

Objetivo de la práctica

Obtener la relación entre la caída de tensión y la corriente en un diodo. Además de ver cómo se comporta el diodo en un circuito sencillo. En concreto, con diodos LED y rectificadores.

Fundamento teórico

El diodo es un dispositivo electrónico cuya relación I-V es la siguiente:

$$I = I_S \left(e^{\frac{1}{n} \frac{V_D}{kT}} - 1 \right)$$

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

Dicha relación, al ser de tipo exponencial, hace más complicado la resolución de los circuitos. Por consiguiente, usamos modelos más sencillos que aproximan el funcionamiento del diodo pero sin usar la relación exponencial. Por consiguiente, con el propósito de simplificar el cálculo, se usan modelos sencillos que dan una idea aproximada del funcionamiento del diodo pero sin usar la relación exponencial. Uno de estos modelos es el siguiente:

$$I_D = \begin{cases} 0 & \text{si } V_D < V_\gamma \\ \frac{V_D}{R_D} & \text{si } V_D > V_\gamma \end{cases}$$

Según este modelo, el diodo no conduce mientras la caída de tensión entre sus extremos sea menor o igual que un cierto valor V_γ (tensión umbral), que depende del tipo de diodo. Superado ese valor, el diodo conduce, presentando una resistencia interna r_d . Un modelo aún más sencillo es el siguiente:

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

En este modelo se desprecia la resistencia del diodo, y se supone que puede circular cualquier valor de la corriente por el mismo si $V_d > V_\gamma$.

Material utilizado

1. Diodo led
2. Diodo Rectificador
3. Fuente de alimentación
4. Resistencia = $2.15k\Omega$
5. Polimetro
6. Placa de montaje

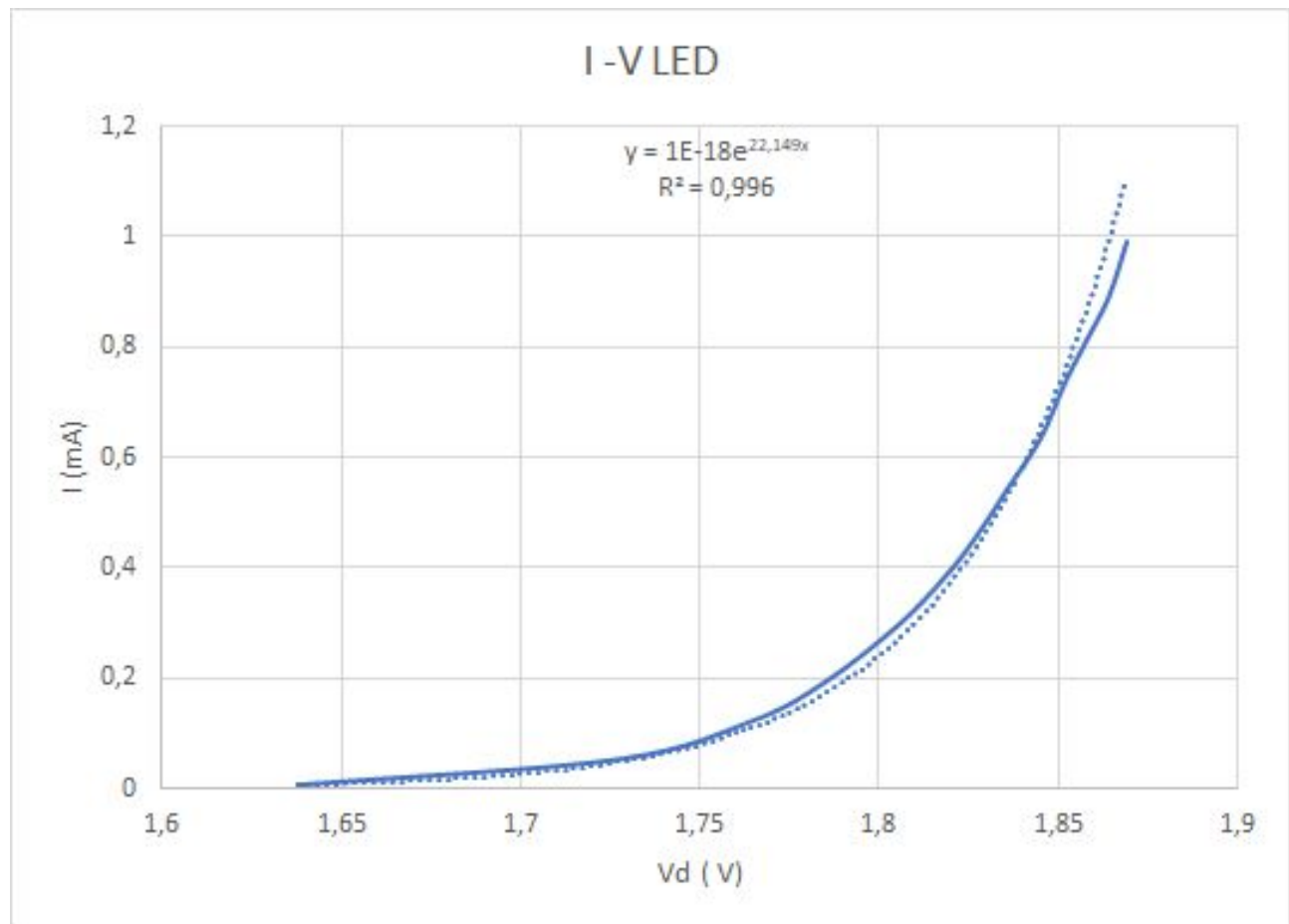
Desarrollo y resultados

Para el desarrollo de la práctica utilizamos una resistencia de 2.15 k Ω .

DIODO LED

Medidas

Vi(V)	Viexp(V)	Vdexp(V)	Vrexp(V)	I(mA)
0	0.005	0.005	0	0
0.2	0.223	0.223	0	0
0.4	0.462	0.462	0	0
0.6	0.609	0.614	0	0
0.8	0.808	0.808	0	0
1	0.99	0.94	0	0
1.2	1.233	1.233	0	0
1.4	1.44	1.439	0	0
1.6	1.652	1.638	0.012	0.005581395349
1.8	1.841	1.728	0.113	0.05255813953
2	2.029	1.765	0.264	0.1227906977
2.2	2.2	1.785	0.414	0.1925581395
2.4	2.436	1.805	0.631	0.2934883721
2.6	2.635	1.818	0.818	0.3804651163
2.8	2.805	1.827	0.979	0.4553488372
3	3.007	1.836	1.172	0.5451162791
3.2	3.209	1.845	1.364	0.6344186047
3.4	3.43	1.852	1.587	0.7381395349
3.6	3.606	1.858	1.75	0.8139534884
3.8	3.777	1.864	1.915	0.8906976744
4	3.995	1.869	2.128	0.9897674419

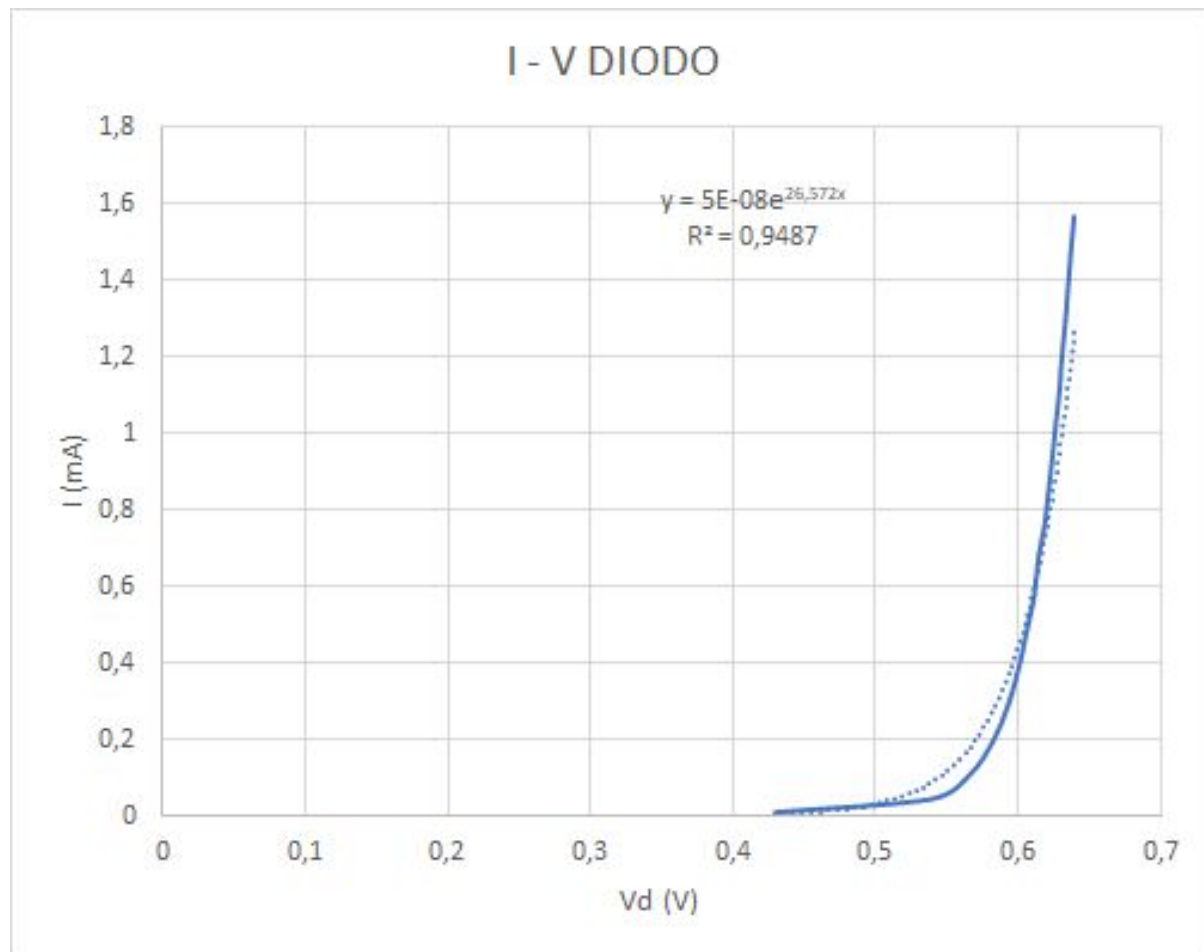


Curva exponencial de ajuste	I_s (A)	q/nkT	$n/(T = 19C)$
$y = 10^{-18}e^{22.149x}$	10^{-18}	22.149	1.791

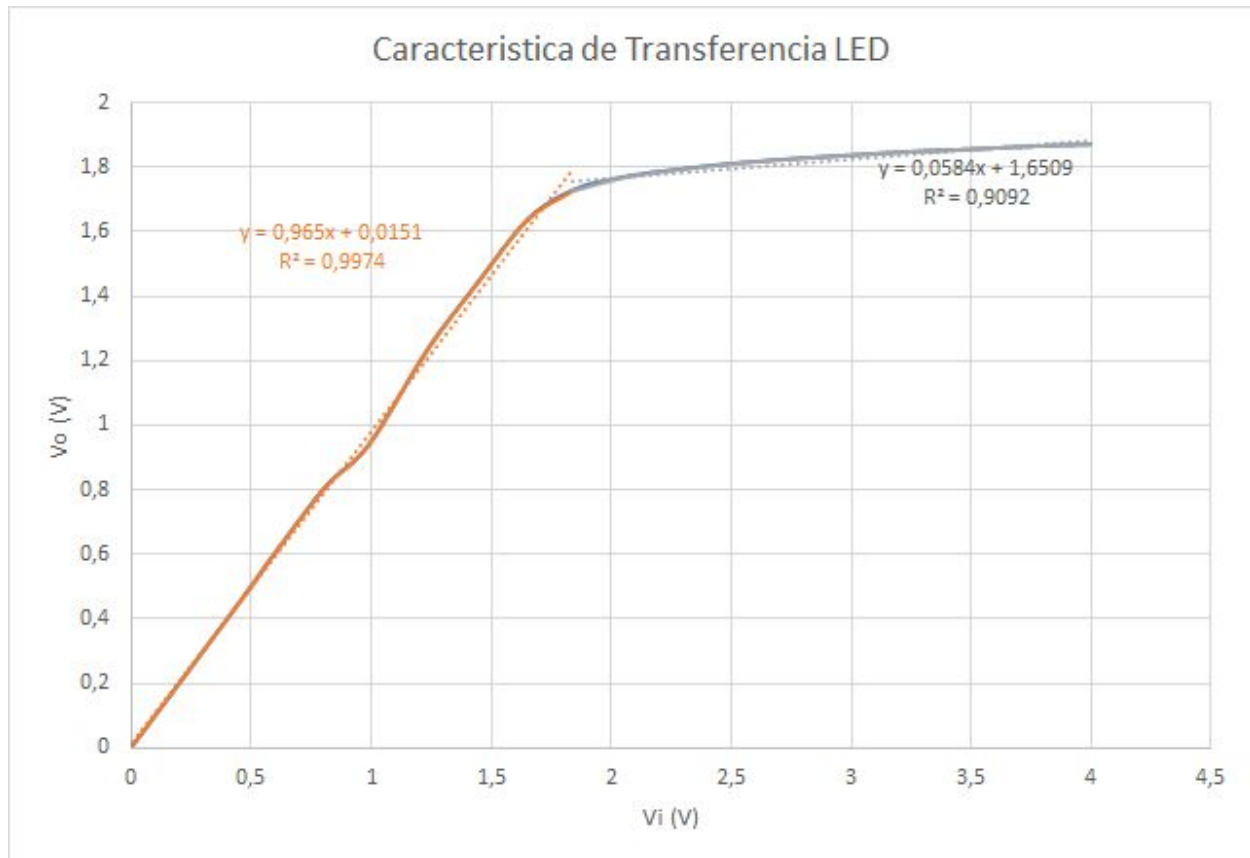
DIODO RECTIFICADOR

Medidas

Vi(V)	Viexp(V)	Vdexp(V)	Vrexp(V)	I(mA)
0	0.005	0.004	0	0
0.2	0.211	0.213	0	0
0.4	0.432	0.43	0.02	0.009302325581
0.6	0.639	0.541	0.097	0.04511627907
0.8	0.809	0.567	0.235	0.1093023256
1	1.002	0.583	0.42	0.1953488372
1.2	1.225	0.594	0.632	0.2939534884
1.4	1.467	0.602	0.865	0.4023255814
1.6	1.624	0.606	1.018	0.4734883721
1.8	1.853	0.612	1.241	0.5772093023
2	2.07	0.615	1.455	0.676744186
2.2	2.239	0.619	1.621	0.7539534884
2.4	2.378	0.621	1.757	0.8172093023
2.6	2.667	0.625	2.042	0.9497674419
2.8	2.824	0.627	2.198	1.022325581
3	3.048	0.63	2.419	1.125116279
3.2	3.174	0.631	2.544	1.183255814
3.4	3.427	0.634	2.794	1.299534884
3.6	3.632	0.636	2.998	1.394418605
3.8	3.836	0.638	3.2	1.488372093
4	4	0.64	3.37	1.56744186



Curva exponencial de ajuste	I_s (mA)	q/nkT	$n/(T = 19C)$
$y = 5 \cdot 10^{-8} e^{26.572x}$	$5 \cdot 10^{-8}$	26.572	1.493



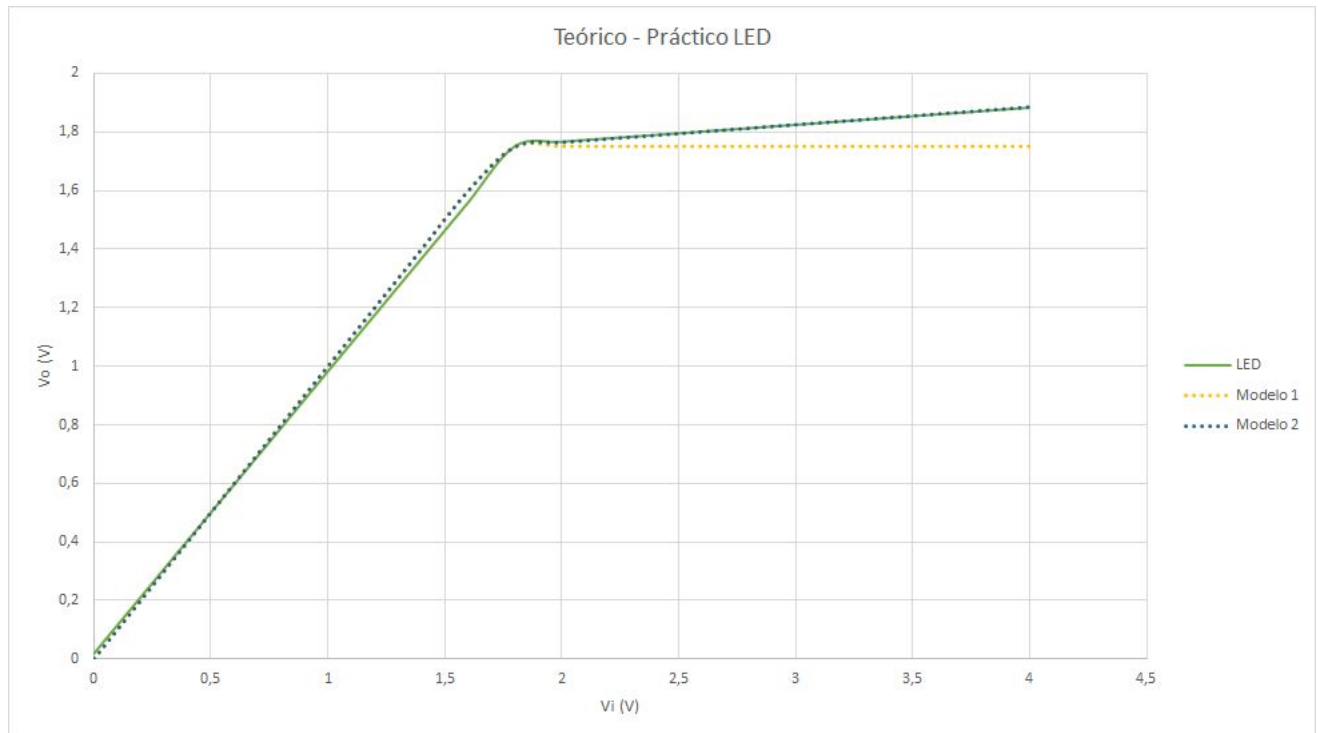
- Pendiente del primer tramo: 0.965
- Coeficiente de correlación del primer tramo: 0.9974
- Pendiente del segundo tramo: 0.0584
- Coeficiente de correlación del segundo tramo: 0.9092
- Tensión de cambio de tramo: 1.75 ± 0.1 V



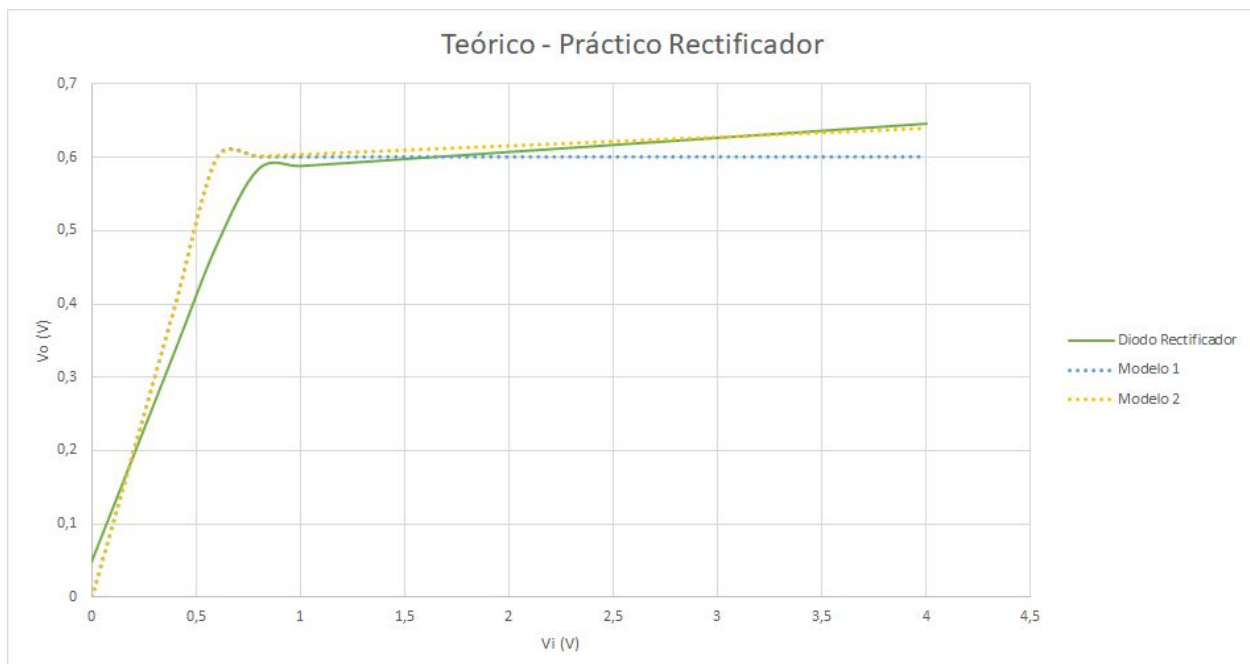
- Pendiente del primer tramo: 0.7209
- Coeficiente de correlación del primer tramo: 0.9449
- Pendiente del segundo tramo: 0.0193
- Coeficiente de correlación del segundo tramo: 0.8999
- Tensión de cambio de tramo: 0.65 ± 0.1 V

Comparación entre los dos diodos

Como se puede apreciar en las gráficas, la diferencia principal entre los diodos es su tensión umbral, que es lo que produce ese desplazamiento entre las líneas en la gráfica. Sin embargo, como podemos ver en la característica de transferencia el comportamiento de los dos diodos es muy similar.



Los modelos teóricos se ajustan con bastante certeza a lo medido experimentalmente, especialmente el modelo 2, cuya gráfica es prácticamente indistinguible de la gráfica práctica ajustada. El modelo 1 se puede utilizar para realizar cálculos más sencillos en los que no se requiera mucha precisión, solo una idea general de lo que ocurrirá con el diodo, sin embargo, el modelo teórico 2 puede reemplazar a la práctica sin pega alguna.



Discusión y Conclusion

Podemos decir que el comportamiento de los diodos es el esperado, hay una región en la que no conducen, y a partir de la tensión umbral, empiezan a conducir de forma exponencial. El comportamiento de ambos diodos es el mismo, y su única diferencia es la tensión umbral, a partir de la cual el diodo empieza a conducir, característica que depende del tipo de diodo, material etc.

Con respecto a los modelos teóricos, podemos decir que se ajustan bastante bien a los resultados prácticos. El modelo 1 es bastante fiable para tensiones cercanas a la umbral, sin embargo a medida que aumenta la tensión se distancia bastante de los resultados prácticos. El segundo modelo es mucho más fiable y predice con exactitud los resultados obtenidos por la práctica.

Objetivo

En esta práctica se pretende caracterizar un transistor MOSFET. Para comprender el funcionamiento de este transistor, se medirán las características I-V, se determinarán los parámetros de un MOSFET de canal N (NMOSFET) y se medirá su característica de transferencia.

Fundamento Teórico

El transistor MOSFET es un dispositivo de tres terminales llamados puerta (G del inglés Gate), drenador (D del inglés Drain) y fuente (S del inglés Source). La corriente que circula entre los terminales de fuente y drenador se controla a través del terminal de puerta. MOSFET son las siglas de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor y, como su propio nombre indica, es un transistor de efecto de campo basado en la estructura MOS (Metal Óxido Semiconductor).

Existen dos tipos de MOSFETs dependiendo de la naturaleza del canal: NMOSFETs y PMOSFETs. En cuanto a su funcionamiento, pueden distinguirse tres modos de operación que dependerán de la relación entre los voltajes de los terminales:

-Región de Corte: En este modo, el transistor no funciona, esto es, no hay corriente entre fuente y drenador. En esta región:

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

donde V_{th} es la tensión umbral del dispositivo.

-Región Triodo: En este modo, el transistor está encendido y el canal que se crea entre fuente y drenador permite la circulación de corriente entre ambos. Este modo se produce cuando $V_{GS} > V_{th}$ y $V_{DS} < (V_{GS} - V_{th})$. La corriente que circula entre la fuente y el drenador es:

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

donde μ_n es la movilidad efectiva de los portadores, W es la anchura de la puerta, L es su longitud y C_{ox} es la capacidad del óxido de puerta por unidad de área.

-Región de Saturación. Este modo se produce cuando:

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

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

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

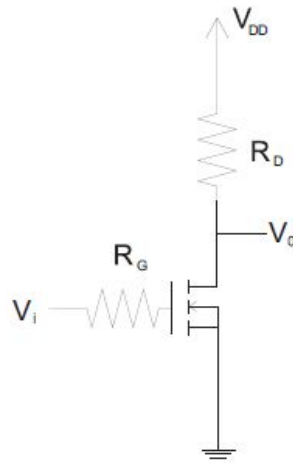
Material utilizado

1. Resistencia de la puerta (R_G) 14.58 k Ω
2. Resistencia del drenador (R_D) 2.15 k Ω
3. Placa de montaje
4. Polímetro
5. Cables
6. Para realizar esta práctica utilizaremos un circuito integrado, en concreto el 4007 que contiene 6 transistores MOS (3 PMOS los tres de arriba y 3 NMOS los tres de abajo). En particular, trabajaremos con uno de los tres transistores NMOS.

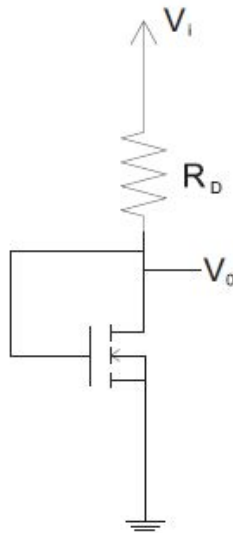
Desarrollo y resultados

Montajes que se van a realizar en esta práctica

Montaje de un inversor NMOS para medir la característica de transferencia (Figura 1.)



Montaje para la medida de la característica I-V de un NMOS. (Figura 2)



Montaje 1

Para este montaje usamos dos resistencias

$$R_D = 2.15 \text{ k}\Omega$$

$$R_G = 14.58 \text{ k}\Omega$$

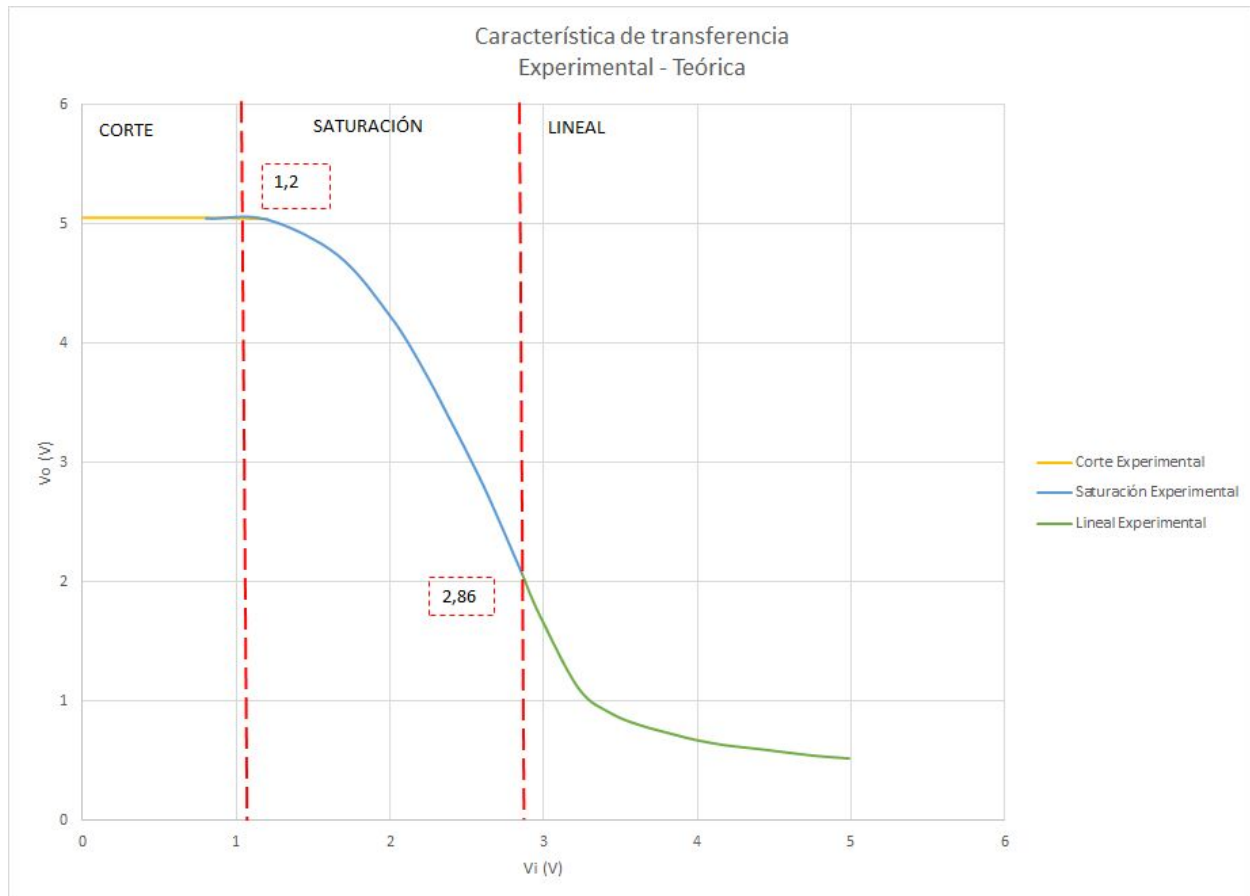
Los datos medidos son

$V_i(V)$	$V_{ds}(V)$	$V_{gs}(V)$	$V_{rg}(V)$	$I_g(V)$	$V_{rd}(V)$	$I_d(mA)$
0	5.05	0	0	0	0	0
0.4	5.05	0.4	0	0	0	0
0.8	5.05	0.8	0	0	0	0
1.2	5.04	1.2	0	0	0.03	0.01395348837
1.66	4.74	1.66	0	0	0.28	0.1302325581
2	4.23	2	0	0	0.95	0.4418604651
2.2	3.82	2.2	0	0	1.27	0.5906976744
2.39	3.36	2.39	0	0	1.79	0.8325581395
2.61	2.8	2.61	0	0	2.41	1.120930233
2.86	2.066	2.86	0	0	2.97	1.381395349
2.971	1.729	2.971	0	0	3.5	1.627906977
3.227	1.108	3.227	0	0	3.97	1.846511628
3.437	0.9	3.437	0	0	4.13	1.920930233
3.626	0.8	3.626	0	0	4.25	1.976744186
3.85	0.721	3.85	0	0	4.33	2.013953488
4.01	0.67	4.01	0	0	4.39	2.041860465
4.19	0.63	4.19	0	0	4.42	2.055813953
4.4	0.6	4.4	0	0	4.45	2.069767442
4.65	0.56	4.65	0	0	4.48	2.08372093
4.79	0.54	4.79	0	0	4.5	2.093023256
4.99	0.52	4.99	0	0	4.53	2.106976744

Como podemos observar la intensidad de la puerta se ajusta perfectamente a lo esperado según los datos teóricos. Esto es que sea 0 debido a que por la puerta del transistor no pasa corriente.

Experimentalmente lo hemos comprobado al medir V_{RG} y ver que siempre era 0. Por tanto, según la ley de Ohm, la intensidad también es 0.

La característica de transferencia del circuito es la siguiente (V_o es V_{DS} y V_i es la entrada)



Se puede observar que sigue el comportamiento esperado de un inversor ya que con una entrada baja correspondiente al 0 lógico devuelve un voltaje alto equivalente al 1 lógico. Y si la entrada es un 1 lógico la salida es un 0 lógico.

Para calcular de manera experimental V_i para cuando el transistor pasa de corte a saturación (V_t) y para cuando pasa de saturación a lineal nos hemos fijado en la gráfica y hemos visto en qué punto cambia de ser una línea recta a curvarse (V_t) y en en qué punto de la curva (más o menos) empieza a cambiar a una función que se acerca al 0 (Saturación a lineal).

De esta forma $V_{TH} = 1.2$ V y $V_{i_{Saturación a lineal}} = 2.86$ V.

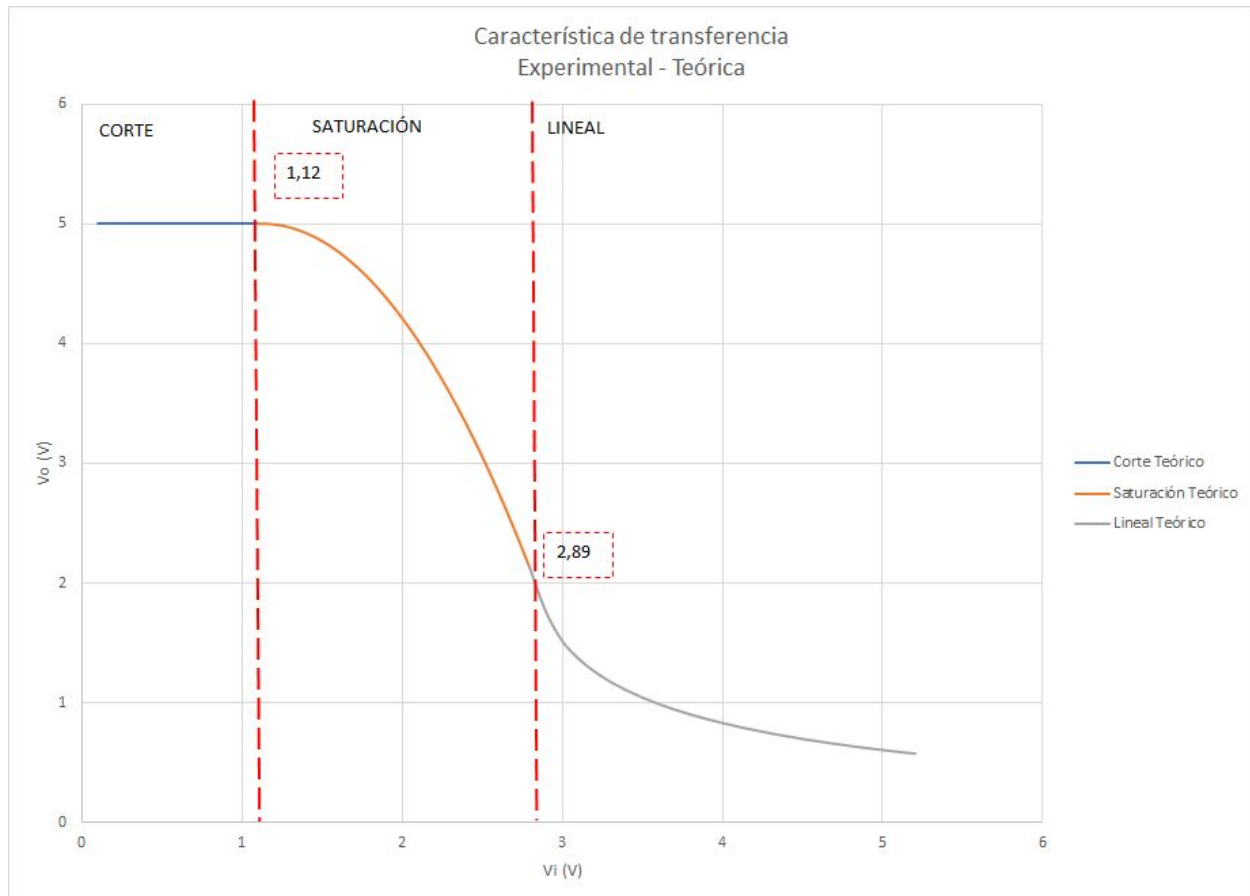
De manera teórica hemos calculado el valor de I_D y la característica de transferencia (V_O frente a V_i). I_D es:

$$I_D = \frac{k}{2} * (2 * V_O * (V_I - V_T) - V_O^2)$$

De esta manera podemos calcular la característica de transferencia utilizando la ecuación de este circuito concreto:

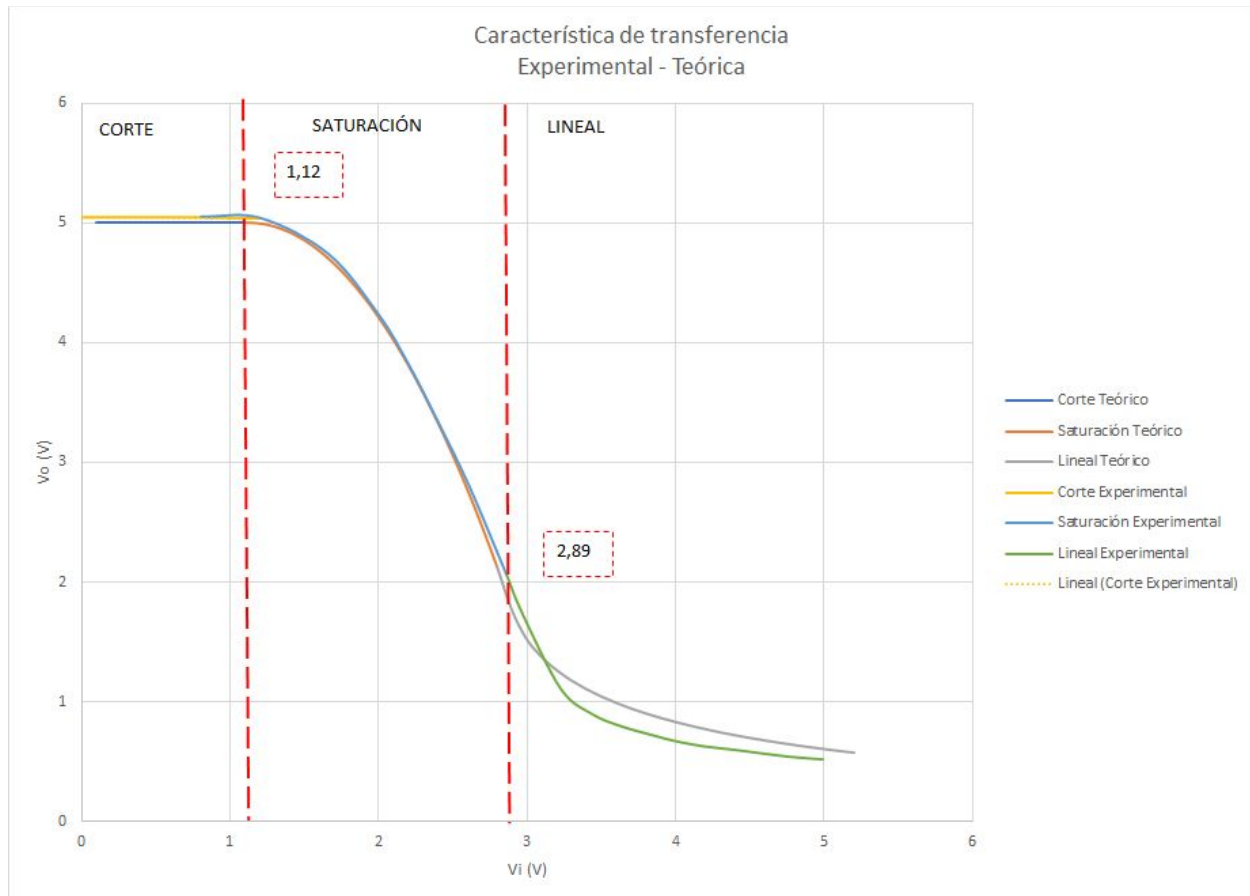
$$V_{DD} = I_D * R_D + V_O \quad ; \quad 5 = I_D * 2150 + V_O$$

Así obtenemos la siguiente característica de transferencia:



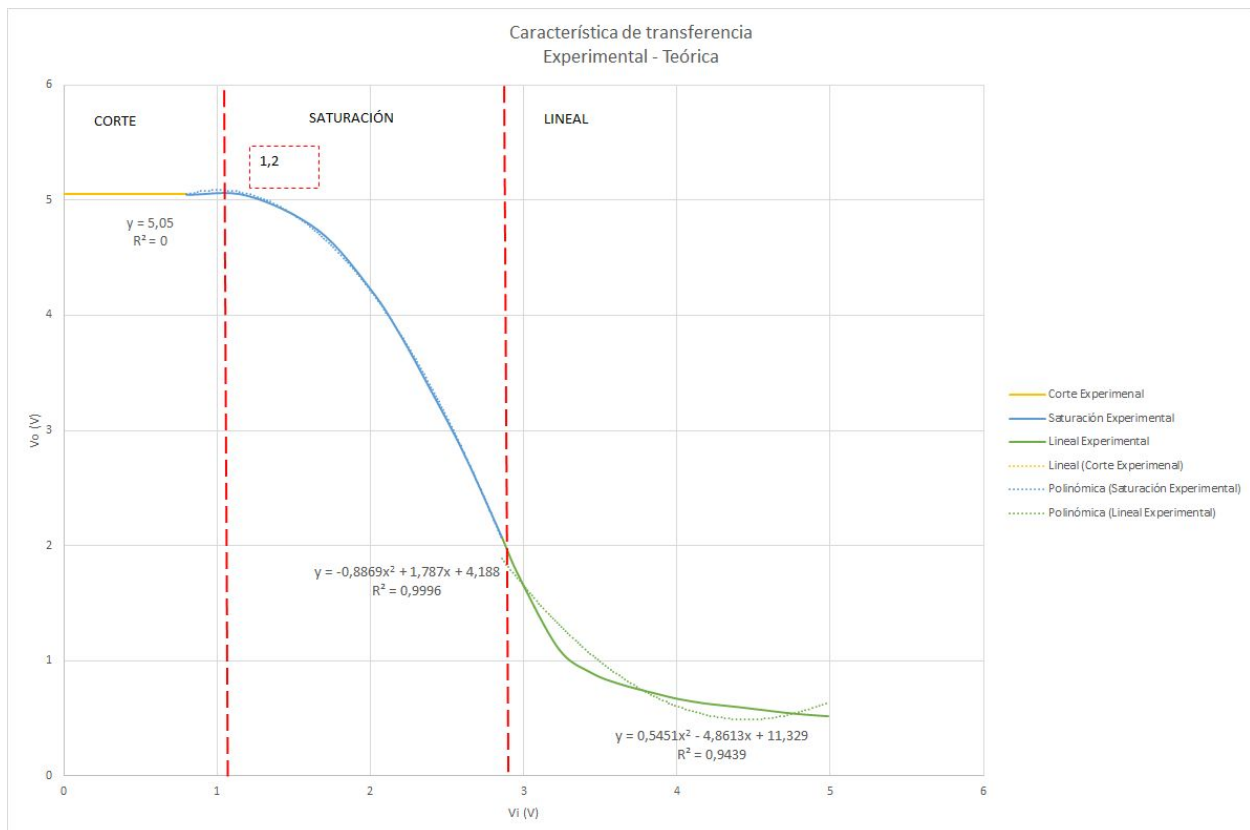
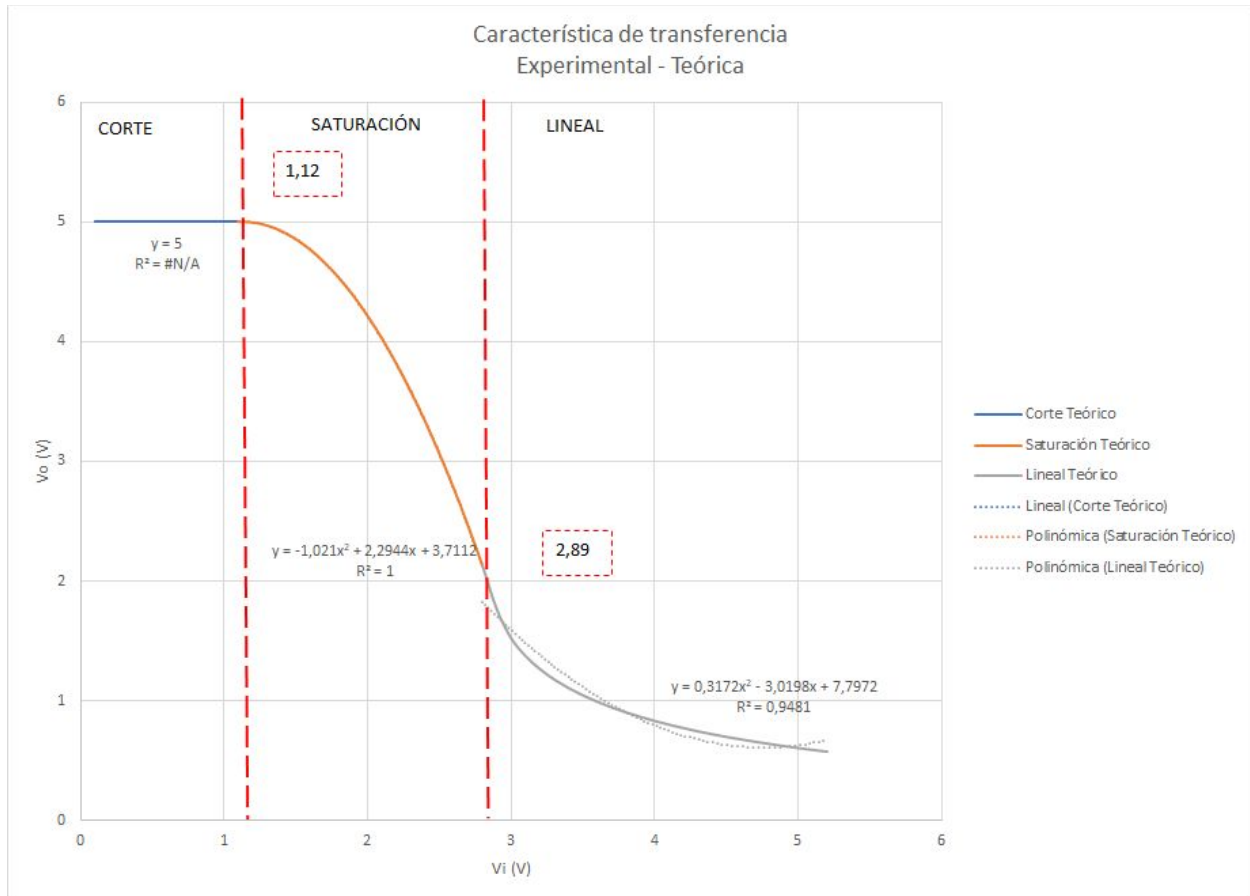
Para calcular V_T hemos usado el ajuste lineal del apartado 8 de esta práctica lo que nos da un resultado de $V_T = 1,12$ V. Para calcular el punto de cambio de saturación a lineal hemos calculado la intersección entre las dos ecuaciones (las igualamos). Esto nos da el resultado $V_{\text{Saturación a lineal}} = 2,89$ V.

Como se puede observar los resultados son muy similares. Tanto el punto de cambio de estados como el comportamiento general del inversor.



Donde más error ha habido ha sido en la región lineal, debido probablemente a algún fallo de cálculo que no logramos encontrar. Por lo general es bastante acertado.

Si realizamos un ajuste por cada tramo (lineal en corte y polinómico en saturación y lineal) podemos ver como es el coeficiente de correlación tanto en el teórico como el práctico.



Como podemos ver el modelo teórico se ajusta de manera perfecta en el estado de saturación con un coeficiente de 1. En la zona lineal se ajusta un poquito peor con un coeficiente de 0.9481.

Por otra parte también podemos observar cómo se ajustan los distintos coeficientes de los estados de la gráfica experimental. 0.9986 en saturación y 0.9439.

De esta forma podemos volver a afirmar que, efectivamente, el modelo teórico es preciso para predecir resultados experimentales. Es decir, los datos experimentales son los esperados.

Montaje 2

Para el montaje de la figura 2 usaremos una resistencia R_D de $2.15k\Omega$.

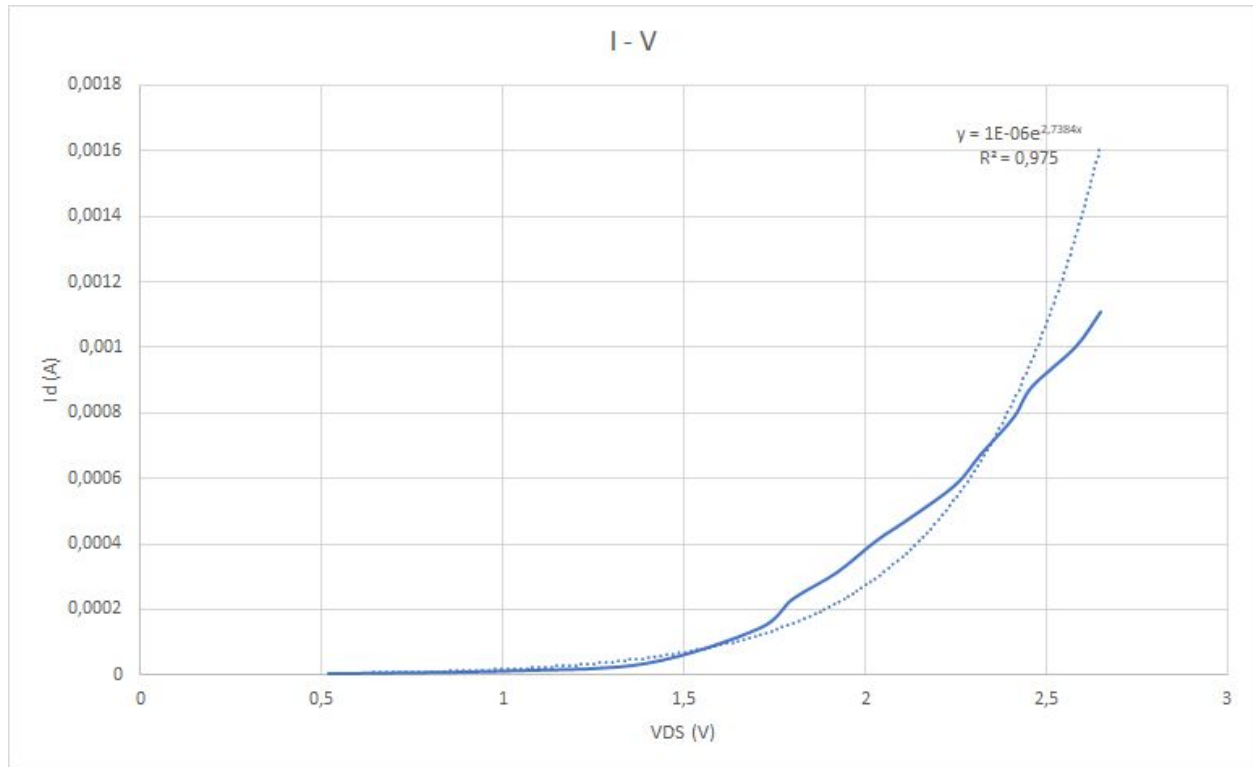
En este caso podemos observar que el transistor MOSFET está siempre en el estado de saturación. Esto se debe a que tiene la puerta y el drenador cortocircuitados. Esto provoca que $V_{GS} = V_{DS}$. Si comparamos esto con la expresión que cumple un transistor en saturación:

$$\text{Saturacion } V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$$

Como $V_{GS} = V_{DS}$ vemos que esta condición se cumple siempre.

Los datos medidos son

V_i	$V_{gs}=V_{ds}(V)$	$V_{rd}(V)$	$I_d(A)$
0	0	0	0
0.52	0.52	0.01	4.65E-01
1.04	1.04	0.03	1.40E+00
1.5	1.4	0.08	3.72E+00
2.07	1.71	0.31	144,186
2.29	1.8	0.5	232,558
2.58	1.92	0.67	311,628
2.89	2.03	0.88	409,302
3.19	2.13	1.04	483,721
3.56	2.25	1.25	581,395
3.81	2.32	1.45	674,419
4.14	2.41	1.69	786,047
4.32	2.46	1.89	87,907
4.775	2.58	2.15	1
5.03	2.65	2.38	1,106,977



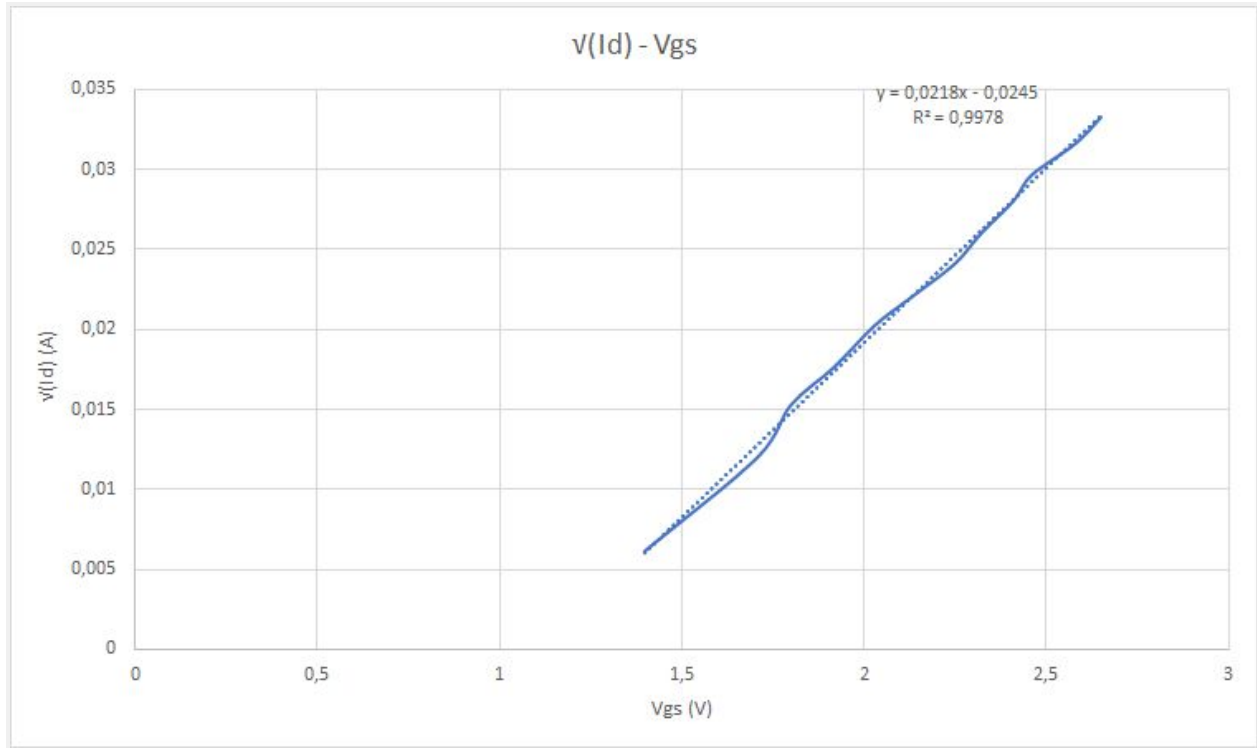
Como el mosfet se encuentra en saturación tenemos que la ecuación de su intensidad es:

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

Haciendo la raíz cuadrada a ambos miembros:

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

De aquí obtenemos que la gráfica representada tendrá pendiente $\sqrt{(k/2)}$ y su ordenada en el origen será $-\sqrt{(k/2)} \cdot V_{TH}$. Despejando de estas expresiones podemos obtener k y la tensión umbral.



V_{TH} (V)	$\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (A/V^2)$	Coefficiente de correlación del ajuste
1.12	0,00095	0.975*

*este es el ajuste de correlación de la relación I - V. El coeficiente de correlación de los ajustes hechos para obtener V_{TH} y k es 0.9978.

Discusión y Conclusión

Los datos obtenidos de las distintas regiones del transistor concuerdan con los datos esperados teóricamente, sin embargo, se aprecian una leve diferencia en el comportamiento del transistor en la zona de cambio de lineal a saturación, que no concuerda tan bien con los datos calculados teóricamente. Esto puede deberse a errores en las medidas experimentales, o a un fallo de cálculo teórico.

Sin embargo, la disparidad solo se da en la zona de transición, a medida que aumenta la tensión, los datos vuelven a coincidir. De ese modo podemos verificar que el modelo teórica realiza una buena aproximación de los datos, y se puede utilizar para predecir el comportamiento del transistor.