Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica
IEE2413 - Electrónica

Problemas Electrónica 2018 - I

Profesor: Ángel Abusleme
Ayudantes: Agustín Campeny, Juan Pablo Elorrieta, Cristóbal Ferrer, y Matías Henríquez

Ejercicios resueltos

Enunciados

1) De acuerdo a lo visto en clases, el diodo tiene una curva de transferencia estática $i_D - v_D$ según la ecuación

$$i_D \approx I_s \cdot e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

donde I_s es del orden de 1 fA y $V_T \approx 25\,\text{mV}$ a temperatura ambiente.

   a) Utilizando un programa de computación científica, grafique la curva de transferencia estática del diodo para voltajes v_D entre 0 V y 0.75 V.

   b) El diodo es una especie de resistencia no lineal. Una consecuencia de la afirmación anterior es que al forzar una corriente i_D a través del diodo aparece un voltaje v_D en él. Suponga que se aplica en el diodo una corriente DC I_D, la cual produce un voltaje V_D. Al valor DC de I_D, se suma una corriente AC i_d muy pequeña. Determine analíticamente una expresión para la relación entre las variaciones de voltaje v_d que aparecen en el diodo y las pequeñas variaciones de corriente i_d. Su expresión, que representa la resistencia incremental del diodo r_d (o resistencia de pequeña señal) debe quedar en función de la corriente DC en el diodo, I_D.

   c) Utilizando un programa de computación científica, grafique la resistencia incremental del diodo r_d para voltajes v_D entre 0 V y 0.75 V.

2) a) Bosqueje la curva I-V del diodo. Puede ser un bosquejo a mano.

   b) En el mismo dibujo bosqueje la curva I-V de dos diodos en paralelo.

   c) En el mismo dibujo bosqueje la curva I-V de dos diodos en serie.

   d) En el mismo dibujo bosqueje la recta de carga de un Thévenin y marque las intersecciones con las curvas anteriores.

   e) Comente.

3) Los diodos sí conducen una corriente muy pequeña en polarización inversa.

   Empleando curvas de carga, determine gráficamente el punto de operación del circuito de la figura.

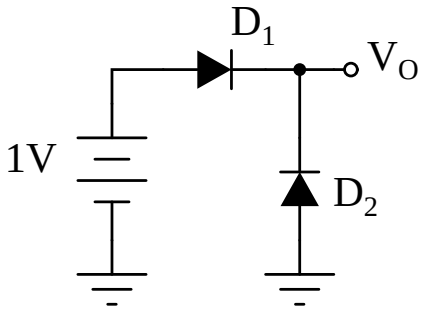


Figura 1: Circuito pregunta 3

4) Averigüe qué tipos de diodo existen y cuáles son sus usos principales.

5) Los diodos de la figuras tienen característica corriente-voltaje dada por

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{V_{DS}}{V_T}} - 1 \right)$$

Los resistores R tienen resistencia $100\,\mathrm{k\Omega}$ y las fuentes de voltaje son de $5\,\mathrm{V}$ DC.

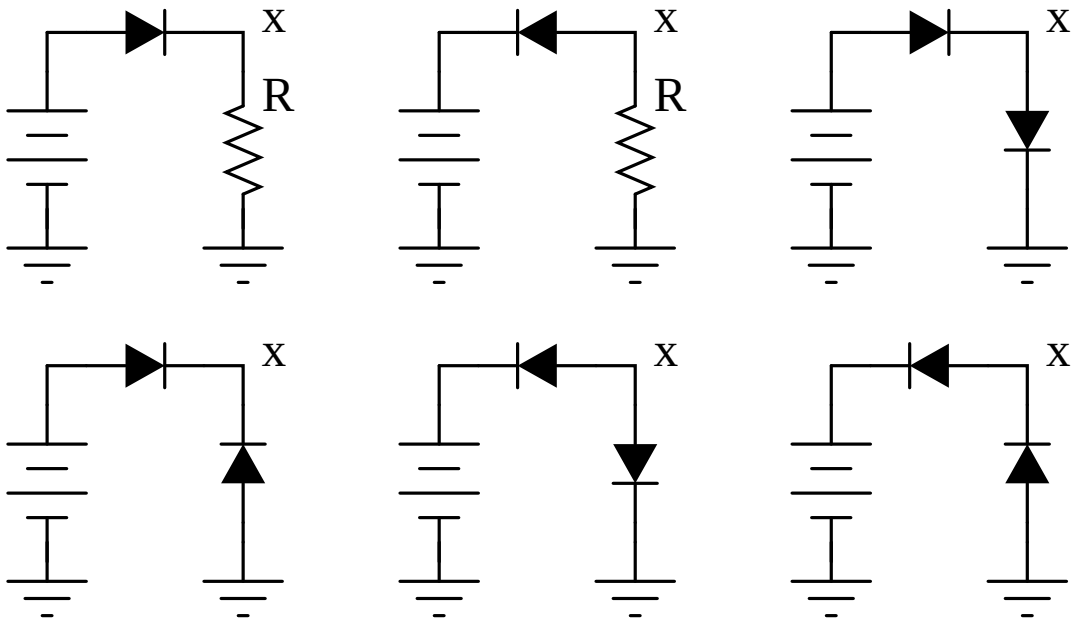


Figura 2: Circuitos pregunta 5

Determine si los nodos marcados en las figuras son de alta o de baja impedancia. Justifique sus respuestas, especialmente si la impedancia alta o baja del nodo queda condicionada a su voltaje. También determine de manera aproximada los voltajes de nodo.

6) Determine si es posible convertir los nodos de alta impedancia de la pregunta anterior en nodos de baja impedancia, y vice versa, mediante la conexión de una fuente de corriente ideal entre el nodo x y tierra. Determine las condiciones de esta fuente de corriente (magnitud y sentido), y el voltaje resultante en el nodo x.

7) a) Usando las ecuaciones de ripple vistas en clases adaptadas para rectificador de onda completa, diseñe un rectificador de onda completa con filtro que tome una entrada sinusoidal de 12Vrms para alimentar una carga de 10 Ω. El ripple debe ser menor que 30 mV.

   b) Determine el valor máximo de la corriente en los diodos.

   c) Simule el rectificador y compruebe su resultado.

8) a) Descargue de Internet la hoja de datos (datasheet) del 7805.

   b) Averigüe el diagrama de pines (pinout) del 7805 en encapsulado TO-220.

   c) Indique qué corriente es capaz de entregar a su salida y qué potencia es capaz de disipar el 7805 en encapsulado TO-220.

   d) Un 7805 es conectado a una alimentación de 7 V para que produzca 5 V a la salida. Suponga que la corriente en el terminal de tierra del 7805 es 5 mA. Determine la corriente en los otros pines del 7805 cuando su salida es conectada a una carga de 10 Ω.

   e) Repita para el caso de una alimentación de 15 V, suponiendo que la corriente del terminal de tierra sigue siendo 5 mA.

   f) Para los dos casos anteriores, calcule la disipación de potencia del 7805.

   g) Comente.

9) a) Descargue la hoja de datos de un 7812.

   b) Diseñe una fuente de potencia que tome como entrada un voltaje sinusoidal de 220 Vrms y entregue como salida 12 Vdc. Utilice un transformador con razón de transformación 220:12, un rectificador de onda completa, un 7812 y capacitores a su entrada y salida. El regulador debe ser diseñado para una carga de 12 Ω.

   c) Determine la capacitancia del capacitor a la entrada del regulador de manera que el voltaje de ripple luego del rectificador sea menor a 1 V. Asuma que la corriente en el terminal de tierra del 7812 es de 5 mA. Determine el rango de voltaje en la entrada del 7812.

   d) Descargue modelo para SPICE del 7812.

   e) Realice una simulación transiente de su circuito en LTspice, midiendo corrientes y voltajes relevantes.

10) Grafique la curva I-V de un diodo en SPICE, para voltajes entre 0 y 2V. Utilice el diodo que aparece al apretar «D» en el editor de esquemático. Explique por qué la curva no se ve realmente como una exponencial.

11) Vimos en clases que los amplificadores operacionales son alimentados generalmente mediante una fuente bipolar (voltaje positivo y negativo).

    Extienda la pregunta 9 y dibuje el esquemático de una fuente de potencia bipolar regulada de ±12 V. Utilice un transformador con derivación central, un puente rectificador, un 7812, un 7912 y capacitores. Finalmente, explique cómo calcularía los capacitores en función de la carga.

Soluciones

1) a) Gráfico de curva.

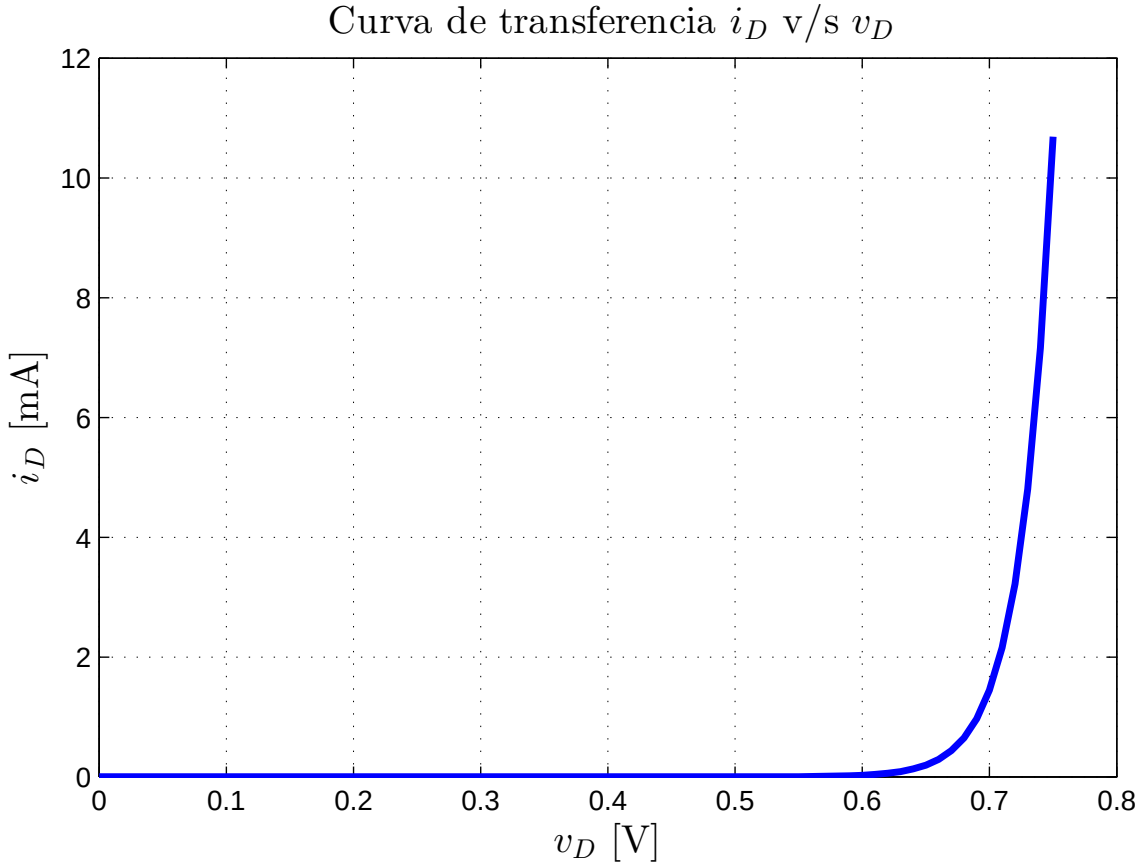


Figura 3: Gráfico pregunta 1

b) En ausencia de una señal v_d no existe corriente i_d y el voltaje en el diodo es V_D, por lo que el comportamiento del diodo en DC queda definido por:

$$I_D \approx I_s \cdot e^{\frac{V_D}{V_T}}$$

Tal como se mencionó anteriormente, la corriente instantánea i_D está dada por:

$$i_D \approx I_s \cdot e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

Si se considera que el valor instantáneo está dado por la suma del valor DC y el de pequeña señal, entonces el voltaje v_D puede reescribirse como:

$$i_D \approx I_s \cdot e^{\frac{(V_D+v_d)}{V_T}}$$
$$i_D \approx I_s \cdot e^{\frac{V_D}{V_T}} \cdot e^{\frac{v_d}{V_T}}$$
$$i_D \approx I_D \cdot e^{\frac{v_d}{V_T}}$$

Como v_d es el voltaje del diodo en pequeña señal entonces es mucho menor a V_T, por lo que se cumple que:

$$\frac{v_d}{V_T} \ll 1$$

Por lo que la exponencial puede aproximarse con los primeros dos términos de su expansión de Taylor:

$$i_D \approx I_D \cdot \left(1 + \frac{v_d}{V_T}\right)$$
$$i_D \approx I_D + I_D \cdot \frac{v_d}{V_T}$$

Si se recuerda que i_D también puede ser reescrito como su valor DC más su valor en pequeña señal, se obtiene finalmente que:

$$I_D + i_d \approx I_D + I_D \cdot \frac{v_d}{V_T}$$
$$i_d \approx I_D \cdot \frac{v_d}{V_T}$$

Luego, la resistencia incremental del diodo queda definida como:

$$r_d = \frac{v_d}{i_d} = \frac{V_T}{I_D}$$

c) La forma de la gráfica de la resistencia era esperada, ya que se sabe que r_d es el inverso de la pendiente de la curva de transferencia i_D versus v_D.

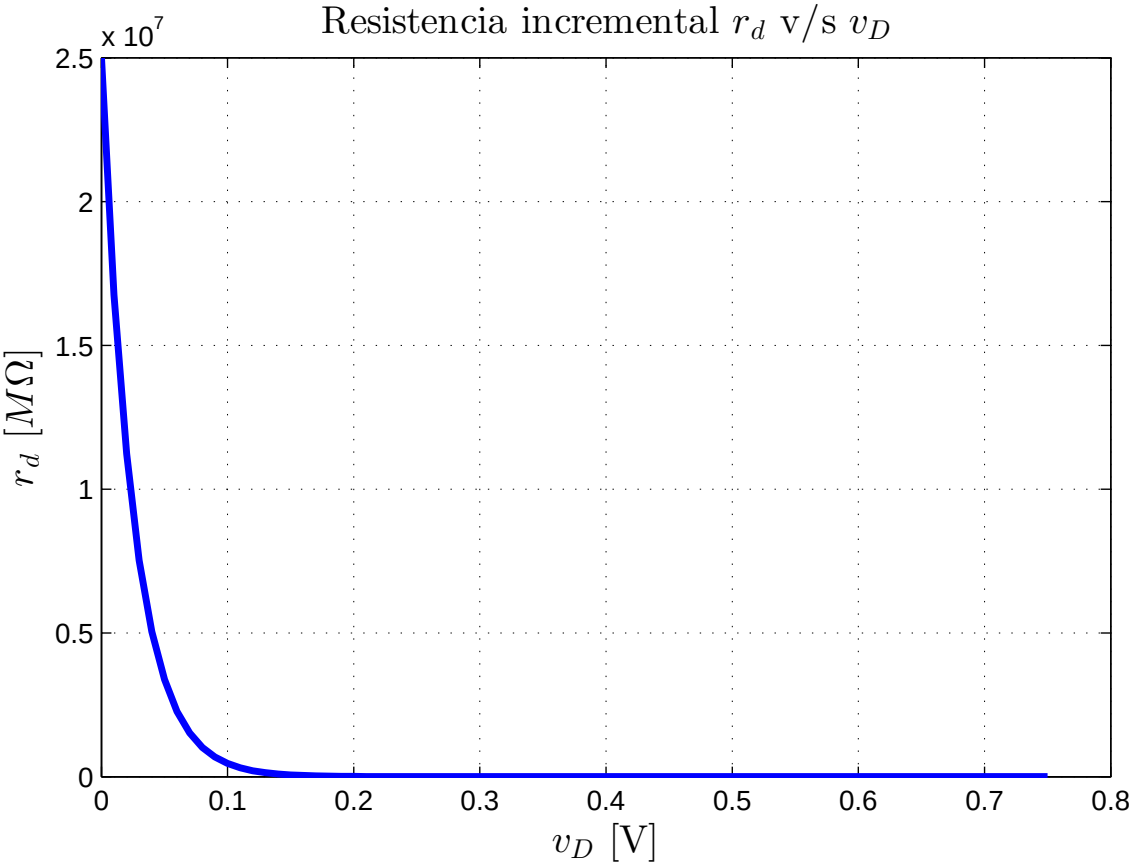


Figura 4: Resistencia incremental del Diodo

2) a) Este gráfico es el mismo de la pregunta anterior. A esta solución le llamamos curva 1.

b) Al tener dos diodos en paralelo la corriente aumenta al doble para el mismo voltaje. La ecuación de dos diodos en paralelo es igual a la del diodo único, pero con el doble de corriente. Por lo tanto, la curva se estira al doble en el eje vertical, es decir, hacia arriba. A esta solución le llamamos curva 2.

c) Al tener dos diodos en serie, la misma corriente produce el doble de caída de tensión que en el caso inicial. La ecuación para dos diodos en serie es igual a la ecuación para un solo diodo, pero se requiere el doble de voltaje para producir la misma corriente, por lo que el voltaje del argumento de la función va dividido por 2. Por lo tanto, las curva se estira al doble en el eje horizontal, hacia la derecha. A esta solución le llamamos curva 3.

d) Graficamos el Thévenin de acuerdo a lo aprendido en clases. Se eligió arbitrariamente un Thévenin con voltaje de $3\,\mathrm{V}$ y resistencia de $1\,\mathrm{k\Omega}$.

e) Para valores razonables del Thévenin, las la intersección de la recta de carga del Thévenin con las curvas 1 y 2 produce aproximadamente el mismo voltaje, cercano a $0.7\,\mathrm{V}$. Es interesante ver que la corriente en ambas curvas es parecida, limitada por la resistencia del Thévenin, aun cuando en un caso usamos dos diodos en paralelo. Esto se debe a que la caída de tensión resulta ser más o menos independiente de la corriente. En el caso de los diodos en paralelo, por cada diodo pasa la mitad de la corriente total, pero el voltaje es prácticamente el mismo. En cambio, la intersección con la curva 3 ocurre a un voltaje el doble de grande. Dos diodos en serie presentan una caída de voltaje mayor.

Diodos en paralelo presentan una pendiente mayor en el gráfico, lo cual es sinónimo de una resistencia menor. Esto era esperable ya que la resistencia de elementos en paralelo disminuye.

Diodos en serie presentan una pendiente menor en el gráfico, lo cual es sinónimo de una resistencia mayor. Esto era esperable ya que la resistencia de elementos en serie aumenta.

Finalmente, comparando las curvas 1 y 2, ambas se ven casi iguales, pero en realidad para un voltaje determinado, la curva 2 tiene el doble de corriente que la curva 1. Sin embargo, como la pendiente es tan alta (resistencia tan pequeña), este hecho apenas se nota en el gráfico.

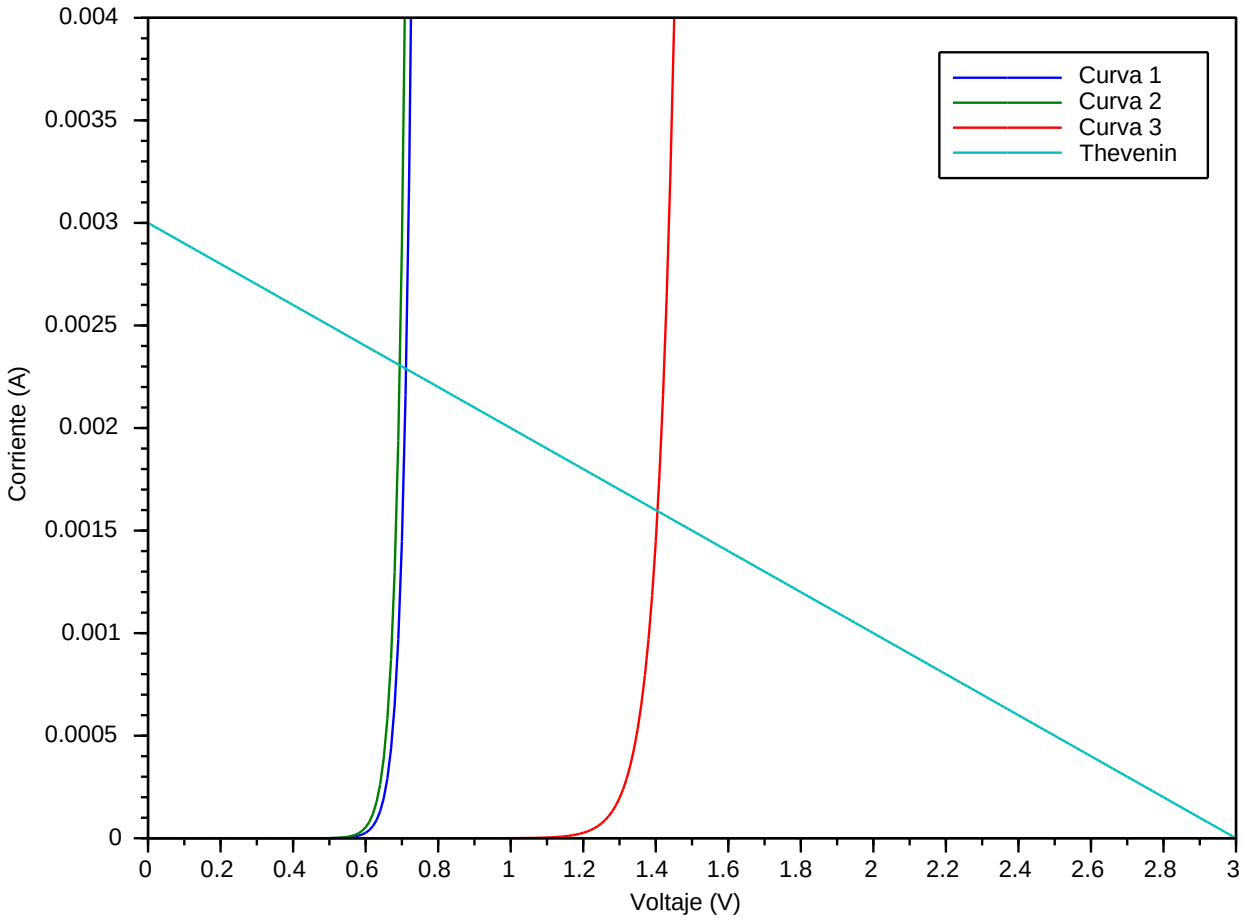


Figura 5: Rectas de carga de pregunta 3

3) Hay un diodo en polarización directa y otro en polarización inversa. Este último es casi un circuito abierto, con una corriente inversa que depende muy poco del voltaje según la curva vista en clases. Así que lo modelamos como una fuente de corriente:

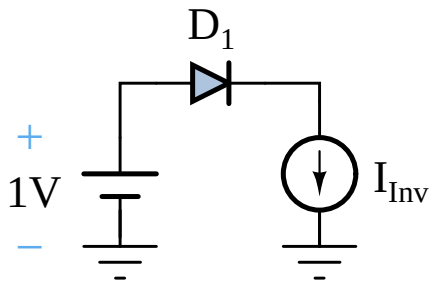


Figura 6: Ciruito equivalente para diodos

La fuente de corriente representa una carga para todo el circuito que está a la izquierda, compuesto

por una fuente DC y un diodo polarizado en forma directa. Determinemos la curva característica de este circuito:

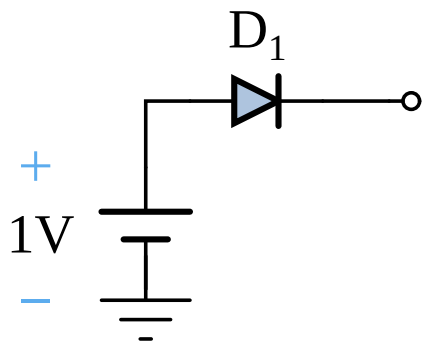


Figura 7: Rama izquierda del circuito

Hagamos una hipotética prueba de cortocircuito. Intuitivamente, si la fuente de alimentación fuera de muy bajo voltaje, la corriente de cortocircuito del combinado fuente-diodo sería muy pequeña. Esta corriente sólo sería grande si la fuente de alimentación fuera mayor que unos 0.7 V. Para una fuente de 1 V esa corriente es muy grande. La siguiente curva representa dicho comportamiento.

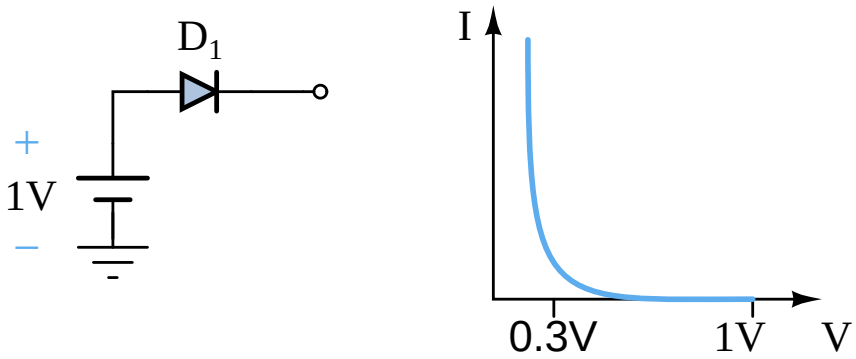


Figura 8: Curva de carga de rama izquierda

Otra forma de hacerlo es sumando (o restando) curvas corriente voltaje. La curva de la fuente de 1V es una vertical. Le restamos la curva del diodo en el sentido horizontal (porque el voltaje de salida cae debido al diodo polarizado en forma directa) y nos queda la curva que acabamos de graficar.

Ahora agreguemos el otro diodo que se comporta como fuente de corriente muy pequeña. Gráficamente,

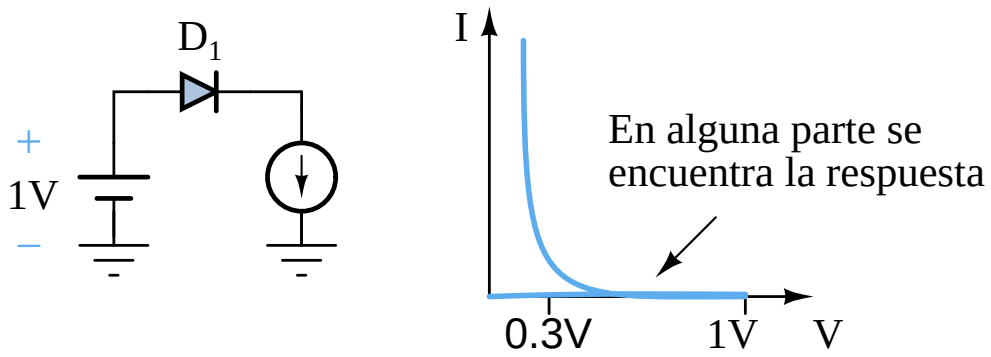


Figura 9: Curva de carga del circuito completo

De acuerdo, no es fácil a menos que tengamos las curvas exactas, con infinita precisión. No basta con curvas a mano. Pero lo que importa es el procedimiento para entender la operatoria con curvas de carga.

Para salir de dudas hagamos el álgebra. La corriente del diodo en serie con la fuente de voltaje es igual a la corriente de la fuente de corriente:

$$I_s \cdot \left(e^{\frac{1\,\mathrm{V}-V_x}{V_T}} - 1\right) = I_s$$

Despejamos el voltaje V:

$$\begin{aligned} e^{\frac{1\,\mathrm{V}-V_x}{V_T}} &= 2 \\ \frac{1\,\mathrm{V}-V_x}{25\,\mathrm{mV}} &= \ln(2) = 0.69 \\ 1\,\mathrm{V}-V_x &= 0.017\,328\,7\,\mathrm{V} \\ V_x &= 0.983\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

Interesante, el resultado no depende de I_s. Pero esto no es del todo cierto. **Este resultado no debe ser tomado al pie de la letra** en la práctica, porque las corrientes de fuga en polarización inversa serán mayores que I_s, lo cual establecerá el resultado del circuito en algunas decenas de mV por debajo de 1 V según el valor de la corriente de fuga.

4) Los principales tipos de diodos se listan a continuación:

- Diodo rectificador
  Son diodos que convierten la señal AC en DC. Su aplicación, tal como su nombre lo indica, es rectificar. Un ejemplo de aplicación es en fuentes de alimentación para rectificar el voltaje AC en DC.
- Diodo Zener
  Diodo que se ha construido para funcionar en las zonas de ruptura. En polarización directa posee las mismas características que un diodo rectificador, pero en inversa mantiene un voltaje constante entre sus terminales. Por ende, su principal uso es como regulador de tensión.
- *Light-Emitting Diode* (LED)
  Es un diodo con un encapsulado transparente que está diseñado para generar fotones. Emite luz no coherente. Se utiliza como indicador.

- Display 7 segmentos

  Corresponde a un arreglo de siete u ocho LEDs dependiendo si el display posee punto decimal o no. Se utilizan para mostrar carácteres hexadecimales.

- Fotodiodo

  Son diodos sensibles a la luz. Su principal aplicación es como detector de luz, por lo que pueden usarse en fotometría o comunicación óptica.

- Optocupla

  Es un LED más un fotodiodo. Permite acoplar de manera óptica dos zonas aisladas de un circuito. Cuando el LED conduce en la primera parte del circuito se excita el fotodiodo de la segunda zona. Esto provoca que el fotodiodo conduzca. Se utilizan para aislar eléctricamente dos áreas del circuito, ya que ni siquiera es necesario que compartan tierra. Un ejemplo de aplicación es aislar la zona de control de un circuito (por ejemplo, un microcontrolador) de la zona de potencia (puente H, actuadores, etc).

- Diodo PIN

  Son diodos con una unión P - intrínseco - N que maximizan el ancho de la región de agotamiento. Se utilizan como interruptores de alta frecuencia y atenuadores. También, debido a que son el tipo de diodo que es más sensible a la luz, se utilizan como fotodetectores y detectores de radiación ionizante.

- Diodo avalancha

  Poseen unión PIN, PN o metal-semiconductor. Son diodos pocos dopados y se operan cerca del punto de ruptura por avalancha (a grandes voltajes los electrones se aceleran y chocan entre sí generando una avalancha de electrones que provoca una gran corriente). Una aplicación común para estos diodos consiste en la protección de circuitos frente a altos voltajes que podrían quemarlos.

- Diodo láser

  Cuando la estructura de un LED se introduce en una cavidad resonante formada al pulir las caras de los extremos, se puede formar un láser. A diferencia del LED, el diodo láser emite luz coherente. Se usan en dispositivos de almacenamiento ópticos y para la comunicación óptica de alta velocidad.

- Diodo Schottky (SBD)

  Es un diodo de unión metal-semiconductor (no PN como los diodos de unión) y posee menor tensión de ruptura que un diodo de unión. Tiene diversas aplicaciones en circuitos de alta velocidad donde se necesiten grandes velocidades de conmutación. También puede utilizarse en variadores de frecuencia, circuitos integrados TTL y controladores de motores *stepper*.

- Varicap o varactor

  Diodo cuya capacitancia varía en función del voltaje entre sus terminales. Son usados comúnmente en VCOs (*Voltage-Controlled Oscillators*), multiplicadores de frecuencia y en circuitos PLL (*Phase-Locked Loop*) y FLL (*Frequency-Locked Loop*) como moduladores y sintetizadores de frecuencia.

- Varistor

  Posee el mismo comportamiento para ambas direcciones de su curva característica, es decir, tiene ruptura en ambas direcciones. Se utilizan como elementos de compensación o control en circuitos, ya sea para otorgar condiciones de operación óptimas o para proteger frente a altos voltajes transientes.

- Diodo túnel o diodo Esaki

Diodo con unión PN en la que se produce el efecto túnel que origina una zona de resistencia negativa en su curva característica. Esto permite utilizarlos como un componente activo, por lo que su principal aplicación es como amplificador y oscilador de alta frecuencia.

- Diodo opuesto o *backward diode*
  Como su nombre lo indica, es un diodo que conduce mejor en forma inversa. Se utiliza como rectificador de señales débiles.

Bibliografía

- Diapositivas del curso IEE2413 Electrónica, semestre I-2013
- Diode. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Disponible en: `http://en.wikipedia.org/wiki/Diode`

5) Es fácil confundirse en este problema, sobre todo si se intenta resolver mirando el circuito y sus componentes. Comúnmente se utilizan modelos de diodos ideales o de caída constante, pero resolver el problema por observación con este enfoque puede llevar a errores.

   La manera más correcta es utilizar el modelo del diodo que se indica en el enunciado. En la figura 10 se muestran las curvas de carga de los distintos esquemas circuitales, siguiendo el mismo orden de la figura del enunciado.

   A continuación se entrega una breve justificación para cada uno de los casos. El orden de numeración, basado en la figura del enunciado, va de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Se denominan diodo 1 al diodo conectado a la fuente de voltaje, y diodo 2 al diodo de carga (cuando aplica).

   - **Caso 1: Baja impedancia**. El diodo se encuenta conduciendo, polarizado de manera directa, por lo que presenta una impedancia muy baja. El voltaje del nodo es cercano a 4,3 V.
   - **Caso 2: Alta impedancia**. El diodo se encuentra conduciendo una corriente de fuga muy pequeña, por lo que presenta una impedancia muy alta. Esta impedancia es probablemente mucho mayor que la resistencia R, así que la impedancia del nodo queda definida principalmente por R, que es relativamente grande. El voltaje del nodo es cercano a 0 V.
   - **Caso 3: Baja impedancia**. Ambos diodos se encuentran conduciendo de manera directa, por lo que ambos presentan una muy baja impedancia. Se observa en la figura 10 que las curvas de carga se intersectan en una corriente muy alta. En el punto de intersección, las curvas tendrán una pendiente muy grande. El voltaje del nodo es, por simetría, de 2,5 V.
   - **Caso 4: Alta impedancia**. El diodo 1 se encuentra conduciendo una corriente muy pequeña, que corresponde a la corriente de fuga del diodo 2. En torno al punto de operación en el que se encuentra el nodo, variaciones pequeñas de corriente producen cambios significativos en el voltaje del nodo. Esto es posible de observar en la curva de carga, donde se observa que cerca de la intersección, las curvas son muy horizontales (pendientes cercanas a cero). El voltaje del nodo se encuentra en torno a 5 V.
   - **Caso 5: Alta impedancia**. Similar al caso 4, el diodo 1 conduce una corriente de fuga muy pequeña, que también circula por el diodo 2. En torno al punto de operación del nodo las curvas de carga son muy horizontales (pendientes cercana a cero) por lo que variaciones incrementales de corriente producen grandes variaciones de voltaje. El voltaje del nodo se encuentra en torno a 0 V.
   - **Caso 6: Alta impedancia**. Ambos diodos se encuentran conduciendo una corriente de fuga muy pequeña, que tiende a I_S. Es claro, de la curva de carga, que el nodo es de muy alta impedancia, dado que las curvas se intersectan en un punto en que ambas son muy horizontales. El voltaje del nodo es, por simetría, de 2,5 V.

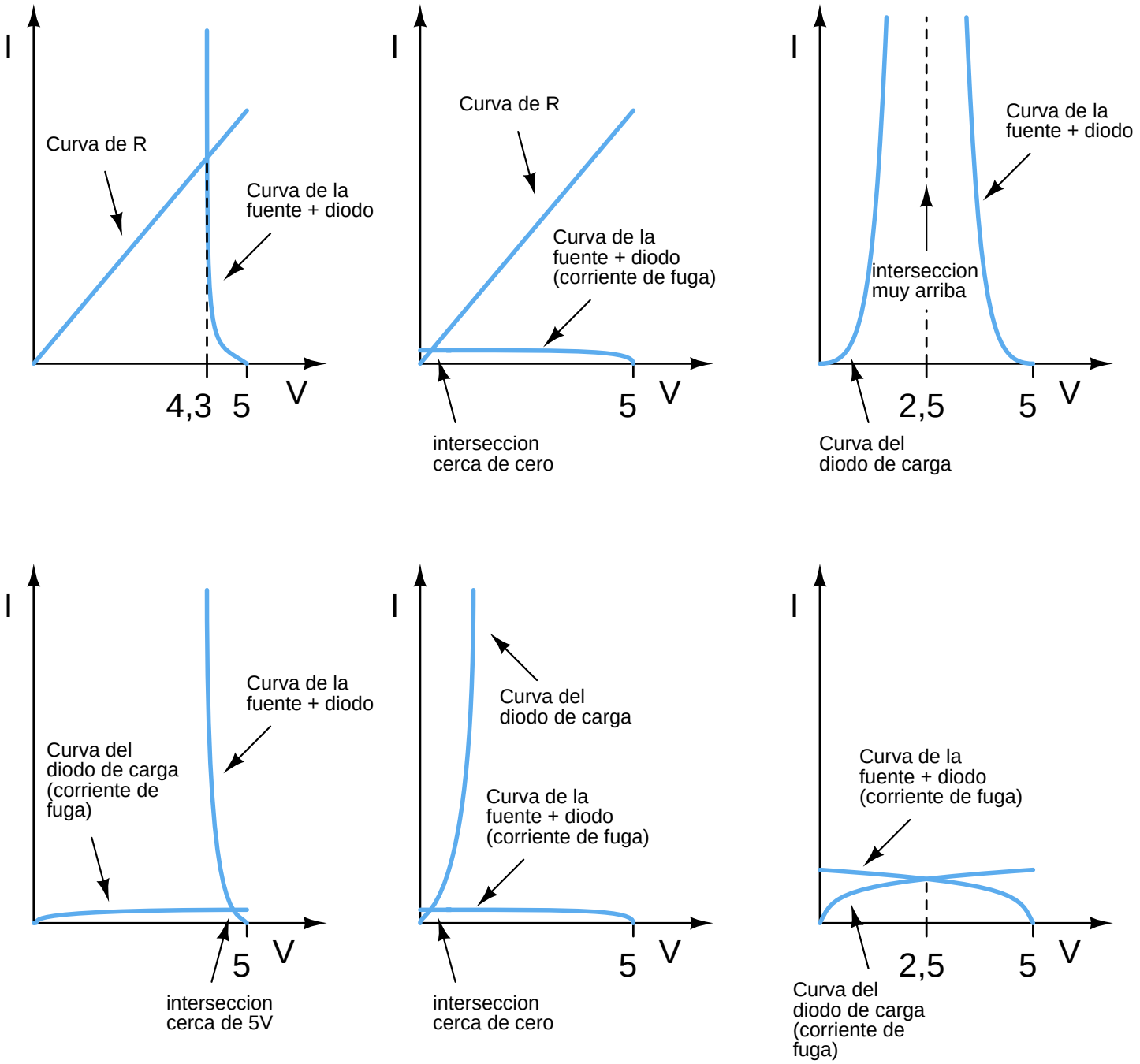


Figura 10: Punto de operación de los distintos circuitos.

10

6) En la figura 11 se muestran los circuitos de la pregunta anterior. Para esta pauta los circuitos se numeran de izquierda a derecha, y de arriba hacia abajo.

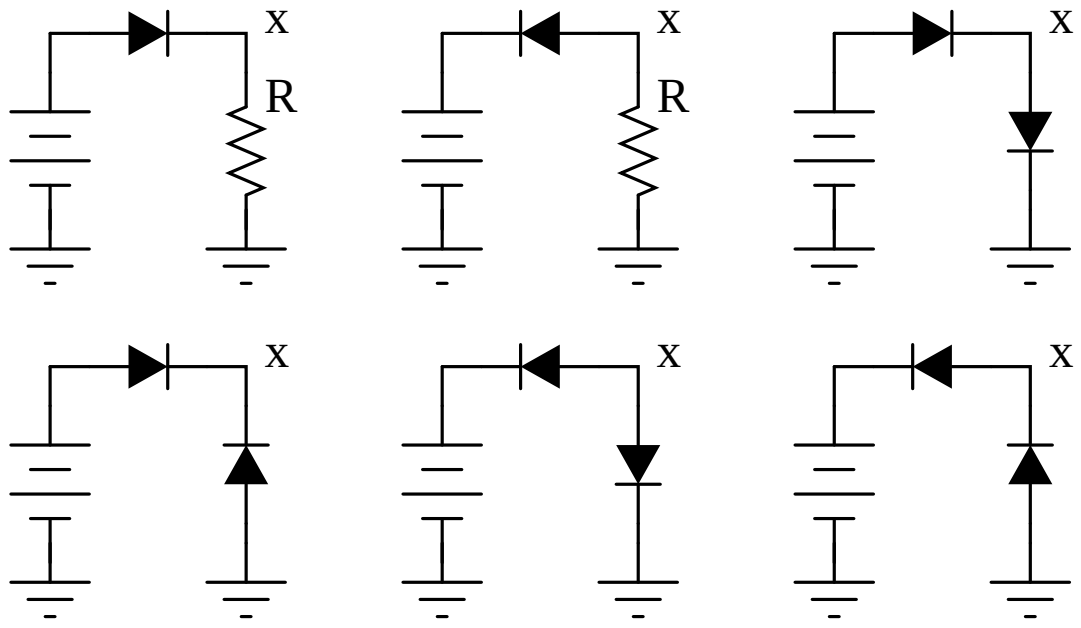


Figura 11: Circuitos pregunta 5

Recordamos que el modelo exponencial para la corriente de un diodo es

$$I_D(v_D) = I_S \cdot \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1\right)$$

A continuación se presenta una justificación cualitativa para cada uno de los casos

- **Caso 1: Baja Impedancia $\rightarrow$ Alta Impedancia.** Para subir la impedancia del nodo, se debe inyectar corriente (que circulará por R) para subir el voltaje del nodo de salida. Cuando el voltaje de dicho nodo sea aproximadamente 5 V, el diodo conectado a la fuente de voltaje no conducirá una cantidad apreciable de corriente y presentará una alta impedancia. Esto puede observarse en la curva de carga graficada en la figura 12, donde puede apreciarse de manera explícita el sentido de la fuente. La magnitud de la corriente debe ser de $I = \dfrac{5}{R}$, para llevar el nodo de salida a 5 V.

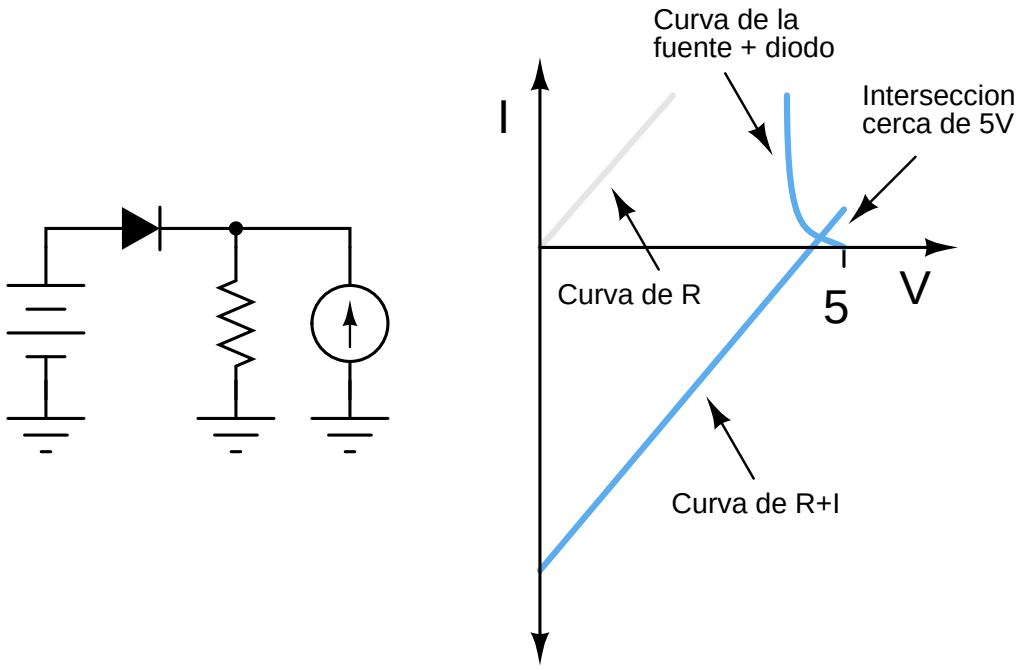


Figura 12: Circuito 1 y curva de carga.

- **Caso 2: Alta Impedancia $\rightarrow$ Baja Impedancia.** En este caso, para bajar la impedancia del nodo, es necesario inyectar corriente para subir el voltaje del nodo de salida, y de esta manera polarizar el diodo que mira hacia la fuente de voltaje. Es posible apreciar la dirección de la fuente de corriente y su efecto en la curva de carga en la figura 13. Una aproximación para el voltaje del nodo es 5,7 V, que logra polarizar el diodo. La magnitud de la fuente de corriente necesaria para llevar el nodo a dicho voltaje es $I = \frac{5,7}{R}$, donde se asume que antes de polarizar el diodo este tiene muy alta impedancia, por lo que toda la corriente se consume en la resistencia R.

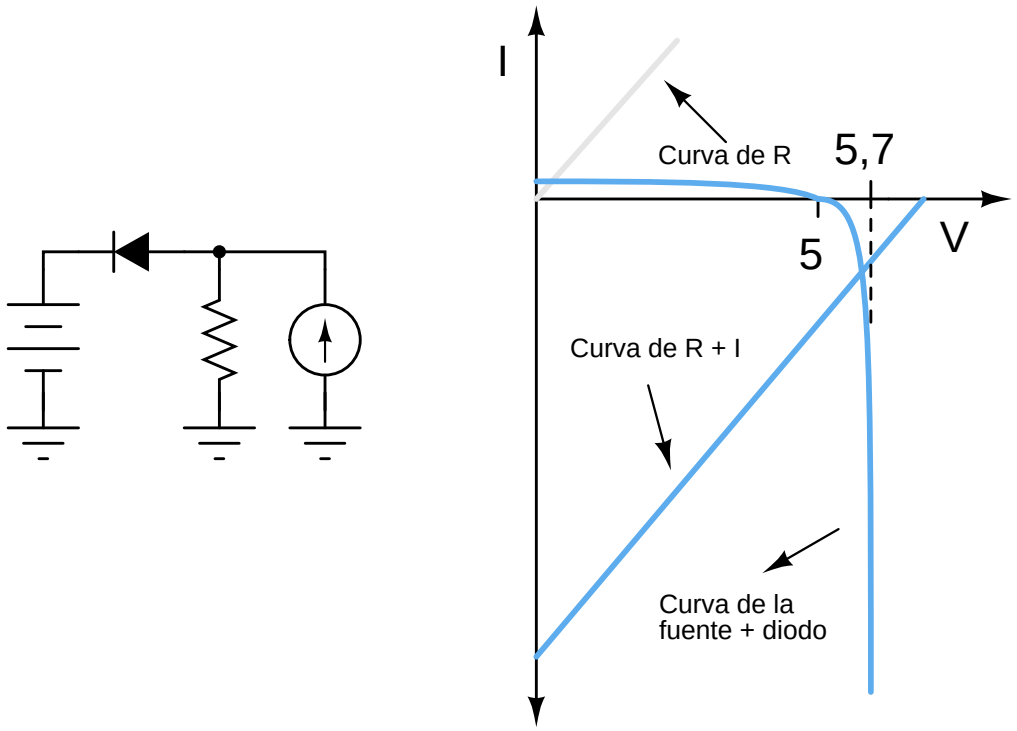


Figura 13: Circuito 2 y curva de carga.

- **Caso 3: Baja Impedancia.** No es posible convertir este nodo en uno de alta impedancia mediante una fuente de corriente. Independiente de la dirección, la corriente inyectada o extraída puede circular por alguno de los dos diodos, haciendo que este nodo sea de baja impedancia.

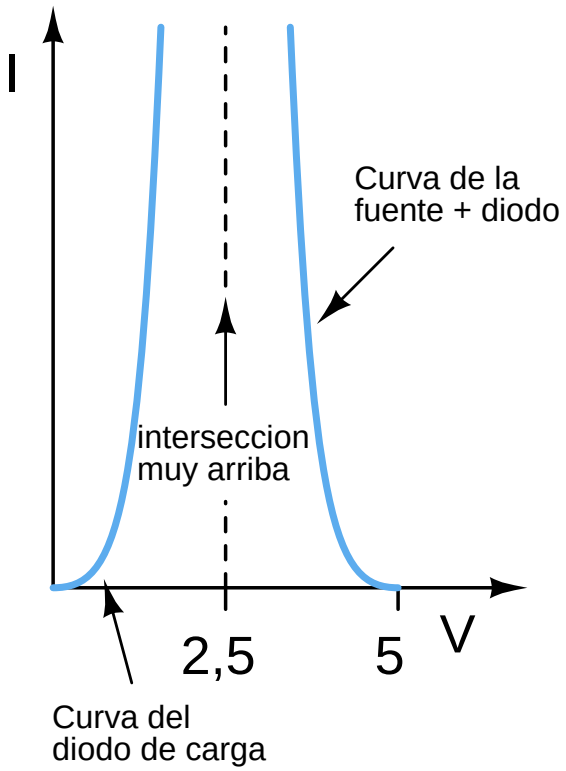


Figura 14: Curva de carga de circuito 3.

- **Caso 4: Alta Impedancia → Baja Impedancia.** En este caso, para bajar la impedancia del nodo, es necesario polarizar el diodo conectado a la fuente de voltaje, mediante una fuente de corriente que consuma la corriente del diodo y le permita conducir libremente. El voltaje del nodo puede aproximarse por 4,3 V, voltaje para el cual el diodo conectado a la fuente de voltaje tendrá muy baja impedancia. La magnitud de la corriente I necesaria para llevar el voltaje del nodo a ese valor es $I = I_D(0,7)$. Es claro que estos valores son muy aproximados, y es probable que se necesite mucha menos corriente para poder caracterizar el nodo como baja impedancia.

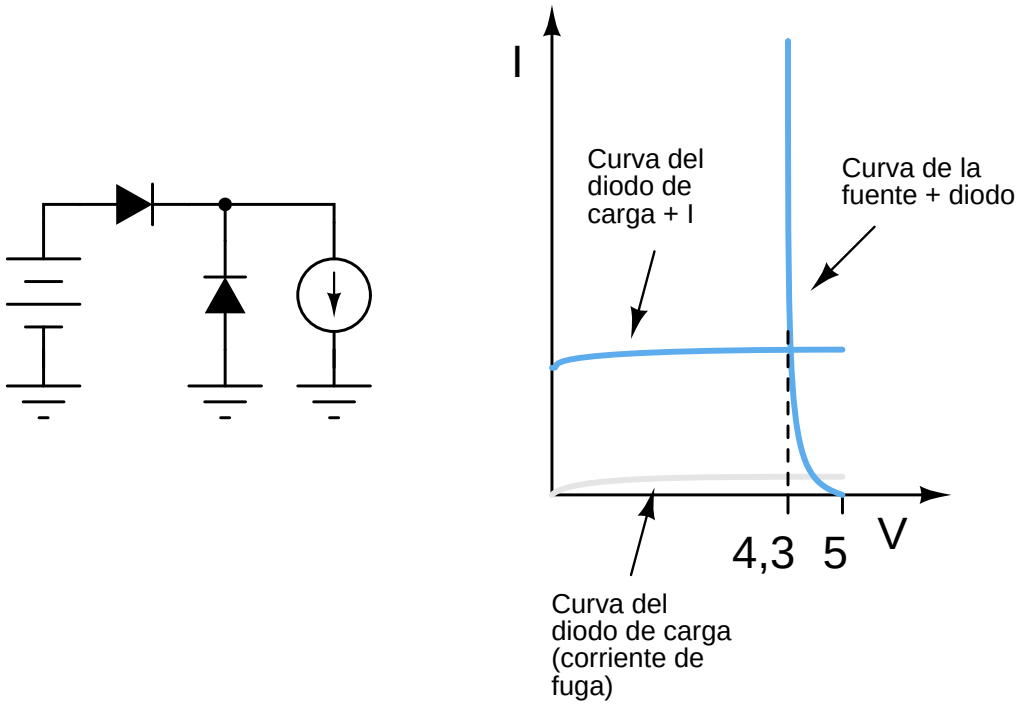


Figura 15: Circuito 4 y curva de carga.

- **Caso 5: Alta Impedancia → Baja Impedancia.** En este caso se inyecta corriente para polarizar el diodo de carga de manera directa. El voltaje del nodo será aproximadamente de 0,7 V, y la magnitud de corriente necesaria será de $I = I_D(0,7)$.

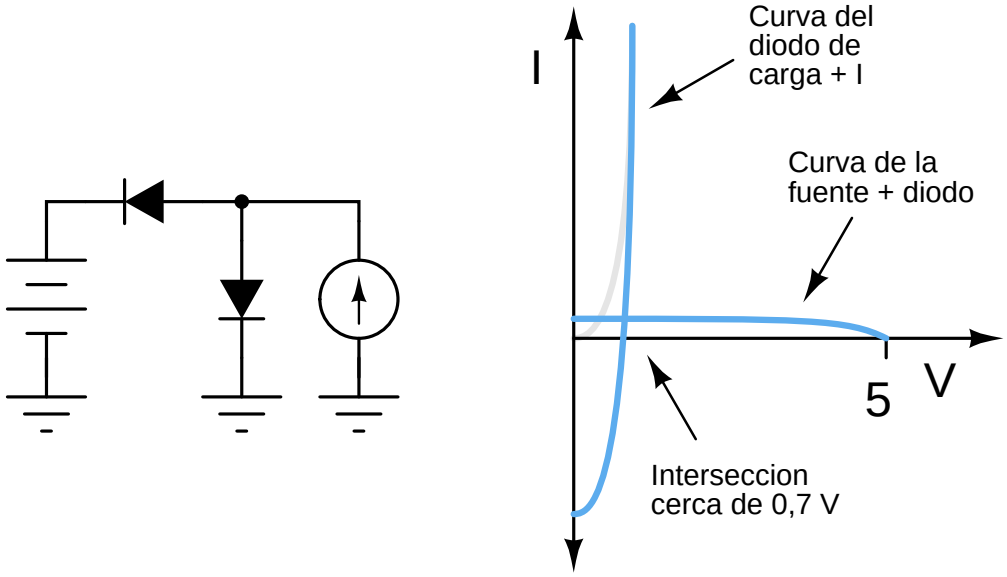


Figura 16: Circuito 5 y curva de carga.

- **Caso 6: Alta Impedancia → Baja Impedancia.** En este caso se inyecta corriente para polarizar el diodo conectado a la fuente de voltaje de manera directa. El voltaje del nodo será aproximadamente de 5,7 V, y la magnitud de corriente necesaria será de $I = I_D(0,7)$.

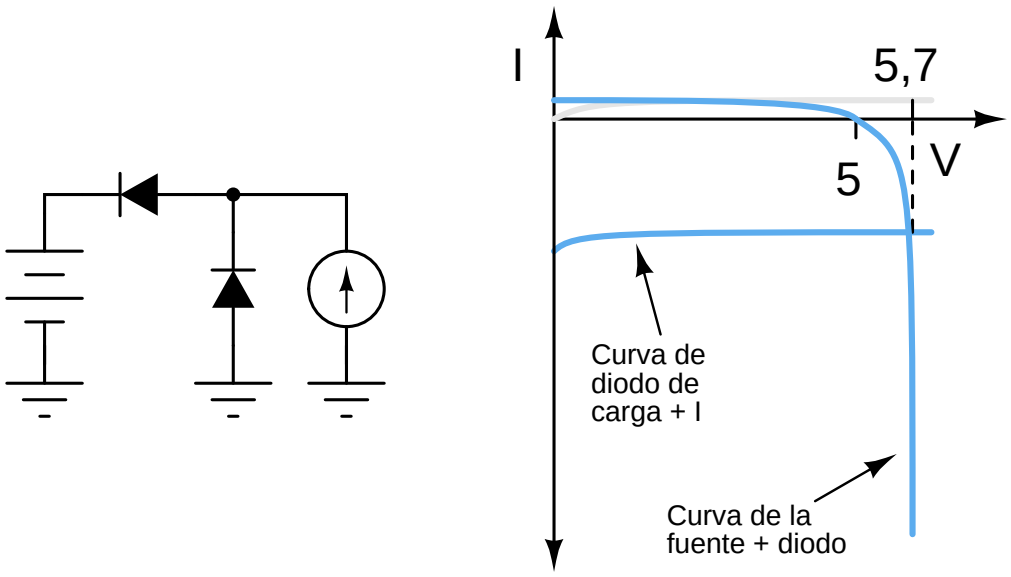


Figura 17: Circuito 6 y curva de carga.

7) El voltaje de rizado del rectificador de onda completa viene dado por:

$$V_r = \frac{V_p}{2fCR}$$

Donde V_p es la amplitud del voltaje rectificado, f es la frecuencia el voltaje, C es la capacitancia de el filtro y R la resistencia de la carga. Ahora si consideramos que la frecuencia es de 50 hz, $R = 10$ Ω y que $V_p = V_{rms}\sqrt{2} - 1.4 = 15.57$ V (Hay que considerar la caída de voltaje en cada diodo). Con estos valores se obtiene una capacitancia de 0.519 F. Se puede ver que la capacitancia es muy grande por lo que lograr valores pequeños de ripple es algo difícil. El valor de la corriente máxima que circula por cada diodo es:

$$I_{Dmax} = I_L \left(1 + 2\pi\sqrt{\frac{V_p}{2V_r}}\right)$$

I_L va a ser $\frac{V_p}{10} = I_L = 1,557$ A. Reemplazando en la expresión para la corriente máxima que pasa por el diodo: $I_{Dmax} = 159.2$ A. Ahora simulamos el circuito rectificador de onda completa en LTspice y obtenemos los siguientes resultados:

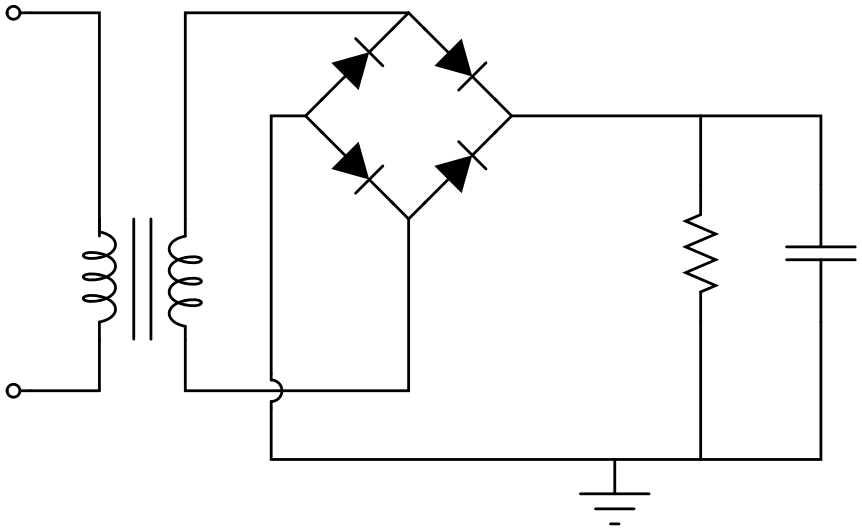


Figura 18: Rectificador de onda completa.

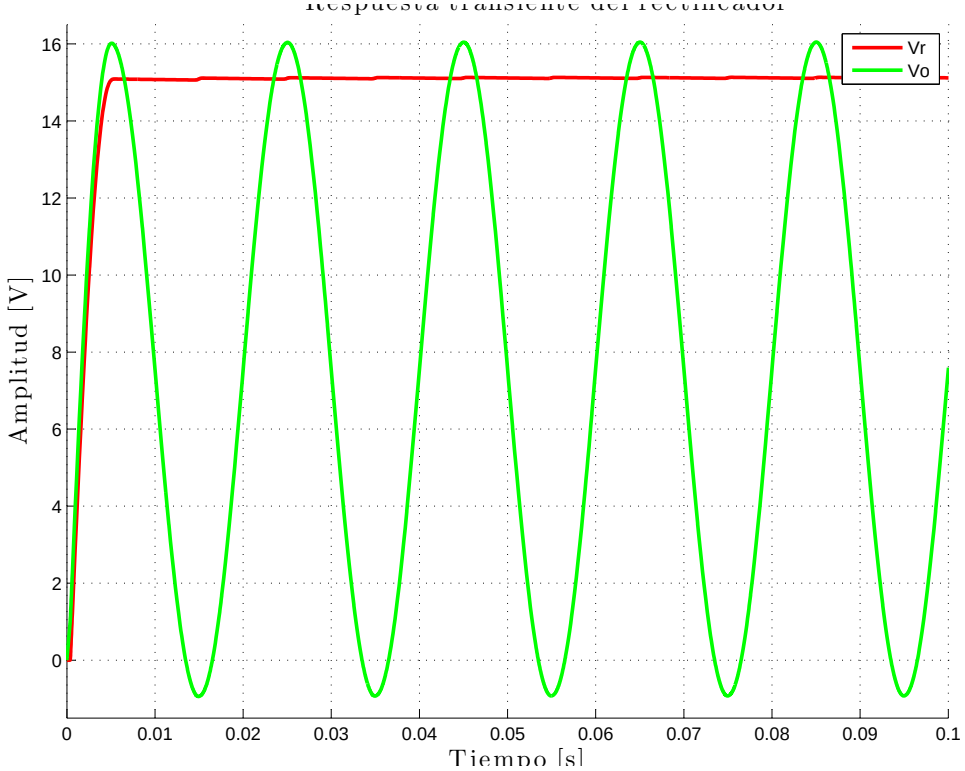


Figura 19: Voltaje de salida.

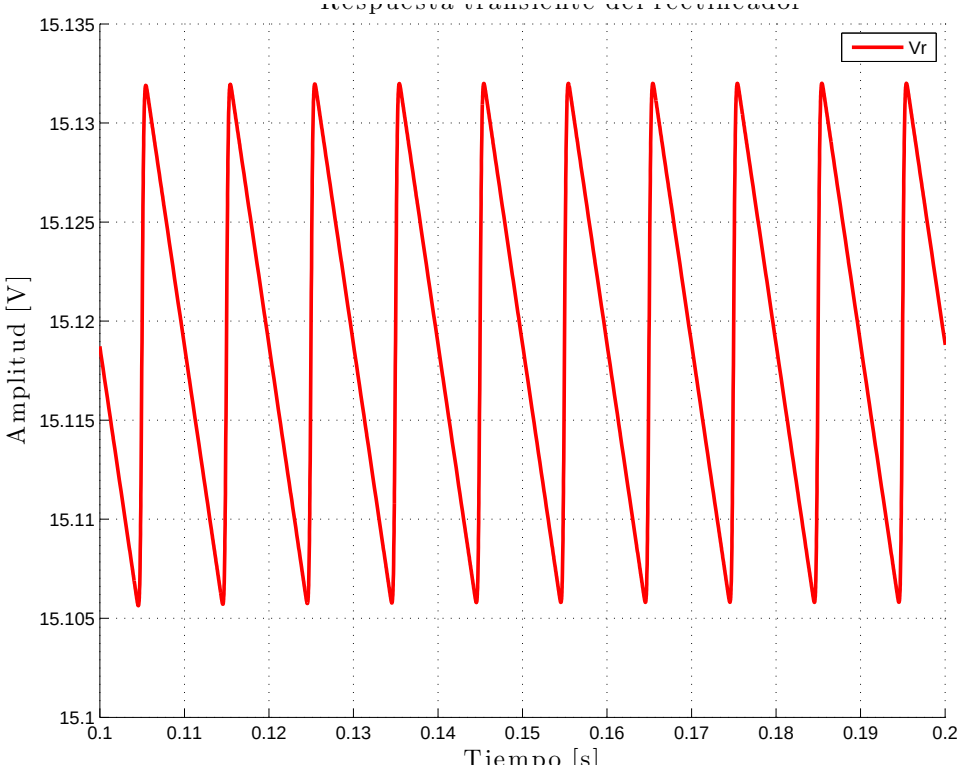


Figura 20: Voltaje de rizado.

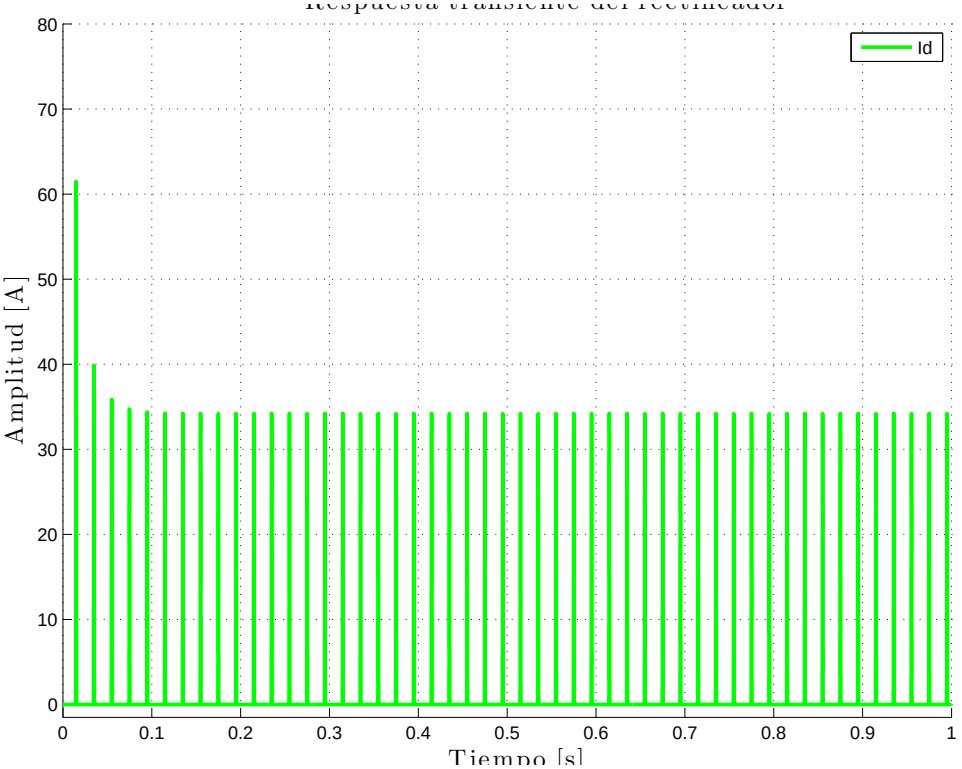


Figura 21: Corriente de diodo.

Se puede ver que la simulación da resultados similares a los que hemos calculado, las diferencias en la corriente del diodo se debe a que la conducción de este es gradual. Además la ecuación de I_{Dmax}

sobreestima la corriente con el objetivo de hacer diseños más conservadores.

8) a) `https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf`

b) Figura.

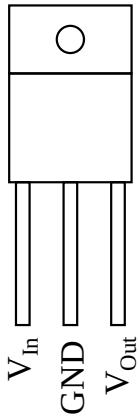


Figura 22: Encapsulado TO-220

c) Según la hoja de datos, el valor máximo absoluto es 2.2 A mientras que el máximo continuo es 1.5 A. La potencia que el TO-220 puede disipar depende de si tiene o no disipador de calor. Sin disipador, la temperatura del chip sube 19 °C por cada watt disipado.

d) Un 7805 es conectado a una alimentación de 7 V para que produzca 5 V a la salida. Suponga que la corriente en el terminal de tierra del 7805 es 5 mA. Determine la corriente en los otros pines del 7805 cuando su salida es conectada a una carga de 10 Ω.

e) El circuito es el de la figura:

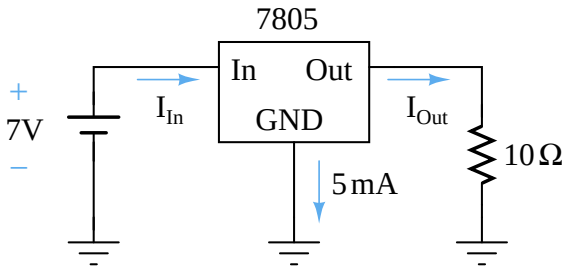


Figura 23: Configuración de un 7805

La entrada es 2 V sobre el voltaje nominal de salida. Por lo tanto, de acuerdo a especificaciones, el regulador está funcionando y la salida es 5 V. Por ley de Ohm, la corriente de salida es 500 mA, por debajo del límite establecido en las hojas de datos.

Haciendo un supernodo, las corrientes que salen del 7805 suman 505 mA. Por lo tanto, $I_{In} = 505\,\text{mA}$.

f) En este caso la corriente de salida es $I_{Out} = 0.5\,\text{A}$, muy por debajo del límite especificado por el fabricante. La corriente de entrada será $I_{In} = 0.505\,\text{A}$.

g) La disipación de potencia es la diferencia entre la potencia que entra y la que sale.

La potencia que entra es

$$P_{In} = V_{In} \cdot I_{In}$$

En el primer caso, la potencia que entra es $P_{In1} = 3.535\,\mathrm{W}$, mientras que en el segundo caso, la potencia que entra es $P_{In2} = 7.575\,\mathrm{W}$.

La potencia que sale es la suma de las potencias que salen en todos los terminales que entregan potencia. El terminal conectado a tierra no entrega potencia, porque su voltaje es 0 V. Por lo tanto, la potencia que sale es la que se entrega a la carga. En ambos casos la potencia entregada a la carga es 2.5 W.

La potencia disipada por el 7805 en el primer caso es:

$$P_1 = P_{In1} - P_{Out1} = 3.535\,\mathrm{W} - 2.5\,\mathrm{W} = 1.035\,\mathrm{W}$$

La potencia disipada por el 7805 en el segundo caso es:

$$P_2 = P_{In2} - P_{Out2} = 7.575\,\mathrm{W} - 2.5\,\mathrm{W} = 5.075\,\mathrm{W}$$

h) Interesante. Subo el voltaje de entrada a poco más del doble y la potencia disipada por el 7805 sube en casi 5 veces. Esto es porque el 7805 es un regulador lineal que asume el voltaje extra y disipa la potencia resultante, a diferencia de los reguladores switching que son mucho más eficientes y convierten la potencia (ahí no sirve usar supernodo, porque las corrientes son pulsantes).

Veamos cuál es el efecto en temperatura. Según la hoja de datos, $\theta_{JA} = 19\,^\circ\mathrm{C}/W$, lo que significa que sin un disipador de calor, por cada watt que disipe el 7805, la temperatura del semiconductor aumentará 19 °C. Si la temperatura ambiente es 30 °C, en el primer caso la temperatura de la unión será de 49.7 °C, mientras que en el segundo caso la temperatura de la unión subirá a 126.4 °C. En este último caso, sin un disipador adecuado, el chip se calentará muchísimo y dejará de funcionar adecuadamente.

Conclusión: un regulador lineal entregando una potencia a una carga fija, disipará más (mucho más) o menos potencia dependiendo del voltaje de entrada. En este caso, al subir el voltaje de entrada de 7 V a 15 V la potencia disipada por el 7805 crece a valores que requieren el uso de un disipador.

9) a) El siguiente *datasheet* se aplica para todos los reguladores de la serie LM78XX de National Semiconductor.

`http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/150/44435_DS.pdf`

b) La fuente diseñada con sus etapas de transformador, rectificador de onda completa, filtro, regulador de voltaje y carga se muestra a continuación:

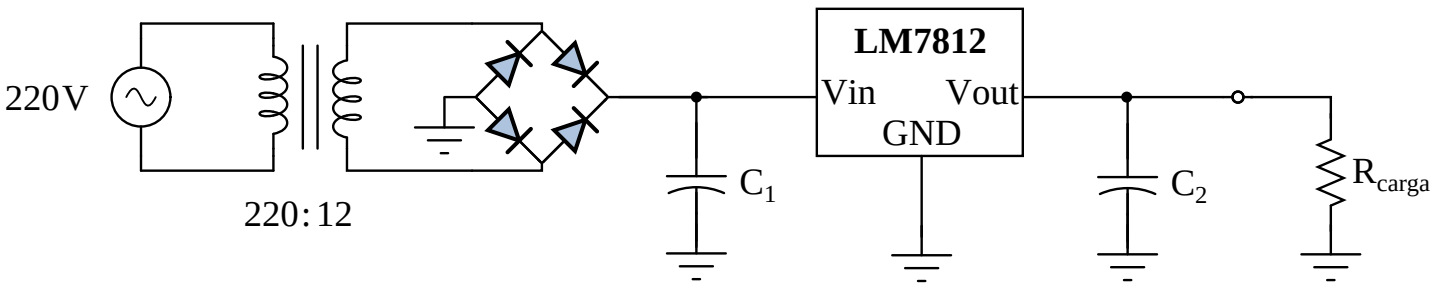


Figura 24: Fuente de alimentación unipolar

El transformador se encarga de convertir los 220 Vrms de su bobina primaria en un voltaje de 12 Vrms en su bobina secundaria. Luego, el puente de diodos transforma el voltaje AC en mitades positivas de sinusoide.

El capacitor a la entrada del regulador cumple la función de cargarse y disminuir la caída del voltaje semi-sinusoidal cuando los diodos dejan de conducir (en vez de caer con la forma de la sinusoide, ahora el voltaje decae como una exponencial, lo que es mucho más lento). La idea es elegir un capacitor muy grande para que demore más en descargarse y disminuya el *ripple* o rizado de la señal.

Tras pasar por el rectificador con filtro, el voltaje con *ripple* entra al regulador de voltaje LM7812. De la hoja de datos se sabe que se requiere un $V_{in} = 14.6\,\text{V}$ para que el regulador pueda mantener 12 V a su salida. Si bien en la bobina secundaria del transformador se tienen 12 V, hay que recordar que esto es Vrms, por lo que en realidad, hay un $V_{peak} = 12\sqrt{2}\text{V}$ y, tras pasar por el rectificador con filtro, se tiene un $V_{peak} = 12\sqrt{2}\text{V} - 2 \cdot 0.7\text{V}$ por la caída en los diodos. Si se escoge una capacitancia muy grande de forma que el *ripple* no sea tan severo, se podrá asegurar que siempre se cumplirá $V_{in} > 14.6\text{V}$, por lo que el regulador operará correctamente. El LM7812, junto con la capacitancia a la salida, se encargarán de estabilizar el voltaje de salida en exactamente 12 V.

Asumiendo que la carga de la fuente es de $12\,\Omega$, puede calcularse la corriente de salida del regulador en DC:

$$I_{Out} = \frac{12V}{12\Omega} = 1\,\text{A}$$

Esta corriente está por debajo de lo especificado en la hoja de datos del LM7812, por lo que no habrá problemas en el funcionamiento del regulador.

c) El voltaje de *ripple* está dado por:

$$V_r = \frac{I_{carga}}{2f\,C}$$

El factor en el denominador es $2f$ porque, tras pasar por el puente de diodos, los *peaks* de la sinusoide estarán el doble de cercanos. La corriente de carga que ve el rectificador se obtiene sumando las corrientes de los terminales de tierra y salida del rectificador.

$$I_{carga} = I_{GND} + I_{Out} = 1.005\text{A}$$

Luego, el valor de la capacitancia de entrada debe ser:

$$C \geq \frac{I_{carga}}{2f} = \frac{1.005\text{A}}{100\text{Hz}} = 10.05\text{mF}$$

Con una capacitancia mayor o igual a este valor, el voltaje a la salida del rectificador oscilará entre el voltaje máximo $V_{peak} = 12\sqrt{2}\text{V} - 2 \cdot 0.7\text{V} = 15.57\text{V}$ y el voltaje cuando justo cuando los diodos comienzan a conducir ($12\sqrt{2}\text{V} - 2 \cdot 0.7\text{V} - 1\text{V} = 14.57\text{V}$).

d) El modelo usado para simular en SPICE se adjunta a continuación:

```
* Subcircuito LM7812
.SUBCKT LM7812  1    2    3
QT6          23  10  2   Q_NPN 0.1
QT7          5   4   10  Q_NPN 0.1
QT5          7   6   5   Q_NPN 0.1
QT1          1   9   8   Q_NPN 0.1
QT3          11  8   7   Q_NPN 0.1
QT2          11  13  12  Q_NPN 0.1
QT17         1   15  14  Q_NPN 10
```

```
C2          10  23      4P
R16         12  5       500
R12         16  2       12.1K
QT18        17  23  16  Q_NPN 0.1
D1          18  19    D_D
R11         20  21      850
R5          22  3       100
QT14        24  18  2   Q_NPN 0.1
R21         6   2       2.67K
R20         3   6       5.22K
DZ2         25  26      D_5V1
R19         1   26      16K
R18         14  3       250M
R17         25  14      380
R15         25  15      1.62K
QT16        1   20  15  Q_NPN 1
QT15        2   24  21  Q_PNP 0.1
*OFF
R14         21  24      4K
C1          27  24      20P
R13         19  2       4K
QT13        24  27  18  Q_NPN 0.1
QT12        20  25  22  Q_NPN 1
*OFF
QT11        20  28  2   Q_NPN 0.1
*OFF
QT10        20  11  1   Q_PNP 0.1
R10         17  27      16.5K
R9          5   4       1.9K
R8          4   23      26
R7          10  2       1.2K
R6          29  2       1K
QT9         11  11  1   Q_PNP 0.1
QT8         27  16  29  Q_NPN 0.1
QT4         15  6   17  Q_NPN 0.1
DZ1         2   9       D_5V6
R4          1   9       80K
R3          28  2       830
R2          13  28      4.97K
R1          8   13      7K
*
.MODEL D_5V1 D( IS=10F N=1.16 BV=5.1 IBV=0.5M CJ0 = 1P TT = 10p )
.MODEL D_5V6 D( IS=10F N=1.16 BV=5.6 IBV=5U CJ0 = 1P TT = 10p )
.MODEL Q_NPN NPN( IS=10F NF=1.16 NR=1.16 BF=80 CJC=1P CJE=2P
+       TF=10P TR=1N )
.MODEL Q_PNP PNP( IS=10F NF=1.16 NR=1.16 BF=80 CJC=1P CJE=2P
+      TF=10P TR=1N )
.MODEL D_D D( IS=1F N=1.16 CJ0 = 1P TT = 10p )
*
.ENDS LM7812
```

e) Simulando en LTspice se obtiene que el voltaje después del transformador (V_{in}), después del rectificador con filtro (V_c) y después del regulador (V_{out}) son:
La sinusoidal V_{in} tiene voltaje pico-pico de $12\sqrt{2}$V y frecuencia de 50 Hz tal como era esperado. V_c tiene como valor máximo $12\sqrt{2}\text{V} - 2 \cdot 0.7\text{V}$ aproximadamente y luego decae exponencialmente a un voltaje lo suficientemente grande como para que el regulador 7812 pueda seguir funcionando. Los valores máximos y mínimos de V_c son ligeramente distintos a los calculados a mano debido a que se utilizó en la simulación el modelo de diodo que LTspice trae por defecto. Finalmente, el voltaje a la salida del regulador está fijo en aproximadamente 12 V que era lo que se buscaba a la salida de la fuente de potencia.

Midiendo la corriente que pasa por la carga de 12 Ω se obtiene:

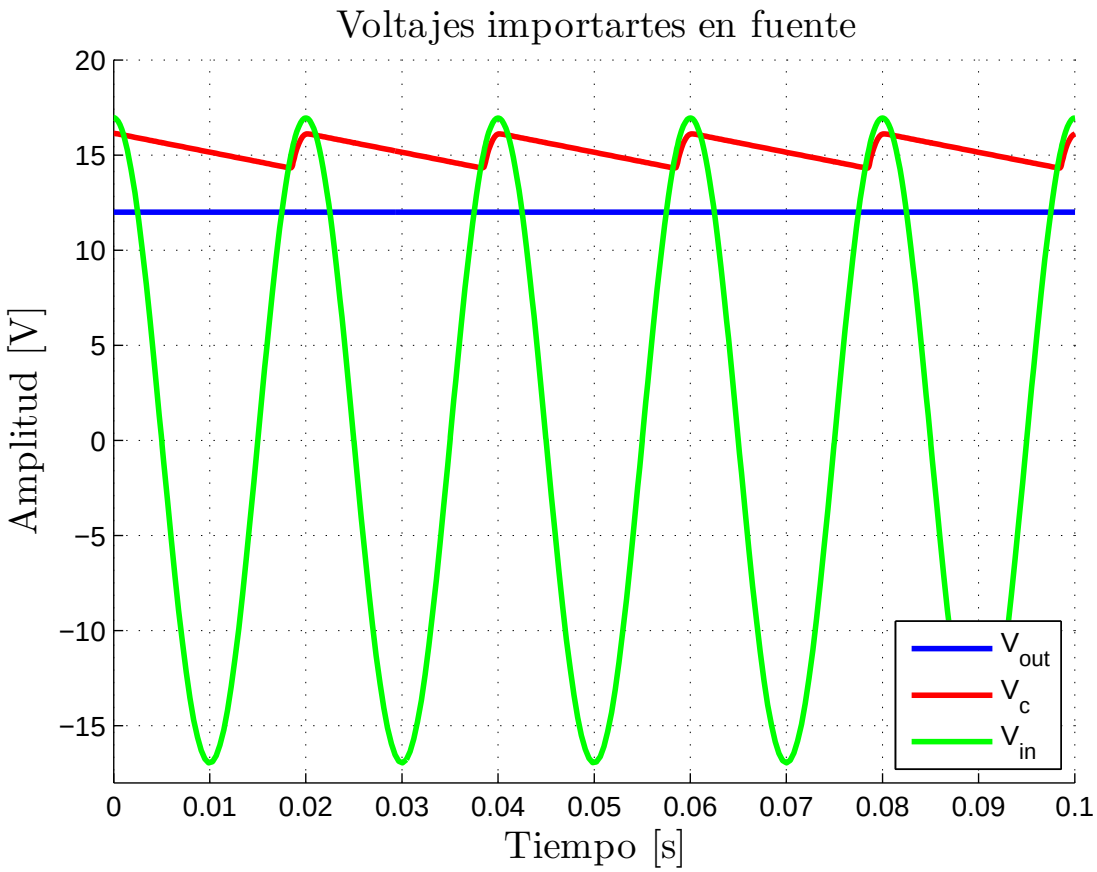


Figura 25: Voltajes de la fuente simulada

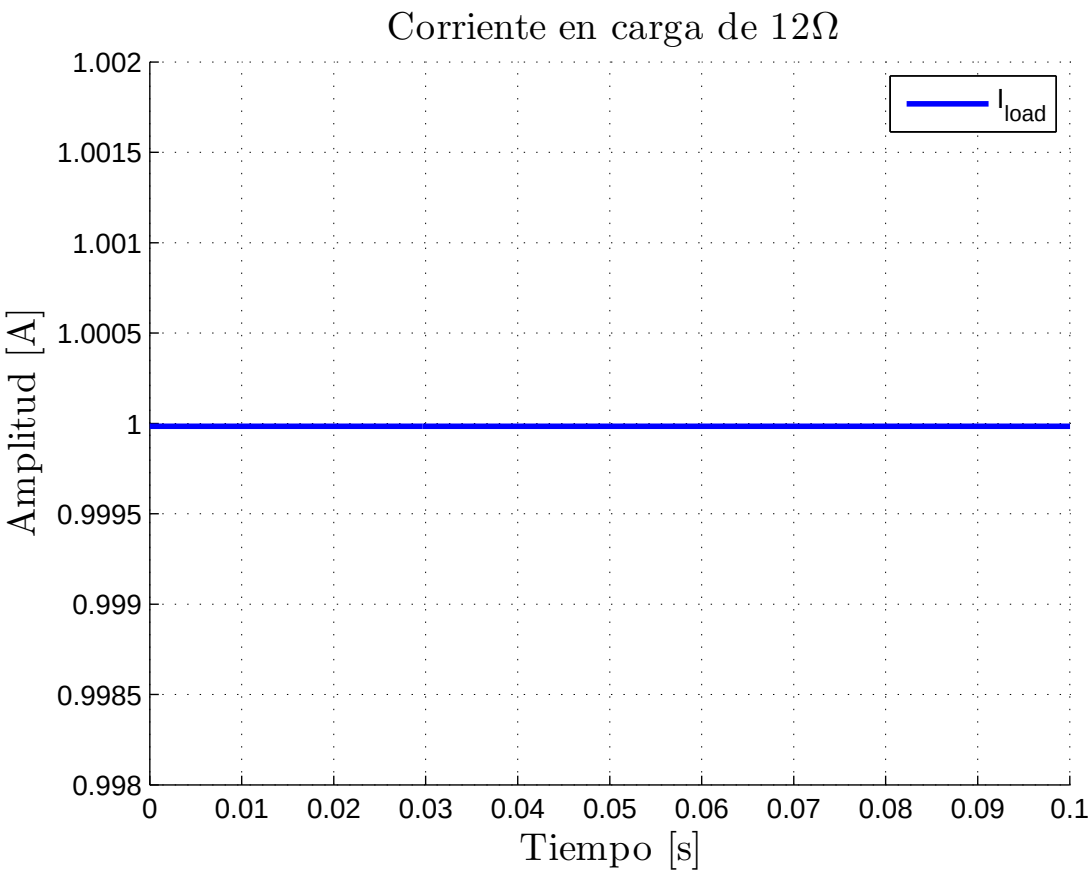


Figura 26: Corriente en la carga

Tal como fue calculado previamente, la corriente I_{Out} es aproximadamente 1 A.

10) La curva I-V del diodo en SPICE se puede ver en la siguiente figura 1.

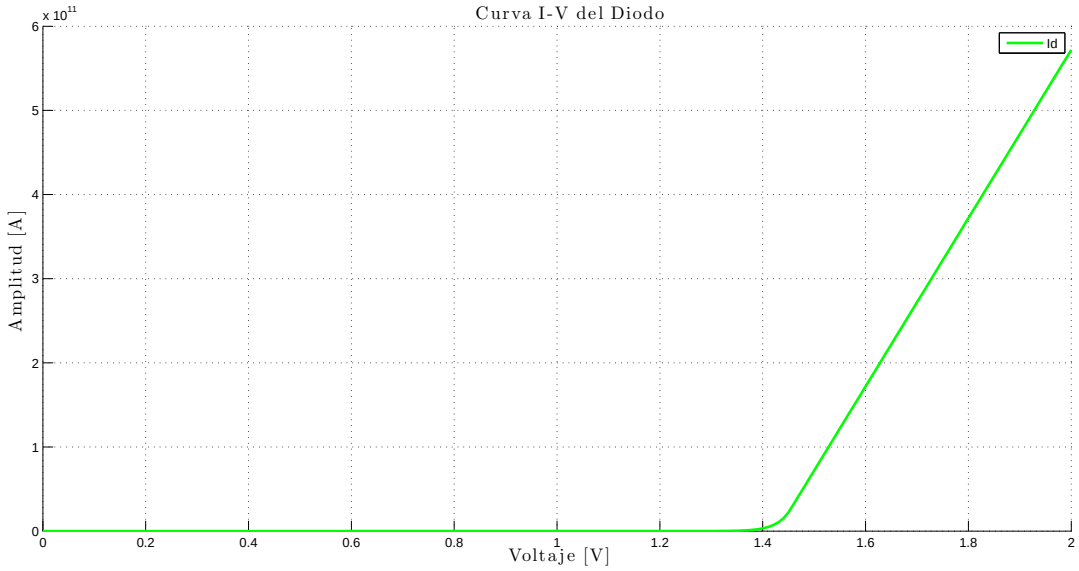


Figura 27: Curva I-V del diodo.

En la figura 2 se ve que se alcanza un valor gigantesco de corriente por lo tanto vamos a hacer un zoom para voltajes menores a 1V.

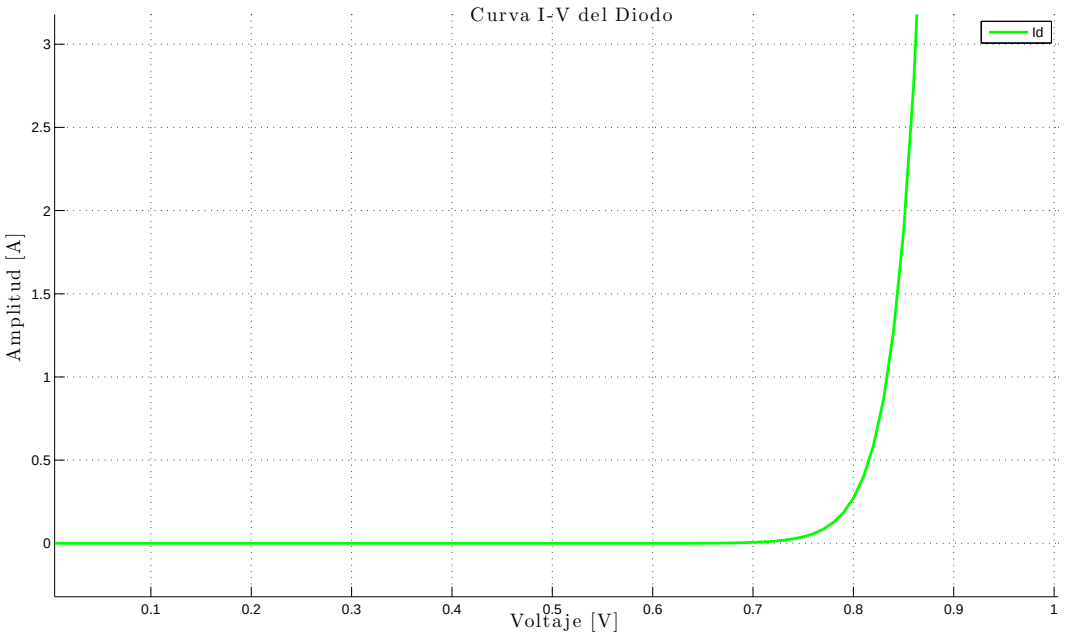


Figura 28: Curva I-V del diodo.

En este tramo la corriente se comporta de forma exponencial. Ahora graficamos la curva pero en escala logarítmica para hacer un análisis más exhaustivo de la forma de esta (figura 3).

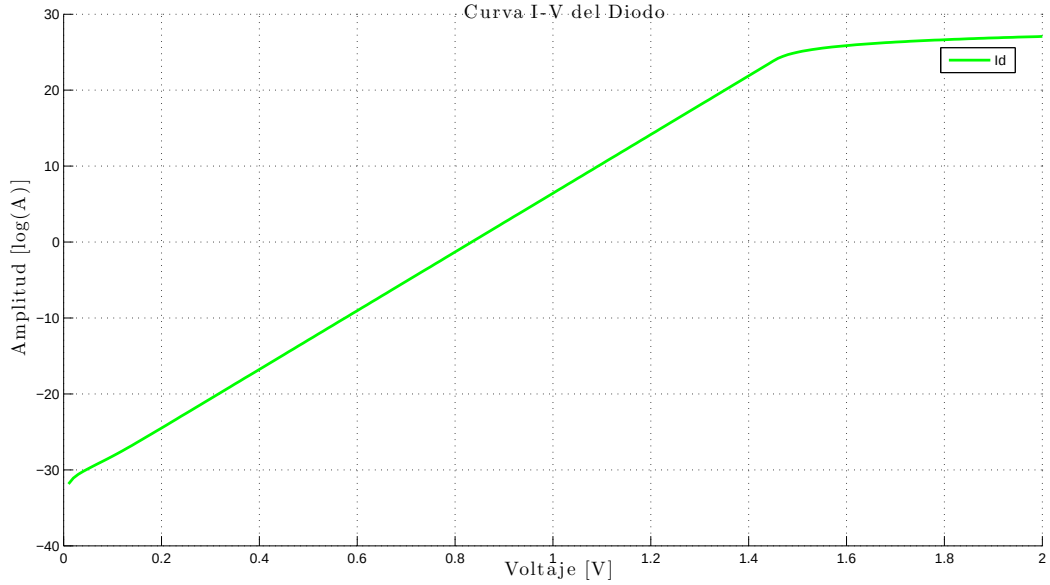


Figura 29: Curva I-V del diodo en escala log.

Se puede ver que se mantiene constante hasta un punto en que la recta disminuye su pendiente, una explicación para esto es porque el diodo a altas tensiones deja de estar en una zona de baja inyección y entra en una de alta inyección lo que provoca una caída en la pendiente. Otra causa de esto es que la caída de potencial en la resistencia en serie del diodo se hace comparable con el voltaje en el diodo, lo que hace que la corriente que circula en el diodo disminuya. Los modelos en SPICE son muy buenos en este sentido ya que son precisos, el problema es que hacer un cálculo así a mano puede ser muy complicado, complicando el diseño.

11) En la figura 30 se muestra el esquemático de la fuente de potencia bipolar solicitada, con carga en ambos canales. En este esquemático está implícita una consideración práctica para este tipo de fuentes. Los condensadores C_1 y C_2 son usualmente grandes para reducir el *ripple*. Típicamente se utilizan condensadores electrilíticos dado que estos alcancan mayor capacitancia por unidad de volumen, por lo que en el esquemático se muestran condensadores con polaridad. Ojo que en el canal negativo (condensador C_2) la placa positiva va conectada a tierra, para polarizar correctamente el capacitor.

    Se utilizan también conensadores de tantalio (que tienen polaridad), y estos tienen la ventaja, por sobre los condensadores electrolíticos, de tener una menor resistencia equivalente en serie (*ESR: series equivalent resistance*).

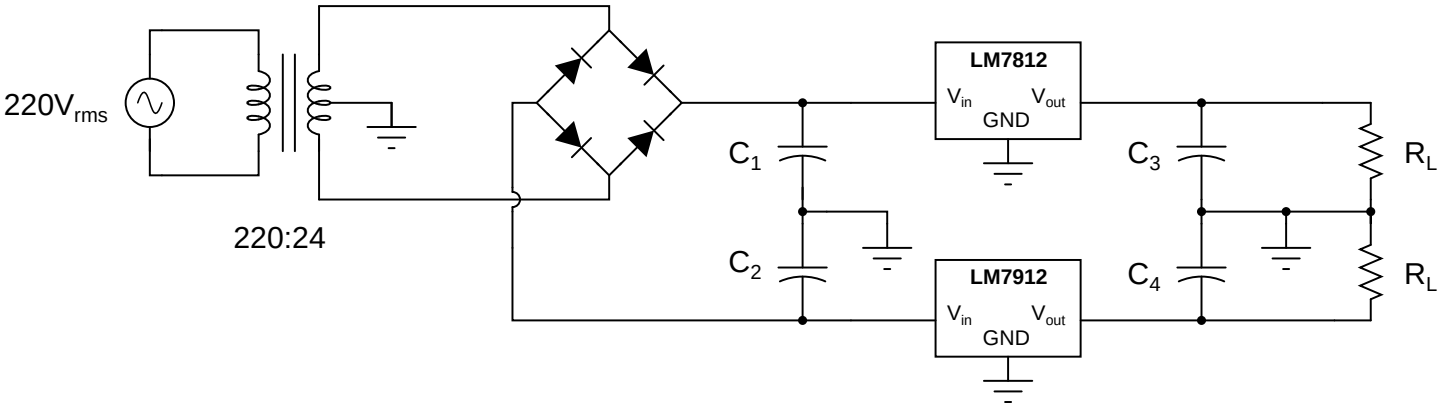


Figura 30: Fuente de potencia bipolar.

Es posible extender el desarrollo de la Tarea 31 a esta fuente. Entre los extremos del bobinado secundario del transformador hay 24 V_{rms}, y hay 12 V_{rms} entre cada uno de los terminales y tierra. El cálculo de los condensadores C_1 y C_2, tanto para el canal positivo y negativo, es totalmente análogo. Se refiere al lector a la pauta de la Tarea 31 para ver el cálculo de los capacitores bajo las condiciones antes planteadas. La única diferencia en el cálculo respecto a la fuente unipolar es que se debe considerar es que el voltaje peak a la salida del rectificador es $V^+_{peak} = 12\sqrt{2} - 0.7$ para el canal positivo, y $V^-_{peak} = -12\sqrt{2} + 0.7$ para el canal negativo.

Vale la pena enfatizar que al diseñar la fuente, como en cualquier circuito electrónico, existen compromisos.

- Si se hubiera elegido un voltaje en el bobinado secundario mayor, entonces se podría haber relajado la condición de *ripple*, lo que permite disminuir el tamaño de los capacitores C_1 y C_2. Sin embargo, esto produce también que los reguladores consuman mayor potencia, dado que para la misma corriente, existiría una mayor caída de voltaje.
- Al elegir un voltaje en el bobinado secundario más cercano al límite necesario para el funcionamiento del regulador, se necesita disminuir el *ripple*, lo que hace necesario utilizar capacitores más grandes y aumenta la corriente que circula por los diodos.