



UNIVERSIDAD DE GRANADA  
GRADO EN INGENIERÍA  
DE TELECOMUNICACIONES  
Electrónica analógica

Práctica 1.  
Polarización de transistores.

Pedro Javier Belmonte Miñano  
Antonio Cantudo Gómez  
Grupo A2

Curso 2019-2020  
03/04/2020

# Índice

	Página
<b>1. Análisis teórico</b>	<b>1</b>
1.1. Fundamento teórico . . . . .	1
1.2. Cálculo teórico de la polarización. . . . .	2
<b>2. Simulación</b>	<b>3</b>
<b>3. Conclusión</b>	<b>4</b>

## Índice de figuras

1. Circuito de polarización . . . . .	1
2. Zonas de polarización de un MOSFET . . . . .	2
3. Captura del esquemático simulado en LtSpice . . . . .	4

## Objetivo

Durante esta práctica simularemos y analizaremos de forma teórica la polarización DC de transistores MOSFET en el circuito de la figura 1.

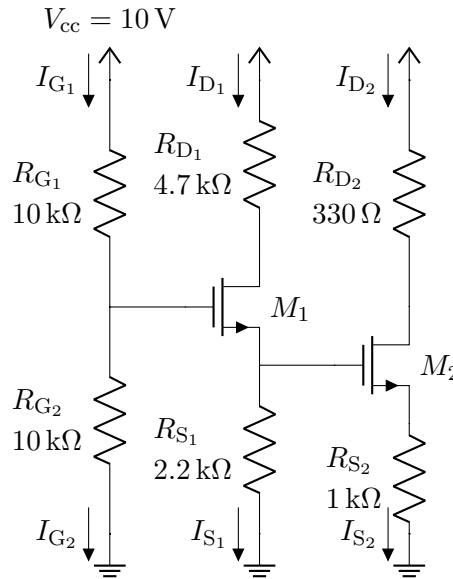


Figura 1: Circuito de polarización

## 1. Análisis teórico

### 1.1. Fundamento teórico

Esta práctica esta basada en los modelos teóricos que describen el comportamiento de un MOSFET de canal n. Estos modelos relacionan la corriente entre drenador y fuente del transistor,  $I_{DS}$ , con la tensión puerta fuente,  $V_{GS}$  y la tensión drenador fuente,  $V_{DS}$ .

De forma general, atendiendo a la curva  $V_{DS} - I_{DS}$ , un MOSFET se puede encontrar, en uno de tres estados de polarización posibles, estado de corte, de triodo o lineal, y de saturación. Cada uno de estos estados corresponde con una de las zonas de polarización de la curva, representada en la figura 2.

El transistor se encuentra en corte siempre que el voltaje puerta fuente,  $V_{GS}$ , sea menor que un determinado valor llamado tensión umbral,  $V_T$ . Se denomina zona de corte pues la corriente que atraviesa el MOSFET, bajo esta condición, es prácticamente nula.

La zona intermedia, a partir de la cual el MOSFET empieza a conducir, se denomina zona lineal. Decimos que un MOSFET está en estado de polarización lineal cuando se cumple  $V_{DS} < V_{GS} - V_T$  y además la tensión puerta fuente es mayor que la tensión umbral. En este tramo la curva  $V_{DS} - I_{DS}$  se comporta de forma análoga a la curva  $\Delta V - I$  de un diodo si consideramos para el mismo el modelo lineal a tramos, por lo que se la conoce como zona lineal o de triodo.

La ultima zona de todas, la zona de saturación aparece cuando  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ . En esta zona, de acuerdo con el modelo que vamos a usar, podemos aproximar el comportamiento del la curva como una recta de pendiente  $\frac{k_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \lambda$  y de ordenada en el origen  $\frac{k_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2$ . El punto donde esta recta corta al eje x se denomina tensión Early o  $V_A$ . El hecho de que la recta tenga pendiente no nula es provocado por el efecto Early, un fenómeno que consiste en la reducción del grosor o longitud del canal de conducción formado en el MOSFET conforme aumenta la tensión drenador fuente,  $V_{DS}$ . El aumento de la intensidad se debe a que la resistencia

del canal es directamente proporcional a la longitud del mismo, al disminuir su longitud, disminuye por tanto su resistencia y la intensidad a través del MOSFET aumenta de acuerdo con la ley de Ohm.

$$\begin{cases} I_{DS} = 0, & \text{si } V_{GS} < V_T. \\ I_{DS} = \frac{k_n}{2} (2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2), & \text{si } V_{GS} \geq V_T \text{ y } V_{DS} \leq V_{GS} - V_T. \\ I_{DS} = \frac{k_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}), & \text{si } V_{GS} \geq V_T \text{ y } V_{GS} - V_T < V_{DS}. \end{cases} \quad (1)$$

Esta es la curva representada para los modelos estudiados en clase, sin embargo, para los transistores reales, estas ecuaciones, debido a las aproximaciones e idealizaciones supuestas para su cálculo, no se cumplen con exactitud. En particular, para la curva  $V_{DS} - I_{DS}$  los MOSFET reales alcanzan, para un cierto valor de  $V_{DS}$  un máximo valor de  $I_{DS}$  a partir del cual, aumentos de la tensión drenador fuente producen decrementos en la corriente  $I_{DS}$ .

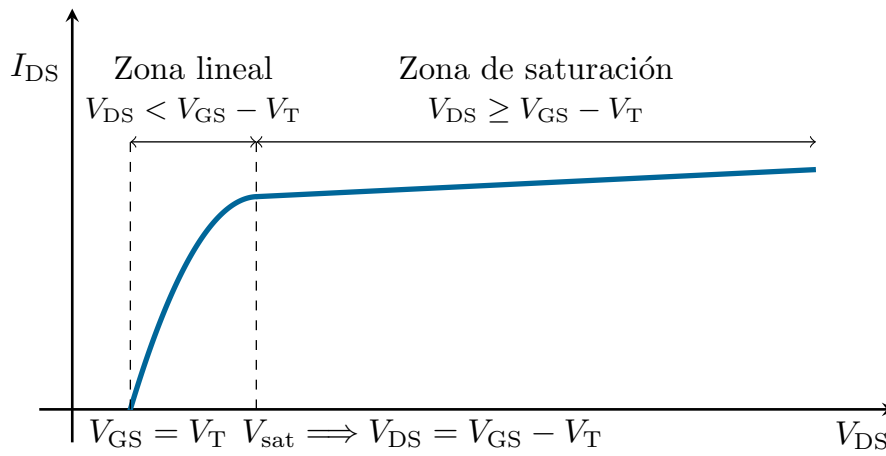


Figura 2: Zonas de polarización de un MOSFET

## 1.2. Cálculo teórico de la polarización.

Considerando nula la corriente de puerta en los MOSFETs, y usando las ecuaciones 1, procedemos a estudiar de forma teórica el circuito de la figura 1, primero obtendremos los valores de tensión y corriente de los terminales del transistor M1, para ello supondremos que trabaja en estado de saturación.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 \\ \frac{V_1 - V_{G1}}{R_1} &= \frac{V_{G1}}{R_2} \xrightarrow{R_1=R_2} V_{G1} = \frac{V_1}{2} = 5 \text{ V} \\ I_3 &= I_2 \\ \frac{V_1 - V_{D1}}{R_3} &= \frac{K_n}{2} (V_{GS1} - V_T)^2 \implies V_{D1} = V_1 - \frac{K_n}{2} R_3 (V_{G1} - V_{S1} - V_T)^2 \\ I_4 &= I_{D1} \\ \frac{V_{S1}}{R_4} &= \frac{K_n}{2} (V_{GS1} - V_T)^2 \implies 12.1 V_{S1}^2 - 77.23 V_{S1} + 120.03 = 0 \end{aligned}$$

Obtenemos dos valores de  $V_{S1}$  y de  $V_{D1}$ , que cumplen las condiciones de las zonas de satura-

ción, es decir,  $V_{GS} \geq V_T$  y  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ .

$$V_{S1} = \begin{cases} 3.71 \text{ V} \\ 2.68 \text{ V} \checkmark \end{cases} \implies V_{D1} = \begin{cases} 2.01 \text{ V} \\ 4.22 \text{ V} \checkmark \end{cases}$$

$$I_{D1} = 1.23 \text{ mA}$$

$$\begin{cases} V_{GS} = 2.32 \text{ V} \geq 1.85 \text{ V} = V_T \\ V_{DS} = 1.54 \text{ V} \geq 2.32 \text{ V} - 1.85 \text{ V} = V_{GS} - V_T \end{cases}$$

De forma análoga realizaremos los cálculos para el transistor M2. Obteniendo dos valores de tensión,  $V_{S2}$  y  $V_{D2}$  que cumplen las condiciones de saturación.

$$I_S = I_{D2}$$

$$\frac{V_1 - V_{D2}}{R_5} = \frac{K_n}{2}(V_{GS2} - V_T)^2 \implies V_{D2} = V_1 - \frac{K_n}{2}R_3(V_{G2} - V_{S2} - V_T)^2$$

$$I_6 = I_{D2}$$

$$\frac{V_{S2}}{R_6} = \frac{K_n}{2}(V_{GS2} - V_T)^2 \implies 5.5V_{S2}^2 - 10.17V_{S2} + 3.83 = 0$$

$$V_{S2} = \begin{cases} 1.32 \text{ V} \\ 0.53 \text{ V} \checkmark \end{cases} \implies V_{D2} = \begin{cases} 9.56 \text{ V} \\ 9.83 \text{ V} \checkmark \end{cases}$$

$$I_{D2} = 0.53 \text{ mA}$$

$$\begin{cases} V_{GS} = 2.15 \text{ V} \geq 1.85 \text{ V} = V_T \\ V_{DS} = 9.30 \text{ V} \geq 2.15 \text{ V} - 1.85 \text{ V} = V_{GS} - V_T \end{cases}$$

Como vemos los dos transistores trabajan en modo de saturación. A continuación se muestran los resultados finales:

Cuadro 1: Resultados obtenidos en el análisis teórico

	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
$V_G(\text{V})$	5.00	2.68
$V_D(\text{V})$	4.22	9.83
$V_S(\text{V})$	2.68	0.53
$I_{DS}(\text{mA})$	1.22	0.53

## 2. Simulación

Hemos simulado el comportamiento del circuito mediante el software LtSpice. En la figura 3 podemos observar una captura del esquemático simulado. Hemos considerado, puesto que no conocemos ni hemos podido obtener experimentalmente el valor de la tensión Early, despreciable el efecto Early, estableciendo a cero el parámetro  $\lambda$ , del transistor NMOS en Spice. Además de  $\lambda$  hemos configurado la tensión umbral,  $V_T$  y el parámetro de transconductancia,  $k_n$ . Puesto que únicamente queremos estudiar el comportamiento del circuito en DC y para un único valor de la fuente de voltaje, hemos simulado el circuito en modo *Operating point*, a fin de obtener las corrientes y tensiones en cada nudo y malla del mismo.

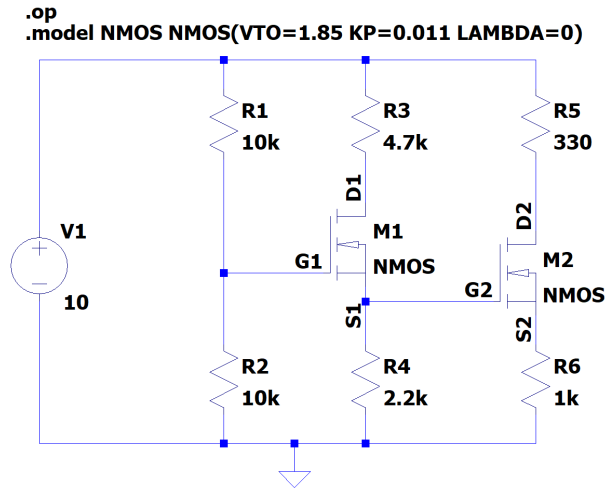


Figura 3: Captura del esquemático simulado en LtSpice

Los resultados obtenidos de la simulación se recogen en la siguiente tabla.

Cuadro 2: Resultados de la simulación en LtSpice

	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
V <sub>G</sub> (V)	5	2.67
V <sub>D</sub> (V)	4.28	9.83
V <sub>S</sub> (V)	2.68	0.5215
I <sub>DS</sub> (mA)	1.21	0.52

Como podemos comprobar los resultados de la simulación se corresponden de forma casi exacta con los obtenidos en el análisis teórico, cuadro 1, por lo que podemos concluir que los cálculos realizados son correctos y ambos transistores se encuentran polarizados en saturación.

### 3. Conclusión

Hemos comprobado que los dos transistores se encontraban en régimen de saturación y que el modelado simplificado del transistor MOSFET estudiado en clase se aproxima bastante bien a los modelos complejos implementados en el software LtSpice para este tipo de circuitos.