



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Año 2025 - 2º cuatrimestre

## TALLER DE DISEÑO DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS (TA138)

### CUARTO CHECKPOINT - SISTEMA DE ALIMENTACIÓN PARA APLICACIONES INDUSTRIALES Y AUTOMOTRICES

ESTUDIANTES: Grupo 4

Martin, Andrés	110722
<code>ammartin@fi.uba.ar</code>	
Loñ, Julieta	110663
<code>jlon@fi.uba.ar</code>	
Monti, Martina	110574
<code>mmonti@fi.uba.ar</code>	
Del Rio, Francisco	110761
<code>fadelrio@fi.uba.ar</code>	

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Fuente buck</b>	<b>2</b>
2.1. Diseño y simulación . . . . .	2
2.2. Inductor . . . . .	4
2.3. Eficiencia . . . . .	4
2.4. Diseño de PCB . . . . .	5
<b>3. Circuito PWM</b>	<b>6</b>
3.1. Diseño y simulación . . . . .	6
3.2. Diseño de PCB . . . . .	8
3.3. Mediciones . . . . .	9
<b>4. Conclusiones</b>	<b>10</b>
<b>5. Apéndice</b>	<b>11</b>
5.1. Calculo del inductor . . . . .	11

## 1. Introducción

En esta entrega se realizara el diseño de la fuente buck y el circuito PWM. Para la fuente buck se deben realizar los cálculos necesarios para obtener las características físicas del inductor que se utilizara para implementar dicho circuito.

Ambos circuitos se deben diseñar teniendo en cuenta las especificaciones requeridas por el trabajo. La eficiencia para la fuente buck y la frecuencia para el PWM.

## 2. Fuente buck

### 2.1. Diseño y simulación

En las fuentes buck se busca reducir la tensión de entrada a un nivel inferior en la salida, manteniendo la alta eficiencia. Para ello se utilizan distintos componentes. Un MOSFET canal N (IRFZ44N) es utilizado para actuar como interruptor controlado por PWM (debido a este comportamiento de "llave", la tensión Drain-Source de este MOSFET es muy baja); el segundo NMOS (IRFZ44N) conduce la corriente cuando el primer transistor se encuentra apagado, implementando de esta manera las llaves ideales vistas en el circuito teórico.

También se agregan capacitores para evitar picos de tensión. El circuito cuenta además con un inductor, el cual almacena energía y suaviza la corriente. Este inductor debe calcularse con precisión para evitar sobrecalentamientos, tener tiempos de respuesta acordes y otros factores; es por esto que se le dedicará toda una sección a su diseño.

Para obtener el valor de la inductancia primero se calculo el mínimo valor que puede tomar para que el circuito continúe funcionando de manera adecuada. Para eso se debió considerar el caso de mayor conmutación, en donde la resistencia de carga es máxima.

$$R_{max} = \frac{V_o}{I_{s,min}}$$

Considerando que  $V_o = 9,5V$  y  $I_{s,max} = 0,1A$  se obtiene  $R_{max} = 95\Omega$ . Luego, el inductor se calcula mediante la siguiente expresión.

$$L_{cr} = \frac{(1-D)R_{max}}{2f} \quad (1)$$

Considerando que se va a tener un  $D_{min}$  y un  $D_{max}$  dependiendo de la  $V_{in}$  se calcularon ambos:

$$D_{max} = \frac{V_o + V_{ds2}}{V_{in} - V_{ds1} + V_{ds2}} = \frac{9,5 + 0,049}{12} = 0,7957 \quad (2)$$

$$D_{min} = \frac{V_o + V_{ds2}}{V_{in} - V_{ds1} + V_{ds2}} = \frac{9,5 + 0,049}{30} = 0,3183 \quad (3)$$

Se calcularon dos valores de  $L_{cr}$  y se utilizó el más alto de ambos que es el que cumple con lo pedido y presenta el peor caso para el inductor critico. De las cuentas se obtuvo  $L_{cr} = 250 \mu H$ . Sin embargo, se decidió utilizar un inductor  $L = 300 \mu H$  para mayor seguridad y evitar que variaciones en el valor real del inductor presenten problemas graves en el circuito implementado.

El valor del capacitor de salida se debe calcular considerando el ripple, por lo tanto el valor se calculo de manera iterativa. Se decidió un valor inicial de  $100 \mu F$  y se observo el valor del ripple con ese valor para luego poder aplicar la siguiente expresión:

$$\Delta V_o = \frac{I_{L,max} - I_{L,min}}{8Cf} \quad (4)$$

Con un capacitor de  $47 \mu F$  se obtiene un  $\Delta V_o = 2,5 mV$  que cumple con los requisitos de tension de salida.

Una vez finalizado todo el desarrollo del circuito se consiguió el siguiente diseño.

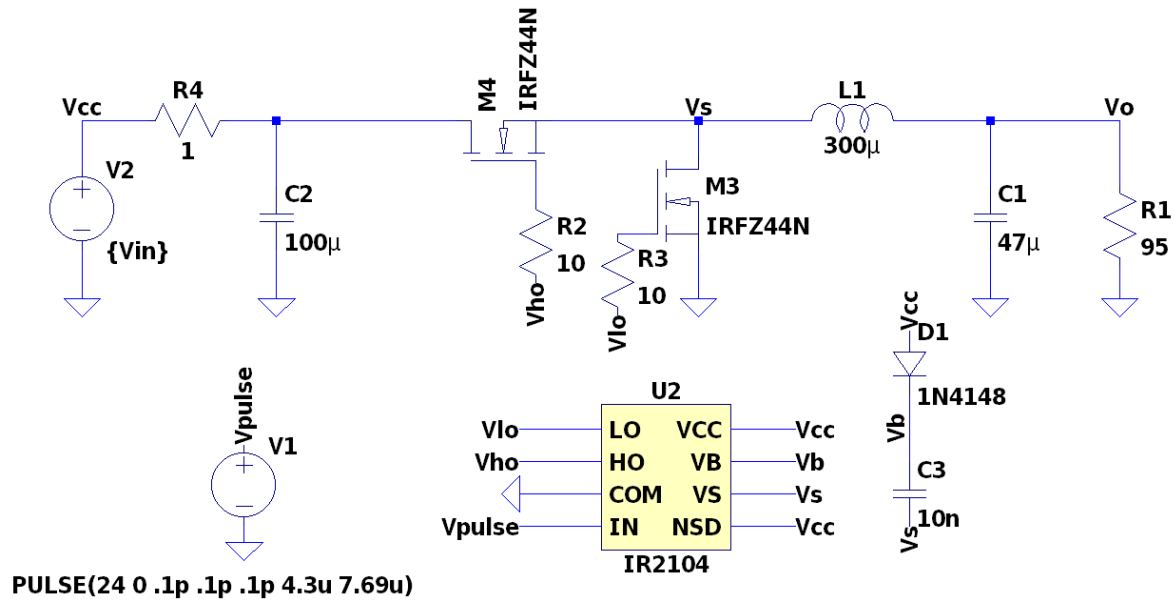


Figura 1: Circuito Fuente Buck

La tensión de salida de la fuente buck:

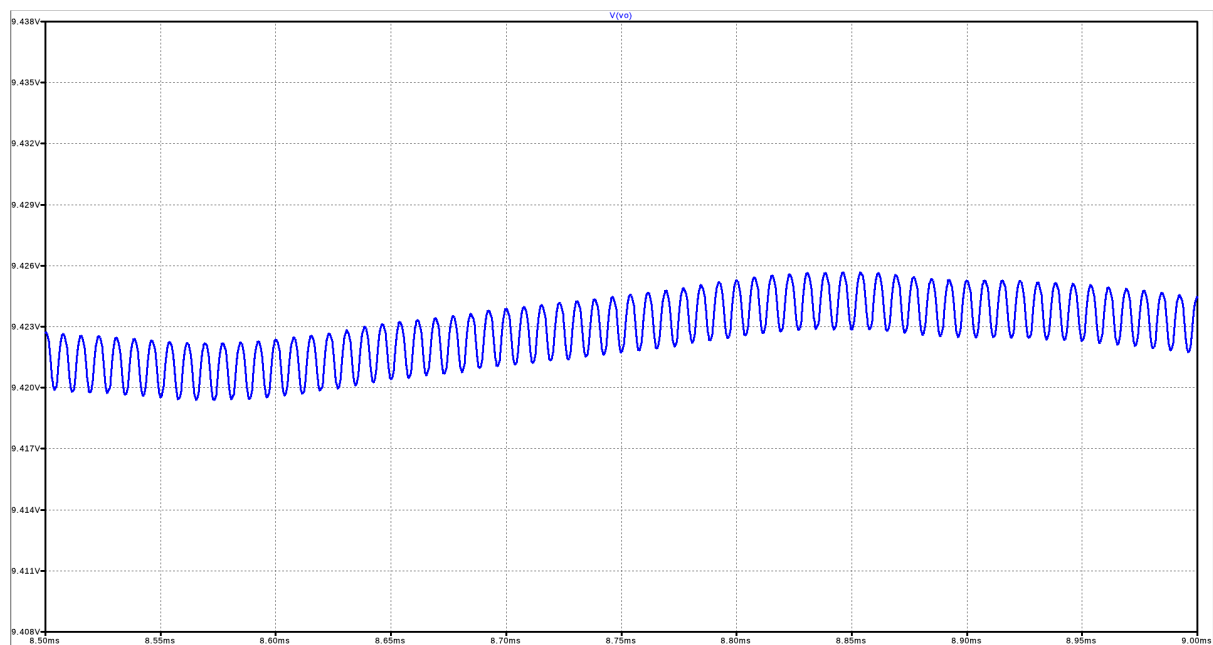


Figura 2: Tension de salida de la fuente buck

La corriente sobre el inductor:

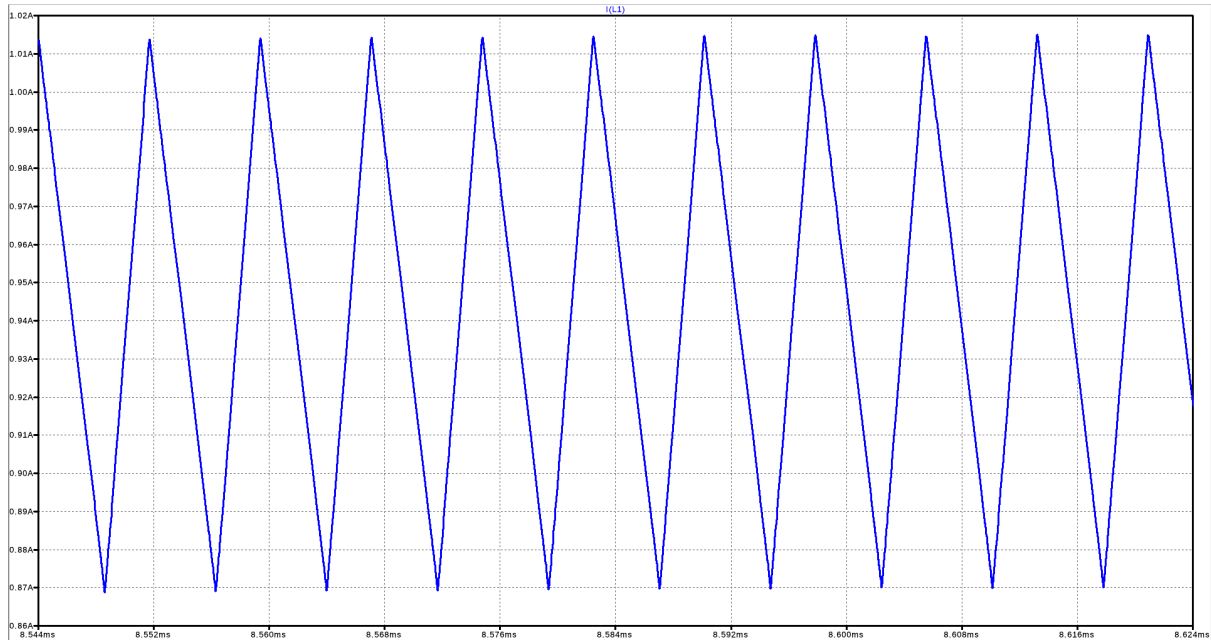


Figura 3: Corriente sobre el inductor

En la Figura 2 se puede ver que, además de la oscilación, el valor medio no es constante, esto se atribuye a la necesidad de agrandar el error de convergencia admitido para asegurarse esta misma.

## 2.2. Inductor

Al momento de diseñar el inductor se debieron tener en cuenta ciertos parámetros de funcionamiento de la fuente buck. La frecuencia trabajo es de 130 kHz, la  $I_{L_{max}} = 1,54A$ , la  $I_{L_{min}} = 1,42A$ .

Se obtuvieron las características físicas del inductor usando el método *Tacca*. Se debe considerar  $\sigma_{IL} \leq 5 \frac{A}{mm^2}$  para evitar el sobrecalentamiento del alambre. Considerando los núcleos disponibles comercialmente y la tabla de cables provista por *Ericksson*, se realizaron los cálculos necesarios para obtener los siguientes parámetros.

Parámetros	Valor
Material del nucleo	N87
Nucleo	EE3007
Cable de cobre	AWG#20
Inductancia [μHy]	300
$l_g$ [mm]	0.151
Numero de vueltas	25
$\sigma_{IL} [\frac{A}{mm^2}]$	2.978
$r_{Cu}$ [cm]	0.0437
$\delta$ [cm]	0.021

Cuadro 2.1: Especificaciones del inductor

Con los valores obtenidos no hay efecto pelicular.

## 2.3. Eficiencia

En los reguladores conmutados Buck una eficiencia ideal sería del 100 %. Sin embargo, esta eficiencia resulta imposible en la realidad debido a pérdidas por conmutación, resistencias parasitas, caídas en el MOSFET, entre otros factores. Debido a esto, la eficiencia real estará alrededor del 90 % – 95 %. Esta eficiencia aumentará dependiendo de la optimización del PCB, un control preciso del ciclo de trabajo y un MOSFET acorde.

En el caso del circuito diseñado, al utilizar un MOSFET como reemplazo del diodo para la conmutación, se logra una reducción en la caída de tensión. Además, la elección del inductor y el capacitor logran una gran reducción en el ripple de corriente y tensión respectivamente, lo que mejora la eficiencia.

La eficiencia del circuito se obtiene segun la siguiente expresión:

$$eficiencia = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (5)$$

$$\eta(9,3V) = \frac{9,3 * 1,469}{24 * 0,00631} = 90,2 \% \quad (6)$$

$$\eta(9,7V) = \frac{9,7 * 0,103}{24 * 0,045} = 91,5 \% \quad (7)$$

Ambos resultados cumplen con la eficiencia pedida para ambas tensiones especificadas del regulador buck.

## 2.4. Diseño de PCB

Para realizar el PCB de la fuente buck debió tenerse en cuenta el trazado de pistas. Aquí se tuvo en cuenta la separación entre ellas para así evitar capacitancias o inductancias parásitas. Además se debió mantener un cierto ancho de las pistas debido a la potencia que circula en ciertas zonas. Se planeó previamente el plano de masa para así mejorar el retorno de la corriente y reducir ruido. Teniendo todas estas cuestiones en consideración se obtuvo el siguiente diseño.

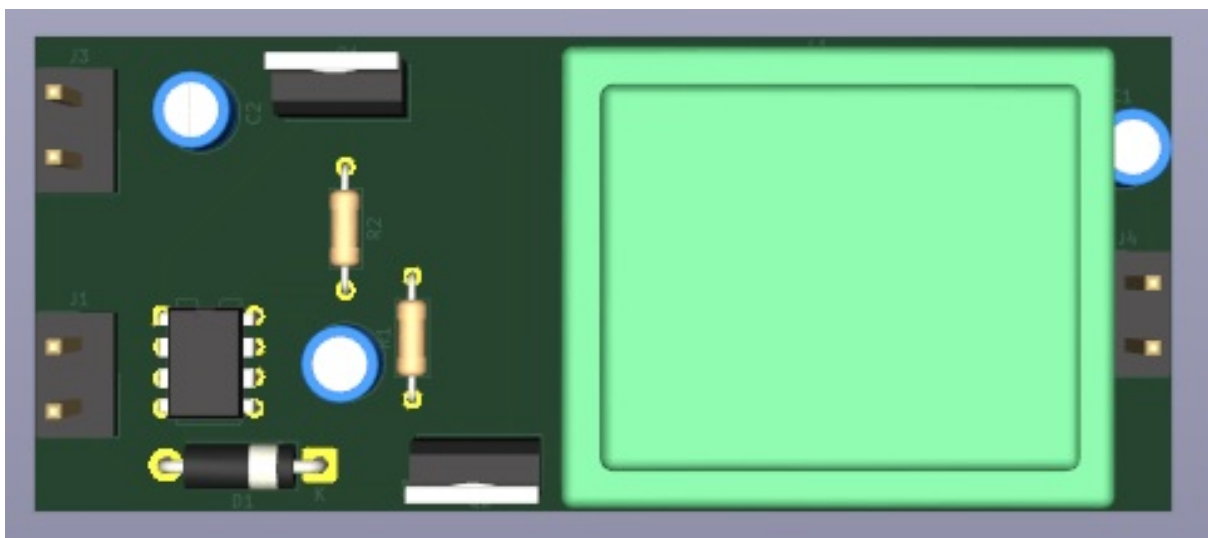


Figura 4: Diseño PCB frente Fuente Buck

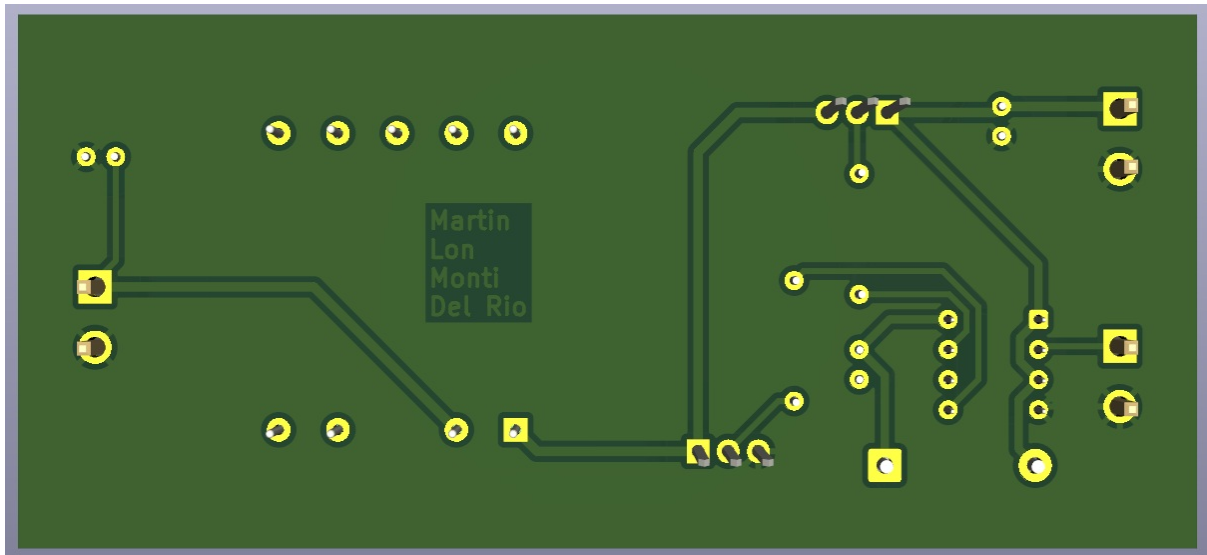


Figura 5: Diseño PCB dorso Fuente Buck

### 3. Circuito PWM

Como se mencionó antes, para la fuente buck se necesita una señal PWM que se ocupará de encender y apagar los MOSFETs. La forma de obtener tal señal utilizada es mediante la comparación de una señal triangular de 130 khz con una tensión constante. La ventaja de obtener la señal PWM de esta forma es que la tensión constante que se compara con la señal triangular podrá ser una señal proporcional a el error de la tensión de salida con la tensión deseada, de esta forma cerrando el lazo y obteniendo una fuente buck a lazo cerrado.

#### 3.1. Diseño y simulación

La topología utilizada para obtener la señal deseada es la de la Figura 12. Este circuito consta de un integrador con el operacional U2 y el capacitor, que recibe una señal cuadrada de la salida de U1, generando la triangular deseada, que luego se compara con V3 en U3, para finalmente tener la señal PWM deseada. Dado la alta frecuencia de oscilación utilizada, U1 y U3 son comparadores en vez de amplificadores operacionales.

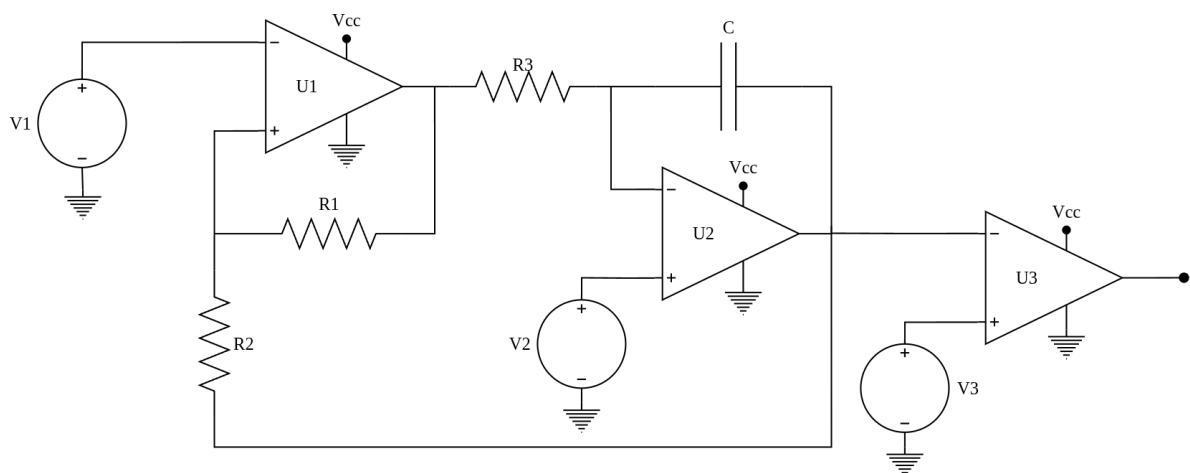


Figura 6: Circuito utilizado para generar la señal PWM

Los valores utilizados para los resistores y capacitores son los presentados en la Tabla 3.1. Los

misimos se obtuvieron de forma empírica, teniendo en cuenta la constante de tiempo  $\tau = R3 \cdot C$ .

Componente	Valor
R1	100 k $\Omega$
R2	24 k $\Omega$
R3	2,7 k $\Omega$
C	2,2 nF

Cuadro 3.1: Valores de los componentes del circuito PWM

Al simular el circuito se obtuvieron las señales cuadrada y triangular de las figuras 7 y 8

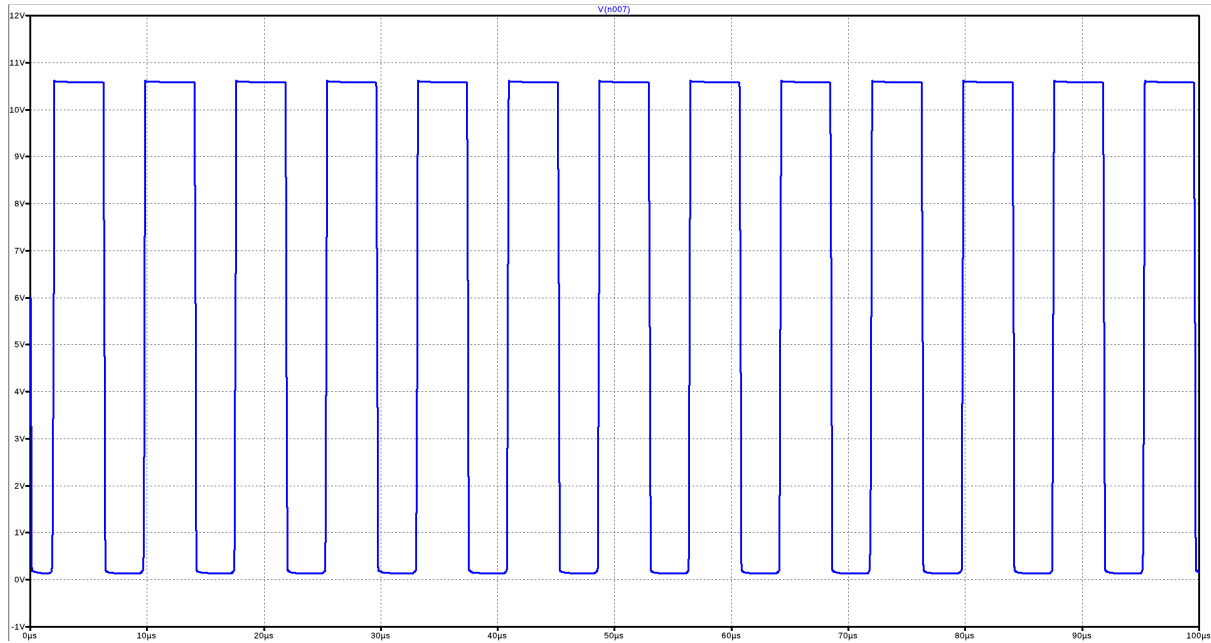


Figura 7: Señal cuadrada simulada

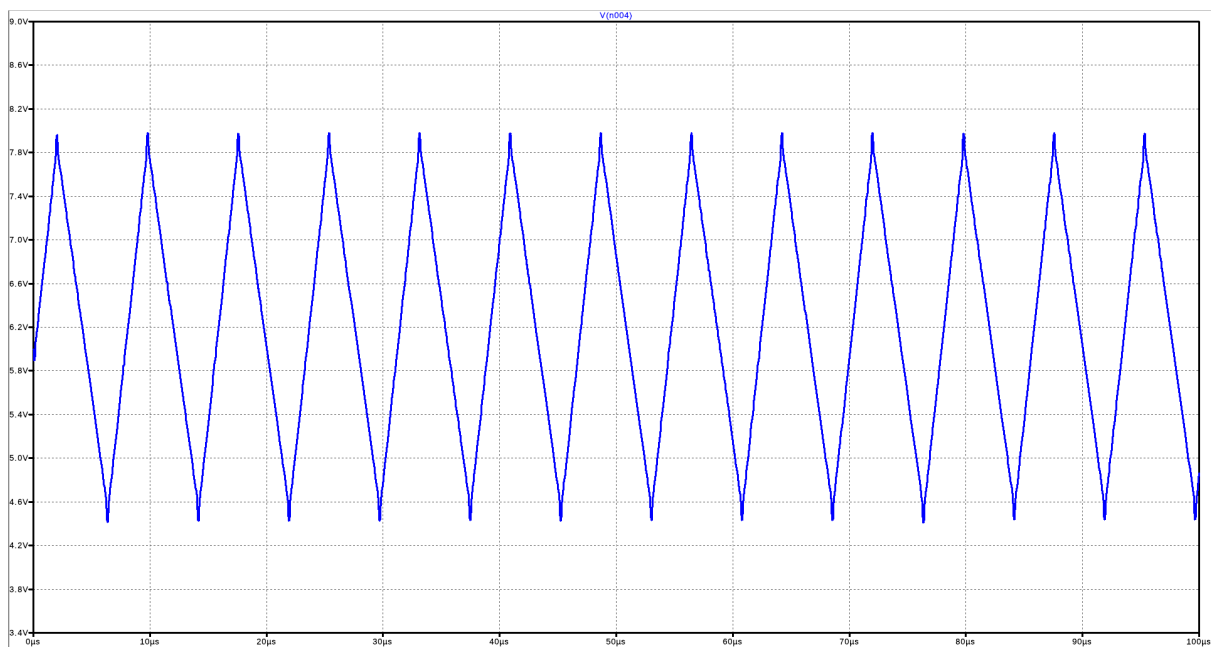


Figura 8: Señal triangular simulada



### 3.2. Diseño de PCB

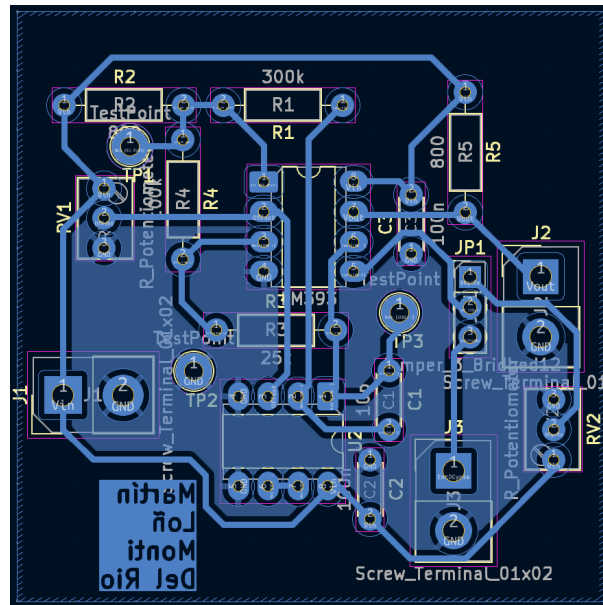


Figura 9: Circuito PCB PWM

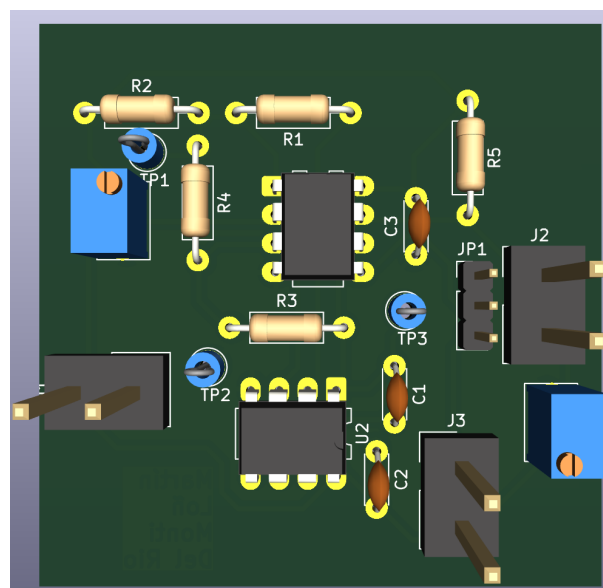


Figura 10: Circuito PCB PWM

Al momento de realizar el diseño del PCB se debieron tener en cuenta las consideraciones nombradas anteriormente. Además se tuvo presente que las pistas debían evitar recorridos de gran distancia ya que al transportar frecuencia si estas son muy largas se puede generar ruido en la información.

Se agregaron pines de prueba al circuito en lugares estratégicos para luego poder verificar el funcionamiento del circuito, pudiendo observar la señal en donde es necesario que cumplan con formas y frecuencias específicas. Por lo tanto los pines agregados son en tierra, en la salida del comparador y en la salida del integrador.

Además como los comparadores son *open collector* se agregaron resistencias de pull up conectadas a su salida. Se eligió el valor teniendo en cuenta lo recomendado por la datasheet del modelo y buscando evitar que se limite la corriente.

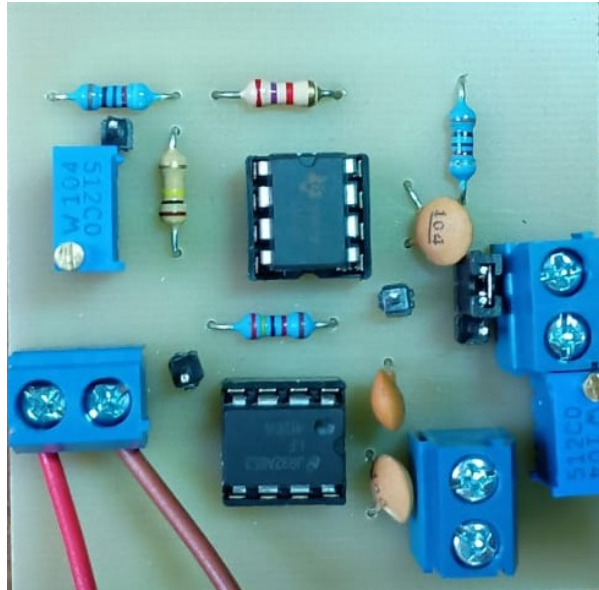


Figura 11: Circuito PWM

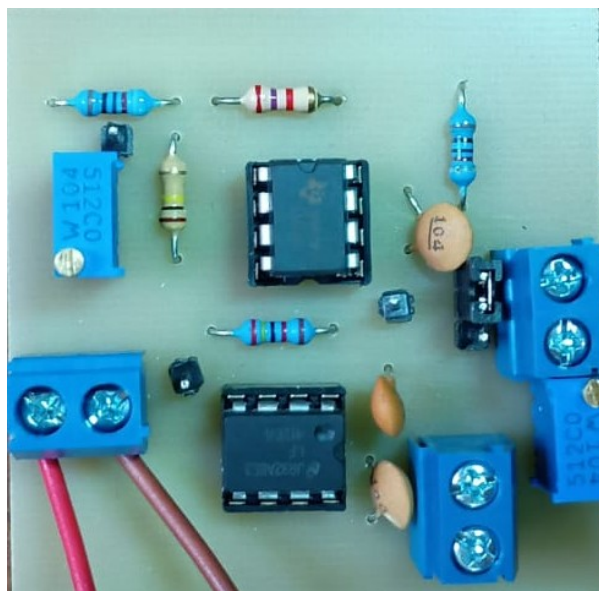


Figura 12: Circuito PWM

Durante la implementación se observó que el valor de capacitancia elegido inicialmente era muy cercano al del capacitor interno del operacional y por lo tanto se deformaba la señal. Para solucionarlo se cambió la relación del RC, se aumentó el valor del capacitor y se disminuyó el de la resistencia.

### 3.3. Mediciones

Al llevar a cabo las mediciones, se observó la señal cuadrada generada por el circuito a una frecuencia aproximada de 130kHz, tal como fue diseñada. Esta señal presenta transiciones rápidas por lo que se garantiza una conmutación correcta y eficiente de los MOSFETs en la fuente Buck. La amplitud de la señal se mantiene estable en el tiempo, sin ningún tipo de distorsiones.

Por otro lado, la señal triangular muestra una forma simétrica y estable con una amplitud adecuada. Se observó que la frecuencia de oscilación también es de aproximadamente 130kHz.

Con estas mediciones se puede confirmar el correcto funcionamiento del PWM, asegurando así una señal de control para la fuente conmutada Buck estable cumpliendo todos los requisitos.

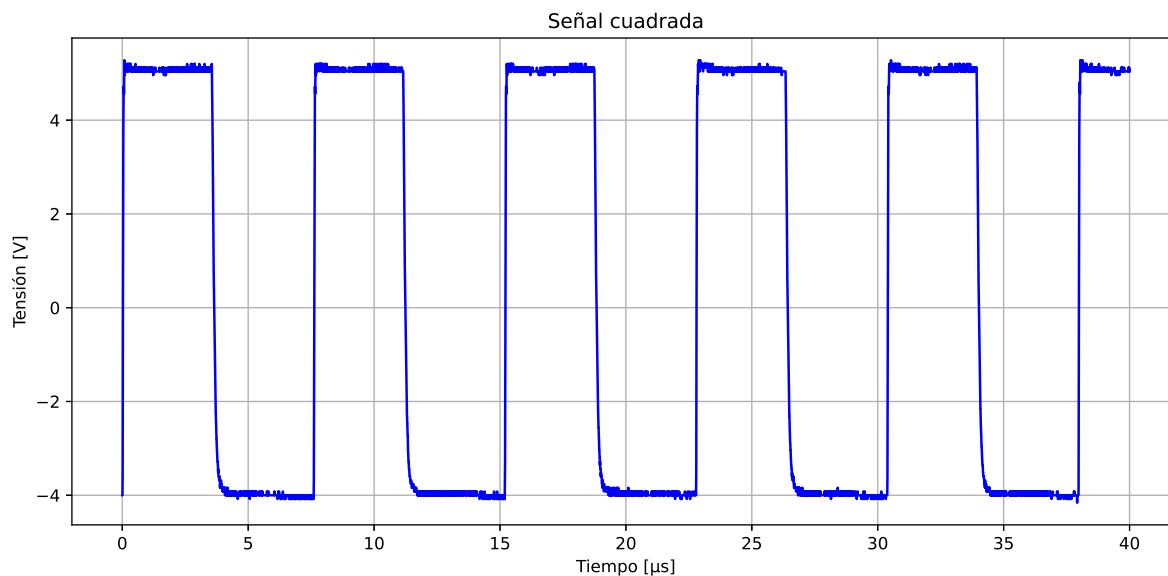


Figura 13: Señal cuadrada

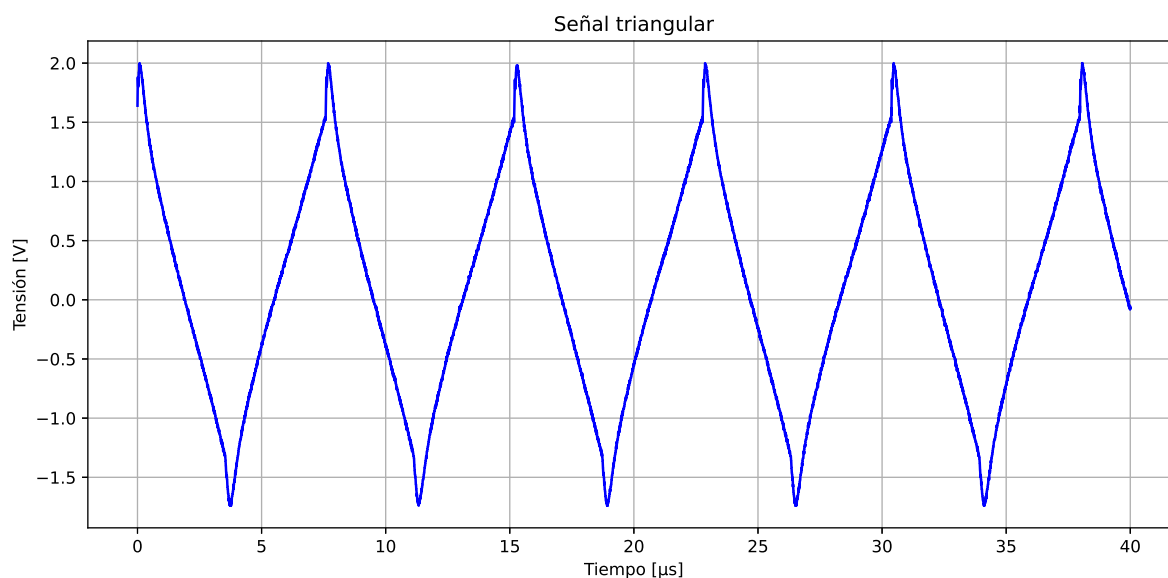


Figura 14: Señal triangular

## 4. Conclusiones

A lo largo del desarrollo se abordó el diseño y simulación de una fuente conmutada tipo Buck, donde se debió trabajar el control por modulación de ancho de pulso y el diseño físico del inductor. Durante la simulación, se observó que esta fuente Buck cumplió los requerimientos, superando el 90 % de eficiencia en distintas condiciones de carga, manteniendo a su vez un tiempo de establecimiento y un ripple acorde.

Se puso en práctica el diseño de pistas para circuitos de frecuencia, en donde se tuvo que considerar el trazado de pistas y el plano de masa. El diseño del circuito PWM se implementó mediante comparadores, logrando generar, luego de varios intentos, una señal triangular estable y una señal PWM capaz de controlar los MOSFETs.

## 5. Apéndice

### 5.1. Calculo del inductor

Se utilizaron las siguientes especificaciones para realizar los cálculos:

$$\begin{aligned}
 L &= 300 \mu\text{H} \\
 I_{L,max} &= 1,54 \text{ A} \\
 I_{L,dc} &= 1,48 \text{ A} \\
 f_{sw} &= 130 \text{ kHz} \\
 P_{cu} &= 1 \text{ W} \\
 K_u &= 0,33 \\
 \rho_{cu} &= 1,7 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}
 \end{aligned}$$

El campo magnético máximo se obtuvo de la hoja de datos del material observando el máximo valor donde la permeabilidad tiene un comportamiento lineal. Luego, los valores de corriente máxima y media fueron obtenidos cuando la carga es mínima  $R_{Lmin} = \frac{9V}{1,5A} = 6,33\Omega$

El método *Tacca* indica que en primer lugar se debe calcular la sección de hierro,  $S_{fe}$ .

$$\begin{aligned}
 F_b &= K_u \\
 F_v &= 0,25 \\
 I_{L,ef} &= I_{L,dc} \\
 \sigma_{IL} &= 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \\
 S_{fe} &= 10 \sqrt{\frac{L I_{L,ef} I_{L,max}}{F_b F_v B_{max} \sigma_{IL}}} = 0,744 \text{ cm}^2
 \end{aligned} \tag{8}$$

Verificando la tabla provista por *Ericksson* y la disponibilidad comercial, se decidió usar el nucleo *EE3007*. Una vez decidido el nucleo es necesario verificar el valor del factor de ventana,  $F_v$ , elegido. Para eso se utilizo la datasheet del nucleo para obtener las dimensiones de la pieza.

$$\begin{aligned}
 B &= 19,6 \text{ mm} \\
 C &= 9,5 \text{ mm} \\
 D &= 6,5 \text{ mm} \\
 E &= 6,3 \text{ mm} \\
 F &= 6,3 \text{ mm} \\
 F_v &= \frac{S_v}{S_{fe}} = \frac{E(B-C)}{2CD} = 0,35
 \end{aligned} \tag{9}$$

Considerando este valor se volvió a calcular la sección del hierro,  $S_{fe} = 0,629 \text{ cm}^2$ . La variación es pequeña por lo que la elección del nucleo continua cumpliendo.

Se procedió a calcular el valor del entrehierro.

$$12 \frac{L}{S_{fe}} \left( \frac{I_{L,max}}{B_{max}} \right)^2 = 0,151 \text{ mm} \tag{10}$$

Obtenido este valor, se pudo conseguir el numero de vueltas necesarias para el inductor.

$$n = 850 \frac{B_{max}}{I_{L,max}} I_g = 25 \tag{11}$$

$$W_a = 0,476 \text{ cm}^2$$

$$A_w \leq \frac{K_u W_a}{n} = 6,283 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \quad (12)$$

Se elige usar el cable AWG#20 que tiene un  $A_w = 5,188 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ . Se verifica que el valor de la densidad sea menor a  $5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$  y que no sature

$$\sigma_{IL} = \frac{I_{L,max}}{100 A_w} = 2,789 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

$$B_{max,real} = \frac{\mu_0 n I_{L,max}}{I_g} = 0,0003 \text{ T}$$

Finalmente, se verifica que no haya efecto pelicular, es decir que  $\delta \leq r_{Cu}$ .

$$r_{Cu} = 0,0437 \text{ cm}$$

$$\delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_{sw}}} = 0,021$$