



Informe Técnico

Fuente dual de corriente directa con limitación de corriente

Autor

Miguel Angel Bañuelos Saucedo

Fecha

Octubre de 2023

Tipo de Proyecto

Interno

Financiamiento interno

Título: Fuente dual de laboratorio con limitación de corriente

Autor: Miguel Angel Bañuelos Saucedo

Afiliación: ICAT, Departamento de Instrumentación Científica e Industrial,
Grupo de Electrónica

Resumen

Se presenta el diseño, prueba y construcción de una fuente de alimentación de laboratorio con salida dual. El diseño se puede modificar para entregar ± 12 VCD o ± 15 VCD. La fuente está pensada para ser utilizada por estudiantes en prácticas de laboratorio, por lo que cuenta con un circuito de protección contra cortocircuito. El sistema se basa en el regulador de voltaje lineal L200CV, que además de proporcionar un voltaje ajustable, cuenta con un circuito para limitar la corriente máxima que proporciona. Esta última característica lo hace una opción adecuada para su utilización por estudiantes. Se diseñó la fuente dual para proporcionar una corriente máxima de 100 mA, lo cual es adecuado para alimentar circuitos básicos con amplificadores operacionales. Se incluyen en el reporte: pruebas de operación con diferentes corrientes de carga, imágenes de osciloscopio, fotografías del prototipo, diagrama esquemático y lista de partes con costo. Se estimó un costo total de los componentes de \$1687 pesos.

Índice

Resumen.....	1
Nomenclatura.....	3
Introducción	4
1 Diseño	5
1.1 Selección del regulador de voltaje.....	5
1.2 Selección del transformador.....	5
1.3 Puente rectificador	6
1.4 El capacitor de filtrado.....	7
1.5 El regulador integrado L200	7
1.6 Diagrama esquemático	9
2 Resultados iniciales.....	9
3 Diseño alternativo.....	11
4 Resultados finales	15
Referencias bibliográficas	16
ANEXO A. Diagrama esquemático	17
ANEXO B. Circuito impreso.....	18
ANEXO C. Costo del material.....	19

Nomenclatura

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>
CC	Corto circuito
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i>
VCA	Voltaje de Corriente Alterna
VCD	Voltaje de Corriente Directa

Introducción

Uno de los instrumentos más utilizados en el diseño de sistemas electrónicos es la fuente de alimentación de corriente directa. Existe en el mercado una gran variedad que van desde los modelos de bajo costo hasta las fuentes programables de bajo nivel de ruido. En la enseñanza de sistemas electrónicos es fundamental abordar el uso del amplificador operacional que es un dispositivo muy versátil para tareas de instrumentación electrónica, amplificación, y filtrado de señales. Los amplificadores operacionales de más fácil adquisición en el mercado, y de menor costo, son aquellos que requieren una fuente dual simétrica para su operación. Aunque la gran mayoría de fuentes de alimentación duales proporcionan voltajes de salida ajustables, son comunes los amplificadores operacionales que trabajan con voltajes en el rango de ± 12 V o ± 15 V. Por lo tanto, en muchas aplicaciones será suficiente con una fuente dual de voltaje fijo.

Cuando se imparten cursos de electrónica en salones que no tienen instalaciones permanentes, y se aborda el funcionamiento de los amplificadores operacionales, es necesario trasladar el equipo necesario. Las fuentes de alimentación son en este caso los equipos de mayor peso.

Se propone el desarrollo de una fuente de alimentación dual simétrica, de voltaje fijo, con la finalidad de facilitar la impartición de clases acerca de los amplificadores operacionales, en salones que no cuentan equipo disponible de manera permanente.

Entre las consideraciones del diseño están: desarrollar una fuente que no sea pesada, con componentes electrónicos de fácil adquisición, y límite máximo a la corriente de suministro, esto último para evitar que la fuente se dañe debido a un corto circuito. Se prefiere el diseño de una fuente de voltaje lineal, pues proporciona un nivel de voltaje con menor ruido que las fuentes de voltaje conmutadas.

1 Diseño

1.1 Selección del regulador de voltaje

Se propone utilizar la configuración típica de una fuente de voltaje basada en un circuito integrado lineal, tal y como se muestra en la Figura 1. Esta configuración consiste en cuatro etapas: transformador reductor de voltaje, puente de diodos de rectificación, capacitor de filtrado y regulador de voltaje integrado.

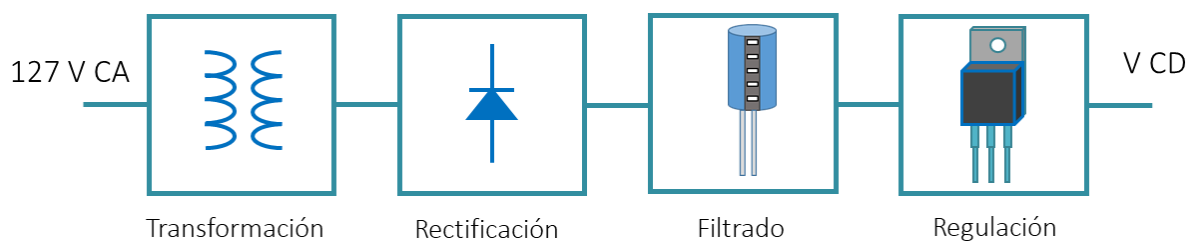


Figura 1. Diagrama de bloques de la fuente de voltaje (imagen propia).

El diseño se realizó utilizando el regulador de voltaje L200 (*L200*, 2000), el cual cuenta con terminales para ajustar el voltaje de salida y la corriente máxima. Esta última característica no está disponible en los reguladores lineales típicos de 3 terminales como el LM78xx y el LM79xx. Sin embargo, a diferencia de estas últimas dos familias, el circuito integrado L200 es únicamente un regulador de voltaje positivo, y no existe la versión para voltaje negativo, por lo que se deberán fabricar dos fuentes positivas y conectarse en serie para producir un voltaje simétrico.

1.2 Selección del transformador

Como se mencionó previamente, un voltaje común de operación de los amplificadores operacionales es ± 12 V o ± 15 V. Para seleccionar el voltaje de operación se considera que se utilizarán transformadores comerciales. Los que tienen salida de 12 VCA proporcionan un voltaje pico aproximado de 17 VCD. A ese voltaje se le debe restar la pérdida en el puente rectificador de diodos y el voltaje de *dropout* del regulador de voltaje

lineal, que en este caso es de 2 V. De esta manera, si se desea que la fuente proporcione 12 V, se deberá utilizar un transformador de 12 VCA de salida, y si se desea que la fuente proporcione 15 V, uno de 15 VCA de salida. Al consultar las páginas web de los proveedores más comunes, se encontró que los voltajes típicos de los transformadores son 12 VCA y 18 VCA (ver Tabla 1).

El circuito L200 puede proporcionar hasta 2 A, si se incluye un disipador de calor y ventilación adecuadas. Sin embargo, los circuitos con amplificador operacional no demandan mucha corriente. Se propone poner un límite máximo de corriente de 100 mA. Los transformadores comerciales existen con corrientes de 500 mA o mayores, y en el caso de la salida de 18 VCA, se encontró uno de 1.2 A. Las dos opciones por considerar se encuentran en la tabla 1. La diferencia de precio no es tan importante, aunque una revisión del nivel de inventarios en el proveedor Steren indica que es menos utilizado el transformador de 18 VCA @ 1.2 A. Para el diseño se opta entonces por ocupar el transformador de 12 VCA @ 500 mA. Tiene la ventaja de ocupar un menor volumen y pesar menos que la opción de 18 VCA.

Tabla 1. Opciones para el transformador de entrada (creación propia).

Transformador	Corriente mínima	Precio (Steren)	Precio (Agelectr)
12 VCA	500 mA	\$149	\$81
18 VCA	1.2 A	\$229	\$140

1.3 Puente rectificador

Como puente rectificador se utiliza el KBP204G (*KBP2005G*, 2017) que soporta 400 VCD de voltaje pico de inversa y puede manejar una corriente máxima de 2.0 A. Sus características superan a las necesidades del diseño, pero es de bajo costo (alrededor de \$10 pesos M.N.), y es producido por varios fabricantes de semiconductores, por lo que se consideró una opción aceptable.

1.4 El capacitor de filtrado

El capacitor de filtrado se establece en 1000 μF , pues es un valor que garantiza un bajo voltaje de rizo a la entrada del regulador de voltaje L200. Considerando que se utilizará un transformador de 12 VCA, con un voltaje pico cercano a los 18 VCD, se opta por capacitores con un voltaje de operación de 25 V. Es posible utilizar capacitores con voltaje de operación mayor, pero se debe verificar su ESR, ya que de incrementarse producirá mayores pérdidas por disipación de calor, ocasionando a su vez un incremento en la temperatura del capacitor y una disminución de su vida útil. En este caso, se encuentra que al incrementar el voltaje de operación de 25 V a 50 V, la ESR disminuye (*Aluminum electrolytic*, 2022), por lo que se pueden utilizar capacitores de filtrado de 50 V, obteniendo una mejoría en su desempeño, al aumentar su vida útil. Por otro lado, si se opera el capacitor a un voltaje inferior a su voltaje nominal no se afectará su vida útil (*Technical note*, 2023).

1.5 El regulador integrado L200

El circuito integrado L200 es un regulador de voltaje ajustable integrado lineal de 5 terminales. Una de las características que lo hacen único en el mercado es que incluye un circuito interno para limitar la corriente máxima a la salida. Esto lo logra mediante un comparador de voltaje que está conectado directamente al transistor de potencia, según se muestra en la Figura 2. La corriente máxima está dada por

$$I_{SC} = \frac{V_{SC}}{R_{SC}} = \frac{0.45 \text{ V}}{R_{SC}} \quad (1),$$

donde V_{SC} es el voltaje de detección de la corriente de corto circuito. Su valor típico es de 0.45 V, pero la hoja de datos también menciona valores de entre 0.38 V y 0.52 V. R_{SC} es la resistencia de detección y es seleccionable por el diseñador. Para el diseño se propone una $I_{SC} = 200 \text{ mA}$, para tener un margen de tolerancia. De acuerdo con las pruebas que se realizaron, el circuito de protección contra cortocircuito (límite de corriente) se va activando progresivamente, disminuyendo el voltaje de salida, por lo que es necesario establecer un límite por encima del valor de la corriente de operación de 100 mA que se

mencionó previamente. Por lo tanto $R_{sc} = 2.25 \Omega$. Se utiliza entonces el valor comercial de 2.2Ω .

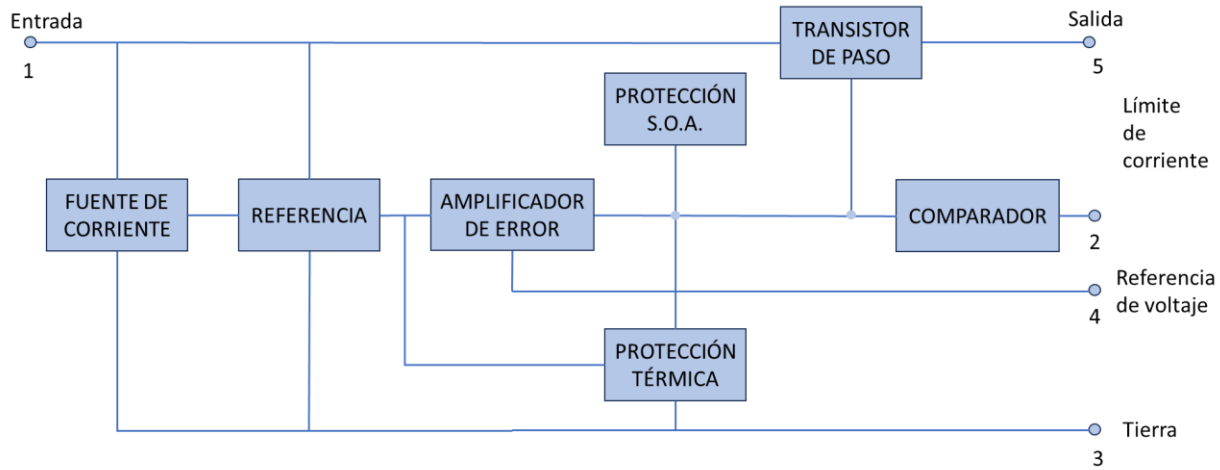


Figura 2. Diagrama de bloques del circuito L200. Imagen propia basada en L200, (2000).

El voltaje de salida está dado por

$$V_{salida} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2)$$

De acuerdo con las hojas de datos, el valor típico de V_{ref} es de 2.77 V. Se propone entonces un valor para R_1 de 1 k Ω . Despejando de (2) se obtiene $R_2 = 3.332 \text{ k}\Omega$. Se utilizará entonces una resistencia de 3.3 k Ω , que es el valor comercial más cercano. De esta manera, el voltaje a la salida quedaría como

$$V_{salida} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 2.77 \text{ V} \left(1 + \frac{3.3 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \right) = 11.91 \text{ V} \quad (3)$$

Sin embargo, al construir el circuito se obtuvo un voltaje sin carga de 11.27 V. Aunque se utilizaron resistencias de 5 % de tolerancia, al utilizar los valores medidos de 0.997 k Ω y 3.264 k Ω para R_1 y R_2 respectivamente, el valor que se debería obtener es de 11.84 V. Esto se debe a que el voltaje de referencia es distinto de su valor típico de 2.77 V. En las

hojas de datos se indica que tiene valores mínimo y máximo de 2.64 V y 2.86 V, respectivamente. Para compensar las variaciones de este voltaje de referencia se optó por utilizar un *trimpot* para ajustar el voltaje de salida del regulador L200.

1.6 Diagrama esquemático

En la Figura 3 se muestra el diagrama esquemático de la fuente basada en el regulador L200. Se omite el transformador de voltaje, el cual debe conectarse en la terminal T1. Los capacitores C2 y C3 son los sugeridos en la hoja de datos del fabricante y contribuyen a la estabilidad del regulador. Se añadieron algunos puntos de prueba (TP+ y TPGND) para facilitar la revisión de la operación del circuito.

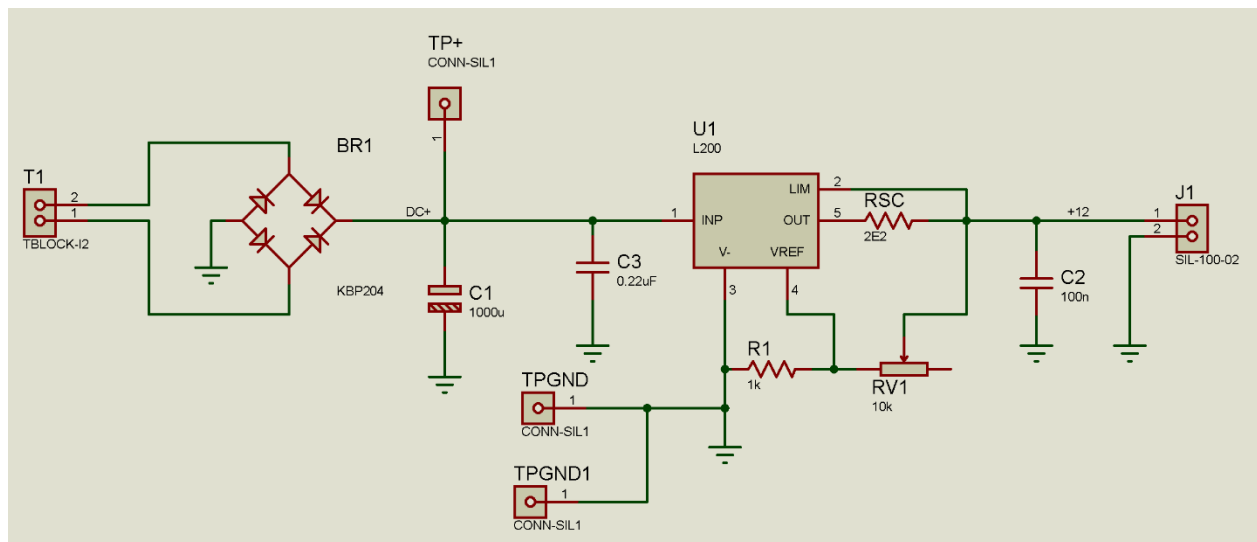


Figura 3. Diagrama esquemático de la fuente de voltaje de 12 VCD (imagen propia).

2 Resultados iniciales

Utilizando un potenciómetro de alambre como carga se determinó el voltaje de operación para diferentes cargas y los resultados se muestran en la tabla 2. El voltaje permanece cercano a los 12 VCD para cualquier condición de carga menor a 175 mA, y para valores mayores comienza a disminuir. En la condición de cortocircuito (CC) la corriente máxima es de 190 mA y el voltaje de salida ha bajado a 0.735 VCD.

Tabla 2. Voltaje de salida para diferentes condiciones de corriente de carga (creación propia).

Corriente de carga	Voltaje de salida
20 mA	12.002 V
40 mA	12.005 V
60 mA	12.007 V
80 mA	12.006 V
100 mA	12.002 V
120 mA	11.995 V
140 mA	11.999 V
160 mA	12.006 V
175 mA	12.006 V
180 mA	10.889 V
(CC) 190 mA	0.735 V

También se realizó una medición del voltaje en el capacitor de filtrado para verificar que sea mayor al voltaje mínimo de entrada del regulador de voltaje L200. De acuerdo con las hojas de datos se requiere un voltaje de dropout máximo de 2.5 V, por lo tanto, el voltaje mínimo a la entrada del regulador debe ser de 14.5 V. En la Figura 4 se muestra una imagen de osciloscopio con el voltaje del capacitor de filtrado con una condición de carga de 175 mA. Las mediciones automáticas indican que el voltaje mínimo es de 13.9 V, lo cual no cumple con lo especificado líneas arriba de 14.5 V. Sin embargo, el voltaje a la salida permanece constante en 12 V. Una revisión más detallada de las hojas de datos muestra que el voltaje de dropout máximo de 2.5 V tiene la condición de que la corriente del regulador sea de 1.5 A. En la gráfica 12 de la hoja de datos (*L200*, 2000), se puede ver que el voltaje de dropout para corrientes menores a 0.5 A @ $T_J=40^\circ\text{C}$ es de 1.5 V, por lo que el voltaje mínimo de entrada es 13.5 V y en la medición se obtiene 13.9 V.



Figura 4. Voltaje de salida y del capacitor de filtrado. Carga = 175 mA (imagen propia).

3 Diseño alternativo

Como se mencionó anteriormente, se prefirió fijar la salida en 12 V. Sin embargo, como el voltaje de salida se puede ajustar mediante un trimpot, también es posible fijar el voltaje de salida en 15 V, si se cambia el transformador de entrada por uno de 18 VAC. El fijar la salida en 15 VCD tiene la ventaja didáctica de que muchos fabricantes presentan las tablas de especificaciones con fuente de alimentación de ± 15 VCD. Es así como se procedió a cambiar el transformador por uno de 18 VAC @ 1.2 A y se ajustaron los trimpots. Se repitieron las pruebas de la sección 2. Se utilizó un potenciómetro de alambre para variar la corriente de carga y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3. Se puede considerar que la fuente opera dentro de parámetros aceptables al suministrar corrientes de hasta 170 mA. Para corrientes mayores el voltaje a la salida disminuye drásticamente. En la condición de corto circuito, el voltaje a la salida es de tan solo 0.755 V, con una corriente de 193 mA.

Tabla 3. Fuente de 15 VCD. Voltaje de salida en función de la carga (creación propia).

Corriente de carga		Voltaje de salida
20 mA		15.005 V
40 mA		15.007 V
60 mA		15.008 V
80 mA		15.006 V
100 mA		15.001 V
120 mA		14.996 V
140 mA		14.985 V
160 mA		14.970 V
165 mA		14.953 V
170 mA		14.952 V
175 mA		14.448 V
180 mA		10.516 V
(CC) 193 mA		0.755 V

Para esta versión de la fuente de alimentación se realizó una prueba adicional. Se determinó el intervalo de voltajes que podría proporcionar la fuente. Para ello, se conectó una resistencia de carga de 149 Ω , la cual se construyó mediante un arreglo paralelo-serie de cuatro resistencias carbón de 150 Ω @ 1 W (5% de tolerancia), y se varió el voltaje mediante el ajuste del trimpot correspondiente. Esta resistencia demandará una corriente cercana a 100 mA (@ 15 V), que es nuestra condición de diseño. Se encontró que la fuente puede generar un voltaje mínimo de 2.74 V y un voltaje máximo de 23 V. En la Figura 5, se muestra una imagen de osciloscopio con las señales del capacitor de filtrado y de salida de la fuente. Es posible incrementar el voltaje de salida, pero para voltajes superiores a 23 V, se empieza a salir de las especificaciones para el voltaje de dropout, y el rizo de la señal del voltaje de filtrado se comienza a propagar al voltaje de salida. Para operar la fuente a otro voltaje distinto a 12 V o 15 V, se sugiere realizar pruebas de carga al voltaje específico requerido.

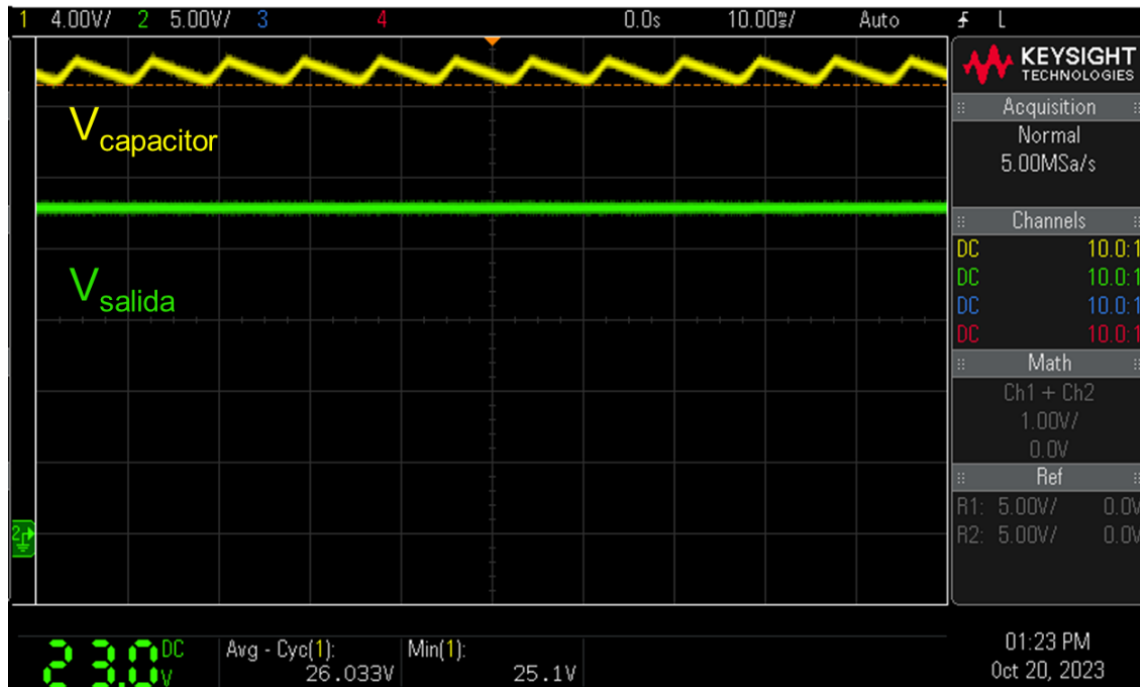


Figura 5. Imagen de osciloscopio para una carga de $149\ \Omega$ para una salida de 23 V (imagen propia).

Como se puede observar en la Figura 5, el voltaje promedio en el capacitor de filtrado es de 26 VCD. Esto quiere decir que la potencia que debe disipar el regulador de voltaje L200CV en una condición de cortocircuito es:

$$P = V \cdot I = (26\ V - 15\ V)193\ mA = 2.123\ W \quad (4)$$

Esta es una potencia alta para un regulador en encapsulado TO-220 que no cuente con disipador de calor. En pruebas realizadas de cortocircuito se encontró que el chip alcanzaba temperaturas superiores a los $100\ ^\circ\text{C}$ en tan solo una veintena de segundos. Ello es un claro indicador de que se necesita colocar un disipador de calor. Se colocó entonces uno del tipo HSE-B20254-056H (de la empresa CUI Devices) y la temperatura alcanzó un máximo de $80\ ^\circ\text{C}$. Lo cual es un valor que se considera elevado, si se toma en cuenta que el gabinete no cuenta con orificios de ventilación. Por ello, se decide reducir la corriente máxima recalculando la expresión (1)

$$I_{sc} = \frac{V_{sc}}{R_{sc}} = \frac{0.45 \text{ V}}{3.3 \Omega} = 136 \text{ mA} \quad (5)$$

Se repiten las pruebas de medición del voltaje de salida para varias condiciones de carga y los resultados se muestran en la tabla 4. Con el nuevo valor de la resistencia de cortocircuito la fuente entrega el voltaje de 15 VCD para corrientes de carga menores a 115 mA, lo cual queda dentro de los parámetros de diseño iniciales. El voltaje de salida disminuye rápidamente para corrientes mayores a 120 mA, y la condición de cortocircuito ocurre a 134 mA. Ahora se tendrá una disipación en el dispositivo L200CV de:

$$P = V \cdot I = (26 \text{ V} - 15 \text{ V})134 \text{ mA} = 1.474 \text{ W} \quad (6)$$

Tabla 4. Fuente de 15 VCD modificada. Voltaje de salida en función de la carga (creación propia).

Corriente de carga	Voltaje de salida
20 mA	15.010 V
40 mA	15.011 V
60 mA	15.011 V
80 mA	15.015 V
100 mA	15.017 V
110 mA	15.023 V
115 mA	15.023 V
120 mA	12.730 V
125 mA	8.498 V
130 mA	5.014 V
(CC) 134 mA	0.511 V

4 Resultados finales

El prototipo se montó dentro de un gabinete de plástico ABS de tipo comercial. El gabinete cuenta con placas de aluminio en el frente y en la parte posterior. Estas placas fueron perforadas para instalar los conectores, el interruptor, un LED, el portafusible y el cable de alimentación. En la Figura 6, se muestra el prototipo terminado. También se muestra una vista del interior del gabinete en la Figura 7, donde se pueden apreciar la placa de circuito impreso y los transformadores. El equipo, en versión de 15 V y con los transformadores de 18 VAC @ 1.2 A, tiene un peso de 1.635 kg. Esto se compara favorablemente a las fuentes variables (de tipo lineal) de laboratorio que pesan arriba de 5 kg. El costo de los materiales se estima en \$1687 pesos (ver Anexo C, precios de octubre de 2023).



Figura 6. Prototipo terminado (imagen propia).

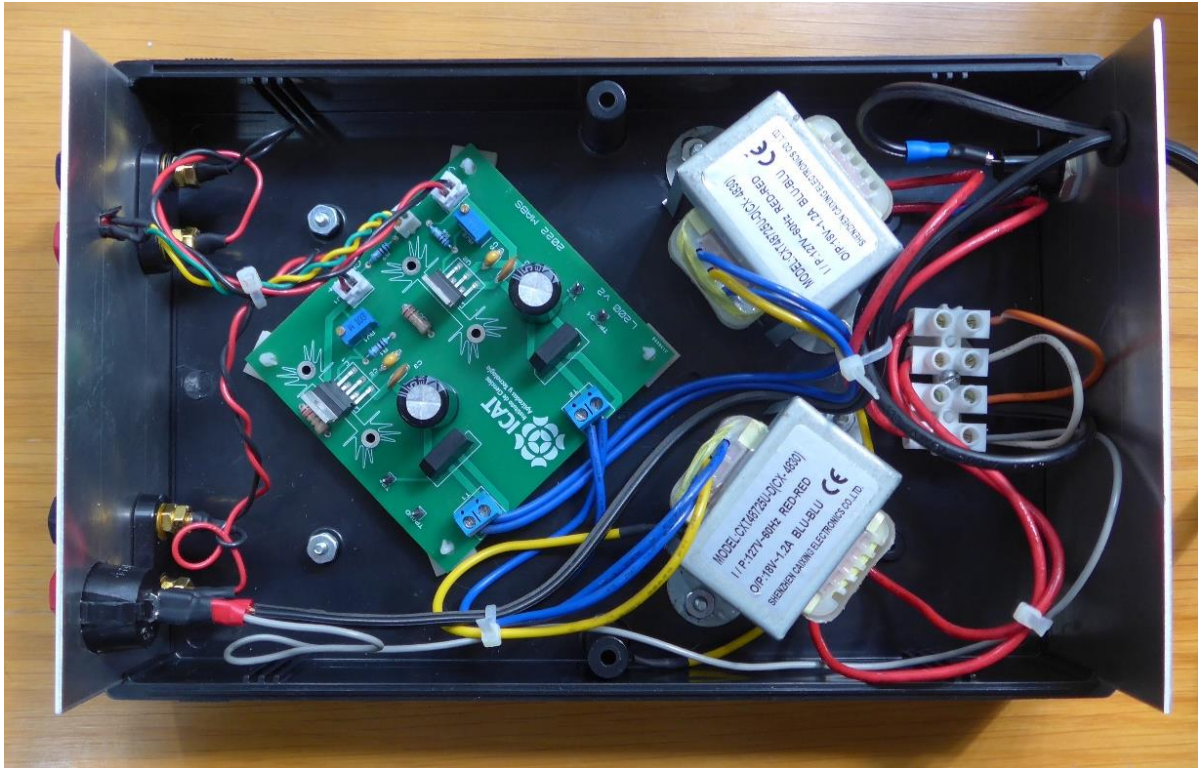


Figura 7. Vista del interior del prototipo sin montar los disipadores de calor (imagen propia).

Referencias bibliográficas

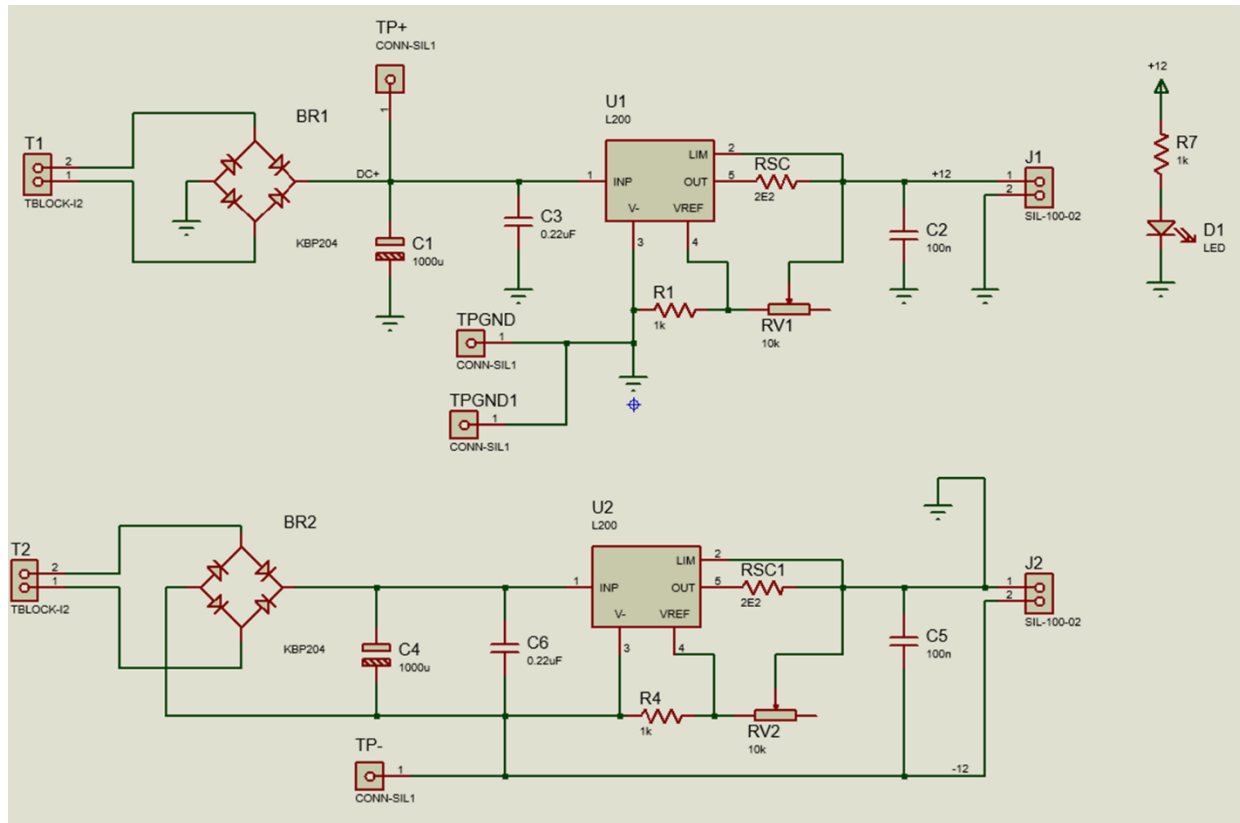
Aluminum electrolytic capacitors. General technical information. (2022). TDK Electronics AG.

KBP2005G thru KBP210G 2.0A Glass passivated bridge rectifier. (2017). Diodes Incorporated.

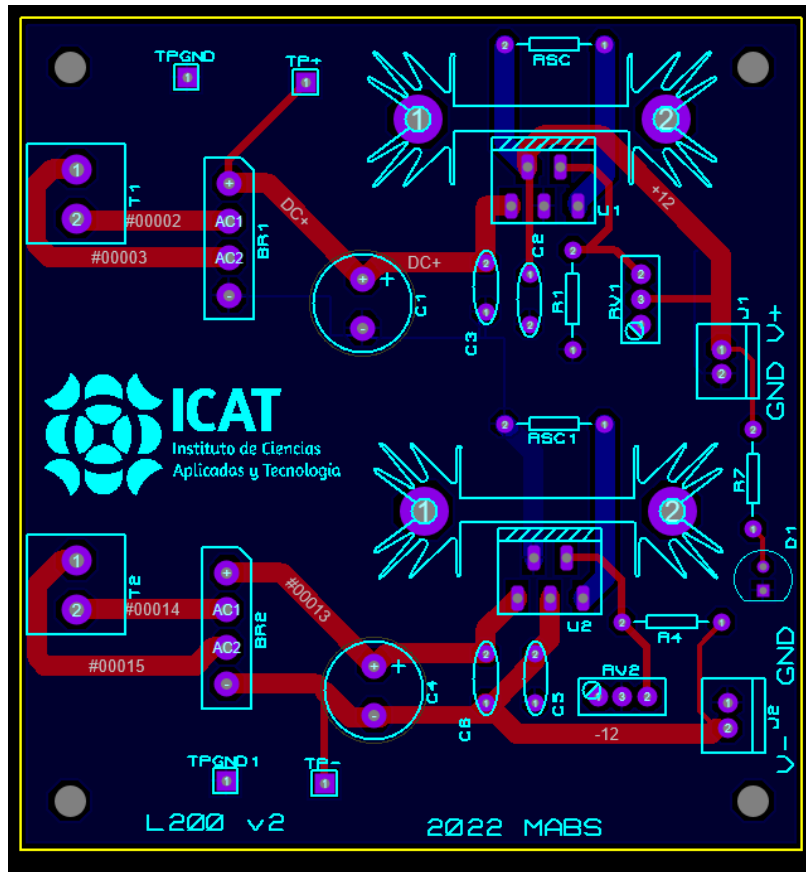
L200 Adjustable voltage and current regulator. (2000). STMicroelectronics NV.

Technical note. Judicious use of aluminum electrolytic capacitors. (2023). Nippon Chemi-Con Corporation.

ANEXO A. Diagrama esquemático



ANEXO B. Circuito impreso



ANEXO C. Costo del material

Cantidad	Descripción	Precio	Proveedor	Subtotal
1	Placa de circuito impreso	\$ 55	AG Electrónica	\$ 55.00
1	1598GBK Gabinete de plástico Hammond Mfg	\$459.41	Newark	\$ 459.41
1	Cable de alimentación interlock 20 AWG	\$ 29.00	Steren	\$ 29.00
4	Terminal de latón tipo U 3/16 pulgada	\$ 4.00	Steren	\$ 16.00
6	Terminal de latón tipo fastón 1/4 pulgada	\$ 2.00	Steren	\$ 12.00
1	Interruptor encendido tipo balancín	\$ 6.47	AG Electrónica	\$ 6.47
2	Transformador para fuente 18 VCA @1200 mA	\$140.00	AG Electrónica	\$ 280.00
1	Porta fusible americano de cartucho AMPF-3	\$ 8.19	AG Electrónica	\$ 8.19
1	Fusible americano FA.1 0.1 A 250 V	\$ 1.72	AG Electrónica	\$ 1.72
2	Capacitor electrolítico 1000 uF 50 V CE-1000/50V-TEAPO	\$ 12.07	AG Electrónica	\$ 24.14
2	Capacitor cerámico 0.1 uF 50V	\$ 1.72	AG Electrónica	\$ 3.44
2	Capacitor cerámico 0.22 uF 50 V	\$ 3.02	AG Electrónica	\$ 6.04
3	Resistencia de carbón 5% 1 kΩ 1/2 W RC-1K/1/2	\$ 0.86	AG Electrónica	\$ 2.58
2	Resistencia de carbón 5% 2.2 Ω 1/2 W RC-2E2/1/2	\$ 0.86	AG Electrónica	\$ 1.72
2	3296W-1-103 Trimpot cuadrado vertical 10 kΩ 25 vueltas	\$ 6.90	AG Electrónica	\$ 13.80
2	Circuito integrado L200CV Regulador de voltaje	\$249.14	AG Electrónica	\$ 498.28
2	KBP204G Puente de diodos 2A 400 V	\$ 9.48	AG Electrónica	\$ 18.96
1	Led rojo 5 mm LED-R5D-AD-R30	\$ 0.86	AG Electrónica	\$ 0.86
1	Porta led para montaje 5 mm PORTALED2-5MM	\$ 1.72	AG Electrónica	\$ 1.72
3	EIS-2PH Conector Molex 2 pines	\$ 1.72	AG Electrónica	\$ 5.16
3	EIS-2PR Conector Molex 2 posiciones receptáculo	\$ 1.72	AG Electrónica	\$ 5.16
6	CON-2026 Terminal para conector Molex receptáculo	\$ 0.86	AG Electrónica	\$ 5.16
2	TRT-02 Bornera para circuito impreso 2 terminales	\$ 3.45	AG Electrónica	\$ 6.90
2	Conector doble banana	\$ 21.00	Unit Electronics	\$ 42.00
4	Bases para PCB	\$ 1.34	Newark	\$ 5.36
			TOTAL con IVA	\$1,686.72

Cálculo realizado en octubre de 2023.