

MEMORIA PRÁCTICA 4-5

CARACTERIZACIÓN DE

CIRCUITOS CON DIODOS

Y MOSFETS

INMACULADA GÁLVEZ LÓPEZ
DAVID MUÑOZ SÁNCHEZ

1º DGIIM FFT



1. OBJETIVOS

Esta práctica se divide en dos partes:

Por un lado, se pretende obtener la relación entre la caída de tensión y la corriente en un diodo, además de ver cómo se comporta dicho diodo en un circuito sencillo. Para ello, utilizaremos un diodo rectificador y un diodo LED.

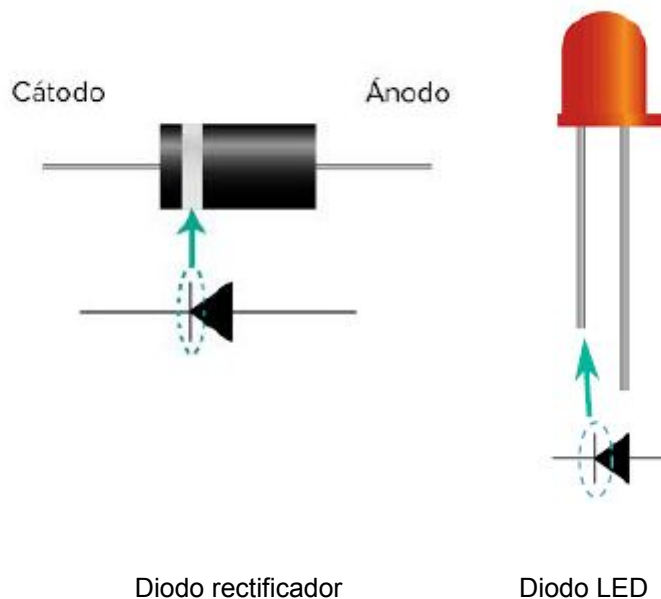
Por otro lado, se quiere caracterizar un transistor MOSFET, para lo que se medirán las características I-V, se determinarán sus parámetros, utilizando un NMOSFET, y se medirá su característica de transferencia. Aquí también haremos dos montajes.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

PRÁCTICA CON DIODOS:

El diodo es un dispositivo electrónico semiconductor que permite el paso de la corriente en un solo sentido. Posee polarización directa cuando permite el paso de corriente (entra por el polo positivo), y polarización inversa en caso contrario.

Además, un LED es un diodo que cuando está polarizado directamente emite luz.



La relación entre intensidad y voltaje (**I-V**) en el diodo es:

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV_d}{nkT}} - 1 \right)$$

donde:

- **I**: intensidad de corriente que atraviesa el diodo.
- **V_d**: diferencia de potencial entre los extremos del diodo.
- **q**: carga del electrón (1.6×10^{-19} C).
- **T**: temperatura de la unión (en Kelvin).
- **k**: constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K).
- **n**: índice de idealidad, que suele adoptar valores entre 1 (para el germanio) y del orden de 2 (para el silicio).

Al ser una relación exponencial, la resolución de circuitos es más compleja, por lo que se usan modelos sencillos que dan una idea aproximada de cómo funcionan los diodos, facilitando así el cálculo.

Los dos modelos más generalizados son:

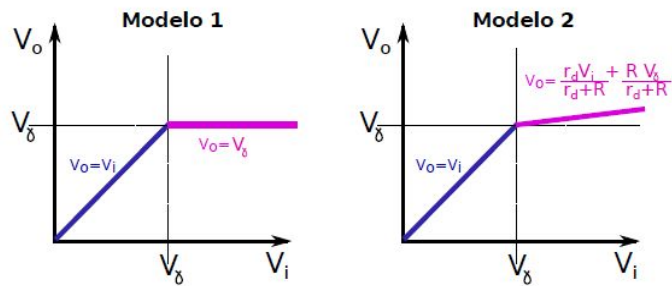
Modelo 1: es el más sencillo. Se desprecia la resistencia del diodo, y se supone que por él puede circular cualquier valor de corriente si $V_d > V_\gamma$.

$$I_d = \begin{cases} 0 & \text{si } V_d < V_\gamma \\ \text{Conduce} & \text{si } V_d > V_\gamma \end{cases}$$

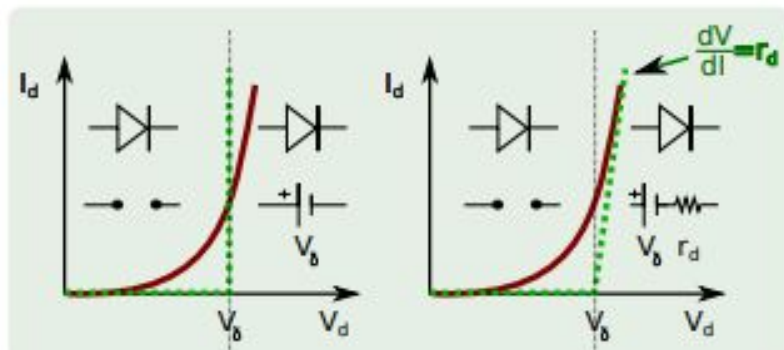
Modelo 2: el diodo no conduce mientras la caída de tensión entre sus extremos sea menor o igual que la tensión umbral (V_γ), que depende del tipo de diodo. Para valores superiores a este, el diodo conduce, presentando una resistencia interna r_d .

$$I_d = \begin{cases} 0 & \text{si } V_d < V_\gamma \\ \frac{V_d}{r_d} & \text{si } V_d > V_\gamma \end{cases}$$

La **característica de transferencia** de un circuito muestra cómo la tensión de salida cambia en función de la tensión de entrada. Esta varía dependiendo si usamos un modelo u otro, quedando las respectivas gráficas de este modo:



En estos gráficos se muestra la relación entre el voltaje y la intensidad (I-V) que atraviesan el diodo siguiendo cada modelo, como anteriormente.

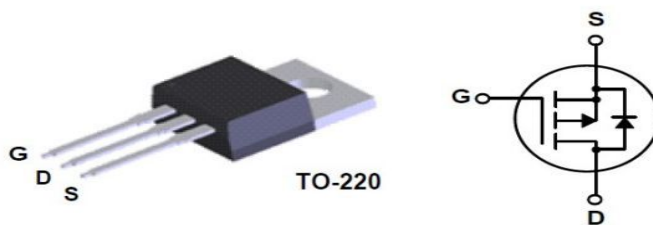


MODELO 1

MODELO 2

PRÁCTICA CON MOSFET:

El transistor MOSFET es un dispositivo electrónico de tres terminales (puerta, drenador y fuente). La corriente que circula entre la fuente y el drenador se controla a través de la puerta. Es un transistor de efecto de campo basado en la estructura MOS (Metal Óxido Semiconductor).



Dependiendo de la naturaleza del canal, podemos encontrarnos los **NMOSFETs** (que hemos utilizado en la práctica) y los **PMOSFETs**. Y en cuanto a su funcionamiento, podemos distinguir tres modos de operación dependiendo de la relación entre los voltajes de los terminales:

- **Región de corte:** el transistor está apagado, no hay corriente entre la fuente y el drenador. Se da:

$$V_{GS} < V_{th}$$

donde:

V_{GS} = tensión entre la puerta y la fuente.

V_{TH} = tensión umbral.

- **Región lineal:** el transistor está encendido, y el canal que se crea entre la fuente y el drenador permite el paso de corriente entre ellos.

Se produce cuando

$$V_{GS} > V_{th} \text{ y } V_{DS} < (V_{GS} - V_{th}).$$

donde:

V_{GS} = tensión entre la puerta y la fuente.

V_{TH} = tensión umbral.

V_{DS} = tensión entre el drenador y la fuente.

La corriente que circula entre la fuente y el drenador es:

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$$

,con:

μ_n = movilidad efectiva de los portadores.

W = anchura de la puerta

L = longitud de la puerta

C_{ox} = capacidad del óxido de la puerta por unidad de área

- **Región de saturación:** se produce cuando:

$$V_{GS} > V_{th} \text{ y } V_{DS} > (V_{GS} - V_{th}).$$

La corriente que circula entre la fuente y el drenador es:

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2$$

3. MATERIAL

PRÁCTICA DIODOS

- Resistencia ($10k\Omega$)
- Diodo rectificador
- Diodo LED
- Polímetro
- Placa (protoboard)
- Fuente de alimentación
- Cables de cocodrilo
- Sondas

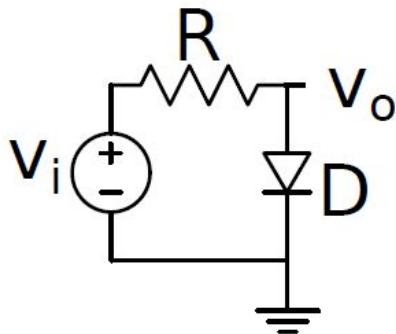
PRÁCTICA MOSFET

- Circuito integrado 4007
- Fuente de tensión
- Resistencia ($10k\Omega$)
- Polímetro
- Placa (protoboard)
- Fuente de alimentación
- Cables de cocodrilo
- Sondas

4. DESARROLLO Y RESULTADOS - 5. DISCUSIÓN

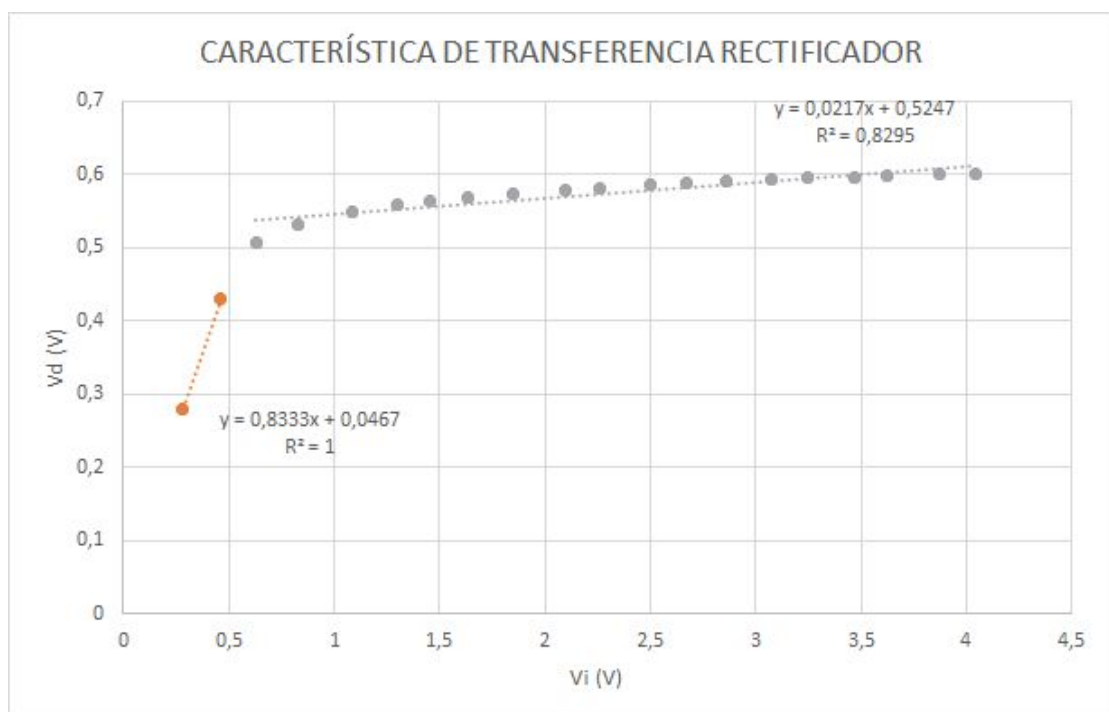
- PRÁCTICA CON DIODOS
 - ❖ DIODO RECTIFICADOR

Para el desarrollo de esta práctica, construiremos el siguiente circuito:



Hemos utilizado una resistencia de **10 k Ω** , un diodo rectificador y una fuente de tensión variable, aplicando tensiones entre 0 y 4 Voltios en saltos de 0.2 Voltios, y midiendo la diferencia de potencial entre los extremos del diodo, de la resistencia, y la propia entrada de forma experimental. Además, calcularemos la intensidad que circula por el circuito, y por consiguiente, por el diodo.

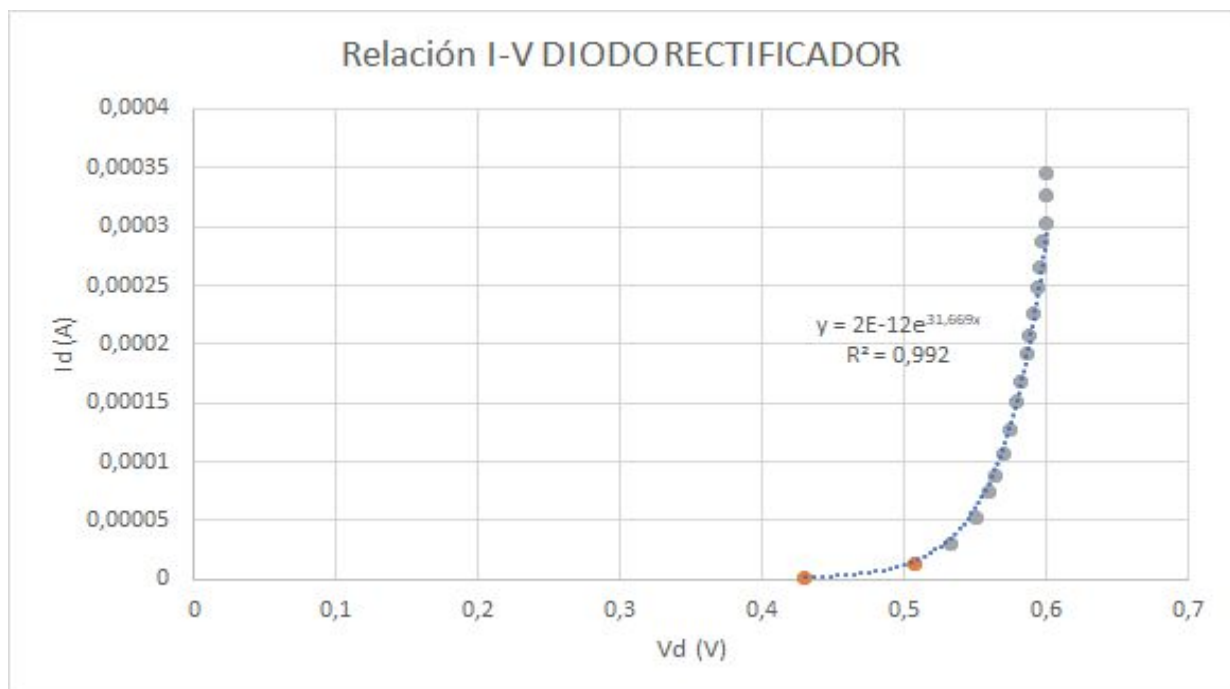
V (ENTRADA) (V)	V(DIODO) (V)	V(RESISTENCIA) (V)	V(ENTRADA EXP) (V)	Id (calculada) (A)
0,2	0,28	0	0,28	0
0,4	0,43	0,018	0,46	0,0000018
0,6	0,507	0,123	0,631	0,0000123
0,8	0,533	0,296	0,831	0,0000296
1	0,55	0,53	1,082	0,000053
1,2	0,559	0,737	1,299	0,0000737
1,4	0,564	0,886	1,453	0,0000886
1,6	0,57	1,064	1,636	0,0001064
1,8	0,575	1,268	1,845	0,0001268
2	0,579	1,512	2,094	0,0001512
2,2	0,582	1,678	2,263	0,0001678
2,4	0,586	1,916	2,504	0,0001916
2,6	0,588	2,078	2,668	0,0002078
2,8	0,591	2,264	2,856	0,0002264
3	0,593	2,477	3,071	0,0002477
3,2	0,595	2,652	3,248	0,0002652
3,4	0,597	2,873	3,47	0,0002873
3,6	0,599	3,027	3,625	0,0003027
3,8	0,6	3,269	3,868	0,0003269
4	0,6	3,45	4,04	0,000345



Si atendemos a la gráfica de la característica de transferencia del diodo rectificador, podemos observar que la tensión umbral se sitúa en los **0.5V** de forma aproximada.

A partir de esta tensión de entrada, el diodo deja de estar en corte, como podemos observar en la representación **Vi-Vd**. Haciendo el ajuste lineal de los primeros datos, obtenemos una recta con pendiente **0.8333** y con ordenada en el origen **0.0467**. En esta región, el diodo está en corte y, por tanto, la entrada y la salida de tensión debería ser, teóricamente, la misma, es decir, una recta con pendiente 1 y ordenada en el origen 0, valores muy cercanos a los que hemos obtenido experimentalmente.

Si nos fijamos en la segunda región (una vez superada la tensión umbral), podemos observar una recta de pendiente **0,0217** y de ordenada en el origen **0,5247**. El modelo 1 nos dice que la salida de tensión a partir de la tensión umbral se vuelve constante, pero vemos que, aunque por muy poco, esto no se cumple. Parece más acertado comparar nuestros resultados experimentales con el modelo 2, que afirma que nuestra recta debería tener una pendiente de $r_d / (R + r_d)$, siendo R una resistencia y r_d la resistencia asociada a la fuente de tensión del modelo 2 (con un valor igual al de la tensión umbral).



Hemos ajustado la relación entre Intensidad y Voltaje usando una línea de tendencia exponencial y, así, hemos deducido los valores de la corriente de saturación inversa y del producto q/nkT . Para ello, despreciamos el -1 de la expresión de la corriente de la ecuación e identificamos cada uno de los términos de esta ecuación con los valores numéricos resultantes del ajuste por mínimos cuadrados.

De este modo, fijándonos en la gráfica de la característica de transferencia y en la I-V, así como en los ajustes lineales y exponenciales, hemos podido rellenar los siguientes datos.

1. Mida el valor de la resistencia utilizada.

$$R = 9'8 \text{ k}\Omega$$

2. En la representación de la relación $I - V$, realice el ajuste exponencial propuesto a partir de los datos tomados en el laboratorio. Usando dicho ajuste calcule:

Curva exponencial de ajuste	I_s	q/nkT	$n(T = 19C)$
$2 \cdot 10^{-12} \cdot e^{31'669 x}$	$2 \cdot 10^{-12}$	31'669	1'25

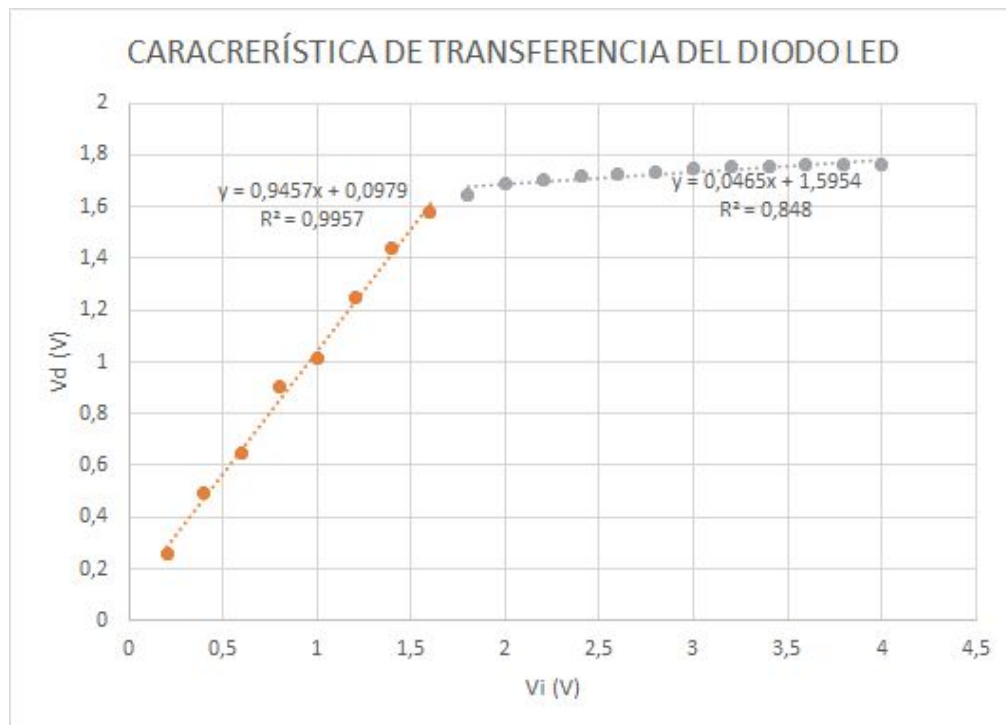
3. En la característica de transferencia pueden apreciarse dos tramos correspondientes a dos comportamientos del diodo (diodo OFF y diodo ON). Usando esta representación gráfica, realice el ajuste lineal de cada uno de los tramos de la gráfica de la tensión aplicada frente a la tensión del diodo. A partir de dicho ajuste calcule:

- Pendiente del primer tramo: 0'8333
- Coeficiente de correlación del primer tramo: 1
- Pendiente del segundo tramo: 0'0217
- Coeficiente de correlación del segundo tramo: 0'8295
- Tensión de cambio de tramo (punto en el que se ve el cambio de comportamiento de la curva) : 0'5 V

❖ DIODO LED

En este caso, construiremos el mismo circuito que anteriormente, solo que cambiaremos el diodo rectificador por uno LED y realizaremos las mismas mediciones y cálculos que en el caso anterior:

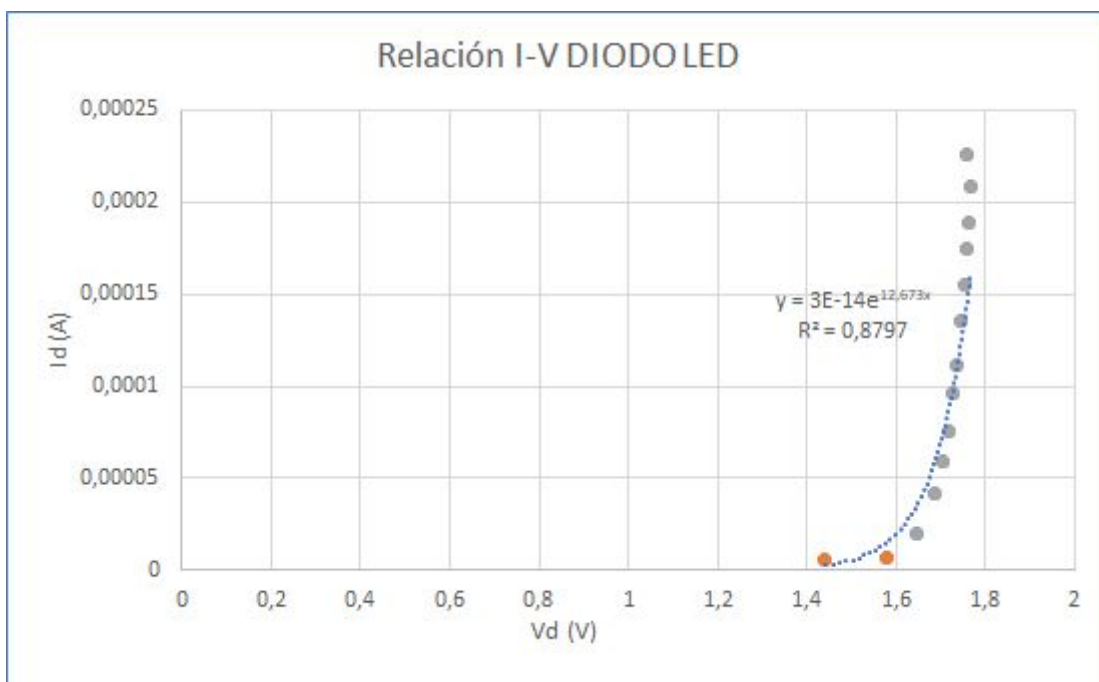
V (ENTRADA) (V)	V(DIODO) (V)	V(RESISTENCIA) (V)	V(ENTRADA EXP) (V)	Id (calculada) (A)
0,2	0,26	0,26	0	0
0,4	0,494	0,494	0	0
0,6	0,648	0,648	0	0
0,8	0,907	0,907	0	0
1	1,013	1,013	0	0
1,2	1,248	1,248	0	0
1,4	1,445	1,441	0,06	0,000006
1,6	1,644	1,581	0,064	0,0000064
1,8	1,841	1,646	0,195	0,0000195
2	2,101	1,686	0,414	0,0000414
2,2	2,305	1,704	0,595	0,0000595
2,4	2,476	1,717	0,757	0,0000757
2,6	2,693	1,729	0,963	0,0000963
2,8	2,803	1,736	1,116	0,0001116
3	3,103	1,746	1,357	0,0001357
3,2	3,305	1,752	1,554	0,0001554
3,4	3,502	1,758	1,746	0,0001746
3,6	3,642	1,761	1,884	0,0001884
3,8	3,847	1,766	2,086	0,0002086
4	4,03	1,76	2,26	0,000226



Teniendo en cuenta que el voltaje de entrada en todos los casos de prueba ha sido el mismo que en el caso del diodo rectificador, y que en el circuito estaba exactamente la misma resistencia, analicemos el diodo LED:

En su característica de transferencia, vemos que la tensión umbral se sitúa en torno a **1.7V**. Antes de esa tensión el voltaje de entrada y el del diodo eran prácticamente iguales (recta con pendiente **0.9457** y con ordenada en el origen **0.0970** (casi 1 y 0, respectivamente).

Después de esta tensión umbral, podemos observar una recta de pendiente **0,0465** y ordenada en el origen **1,5954**. El modelo 1 nos dice que la salida de tensión a partir de la tensión umbral se vuelve constante, pero vemos que, aunque por muy poco, esto no se cumple. Parece más acertada comparar nuestros resultados experimentales con el modelo 2, que afirma que nuestra recta debería tener una pendiente de $rd / (R + rd)$, siendo R una resistencia y rd la resistencia asociada a la fuente de tensión del modelo 2 (con un valor igual al de la tensión umbral).



Al igual que con el diodo rectificador, hemos ajustado la relación entre Intensidad y Voltaje usando una línea de tendencia exponencial y, así, hemos deducido los valores de la corriente de saturación inversa y del producto q/nkT . Para ello, despreciamos el -1 de la expresión de la corriente de la ecuación e identificamos cada uno de los términos de esta ecuación con los valores numéricos resultantes del ajuste por mínimos cuadrados.

De este modo, fijándonos en la gráfica de la característica de transferencia y en la I-V, así como en los ajustes lineales y exponenciales, hemos podido rellenar los siguientes datos.

1. Mida el valor de la resistencia utilizada.

$$R = 9'8 \text{ k}\Omega$$

2. En la representación de la relación $I - V$, realice el ajuste exponencial propuesto a partir de los datos tomados en el laboratorio. Usando dicho ajuste calcule:

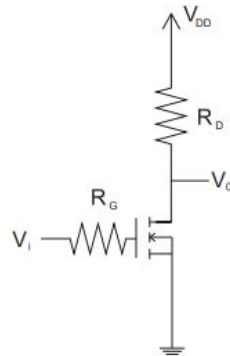
Curva exponencial de ajuste	I_s	q/nkT	$n(T = 19C)$
$3 \cdot 10^{-14} e^{12'673 x}$	$3 \cdot 10^{-14} \text{ A}$	12'673	3'13

3. En la característica de transferencia pueden apreciarse dos tramos correspondientes a dos comportamientos del diodo (diodo OFF y diodo ON). Usando esta representación gráfica, realice el ajuste lineal de cada uno de los tramos de la gráfica de la tensión aplicada frente a la tensión del diodo. A partir de dicho ajuste calcule:

- Pendiente del primer tramo: 0'9457
- Coeficiente de correlación del primer tramo: 0'9957
- Pendiente del segundo tramo: 0'0465
- Coeficiente de correlación del segundo tramo: 0'848
- Tensión de cambio de tramo (punto en el que se ve el cambio de comportamiento de la curva) : 1'7 V

- **PRÁCTICA MOSFET**

Para el montaje de la figura 6.3, usaremos N-MOSFETS, dos resistencias, una conectada la puerta (R_G) y otra al drenador (R_D) y, de valores experimentales, **9,8 k Ω** , y **9,9 k Ω** , respectivamente, y montaremos el siguiente circuito:



donde V_i es una fuente de alimentación variable cuyo valor cambiaremos en el intervalo de 0V a 5V. Además, V_{DD} tendrá un valor constante de 5V. Para cada uno de los valores de V_i (en concreto tomaremos 15 valores), mediremos también la tensión drenador-fuente (**V_{ds}**), la tensión puerta fuente (**V_{gs}**) y la tensión entre los extremos de R_G (**V_{rg}**).

A partir de estos valores, realizaremos una representación de la característica de transferencia del circuito, donde la salida será **V_{ds}** y la entrada **V_i** .

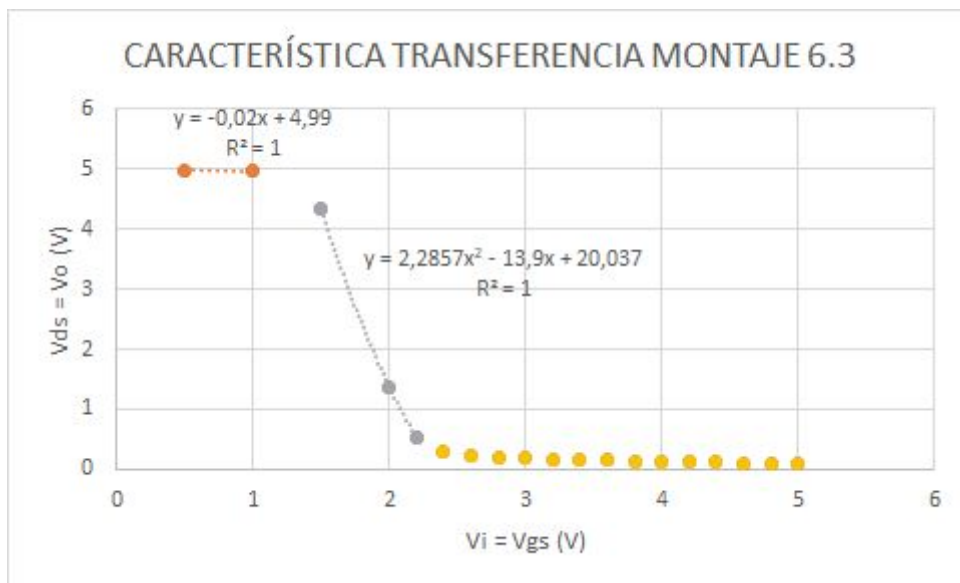
Además, medimos también la tensión entre la resistencia R_D (**V_{rd}**), y con estos datos, calculamos **I_d** e **I_g** (que sabemos que siempre es 0).

V_{DS} (V)	V_{GS} (V)	V_{RG} (V)	I_G (A)	V_{RD} (V)	I_D (A)	V_i (V)
4,98	0,6	0	0	0	0	0,5
4,97	1,05	0	0	0	0	1
4,33	1,57	0	0	0,64	0,000064	1,5
1,38	2,08	0	0	3,59	0,000359	2
0,52	2,22	0	0	4,45	0,000445	2,2
0,3	2,46	0	0	4,67	0,000467	2,4
0,24	2,7	0	0	4,73	0,000473	2,6
0,21	2,86	0	0	4,76	0,000476	2,8
0,18	3,1	0	0	4,79	0,000479	3
0,17	3,27	0	0	4,6	0,00046	3,2
0,16	3,44	0	0	4,81	0,000481	3,4
0,15	3,69	0	0	4,83	0,000483	3,6
0,14	3,69	0	0	4,63	0,000463	3,8
0,13	4,03	0	0	4,64	0,000464	4
0,12	4,25	0	0	4,85	0,000485	4,2
0,12	4,43	0	0	4,65	0,000465	4,4
0,11	4,67	0	0	4,86	0,000486	4,6
0,11	4,69	0	0	4,86	0,000486	4,8
0,11	5,05	0	0	4,87	0,000487	5

Como podemos observar, V_{rg} e I_g son constantemente iguales a 0. Esto es debido a que por la puerta de un transistor MOSFET no entra corriente, con lo que la resistencia R_G puede ser sustituida por un cable, y por consiguiente, la tensión en sus extremos es 0. Así, podemos considerar que los resultados esperados teóricamente se cumplen al hacerlo experimentalmente.

También, hemos medido experimentalmente V_{gs} , y obtenemos valores muy parecidos a la tensión de entrada V_i .

De este modo, la característica de transferencia quedaría de esta forma:



A la vista de los resultados, podemos hallar una aproximación de nuestra tensión umbral igualando la ecuación de la zona de corte (en naranja) y de la zona de saturación (en gris): $2,2857x^2 - 13,9x + 20,037 = -0,02x + 4,99$, que da lugar a $x = 4,66$ V y $x = 1,41$ V, siendo esta última la más coherente, atendiendo a nuestros resultados.

Observando la gráfica, vemos que, a partir de la tensión umbral, $V_{ds} > (V_{gs} - V_t)$, condición necesaria para la región de saturación.

En nuestra gráfica, vemos que, para una V_i entre 2,1V y 2,5V, hay un cambio de comportamiento en la salida, pasando de región activa a óhmica.

En la siguiente imagen detallamos el valor teórico de V_i que determina el paso de la región de saturación a lineal, usando los valores teóricos de V_t y de k que hemos obtenido en el siguiente apartado.

Si obtenemos las ecuaciones generales del circuito, tenemos:

$$\textcircled{1} \quad V_{DD} - I_D R_D - V_{DS} = 0 \Rightarrow \boxed{5 \text{ V} - 10^4 \Omega I_D - V_{DS} = 0}$$

$$\textcircled{2} \quad \boxed{V_i = V_{GS}}$$

$$\textcircled{3} \quad \boxed{V_o = V_{DS}}$$

Además, en el paso de saturación a lineal, se da:

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T \Rightarrow V_o = V_i - V_T \Rightarrow \boxed{V_o = V_i - 1.199 \text{ V}}$$

Como se cumplen tanto las condiciones de saturación como de lineal, usamos la ecuación para la intensidad de la región de saturación, ya que es más sencilla.

$$I_D = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{9.33 \cdot 10^{-4}}{2} (V_i - 1.199)^2 =$$

$$= 4.66 \cdot 10^{-4} (V_i^2 - 2.1199 V_i + 1.199^2)$$

Uniendo esto con la ecuación $\textcircled{1}$, tenemos:

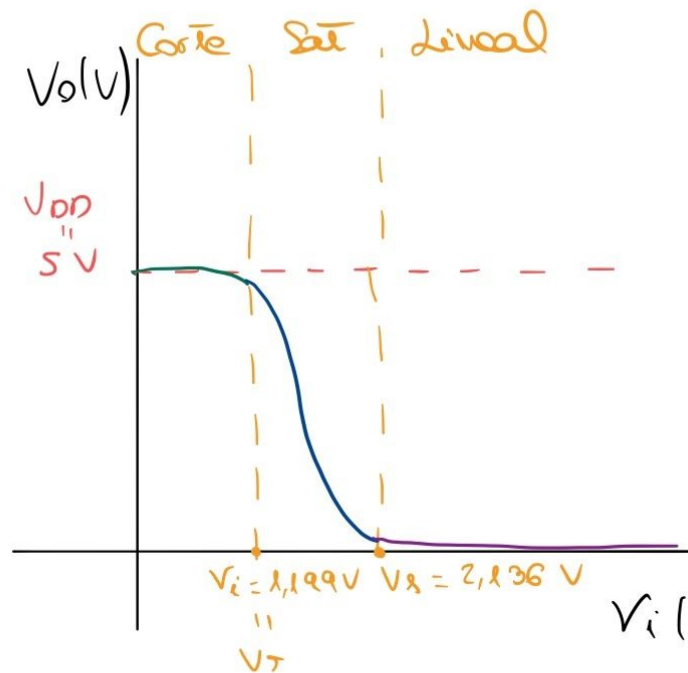
$$5 - 10^4 I_D - V_o = 0 \Rightarrow 5 - 10^4 I_D - V_i + 1.199 = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 5 - 10^4 \left[4.66 \cdot 10^{-4} (V_i^2 - 2.1199 V_i + 1.199^2) \right] - V_i + 1.199 = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -4.66 V_i^2 + (11.17 - 1) V_i + (5 - 6.7 + 1.199) = 0$$

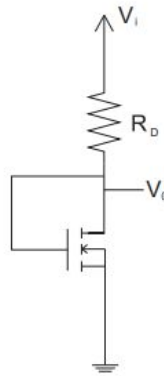
$$\Rightarrow \begin{cases} V_i = 2.136 \text{ V} \\ V_i = 0.05 \text{ V} \end{cases}$$

Nos quedamos solamente con la primera opción: **$V_i = 2.136 \text{ V}$** , pues, como vemos, se ajusta perfectamente a nuestro rango obtenido en la gráfica de la característica de transferencia. De esta manera, podemos considerar que nuestros resultados experimentales son muy cercanos a los esperados. También nuestra **$V_t = 1.199 \text{ V}$** se asemeja a el **1.4** que obtuvimos anteriormente.



Esta sería la gráfica de la característica de transferencia teórica, la cual, como podemos comprobar, es muy semejante a la que hemos obtenido experimentalmente, salvo por pequeñas variaciones debido a posibles errores en la medida y a las condiciones de ambiente.

Por otro lado, para medir la característica I-V de la figura 6.4, montamos el siguiente circuito:



donde el drenador y la puerta están cortocircuitados, usamos R_D con un valor de **9,8k Ω** , y donde, de nuevo, la entrada **V_i** es una fuente de alimentación variable cuyo valor cambiaremos en el intervalo de 0V a 5V. Para cada uno de los valores de V_i (en concreto tomaremos 15 valores), mediremos la tensión entre los extremos de R_D (**V_{rd}**) y la tensión puerta-fuente (**V_{gs}**) que coincide con **V_{ds}** .

A partir de estos valores, usando la Ley de Ohm, calcularemos la intensidad **I_d** , y representaremos en una gráfica **I_d** frente a **V_{gs}** . Usando esta gráfica, realizaremos un ajuste por mínimos cuadrados para estimar la tensión umbral y la constante **k** (transconductancia), teniendo en cuenta que el transistor está en saturación.

Un **N-MOSFET** con la puerta y el drenador cortocircuitados, siempre que conduzca, se encuentra en saturación porque, suponiendo que **$V_{gs} > V_t$** , **$V_{ds} > V_{gs} - V_t$** va a ocurrir siempre, puesto que **$V_{gs} = V_{ds}$** en este caso y es evidente que la desigualdad **$V_{gs} > V_{gs} - V_t$** se cumple siempre que hablemos de cantidades positivas.

VI (V)	VDS=VGS (V)	VRD (V)	ID (A)	SQRT(ID) (A)
0,5	0,55	0	0	0
1	1,03	0	0	0
1,5	1,36	0,14	0,000014	0,00374166
2	1,54	0,51	0,000051	0,00714143
2,2	1,58	0,64	0,000064	0,008
2,4	1,63	0,84	0,000084	0,00916515
2,6	1,67	1,01	0,000101	0,01004988
2,8	1,7	1,12	0,000112	0,01058301
3	1,73	1,33	0,000133	0,01153256
3,2	1,77	1,46	0,000146	0,01208305
3,4	1,8	1,65	0,000165	0,01284523
3,6	1,82	1,81	0,000181	0,01345362
3,8	1,85	1,96	0,000196	0,014
4	1,89	2,19	0,000219	0,01479865
4,2	1,91	2,33	0,000233	0,01526434
4,4	1,93	2,48	0,000248	0,01574802
4,6	1,96	2,67	0,000267	0,01634013
4,8	1,98	2,85	0,000285	0,01688194
5	2	3,01	0,000301	0,01734935

Para mayor comodidad, cuando I_d es distinto de cero, podemos trabajar con su raíz:

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

$$\sqrt{I_D} = \sqrt{\frac{k}{2}} (V_{GS} - V_T)$$

De esta manera, si realizamos un ajuste lineal de la raíz de I_d frente a V_{GS} , tendríamos:

$y = \sqrt{k/2} * (x - V_t)$, es decir, tendríamos de pendiente $\sqrt{k/2}$ y, de ordenada en el origen, $-\sqrt{k/2} * V_t$, y de aquí despejamos los valores de V_t y k .

Como podemos observar en la gráfica, nos da una pendiente de 0,0216 y una ordenada en el origen de -0,0259.

Haciendo los cálculos mencionados, hemos obtenido:

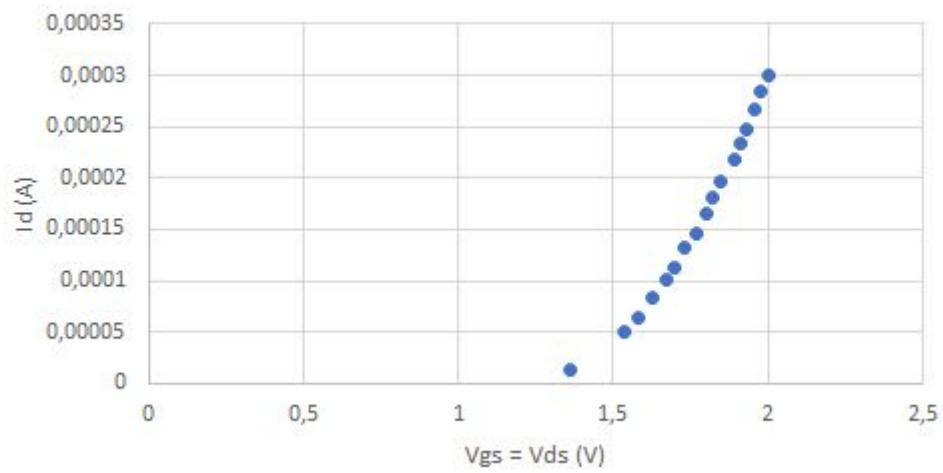
$$V_t = 1,199 \text{ V}$$

$$k = 9,33 \cdot 10^{-4} \text{ A/(V}^2\text{)}$$

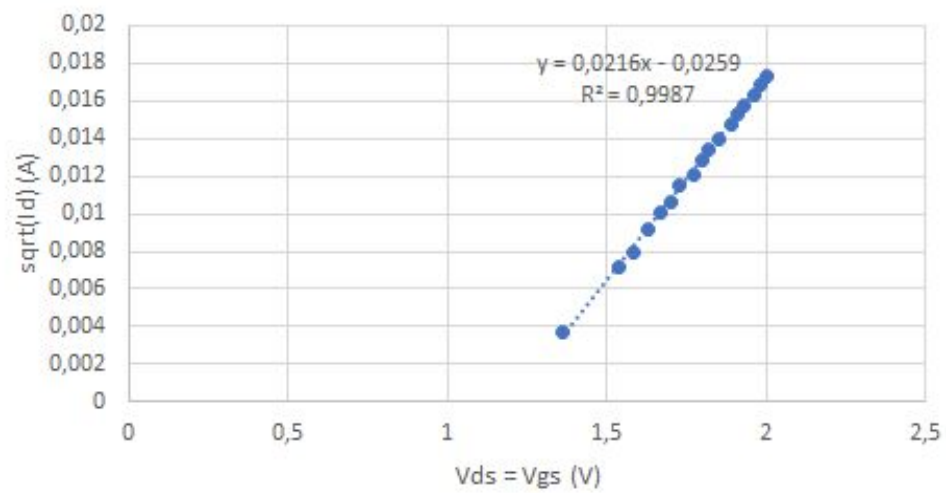
Además, tenemos que el coeficiente de correlación lineal es:

$$R^2 = 0,9987$$

REPRESENTACIÓN I-V (I_d - V_{gs}) MONTAJE 6.4



Representación de $\sqrt{I_d}$ -V



6. CONCLUSIÓN

Comenzando con la práctica de los diodos, hemos aprendido a entender y a dibujar las gráficas de la característica de transferencia (salida frente a entrada) y la de la característica I-V (intensidad frente a voltaje de entrada). Hemos podido observar que en los diodos rectificadores, la tensión umbral es considerablemente más pequeña que en los diodos LEDs, además de que los resultados obtenidos experimentalmente se asemejan bastante a los esperados teóricamente, salvando pequeños errores debido a la precisión y a las condiciones ambientales.

Por último, hemos comprendido que los diodos se comportan como un circuito abierto cuando la tensión entre sus extremos es menor que la umbral, y como una fuente de tensión (con o sin una pequeña resistencia, dependiendo del modelo que utilicemos) cuando la tensión en sus extremos es mayor que la umbral.

Siguiendo con la práctica de los transistores, también hemos aprendido cómo construir e interpretar tanto la característica de transferencia (en este caso de la figura 6.3) como la I-V (con la puerta y el drenador cortocircuitados en la figura 6.4).

A partir del análisis de la característica de transferencia (6.3), hemos podido observar que antes de superar la tensión umbral, el transistor está en corte, y la salida es constante (aproximadamente) y no depende de la entrada. A partir de la tensión umbral, el diodo puede estar en saturación o en región lineal, y mientras más aumente la tensión de entrada en región lineal, más se acerca la salida a 0, obteniendo los valores tanto teóricos como experimentales de V_i para los cuales se producen los cambios de comportamiento en la salida.

Por último, en la figura 6.4, sabemos que una vez superada la tensión umbral, el transistor siempre se encuentra en saturación debido al cortocircuito entre la puerta y el drenador. Además, hemos conseguido obtener la tensión umbral y la transconductancia del transistor a partir de la fórmula de saturación, que, debido a que es cuadrática y de términos positivos, podemos tomar raíces y simplificarlo todo con un ajuste lineal.