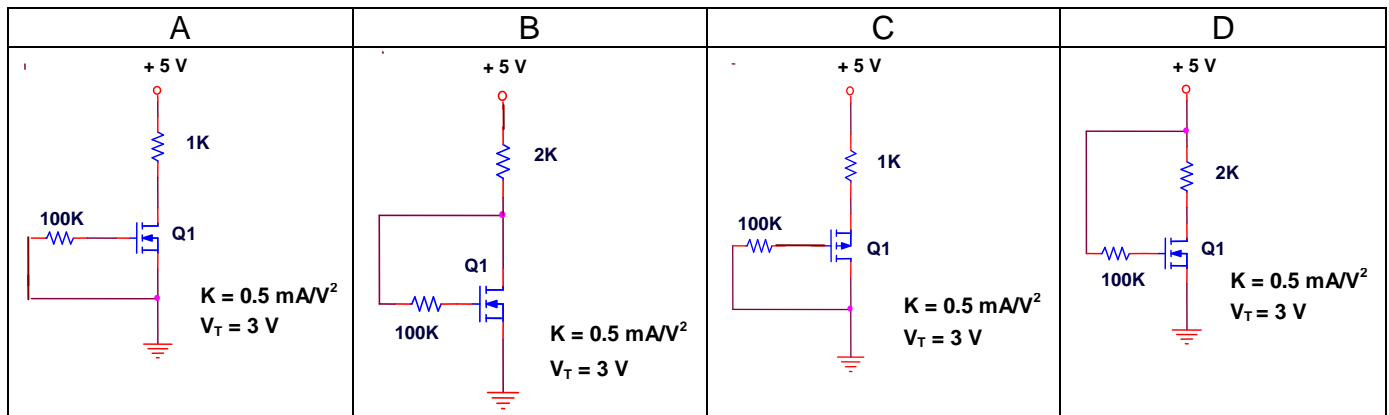


2.1 Indicar la región de funcionamiento de los transistores MOSFET de los siguientes circuitos:



A) $V_{GS} = 0\text{V} \rightarrow V_{GS} < V_T \rightarrow$ corte

B) Como $V_G = V_D \rightarrow V_{GS} = V_{DS} \rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T \rightarrow$ saturación siempre

C) $V_G = V_D \rightarrow V_{GS} = V_{DS} \rightarrow$ se cumple siempre que $V_{DS} < V_{GS} + V_T$, con $V_{DS} < 0$, $V_{GS} < 0$ (es un PMOS). Por tanto la zona es saturación

D) $V_{GS} = 5\text{V}$. Suponemos saturación: $I_{DS} = 0.5(5-3)^2 = 2\text{mA} \rightarrow V_{DS} = 5 - (2 \times 2) = 1\text{V}$. Comprobamos saturación: $V_{DS} > V_{GS} - V_T$: $1\text{V} > 5 - 3 \rightarrow$ no lo cumple \rightarrow zona óhmica o lineal

3.5 Dado el circuito de la figura:

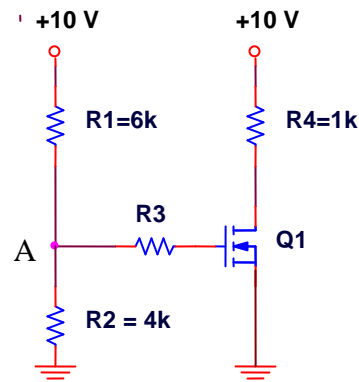
Transistor:

Sat: $I_{DS} = K (V_{GS} - V_T)^2$

Óhmica: $I_{DS} = 2K (V_{GS} - V_T)V_{DS}$

$V_T = 2 \text{ V}$

$K = 1 \text{ mA/V}^2$



- [A] Calcula la tensión en el punto A
[B] Calcule el punto de trabajo Q (V_{GS} , I_{DS} , V_{DS})

- [C] Recalcule el valor de la resistencia R4 para situar el punto de trabajo del circuito del apartado A en el límite entre saturación y zona óhmica

A) Como $I_G = 0$, divisor resistivo: $V_A = 10\text{V} \times 4\text{k} / (6\text{k} + 4\text{k}) = 4\text{V}$

B) $V_G = V_D$, pues no hay corriente en R3. $V_G = 10 (4 / (6 + 4)) = 4\text{V}$. $V_S = 0\text{V}$. $V_{GS} = 4\text{V}$. Suponemos saturación: $I_D = (4 - 2)^2 = 4\text{mA}$. En la malla DS: $V_D = 10 - I_D = 6\text{V}$
Comprobemos la saturación: $V_{DS} > V_{GS} - V_T = 6 > 4 - 2 \rightarrow$ correcto

C) Límite con zona óhmica: $V_{DS} = V_{GS} - V_T$: $V_{DS} = 4 - 2 = 2\text{V}$.

En la malla de salida: $10 = I_D R4 + V_{DS}$

$R4 = (10 - 2) / 4 = 2\text{K}$. Se ha empleado la I_D de saturación porque estamos en el límite de las 2 zonas.

5.6 Sabiendo que la tensión de entrada (V_{IN}) es de 10 V para ambos transistores, indique cuál de las siguientes afirmaciones es **CIERTA** con respecto a la tensión de salida (V_{OUT}).

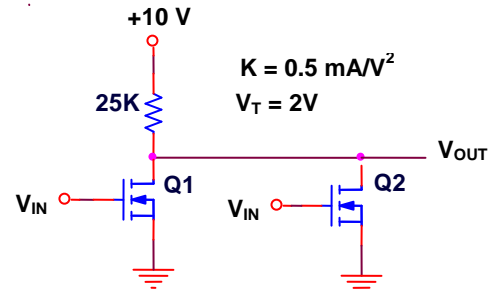
Nota: En zona óhmica utilice la expresión $I_{DS} = 2K(V_{GS} - V_T) V_{DS}$, y en zona de saturación $I_{DS} = K(V_{GS} - V_T)^2$.

[A] Ambos transistores están cortados, por lo que $V_{OUT} \approx 0.025V$ (por corrientes de fuga).

[B] Ambos transistores conducen, por lo que $V_{OUT} \approx 0.025 V$.

[C] En este circuito, los transistores forman una AND cableada por lo que $V_{OUT} \approx 10 V$ (un "1" lógico).

[D] No es aconsejable realizar la conexión indicada, el valor de la salida queda indeterminado.



SOLUCIÓN:

$R_{ON1} = R_{ON2} = 1 / (2 * 0.5 (10-2)) = 0.125K$. La tensión de salida corresponderá a un divisor resistivo con 25K en la rama superior y $(0.125K / 0.125K)$ en la rama inferior:

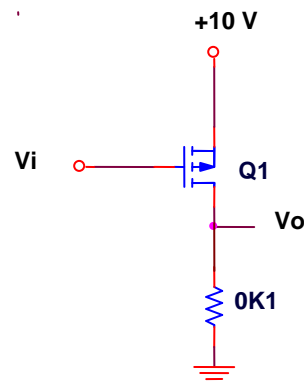
$$V_{OUT} = 10V * (0.0625K / (0.0625 + 25)) = 0.025V$$

5.7 Dado el interruptor de la figura, con una señal de control V_i que es una onda cuadrada variando entre 0 y V_{DD} , se pregunta lo siguiente:

[A] Considerando el transistor como una resistencia variable controlada por voltaje, calcular su resistencia cuando está cerrado para que el valor de la tensión en sus extremos sea 0.01 V.

[B] Si la V_T del transistor es de 2 V, encontrar el valor de K del transistor. Para ello considerar que en la zona óhmica (o también denominada zona lineal) el valor de la corriente I_{DS} puede aproximarse por la siguiente expresión:

$$I_{SD} \approx K [2 (V_{GS} + V_T) V_{DS}].$$



SOLUCIÓN:

Cuando $V_i = 10V \rightarrow V_{GS} = 0V \rightarrow$ PMOS cortado $\rightarrow V_o = 0V$

A) Cuando $V_i = 0V \rightarrow V_{GS} = -10V < -V_T \rightarrow$ PMOS = $R_{(on)}$

Considerando el divisor resistivo formado por $R_{(on)}$ y R_L , $V_o = 10V (R_L / R_L + R_{(on)}) = 9.99V$

De ahí despejamos $R_{(on)} = 0.0001k$

$$B) R_{(on)} \approx |1 / (2K(V_{GS} + V_T))| = |1 / (2K(-10 + 2))| = 0.91 \rightarrow K = |1 / (2 * R_{(on)}(-10 + 2))| = 1 / (2 * 0.0001 * 8) = 625mA/V^2$$

Ojo con las tensiones del PMOS, son negativas y hay que tomar el valor absoluto en la expresión de $R_{(on)}$.

5.8 Diseñar un inversor NMOS con resistencia de pull-up R_D que cumpla los siguientes requisitos:

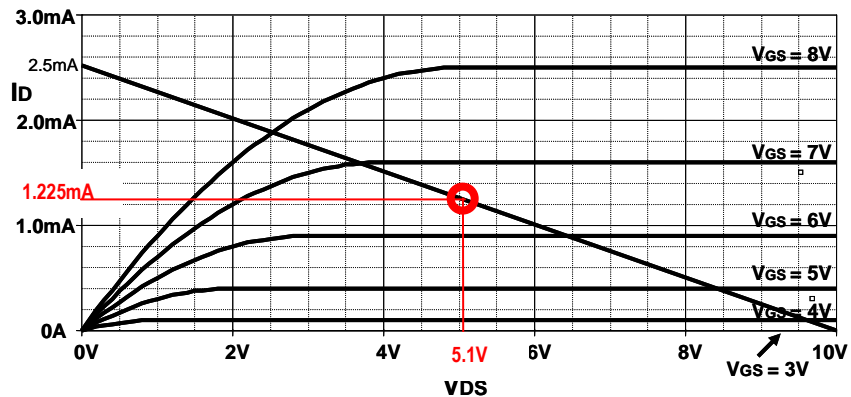
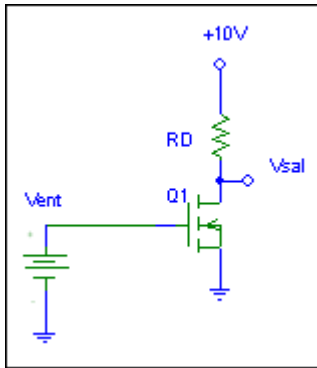
- Potencia estática consumida en estado de salida bajo = 0.10 mW
- $V_{OL} = 0.5 \text{ V}$
- $V_{OH} = V_{DD} = 5 \text{ V}$
- Transistor: $V_T = 1 \text{ V}$

Calcular R_D y la K del transistor.

En el nivel bajo de salida, tenemos el divisor resistivo formado por R_D y $R_{(on)}$.
 $P = I_{DS} \cdot V_{DD} = I_{DS} \times 5 \rightarrow I_{DS} = 0.1 \text{ mW} / 5 \text{ V} = 0.02 \text{ mA}$ es el consumo a nivel bajo
 $I_{DS} = V_{DD} / (R_{(on)} + R_D) \rightarrow R_{(on)} + R_D = 5 \text{ V} / 0.02 \text{ mA} = 250 \text{ K}$
 $V_{OL} = V_{DD} (R_{(on)} / R_D + R_{(on)}) \rightarrow R_{(on)} = V_{OL} (R_D + R_{(on)}) / V_{DD}$
 $R_{(on)} = 0.5 \cdot 250 \text{ K} / 5 = 25 \text{ K} \rightarrow R_D = 250 - 25 = 225 \text{ K}$
 $K \text{ del transistor} = (2 \cdot R_{(on)})(V_i - V_T) - 1 = (2 \cdot 25 \cdot (5 - 1)) - 1 = 5 \mu\text{A/V}^2$

PROBLEMA:

6.4 A la vista del circuito con transistor de la figura y la gráfica adjunta con la recta de carga, se pide:



Ecuación en zona saturación: $I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$

Ecuación en zona óhmica: $I_D = K [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$

Ecuación en zona ohmica simplificada: $I_D = 2K (V_{GS} - V_T) V_{DS}$

1.- (1p.) Obtenga e indique el valor de los parámetros V_T y K del MOSFET, a la vista de los datos suministrados en el enunciado y la gráfica adjunta.

A la vista de la gráfica, es evidente que $V_T = 3\text{V}$ (la tensión límite que corresponde al corte del Mosfet)

Tras ello, tomando cualquier curva, por ejemplo la que corresponde a $V_{GS} = 7\text{V}$, se tendrá:

$I_{DS} = 1.6 \text{ mA} = K(7\text{V} - 3\text{V})^2$, de donde despejamos :

$K = 1.6 \text{ mA} / (4\text{V})^2 = 0.1 \text{ mA/V}^2$

2.- (1.5p.) ¿Cuál es el valor de la resistencia R_D del circuito? Justifique la respuesta. (Sugerencia: utilice la recta de carga)

Como se puede observar en la gráfica, el valor de la corriente de cortocircuito del MOSFET (La que corresponde con $V_{DS} = 0\text{V}$ es de 2.5mA, por lo que de la ecuación de la recta de carga se puede calcular R_D :

$10\text{V} = R_D I_D + V_{DS}$ de donde: $R_D = 10\text{V} / 2.5\text{mA} = 4\text{k}\Omega$.

3.- (3p.) Obténgase analíticamente el valor de la corriente de drenador I_D para una $V_{in} = 6.5\text{V}$ e indique sobre la gráfica el punto de trabajo. ¿En qué zona de trabajo se encuentra el transistor? Justifique la respuesta e indique los valores del punto de trabajo (I_{DQ} , V_{DSQ} y V_{GSQ})

Para $V_{GS} = 6.5\text{V}$, se observa en la gráfica que el punto de trabajo se situará aproximadamente en la zona de saturación, por lo que podremos emplear la siguiente ecuación para obtener I_D :

$I_D = K (V_{GS} - V_T)^2 = 0.1 (6.5 - 3)^2 = 1.225 \text{ mA}$

TCO – Tema 2 – El Transistor FET

Por lo que solo nos queda emplear la recta de carga para calcular V_{DS} :
 $10V = R_D I_D + V_{DS} = 4k \times 1.225mA + V_{DS}$, de donde despejando, se obtiene:

$$V_{DS} = 10 - 4 \times 1.225 = 10 - 4.9 = \mathbf{5.1V}$$

Dado que $V_{DS} > V_{GS} - V_T$: $5.1V > 6.5 - 3 = 3.5V$ se confirma que trabaja en **saturación**.

4.- **(3p.)** Indique los valores **límite** de la tensión de entrada V_{ent} que hacen que el transistor de la figura trabaje en conmutación ($V_{ent(corte)}$ y $V_{ent(ohmica)}$). Justifique la respuesta.

$V_{ent(corte)}$ es igual a V_T , evidentemente: $V_{ent(corte)} = \mathbf{3V}$

Para calcular $V_{ent(ohmica)}$ vamos a suponer que estamos en saturación y llegamos al límite de la zona ohmica:

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 1: saturación:} \quad I_D &= K (V_{GS} - V_T)^2 = 0.1(V_{ent(ohm)} - 3)^2 \\ \text{Ecuación 2 : recta de carga:} \quad 10V &= 4k \times I_D + V_{DS} \\ \text{Ecuación 3: condición límite sat-ohm:} \quad V_{DS} &= V_{ent(ohm)} - 3 \end{aligned}$$

Sustituyendo 3 en 1: $I_D = K (V_{GS} - V_T)^2 = 0.1(V_{DS})^2$ y sustituyendo ahora en 2: tendremos una ecuación de segundo grado:

$$0.4 V_{DS}^2 + V_{DS} - 10 = 0 \quad \text{con 2 soluciones. La única solución válida es } V_{DS} = 3.903V, \text{ que nos lleva a:}$$

$$V_{ent(ohm)} = 3.903 + 3 = \mathbf{6.9 V}$$

5.- **(1.5p.)** Para una tensión de entrada V_{ent} de 10V y suponiendo funcionamiento en zona óhmica **simplificada**, ¿Cuál sería el valor de la resistencia equivalente del MOSFET $R_{(ON)}$? Justifique la respuesta.

$$\begin{aligned} \text{En zona óhmica simplificada se tiene: } I_D &= 2K (V_{GS} - V_T) V_{DS} \\ R_{(ON)} &= 1 / (2 \times K \times (V_{GS} - V_T)) = 1 / (2 \times 0.1 \times (10 - 3)) = 1/1.4 = 0.714 \text{ kOhm} = \mathbf{714 \text{ Ohm}} \end{aligned}$$

RESUMEN DE RESPUESTAS:

1	V_T	3 (V)
	K	0.1 (mA/V²)
2	R_D	4 (kOhm)
3	ZONA:	SATURACION .
	I_{DQ}	1.225 (mA)
	V_{DSQ}	5.1 (V)
	V_{GSQ}	6.5 (V)
4	$V_{ent(CORTE)}$	3 (V)
	$V_{ent(OHMICA)}$	6.9 (V)
5	$R_{(ON)}$	714 (Ohm)