



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES
Departamento de Electrónica

Materia: Electrónica de Potencia
Proyecto 1° Cuatrimestre: Aplicaciones de alta frecuencia

Curso: R5053
Docente: Ing. Oscar Pugliese
Ayudante: Pablo Chiaramello

Alumnos: Hugo Alejandro Gomez 152466-5
Lucio Zolezzi Mir 147717-7



Índice

Objetivo	3
Descripción	3
Alcance	3
Desarrollo teórico	3
Simulación en LTSpice	5
Diseño de placa en KiCAD	7
Fabricación de placa	9
Cálculo de núcleo magnético en FEMM	10
Mediciones	14
Conclusiones	19
Anexos	19

Objetivo

El objetivo en el primer cuatrimestre es realizar un proyecto para estudiar los comportamientos de los tres elementos básicos (inductor, capacitor y resistor) cuando la frecuencia de operación está muy por encima de la frecuencia de red. Al asociar estos tres componentes con uno nuevo, que se denominará conmutador controlado, surgirán topologías que se aplican a reguladores y convertidores conmutados. Es por esto que como proyecto se realizará el diseño y construcción de una fuente de una de estas topologías.

Descripción

Con el objetivo de alimentar una placa Raspberry Pi 3B+, realizaremos una fuente reguladora de tensión que nos provea los parámetros necesarios para cumplir con dicha finalidad.

Para este cometido, la topología a utilizar será un regulador tipo Buck, ya que se plantea una reducción de tensión, y el integrado principal a utilizar será el LM2596.

Alcance

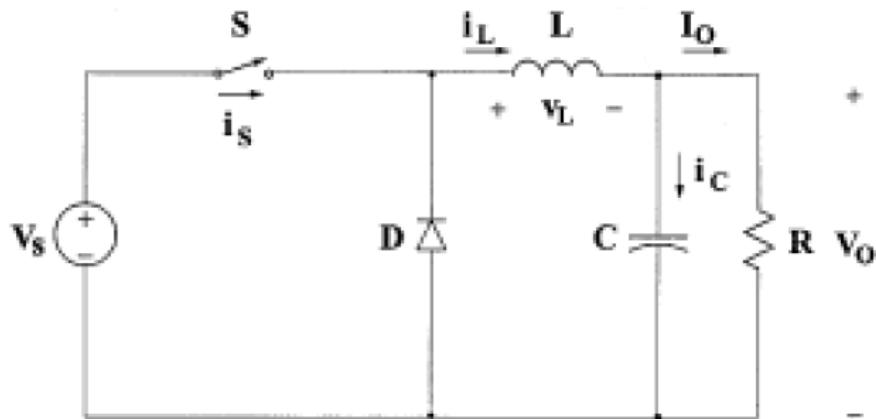
El alcance del proyecto está definido por el diseño, simulación y elaboración de la fuente de tensión, junto con sus posteriores pruebas para corroborar las especificaciones planteadas al inicio.

Las especificaciones de la fuente son:

- Tensión de entrada: 11-15 V
- Tensión de salida: 5 V ($\pm 5\%$)
- Máximo consumo de corriente: 2,5 A
- Mínima corriente: 0,25 A

Desarrollo teórico

Partiendo con la premisa de nuestras especificaciones, al ser una fuente de tensión que reduce la tensión de entrada respecto a la de salida, se adoptó una topología Buck.



Esquemático básico

Por esto, investigamos integrados que se apliquen a nuestra necesidad y encontramos el circuito integrado LM2596.

Considerar su uso, nos permitió en un primer momento adoptar sus valores y características para plantear las ecuaciones del circuito. Estos primeros cálculos teóricos nos servirán como base y luego se irán ajustando conforme a simulaciones y recomendaciones del fabricante.

Tomando la fórmula principal del Buck que relaciona la tensión de salida con la tensión de entrada obtenemos nuestro ciclo de trabajo.

$$V_o = V_s \times D \Rightarrow D = \frac{V_o}{V_s}$$

En nuestro caso al tener un valor de entrada entre 11V y 15V.

Calculamos el ciclo de trabajo mínimo y máximo.

$$D_{min} = \frac{5V}{15V} = 0,333$$

$$D_{max} = \frac{5V}{11V} = 0,454$$

Tenemos entonces un rango de ciclo de trabajo entre 0,333 y 0,454, dependiendo de la tensión de entrada, que irá ajustando el integrado a través de la realimentación.

Vamos a plantear la diferencia de corriente en el inductor tanto en el ON como en el OFF. Uno de los parámetros a considerar en esta parte es la frecuencia de trabajo del LM2596 que es del orden de los 150 kHz. También vamos a utilizar el D_{min}



$$\Delta I_{Lon} = \frac{V_s - V_{out}}{L} * D * \frac{1}{f}$$
$$\Delta I_{Loff} = \frac{V_{out}}{L} * (1 - D) * \frac{1}{f}$$

Buscamos el valor crítico del inductor que corresponde a cuando la corriente mínima del mismo sea cero y, en consecuencia, la corriente máxima sea el doble de ΔI_L . Otra consideración es la corriente de salida, usaremos 1,2 A que es la máxima corriente del USB del Raspberry PI 3 B+.

$$L_{crit} = \frac{V_{out}}{2 * I_{out}} * \frac{1 - D}{f} = \frac{5V}{2 * 1,2A} * \frac{1 - 0,333}{150 \text{ kHz}} = 9,26 \mu H$$

A este valor lo multiplicamos por un factor de 5 para tener cierto margen de maniobra.

$$L = L_{crit} * 5 = 9,26 \mu H * 5 = 46,3 \mu H$$

Queda plantear el capacitor de salida. Por eso, primero calculamos el ripple de tensión a la salida que vamos a necesitar más adelante.

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} = \frac{V_{o \text{ max}} - V_{o \text{ min}}}{V_{out}} = \frac{5,25 \text{ V} - 4,75 \text{ V}}{5 \text{ V}} = 0,1$$

Igualamos la diferencia de cargas entre el inductor y el capacitor, para luego despejar el valor del último.

$$\Delta Q_C = \Delta Q_L$$
$$C * \Delta V_o = \frac{1}{2} * \frac{T}{2} * \frac{\Delta I_L}{2}$$

Despejando el capacitor nos queda la fórmula:

$$C_{\text{mínimo}} = \frac{1}{8 * \frac{\Delta V_o}{V_o} * f^2 * L} = \frac{1}{8 * 0,1 * 150 \text{ kHz}^2 * 46,3 \mu H} = 1,12 \mu F$$

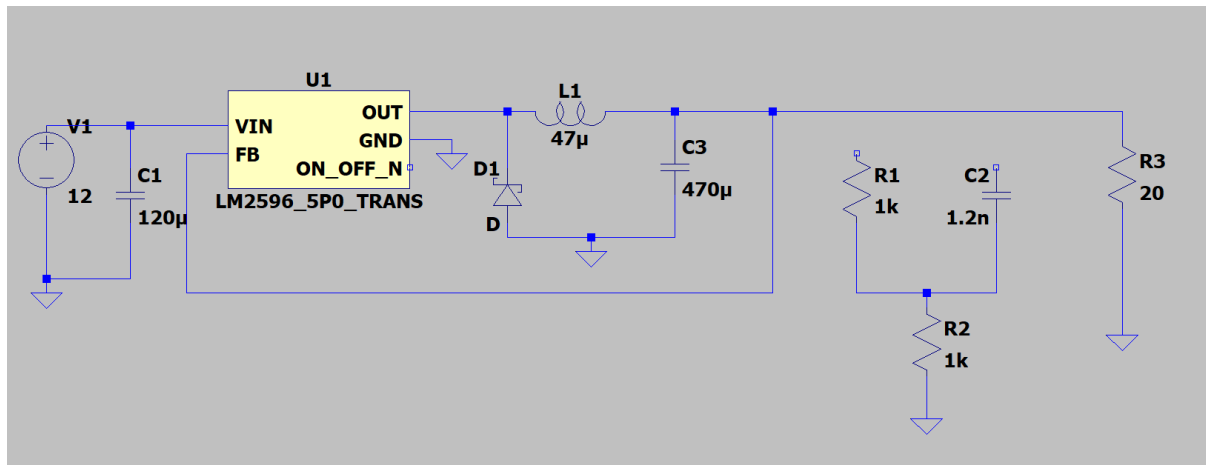
Con respecto al diodo y al switch, en este caso el LM2596, su tensión máxima es igual a la tensión máxima de entrada, es decir, que deben soportar 15V.

Para la realización de la placa, estos valores fueron ajustados en base a simulaciones y recomendaciones del fabricante del integrado en su hoja de datos.



Simulación en LTSpice

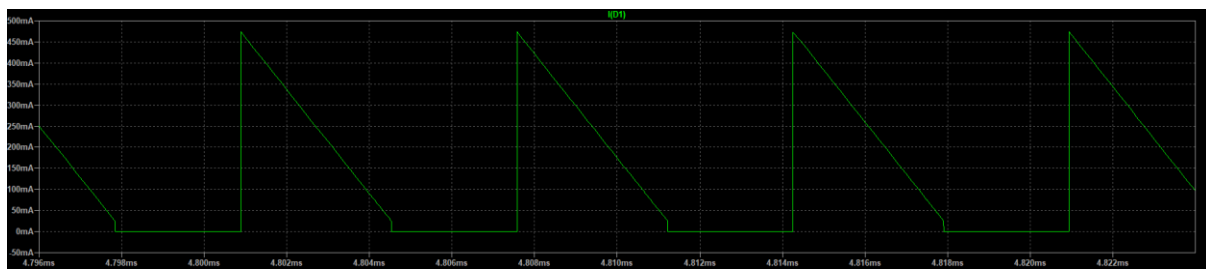
Esquemático



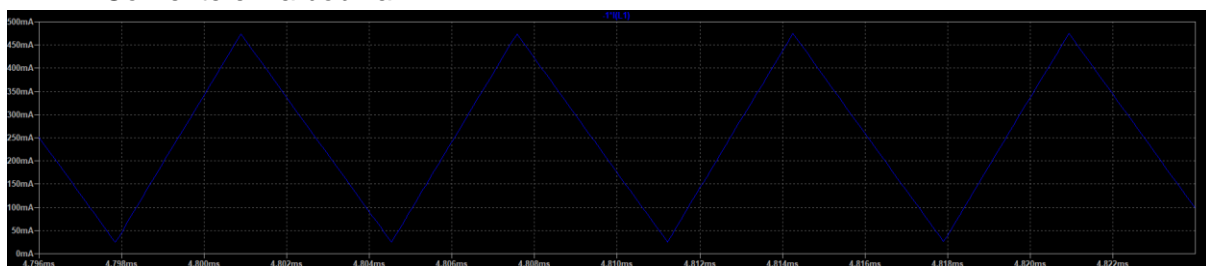
- **ACLARACIÓN:** no existe un componente provisto por el fabricante para el LM2596ADJ, sí para sus otras versiones de tensión fija, por lo que se tiene que usar un divisor resistivo para ajustarlo a la tensión deseada a partir de estos modelos fijos (en las comunidades de Texas Instrument proponen hacerlo de esta manera). Como hay una versión de 5 volts, usamos directamente esa sin divisor. También se puso la red de realimentación simbólicamente ya que en las versiones de tensión fija no se utilizan

Simulación

- Corriente en el diodo

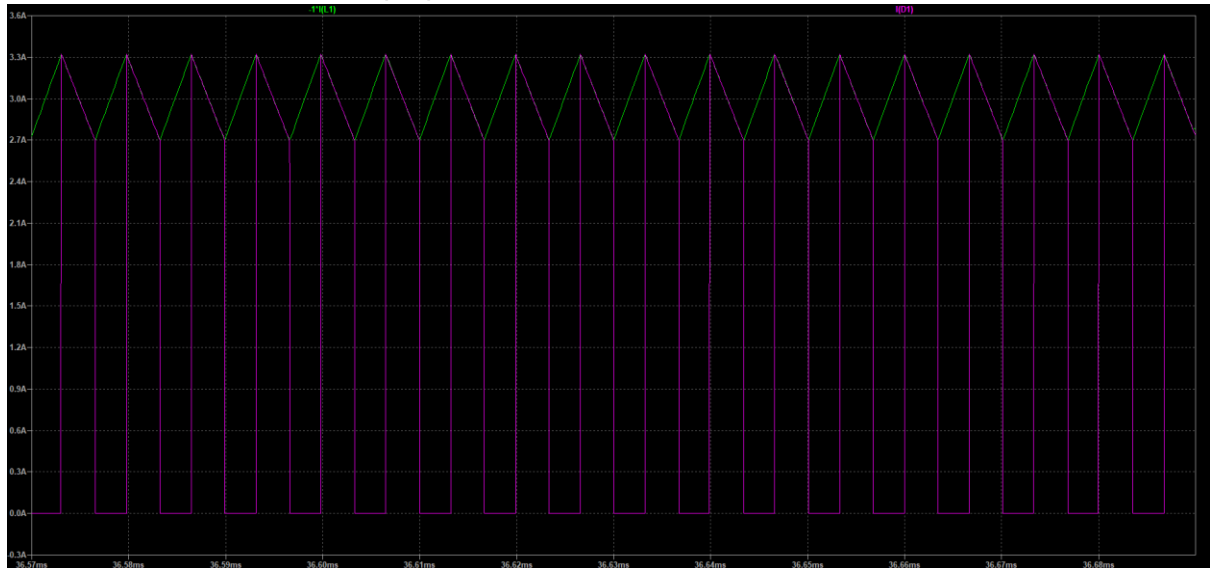


- Corriente en la bobina





- Corriente en diodo superpuesta con corriente de bobina



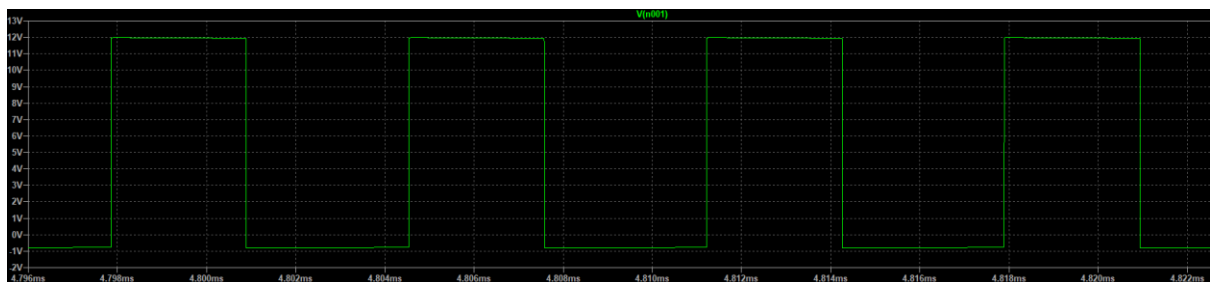
- Corriente capacitor



- Corriente de salida

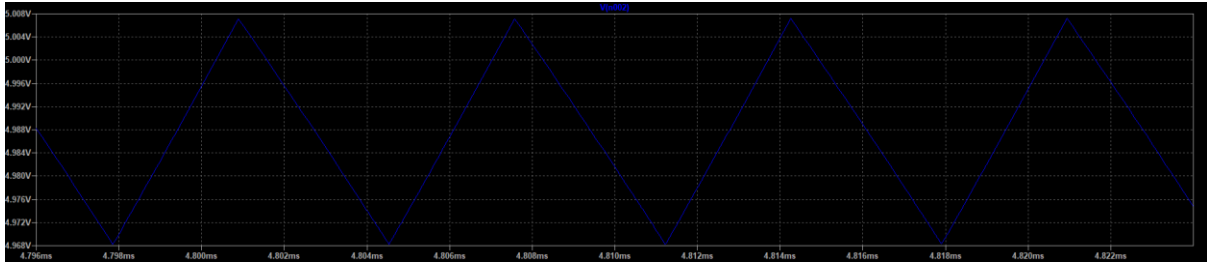


- Tensión en el nodo diodo - bobina



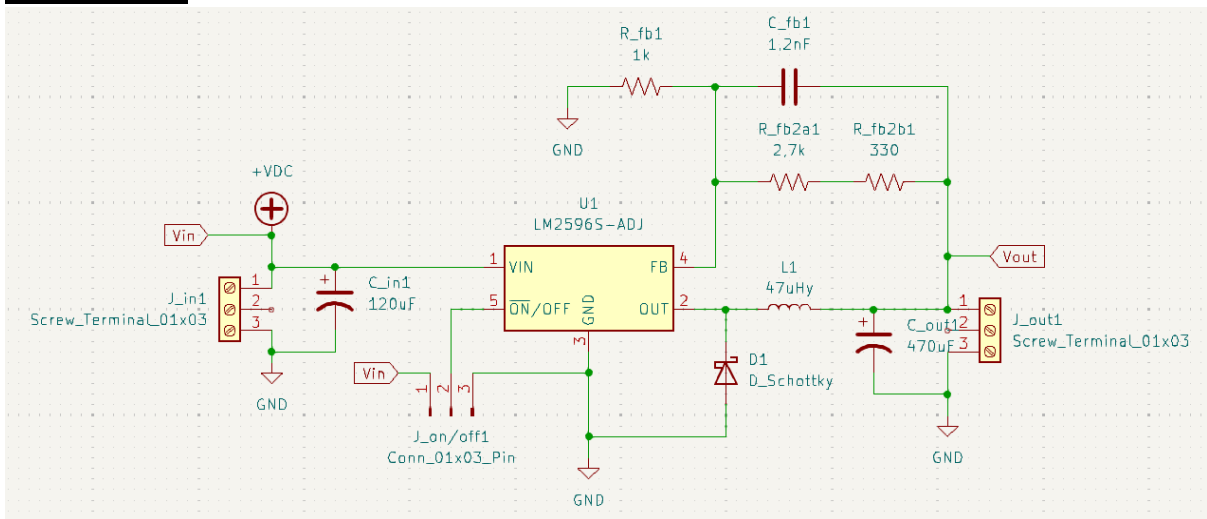


- Tensión de salida



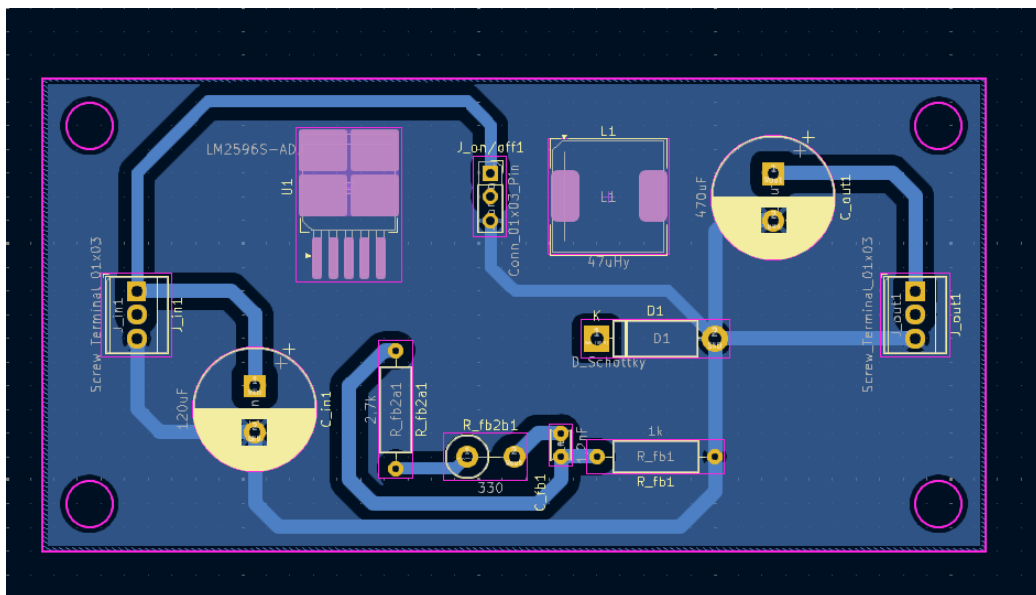
Diseño de placa en KiCAD

Esquemático



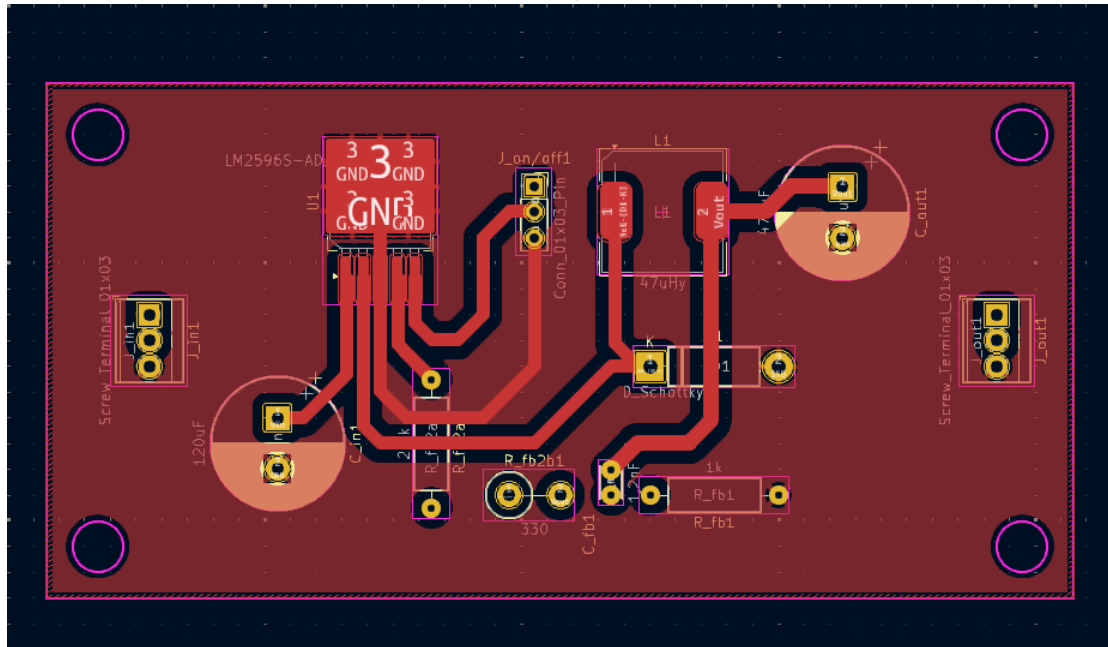
Board

Cara inferior





Cara superior



Consideraciones acerca del diseño de la placa:

- Tamaño 100mm x 50mm
- Placa de cobre doble faz
- Ancho mínimo de pistas 50mil
- Evitar realizar la realimentación tan cerca del inductor
- Borneras a los costados para facilitar conexiones
- Jumper para encendido y apagado del LM2596
- Agregar denominaciones de componentes en el grabado de la placa
- Al utilizar LM2596 e inductor con paquetes de tipo SMD, utilizamos los terminales de los componentes THT como vías y realizar la conexión entre ambas caras de la placa.
- Como inductor utilizamos un modelo que ya viene encapsulado de potencia blindado.
- El diodo es del tipo Schottky (1N5822) usado para aplicaciones de potencia y alta frecuencia.

Fabricación de placa

Para realizar la placa, usamos el método de planchado para transferir el diseño a la misma. Gran parte de la complejidad fue durante esta etapa ya que se debió alinear lo más preciso posible las hojas impresas con el diseño a la placa para su posterior planchado.

Una vez planchado, se procedió a sumergir la placa en cloruro férrico para grabar el diseño, disolviendo el cobre que quedó sin protección.

Luego de dejar actuar al cloruro férrico y enjuagar la placa, era el turno de agujerear, y aquí como mencionamos anteriormente, era clave que los diseños de ambas caras estén perfectamente alineados para que la perforación se realice en el centro de las vías y poder soldar correctamente los terminales de los componentes con la corona de cobre en ambas caras.



Se realizó una aplicación de flux en toda la placa para facilitar la soldadura y como protección del cobre.

La siguiente etapa fue el soldado de los componentes, en la que no hubo mayores inconvenientes, sólo un mayor cuidado con el integrado y el inductor debido a falta de experiencia en el soldado de SMD.

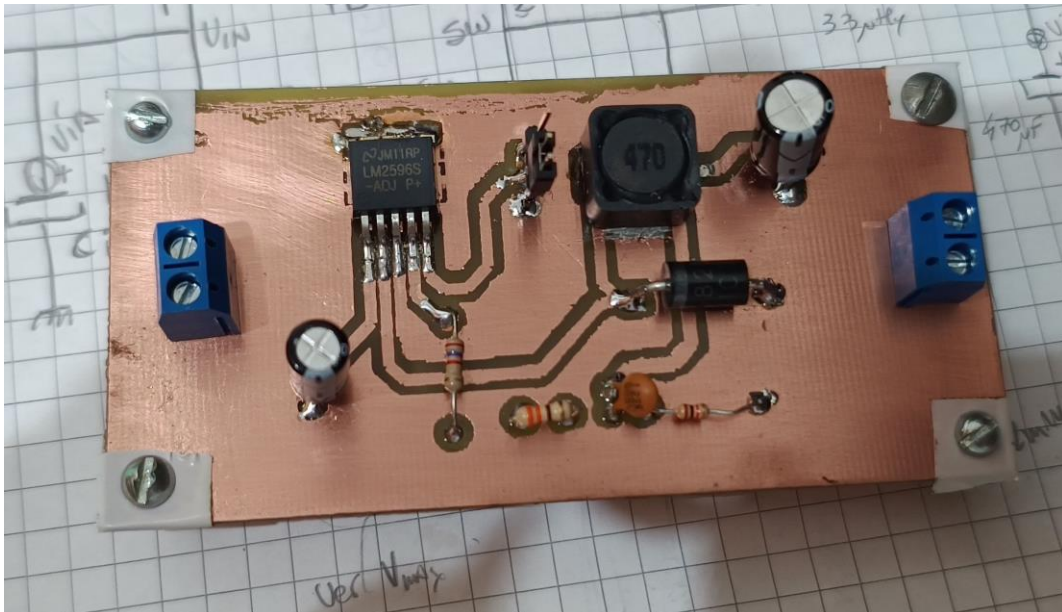
Consideraciones para una futura revisión de la placa

- Para el resistor R_fb2b1, utilizar un preset en lugar de una resistencia común para tener un parámetro más de ajuste de la realimentación.
- Remover el cobre debajo del inductor, ya que más allá de la huella recomendada del fabricante, tiene más superficies metálicas que pueden generar contactos no deseados.



- Además del jumper de encendido/apagado del LM2596, agregar un interruptor que permita encender y apagar la placa. También contar un led indicador del estado.
- Diseñar agujeros debajo del integrado para poder poner del otro lado un disipador y poder mejorar el rendimiento térmico del integrado

Foto de la placa finalizada

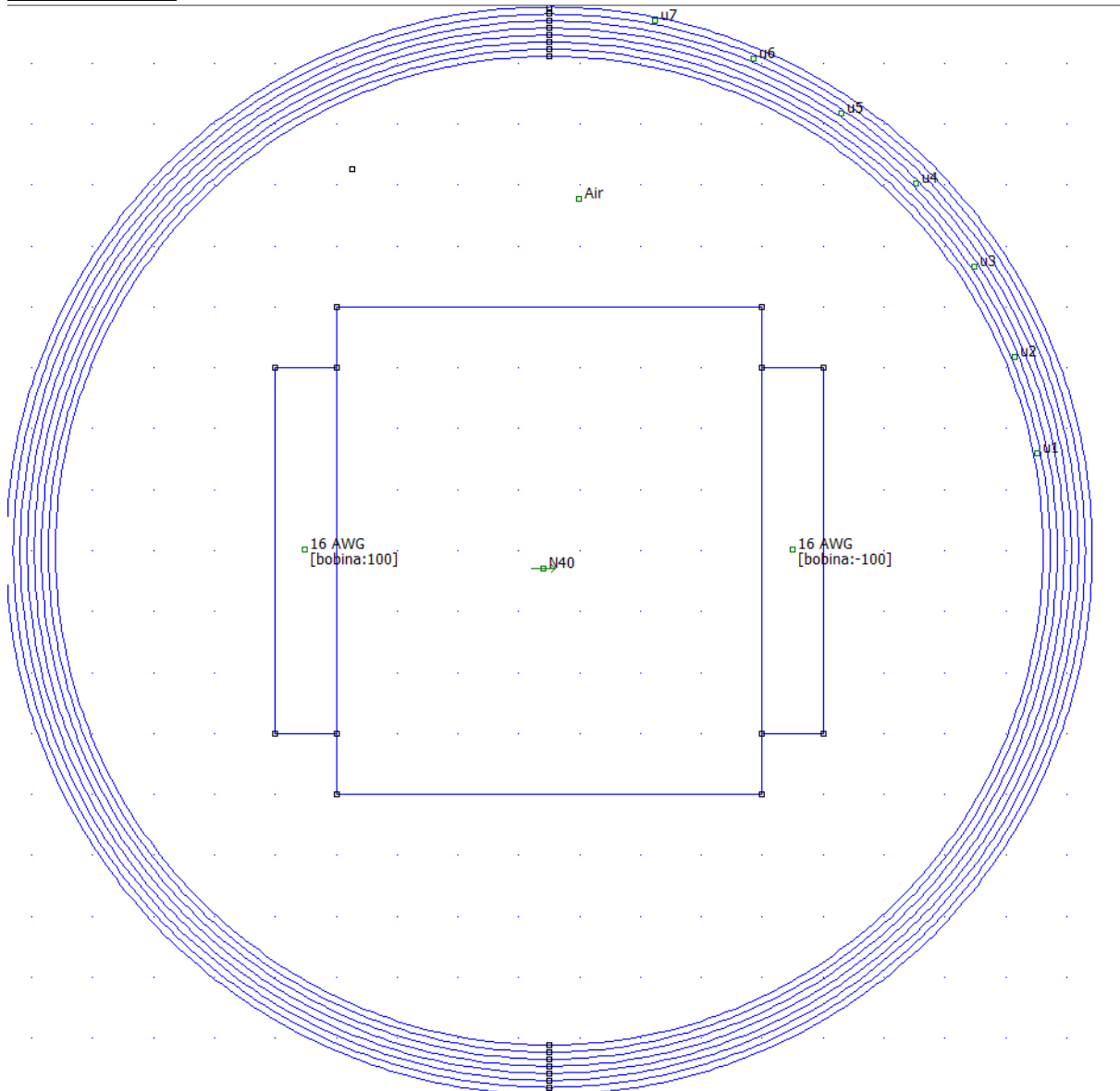




Cálculo de núcleo magnético en FEMM

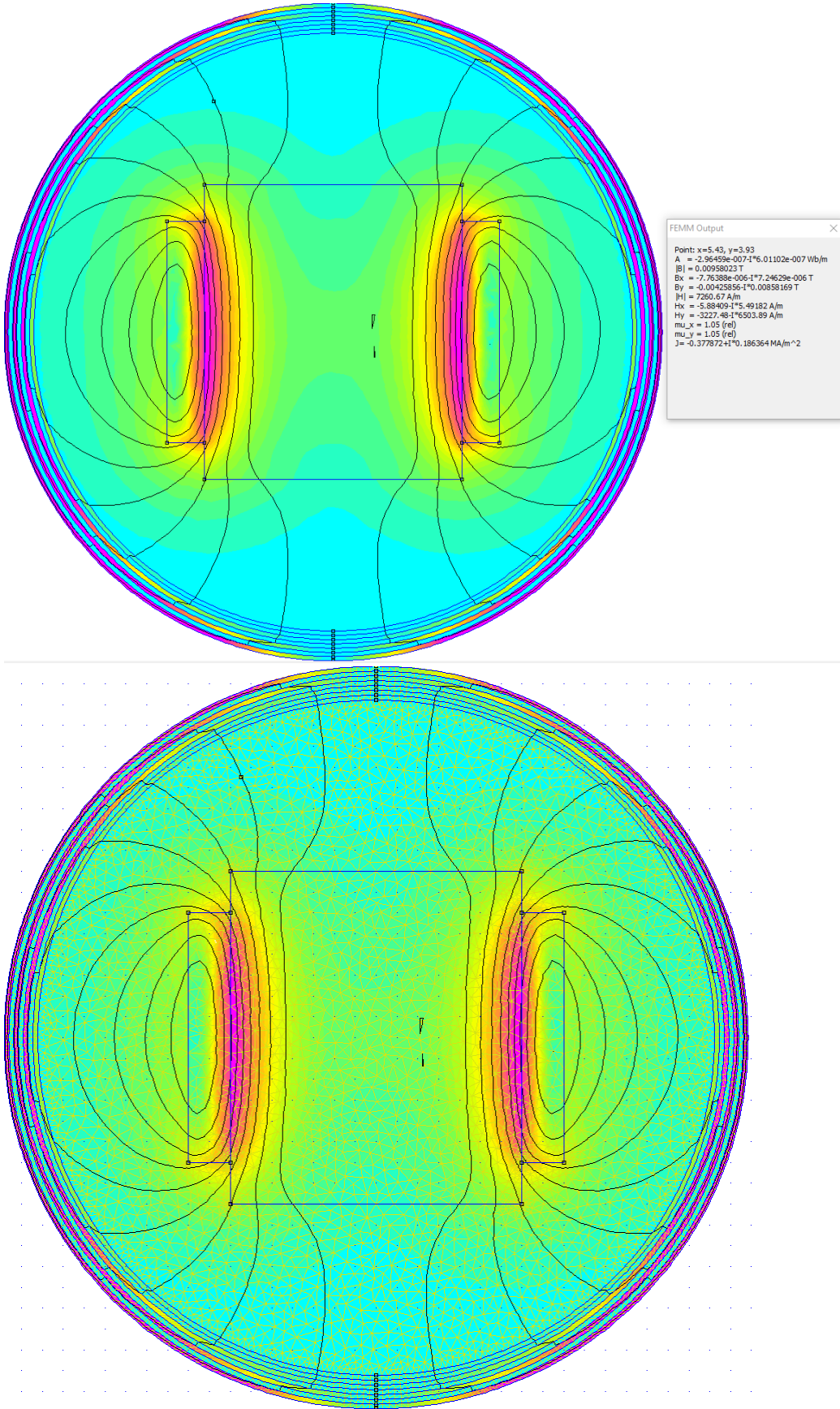
- Aclaración - los cálculos en el simulador FEMM se hicieron tomando en cuenta las siguientes propiedades
 - Materiales
 - Aire
 - N40 (para el ferrite)
 - Cobre AWG 16
 - Bobina
 - Corriente 3A
 - 100 vueltas
 - Frecuencia de trabajo - 150 KHz (la del integrado)
- Las propiedades de N40, AWG 16 y 100 vueltas de bobinado fueron puestas de manera genérica ya que no encontramos información para determinarlas
- Las medidas de la bobina fueron hechas lo más cercanamente posible a la realidad basándonos en el footprint y diseño mecánico de la bobina que provee el datasheet

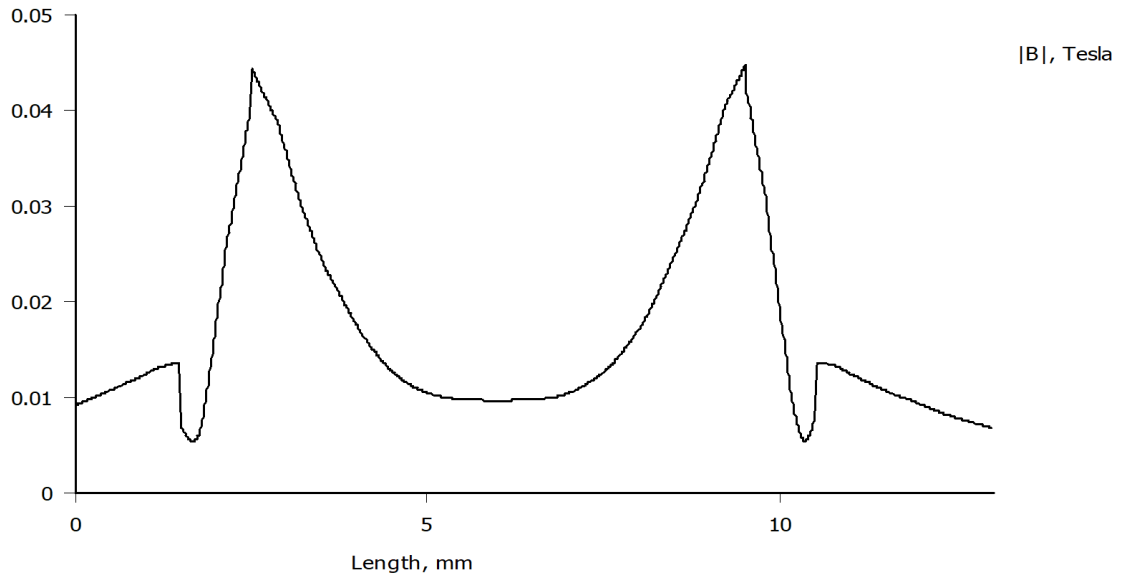
Esquemático





Simulación

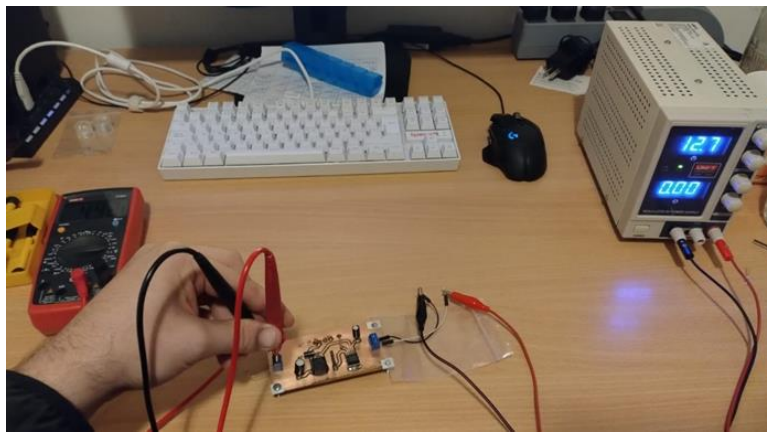




Mediciones

A continuación, mostraremos las mediciones realizadas a la placa y al final se incluye una tabla con la información de cada una de ellas.

Medición 1:



Tensión de entrada: 12,7 V

Resistencia de carga: 10 k Ω

Tensión de salida: 4,92 V

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{carga}} = \frac{4,92V}{10\text{ k}\Omega} = 492\mu A$$

$$P_{out} = V_{out} * I_{out} = 4,92V * 492\mu A = 2,42\text{ mW}$$

Medición 2:

En el video demostrativo se muestran las mediciones realizadas.

Se realizan mediciones variando la tensión de entrada, desde la mínima hasta la máxima asegurándose mantener la tensión de salida estable.

La resistencia de carga usada es de 75 Ω .



Tensión de entrada: 12,6 V \Rightarrow $V_{out} = 4,90$ V

Tensión de entrada: 11,1 V \Rightarrow $V_{out} = 4,90$ V

Tensión de entrada: 15,1 V \Rightarrow $V_{out} = 4,90$ V

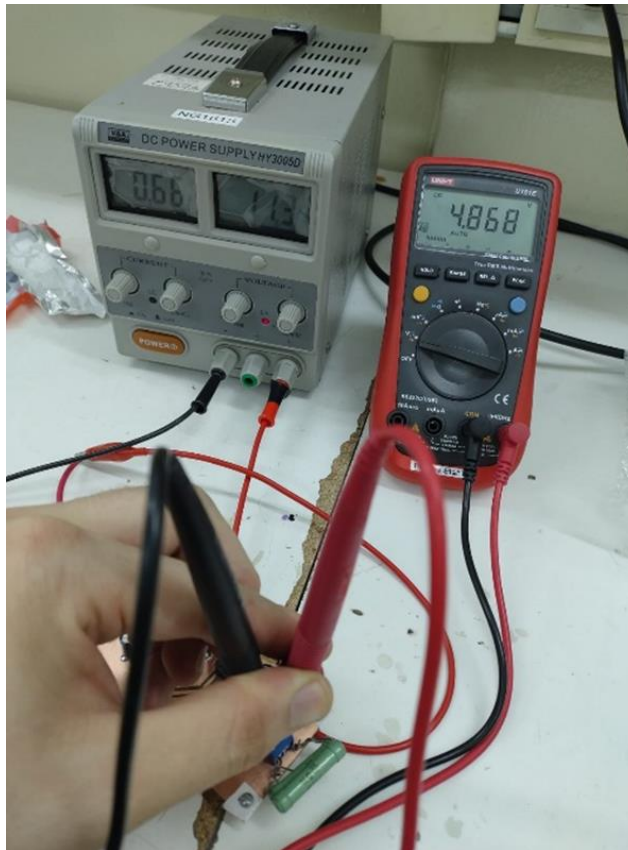
En los 3 casos se mantiene la tensión de salida en 4,90 V

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{carga}} = \frac{4,90V}{75 \Omega} = 65,33 \text{ mA}$$

$$P_{out} = V_{out} * I_{out} = 4,90V * 65,33mA = 320 \text{ mW}$$

Medición 3:

En esta medición se utilizó una resistencia de carga de 4,75 Ω . Al transcurrir determinado tiempo de la medición, la resistencia comenzó a calentarse y por ende aumentar su valor.



Tensión de entrada: 11,3 V

Resistencia de carga: 4,75 Ω

Tensión de salida: 4,868 V

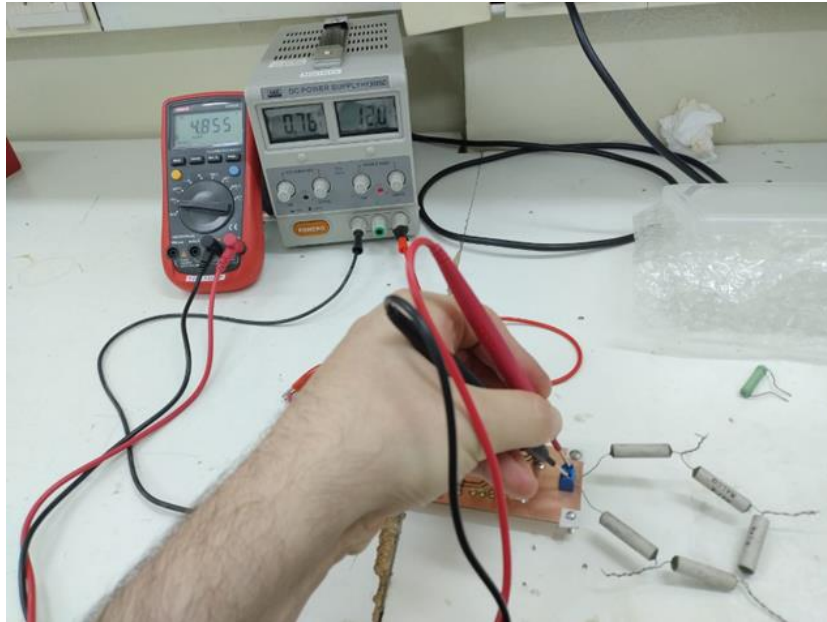
$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{carga}} = \frac{4,868V}{4,75 \Omega} = 1,025 \text{ A}$$

$$P_{out} = V_{out} * I_{out} = 4,868 \text{ V} * 1,025 \text{ A} = 4,989 \text{ W}$$

Medición 4:

Se vuelve a disminuir el valor de la resistencia de carga, esta vez se utilizaron 5 resistencias con mayor poder de disipación en serie, dando un valor de 3,5 Ω .

Al igual que en el caso anterior, al transcurrir determinado tiempo, las resistencias comenzaron a calentarse y por ende aumentar su valor.



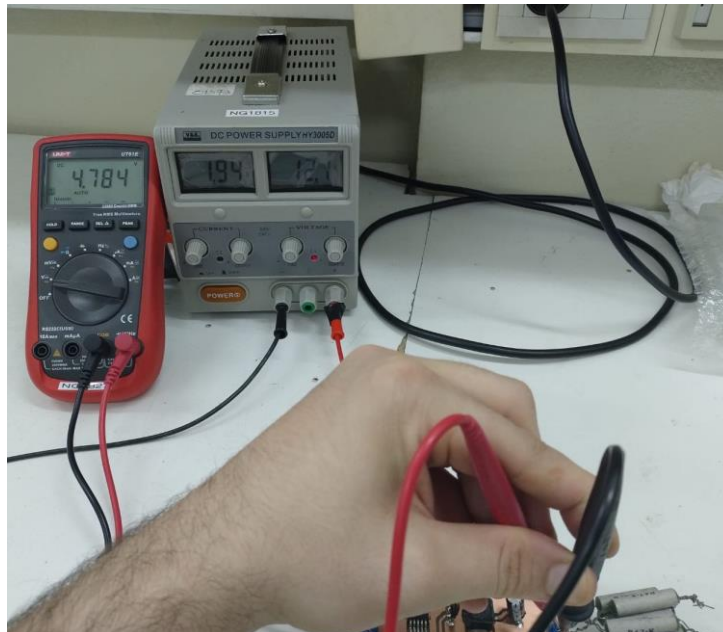
Tensión de entrada: 12,0 V
Resistencia de carga: 3,5 Ω
Tensión de salida: 4,855 V

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{carga}} = \frac{4,855V}{3,5 \Omega} = 1,387 A$$

$$P_{out} = V_{out} * I_{out} = 4,855 V * 1,387 A = 6,734 W$$

Medición 5:

En esta medición se utilizó otro arreglo de resistencias para obtener un valor aún más bajo. Este fue de 1,9 Ω y es el valor más bajo al que fue probada la placa. Con esta prueba podemos comprobar que la fuente puede brindar la máxima corriente a la que fue especificada.





Tensión de entrada: 12,1 V

Resistencia de carga: 1,9 Ω

Tensión de salida: 4,784 V

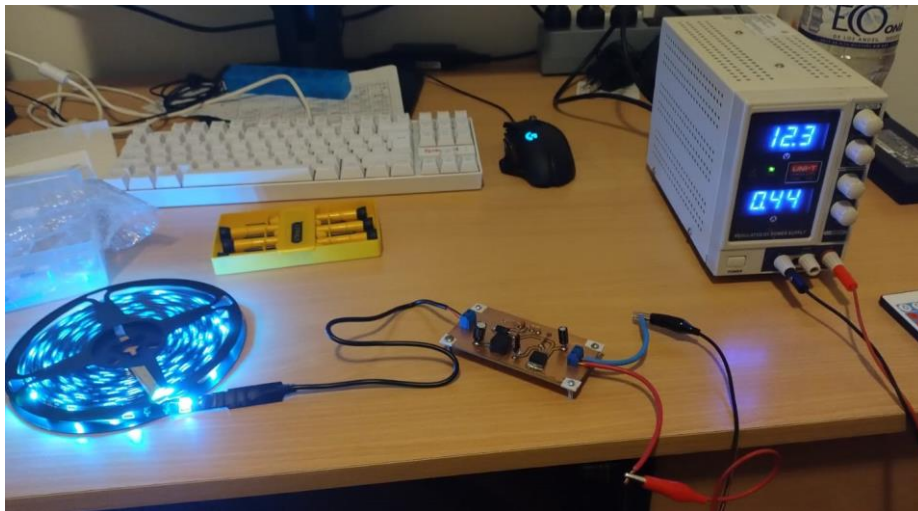
$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{carga}} = \frac{4,784V}{1,9 \Omega} = 2,518 A$$

$$P_{out} = V_{out} * I_{out} = 4,784 V * 2,518 A = 12,046 W$$

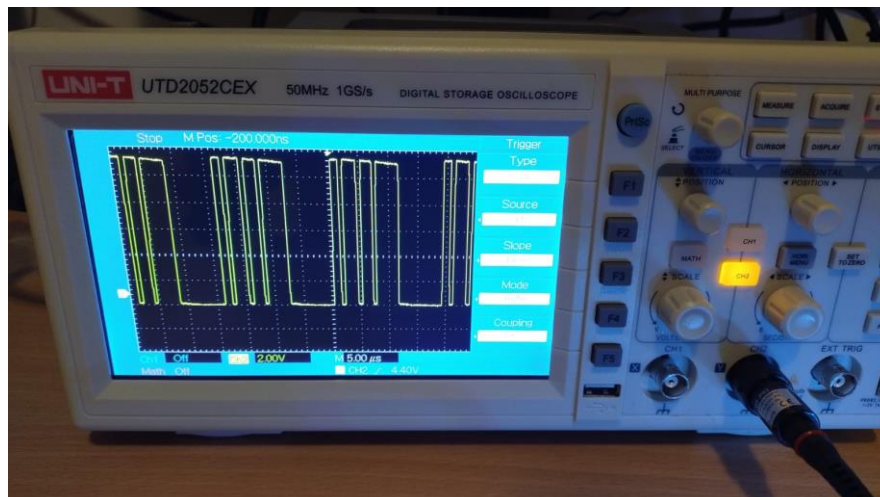
Medición 6:

Por último, se realizaron mediciones usando como carga una tira de luces LED.

Usando el osciloscopio, pudimos visualizar la tensión del diodo y el rizado de la tensión de salida.



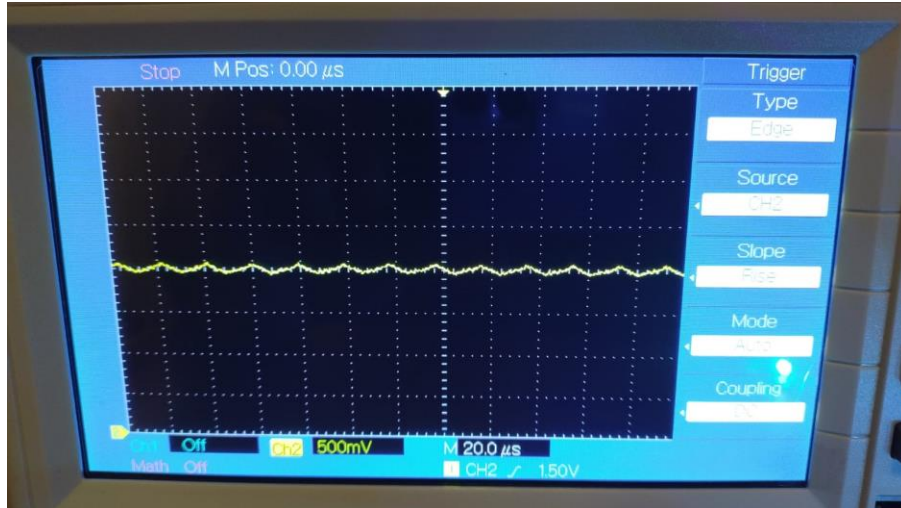
Con respecto al diodo, se observa que la tensión máxima a la que es sometido es cercana a la tensión de entrada.



$$V_{max} = div * FDV = 5,6 div * 2 \frac{V}{div} = 11,2 V$$



La última medición corresponde al rizado de la tensión de salida.



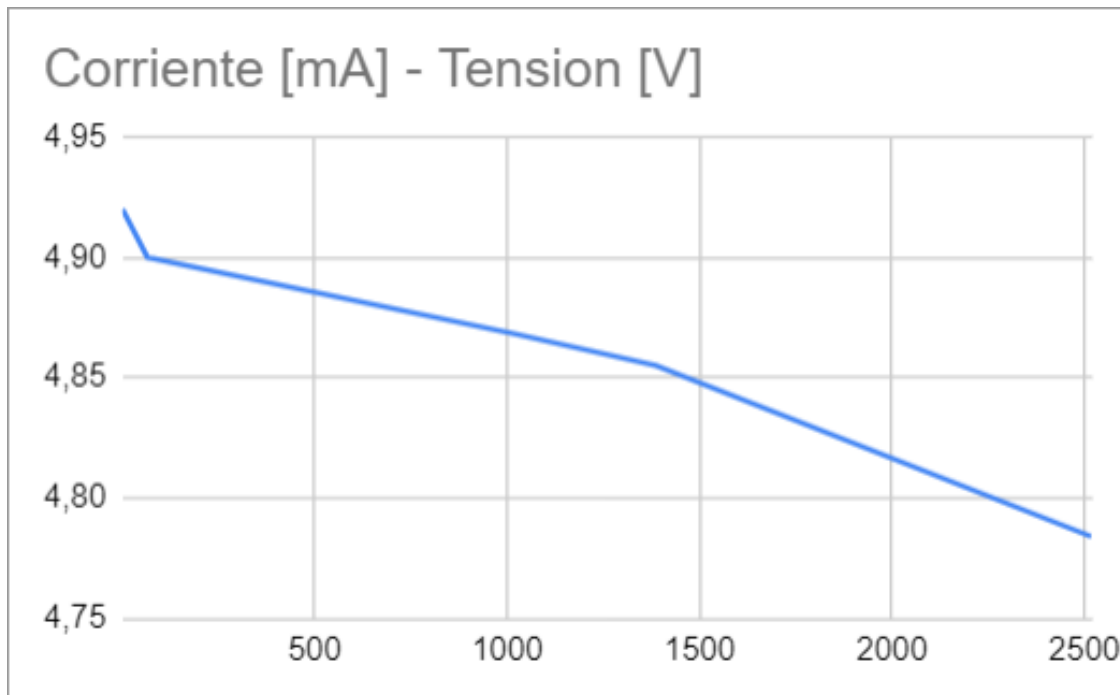
$$V_{\text{rizado}} = \text{div} * \text{FDV} = 0,4 \text{ div} * 500 \frac{\text{mV}}{\text{div}} = 200 \text{ mV}$$

Tabla: Resumen de mediciones

Medición N°	V entrada	R carga	V salida	I salida
1	12,7 V	10 kΩ	4,92 V	492 μA
2a	12,6 V	75 Ω	4,90 V	65,33 mA
2b	11,1 V	75 Ω	4,90 V	65,33 mA
2c	15,1 V	75 Ω	4,90 V	65,33 mA
3	11,3 V	4,75 Ω	4,868 V	1,025 A
4	12,0 V	3,5 Ω	4,855 V	1,387 A
5	12,1 V	1,9 Ω	4,784 V	2,518 A



Gráfica Corriente vs. Tensión



Conclusiones

Se logró planificar, simular, diseñar y fabricar una fuente reguladora Buck con salida de 5V con las especificaciones planteadas inicialmente.

Pudimos observar que a medida que bajamos la carga para aumentar la corriente, la tensión de salida iba disminuyendo, pero siempre dentro de los parámetros establecidos. Otro aspecto es la diferencia de valores entre los cálculos teóricos, la simulación y la placa, ya que en el mundo ideal de los cálculos no tuvimos en cuenta efectos que hay en el mundo real, como capacidades e inductancias parásitas que aportan los distintos componentes. Respecto a la placa, convenimos en que es posible mejorarla desde un punto de vista estético y funcional, como las mencionadas en el punto "Consideraciones para una futura revisión de la placa".

Anexos

Link video demostrativo:

<https://youtube.com/shorts/q110y6UzGNq?feature=share>

<https://youtube.com/shorts/bDD0I2KfThg?feature=share>

<https://youtu.be/fQqpGzRGgSc>