

Práctica 4. Transistor MOSFET: medida de la característica estática.

Mercedes Pérez, Laura Rubiño y Antonio Cantudo

9 de noviembre de 2019

Índice

	Página
1. Introducción.	1
2. Fundamento teórico	1
2.1. Nuestro experimento	2
2.1.1. Medida de la curva $I_{DS}-V_{GS}$	2
2.1.2. Medida de la curva $I_{DS}-V_{DS}$	3
3. El experimento	3
3.1. Medida de la curva $I_{DS}-V_{GS}$	3
3.1.1. Procedimiento	3
3.1.2. Resultados obtenidos	4
3.2. Medida de la curva $I_{DS}-V_{DS}$	5
3.2.1. Procedimiento	5
3.2.2. Resultados obtenidos	6
4. Conclusión	8

Índice de cuadros

1.	Datos experimentales para la medida de la curva $I_{DS}-V_{GS}$	4
2.	Datos experimentales para la medida de la curva $I_{DS}-V_{DS}$	6

Índice de figuras

1.	Zonas de polarización de un MOSFET.	2
2.	Circuito para la medida del parámetro de transconductancia β_n , la tensión umbral y la curva $I_{DS}-V_{GS}$ en saturación.	3
3.	Intensidad en el transistor en función de la tensión puerta-fuente y ajuste cuadrático.	4
4.	Intensidad en el transistor en función de la tensión puerta-fuente y ajuste cuadrático.	5
5.	Circuito para la medida de la curva $I_{DS}-V_{DS}$	6
6.	Intensidad en el transistor en función de la tensión drenador fuente.	7
7.	Intensidad en el transistor en función de la tensión drenador fuente.	7
8.	Tension Early, corte de la recta ajustada con el eje x.	8

Objetivo

El objetivo de esta práctica es el determinar experimentalmente las curvas $I_{DS}-V_{DS}$ e $I_{DS}-V_{GS}$ de un transistor MOSFET en saturación. Además determinaremos ciertos parámetros del MOSFET, entre ellos el parámetro de transconductancia(β_n), la tensión umbral(V_T) y la tensión Early.

1. Introducción.

En esta práctica hallaremos, para un transistor MOSFET el parámetro de transconductancia (β_n), la tensión umbral y la tensión Early. Además construiremos las gráficas que representan las curvas $I_{DS}-V_{DS}$ e $I_{DS}-V_{GS}$.

Por una parte, para medir el parámetro de transconductancia (β_n) y la tensión umbral a través de la curva $I_{DS}-V_{GS}$ hemos construido el circuito de la figura 2.

Por otra parte, hemos construido el circuito de la figura 5, con el que determinaremos la curva $I_{DS}-V_{DS}$, para más tarde calcular la tensión Early mediante un ajuste lineal del MOSFET en saturación.

2. Fundamento teórico

Esta práctica está basada en los modelos teóricos vistos en clase que explican como varía la corriente drenador fuente en un transistor MOSFET de canal n en función de dos variables, la tensión drenador fuente (V_{DS}) y la tensión puerta fuente (V_{GS}).

Un MOSFET, de forma general, puede encontrarse en un determinado instante de tiempo en uno de tres estados posibles, el estado de corte, de triodo o lineal y de saturación. Cada uno de estos estados corresponde a una zona de polarización, en la figura 1 se pueden apreciar cada una de estas zonas.

La zona de corte del MOSFET se da para $0 < V_{DS} < V_T$, se denomina zona de corte porque la intensidad que circula por el transistor mientras $0 < V_{DS} < V_T$ es prácticamente nula. El transistor no comienza a conducir hasta que se encuentra en la zona lineal, que se da para $V_T < V_{DS} < V_{GS} - V_T$, en este tramo de la curva $I_{DS}-V_{DS}$ el transistor se comporta de forma aproximadamente análoga a la de un diodo, si nos referimos al modelo lineal a tramos para el diodo, la tensión a partir de la que se considera que el diodo empieza a conducir, V_γ correspondería a la tensión V_T , aproximando la curva en este tramo por una línea recta, la pendiente de la misma corresponde al inverso del parámetro r_D del diodo. A pesar de que en la última zona el comportamiento del transistor también se puede aproximar por un modelo lineal, la elevada pendiente en este segundo tramo es la razón por la que se conoce a esta zona como la zona de triodo o lineal por la relación de los diodos con el modelo lineal.

La última zona de todas se denomina zona de saturación, aparece para valores de V_{DS} mayores que $V_{GS} - V_T$. En esta zona el comportamiento del MOSFET según los modelos estudiados se puede aproximar como una recta de pendiente $\frac{\beta_n}{2} (V_{GS} - V_T) \lambda$. El punto donde esta recta corta al eje x se denomina tensión Early. El nombre proviene de lo que se conoce como efecto Early, un fenómeno que consiste en la reducción de la longitud del canal que se produce en el transistor al aumentar V_{DS} . La resistencia del canal es directamente proporcional a la longitud del mismo, por ello, al aumentar V_{DS} y disminuir la longitud, aumenta la corriente drenador fuente, ya que la resistencia del canal disminuye.

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

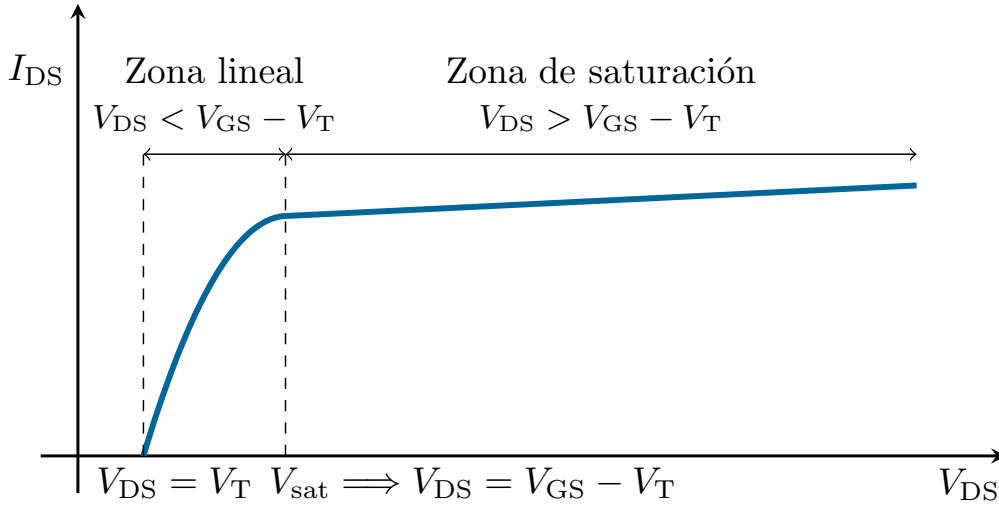


Figura 1: Zonas de polarización de un MOSFET.

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 que supuestas para su cálculo, no se cumplen con exactitud. En particular, para la curva $I_{DS}-V_{DS}$ 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} .

2.1. Nuestro experimento

2.1.1. Medida de la curva $I_{DS}-V_{GS}$

Para la medida de la curva $I_{DS}-V_{GS}$, el parámetro de transconductancia y la tensión umbral, hemos montado el circuito de la figura 2. Este circuito está diseñado para que opere continuamente en la zona de saturación, puesto que $V_{GS} = V_{DS}$ lo que supone que $V_{GS} - V_T < V_{DS}$ suponiendo $V_{GS}, V_T, V_{DS} > 0$.

Para poder calcular el parámetro de transconductancia y la tensión umbral de nuestro circuito mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados, hemos considerado el parámetro λ como 0 (para poder determinar λ, β_n y V_T deberíamos usar un software que nos permita ajustar los datos en base a 3 parámetros), de esta forma, la ecuación para la corriente drenador fuente en saturación queda como:

$$I_{DS} = \frac{\beta_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2. \quad (2)$$

Si expresamos en lugar de I_{DS} la raíz cuadrada de I_{DS} , la ecuación se expresa del siguiente modo:

$$\sqrt{I_{DS}} = \sqrt{\frac{\beta_n}{2}} V_{GS} - \sqrt{\frac{\beta_n}{2}} V_T. \quad (3)$$

Mediante el ajuste de las raíces cuadradas en lugar de los valores nominales de I_{DS} transformamos una función cuadrática en una lineal, de modo que realizando un ajuste del tipo $y = ax + b$ para $y = \sqrt{I_{DS}}$ y $x = V_{GS}$, podemos expresar β_n y V_T en función de a y b como:

$$\beta_n = 2a^2. \quad (4)$$

$$V_T = -2\frac{b}{a}. \quad (5)$$

2.1.2. Medida de la curva $I_{DS}-V_{DS}$

En este caso, para la medida de la curva $I_{DS}-V_{DS}$ y la tensión Early, hemos montado el circuito de la figura 5.

Hemos mantenido la fuente V_{GG} constante y hemos variado la tensión de la fuente V_{in} , de modo que el transistor no opera siempre en la zona de saturación, sino que a lo largo del experimento pasa por las tres zonas apreciables en la figura 1.

Para calcular la tensión Early, una vez realizado el barrido de tensiones y recogidos los datos, mediante un ajuste lineal, calculamos la recta que mejor se aproxima a todos los puntos de la curva $I_{DS}-V_{DS}$ para los que el transistor está en saturación. Para determinar cuando se encuentra el MOSFET en saturación, usamos el valor de V_T calculado anteriormente, los valores de I_{DS} y V_{DS} obtenidos para los que $V_{GS} - V_T \leq V_{DS}$ corresponderán a la zona de saturación del MOSFET.

El ajuste nos brinda una recta del tipo $y = ax + b$, para calcular la tensión Early V_A , calculamos la abcisa donde la recta corta al eje x, de modo que:

$$V_A = -\frac{b}{a}. \quad (6)$$

3. El experimento

3.1. Medida de la curva $I_{DS}-V_{GS}$

3.1.1. Procedimiento

En esta primera parte montamos el circuito de la figura 2 en la protoboard. Este circuito, está conformado por un MOSFET de canal n con puerta y drenador cortocircuitados y una resistencia de $10\text{ k}\Omega$.

A este circuito se le aplica una tensión de entrada continua para la que realizaremos un barrido de tensiones de 0V a 15V en pasos de 1V . Para cada una de estas tensiones de entrada, mediremos la tensión drenador fuente V_{GS} (que será igual a la tensión drenador fuente) y la tensión de entrada.

A través de la ley de ohm podemos la intensidad que recorre el circuito I_{DS} , que podemos expresar como:

$$I_{DS} = \frac{V_{in} - V_{GS}}{R}. \quad (7)$$

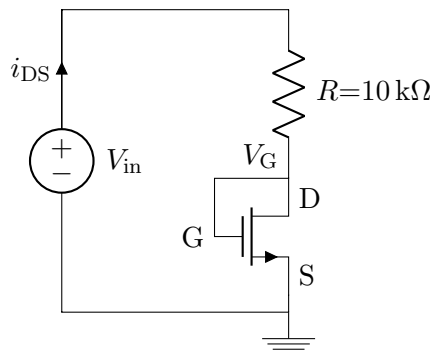


Figura 2: Circuito para la medida del parámetro de transconductancia β_n , la tensión umbral y la curva $I_{DS}-V_{GS}$ en saturación.

3.1.2. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla.

Cuadro 1: Datos experimentales para la medida de la curva $I_{DS}-V_{GS}$

$V_{in}(V)$	$V_{GS}(V)$	$I_{DS}(mA)$
0.96	0.96	0
1.98	1.41	0.058
2.93	1.60	0.135
4.82	1.86	0.300
5.93	1.98	0.400
7.00	2.08	0.499
8.02	2.18	0.592
8.84	2.25	0.668
10.03	2.34	0.779
10.93	2.41	0.864
11.81	2.48	0.946
13.05	2.57	1.062
14.12	2.64	1.164
14.98	2.70	1.245

Al representar dichos datos en MATLAB obtenemos la curva de la figura 3, puede apreciarse que tiene una forma cuadrática, lo que concuerda con el resultado predicho en el fundamento teórico. A partir de $V_{GS} = 1V$, I_{DS} es apreciablemente mayor que cero, de forma estimativa, podemos considerar que este es aproximadamente el valor de la tensión a partir del cual empieza a conducir el transistor, mas adelante, calcularemos de forma precisa su valor mediante un ajuste lineal.

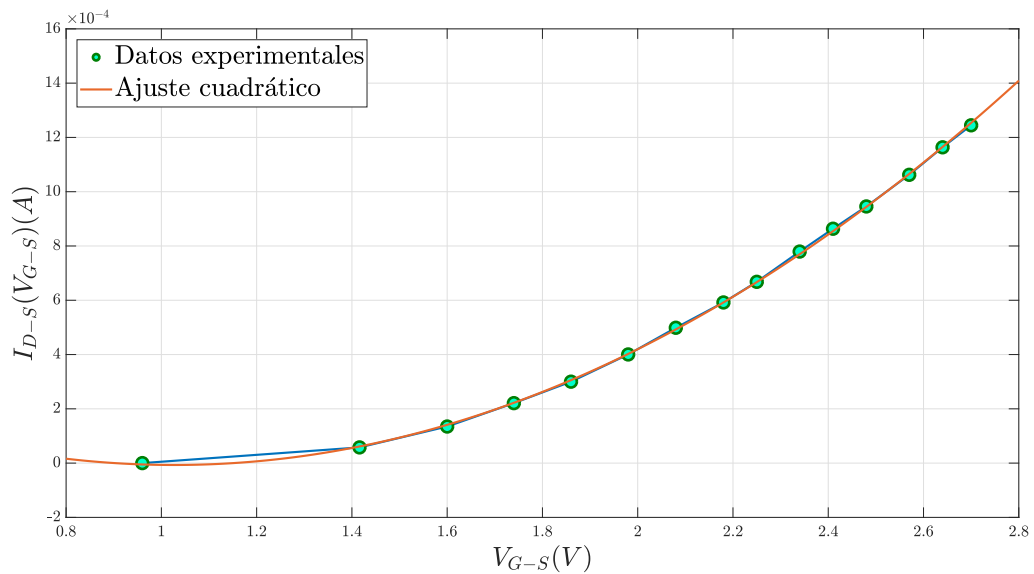


Figura 3: Intensidad en el transistor en función de la tensión puerta-fuente y ajuste cuadrático.

Una vez representada la curva, pasamos a realizar un ajuste lineal de los datos, para ello, como hemos comentado en el fundamento teórico, aplicamos el método de los mínimos cuadrados

para calcular una recta del tipo $y = ax + b$, donde $y = \sqrt{I_{DS}}$ y $x = V_{DS}$. En la siguiente figura, se puede observar el resultado obtenido.

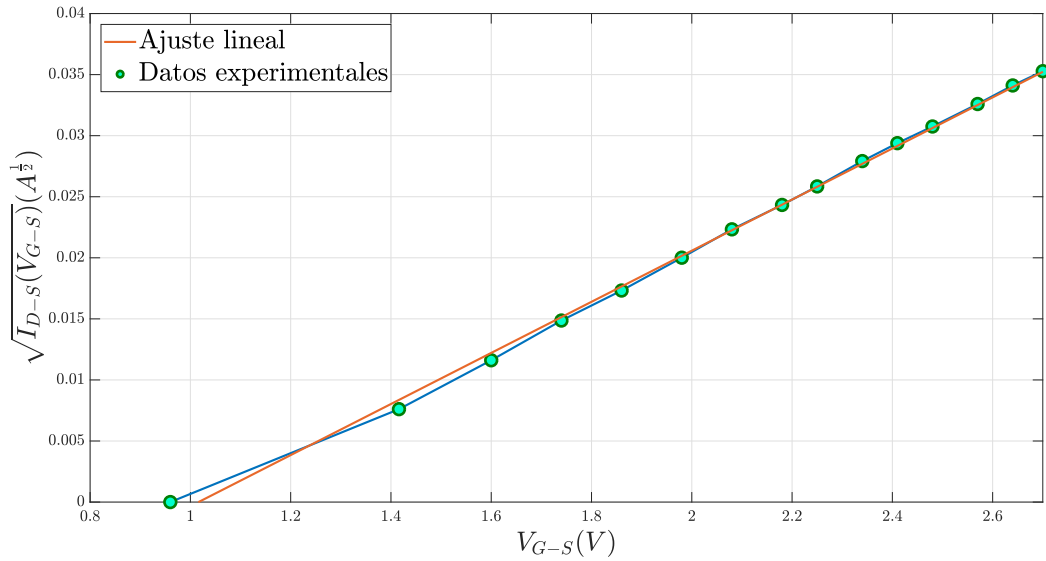


Figura 4: Intensidad en el transistor en función de la tensión puerta-fuente y ajuste cuadrático.

Obtenemos un $a = 0.02092$ y un $b = -0.02126$, podemos calcular β_n y V_T refiriéndonos a las ecuaciones (4) y (5), llegando a los siguientes resultados:

$$V_T = 1.0163V.$$

$$\beta_n = 8.753 \cdot 10^{-4} \frac{A}{V^2}.$$

El coeficiente de determinación del ajuste es bastante alto ($R^2 = 0.9981$) por lo que los resultados expresados anteriormente serán (obviando las aproximaciones) relativamente precisos.

Deducimos por tanto, las separaciones entre las dos zonas en las que opera el MOSFET en este circuito, la zona de corte, tanto en la figura 3 como en la figura 4 corresponde a todos los valores de I_{DS} para los que $V_{GS} < 1.0163V$, la zona de saturación, por otro lado, corresponde a a todos los valores de I_{DS} para los que $V_{GS} \geq 1.0163V$.

3.2. Medida de la curva $I_{DS}-V_{DS}$

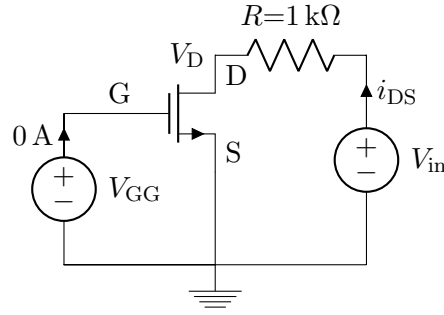
3.2.1. Procedimiento

Para esta segunda parte, hemos montado el circuito que se muestra en la figura 5, con el que no solo hallaremos la curva $I_{DS}-V_{DS}$, sino que también nos servirá para hallar la tensión Early.

La fuente de tensión V_{GG} ha sido conectada a la puerta del MOSFET y mantenida a 2.96V, mientras que la fuente V_{in} ha sido conectada al drenador.

Realizamos un barrido de tensiones de 0.5V a 7.5V en pasos de 0.5V para la fuente V_{in} . Y medimos para cada uno de los valores de V_{in} , la tensión en el drenador V_{DS} . Mediante la ley de ohm podemos calcular la intensidad drenador fuente I_{DS} , pudiéndola expresar como:

$$I_{DS} = \frac{V_{in} - V_{DS}}{R}. \quad (8)$$

Figura 5: Circuito para la medida de la curva $I_{DS} - V_{DS}$

3.2.2. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla.

Cuadro 2: Datos experimentales para la medida de la curva $I_{DS} - V_{DS}$

$V_{in}(V)$	$V_{DS}(V)$	$I_{DS}(mA)$
0.48	0.14	0.346
1.05	0.31	0.754
1.47	0.47	1.018
1.80	0.61	1.212
2.67	1.12	1.578
3.01	1.43	1.609
3.47	1.90	1.599
3.99	2.37	1.650
4.54	2.94	1.629
5.00	3.36	1.670
5.38	3.76	1.650
5.97	4.28	1.721
6.51	4.85	1.690
6.95	5.30	1.680
7.45	5.81	1.670

Al representar los datos en MATLAB, obtenemos la curva de la figura 6, podemos observar que a grandes rasgos coincide con el resultado predicho en el primer apartado del fundamento teórico, en concreto, la representación es análoga a la de la figura 1.

Para determinar la tensión Early, de nuevo, seguimos el procedimiento descrito en el fundamento teórico de la práctica. En primer lugar determinamos cuando el MOSFET se encuentra en la zona de saturación, con el parámetro V_T calculado en el apartado anterior, concluimos que, sabiendo que el MOSFET se encuentra en saturación para $V_{DS} > V_{GS} - V_T$, en nuestro caso para $V_{DS} > 1.948V$ el transistor se encuentra polarizado en saturación. Refiriéndonos a la ecuación(6), una vez realizado el ajuste lineal de los datos para el MOSFET en saturación, podemos expresar la tensión Early V_A del siguiente modo:

$$V_A = -\frac{b}{a}. \quad (9)$$

Donde a y b son, respectivamente, la pendiente y la ordenada en el origen de la recta ajustada para el MOSFET en saturación. En la siguiente figura, se pueden observar los datos recogidos y el ajuste lineal realizado.

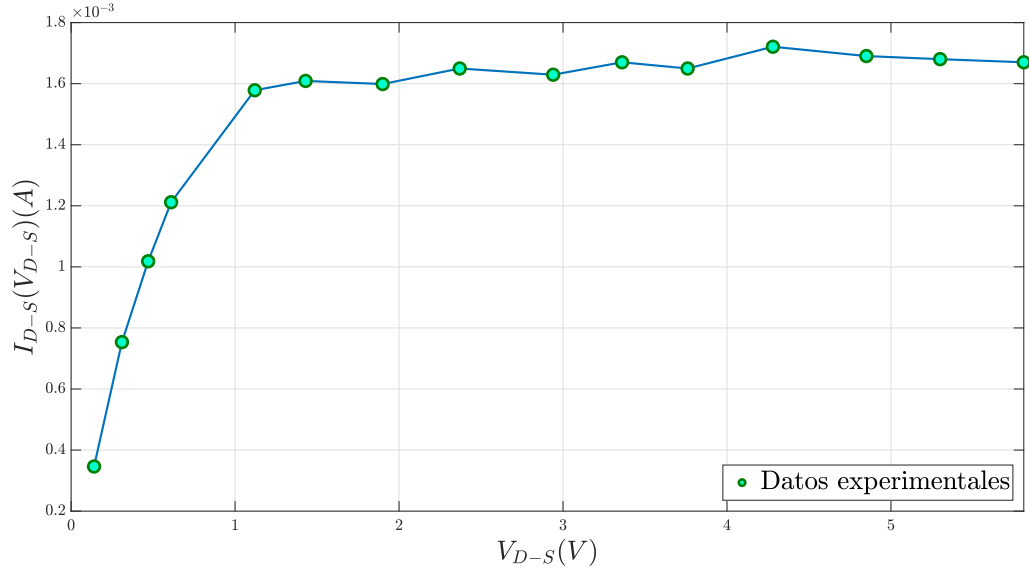


Figura 6: Intensidad en el transistor en función de la tensión drenador fuente.

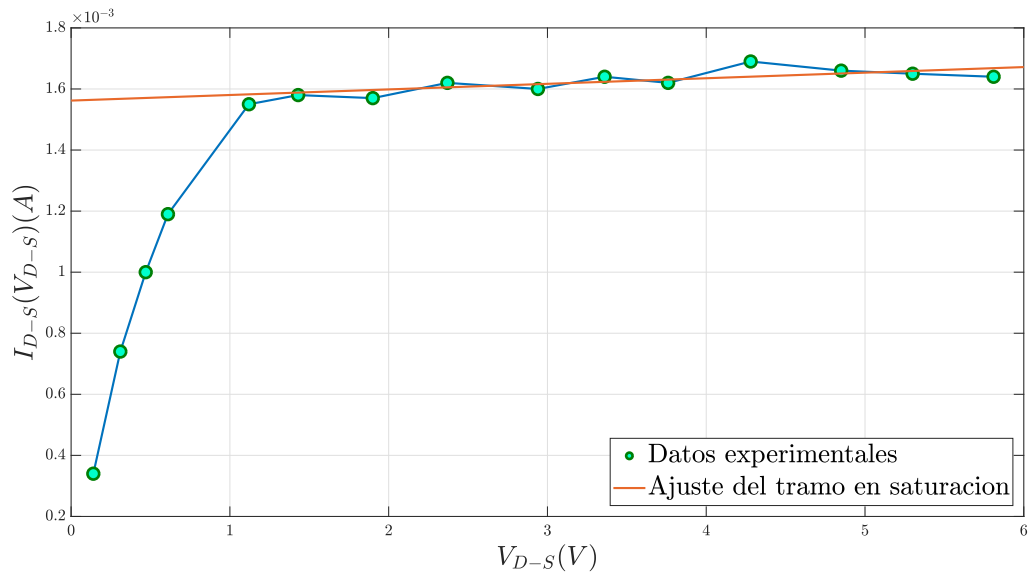


Figura 7: Intensidad en el transistor en función de la tensión drenador fuente.

Para este ajuste hemos obtenido unos parámetros $a = 1.8626 \cdot 10^{-5}$ y $b = 0.0016$, con un R^2 de 0.698, llegando al siguiente resultado:

$$V_A = -85.901V.$$

Por último, describimos el punto de polarización del MOSFET en función de la tensión drenador fuente V_{DS} , usando el valor de la tensión umbral calculado en el apartado anterior.

$$\begin{cases} \text{Corte,} & \text{si } V_{DS} < 1.012V. \\ \text{Lineal,} & \text{si } 1.012V \leq V_{DS} \leq 1.948V. \\ \text{Saturación,} & \text{si } V_{DS} > 1.948V. \end{cases} \quad (10)$$

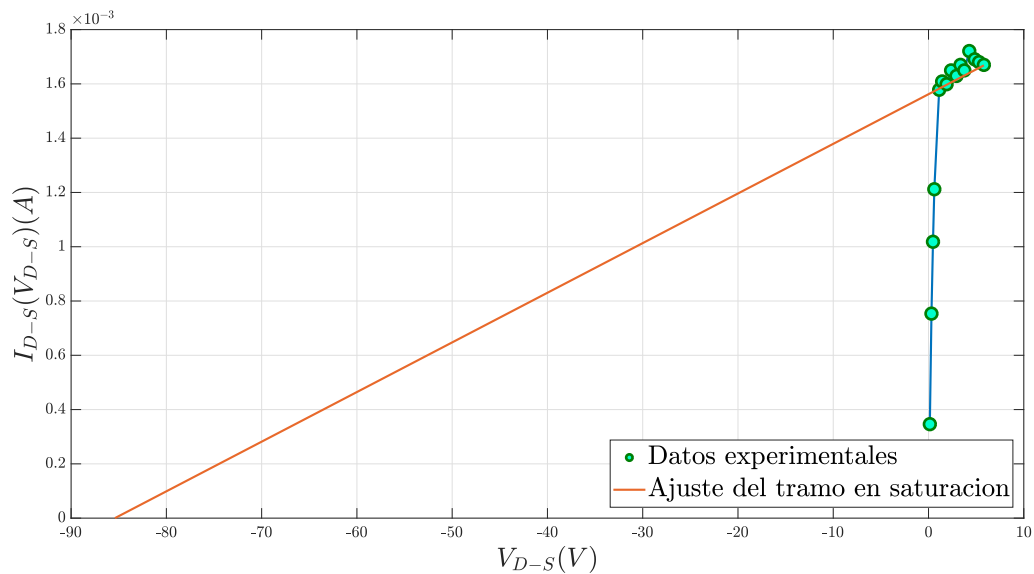


Figura 8: Tension Early, corte de la recta ajustada con el eje x.

4. Conclusión

Hemos comprobado, que, al menos de forma aproximada se cumplen los modelos estudiados en clase. En el primer circuito, para el MOSFET en saturación, con drenador y puerta cortocircuitados, el ajuste por mínimos cuadrados, tiene un R^2 bastante alto, de 0.9981, por lo que la curva se ajusta bastante bien a los datos y el modelo cuadrático aproxima con relativa exactitud la curva $I_{DS}-V_{GS}$. Sin embargo, el ajuste realizado para la zona de saturación de la curva $I_{DS}-V_{DS}$ tiene un R^2 de 0.698, con lo que, dependiendo del criterio escogido, la recta ajustada no aproxima bien el comportamiento del MOSFET.

Esto puede ser debido a las aproximaciones e idealizaciones consideradas para el cálculo de los modelos teóricos, como hemos comentado en el fundamento teórico, en los MOSFET reales se produce una disminución de la corriente drenador fuente para valores altos de V_{DS} , fenómeno que no se ve reflejado en el modelo que hemos usado. Existen otros modelos, mucho más precisos y con muchos más parámetros que el que hemos usado que definen mucho mejor como se comporta un MOSFET. Algunos de los efectos que este modelo no considera son los denominados efectos de segundo orden, entre los que se encuentran:

- Saturación de velocidad: Para transistores con un canal corto, la curva $I_{DS}-V_{DS}$ no es cuadrática.
- Efecto body: La tensión umbral V_T se ve modificada en función de la tensión entre la fuente y el sustrato del MOSFET. Este efecto puede llegar a ser deseado y a veces se implementa como parte del funcionamiento de los circuitos, ya que permite controlar el valor de la tensión a partir del cual el MOSFET empieza a conducir, en inglés, esto se conoce como body bias.

Tras esta última práctica, que hemos realizado de forma mucho más rápida y eficiente que las anteriores, concluimos que no hemos tenido demasiadas dificultades y hemos obtenido unos valores relativamente acordes a lo esperado en el cálculo teórico previo.