

Práctica 7: elementos no lineales

Laboratorio 3 - Departamento de Física - FCEyN - UBA

por Nicolas Torasso, Gabriela Pasquini, Eliana Depaoli y Facundo Sánchez

(1c 2023)

Se dice que un elemento pasivo es no lineal cuando la caída de potencial entre sus extremos ΔV y la corriente I que por él circula, no guardan entre sí una relación de proporcionalidad directa. Por otro lado, se dice que un material es óhmico cuando, a otras variables fijas (como temperatura, campo magnético, presión) la conductividad es una constante, que no depende de la corriente.

1. Diodos

1.1. Diodo común

El diodo, en cambio, es un elemento intrínsecamente no óhmico. Está conformado por una juntura entre dos materiales semiconductores dopados, uno con exceso de electrones (n) y otro con falta de electrones, o exceso de "huecos" (p). La física detrás de los semiconductores dopados excede el alcance de este curso, de manera que sólo nos concentraremos en la respuesta macroscópica.

En ese aspecto, el diodo es un importante elemento no lineal que permite la circulación de corrientes significativas en un solo sentido. Esto significa, por ejemplo, que si entre sus terminales se aplica tensión alterna, sólo circulará una corriente significativa a través de él en uno de los dos semi ciclos.

El símbolo para representar al diodo, un esquema de su aspecto físico y la convención de signos para la polaridad de la tensión aplicada y el sentido de circulación de la corriente pueden verse en la Figura 1.

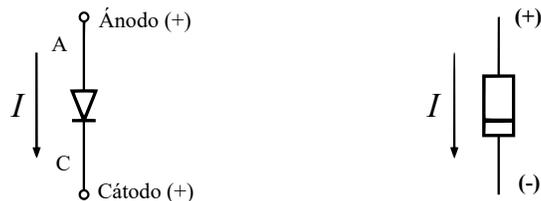


Figura 1: Representación gráfica de un diodo común. Izquierda: símbolo electrónico. Derecha: esquema de su aspecto físico. En ambos casos se indica la convención para la polaridad de la tensión aplicada y la circulación de corriente.

Cuando la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo de un diodo, $V_{AC} = V_A - V_C$, es positiva (negativa), se dice que se encuentra en polarización directa (inversa).

En una representación de diodo simplificada (o diodo “ideal”), cuando la polarización es directa circula corriente y, cuando es inversa, no. La curva característica de un diodo ideal sería similar a la ilustrada en la Figura 2 a). Bajo estas premisas se los podría concebir como una llave ideal, ya sea cerrada o abierta, dependiendo de que la polarización fuera directa o inversa, respectivamente.

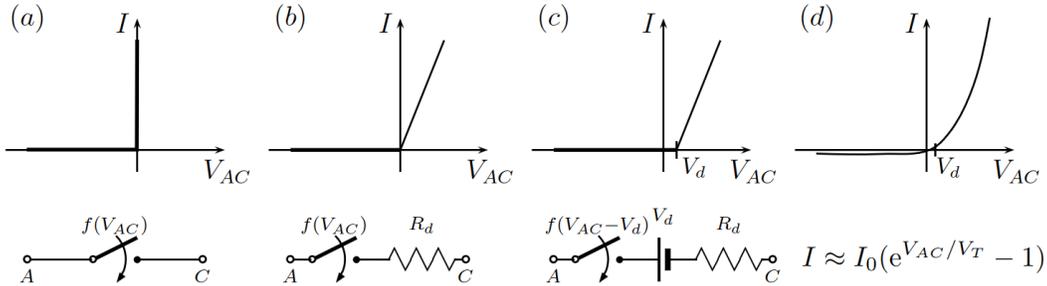


Figura 2: Curvas características correspondientes a tres grados diferentes de idealización de un diodo (a, b y c) y a un diodo real (d). En este último caso, la escala del semieje $I < 0$ fue ampliada a fin de ilustrar la corriente de fuga.

Un modelo un poco más ajustado a la realidad se muestra en la Figura 2 b), donde se considera la existencia de una resistencia interna R_d (constante en primera aproximación) que el diodo presenta bajo polarización directa.

Para los diodos reales en polarización directa existe además cierta *tensión umbral*, simbolizada V_d , tal que si $V < V_d$ no circula corriente significativa. El valor de la tensión umbral depende del material semiconductor del diodo. En los diodos de silicio (los más comunes) V_d se ubica aproximadamente entre 0.6 y 0.7 V. Una modelización aún simplificada, que tiene en cuenta este umbral, se muestra en la Figura 2 c).

Finalmente, un modelo más realista debe tener en cuenta otros dos elementos: en polarización inversa los diodos reales presentan una pequeña circulación de corriente, del orden de los $10 \mu\text{A}$ o menor, según el tipo de diodo. Se la denomina *corriente de fuga*, o corriente inversa, y se la suele simbolizar como I_R (*reverse current*). A la corriente que circula cuando el diodo está polarizado en sentido positivo se la denomina corriente directa y se la simboliza I_F (*forward current*). La resistencia en directa está lejos de ser constante, la relación $I(V)$ es altamente no lineal. La correspondiente curva característica puede verse en la Figura 2 d), y su forma funcional aproximada, debida a W. Shockley, se expresa:

$$I \approx I_0(e^{V_{AC}/V_T} - 1) \quad (1)$$

donde I_0 es del orden de los nA, o menor, y $V_T \approx 26 \text{ mV}$ a temperatura ambiente. V_T es la tensión térmica de juntura e I_0 es la corriente de saturación inversa. Ambos parámetros dependen de la temperatura. Además, I_0 depende del tipo de diodo considerado.

Los diodos comunes de uso más frecuente son los de la denominada serie 1N4000. Pueden conducir hasta 1 A de corriente directa ($I_{F_{\text{Máx}}} = 1 \text{ A}$), y soportan las tensiones inversas máximas, $V_{R_{\text{Máx}}}$, consignadas en la Tabla 1. Para obtener más información sobre las especificaciones técnicas de estos

diodos, consulte la hoja de datos correspondiente.

Diodo	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007
$V_{R_{M\acute{a}x}}$ (V)	50	100	200	400	600	800	1000

Tabla 1: Tensiones inversas máximas que soportan los diodos de la serie 1N4000. Todos ellos pueden conducir hasta 1 A de corriente directa y tienen una corriente de fuga de $\sim 10 \mu A$.

1.2. Diodo rápido

La velocidad de conmutación de un diodo real, esto es, la velocidad con que puede pasar del estado de no-conducción al de conducción o viceversa, es limitada. Esto significa, por ejemplo, que si a un diodo real que está en estado de no-conducción porque la diferencia de potencial entre sus extremos es nula, se le aplica súbitamente una polarización positiva, tardará un tiempo no nulo en pasar al estado de conducción. Debido a la importancia de la velocidad de procesamiento en aplicaciones tales como computación y comunicaciones, se desarrollaron diodos de conmutación rápida comparada con la correspondiente a los diodos comunes estudiados en la sección anterior.

Un ejemplo de diodo rápido es el 1N4148. La curva característica de los diodos rápidos es similar a la de los diodos comunes, pero suelen tener menor capacidad de conducir corriente y tienen un umbral menor de tensión inversa máxima. Para el caso del diodo 1N4148 los correspondientes valores son: $I_{F_{M\acute{a}x}} = 200 \text{ mA}$ y $V_{R_{M\acute{a}x}} = 100 \text{ V}$.

1.3. Diodo Zener

El Zener es un diodo especial cuya curva característica se ilustra en la Figura 4. En la zona de polarización directa, el Zener se comporta como un diodo común, pero cuando es polarizado en inversa existe una tensión, V_Z , denominada *tensión Zener* o *tensión de ruptura*, en la que el diodo permite la circulación de corriente sin que varíe, prácticamente, la caída de tensión entre sus extremos.

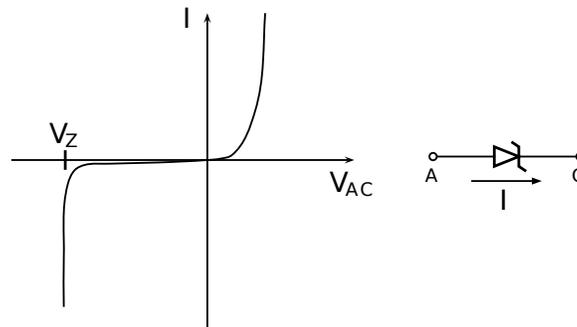


Figura 3: Curva característica de un diodo Zener real, junto con una imagen de su símbolo electrónico.

Esto permite emplearlo como referencia de tensión, dado que polarizado en inversa en un circuito adecuado, la caída de potencial entre sus extremos es prácticamente independiente de la corriente que

por él circule. El símbolo con el que se representa a un diodo Zener se ilustra en la Figura 4. Las dos especificaciones más importantes de un Zener son: la tensión de ruptura V_Z y la potencia máxima que puede disipar en inversa P_R . A partir de estos valores se puede determinar la máxima corriente que puede conducir en inversa sin destruirse: $I_{R_{\text{Máx}}} = P_R/V_Z$. Los valores típicos más comunes son $3.3 \text{ V} \leq V_Z \leq 200 \text{ V}$, mientras que las potencias de los Zener de uso más frecuente suelen ser 0.2, 0.5 o 1 W.

1.4. Diodo Led

El diodo LED (*Light Emitting Diode*, o diodo emisor de luz) tiene la particularidad de emitir luz cuando está en estado de conducción. Los colores fácilmente asequibles en la actualidad son rojo, amarillo, verde y azul, pero también existen LEDs que emiten en el infrarrojo y el ultravioleta. Entonces, para distinguirlos entre sí se habla de LEDs rojos, amarillos, verdes, etc.

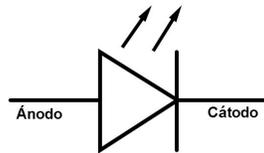


Figura 4: Símbolo electrónico del led.

Desde el punto de vista eléctrico, los LEDs presentan curvas características parecidas a las de los diodos comunes. La principal diferencia entre ellas es el valor de la tensión umbral, V_d , que para los LEDs resulta ser mayor que la correspondiente a los diodos comunes y dependiente del color. Para LEDs rojos se tiene, típicamente, $1,6 \text{ V} \leq V_d \leq 2,0 \text{ V}$, mientras que para los azules resulta: $2,5 \text{ V} \leq V_d \leq 3,7 \text{ V}$.

La capacidad de conducir corriente cuando están polarizados en directa depende del tamaño del LED. Normalmente se pueden conseguir LEDs que trabajan desde 2 mA (los más pequeños) hasta 50 mA. Si se exceden dichos valores, la vida útil del dispositivo se reduce considerablemente, o se quema al instante, dependiendo de la magnitud del exceso.

La amplitud de la tensión inversa que pueden soportar sin dañarse es muy inferior a la de los diodos comunes: los LEDs normalmente se destruyen si $V_{AC} < -5 \text{ V}$

2. Lámpara incandescente

Una lámpara incandescente está compuesta por un material óhmico (un filamento metálico), pero sin embargo es un elemento no lineal puesto que la resistencia de su filamento depende de la temperatura (T) del mismo y ésta, a su vez, depende (entre otras variables) de la corriente que por él circule; de modo que no se puede establecer una relación de proporcionalidad directa entre la diferencia de potencial, ΔV , que se aplique entre sus extremos y la corriente circulante, I .

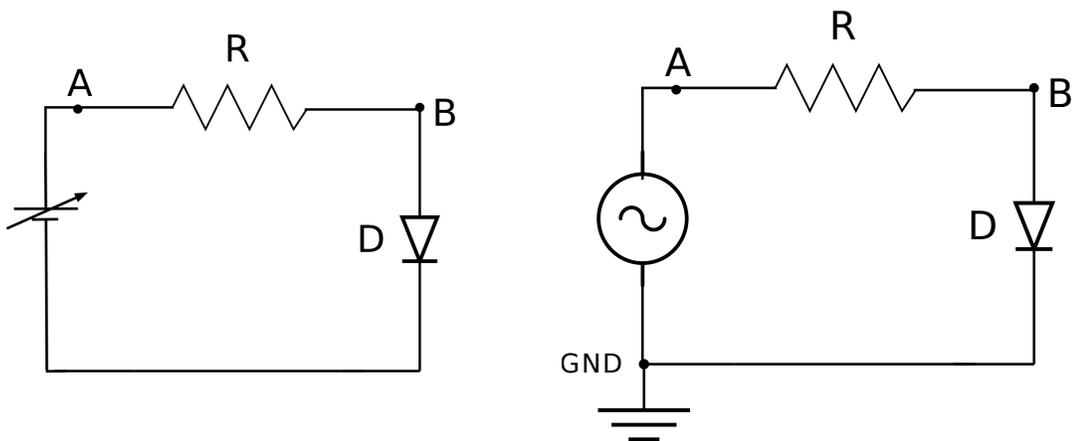
En primera aproximación, se puede afirmar entonces que en lugar de la relación $\Delta V = RI$, que es lineal sólo para resistencias R constantes, en el caso de la lámpara incandescente correspondería escribir, por ejemplo, $\Delta V = R[T(I)]I$.

$$\Delta V = R(I)I \quad (2)$$

3. Parte experimental

3.1. Caracterización de diodos

1. Armar un circuito como el de la figura 5a con una fuente de continua conectados a una resistencia R y un diodo en serie. Fijando varias tensiones de alimentación y midiendo para cada una la caída de tensión sobre el diodo (V) y sobre la resistencia (proporcional a I) levantar la curva del diodo $V(I)$.
2. Una segunda opción es armar un circuito como el de la figura 5b y utilizar una rampa en tensión provista por un generador de funciones. Midiendo con el osciloscopio entre el punto B y tierra pueden obtener la caída de tensión sobre el diodo, y midiendo entre el punto A y tierra la tensión de alimentación. La diferencia V_{AB} da la caída sobre la R a partir de la cual pueden obtener la corriente.
3. Una tercera opción es usar un transformador para levantar el circuito de tierra, como muestra la figura 6. De esa manera pueden medir en forma directa V_{AB} y poniendo el osciloscopio en modo x-y levantar en la pantalla la curva del diodo.
4. Evalúen las ventajas y desventajas de cada opción.



(a) Circuito propuesto para trazar la curva característica de un diodo con un multímetro. Opción 1

(b) Circuito propuesto para trazar la curva característica de un diodo en un osciloscopio. Opción 2

Figura 5: Circuitos propuestos para medir la curva característica de un diodo.

5. Observaciones, preguntas y opcionales:

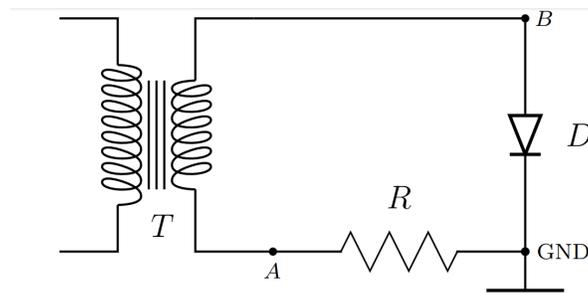


Figura 6: Circuito propuesto para trazar la curva característica de un diodo en un osciloscopio con un transformador. Opción 3.

- a) En las opciones que utilizan el osciloscopio pueden medir mediante los cursores del osciloscopio la caída de tensión necesaria para que el diodo comience a conducir. Observen que para medir correctamente esta cantidad deben conocer la ubicación, en la pantalla de osciloscopio, del origen de coordenadas del plano $I - V$. Piensen cómo hacer para determinar dicho origen experimentalmente.
- b) Con el circuito anterior pueden estudiar también un diodo Zener. Tener en cuenta la máxima potencia que puede disipar, para no quemarlo.
- c) Con el circuito anterior pueden estudiar un diodo 1N4148 y diodos LEDs de diferentes colores. Para no quemar ningún diodo, tengan presente las limitaciones de corriente de los mismos.
- d) **Velocidad de conmutación.** El circuito con el generador permite además estimar la velocidad de conmutación de un diodo. Prueben medir las velocidades de diodos de la serie 1N4000, un 1N4148, un Zener y un LED. Verifiquen si dicha velocidad es la misma (en módulo) al pasar del estado de no conducción al de conducción o viceversa.

3.2. Aplicaciones de circuitos con diodos (propuestas)

3.2.1. Rectificadores

Los diodos pueden usarse como rectificadores, es decir, para convertir CA en CC. Piense por qué funcionan como tal. Si se añade un capacitor, los rectificadores pasan a funcionar como fuente para alimentar una resistencia de carga R_L . Arme los circuitos de la Figura 7 y mida la tensión de salida (sobre R_L). A la relativamente pequeña amplitud de la señal CC obtenida se la conoce como *ripple*. Analice cómo cambia la tensión de salida y el *ripple* al cambiar R_L y C .

3.2.2. Regulación de tensión mediante un diodo Zener

Arme un circuito como el de la figura 8 y estudie la variación de la caída de tensión sobre la resistencia de carga cuando se varía:

1. la tensión de la fuente

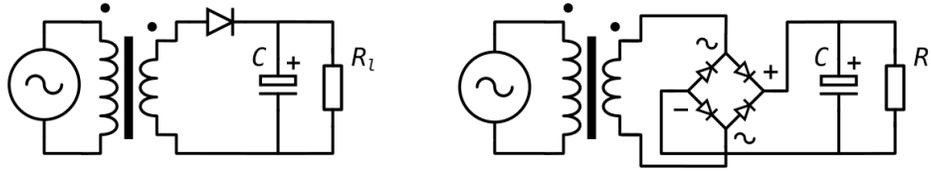


Figura 7: Fuentes de tensión continua basadas en un circuito rectificadores de media onda (izquierda) y de onda completa (derecha).

- la resistencia de carga R_c . Compare ambos resultados con los que se obtendrían en caso de no incluir el Zener en el circuito.

El circuito regulador con Zener puede ser utilizado a la salida de una fuente regulada para eliminar el *ripple*.

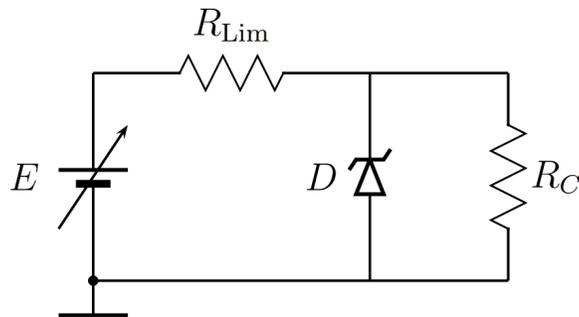


Figura 8: Regulador de tensión basado en un diodo Zener.

3.2.3. Circuito clamper (enclavador o fijador de nivel)

Dado el circuito de la figura 9 prediga conceptualmente cuál será la salida V_{out} medida respecto de tierra. Ármelo y mida V_{out} . Simule el circuito con *LT Spice*.

¿Para qué cree que puede servir un circuito como el de la figura 9?

Analice cómo se modifica la tensión V_{out} si se conecta una resistencia de carga entre dicho terminal y tierra. Analice cómo se modifica la tensión V_{out} si se conecta el diodo al revés.

Determine qué ocurre si en lugar de emplear una fuente senoidal, se aplica una fuente de tensión continua, triangular o cuadrada.

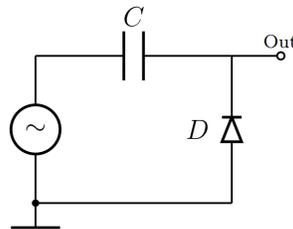


Figura 9: Circuito Clamper o enclavador.

3.2.4. Elevador de tensión

Complete el circuito anterior hasta armar el de la figura 10 y estudie cada una de las tensiones de salida Out 1, 2 y 3, medidas respecto de tierra. Simule el circuito y compare los resultados de la simulación con el experimento. Estudie cómo cambia la tensión de salida si se conecta una resistencia de carga.

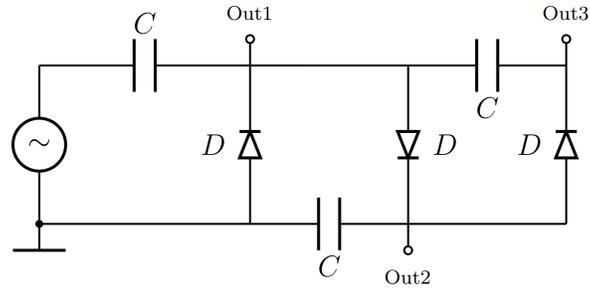


Figura 10: Circuito elevador de tensión.

3.3. Lámpara incandescente (propuesta opcional)

Diseñar y armar un circuito que les permita trazar la curva $I - V$ de la lámpara incandescente que tengan a su disposición. Como fuentes de alimentación podrán emplear una fuente de tensión continua y/o una de alterna. Medir la curva $I - V$ a distintas velocidades y graficar. Depende de la velocidad de la rampa de corriente? Porqué? Identificar, si es que existen, zonas en donde la lámpara pueda llegar a considerarse como un elemento lineal.