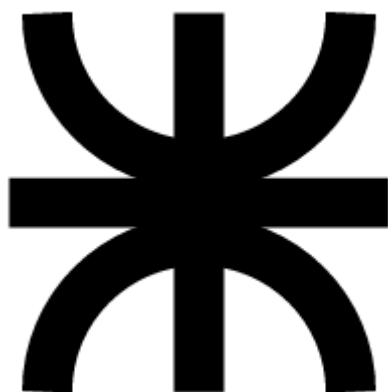


U.T.N. Facultad Regional Paraná

Ingeniería Electrónica



Electrónica de Potencia

2026

Trabajo práctico N°2

Alumnos: Cafaro Alejandro, Guiglioni Lautaro, Penon Marcos

Mails: Alejandrocafarro@alu.frp.utn.edu.ar , LautaroGuiglioni@alu.frp.utn.edu.ar ,
Marcospenon@alu.frp.utn.edu.ar

Docentes: Ing. Frund Jose, Ing. Chort Agustin

Fecha de Presentación: 22 de junio de 2026.

Paraná, Entre Ríos.

Índice

Introducción	3
Control por ángulo de fase	4
Investigación sobre la carga y su comportamiento	5
Análisis de topologías posibles y elección	6
Desarrollo del circuito	7
Diseño de circuito de control	7
Etapa de Disparo y Potencia	8
Etapas anexas	9
Implementación del circuito	10
Pruebas e implementación	11
Presupuesto	13

Introducción

El presente trabajo práctico tiene como objetivo el diseño e implementación de un controlador de voltaje de corriente alterna para regular la luminosidad de una lámpara incandescente de al menos 42 W conectada a la red de 220 Vac. El control se realiza mediante una señal analógica de referencia de 0 a 1 Vdc, donde 0 V corresponde a la lámpara completamente apagada y 1 V a la plena potencia.

A lo largo del informe se desarrollan las distintas etapas del proyecto: la descripción del principio de control por ángulo de fase, el análisis del comportamiento de la carga, la selección de la topología del circuito, el diseño de las etapas de control y potencia con aislación óptica, la implementación experimental y en PCB, y finalmente las conclusiones obtenidas.

Control por ángulo de fase

El control por ángulo de fase es una técnica de conversión de energía utilizada para regular la potencia eficaz entregada a una carga alimentada con corriente alterna. Su principio de funcionamiento consiste en retrasar el instante de conducción del semiconductor de potencia en cada semiciclo de la señal de red. De esta manera, la carga no recibe la onda senoidal completa, sino únicamente una fracción de ella.

Dado que la red eléctrica en Argentina opera a una frecuencia de 50 Hz, el período total de la señal T es de 20 ms, lo que significa que cada semiciclo dura exactamente 10 ms. El circuito de control debe variar de forma simétrica el ángulo de disparo α entre dos extremos teóricos dentro de esos 10 ms.

- $\alpha = 0$ (0 ms de retardo): Conducción total de la onda. La carga recibe los 220 V_{RMS} de la red, lo que equivale al brillo máximo de la lámpara.
- $\alpha = 180$ (10 ms de retardo): Conducción nula. El semiconductor permanece bloqueado durante todo el semiciclo y la lámpara se apaga por completo.

En un dimmer para lámpara incandescente, este método permite variar el valor eficaz de la tensión de manera continua. El dispositivo de conmutación que será un TRIAC permanece bloqueado actuando como un interruptor abierto hasta que recibe un pulso de corriente en gate. A partir de ese instante de disparo, el dispositivo conmuta al estado de conducción y permanece "clavado" en ese estado hasta que la corriente del semiciclo cae naturalmente por debajo de la corriente de mantenimiento I_H , lo cual ocurre exactamente en cada cruce por cero de la señal.

La ventaja principal de esta técnica radica en su alta eficiencia energética y en su simplicidad circuital. Además, al emplear un optotriac de fase aleatoria para comandar la compuerta del TRIAC principal, se logra un aislamiento total entre la etapa de control de baja tensión y la etapa de potencia de 220 Vac.

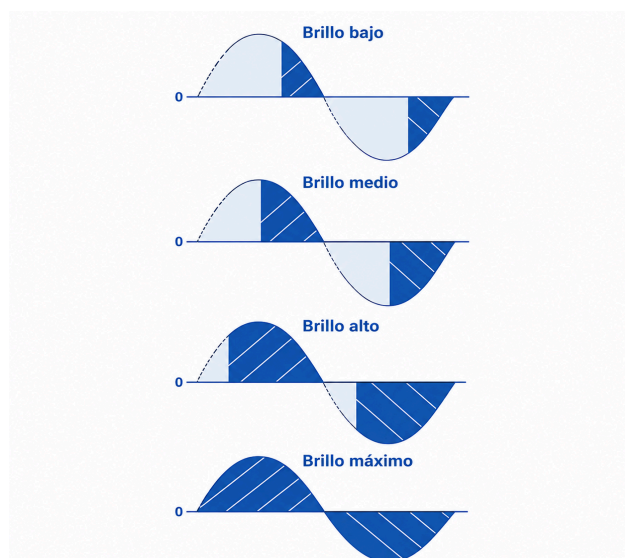


Fig. 1. Control por ángulo de fase en lámpara.

Investigación sobre la carga y su comportamiento

Principio de funcionamiento

La lámpara incandescente es una carga de naturaleza resistiva que convierte energía eléctrica en luz y calor mediante el efecto Joule. Su elemento activo es un filamento de tungsteno que, al ser recorrido por corriente eléctrica, se calienta hasta temperaturas del orden de 2500–3000 °C, emitiendo radiación visible.

Comportamiento de la resistencia con la temperatura

El tungsteno tiene un coeficiente de temperatura positivo (PTC): su resistencia aumenta con la temperatura. Esto tiene una implicancia importante para el diseño: la resistencia del filamento en frío es significativamente menor que en funcionamiento normal. Para una lámpara de 42 W a 220 V, la resistencia nominal en caliente es:

$$R = V^2 / P = 220^2 / 42 \approx \mathbf{1152 \, \Omega}$$

En frío, esa resistencia puede ser entre 5 y 10 veces menor (del orden de 100–200 Ω), lo que genera una corriente de arranque elevada en el primer instante de encendido. Este fenómeno es transitorio y no representa un problema para el TRIAC dimensionado, pero es importante tenerlo en cuenta.

Comportamiento frente al control por ángulo de fase

Al tratarse de una carga puramente resistiva, la corriente está en fase con la tensión. Esto simplifica enormemente el control, porque el TRIAC se apaga naturalmente en cada cruce por cero de la corriente, coincidente con el cruce por cero de la tensión. No hay energía reactiva almacenada que pueda mantener la conducción más allá del cruce por cero, como ocurriría con cargas inductivas.

La potencia entregada a la lámpara en función del ángulo de disparo α se expresa como:

$$P(\alpha) = (V_p^2 / 2R) \cdot [1 - \alpha/\pi + \sin(2\alpha)/2\pi]$$

Donde $V_p = 311 \text{ V}$ es el valor pico de la red. Esto confirma que la relación entre α y la potencia es no lineal, y que el microcontrolador deberá compensar esta curva en el mapeo entre la señal de 0–1 V y el retardo de disparo si se desea una respuesta perceptualmente lineal al ojo humano.

Respuesta perceptual

La percepción humana de la luminosidad no es lineal sino aproximadamente logarítmica. Esto significa que la lámpara parece pasar de "apagada" a "media luz" en los primeros tramos del control, y que los últimos tramos de potencia generan poco cambio perceptual. Para el informe, la cátedra solicita específicamente la gráfica de tensión sobre la lámpara con la señal de control a **0,75 Vdc**, condición que corresponde a un ángulo de disparo de aproximadamente 45° y una potencia entregada de alrededor del 82%.

Análisis de topologías posibles y elección

Topologías posibles para control de CA por ángulo de fase

Existen tres topologías principales para controlar una carga de CA mediante ángulo de fase:

Topología 1 : Par de SCRs en antiparalelo

Consiste en dos tiristores SCR conectados en sentido opuesto, uno conduce el semiciclo positivo y el otro el negativo. Permite control independiente de cada semiciclo, lo que da mayor flexibilidad, pero requiere dos circuitos de disparo separados, duplicando la complejidad del gate y el optoacoplador. Es la topología usada en el TP1 con rectificador, pero aplicada directamente sobre CA resulta más compleja de implementar.

Topología 2 : TRIAC con disparo por microcontrolador

Un único componente bidireccional que conduce en ambos semiciclos con un solo gate. Requiere un único circuito de disparo y un único optoacoplador de salida. El microcontrolador calcula el ángulo de disparo a partir de la señal analógica de 0–1 V y genera el pulso en el momento exacto.

Topología 3 : TRIAC con DIAC (control analógico puro)

Variante de la anterior donde el disparo se genera mediante una red RC que carga un capacitor hasta la tensión de ruptura del DIAC, que entonces dispara el gate del TRIAC. No requiere microcontrolador ni detección de cruce por cero. Sin embargo, la relación entre la señal de control y el ángulo de disparo es no lineal y difícil de calibrar, y la topología no acepta directamente una señal analógica de 0–1 V como entrada sin etapas adicionales de acondicionamiento.

Topología elegida: TRIAC con disparo por microcontrolador

Se adopta la topología de TRIAC único con disparo controlado por microcontrolador externo al PCB, por las siguientes razones:

La carga es monofásica de CA y puramente resistiva, condición ideal para el TRIAC ya que el apagado se produce naturalmente en cada cruce por cero sin necesidad de circuitos de conmutación forzada.

El microcontrolador lee la señal analógica de 0–1 V mediante su ADC, detecta el cruce por cero de la red a través de un optoacoplador aislado, y calcula el retardo de disparo correspondiente con precisión de microsegundos mediante un timer interno. Esto garantiza linealidad y repetibilidad que una red RC analógica no puede ofrecer.

El disparo del gate del TRIAC se realiza a través de un segundo optoacoplador (MOC3021), cumpliendo el requisito de aislación galvánica entre la etapa de control y los 220 Vac de potencia.

Esta arquitectura es prácticamente idéntica a la validada en el TP1, donde el mismo esquema de detección de cruce por cero y disparo opto-aislado fue implementado

exitosamente sobre un SCR para control de motor DC. La diferencia es que ahora se trabaja directamente sobre CA sin rectificar, usando un TRIAC BT136-600 en lugar del SCR, lo que simplifica aún más el circuito de potencia al eliminar el puente de diodos.

Debido a la posibilidad de transitorios de red y a los requerimientos de inmunidad del TRIAC frente a elevadas pendientes dV/dt , se evaluará en la etapa de diseño la incorporación de una red snubber RC en paralelo con el dispositivo de potencia.

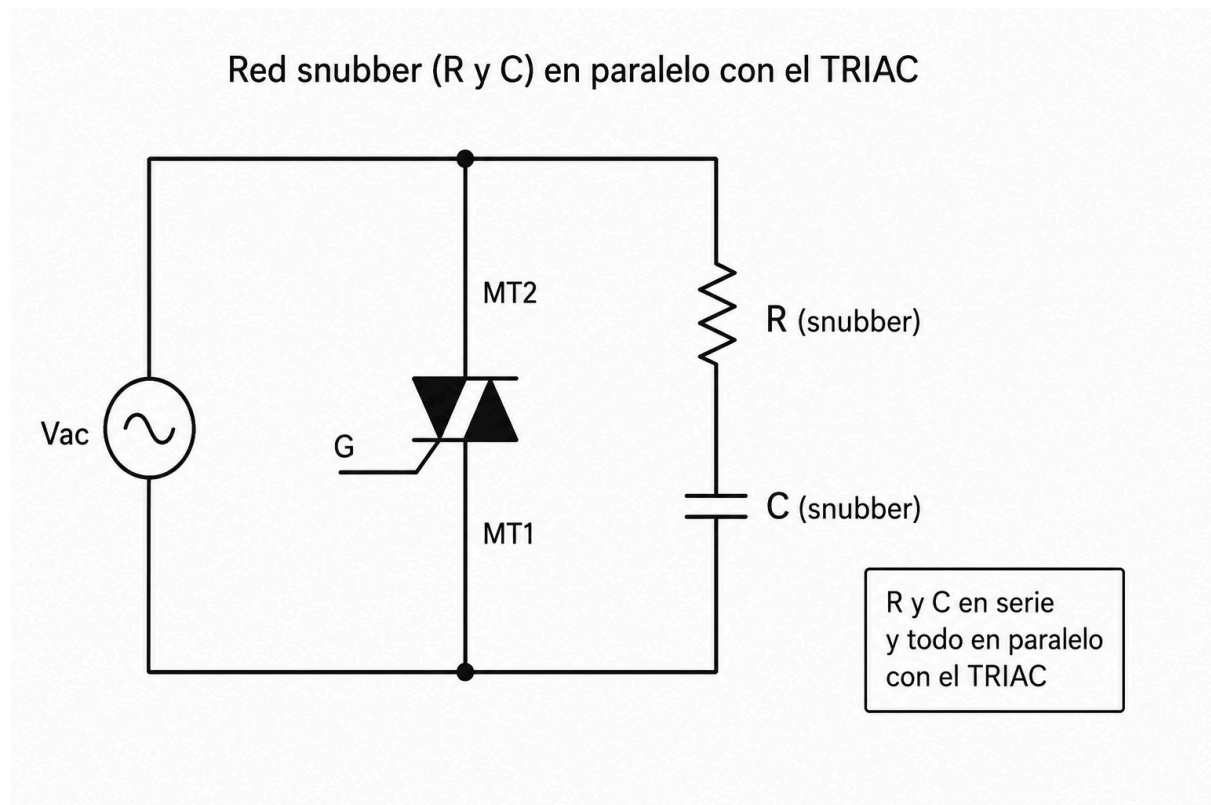


Fig. 2. Red Snubber

Desarrollo del circuito

Diseño de circuito de control

La detección de cruce por cero se implementa mediante un puente rectificador, una red resistiva de limitación y un optoacoplador 4N25. La tensión de red se reduce y se aísla ópticamente, obteniendo en la salida una señal compatible con la electrónica de control. Esta señal permite identificar los instantes en que la tensión de CA atraviesa cero, lo cual resulta fundamental para sincronizar el disparo del TRIAC en cada semiciclo.

BR1: rectifica la señal de CA para que el LED del optoacoplador conduzca en ambos semiciclos.

R1, R7, R3, R8: limitan la corriente que circula por el LED interno del 4N25.

4N25: proporciona aislamiento galvánico entre la red y la electrónica de control.

R2: actúa como pull-up en la salida del transistor del optoacoplador.

J3: entrega la señal digital al Arduino o microcontrolador.

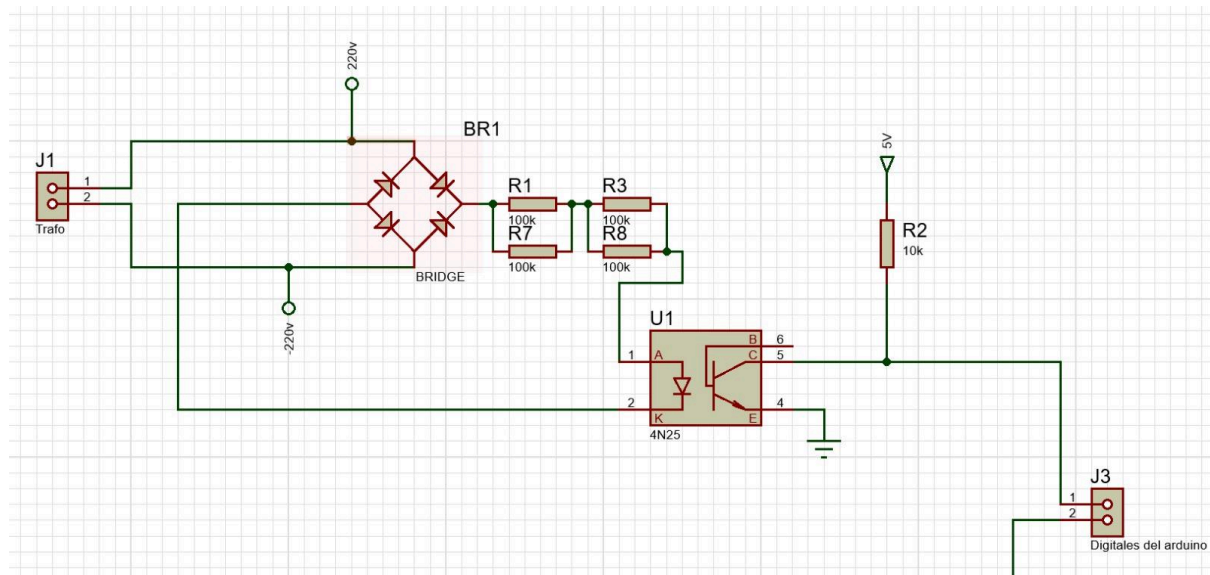


Fig 3. Circuito de control

Etapa de Disparo y Potencia

La etapa de potencia garantiza la aislación galvánica del circuito de control lógico mediante el uso del optotriac MOC3021 (U2). Una vez calculado y transcurrido el tiempo de retardo correspondiente, el microcontrolador envía una señal digital por el conector J3. Esta señal, limitada por la resistencia R5 de 150 Ω , enciende el emisor infrarrojo del optoacoplador y hace conducir a su fototriac interno. Dicho fototriac inyecta la corriente de disparo necesaria hacia la compuerta del TRIAC principal (U3) a través de la resistencia limitadora R4 de 330 Ω . Al recibir este pulso en su gate, el TRIAC entra en estado de conducción y cierra el lazo de 220 Vac, permitiendo el flujo de corriente hacia la lámpara conectada en la bornera J5 durante la fracción restante del semiciclo.

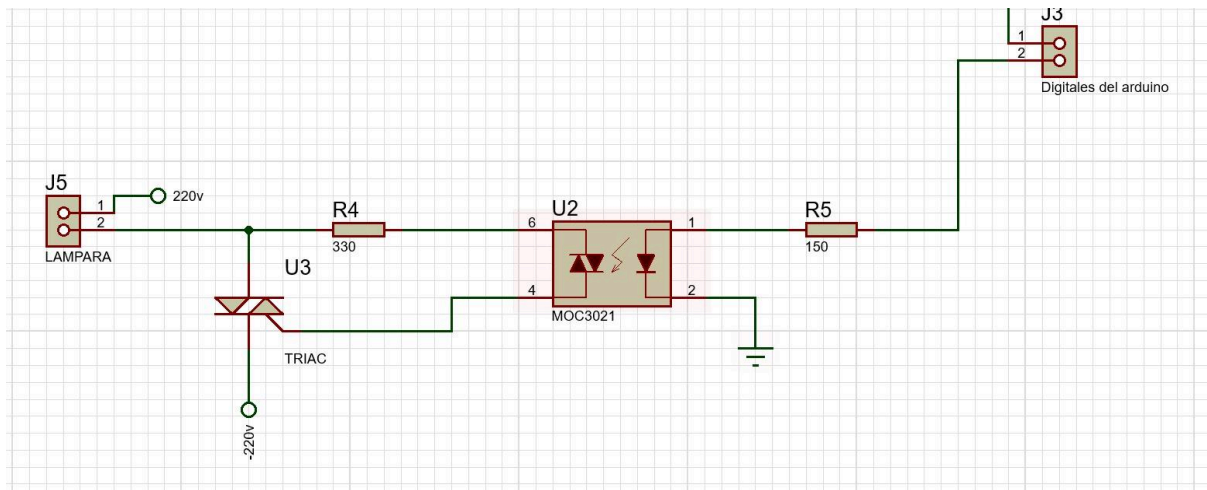


Fig 4. Circuito de potencia

Etapas anexas

En estas siguientes figuras observamos las borneras de las cuales se alimentó el arduino y el potenciómetro para regulación.

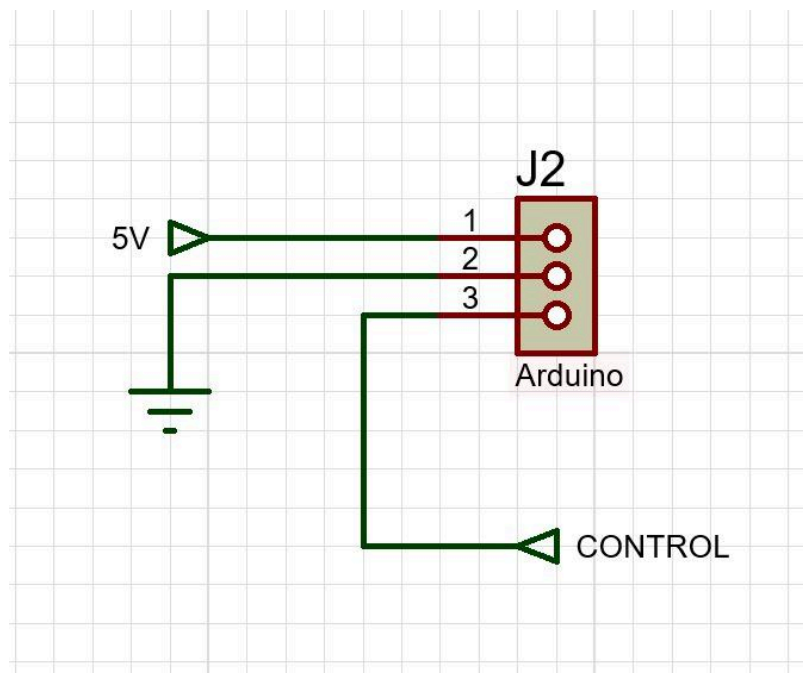


Fig 5. Alimentación de control

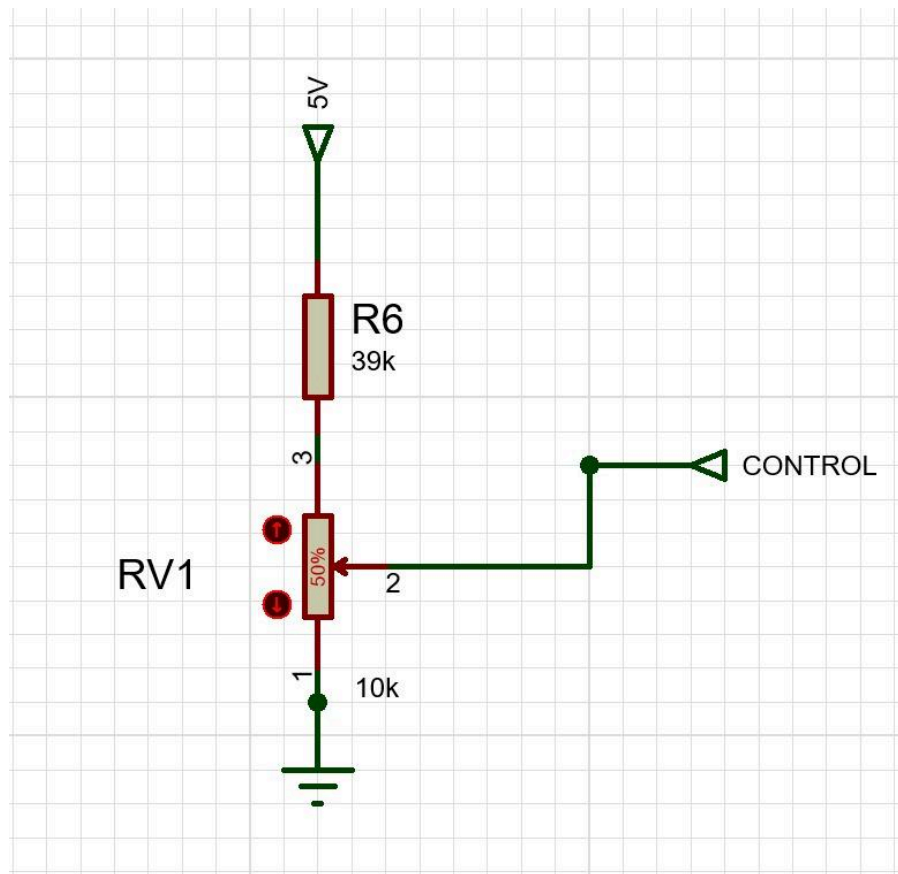


Fig 6. Regulación luminosidad lámpara

Implementación del circuito

Se realizó el siguiente diseño de PCB para implementar el circuito mencionado:

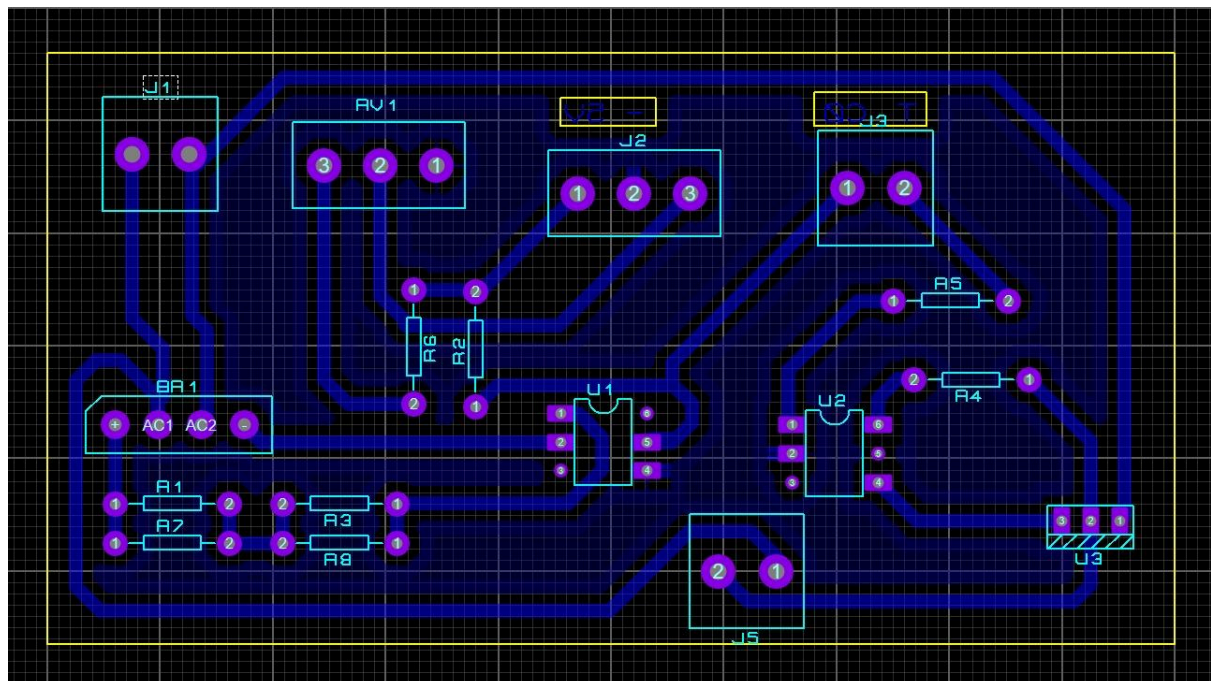


Fig 7. Diseño placa PCB

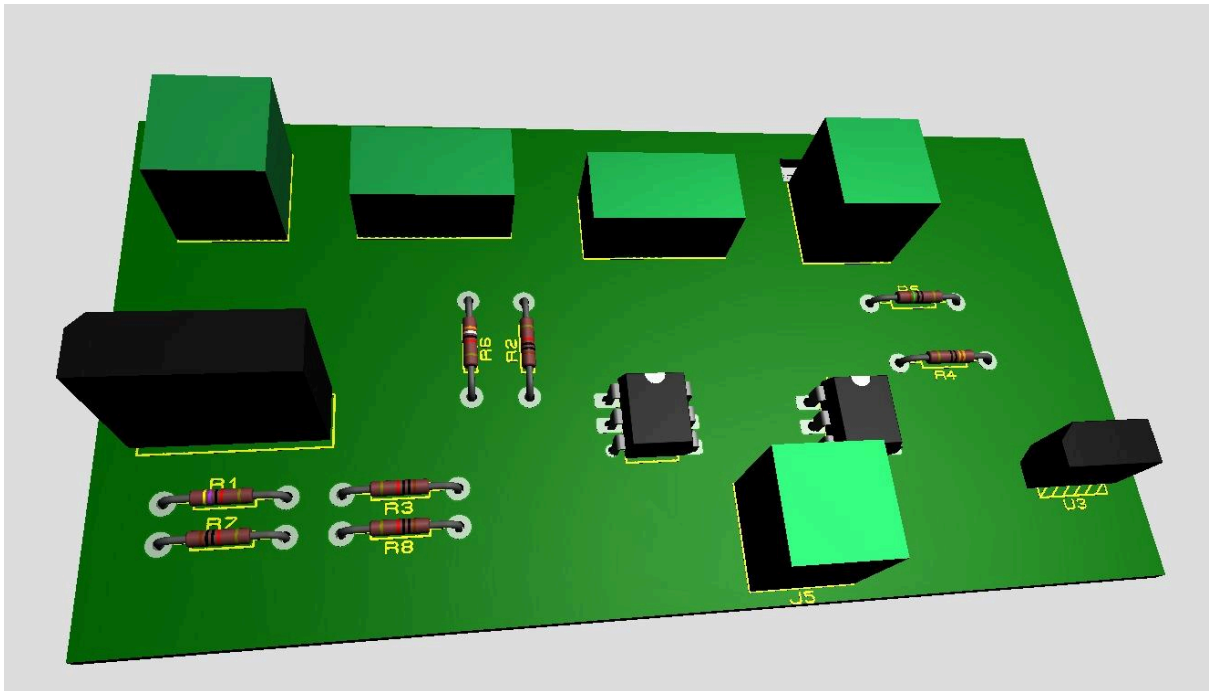


Fig 8. Vista PCB 3D

Pruebas e implementación

Se realizaron pruebas a diferentes valores de regulación para poder observar la salida.

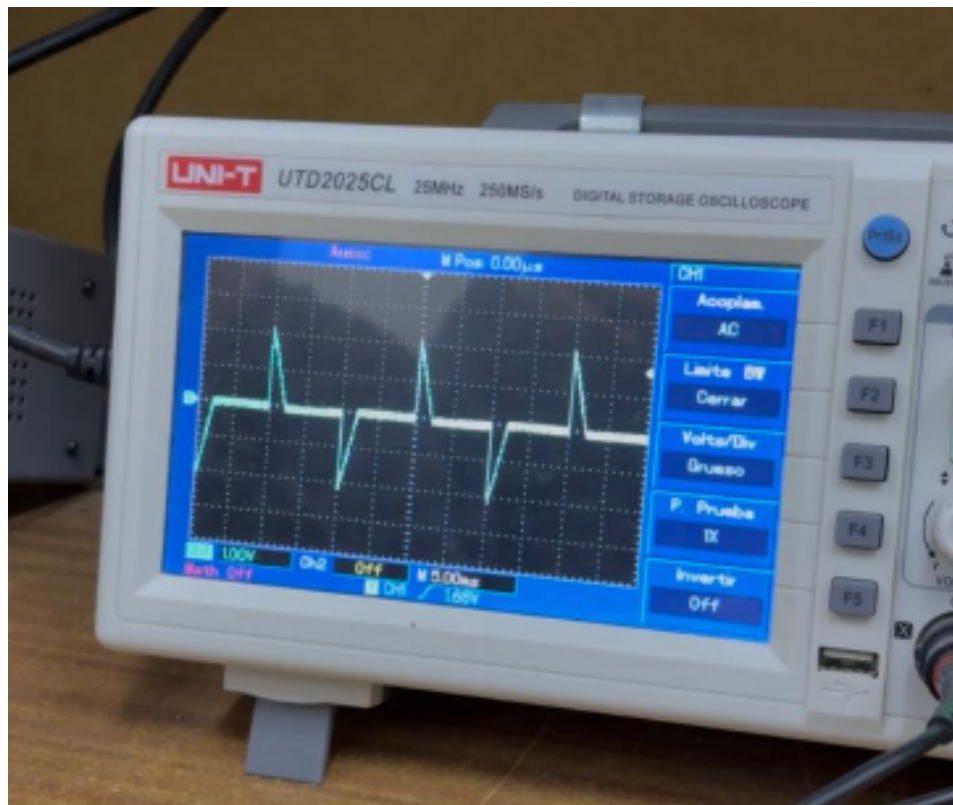


Fig 9. Salida al 20%

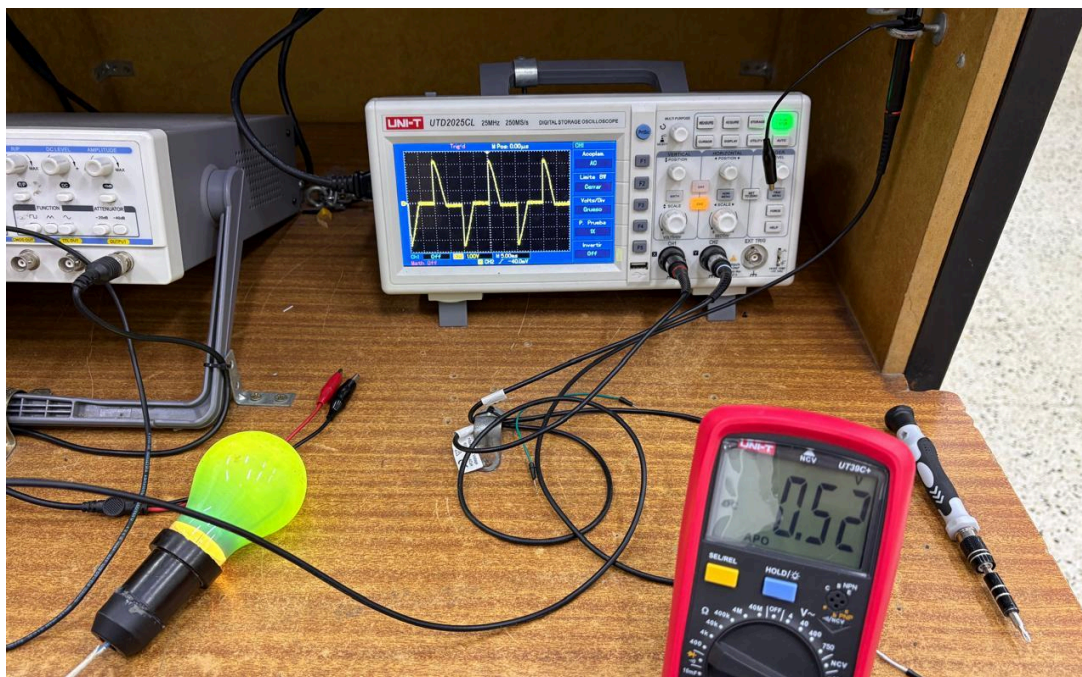


Fig 10. Salida al 50%

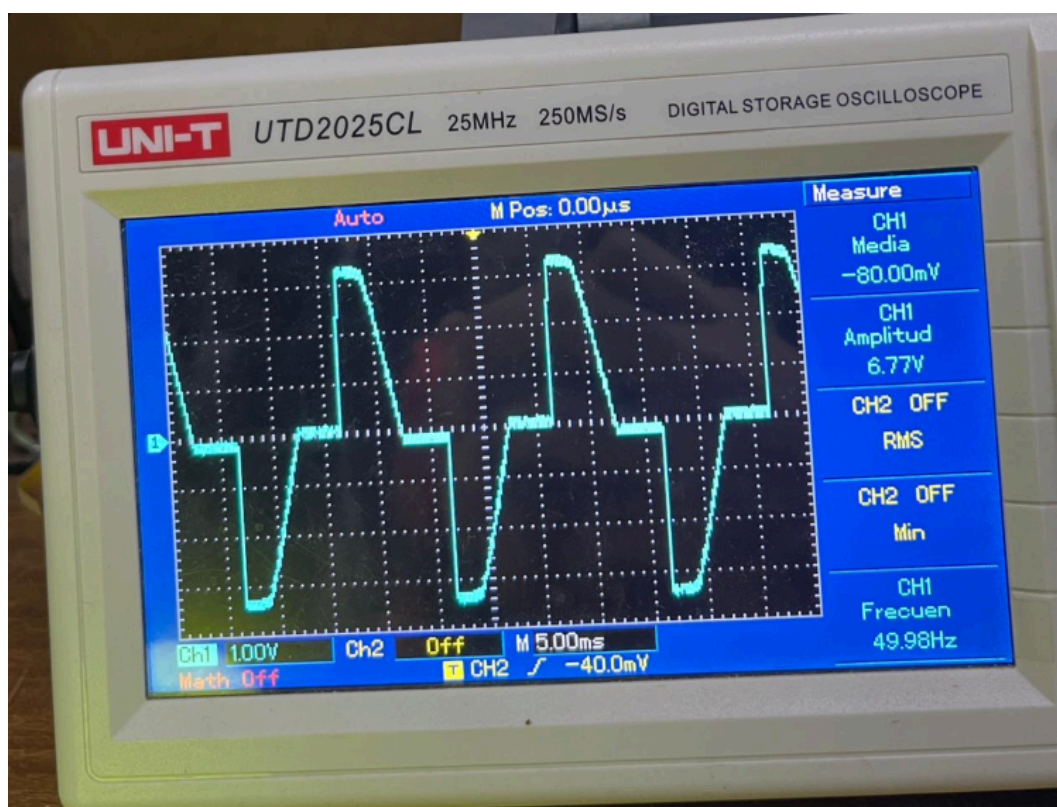


Fig 11. Salida al 75%

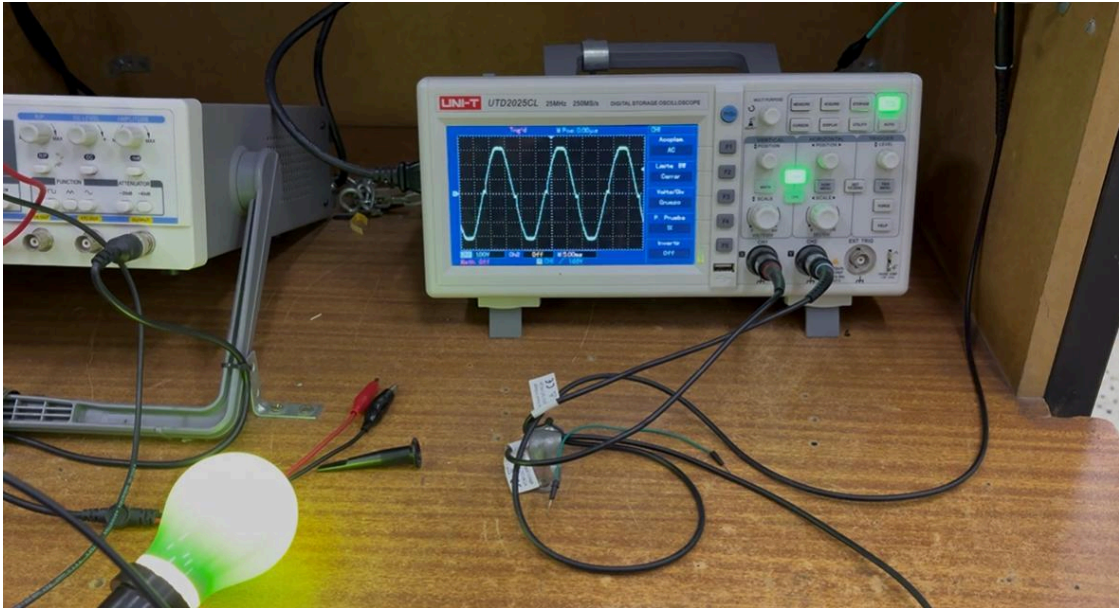


Fig 12. Salida al 100%

Presupuesto

Componente	Cantidad	Precio por unidad (\$)	Precio total (\$)
BT137	1	1250	1250
4N25	2	1500	3000
Resistencias varias	8	0	0
MOC2031	1	1250	1250
KBL610	1	3200	3200
Borneras	3	500	1500
Potenciometro 10k	1	0	0
Placa de cobre 10x10	1	4500	4500
TOTAL			\$14700

A este presupuesto deberíamos agregarle también las horas de mano de obra que se ocuparon para, diseñar el circuito en proteus, el armado del mismo, diseño de la pcb, hacer el código del microcontrolador y realizar la pcb. La sumatoria total es entre 12 y 14 horas. Cobrando \$8.500 la hora de trabajo nos quedaría que el coste total del trabajo sería 119.00\$.

El total del producto sería de 133.700\$ con mano de obra y materiales.