



## **Informe Técnico**

# **Uso de disipadores de calor en una fuente de alimentación basada en un regulador lineal integrado**

---

**Autor**

**Miguel Ángel Bañuelos Saucedo**

**Fecha**

**Septiembre-2018**

**Tipo de Proyecto**

**Desarrollo Tecnológico**

**Financiamiento interno**

**Título:** Uso de disipadores de calor en una fuente de alimentación basada en un regulador lineal integrado

**Autores:** Miguel Ángel Bañuelos Saucedo

**Grupo de Electrónica, ICAT, UNAM**

## **Resumen**

Las fuentes de alimentación lineales son un elemento común en el diseño de circuitos electrónicos. Su diseño se ha simplificado debido a que existen numerosas alternativas, y mucha información técnica para la utilización de reguladores de voltaje integrados lineales. Sin embargo, se suele pasar por alto el manejo de potencia y las características apropiadas del disipador de calor que se requiere cuando el regulador integrado debe disipar más de un par de watts. En este documento se presenta el diseño y análisis de una fuente de alimentación de 5 V de corriente directa basada en un regulador de voltaje LM7805, poniendo énfasis en las consideraciones térmicas para el manejo de la potencia disipada. Se describe el método para seleccionar los componentes principales de la fuente, incluyendo el disipador de calor, capacitores de desacoplo y diodos de protección. Se analiza el desempeño en términos del voltaje, la corriente en la carga y la temperatura que alcanza el dispositivo. Se mencionan también los problemas encontrados con dispositivos falsificados.

## Índice

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen .....                                                                          | 1  |
| Nomenclatura .....                                                                     | 3  |
| Introducción .....                                                                     | 4  |
| 1    Consideraciones generales en el diseño de una fuente de alimentación lineal ..... | 4  |
| 1.1    Diseño de una fuente de voltaje de 5 V CD .....                                 | 6  |
| 1.2    Modelo térmico .....                                                            | 7  |
| 2    Resultados.....                                                                   | 10 |
| 3    Discusión .....                                                                   | 12 |
| Conclusiones .....                                                                     | 13 |
| Referencias bibliográficas .....                                                       | 14 |

## Nomenclatura

| <i><b>Símbolo</b></i> | <i><b>Significado</b></i> |
|-----------------------|---------------------------|
| CD                    | Corriente directa         |
| CA                    | Corriente alterna         |

## Introducción

Los sistemas electrónicos requieren de una fuente de alimentación. Es muy común utilizar una fuente que produzca un voltaje de CD (corriente directa) a partir de la energía que proviene de la red eléctrica de CA (corriente alterna). Cuando se debe diseñar este tipo de fuentes, es una práctica extendida el recurrir a la utilización de reguladores de voltaje lineales integrados en una topología que se presenta en la Figura 1, y que consiste de un transformador, una etapa de rectificación, una de filtrado y una de regulación (Boylestad and Nashelsky, 2012). Para su diseño se siguen algunas reglas generales tales como utilizar un capacitor de filtrado de 1000  $\mu\text{F}$  por cada ampere de corriente (Sinclair, 2000), o sobredimensionar ligeramente la corriente proporcionada por el transformador y manejada por la etapa de rectificación (NSC, 1980). También se sugiere que el voltaje de clasificación del capacitor sea 1.3 veces el voltaje de operación (Lenk, 1994). En particular, cuando la potencia a disipar por el regulador de voltaje rebasa los dos watts, es necesario colocarle un disipador de calor. La selección de este dispositivo comúnmente se hace de forma heurística; sin embargo, el conocimiento del modelo térmico permite hacer una selección más adecuada. De esta manera se evitan problemas en el diseño del espacio requerido dentro del circuito impreso. En el presente trabajo se muestra el procedimiento de selección del disipador de calor y se presentan pruebas de funcionamiento.

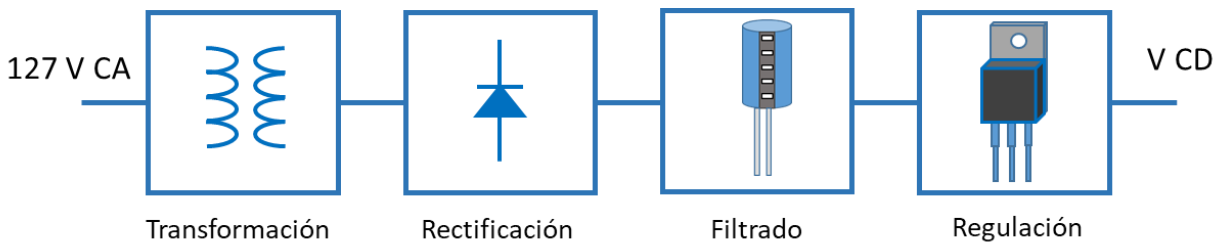


Figura 1. Diagrama de bloques de una fuente de corriente directa basada en un regulador de voltaje integrado.

## 1 Consideraciones generales en el diseño de una fuente de alimentación lineal

Considérese una fuente de alimentación con regulador integrado y puente rectificador de onda completa como el mostrado en la Figura 2. Donde  $V_{CA}$  es el voltaje de corriente alterna en el secundario del transformador,  $V_{RECT}$  es el voltaje de encendido de los diodos del puente rectificador,  $V_{RIZO}$  es el voltaje de rizo medido a través del capacitor de filtrado  $C1$ ,  $V_{REG}$  es la diferencia de potencial que debe existir entre la entrada y salida del regulador de voltaje para que este pueda operar y  $V_{OUT}$  es el voltaje de salida de la fuente. Para diseñar una fuente de alimentación con un regulador de voltaje integrado se pueden seguir los pasos enlistados en la Tabla 1. Los cálculos que se muestran están basados en el artículo de Ed Polen (NSC, 1980), donde el lector podrá encontrar también las fórmulas aplicables al caso de un puente de onda completa con tap central.

Un regulador integrado lineal comúnmente lleva asociados dos capacitores: uno para desacoplo y otro para estabilización de la respuesta en frecuencia. Normalmente se colocan antes y después del regulador de voltaje (ver Figura 3). Los valores de estos capacitores dependen del modelo particular de regulador de voltaje, y varían además dependiendo de si se trata de un regulador de voltaje positivo o negativo, por lo que siempre debe consultarse la hoja de datos del fabricante. Para el caso de la familia LM78xx de reguladores de voltaje, si éste se encuentra a más de 5 cm del capacitor de filtrado, se recomienda colocar

un capacitor de desacoplo a la entrada del regulador, para garantizar estabilidad (NSC, 1980); o bien, para mejorar la respuesta transitoria (Pippenger et al., 1988), y debe colocarse tan cerca como sea posible de las terminales del regulador. Las opciones recomendadas son: capacitor cerámico de  $0.22\ \mu\text{F}$  o mayor, capacitor de tantalio sólido de  $2\ \mu\text{F}$  o mayor, o un capacitor electrolítico de aluminio igual o mayor a  $25\ \mu\text{F}$ . Por otro lado, se recomienda colocar un capacitor cerámico de  $0.01\ \mu\text{F}$  a la salida del regulador para minimizar el ruido de alta frecuencia (NSC, 1980). Cuando se trata de un regulador de voltaje negativo, el uso de capacitores de desacoplo tanto a la entrada como a la salida del regulador es indispensable, “recomendándose un valor de  $2\ \mu\text{F}$  para la entrada y de  $1\ \mu\text{F}$  para la salida”, “los cuales pueden ser de mylar, cerámicos o tantalio, asegurándose de que cuentan con buenas características de respuesta en frecuencia” (Pippenger et al., 1988).

Si se desea construir una fuente dual con reguladores de voltaje positivo y negativo, se recomienda colocar un diodo en inversa a la salida de cada regulador, para prevenir un efecto de *latch-up* al encender la fuente. Los diodos deberán ser capaces de manejar una corriente de al menos la mitad de la corriente de salida (Pippenger et al., 1988). Por otro lado, si se presenta una condición en la que el voltaje a la salida del regulador sea mayor al voltaje de entrada, el regulador puede dañarse o ser destruido. Para evitar esto se puede añadir un diodo en inversa entre las terminales de entrada y salida del regulador. El diagrama esquemático de una fuente de alimentación dual basada en reguladores integrados se muestra en la Figura 4, donde también se incluyen los capacitores de desacoplo y estabilización, y los diodos de protección.

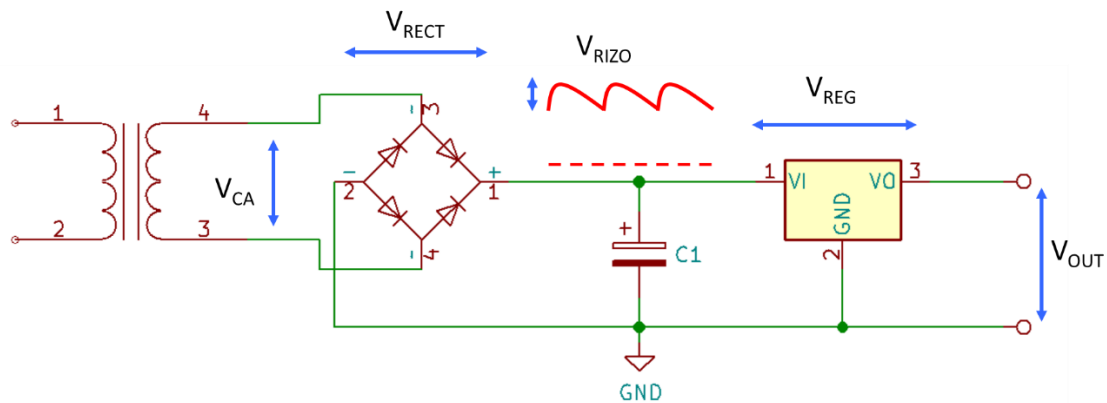


Figura 2. Diagrama esquemático de una fuente de voltaje con regulador integrado y puente de onda completa.

Tabla 1. Lista de pasos para diseñar una fuente de alimentación basada en un regulador integrado.

| Procedimiento de diseño de una fuente de alimentación regulada              |
|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1. Definición del voltaje de salida y su corriente máximo                   |
| 2. Selección del regulador de voltaje integrado                             |
| 3. Selección del transformador. Determinación del voltaje en el secundario. |
| 4. Selección de los diodos del puente de rectificación                      |
| 5. Selección de los capacitores de filtrado                                 |
| 6. Selección de capacitores de desacoplo y estabilización                   |
| 7. Selección de los diodos de protección                                    |

## 1.1 Diseño de una fuente de voltaje de 5 V CD

Para comenzar, se define el voltaje de salida igual a 5 V CD y una corriente máxima de  $I=1$  A. Como regulador de voltaje integrado se selecciona el circuito LM7805, el cual cumple con las condiciones mencionadas y tiene un voltaje de operación  $V_{REG}$  de 3 V. Para la selección del voltaje en el secundario del transformador se utiliza la ecuación 1 (NSC, 1980),

$$V_{CA} = \frac{(V_{OUT} + V_{REG} + V_{RECT} + V_{RIPPLE})}{0.92} \cdot \frac{V_{NOM}}{V_{LINEABAJA}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (1),$$

donde  $V_{OUT}$  es el voltaje de salida del regulador,  $V_{REG}$  es el voltaje de operación (*dropout*) del regulador,  $V_{RECT}$  es la pérdida de voltaje en el puente de diodos,  $V_{RIPPLE}$  es el voltaje de rizo a la entrada del regulador,  $V_{NOM}$  es el voltaje nominal de la línea (127 V CA),  $V_{LINEABAJA}$  es el voltaje mínimo esperado en la línea, y 0.92 es la eficiencia estimada del transformador. Considerando un  $V_{REG}=5$  V,  $V_{RECT}=1.2$  V,  $V_{RIPPLE}=1$  V,  $V_{NOM}=127$  V,  $V_{LINEABAJA}=120$  V, se obtiene  $V_{CA}=8.3$  V. Esto indica que deberá seleccionarse un transformador con un voltaje en el secundario de 9 V CA.

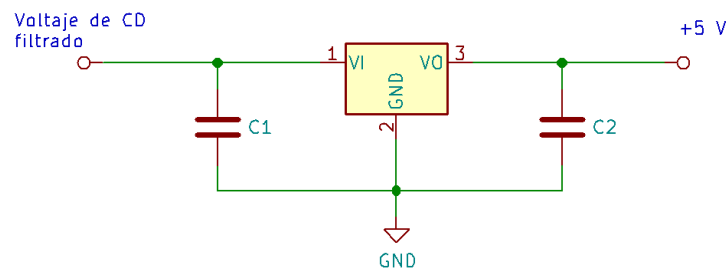


Figura 3. Regulador de voltaje integrado mostrando los capacitores de desacoplo (C1) y estabilidad (C2).

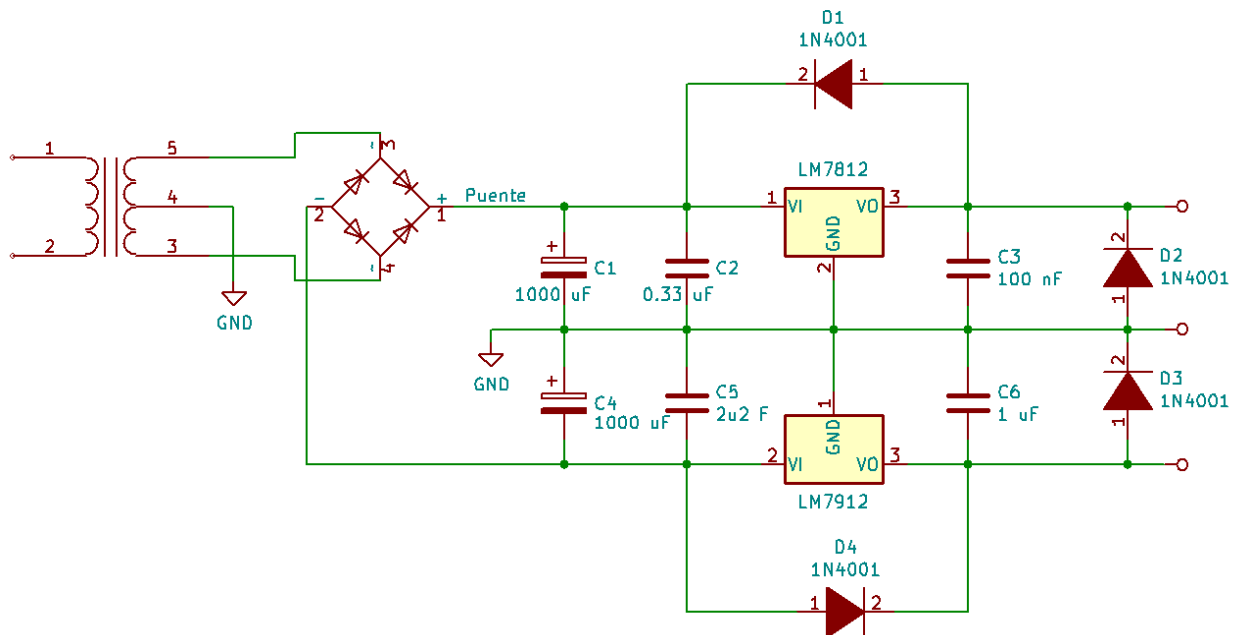


Figura 4. Diagrama esquemático completo de una fuente dual.

## 2 Modelo térmico

El flujo de calor se modela de forma similar a la de un circuito eléctrico. Se considera que se establece un flujo de calor del punto de mayor temperatura al de menor temperatura (ver Figura 5), y que existe una oposición a ese flujo denominada resistencia térmica, la cual puede calcular con la ecuación 2.

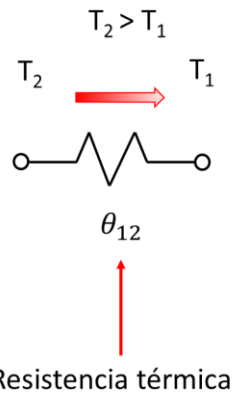


Figura 5. Modelo de flujo de calor.

$$\theta_{12} = \frac{T_2 - T_1}{P_D} \quad (2),$$

donde  $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas y  $P_D$  es la potencia disipada.

En el caso de un circuito integrado se considera la temperatura de la junta  $T_J$ , la temperatura del empaquetado  $T_C$  y la temperatura ambiente  $T_A$ , estableciéndose las resistencias térmicas junta-empaculado  $\theta_{JC}$  y empaquetado-ambiente  $\theta_{CA}$ , que resultan en una resistencia total junta-ambiente  $\theta_{JA}$ , según se muestra en la Figura 6.

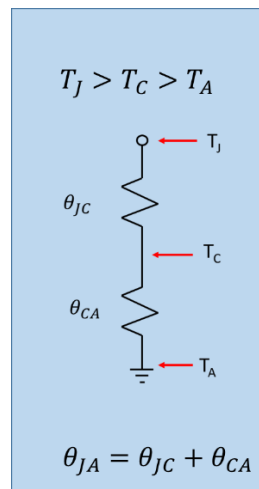


Figura 6. Modelo térmico asociado a un dispositivo semiconductor.

La temperatura de la juntura puede calcularse mediante la ecuación 3

$$T_J = T_A + \theta_{JA} P_D \quad (3)$$

Donde  $P_D$  es la potencia disipada por el regulador y se puede calcular con la ecuación 4

$$P_D = (V_{IN} - V_{OUT}) I \quad (4)$$

Donde  $I$  es la corriente máxima suministrada a la carga (en este caso  $I=1$  A). De acuerdo con la hoja de datos del regulador integrado LM7805 en encapsulado TO-220, éste tiene una resistencia térmica juntura-ambiente de  $\theta_{JA} = 65$  °C/W (OnSemi, 2014). Entonces, para un voltaje de salida  $V_{OUT} = 5$  V, una corriente de salida  $I=1$  A, y partiendo de un voltaje de entrada no regulado  $V_{IN}$  de 12 V, se obtiene que la potencia disipada en el regulador es de 7 W. Por lo tanto, utilizando la ecuación 3, con una temperatura ambiente  $T_A=25$  °C, la temperatura de la juntura alcanzaría ¡480 °C!, lo cual está muy por encima del límite de 125 °C (OnSemi, 2014). Este límite es típico de los semiconductores de silicio.

Una opción para evitar el sobrecalentamiento del regulador es instalarle un disipador de calor. El modelo más común de disipador para un encapsulado TO-220 es de tipo clip y se muestra en la Figura 7. No fue posible encontrar la hoja de datos de este modelo; sin embargo, se puede considerar que es del orden de 25 °C/W. Es importante mencionar que la resistencia térmica cambia dependiendo de un montaje horizontal o vertical, y del nivel de ventilación forzada, si lo hay. El modelo térmico se modifica y queda representado por el diagrama de la Figura 8, donde se consideran ahora las resistencias térmicas  $\theta_{CS}$  (encapsulado a disipador), y  $\theta_{SA}$  (disipador a ambiente). La temperatura de la juntura ahora queda definida por la ecuación 5

$$T_J = T_A + (\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}) P_D \quad (5)$$

El objetivo de introducir un disipador de calor es reducir el valor total de la resistencia térmica del encapsulado al ambiente, esto se logra si se cumple la ecuación 6. Es decir, el disipador de calor aumenta la superficie de intercambio de calor con el ambiente, lo cual reduce la resistencia térmica.

$$\theta_{CA} > \theta_{CS} + \theta_{SA} \quad (6)$$



Figura 7. A la izquierda: imagen de un disipador de calor tipo clip para encapsulado TO-220. A la derecha: imagen de un regulador de voltaje en encapsulado TO-220 (Fotografía tomada por el autor).

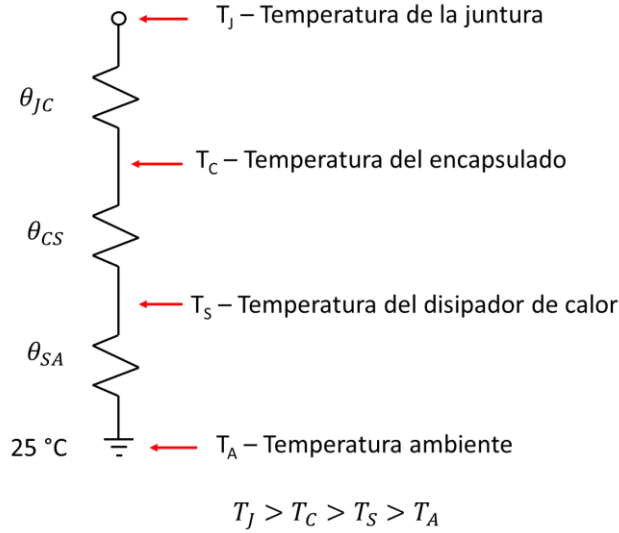


Figura 8. Modelo térmico de un dispositivo semiconductor con disipador de calor.

Para poder calcular el valor de la temperatura de la junta al usar el disipador de calor, se requiere conocer la resistencia térmica entre el encapsulado y el disipador. Este valor se puede considerar como  $\theta_{CS}=1.3$  °C/W (NSC, 1980), y dado  $\theta_{SA}=25$  °C/W, se obtiene que la junta alcanza una temperatura de 244.1 °C, lo cual aún está por encima del límite de operación. Si se repite el cálculo, pero considerando un disipador de calor más grande, como el modelo 5339 (ver Figura 9), el cual tiene una resistencia térmica  $\theta_{SA}=11$  °C/W (AAVID, 2010). En estas condiciones se logra una temperatura en la junta de 147.5 °C.

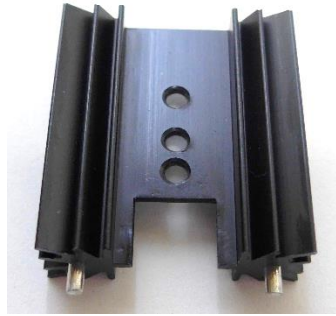


Figura 9. Disipador de calor modelo 5339 para encapsulado TO-220 (Fotografía tomada por el autor).

Como aún no se logra mantener la temperatura de la junta por debajo de su límite de 125 °C, y dado que sería deseable operar con un margen de temperatura ambiente de hasta 40 °C, se puede recurrir a un disipador de calor más grande, al uso de un ventilador, o a la reducción en la corriente máxima de la fuente. Considerando entonces el uso de un disipador 5339 y un margen de temperatura ambiente de hasta 40 °C, se puede calcular la corriente máxima de operación con la ecuación 7,

$$I_{MAX} = \frac{T_J - T_A}{\theta_{JA} V_{Dropout}} \quad (7)$$

y se obtiene  $I_{MAX}=0.694$  A. Por lo que podríamos establecer como límite una corriente de 600 mA.

### 3 Resultados

Como se mencionó previamente, una regla común de diseño para una fuente lineal consiste en utilizar un capacitor de filtrado de  $1000\ \mu\text{F}$  por cada amperio. Para probar la validez de esta regla, se midió el voltaje de rizo con tres valores de capacitor de filtrado:  $470\ \mu\text{F}$ ,  $1000\ \mu\text{F}$  y  $2200\ \mu\text{F}$ . Inicialmente, se conectó una carga de  $15\ \Omega$ , con lo cual se produce una demanda de  $333\ \text{mA}$ , los resultados se presentan en la Figura 10. La adquisición de datos fue realizada con un osciloscopio digital Keysight DSOX1102G y posteriormente graficada utilizando MATLAB. Se observa que el nivel de rizo disminuye al aumentar el valor del capacitor de filtrado. Esto es importante de considerar debido a que existe un voltaje mínimo que debe existir a la entrada del regulador de voltaje para que este pueda operar correctamente. Para el caso del LM7805 el voltaje mínimo es de  $8\ \text{V}$ . Esto descarta el uso de un capacitor de  $470\ \mu\text{F}$ , pero puede causar problemas incluso el de  $1000\ \mu\text{F}$  si se aumenta la carga del regulador, pues aumentará el voltaje de rizo. Se observa que en los tres casos voltaje promedio es de aproximadamente  $10.7\ \text{V}$ , por lo que los cálculos de disipación de potencia realizados en la sección precedente están ligeramente sobrados, ya que se consideró una caída de voltaje en el regulador de  $7\ \text{V}$ , en lugar de  $5.7\ \text{V}$  que se mide experimentalmente.

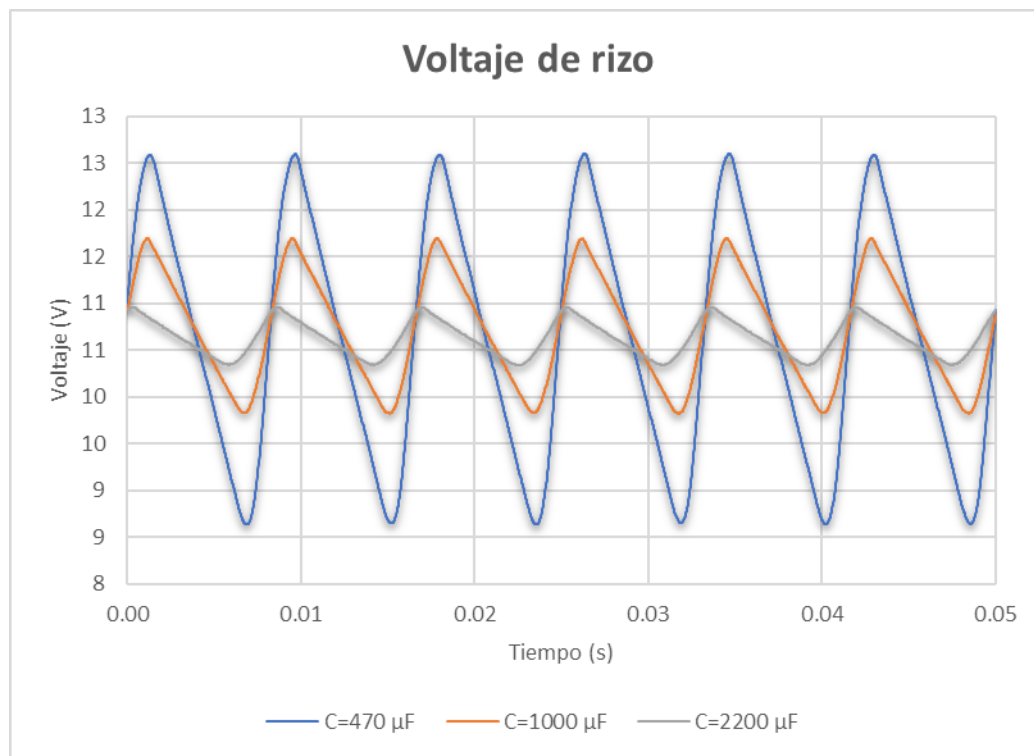


Figura 10. Voltaje de rizo utilizando diferentes capacitores de filtrado y una carga de  $15\ \Omega$ .

A continuación se realizó una prueba utilizando el disipador de calor 5339, una carga de  $5\ \Omega$  y un capacitor de filtrado de  $1000\ \mu\text{F}$ . Bajo estas condiciones el voltaje de salida del regulador es de  $4.92\ \text{V}$  (medido con un multímetro de banco GW-Instek GDM-8351) y la corriente de salida es  $0.95\ \text{A}$  (medida con un multímetro de mano Amprobe AM-270). Ambos valores están dentro de las especificaciones indicadas por el fabricante (OnSemi, 2014). Las gráficas de entrada y salida del regulador de voltaje se muestran en la Figura 11. Se observa que durante parte del ciclo el voltaje de entrada del regulador baja de  $8\ \text{V}$ , lo cual viola los parámetros de operación y eso produce que el voltaje de salida no sea una señal continua. Utilizando la ecuación 5 se obtiene que la temperatura de la junta alcanza los  $95\ ^\circ\text{C}$ , lo cual está dentro de los límites de operación del dispositivo. Durante la prueba, se encontró que la temperatura del disipador de calor se estabiliza, alrededor de 30 minutos después del encendido, en  $76.6\ ^\circ\text{C}$ . En la Figura 12 se muestra una imagen termográfica (tomada con una cámara Flir TG-165). Una opción para evitar la generación de vados es incrementar el valor del capacitor de filtrado.

En muchos casos resulta más fácil conseguir transformadores de 12 V de voltaje secundario que de 9 V. Si se emplea un transformador de 12 V se deberá disipar una cantidad mayor de energía en el regulador. Para evaluar este último caso se montó un transformador de 12 V a la misma fuente construida (ver Figura 13). Utilizando nuevamente una carga de  $5\ \Omega$  y un capacitor de filtrado de  $1000\ \mu\text{F}$ , se obtiene que el disipador de calor se calienta rápidamente, alcanzando una temperatura de  $113\ ^\circ\text{C}$  a los 7 minutos de estar operando (ver Figura 14). Los circuitos internos de protección del regulador comienzan a desconectarlo un poco después de los 5 minutos de operación. Por lo tanto, no se recomienda el uso de transformadores de 12 V para diseñar una fuente de voltaje de  $5\ \text{V @ } 1\text{A}$  utilizando un regulador de voltaje integrado tipo LM7805. Esto, debido a que la gran cantidad de calor que se debe disipar en condiciones de carga plena, se hace necesaria la instalación de un voluminoso y relativamente costoso disipador de calor.

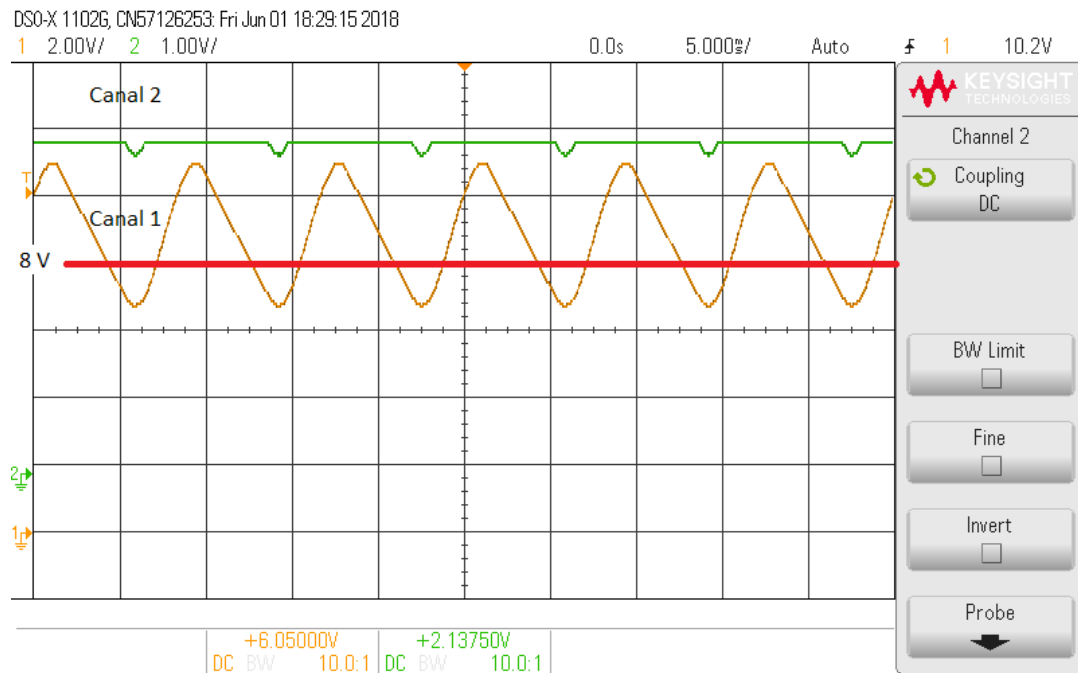


Figura 11. Prueba de funcionamiento con  $C = 1000\ \mu\text{F}$ ,  $R_L = 5\ \Omega$ . Canal 1, voltaje de entrada al regulador. Canal 2, voltaje de salida del regulador.

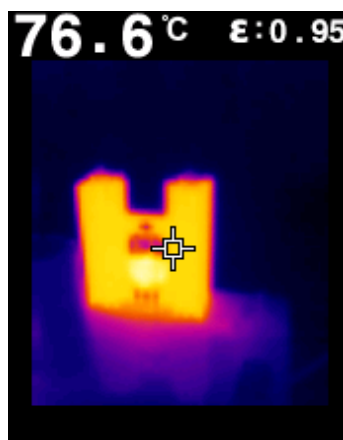


Figura 12. Imagen termográfica del regulador de voltaje montado en el disipador de calor después de 30 minutos de operación ( $R_L = 5\ \Omega$ ,  $C = 1000\ \mu\text{F}$ ).

## 4 Discusión

El diseño de una fuente de alimentación basada en un regulador de voltaje integrado como el LM7805 es a menudo abordado siguiendo reglas generales. Cuando se intenta utilizarlo en aplicaciones que demandan corrientes de 500 mA o más es necesario tomar en cuenta la potencia que va a disipar el dispositivo y su correspondiente manejo. Para poder evaluar si un determinado disipador de calor es adecuado para un diseño específico, se puede recurrir al modelo térmico equivalente, que permite conocer si dado el manejo de potencia esperado, la juntura semiconductor operará dentro de los límites establecidos. Otros parámetros que afectan la disipación de potencia son el voltaje que entrega el transformador y el nivel de voltaje continuo en el capacitor de filtrado.

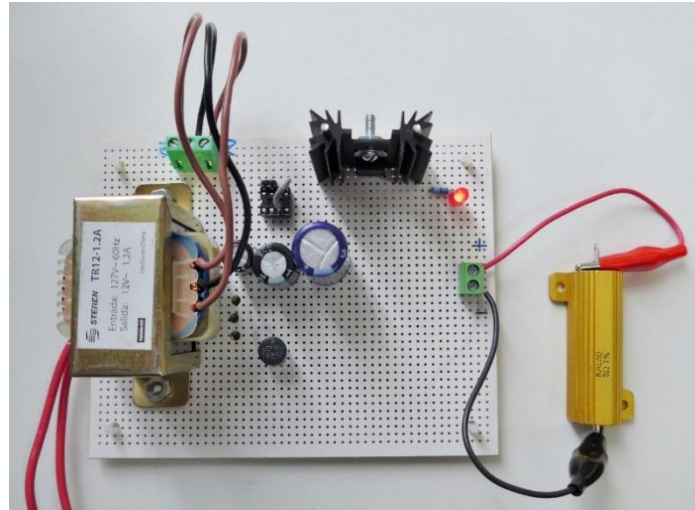


Figura 13. Fotografía de la fuente regulada montada en una tarjeta de prototipo.

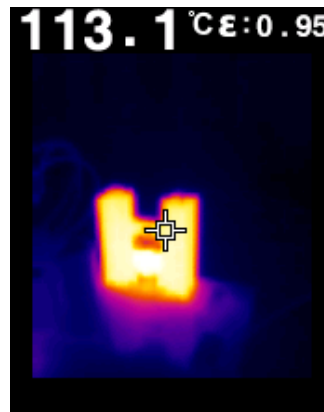
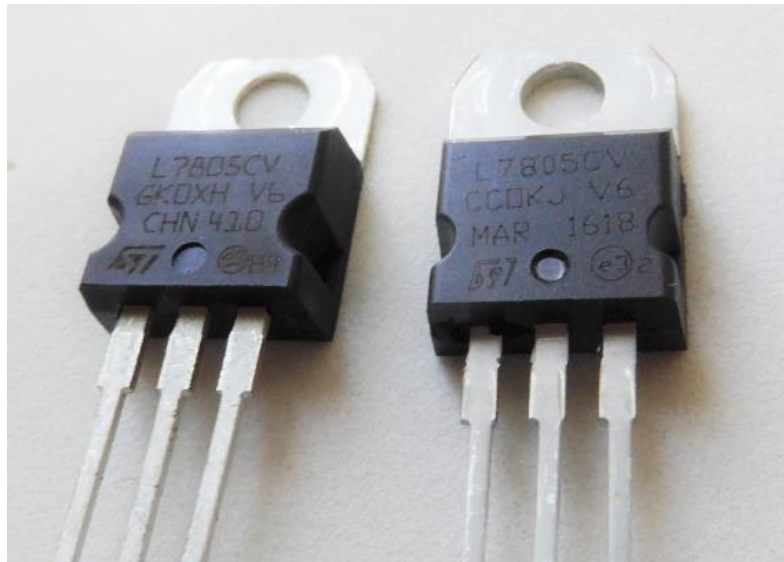


Figura 14. Imagen termográfica del regulador de voltaje montado en el disipador de calor después de 7 minutos de operación ( $R_L = 5 \Omega$ ,  $C = 1000 \mu F$ ), utilizando un transformador de 12 V.

En los ejemplos presentados, el disipador de calor se encuentra al aire libre. En el caso de que el mismo deba instalarse dentro de un gabinete, deberá considerarse la posibilidad de incluir un ventilador para establecer una ventilación forzada o de reducir la carga eléctrica.

Durante la primera etapa del diseño y las pruebas de la fuente regulada, se encontró que no era posible obtener más de 500 mA de corriente, incluso con un disipador de calor grande y con ventilación forzada.

Para descartar que el problema lo ocasionara el transformador, se alimentó el regulador de voltaje directamente de una fuente de laboratorio. Después de probar dos tipos diferentes de regulador de voltaje se encontró que un lote estaba formado por componentes falsificados. En la Figura 15 se muestra una fotografía con un regulador de voltaje de cada uno de los dos lotes probados. La falla no fue ocasional, pues se repitió en varios componentes del lote. El componente original fue adquirido por medio de un distribuidor nacional, mientras que el componente falsificado fue comprado a un distribuidor en China. Se puede observar que el dispositivo falsificado tiene la matrícula desalineada, el logotipo del fabricante aparece con menos detalle, el encapsulado presenta pequeños defectos de manufactura y las terminales se encuentran cortadas de manera excéntrica.



*Figura 15. Regulador de voltaje tipo LM7805. A la izquierda, componente original. A la derecha, componente falsificado.*

## Conclusiones

En el diseño de fuentes de alimentación basadas en un regulador lineal de voltaje es importante tomar en cuenta las limitaciones de disipación de potencia propias del encapsulado. La correcta estimación del disipador de calor requerido representa ventajas desde el punto de vista del costo y del desempeño de la fuente.

En este reporte se ha presentado el análisis térmico como parte del diseño de una fuente de alimentación, y evaluado su desempeño. Se ha mostrado el efecto perjudicial que puede tener el sobredimensionamiento del voltaje de salida del transformador, y la influencia del valor del capacitor de filtrado.

Aunque los reguladores de voltaje cuentan con circuitos de protección térmica, no impide que alcancen temperaturas superiores a los 100 °C, lo que puede representar un riesgo para el usuario.

Se ha presentado como caso ejemplo el uso de un regulador de voltaje integrado tipo LM7805, pero el método se puede extender a otros reguladores lineales de características similares.

## Referencias bibliográficas

- Aavid (2010) **Board level heatsinks catalog**. USA. Aavid Thermalloy.
- Boylestad, R. L. & Nashelsky, L. (2012) **Electronic Devices and Circuit Theory**. USA. Pearson Education Limited.
- Lenk, J. (1994) **Simplified design of linear power supplies**. USA. EDN.
- NSC (1980) **Voltage regulator handbook**. USA. National Semiconductor Corp.
- Onsemi (2014) **LM78XX Positive voltage regulator datasheet**. USA. Fairchild.
- Pippenger, D. E., Tobaben, E. J. & Texas Instruments Inc. (1988) **Linear and Interface Circuits Applications**. USA. McGraw-Hill.
- Sinclair, I. (2000) **Passive Components for Circuit Design**. USA. Elsevier Science.