

Fundamentos Físicos y Tecnológicos



*Escuela Técnica Superior de Ingenierías
Informática y de Telecomunicación*

Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

Doble Grado en Ingeniería Informática y Matemáticas
Universidad de Granada



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

Eres libre de compartir y redistribuir el contenido de esta obra en cualquier medio o formato, siempre y cuando des el crédito adecuado a los autores originales y no persigas fines comerciales.

Fundamentos Físicos y Tecnológicos

Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

Arturo Olivares Martos

Granada, 2023-2024

Índice general

1. Práctica 3: Medidas en Corriente Alterna	5
1.1. Objetivos	5
1.2. Fundamento Teórico	5
1.3. Material	7
1.4. Desarrollo y resultados	7
1.5. Discusión	8
1.5.1. Frecuencia angular de corte	8
1.5.2. Gráfica de la función de transferencia	9
1.5.3. Pendiente de la zona con frecuencias altas	9
1.6. Conclusiones	11
2. Práctica 4: Caracterización de Circuitos con Diodos	13
2.1. Objetivos	13
2.2. Fundamento Teórico	13
2.3. Material	15
2.4. Desarrollo y resultados	15
2.5. Discusión	17
2.5.1. Curva I-V en un diodo	17
2.5.2. Estudio de la bondad de los modelos de aproximación	19
2.6. Conclusiones	20
3. Práctica 5: Caracterización de Circuitos con MOSFETS	21
3.1. Objetivos	21
3.2. Fundamento Teórico	21
3.3. Material	23
3.4. Desarrollo y resultados	24
3.4.1. Característica de Transferencia	24
3.4.2. Curva I-V de un NMOSFET en saturación	26
3.5. Discusión	26
3.5.1. Curva I-V de un NMOSFET en saturación	26
3.5.2. Característica de transferencia	28
3.6. Conclusiones	28

1. Práctica 3: Medidas en Corriente Alterna

1.1. Objetivos

En esta práctica, se va a aprender a manejar el osciloscopio, y se estudiará un circuito RC. En él, se va a medir la diferencia de potencial en los extremos del condensador en función de la frecuencia de la señal de entrada. Posteriormente, se va a representar la función de transferencia del circuito RC tomando la salida en el condensador.

1.2. Fundamento Teórico

El circuito a tratar en esta sesión es un circuito RC (Figura 1.1). En él, se encuentra una resistencia en serie con un condensador.

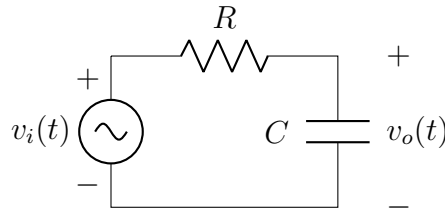


Figura 1.1: Circuito RC

La función de transferencia $T(\omega)$ del circuito toma como entrada el potencial de entrada V_i y como potencial de salida la caída de potencial en el condensador, V_o .

$$T(\omega) = \frac{v_o(\omega)}{v_i(\omega)} \quad (1.1)$$

Como la resistencia y el condensador del circuito están en serie,

$$Z_{eq} = Z_R + Z_C = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1 + j\omega RC}{j\omega C} \quad (1.2)$$

Por tanto, la intensidad de la corriente que circula por el circuito en sentido horario es:

$$i(\omega) = \frac{v_i(\omega)}{Z_{eq}} = v_i(\omega) \frac{j\omega C}{1 + j\omega RC} \quad (1.3)$$

De esta forma, el potencial de salida $v_o(\omega)$ buscado es:

$$v_C(\omega) = i(\omega)Z_C = v_i(\omega) \frac{j\omega C}{1 + j\omega RC} \frac{1}{j\omega C} = v_i(\omega) \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (1.4)$$

Por tanto, la función de transferencia de este circuito queda:

$$T(\omega) = \frac{v_C(\omega)}{v_i(\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (1.5)$$

Como en esta práctica se va a representar el diagrama de Bode en módulo de la función de transferencia, se convierte la expresión compleja de $T(\omega)$ a polar:

$$T(\omega) = \frac{1e^{j0}}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2} e^{j \arctan(\omega RC)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} e^{-j \arctan(\omega RC)} \quad (1.6)$$

Por tanto, la expresión a representar en el eje vertical del diagrama de Bode en módulo es:

$$|T(\omega)|_{dB} = 20 \log(|T(\omega)|) = 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \right) \quad (1.7)$$

Para obtener la frecuencia de corte teórica del circuito, comparamos la función de transferencias obtenida (Ec. 1.5) con la función de transferencia conocida $T(\omega) = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$, donde obtenemos que:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad (1.8)$$

Para obtener la frecuencia de corte experimental, hemos de establecer la condición de $\omega = \omega_0$. Por tanto, como indica la Ec. 1.9, hemos de buscar un valor donde el cociente entre la señal de salida entre la de entrada sea de aproximadamente 0,7.

$$\omega = \omega_0 \implies |T(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0}{\omega_0}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7 \quad (1.9)$$

En la figura 1.2 se puede ver el diagrama de Bode en Módulo de la función de transferencia de este circuito (Ec. 1.5). Como podemos ver, sus propiedades son:

- **Si $\omega \ll \omega_0$** : No se modifica prácticamente la señal de entrada. La pendiente de esta zona es 0.
- **Si $\omega \approx \omega_0$** : La atenuación es de -3 dB.
- **Si $\omega \gg \omega_0$** : La atenuación es cada vez mayor, ya que conforme aumenta la frecuencia disminuye la amplitud del potencial de salida. La pendiente de esta zona es -1 .

Por tanto, como las frecuencias bajas no las modifica, este circuito se llama también **filtro paso baja**.

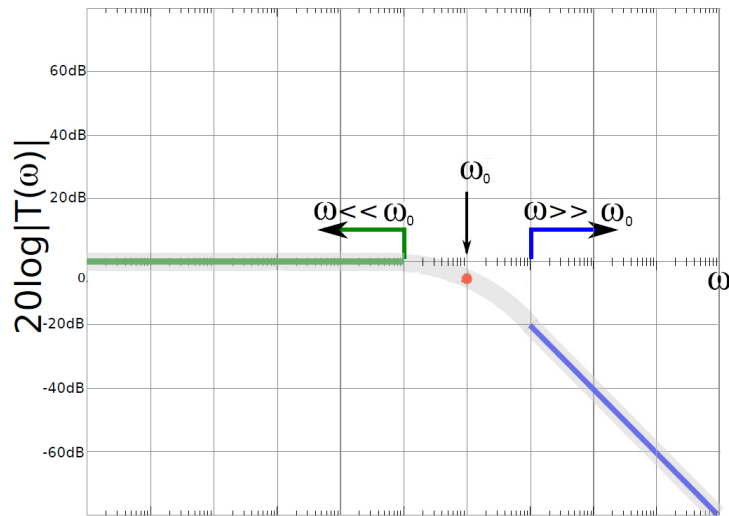


Figura 1.2: Diagrama de bode en módulo de $T(\omega)$

1.3. Material

- Generador de Señales: fuente de tensión de corriente alterna empleada para proporcionarle tensión al circuito RC. El modelo empleado es Agilent 33220A.
- Osciloscopio: dispositivo empleado para realizar diversas medidas en el circuito. Permite ver las señales sinusoidales en pantalla. El modelo empleado es Agilent 54622A.
- Resistencia
- Condensador
- Protoboard

1.4. Desarrollo y resultados

Los valores de los elementos empleados en el circuito son:

- $R = 9,04 \text{ k}\Omega$
- $C = 1,985 \text{ nF}$

Una vez medidos estos, se han medido diversas magnitudes conforme se variaba la frecuencia de la señal de entrada. Los datos obtenidos se muestran en la figura 1.3, donde cada columna representa:

Columna 1: Frecuencia teórica de la señal de entrada $[Hz]$. Dada por el generador de señales.

Columna 2: Frecuencia experimental de la señal de entrada $[Hz]$. Medida por el osciloscopio.

(f^{teo}) [Hz]	(f^{exp}) [Hz]	ω^{exp} [rad/s]	$ V_{ipp} $ [V]	$ V_{opp} $ [V]	$ V_{opp} / V_{ipp} $	$20\log(T(\omega))$ [dB]
100	100	628,319	10,2	10,2	1,00000000	0,00000000
300	300	1884,327	10,3	10,3	1,00000000	0,00000000
500	500	3141,593	10,3	10,2	0,99029126	-0,08474106
700	699	4391,947	10,2	10,3	1,00980392	0,08474106
1000	1000	6283,185	10,0	10,3	1,03000000	0,25674449
3000	3003	18868,405	10,0	9,5	0,95000000	-0,44552789
5000	5000	31415,927	9,8	8,4	0,85714286	-1,33893579
7000	7010	44045,129	9,8	7,4	0,75918367	-2,39306280
7800	7810	49071,677	9,8	7,0	0,71428571	-2,92256071
7900	7910	49699,996	9,8	6,9	0,70510204	-3,03496057
8000	8000	50265,482	10,0	6,9	0,68800000	-3,24823124
8869	8870	55731,854	9,8	6,5	0,66326531	-3,56625438
50000	10000	62831,853	9,8	6,1	0,62551020	-4,07531202
70000	30030	188684,055	9,8	2,6	0,26428571	-11,55852623
78000	50000	314159,265	9,8	1,7	0,16938776	-15,42235975
80000	70200	441079,609	9,8	1,2	0,12448980	-18,09732490
500000	100200	629575,168	9,8	0,9	0,08979592	-20,93486807
700000	299400	1881185,681	9,7	0,3	0,03154639	-30,02100616
780000	500000	3141592,654	9,7	0,2	0,02061856	-33,71483477

Figura 1.3: Datos obtenidos con el circuito RC

Columna 3: Frecuencia angular de la señal de entrada $[\frac{rad}{s}]$. $\omega = 2\pi f$

Columna 4: Potencial de entrada pico a pico (V_{ipp}) [V]. Medido por el osciloscopio.

Columna 5: Potencial de salida pico a pico (V_{opp}) [V]. Medido por el osciloscopio en los extremos del condensador.

Columna 6: Módulo de la función de transferencia $\left(|T(\omega)| = \frac{|V_{opp}|}{|V_{ipp}|}\right)$.

Columna 7: $20\log(|T(\omega)|)$ [dB]. Valores del eje vertical en el diagrama de Bode en módulo de la función de transferencia.

En la figura 1.4 podemos ver el diagrama de Bode en módulo.

1.5. Discusión

1.5.1. Frecuencia angular de corte

En primer lugar, estudiamos la **frecuencia angular de corte**, tanto teórica como experimentalmente.

Según dice la teoría, como se ha visto en la Ec. 1.8, la frecuencia de corte teórica es:

$$\omega_o^{teo} = \frac{1}{RC} = 55727,69 \frac{rad}{s} \quad (1.10)$$

En la práctica, según la Ec. 1.9,

$$\omega_0^{exp} = \omega/|T(\omega)| \approx 0,7 \implies \omega_0^{exp} = 49699,996 \frac{rad}{s}. \quad (1.11)$$

Por tanto, como podemos ver, son resultados muy similares. La frecuencia de corte experimental es menor, lo que podría deberse a pérdidas de energía en las

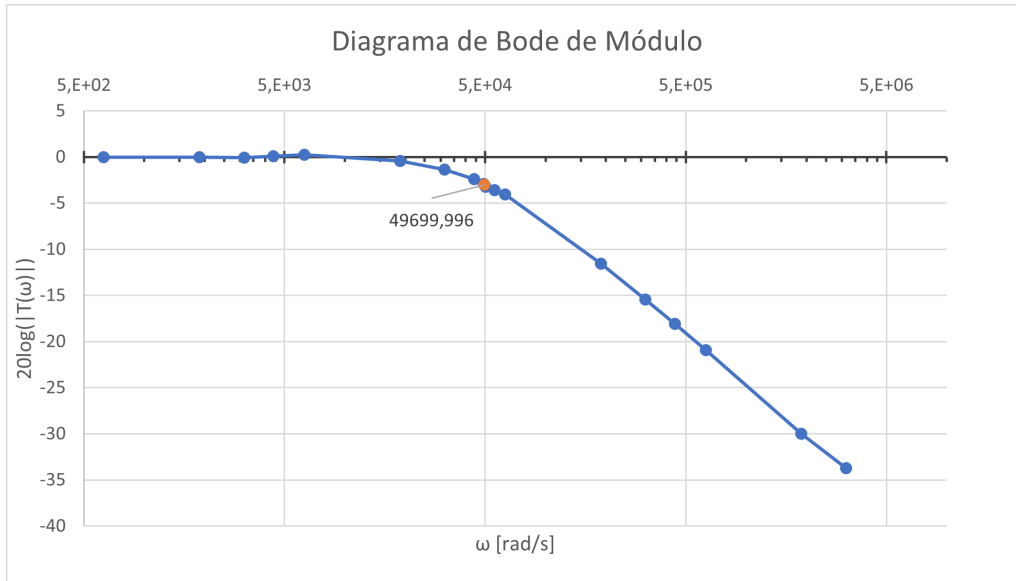


Figura 1.4: Diagrama de Bode en módulo experimental

conexiones de la protoboard, imprecisiones en las mediciones, e incluso a que no se ha obtenido el valor exacto de $1/\sqrt{2}$, sino que se ha aproximado a 0,7.

1.5.2. Gráfica de la función de transferencia

Respecto a la gráfica de la **función de transferencia**, en la figura 1.5 se pueden ver los datos teóricos del módulo de la función de transferencia, y en la figura 1.6 se puede ver una comparación del diagrama de Bode en módulo teórico y experimental. Es fácil ver la teoría se ajusta mucho a lo que sucede en la realidad, ya que ambas gráficas se solapan casi en su totalidad. Además, podemos ver que la frecuencia de corte teórica y experimental, aunque distintas, en el orden de magnitud en cuestión el error es prácticamente insignificante, ya que en la distancia que les separa en la gráfica es despreciable. Por último, vemos que los puntos en los que difieren se encuentran en las frecuencias más altas, y esto se debe a las imprecisiones del osciloscopio al requerir el uso del botón de *trigger*.

1.5.3. Pendiente de la zona con frecuencias altas

Por último, vamos a calcular la pendiente de la zona descendiente del diagrama de Bode, aquella que se da para frecuencias mucho mayores que la de corte. En la figura 1.7, se puede observar que la línea de tendencia logarítmica de la parte en cuestión es $y = -7,44 \ln x + 77,525$. Su coeficiente de correlación, $R^2 = 0,9973$, es cercano a 1, por lo que el ajuste es considerablemente correcto.

Como se desea obtener una recta del tipo $y = m(20 \log x) + n$, usamos el cambio de base para expresar el logaritmo de la línea de tendencia en base decimal.

$$\begin{aligned}
 y &= -7,44 \ln x + 77,525 = -7,44 \frac{\log(x)}{\log(e)} + 77,525 = \\
 &= -17,13 \log x + 77,525 \\
 &= -0,85 (20 \log x) + 77,525
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

(f^{teo}) [Hz]	ω^{teo} [rad/s]	$ T(\omega) $	$20\log(T(\omega))$ [dB]
100	628,319	0,99993645	-0,00055204
300	1884,956	0,99942845	-0,00496588
500	3141,593	0,99841476	-0,01378011
700	4398,230	0,99690001	-0,02696801
1000	6283,185	0,99370391	-0,05486003
3000	18849,556	0,94727854	-0,47044605
5000	31415,927	0,87111361	-1,19850404
7000	43982,297	0,78497352	-2,10289983
7800	49008,845	0,75092414	-2,48807863
7900	49637,164	0,74673400	-2,53668143
8000	50265,482	0,74256118	-2,58535520
8869	55725,570	0,70712024	-3,01013461
8869	55727,690	0,70710680	-3,01029978
50000	314159,265	0,17466010	-15,15612571
70000	439822,972	0,12569984	-18,01330538
78000	490088,454	0,11298139	-18,93986191
80000	502654,825	0,11019158	-19,15703154
100000	628318,531	0,08834657	-21,07620637
300000	1884955,592	0,02955155	-30,58839562
500000	3141592,654	0,01773589	-35,02294262

Figura 1.5: Datos teóricos de este circuito RC

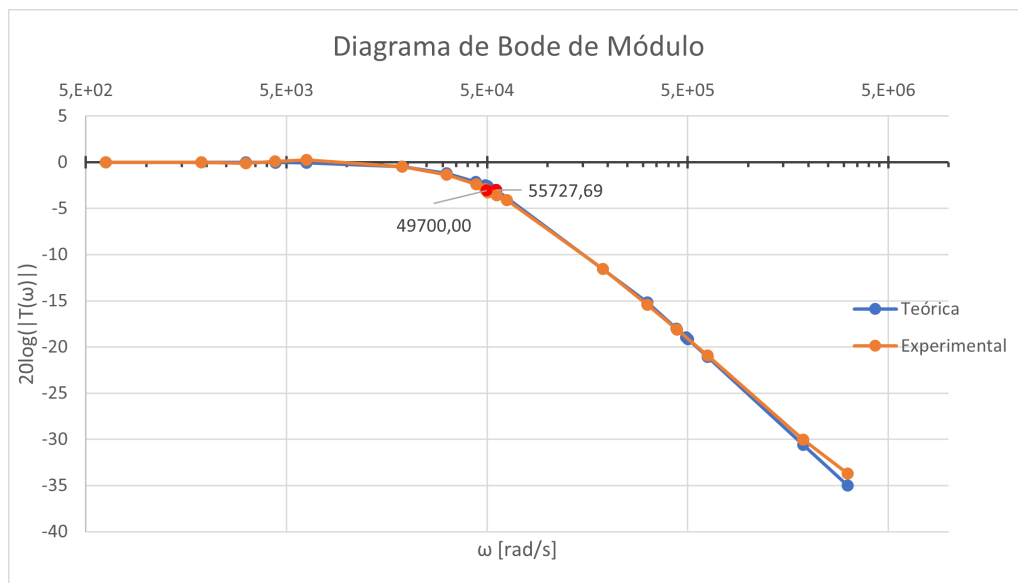


Figura 1.6: Diagrama de Bode en módulo teórico y experimental

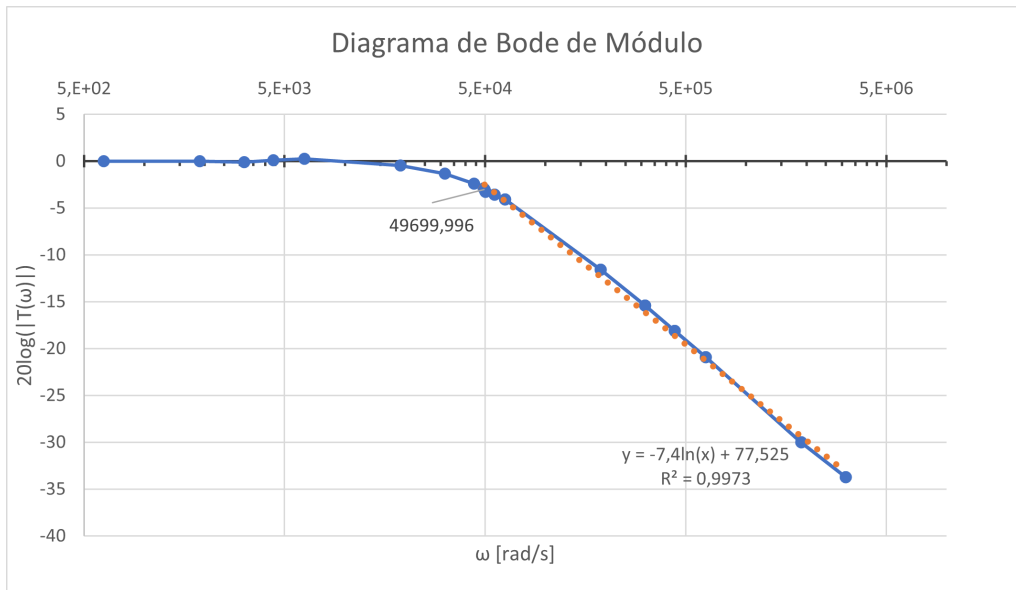


Figura 1.7: Línea de tendencia de las frecuencias altas del D. Bode

Por tanto, la pendiente es $m^{exp} = -0,85$, que difiere de la teórica, que es $m^{teo} = -1$. Esto se puede deber a los puntos últimos de la recta, que como hemos mencionado antes difieren en mayor medida de la teoría.

1.6. Conclusiones

Las conclusiones extraídas de esta práctica de laboratorio son:

- En primer lugar, se aprecia perfectamente que la teoría se ajusta en gran medida a lo que sucede experimentalmente, ya que los resultados que hemos obtenido ya habían sido predichos por la teoría anteriormente. Esto nos permite estudiar este tipo de circuitos teóricamente, sin tener que medir en ellos siempre. Cabe notar que los métodos teóricos utilizados son simplificaciones ideales de lo real, ya que en las medidas interfieren otros factores como el ruido o los errores de precisión humanos.
- En base a los resultados obtenidos, también se puede deducir que, en valores más límite como frecuencias muy altas, la teoría y lo experimental difieren más, y esto puede tener muchos motivos diversos. El más factible podría ser errores de precisión en los dispositivos empleados, como el error en el osciloscopio previamente mencionado.
- Por último, se ha podido comprobar que el circuito RC tomando como salida el condensador es, efectivamente, un filtro paso bajo, ya que solo deja pasar las frecuencias bajas y, sin embargo, atenúa en gran medida las frecuencias altas. Esto tendrá diversas aplicaciones en la ingeniería, como los ecualizadores de sonido.

2. Práctica 4: Caracterización de Circuitos con Diodos

2.1. Objetivos

En esta práctica, vamos a obtener la relación entre la caída de tensión y la corriente en un diodo. Esto lo haremos estudiando el comportamiento de un diodo en un circuito sencillo.

2.2. Fundamento Teórico

La relación entre la caída de tensión y la corriente en un diodo viene dada por la siguiente expresión:

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV_d}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

siendo:

- I : La intensidad de la corriente que atraviesa el diodo.
- V_d : La diferencia de tensión entre los extremos del diodo.
- I_s : La corriente de saturación inversa, característica de cada diodo.
- q : La carga del electrón ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).
- T : La temperatura de la unión, característica de cada diodo. $[K]$.
- k : La constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).
- n : El índice de idealidad, que suele adoptar valores entre 1 (para el germanio) y del orden de 2 (para el silicio).

Debido a la complejidad de esa expresión, donde con frecuencia aparecerían ecuaciones trascendentales, se hace uso de dos métodos.

El primer método, reflejado en la figura 2.1, indica que el diodo conduce o no en función de una tensión umbral, V_γ . Si conduce, este se sustituye por una fuente de tensión en serie con una resistencia; y en caso contrario se sustituye por un circuito abierto.

El segundo método, aun más sencillo y reflejado en la figura 2.2, indica igualmente que el diodo conduce o no en función de una tensión umbral, V_γ . Este método indica

$$\text{Diodo} = \begin{cases} \text{---} \bullet & \bullet \text{---} \quad si \quad V_i < V_\gamma \\ V_\gamma & \\ \text{---} | \text{---} \text{---} r_d & si \quad V_i \geq V_\gamma \end{cases}$$

$$I_d = \begin{cases} 0 & si \quad V_i < V_\gamma \\ \frac{V_d}{r_d} & si \quad V_i \geq V_\gamma \end{cases}$$

$$V_d = \begin{cases} V_i & si \quad V_i < V_\gamma \\ \frac{r_d}{r_d + R} V_i + \frac{R}{r_d + R} V_\gamma & si \quad V_i \geq V_\gamma \end{cases}$$

Figura 2.1: Método 1 de simplificación

$$\text{Diodo} = \begin{cases} \text{---} \bullet & \bullet \text{---} \quad si \quad V_i < V_\gamma \\ V_\gamma & \\ \text{---} | \text{---} & si \quad V_i \geq V_\gamma \end{cases}$$

$$I_d = \begin{cases} 0 & si \quad V_i < V_\gamma \\ V_d & si \quad V_i \geq V_\gamma \end{cases}$$

$$V_d = \begin{cases} V_i & si \quad V_i < V_\gamma \\ V_\gamma & si \quad V_i \geq V_\gamma \end{cases}$$

Figura 2.2: Método 2 de simplificación

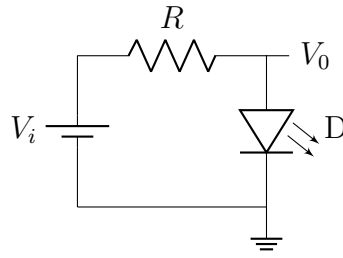


Figura 2.3: Montaje Experimental

que, si el diodo conduce, este se sustituye por una fuente de tensión; y en caso contrario se sustituye por un circuito abierto.

Para estudiar el comportamiento del diodo, vamos a montar el circuito de la figura 2.3 y representaremos la característica de transferencia tomando como entrada V_i y como salida $V_0 (= V_d)$.

2.3. Material

- Fuente de alimentación: fuente de tensión de corriente continua empleada para proporcionarle tensión al circuito. El modelo empleado es FAC-363B.
- Polímetro digital: dispositivo empleado para realizar diversas medidas en el circuito. Es usado principalmente en corriente continua para medir la resistencia, diferencia de potencial o capacidad de un condensador, por ejemplo.
- Resistencia
- Diodo LED diodo que se ilumina cuando conduce. En la figura 2.4 se aprecia que la patilla larga es la parte P.



Figura 2.4: Diodo Led

- Protoboard

2.4. Desarrollo y resultados

El valor de la resistencia empleada en el circuito es:

- $R = 992 \, \Omega$

Una vez medidos estos, se han medido diversas magnitudes conforme se variaba el valor de V_i , el potencial de entrada. Los datos obtenidos se muestran en la figura 2.5, donde cada columna representa:

Columna 1: Potencial de entrada teórico (V_i^{teo}) [V]. Dado por la fuente de alimentación.

Columna 2: Potencial de entrada real (V_i^{exp}) [V]. Medido con el polímetro.

Columna 3: Caída de potencial en el diodo [V]. Medido con el polímetro.

Columna 4: Caída de potencial en la resistencia [V]. Medido con el polímetro.

Columna 5: Intensidad que circula por la malla [A]. Calculada como $I = \frac{V_r}{R}$

(V_i) [V]	(V_i^{exp}) [V]	(V_d^{exp}) [V]	(V_r^{exp}) [V]	$I^{calculada}$ [A]
0,0	0,005	0,005	0,000	0,00000
0,2	0,200	0,200	0,000	0,00000
0,4	0,460	0,460	0,000	0,00000
0,6	0,591	0,591	0,000	0,00000
0,8	0,870	0,870	0,000	0,00000
1,0	1,062	1,062	0,000	0,00000
1,2	1,268	1,268	0,000	0,00000
1,4	1,437	1,434	0,004	0,00000
1,6	1,655	1,569	0,085	0,00009
1,8	1,882	1,622	0,259	0,00026
2,0	2,015	1,640	0,375	0,00038
2,2	2,227	1,661	0,565	0,00057
2,4	2,471	1,678	0,792	0,00080
2,6	2,618	1,687	0,931	0,00094
2,8	2,843	1,699	1,144	0,00115
3,0	3,081	1,710	1,371	0,00138
3,2	3,242	1,716	1,525	0,00154
3,4	3,472	1,725	1,747	0,00176
3,6	3,645	1,732	1,914	0,00193

Figura 2.5: Datos obtenidos en el circuito de la figura 2.3.

En la figura 2.6 se observa cómo varía la intensidad de un circuito en función de V_d . Solo se representan los valores para los que el diodo conduce.

En la figura 2.7 se muestra la característica de transferencia del circuito tomando como entrada el potencial suministrado por la fuente de tensión y como salida la caída de voltaje en el diodo.

2.5. Discusión

2.5.1. Curva I-V en un diodo

En primer lugar, se ha representado la intensidad que circula por un diodo frente a la caída de potencial en este (figura 2.6). Solo se han representado los valores para los que circula corriente, ya que para evitar resolver ecuaciones trascendentales vamos a aproximar la expresión teórica:

$$I_d \approx I_s e^{\frac{qV_d}{nkT}} \quad (2.2)$$

Tras obtener la línea de tendencia exponencial¹, vemos que:

$$I_d \approx I_s e^{\frac{qV_d}{nkT}} \approx 9 \cdot 10^{-18} e^{19,117V_d} \quad (2.3)$$

Por tanto,

$$\blacksquare I_s = 9 \cdot 10^{-18} \text{ A}$$

¹Coef. de correlación $R^2 = 0,9941$ cercano a 1, luego el ajuste es suficientemente preciso.

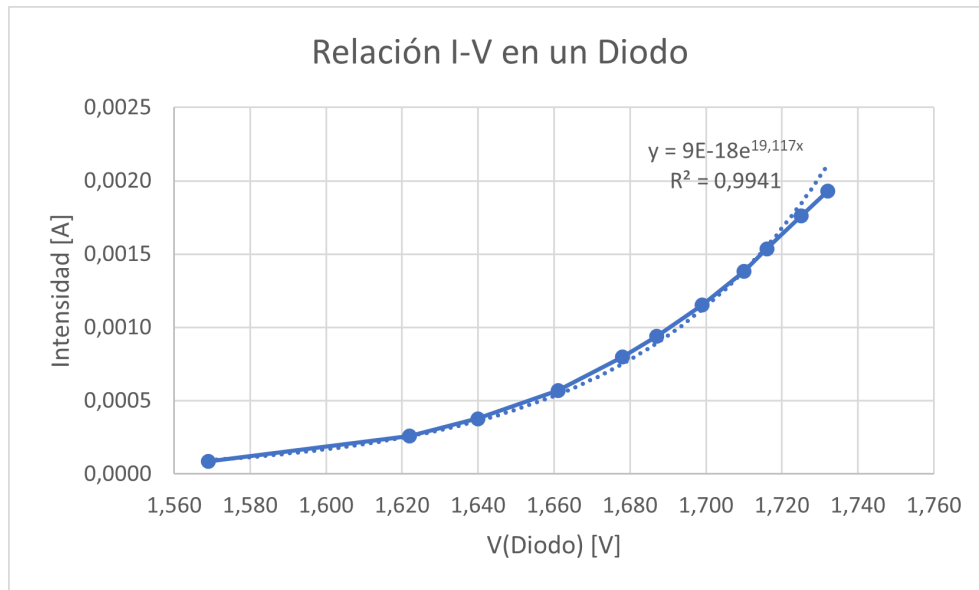
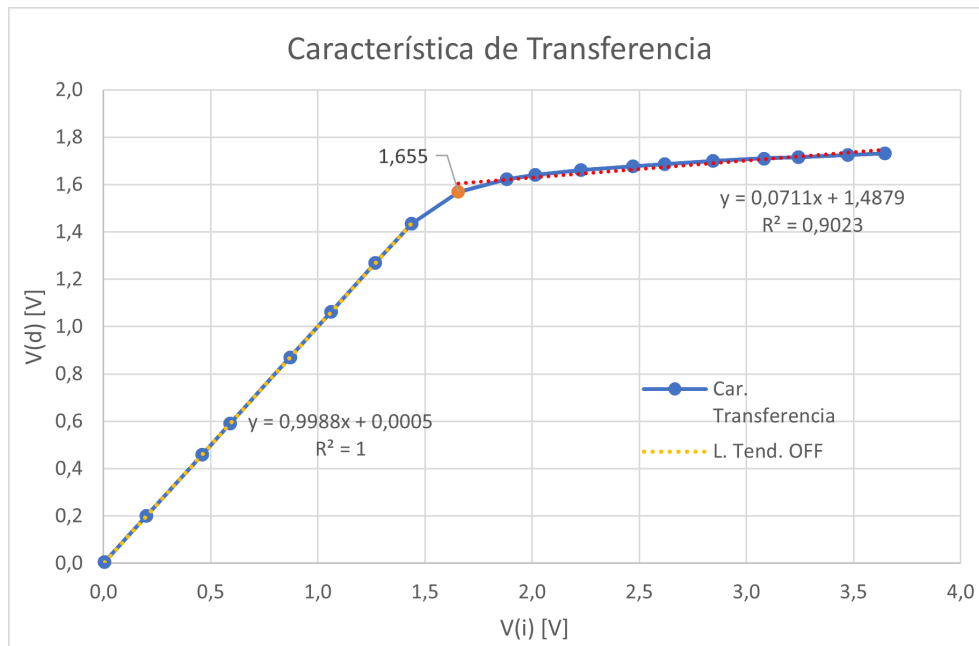


Figura 2.6: Relación I-V en un diodo.

Figura 2.7: Característica de transferencia del circuito tomando como salida V_d .

- $\frac{q}{nkT} = 19,117$. Como $T = 19^\circ C = 292,15 K$,

$$n = \frac{q}{kT \cdot 19,117} = 2,07$$

Como vemos, $n \approx 2$, lo que nos indica que el diodo LED posiblemente sea de silicio. Los resultados obtenidos concuerdan con la teoría ya que la relación se ajusta de manera correcta ($R^2 \approx 1$) a la relación I-V definida en la Ec. 2.1.

2.5.2. Estudio de la bondad de los modelos de aproximación

A partir de la figura 2.5, vemos que, para este diodo, $V_\gamma \approx 1,6 V$. Por tanto, se representa la característica de transferencia tomando como salida V_d y se obtienen las tendencias lineales de ambos tramos, cuando el diodo está encendido y cuando está apagado. Estos resultados se encuentran en la figura 2.7.

Si $V_i < V_\gamma$ En este caso $I = 0A$, luego el diodo está apagado. Diodo OFF.

$$V_d = 0,9988 V_i + 0,0005 \quad (2.4)$$

Como $R^2 = 1$, el ajuste es prácticamente perfecto.

1. **Modelo 1** (Figura 2.1).

Este modelo afirma que, en este caso, $V_d = V_i$, ya que el diodo se sustituye por un circuito abierto por lo que no circula corriente. Como $m = 0,9988 \approx 1$ y $n = 0,0005 \approx 0$, este modelo es válido en este tramo, ya que los resultados que predice teóricamente se ajustan muy fielmente a lo que ocurre en la realidad.

2. **Modelo 2** (Figura 2.2).

Como en este caso afirma lo mismo que en el primer modelo, este es igualmente válido.

Si $V_i \geq V_\gamma$ En este caso $I \neq 0A$, luego el diodo está encendido. Diodo ON.

$$V_d = 0,0711 V_i + 1,4879 \quad (2.5)$$

Como $R^2 = 0,9023$, el ajuste no es ideal pero los resultados serán coherentes.

1. **Modelo 1** (Figura 2.1).

Este modelo afirma que, en este caso, $V_d = \frac{r_d}{r_d + R} V_i + \frac{R V_\gamma}{r_d + R}$. Por tanto,

$$\frac{V_\gamma R}{r_d + R} = 1,4879 \implies r_d = 1,4879 \frac{R + r_d}{R} = 75,92 \Omega$$

$$\frac{r_d}{r_d + R} = 0,0711 \implies V_\gamma = 0,0711 \frac{R}{1 - 0,0711} = 1,601 V$$

Por tanto, con $r_d = 75,92 \Omega$ y $V_\gamma = 1,601 V$ este modelo se ajusta a lo que ocurre en la realidad, ya que coincide con la línea de tendencia. Además, Se cumple que $V_\gamma \approx 1,6 V$, como habíamos predicho.

2. **Modelo 2** (Figura 2.2).

Este modelo afirma que, en este caso, $V_d = V_\gamma$. Por tanto, este modelo es válido solo si $0,0711 \approx 0$ y $1,4879 \approx V_\gamma$. Como vemos, este modelo se ajusta peor a la realidad, ya que no es una recta totalmente horizontal (como predice esta simplificación) sino que tiene cierta pendiente. Esto provoca también que V_γ sea mayor que la que este modelo predice.

2.6. Conclusiones

Las conclusiones extraídas de esta práctica de laboratorio son:

- En primer lugar, podemos ver que gracias a la investigación se tienen modelos de simplificación que, aunque no representan perfectamente lo que ocurre en realidad, nos aportan resultados coherentes, fiables y similares a los reales facilitándonos en gran medida los cálculos, por lo que son muy útiles.
- En base a los resultados obtenidos, también se puede deducir que, existe un valor umbral, V_γ , a partir del cual el diodo pasa a conducir una corriente insignificante a conducir de manera proporcional a la diferencia de potencial. Además, en la característica de transferencia también se aprecia a la perfección que, una vez el diodo conduce, la caída de potencial en sus extremos se estabiliza en cierta medida en ese valor umbral.
- Por último, se ha podido comprobar la característica del diodo como *semiconductor*, ya que en función del potencial de entrada se ha podido observar que conduce o no.

3. Práctica 5: Caracterización de Circuitos con MOSFETS

3.1. Objetivos

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

3.2. Fundamento Teórico

Un transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) es un semiconductor con tres terminales:

1. Puerta (G del inglés *gate*)
2. Drenador (D del inglés *drain*)
3. Fuente (S del inglés *source*)

La corriente que circula entre la fuente y el drenador se controla mediante el terminal de la puerta. Además, se distinguen dos tipos: los tipo N o NMOSFET (unión NPN) y los tipos P o PMOSFET (unión PNP). En cuanto a su funcionamiento, los transistores se pueden encontrar en tres regiones distintas de funcionamiento:

1. Región de Corte En esta región de funcionamiento, el transistor no conduce, luego $I_d = 0$ A. La condición necesaria para este modo es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Corte} &\iff V_{GS} < V_T \\ I_d &= 0 \text{ A} \end{aligned} \tag{3.1}$$

donde V_T representa la tensión umbral y es característica de cada transistor.

2. Región Lineal En esta región de funcionamiento, el transistor sí conduce. Las ecuaciones que describen este modo son:

$$\begin{aligned} \text{Lineal} &\iff \begin{cases} V_{GS} \geq V_T \\ V_{DS} < (V_{GS} - V_T) \end{cases} \\ I_d &= \frac{k}{2} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \end{aligned} \tag{3.2}$$

donde k es la transconductancia del transistor, característica del mismo.

3. Región de Saturación En esta región de funcionamiento, el transistor sí conduce. Las ecuaciones que describen este modo son:

$$\begin{aligned} \text{Saturación} &\iff \begin{cases} V_{GS} \geq V_T \\ V_{DS} \geq (V_{GS} - V_T) \end{cases} \\ I_d &= \frac{k}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Para ver la característica de transferencia de un transistor NMOSFET, se va a trabajar con el circuito de la figura 3.1 con la entrada en V_i y salida en $V_0 (= V_{DS})$. Este circuito es el de un **inversor**, ya que para potenciales de entrada altos, el potencial de salida será bajo y viceversa. La ecuación de V_0 es:

1. Corte ($V_i < V_T$)

$$V_0 = V_{DD}$$

2. Saturación ($V_i > V_T$)

$$V_0 = V_{DD} - \frac{k R_D}{2} (V_i - V_T)^2$$

3. Lineal ($V_i \gg V_T$)

$$V_0 = \frac{1 + k R_D (V_i - V_T)}{k R_D} - \frac{\sqrt{(1 + k R_D (V_i - V_T))^2 - 2 k R_D V_{DD}}}{k R_D}$$

Además, sean V_i^* y V_0^* los valores de transición de saturación a lineal.

$$V_i^* = V_0^* + V_T = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2 k R_D V_{DD}}}{k R_D} + V_T \quad (3.4)$$

Por tanto, según la teoría respecto al circuito 3.1,

$$V_0(V_i) = \begin{cases} V_{DD} & \text{si } V_i < V_T \\ V_{DD} - \frac{k R_D}{2} (V_i - V_T)^2 & \text{si } V_T \leq V_i \leq V_i^* \\ \frac{1 + k R_D (V_i - V_T)}{k R_D} - \frac{\sqrt{(1 + k R_D (V_i - V_T))^2 - 2 k R_D V_{DD}}}{k R_D} & \text{si } V_i^* < V_i \end{cases} \quad (3.5)$$

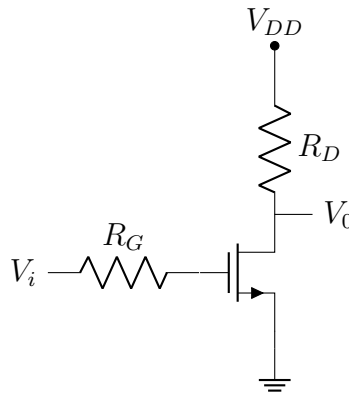


Figura 3.1: Montaje Experimental para la medida de la característica de transferencia de un NMOSFET

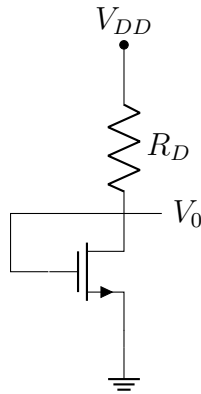


Figura 3.2: Montaje Experimental para la medida de la característica I-V de un NMOSFET

Para ver la característica I-V de un transistor NMOSFET en saturación, se va a trabajar con el circuito de la figura 3.2. Este se encuentra en saturación al tener la puerta y drenador cortocircuitados. El potencial medido es V_0 ($= V_{DS} = V_{GS}$).

3.3. Material

- Fuente de alimentación: fuente de tensión de corriente continua empleada para proporcionarle tensión al circuito. El modelo empleado es FAC-363B.
- Polímetro digital: dispositivo empleado para realizar diversas medidas en el circuito. Es usado principalmente en corriente continua para medir la resistencia, diferencia de potencial o capacidad de un condensador, por ejemplo.
- Resistencias
- Circuito integrado 4007 este circuito integrado contiene 6 transistores MOSFET, tres de canal N y tres de canal P. Como se ve en la figura 3.3, los tres de abajo son los de tipo N, por lo que se usará uno de ellos.
- Protoboard



Figura 3.3: Circuito integrado 4007

3.4. Desarrollo y resultados

3.4.1. Característica de Transferencia

Se ha montado el circuito de la figura 3.1, donde los valores de los elementos empleados en él son:

- $R_D = 0,998 \text{ k}\Omega$
- $R_G = 0,99 \text{ M}\Omega$
- $V_{DD} \approx 15 \text{ V}$

Una vez medidas estas, se han medido diversas magnitudes conforme se variaba el valor de V_i , el potencial de entrada. Los datos obtenidos se muestran en la figura 3.4, donde cada columna representa:

Columna 1: Potencial de entrada teórico (V_i^{teo}) [V]. Dado por la fuente de alimentación.

Columna 2: Potencial de entrada real (V_i^{exp}) [V]. Medido con el polímetro.

Columna 3: Caída de potencial en entre la puerta y la fuente del transistor (V_{GS}) [V]. Medido con el polímetro.

Columna 4: Caída de potencial en entre el drenador y la fuente del transistor (V_{DS}) [V]. Medido con el polímetro.

Columna 5: Caída de potencial en la resistencia de la puerta (V_{RG}) [V]. Medido con el polímetro.

Columna 6: Caída de potencial en la resistencia del drenador (V_{RD}) [V]. Medido con el polímetro.

Columna 7: Intensidad que circula por la puerta [A].

Calculada como $I_G = \frac{V_{RG}}{R_G}$.

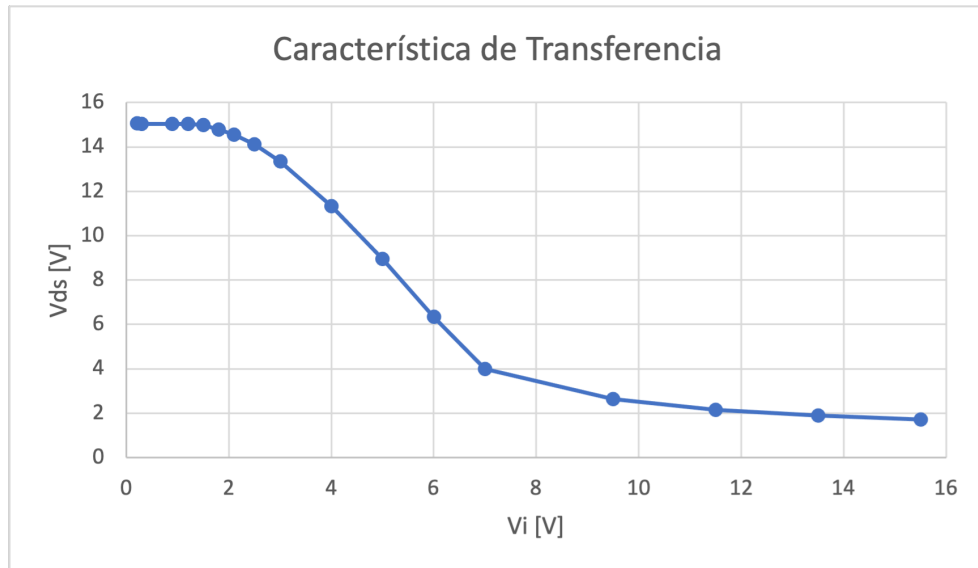
Columna 8: Intensidad que circula entre el drenador y la fuente [A].

Calculada como $I_D = \frac{V_{RD}}{R_D}$.

En la figura 3.5 se observa la característica de transferencia del circuito 3.1 tomando como entrada el potencial en la puerta $V_i = V_G$, y como salida el potencial en el drenador $V_0 = V_D$.

(V_i) [V]	(V_i^{exp}) [V]	(V_{GS}) [V]	(V_{DS}) [V]	(V_{RG}) [V]	(V_{RD}) [V]	I_G [A]	I_D [A]
0,2	0,231	0,220	15,050	0,000	0,000	0,000	0,000
0,3	0,331	0,315	15,040	0,000	0,000	0,000	0,000
0,9	0,941	0,896	15,040	0,000	0,000	0,000	0,000
1,2	1,234	1,177	15,030	0,000	0,005	0,000	0,000
1,5	1,548	1,478	14,980	0,000	0,070	0,000	0,000
1,8	1,878	1,791	14,790	0,000	0,253	0,000	0,000
2,1	2,147	1,050	14,560	0,000	0,487	0,000	0,000
2,5	2,519	2,404	14,120	0,000	0,920	0,000	0,001
3,0	3,027	2,887	13,360	0,000	1,680	0,000	0,002
4,0	4,060	3,870	11,320	0,000	3,710	0,000	0,004
5,0	5,060	4,820	8,950	0,000	6,080	0,000	0,006
6,0	6,040	5,750	6,330	0,000	8,700	0,000	0,009
7,0	7,010	6,680	4,000	0,000	11,240	0,000	0,011
9,5	9,362	9,352	2,637	0,000	12,925	0,000	0,013
11,5	11,462	11,435	2,144	0,000	13,384	0,000	0,013
13,5	13,513	13,410	1,883	0,000	13,528	0,000	0,014
15,5	15,454	15,410	1,716	0,000	13,642	0,000	0,014

Figura 3.4: Datos obtenidos en el circuito de la figura 3.1.

Figura 3.5: Característica de Transferencia del circuito 3.1 tomando como salida V_{DS}

$(V_i^{exp}) [V]$	$(V_{GS} = V_{DS}) [V]$	$(V_{RD}) [V]$	$I_D [A]$	$Sqrt(I_D)$
0,573	0,573	0,012	0,000	0,003
1,041	1,041	0,015	0,000	0,004
2,678	2,291	0,349	0,000	0,019
2,940	2,433	0,468	0,000	0,022
3,285	2,606	0,635	0,001	0,025
3,600	2,748	0,798	0,001	0,028
3,882	2,877	0,948	0,001	0,031
4,182	3,000	1,117	0,001	0,033
4,552	3,155	1,324	0,001	0,036
4,911	3,328	1,546	0,002	0,039
5,200	3,413	1,723	0,002	0,042

Figura 3.6: Datos obtenidos en el circuito de la figura 3.2.

3.4.2. Curva I-V de un NMOSFET en saturación

Se ha montado el circuito de la figura 3.2, donde el valor de R_D es el mismo que en el circuito anterior.

- $R_D = 0,998 \text{ k}\Omega$

Posteriormente, se han medido diversas magnitudes conforme se variaba el valor de V_i , el potencial de entrada. Los datos obtenidos se muestran en la figura 3.6, donde cada columna representa:

Columna 1: Potencial de entrada real (V_i^{exp}) [V]. Medido con el polímetro.

Columna 2: Caída de potencial en entre la puerta y la fuente del transistor (V_{GS}) [V]. Medido con el polímetro. Este es igual a la caída de potencial entre el drenador y la fuente, al estar drenador y puerta cortocircuitados ($V_{GS} = V_{DS}$).

Columna 3: Caída de potencial en la resistencia del drenador (V_{RD}) [V]. Medido con el polímetro.

Columna 4: Intensidad que circula entre el drenador y la fuente [A].
Calculada como $I_D = \frac{V_{RD}}{R_D}$.

Columna 5: Raíz cuadrada de la intensidad que circula entre el drenador y la fuente ($\sqrt{I_D}$).

En la figura 3.7 se representa la relación entre V_{GS} e I_D en un transistor NMOSFET en saturación (circuito de la figura 3.2). Como se desea que el transistor esté en saturación, no se representan los valores para los que el transistor está en corte, es decir, el valor de I_D sea despreciable.

3.5. Discusión

3.5.1. Curva I-V de un NMOSFET en saturación

En esta parte de la práctica, se ha representado la intensidad que circula por el transistor frente a el potencial de entrada $V_i = V_{GS}$. Tan solo se han representado

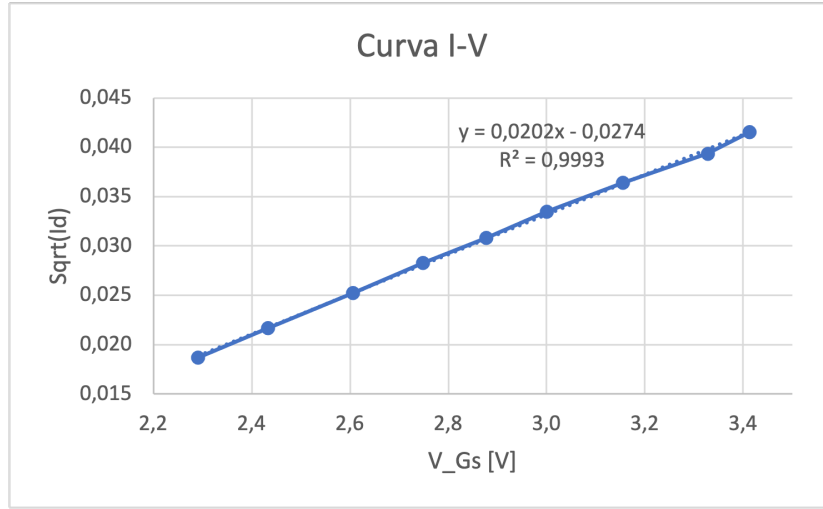


Figura 3.7: Característica de Transferencia del circuito 3.2 tomando como salida V_{DS} .

aquellos valores para los que el transistor está en saturación, por lo que, teóricamente (ver Ec. 3.3):

$$\begin{aligned}
 I_d &= \frac{k}{2}(V_{GS} - V_T)^2 \implies \sqrt{I_d} = \sqrt{\frac{k}{2}} (V_{GS} - V_T) \\
 &= \sqrt{\frac{k}{2}} V_{GS} - \sqrt{\frac{k}{2}} V_T
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Tras obtener la línea de tendencia lineal de la figura 3.7 con $R^2 = 0,993 \approx 1$ (muy fiable), vemos que:

$$I_d \approx 0,0202 V_{GS} - 0,0274 \tag{3.7}$$

Por tanto,

$$\begin{aligned}
 \sqrt{\frac{k}{2}} &\approx 0,0202 \implies k \approx 0,0202^2 \cdot 2 = 8,1608 \cdot 10^{-4} \text{ A/V} \\
 \sqrt{\frac{k}{2}} V_T &\approx 0,0274 \implies V_T \approx \frac{0,0274}{\sqrt{\frac{k}{2}}} = 1,35 \text{ V}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Por tanto, los datos obtenidos experimentalmente para este diodo son:

- $k \approx 8,1608 \cdot 10^{-4} \text{ A/V}^2$
- $V_T \approx 1,35 \text{ V}$

Estos resultados son razonables, ya que están en el orden de magnitud esperado. Además, en la figura 3.6 se aprecia cómo $I_G = 0$, ya que, como predice la teoría, por la puerta del transistor la intensidad es siempre nula.

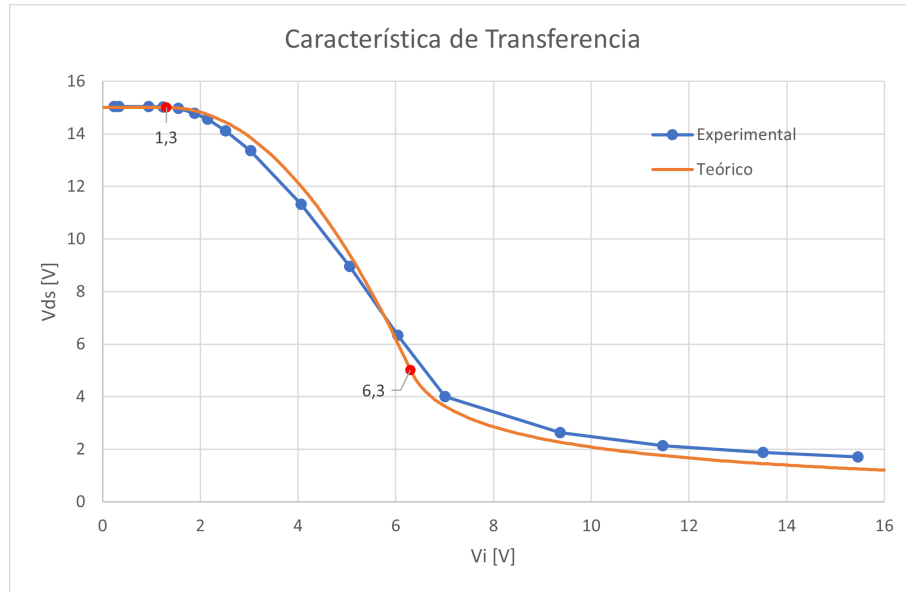


Figura 3.8: Característica de transferencia teórica del circuito 3.1.

3.5.2. Característica de transferencia

Según el apartado anterior, $V_T = 1,35 \text{ V}$, valor para el cual el transistor pasa de estar en corte al estado de saturación. El valor para el cual pasa de saturación a la región lineal es V_i^* , que tomando los datos del apartado anterior y la ecuación 3.4, $V_i^* = 6,31 \text{ V}$.

Por tanto, en la figura 3.8 se representa la característica de transferencia teórica calculada en la ecuación 3.5, donde se han resaltado los puntos en los que el transistor cambia de estado. Como podemos ver, la gráfica experimental se asemeja considerablemente a lo que predice la teórica. Sí es verdad que no coincide exactamente, pero se debe a que al estar trabajando con una magnitud de orden tan pequeña, cualquier pequeño cambio destaca considerablemente.

3.6. Conclusiones

Las conclusiones extraídas de esta práctica de laboratorio son:

- En primer lugar, el circuito con un transistor tipo N y una resistencia como carga en el drenador (circuito 3.5) se ha visto que se comporta como un inversor. Este es fundamental en la electrónica digital actual, ya que es la base para las puertas lógicas del álgebra booleana como son las NAND, NOR, XOR o muchas otras. Estas son muy relevantes en la informática actual y son la base de muchos procesadores, por lo que este componente es esencial.
- Además, se ha podido observar como los datos predichos con la teoría coinciden, una vez más, con lo que sucede experimentalmente. Esto supone una gran ayuda, ya que permite estudiar diversos circuitos más complejos de forma teórica basándonos en los conocimientos teóricos.

- Por último, se ha podido comprobar la característica del transistor como *semiconductor*, ya que en función del potencial de entrada se ha podido observar que se puede encontrar en tres regiones de funcionamiento distintas, todas ellas con valores de intensidad distintos.