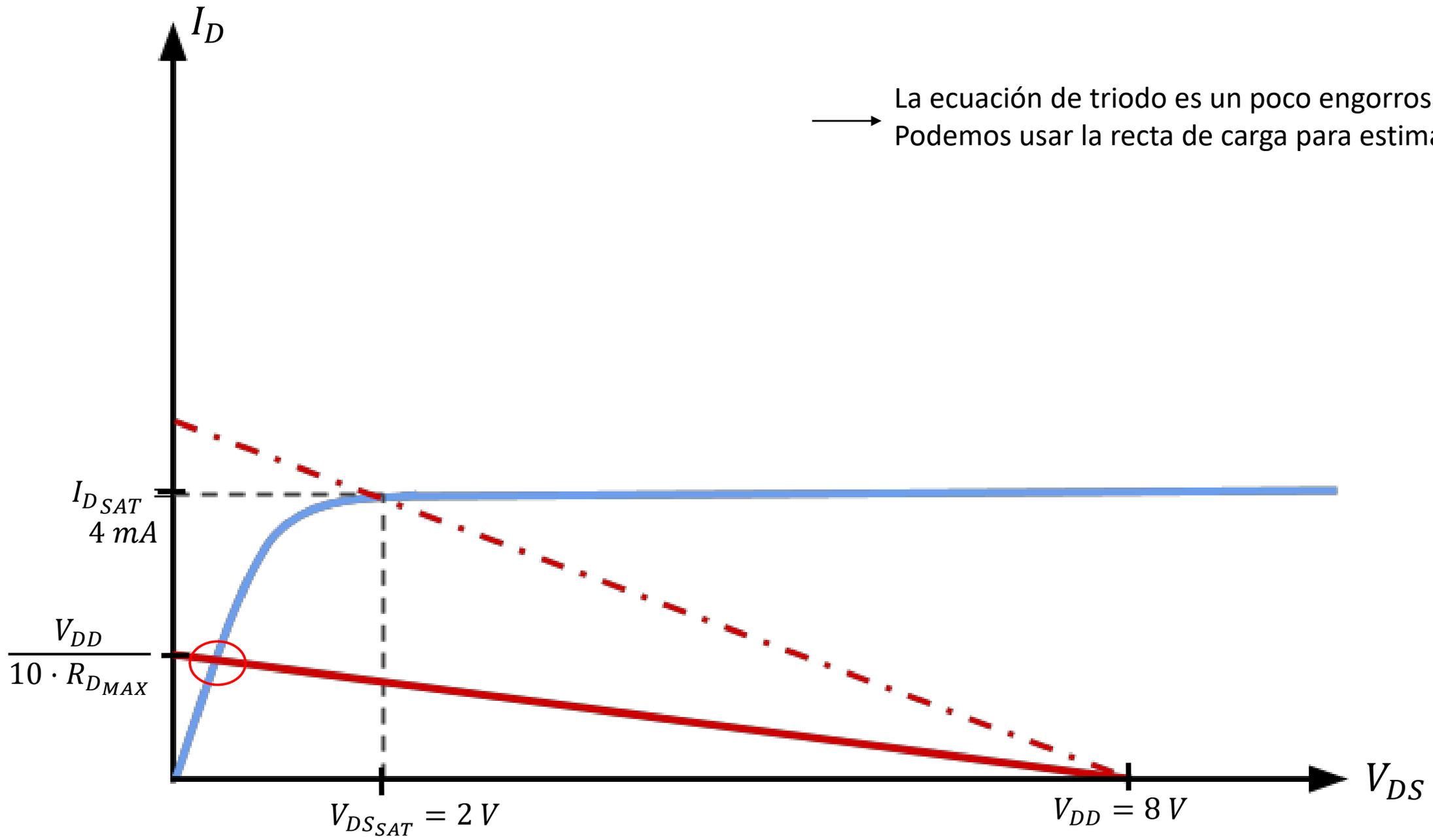
→ $R_{D_{MAX}} = 1.5 \text{ k}\Omega$

→ Para SAT: $0 < R_D < 1.5 \text{ k}\Omega$

c) ¿Qué sucede cuando $R_D = 10 \cdot R_{D_{MAX}}$? Estimar I_D .

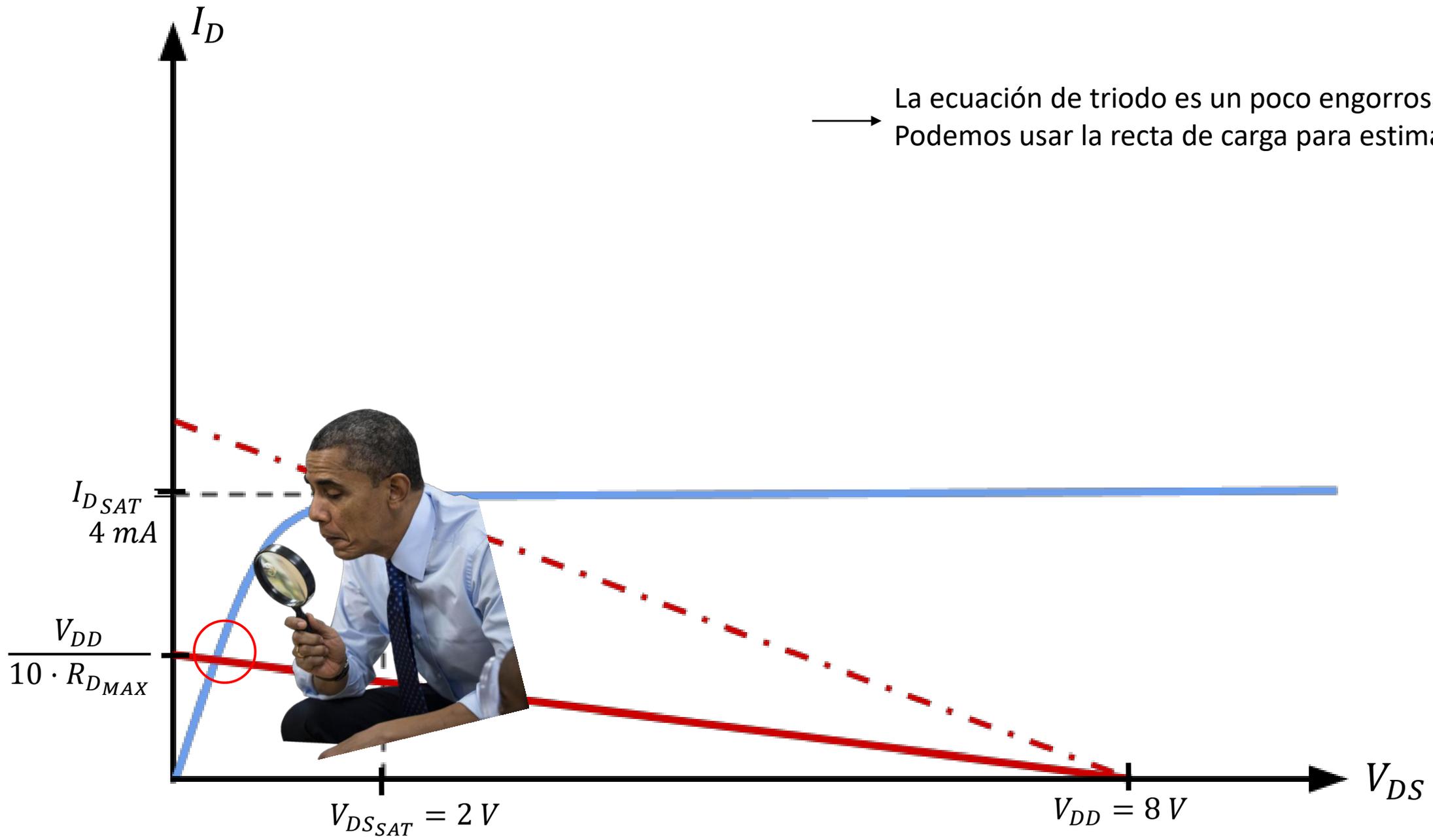


c) ¿Qué sucede cuando $R_D = 10 \cdot R_{D_{MAX}}$? Estimar I_D .



→ La ecuación de triodo es un poco engorrosa de usar.
Podemos usar la recta de carga para estimar I_D .

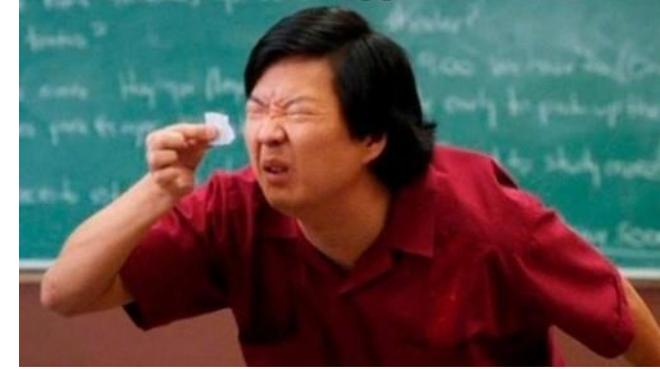
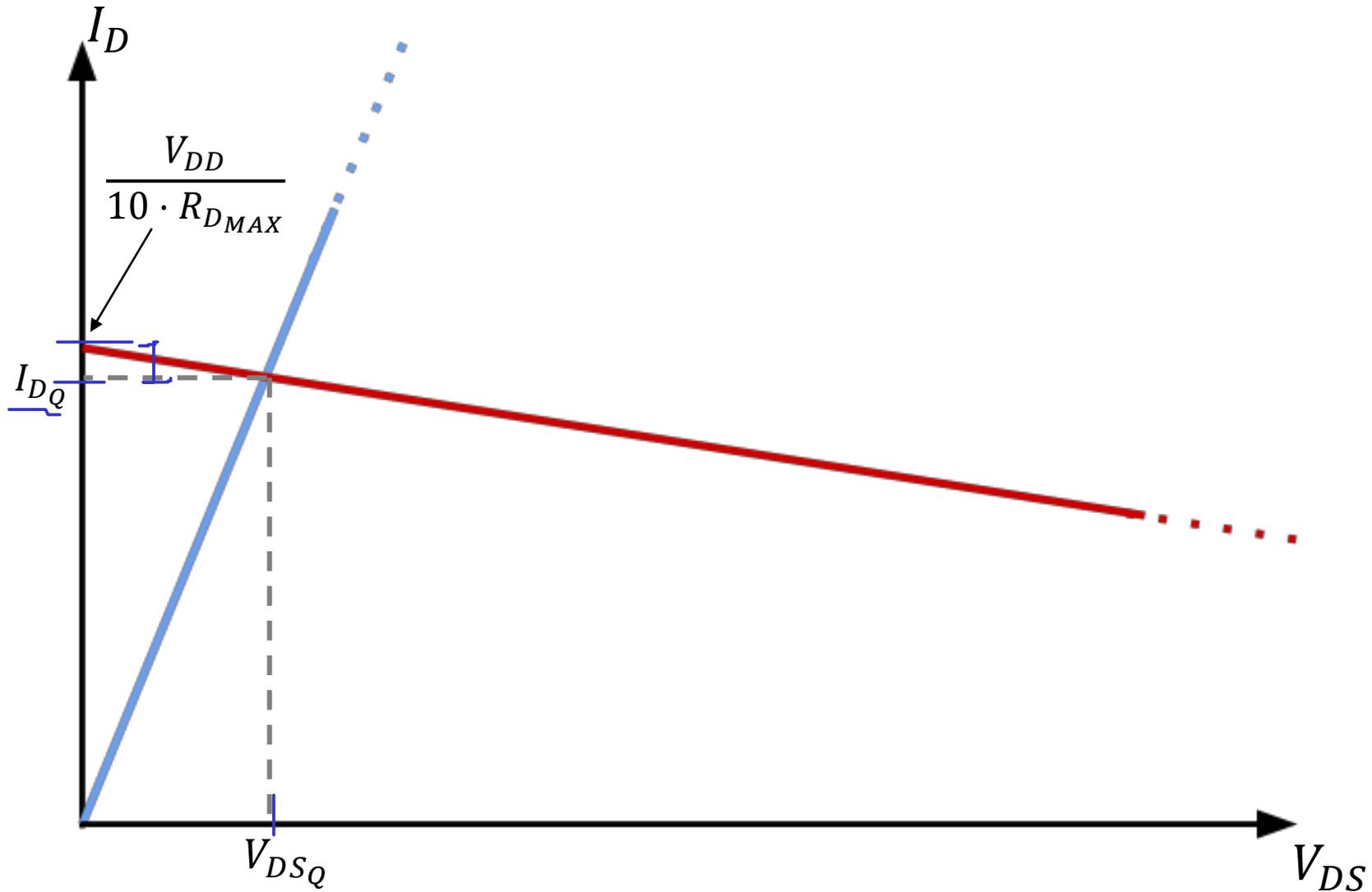
c) ¿Qué sucede cuando $R_D = 10 \cdot R_{D_{MAX}}$? Estimar I_D .



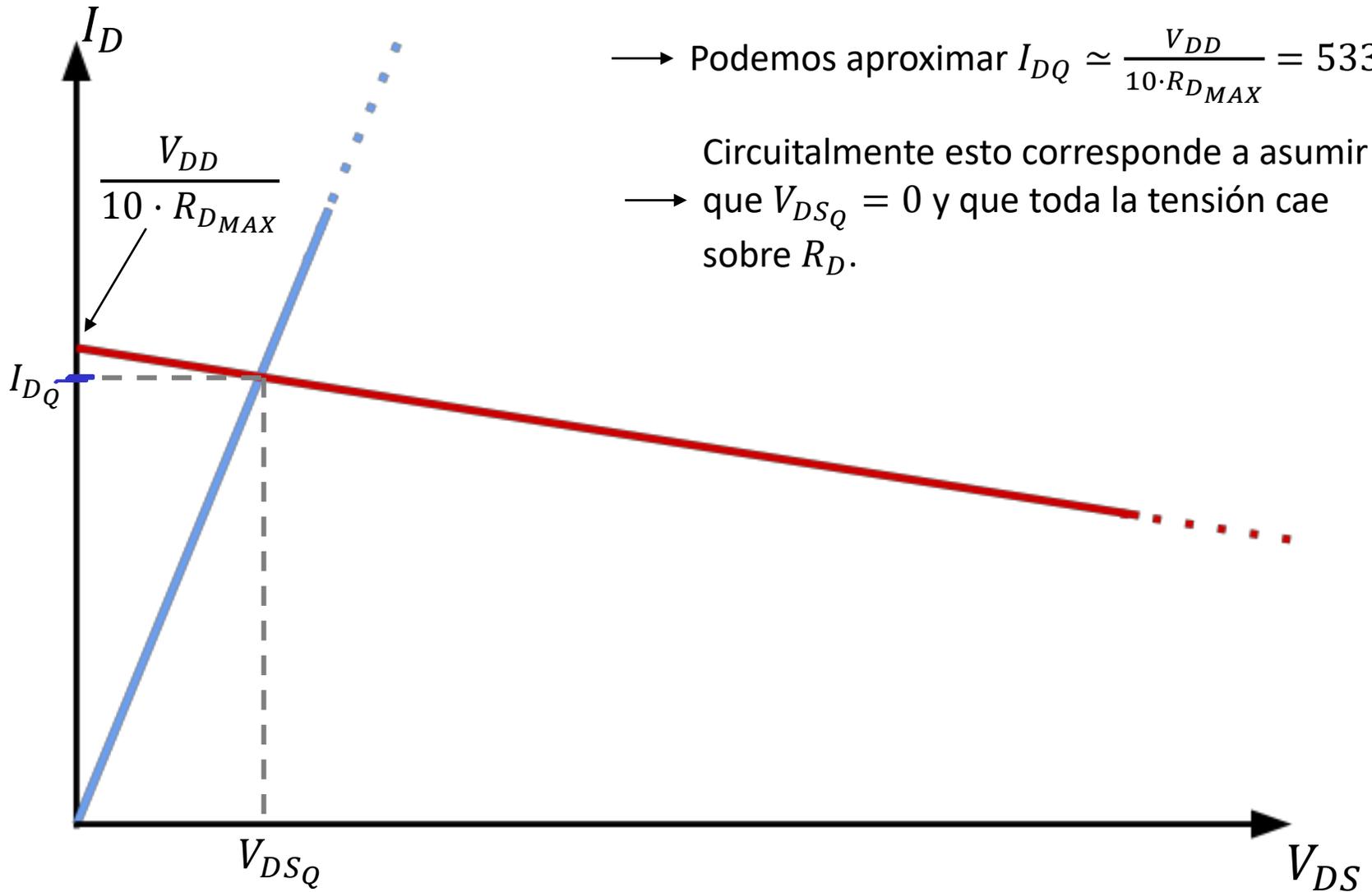
→ La ecuación de triodo es un poco engorrosa de usar.
Podemos usar la recta de carga para estimar I_D .

→ Haciendo zoom cerca del punto Q en el grafico....

→ Haciendo zoom cerca del punto Q en el grafico....



→ Haciendo zoom cerca del punto Q en el grafico....



→ Podemos aproximar $I_{DQ} \approx \frac{V_{DD}}{10 \cdot R_{D_{MAX}}} = 533 \mu A$

Circuitalmente esto corresponde a asumir
→ que $V_{DSQ} = 0$ y que toda la tensión cae sobre R_D .

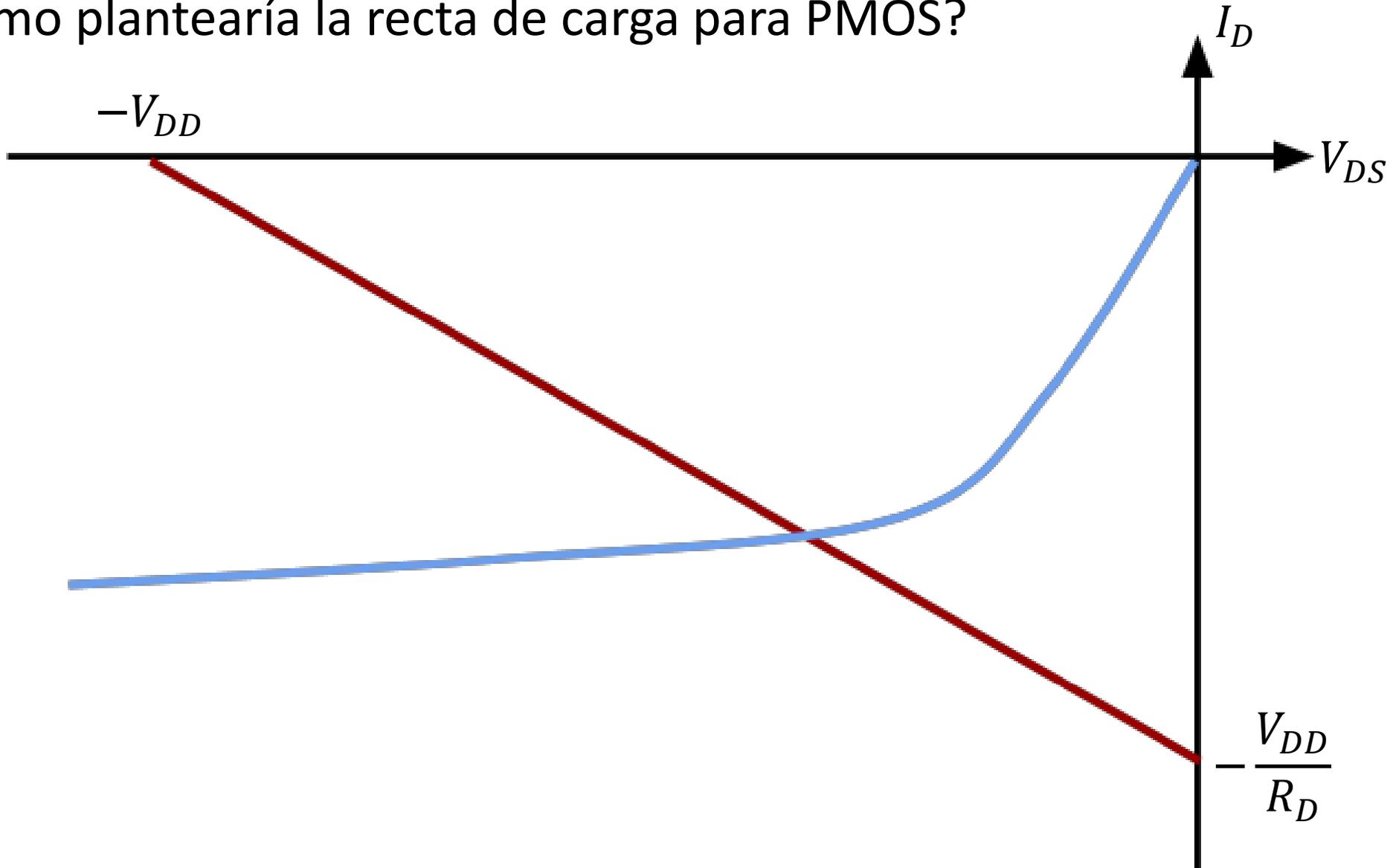
→ $I_{DQ} \approx 533 \mu A$

Resumen

- Obtuvimos la ecuación de la recta de carga. ←
- Analizamos como cambia cuando varían los valores de los elementos del circuito (R_L , V_{DD} , etc.). ←
- La usamos para encontrar el rango de resistencias posibles que mantienen a un NMOS en un régimen deseado. ←
- La usamos para estimar la corriente en tríodo. ←

Bonus round:

- ¿Cómo plantearía la recta de carga para PMOS?



Bonus round ++:

- ¿Cómo la plantearían la recta de carga para un diodo? ←
- ¿Qué otras formas se les ocurren de estimar la corriente en triodo usando la recta de carga? ←
- Ejercicio 24 Guía 5: Recta de carga pero con una fuente de corriente-.

