

RETO FUENTE 10- REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS

Colominas, Manel

Martínez Badenas, Miquel Àngel

Parrón, Alan

ÍNDICE

RETO FUENTE 10- REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS	1
Introducción.....	3
1. Alternativas de diseño.....	4
Características del LM2596	4
Diagrama de bloques.....	4
Ejemplo de implementación.....	5
Ventajas Frente a Reguladores Lineales	5
2. Propuesta de diseño.....	6
2.1 Justificación de resultados.....	8
2.1.1 Regulador Shunt TL431	8
Selección de valores	8
2.1.2 Regulador lineal LM317	9
Selección de valores	9
2.1.3 Eficiencia del LM317	10
· Eficiencia instantánea (η)	10
· Eficiencia promedio (η)	10
2.1.4 Transformadores.....	11
Selección de valores transformador 1	12
Selección de valores transformador 2	12
3. Pruebas simuladas.....	13
4. Pruebas Experimentales	15
5. Diseño PCB en KiCad.....	18
6. Conclusiones	20

Introducción

El diseño de fuentes de alimentación con reducción de pérdidas es un gran desafío en la electrónica moderna debido a la creciente demanda de dispositivos compactos, sostenibles y de alto rendimiento.

Las pérdidas de potencia en los reguladores lineales representan una limitación significativa, especialmente cuando existe una gran diferencia entre la tensión de entrada y la tensión de salida. Estas pérdidas no solo disminuyen la eficiencia energética, sino que también generan calor, aumentando la necesidad de disipación de energía térmica y, con ello, los costos y el tamaño del sistema.

El problema se agrava en aplicaciones donde se requieren múltiples niveles de tensión de salida o donde la tensión de salida varía en un amplio rango. En estas condiciones, los reguladores lineales presentan bajos rendimientos, especialmente a tensiones de salida bajas, debido a la alta potencia disipada por el transistor del regulador. Para abordar este desafío, se propone un diseño que combine múltiples niveles de tensión rectificada, conmutando entre ellos en función de las necesidades de la carga, para maximizar la eficiencia mientras se mantiene una regulación constante.

El uso de reguladores lineales es una solución común en fuentes de alimentación debido a su simplicidad y capacidad de proporcionar una salida estable y libre de ruido. Sin embargo, su principal desventaja es su baja eficiencia cuando la diferencia entre la tensión de entrada y salida es significativa.

A lo largo de la historia de la electrónica diferentes soluciones han sido propuestas para mejorar el rendimiento de los reguladores lineales sin sacrificar su simplicidad. Una estrategia bastante común, hace utilizar múltiples niveles de tensión de entrada. Esta técnica, explorada por fabricantes y diseñadores, permite reducir las pérdidas seleccionando dinámicamente el nivel de tensión más adecuado según las condiciones de la carga.

El enfoque actual busca integrar estas ideas en un sistema práctico que aproveche las ventajas de los reguladores lineales y la conmutación eficiente de tensiones de entrada, resolviendo las limitaciones inherentes de los sistemas tradicionales.

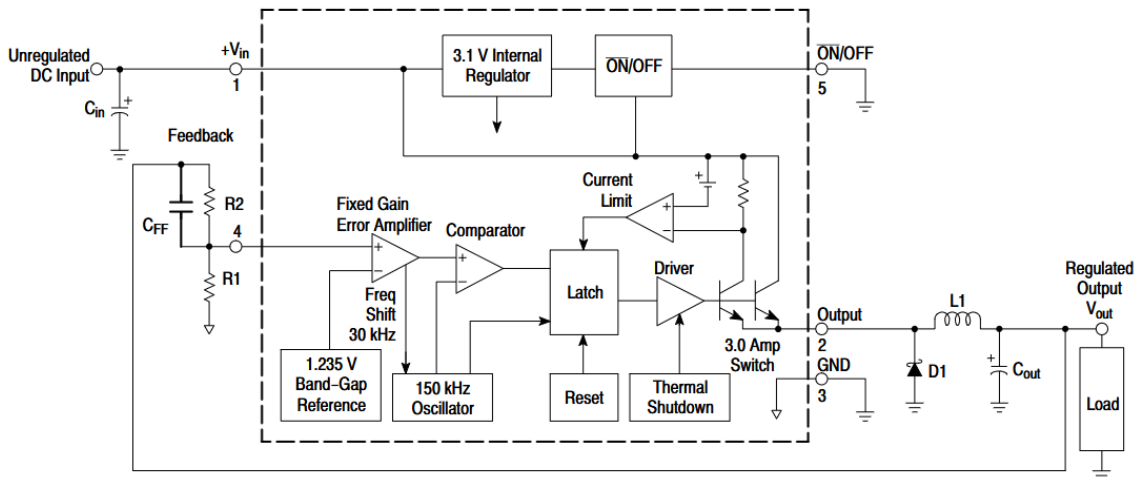
1. Alternativas de diseño

En el desarrollo del proyecto, resulta esencial evaluar diversas alternativas de diseño que permitan alcanzar los objetivos planteados de manera eficiente. Una de estas alternativas es el regulador conmutado **LM2596**, un componente distribuido por **Farnell**, que ofrece características sobresalientes frente a otros tipos de reguladores.

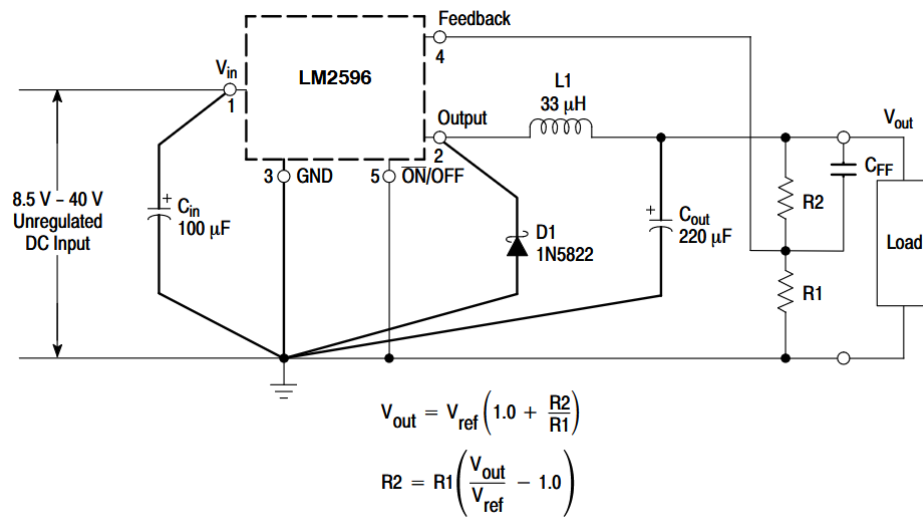
Características del LM2596

El **LM2596** es un regulador de voltaje conmutado tipo buck (reductor), diseñado para convertir eficientemente un voltaje de entrada más alto en un voltaje de salida más bajo. Este dispositivo opera a una frecuencia de conmutación de 150 kHz, lo que le permite alcanzar eficiencias de hasta el 92%. Puede manejar corrientes de salida de hasta 3 A y soporta un rango de voltaje de entrada de 4,5 V a 40 V, con un voltaje de salida ajustable entre 1,23 V y 37 V.

Diagrama de bloques



Ejemplo de implementación

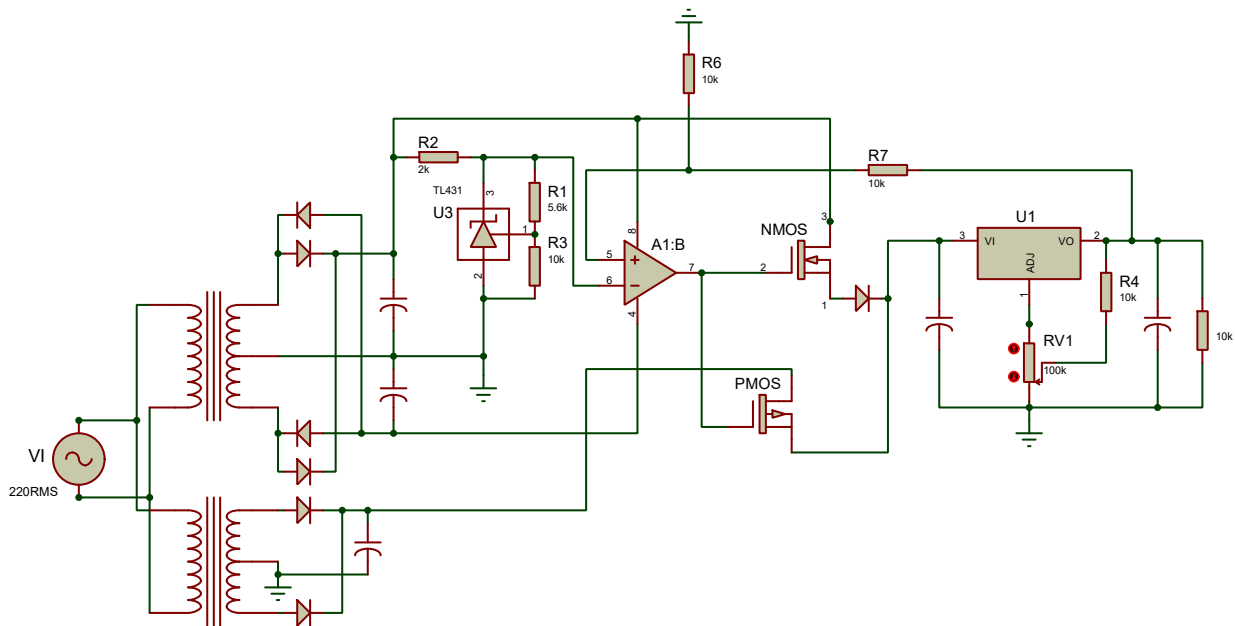


<https://es.farnell.com/on-semiconductor/lm2596dsadjg/conver-dc-dc-buck-3a-150khz-to/dp/2534162>

Ventajas Frente a Reguladores Lineales

A diferencia de los reguladores lineales, que disipan el exceso de energía en forma de calor, el LM2596 minimiza las pérdidas mediante su diseño conmutado. Esto lo convierte en una solución especialmente eficiente en aplicaciones donde existe una diferencia considerable entre los voltajes de entrada y salida.

2. Propuesta de diseño



Sección de entrada:

- **Transformador:** Reduce el nivel de tensión de la corriente alterna (AC) proveniente de la red eléctrica a un valor inferior.
- **Puente rectificador:** Convierte la señal de corriente alterna (AC) en una señal de corriente continua (DC) más estable.
- **Diodos Rectificadores:** Transforman la corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). Sin embargo, generan un mayor rizado en comparación con el puente rectificador, ya que estos diodos solo rectifican media onda de señal.
- **Condensadores:** Filtran y suavizan la señal pulsante obtenida tras la rectificación, reduciendo el rizado para lograr una corriente continua más uniforme.

Sistema de control:

- El **Regulador Shunt** suministra una tensión constante de referencia al amplificador operacional. Lo que permite controlar la polarización de los transistores MOSFET. Cuando polariza el transistor NMOS, se alimenta el Regulador Lineal con el secundario superior, mientras que cuando, polariza el transistor PMOS, se hace con la tensión del secundario inferior.
- **Amplificador Operacional:** Polariza los transistores en función de la región de trabajo donde se desee trabajar.

Transistores MOSFET:

- Se utilizan transistores **NMOS** y **PMOS** para conmutar y gestionar la alimentación del regulador lineal. Estos transistores conmutan la corriente de salida en función de la diferencia de tensión entre puerta y fuente desde el sistema de control, asegurando un suministro constante.

Regulador Lineal LM317:

- Este componente mantiene una salida de tensión estable en la carga, siempre que se respete la condición de ***Drop-Out-Voltage***, especificado en la hoja de características.
- Potenciómetro: permite ajustar la tensión en la carga, así mismo controla el sistema de control permitiendo la conmutación de los transistores.

Para mayor comprensión, el funcionamiento puede explicarse como sigue:

1. **Etapas de conversión y filtrado:**
 - La señal alterna es rectificada y filtrada para generar una señal continua inicial.
2. **Control:**
 - El sistema de amplificadores operacionales detecta diferencias entre la salida y el valor de referencia, ajustando la conmutación de los MOSFET para tener la salida deseada.
3. **Regulación:**
 - El regulador lineal asegura una tensión estable en la carga, además se le ha añadido un condensador a la entrada para aportar una mayor estabilidad y un menor rizado al sistema.

2.1 Justificación de resultados

2.1.1 Regulador Shunt TL431

Se emplea un **regulador shunt** para establecer una referencia de tensión, que posteriormente, el amplificador operacional usará para compararla con la tensión en la carga.

Esta decisión se toma debido a las siguientes razones:

- **Estabilidad del voltaje:** El regulador shunt proporciona un voltaje de referencia constante y estable, incluso en presencia de pequeñas variaciones en el voltaje de entrada o la carga.
- **Simplicidad del diseño:** El regulador shunt es una solución sencilla y eficiente para establecer una referencia de voltaje fija sin requerir componentes complejos.

Datos

$$V_{in} = 17 \text{ V}$$

$$V_{out} = 4 \text{ V}$$

$$i_{KA} = 10 \text{ mA (según datasheet)}$$

$$V_{ref} = 2.495 \text{ V (según datasheet)}$$

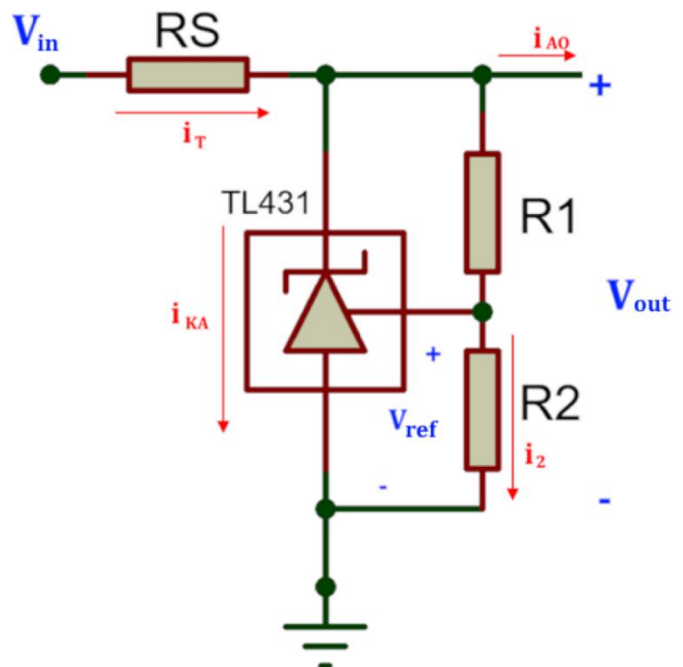
Ecuaciones

$$i_T = i_{KA} + i_2 + i_{AO} \approx i_{KA} + i_2 \text{ [A]}$$

$$V_{out} = V_{ref} + i_2 \cdot R_1 = V_{ref} + \frac{V_{ref}}{R_2} \cdot R_1 \text{ [V]}$$

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \text{ [V]}$$

$$R_s = \frac{V_{in} - V_{out}}{i_T} \text{ [\Omega]}$$



Selección de valores

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 = \frac{4 \text{ V}}{2.495 \text{ V}} - 1 \approx 0.6$$

Se seleccionan resistencias del orden de **kΩ's**, con la finalidad de reducir el consumo sin comprometer la calidad de la regulación. (Ruidos, eficiencia...)

$$R_1 = 6 \text{ k}\Omega \approx 5.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

En un **regulador shunt**, la resistencia **R_s**, se encarga de **limitar la corriente** que fluye hacia el regulador y la carga, protegiendo así al circuito de sobre corrientes.

$$R_s = 1.3 \text{ k}\Omega \approx 1 \text{ k}\Omega$$

2.1.2 Regulador lineal LM317

El **LM317** es un regulador de voltaje lineal ajustable de tres terminales, muy popular y ampliamente utilizado en aplicaciones electrónicas debido a su capacidad para proporcionar un voltaje de salida ajustable y estable, con una corriente moderada.

Es un regulador de voltaje con **tensión de salida variable**, que permite ajustarlo entre 1.25 V y 37 V, dependiendo de la configuración de los componentes externos.

Como desventaja, cabe destacar que, el LM317 no es eficiente para aplicaciones de alta corriente o con grandes diferencias entre el voltaje de entrada y el de salida debido a su naturaleza de regulador lineal, lo que puede generar calor significativo.

Datos

$i_{adj} = 50nA$ (según datasheet)

$V_{ref} = 1.25V$ (según datasheet)

Ecuaciones

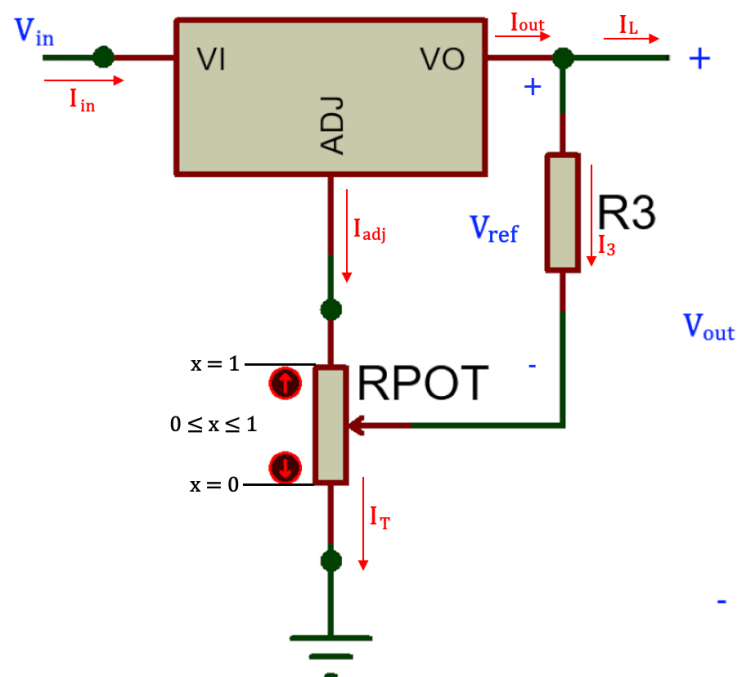
$$i_{in} = i_{out} + i_{adj} \text{ [A]}$$

$$V_{out} = V_{ref} + i_T \cdot x \cdot R_{POT} \text{ [V]}$$

$$V_{out} = V_{ref} + (i_3 + i_{adj}) \cdot x R_{POT} \text{ [V]}$$

$$V_{out} = V_{ref} + \left(\frac{V_{ref}}{R_3} + i_{adj} \right) \cdot x R_{POT} \text{ [V]}$$

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{x R_{POT}}{R_3} \right) + i_{adj} \cdot x R_{POT} \text{ [V]}$$



Realizando un poco de álgebra, se llega a que:

$$R_{POT} = \frac{V_{out} - V_{ref}}{\frac{V_{ref}}{R_3} + i_{adj}} \text{ [\Omega]}$$

$$R_3 = \frac{V_{ref}}{\frac{V_{out} - V_{ref}}{R_{pot}} - i_{adj}} \text{ [\Omega]}$$

Selección de valores

Fijando el valor del potenciómetro $R_{POT} = 100 \text{ k}\Omega$ se obtiene que $R_3 \approx 10 \text{ k}\Omega$

Los valores de las resistencias seleccionados son el resultado de la aplicación de las ecuaciones, juntamente con la experimentación mediante el software Proteus.

2.1.3 Eficiencia del LM317

· Eficiencia instantánea (η)

$$\eta \triangleq \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{V_{in} \cdot I_{in}} = \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{V_{in} \cdot (I_{out} + I_{adj})} \xrightarrow{I_{adj} \ll I_{out}} \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

donde:

P_{out} es la potencia a la salida.

P_{in} es la potencia a la entrada.

V_{out} es la tensión a la salida.

I_{out} es la corriente a la salida.

V_{in} es la tensión a la entrada.

I_{in} es la corriente a la entrada.

I_{adj} es la corriente de ajuste.

· Eficiencia promedio ($\hat{\eta}$)

$$\hat{\eta} \triangleq \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \eta_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx 60.74\%$$

donde:

N es el número de niveles del potenciómetro.

η_i es la eficiencia en la *i-ésima* medición.

El potenciómetro seleccionado tiene un total de 11 niveles de resistencia (incluyendo extremos), cada uno de ellos da como resultado un valor de la tensión de salida distinto, siempre inferior al valor de entrada.

Aplicando la expresión anterior se puede obtener una aproximación del rendimiento del regulador lineal del 60.74%, lo que significa que, el 60% de la potencia de entrada se convierte en potencia útil en la salida, mientras que el 40% restante se pierde principalmente en forma de calor (debido a los componentes resistivos que lo forman).

Los reguladores lineales, como el LM317, son conocidos por su baja eficiencia en comparación con los reguladores conmutados.

En apartados anteriores se propuso una solución más eficiente utilizando reguladores conmutados.

2.1.4 Transformadores

Para esta solución, se emplean 2 transformadores.

El transformador 1 es un transformador de doble polaridad que se encarga de alimentar:

- La entrada del regulador lineal con una tensión superior.
- La alimentación positiva y negativa del AO.
- El regulador shunt que genera la referencia de tensión para el AO.

Mientras tanto, el transformador 2 se encarga únicamente de alimentar el regulador lineal con una tensión inferior de la que lo hace el transformador 1.

Estos dos transformadores trabajan al unísono con la finalidad de simular un transformador con dos niveles de tensión, para alimentar el regulador LM317 en función del voltaje deseado en la carga y minimizar así las pérdidas.

La inductancia de un devanado está directamente relacionada con el cuadrado del número de espiras, según la fórmula general de la inductancia:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} [H]$$

Donde:

μ es la permeabilidad del material del núcleo.

N es el número de espiras.

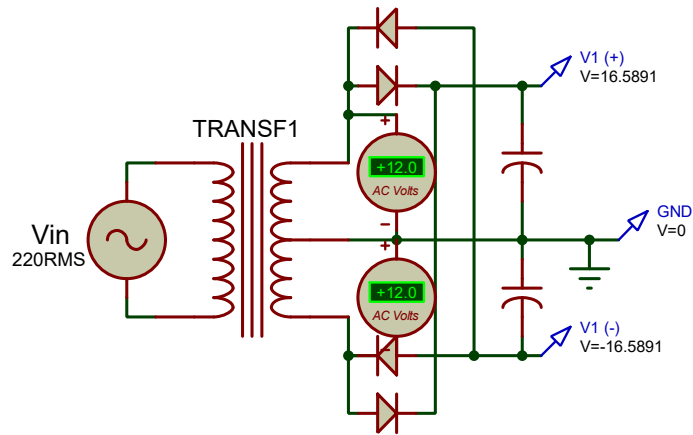
A es el área de la sección transversal del núcleo.

l es la longitud del camino magnético.

Si consideramos un **transformador ideal**, y μ, A, l , constantes en ambos devanados, se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s}$$
$$\frac{L_p}{L_s} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 = \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2$$

Selección de valores transformador 1

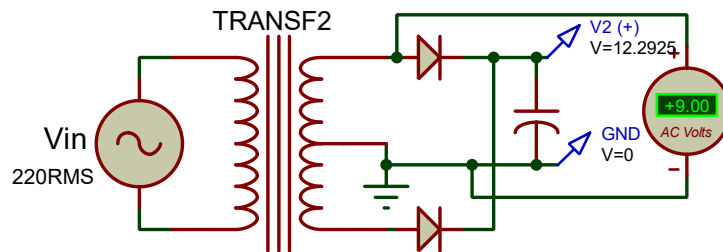


Asumimos una inductancia del devanado primario $L_p = 1H$, por lo que:

$$L_s = L_p \cdot \left(\frac{N_s}{N_p} \right)^2 = L_p \cdot \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 = L_p \cdot \left(\frac{V_1 + V_r}{V_p} \right)^2 = 1H \cdot \left(\frac{16.5891 + 0.7}{220} \right)^2$$

$$L_s \approx 6.17mH$$

Selección de valores transformador 2



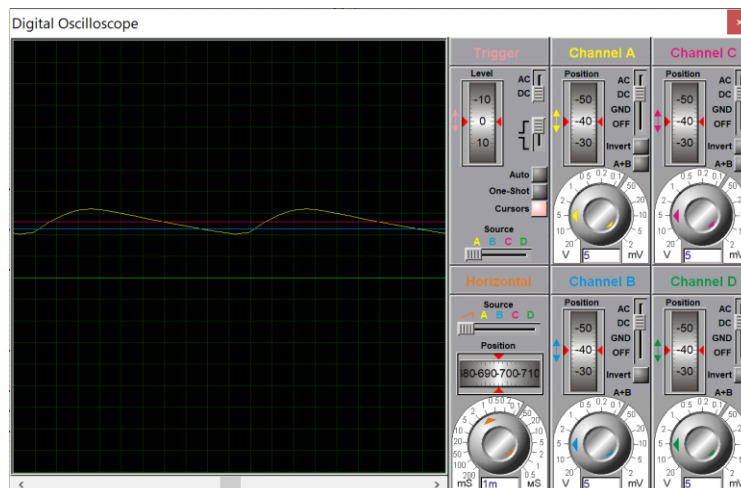
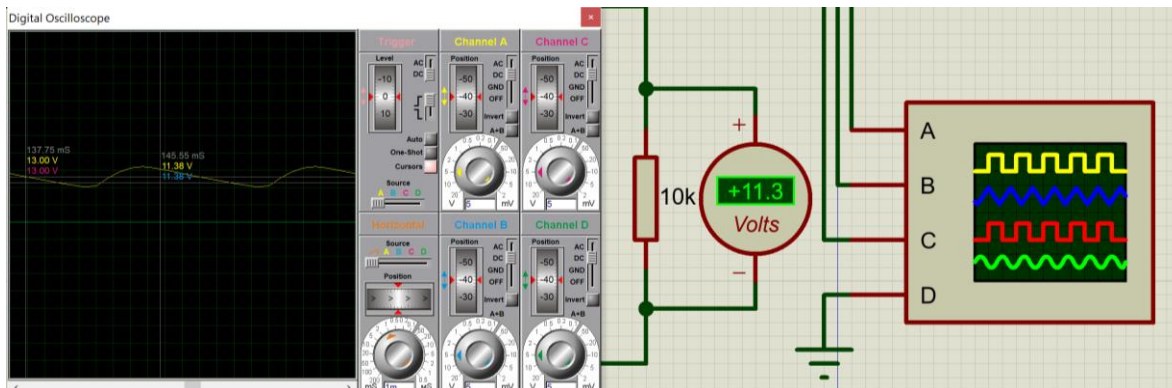
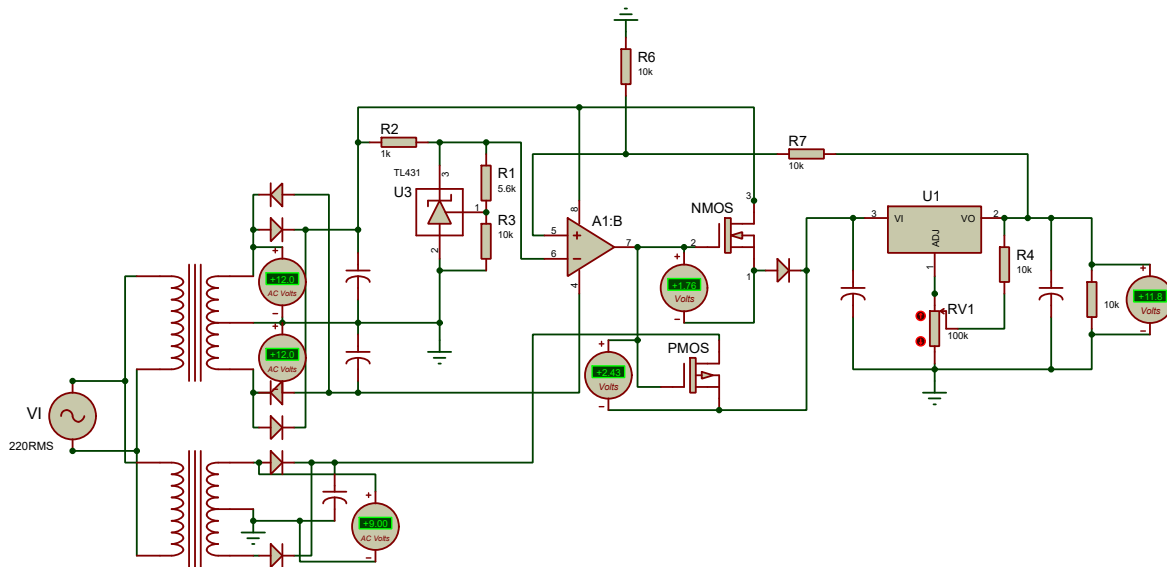
Asumimos una inductancia del devanado primario $L_p = 1H$, por lo que:

$$L_s = L_p \cdot \left(\frac{N_s}{N_p} \right)^2 = L_p \cdot \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 = L_p \cdot \left(\frac{V_2 + V_r}{V_p} \right)^2 = 1H \cdot \left(\frac{12.2925 + 0.7}{220} \right)^2$$

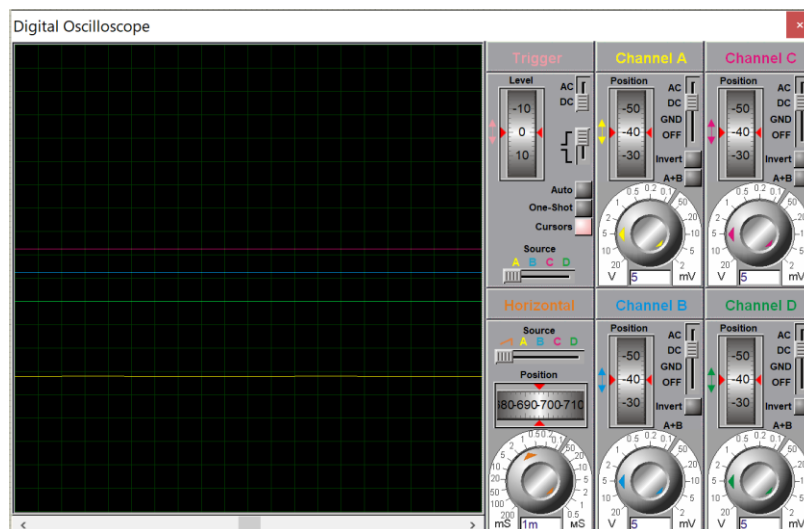
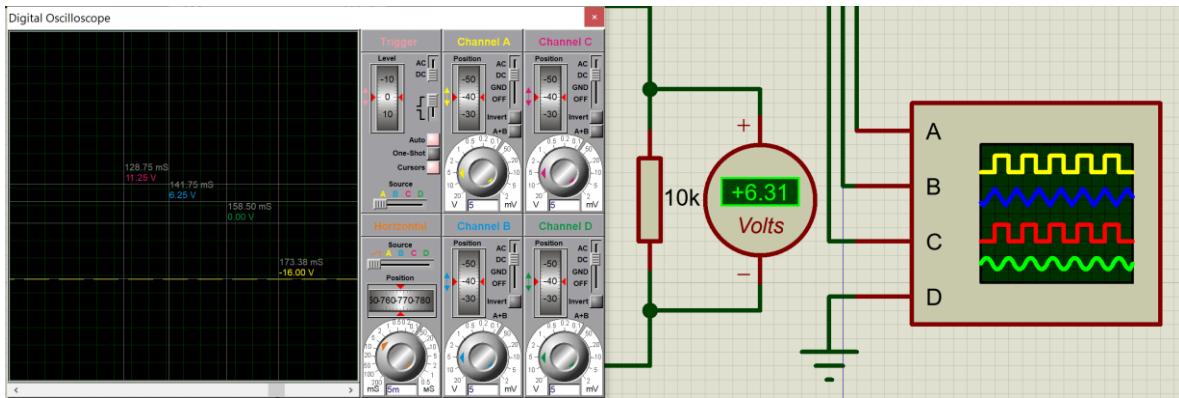
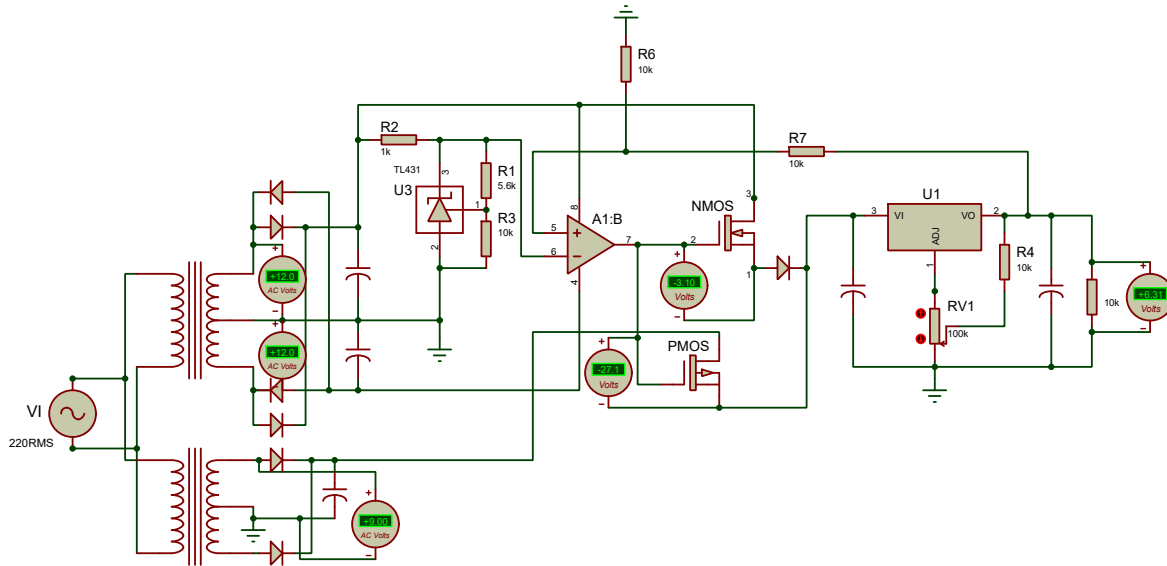
$$L_s \approx 3.487mH$$

3. Pruebas simuladas

Las medidas que se han hecho para comprobar el funcionamiento del circuito han sido mediante elementos de medición simulados del proteus, así como, sondas de tensión, sondas de corriente, voltímetros para medir las caídas de tensión en los MOSFET y en la carga, y el osciloscopio, lo que nos ha permitido verificar el buen funcionamiento del sistema.



El canal A (señal amarilla) está conectado a la salida del operacional A1:B, donde se puede apreciar que la señal tiene un rizado y además de tensión positiva, el canal C (señal rosa) está conectado a la entrada del regulador y una tensión mayor que la tensión de salida, y el canal B (señal azul) está conectado a la carga.

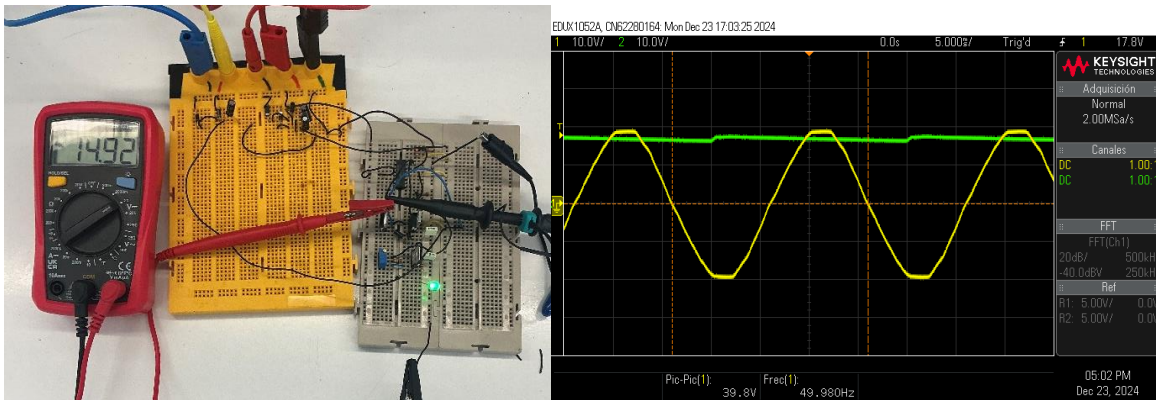


El canal A (señal amarilla) está conectado a la salida del operacional A1:B, donde se puede apreciar que la señal tiene un ligero rizado y además es una tensión negativa y el canal B (señal azul) está conectado a la carga, el canal C (señal rosa) está conectado a la entrada del regulador y tiene una tensión mayor que la tensión de salida.

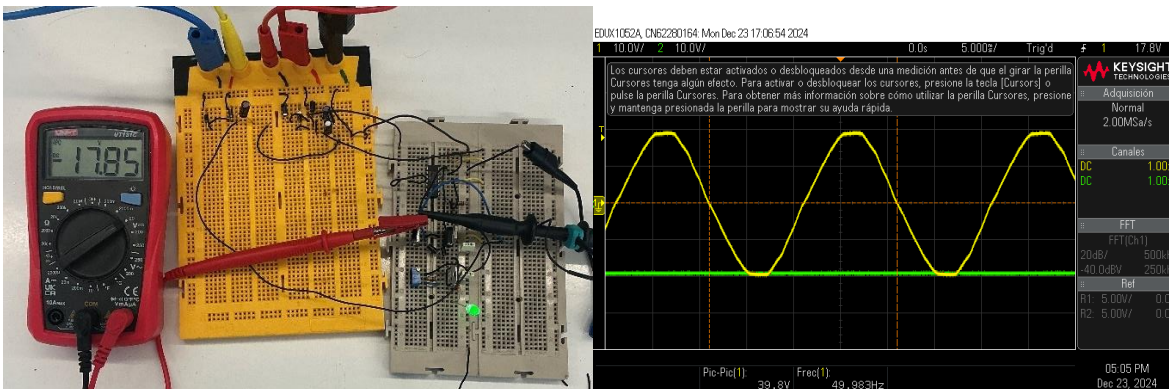
De las pruebas simuladas, se observa que, a la salida de los rectificadores, la señal presenta un rizado. Además, la señal de entrada al regulador lineal es superior a la de salida, cumpliendo con la condición del dropout voltage. Los valores finales de tensión en la carga coinciden con los esperados, logrando así el objetivo planteado en el reto.

4. Pruebas Experimentales

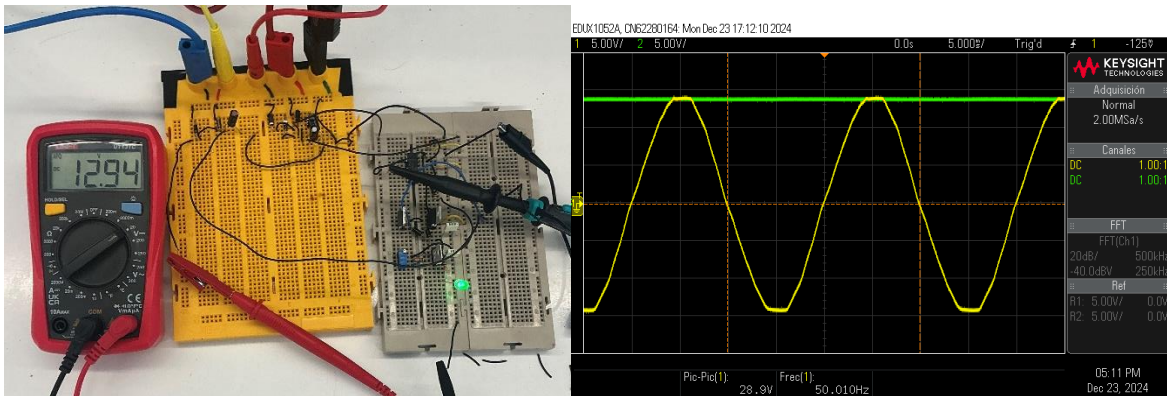
Para garantizar el correcto funcionamiento del circuito, se realizó un ajuste en el diseño. El regulador shunt no operaba adecuadamente, proporcionando una tensión de salida de solo 0.4 V, en lugar de los 4 V esperados. Por este motivo, durante las pruebas experimentales se decidió sustituirlo por un divisor de tensión, además se añadió un LED en serie con la carga, para intentar ver cambios de luminosidad en función de las tensiones de salida del regulador.



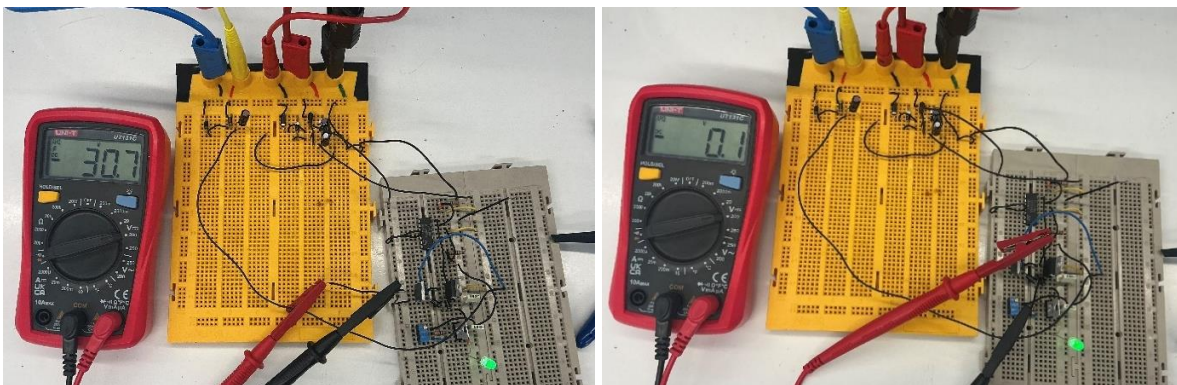
En estas primeras imágenes se observa la señal generada por el transformador 1 (representada en amarillo), con un valor eficaz de 12 V. Asimismo, se identifica la señal rectificada (en verde), que será utilizada como la tensión de saturación positiva del amplificador operacional, 14.92 V.



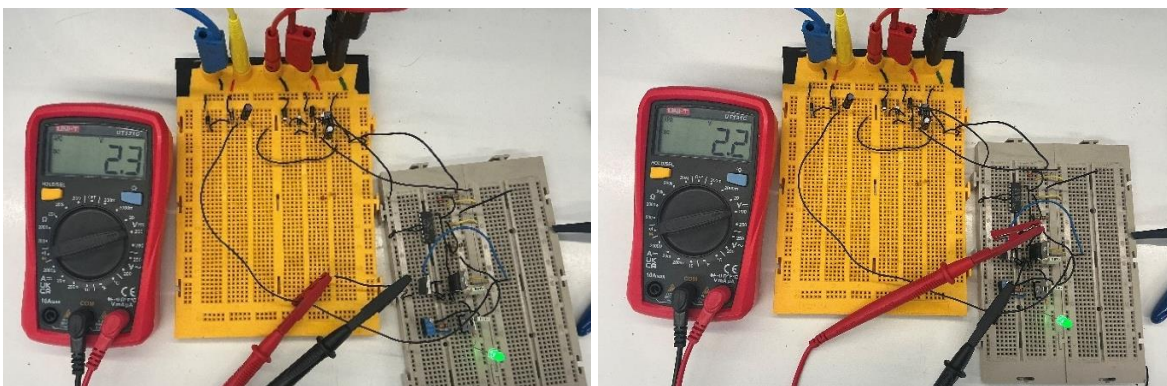
Por otro lado, en este caso se visualiza nuevamente la señal de entrada del transformador 1 (en amarillo) junto a la señal rectificada (en verde). Esta última se empleará como tensión de saturación negativa del amplificador operacional, -17.85 V.



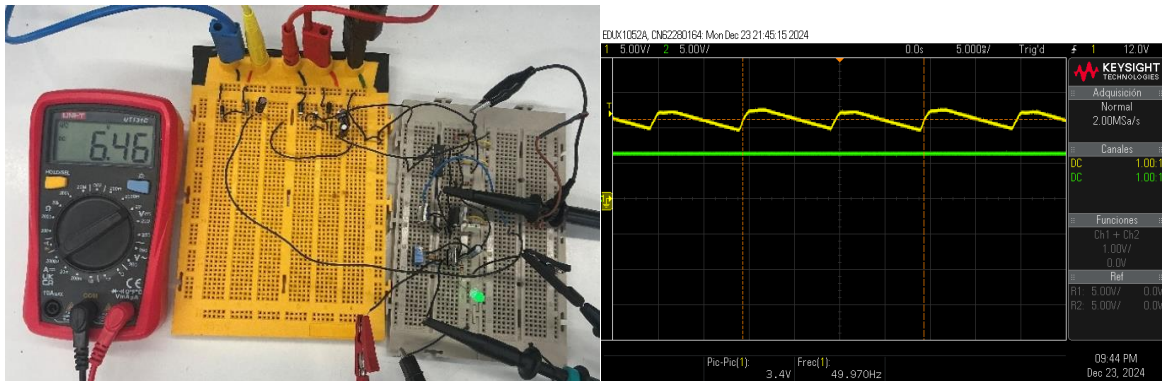
Para concluir la etapa de rectificación, se presenta la señal rectificada generada por el transformador 2 (representada en verde), que será utilizada como la tensión de alimentación al regulador lineal inferior, 12.94 V.



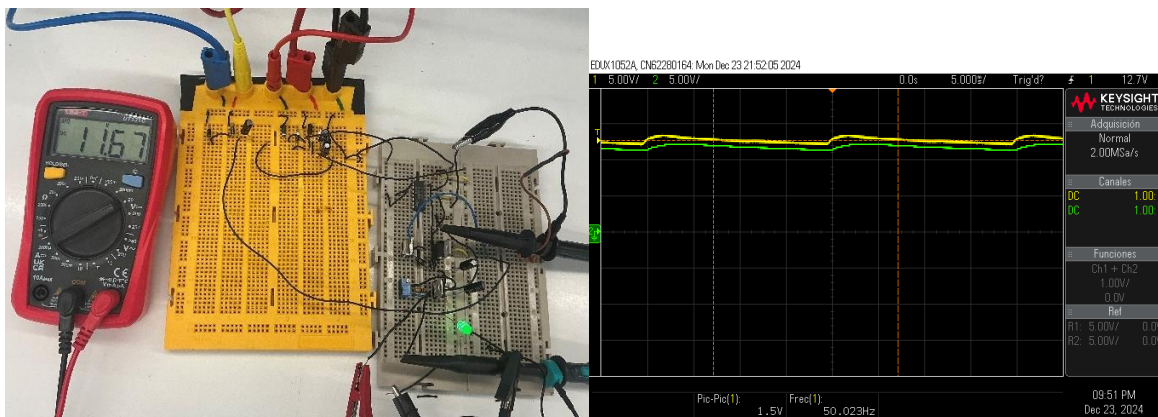
En las imágenes siguientes se analiza la tensión entre puerta y fuente del PMOS y NMOS, respectivamente, cuando el amplificador operacional alcanza la saturación negativa. Bajo estas condiciones, el PMOS opera en la región óhmica, mientras que el NMOS permanece en corte.



En contraste, aquí se mide la misma tensión entre puerta y fuente del PMOS y NMOS respectivamente, pero cuando el amplificador operacional está en saturación positiva. En este escenario, el PMOS se encuentra en corte, y el NMOS opera dentro de la región óhmica.



En esta medición se registra la tensión en la carga durante la saturación negativa del amplificador operacional. En esta condición, el PMOS funciona en la región óhmica, con una tensión de entrada al regulador lineal cercana a 11.5 V (señal amarilla) y una tensión de salida de 6.46 V (señal verde).



Finalmente, en esta última medición se observa la tensión en la carga bajo saturación negativa del amplificador operacional. Aquí, el PMOS opera en la región óhmica, presentando una tensión de entrada al regulador lineal de aproximadamente 13.5 V (señal amarilla) y una salida de 11.67 V (señal verde). En este caso, se aprecia un leve rizado en la tensión de salida debido al incumplimiento del drop-out voltage.

	Experimental	Teorica
Tensión rectificada 1 (VSAT +)	+14.92 V	+16.20 V
Tensión rectificada 1 (VSAT -)	-17.85 V	-16.11 V
Tensión rectificada 2	+ 12.94 V	+ 11.32 V
V _{gs} PMOS (SAT -)	-30.7 V	-27.1 V
V _{gs} NMOS (SAT -)	-0.1 V	-3.10 V
V _{gs} PMOS (SAT +)	+2.3 V	+2.43 V

V _{gs} NMOS (SAT +)	+2.2 V	+1.76 V
V _{in} LM317 (SAT -)	+11.5 V	+ 11.3 V
V _{out} LM317 (SAT -)	+6.46 V	+ 6.31 V
V _{in} LM317 (SAT +)	+13.3 V	+13.5 V
V _{out} LM317 (SAT +)	+11.67 V	+ 11.8 V
V ₋ (Tensión de referencia)	+ 5.26 V	+5.08 V

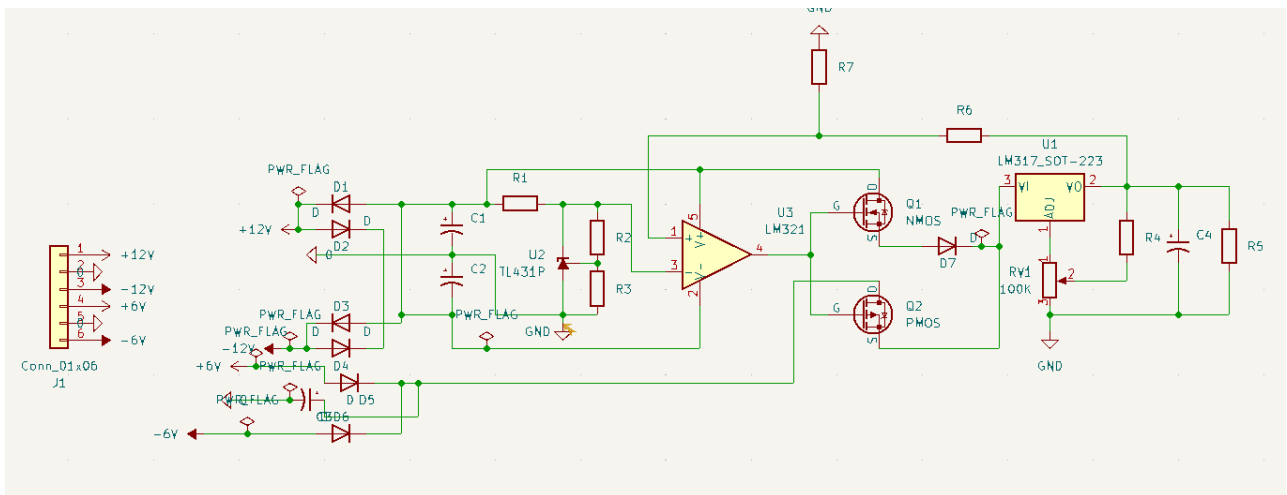
Durante el día de la experimentación, el circuito se probó de la siguiente manera: en primer lugar, se realizó la prueba de la etapa de rectificación utilizando los transformadores disponibles en la escuela. Posteriormente, se verificó la parte de control y acondicionamiento de la señal, y finalmente, se procedió a la integración de ambas etapas. Esta metodología se adoptó para registrar el funcionamiento independiente de cada parte, en caso de que no funcionaran correctamente al combinarse. Como resultado, se generaron dos videos: uno que muestra el funcionamiento de las diferentes partes por separado y otro que muestra el funcionamiento combinado de las etapas. Si se desea observar el funcionamiento de ambas etapas juntas, se debe ver el video 2.

Video 1: <https://youtu.be/RebInM5edG8>

Video 2: <https://youtu.be/Ml6JChBRwXs>

5. Diseño PCB en KiCad

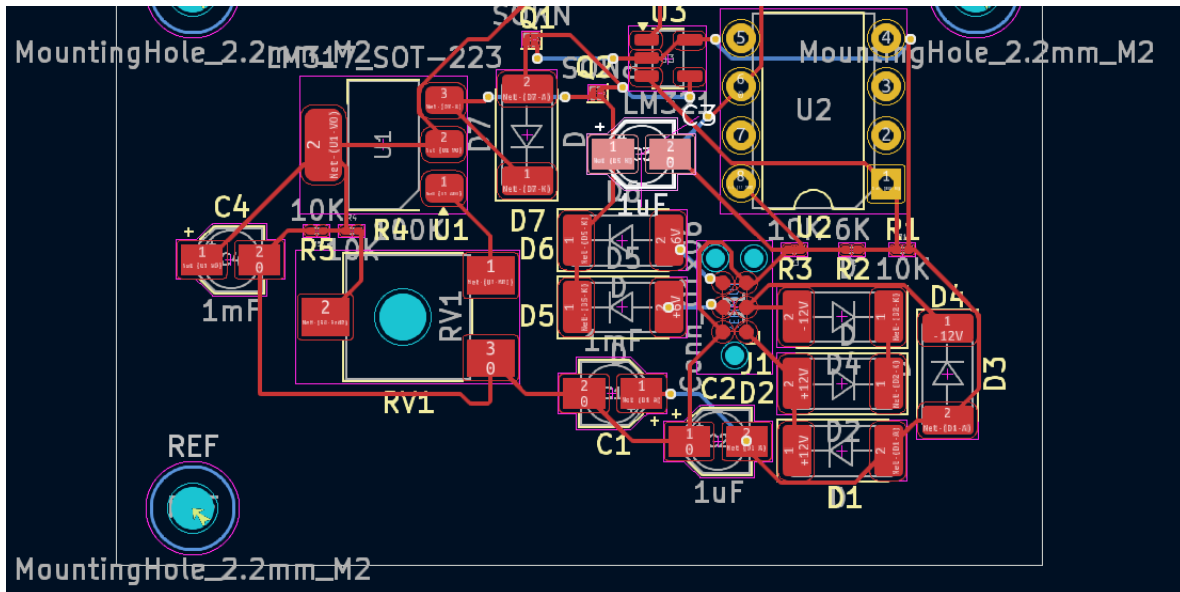
En primer lugar, transferimos el circuito diseñado en Proteus al software KiCad.



Dado que no necesitamos un transformador, ya que es un elemento externo al circuito, lo reemplazamos por las entradas con los valores aproximados esperados de tensión.

Una vez transferido el circuito, verificamos que todos los componentes tengan asignada una huella, y aquellos que no la tengan, se le asigna una.

1	C1 -	1mF :	Capacitor_SMD:CP_Elec_3x5.3
2	C2 -	1uF :	Capacitor_SMD:CP_Elec_3x5.3
3	C3 -	1uF :	Capacitor_SMD:CP_Elec_3x5.3
4	C4 -	1mF :	Capacitor_SMD:CP_Elec_3x5.3
5	D1 -	D :	Diode_SMD:D_MELF
6	D2 -	D :	Diode_SMD:D_MELF
7	D3 -	D :	Diode_SMD:D_MELF
8	D4 -	D :	Diode_SMD:D_MELF
9	D5 -	D :	Diode_SMD:D_MELF
10	D6 -	D :	Diode_SMD:D_MELF
11	D7 -	D :	Diode_SMD:D_MELF
12	J1 -	Conn_01x06 :	Connector:Tag-Connect_TC2030-IDC-NL_2x03_P1.27mm_Ve
13	Q1 -	NMOS :	Package_DFN_QFN:Texas_PicoStar_DFN-3_0.69x0.60mm
14	Q2 -	PMOS :	Package_DFN_QFN:Texas_PicoStar_DFN-3_0.69x0.60mm
15	R1 -	10K :	Resistor_SMD:R_0201_0603Metric
16	R2 -	6K :	Resistor_SMD:R_0201_0603Metric
17	R3 -	10K :	Resistor_SMD:R_0201_0603Metric
18	R4 -	10K :	Resistor_SMD:R_0201_0603Metric
19	R5 -	10K :	Resistor_SMD:R_0201_0603Metric
20	R6 -	10K :	Resistor_SMD:R_0201_0603Metric
21	R7 -	10K :	Resistor_SMD:R_0201_0603Metric
22	RV1 -	100K :	Potentiometer_SMD:Potentiometer_ACP_CA6-VSMD_Vertic
23	U1 -	LM317_SOT-223 :	Package_TO_SOT_SMD:SOT-223-3_TabPin2
24	U2 -	TL431P :	Package_DIP:DIP-8_W7.62mm
25	U3 -	LM321 :	Package_TO_SOT_SMD:SOT-23-5



Una vez montada y cableada la PCB verificamos nuevamente en busca de errores y confirmamos que no hay ninguno.

Mostrar: ☐ Todo ☒ Errores **0** ☒ Avisos **3** ☐ Exclusiones

6. Conclusiones

Para concluir: el diseño de fuentes de alimentación eficientes es esencial para satisfacer las demandas de la electrónica moderna. Aunque los reguladores lineales ofrecen ventajas como simplicidad y estabilidad, sus bajas eficiencias en ciertas condiciones plantean desafíos importantes.

Sin embargo, estrategias como la incorporación de múltiples niveles de tensión de entrada y la conmutación de estos demuestran ser soluciones efectivas para superar estas limitaciones. Al combinar estas técnicas con los beneficios de los reguladores lineales, se pueden lograr sistemas prácticos que optimicen la eficiencia energética sin comprometer la simplicidad ni la calidad de la regulación. Esto puede hacer abrir nuevas posibilidades para el desarrollo de dispositivos de alto rendimiento.