

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACONDICIONADOR DE LÍNEA CONMUTADO POR ALTERNISTORES MEDIANTE CONTROL DIGITAL

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DIGITALLY CONTROLLED LINE CONDITIONER SWITCHED BY ALTERNISTORS

Alejandra Jimena Sánchez Carbajal

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México
al2143001032@azc.uam.mx

Jorge Miguel Jaimes Ponce

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México
jjp@azc.uam.mx

Roberto Alfonso Alcántara Ramírez

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México
raar@azc.uam.mx

Jorge Alberto Zamora Mendoza

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México
al2173003035@azc.uam.mx

Recepción: 27/enero/2026

Aceptación: 13/mayo/2026

Resumen

Este trabajo muestra el diseño y la construcción de un acondicionador de línea capaz de corregir automáticamente variaciones de voltaje, protegiendo sistemas electrónicos mediante una salida estable. La solución emplea Triac Alternistores para la conmutación de las derivaciones de un transformador, el cual se utiliza como una fuente de voltaje de corriente alterna (CA) que se puede sumar o restar al voltaje de línea, para compensar cualquier disminución o elevación no adecuada. Dado lo anterior se diseña un transformador y se implementa un arreglo de ocho Alternistores para conmutar los devanados. El sistema monitorea en tiempo real las variaciones del voltaje de línea y mediante una tarjeta de desarrollo ESP32, se determina qué Alternistor activar según rangos definidos de operación. Este trabajo concluye con la realización de un prototipo que además del transformador incluye el diseño de un circuito impreso y un gabinete.

Palabras Clave: Acondicionador, conmutación, regulación, transformador, Triac Alternistor.

Abstract

This work shows the design and construction of a line conditioner capable of automatically correcting voltage variations that can damage electronic systems, providing stable output voltage. The solution is based on the use of thyristors (specifically, Alternistor Triacs) to switch the branches of a step-down transformer. This transformer is used as an alternating current (AC) voltage source that can be added or subtracted from the line voltage to compensate for an inadequate drop or rise. Based on the above, a transformer is designed, and an array of Alternistors is implemented to switch the windings. Switching based online voltage variations is performed by monitoring these changes and establishing several operating ranges; using an ESP32, it is decided which thyristors should be activated to achieve adequate regulation. This work concludes with the creation of a prototype that, in addition to the transformer, includes the design of a printed circuit board and a cabinet.

Keywords: Alternistors Triacs, conditioner, regulation, switching, transformer.

1. Introducción

Algunos de los sistemas eléctricos y electrónicos que están diseñados para trabajar con un sistema monofásico 208 V / 120 V, operan en un rango de tensión nominal de $V_{Lin} = 120 VCA \pm 10\%$, en la Secretaría de Economía [2012] se aborda el tema de instalaciones eléctricas, ahí se menciona que el voltaje de línea usualmente opera entre $V_{Lin_{min}} = 108 VCA$ y $V_{Lin_{max}} = 132 VCA$. Cuando el voltaje se sale de este rango, se presentan problemas serios tanto de funcionamiento como de vida útil en los equipos [Almanza, 2018].

La caída de voltaje en las redes de distribución eléctrica puede generar problemas y pérdidas significativas [Cárdenas, 2021]. Las principales causas pueden ser la sobrecarga del sistema eléctrico que ocurre cuando la demanda de energía excede el diseño de las líneas de distribución [Castellanos, 2014]. Esto es un problema

común en zonas con altas temperaturas debido al uso intensivo de aires acondicionados, lo que eleva el consumo en las horas pico. Otra causa son los largos tramos de líneas de distribución por lo que el voltaje tiende a ser bajo en líneas que cubren grandes distancias desde la subestación hasta el usuario final [Eremia, 2013]. Esto se debe a que la resistencia del conductor aumenta con su longitud, lo que provoca una mayor caída de voltaje. El grosor del cable influye directamente en la caída de voltaje ya que un calibre con un diámetro más pequeño incrementa la resistencia del conductor, causando una mayor pérdida de tensión. Otros factores pueden ser el desequilibrio de cargas y un voltaje de entrega ya bajo en el punto de origen que también contribuyen a los problemas de tensión. Para reducir estos problemas, se implementan diversas soluciones, como la instalación de reguladores de voltaje, la reubicación o adición de subestaciones y el uso de conductores de diámetro mayor.

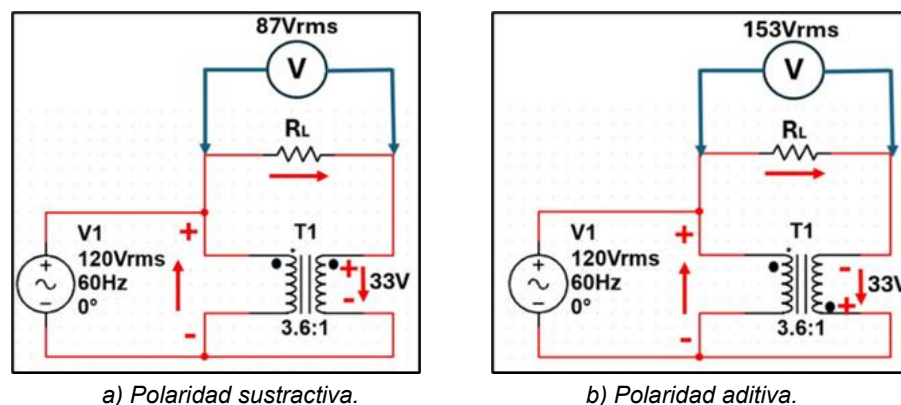
Específicamente, si el voltaje es bajo, por ejemplo, menor a $V_{Lin} = 80 VCA$, en los aparatos electrónicos, video, osciloscopios, computadoras, etc., las fuentes conmutadas que regulan el voltaje de alimentación, compensan dichas variaciones aumentando la corriente de entrada, se sobrecalientan y pueden fallar. Si la caída es brusca, el equipo puede reiniciarse o apagarse repentinamente. Los dispositivos que tienen motores, por ejemplo, ventiladores, refrigeradores, bombas, etc., pierden par de arranque y no alcanzan la velocidad nominal, además demandan más corriente, presentan sobrecalentamiento y daño en el aislamiento. En algunos de los sistemas antiguos electrónicos antes mencionados, si el voltaje es alto (más de $V_{Lin} = 132 VCA$), la etapa rectificadora y capacitores de filtrado reciben sobrevoltaje con un riesgo de daño dieléctrico. Los semiconductores como diodos y transistores operan cerca o más allá de su límite por lo que reducen drásticamente su vida útil o se queman. Las lámparas LED o focos ahorradores aumentan su luminosidad, pero su vida se reduce. Mientras que, en los motores y electrodomésticos aumenta la corriente, las vibraciones mecánicas y se produce calentamiento excesivo, aumentando la degradación de aislamientos y embobinados.

Existen diversos tipos de sistemas para regular el voltaje de línea monofásico, cada uno con un método de regulación y uso comercial distinto. Por ejemplo, los

reguladores automáticos de voltaje (AVR – Automatic Voltage Regulator), comunes en hogares y oficinas, de las marcas Forza, Koblenz, APC, Tripp Lite, los cuales funcionan con “*tap switching*” en un transformador para estabilizar el voltaje. También se tienen los Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (UPS) [Almanza, 2018; Cárdenas, 2021] con regulación, que proveen energía en caso de interrupción de voltaje, tal como APC by Schneider, CyberPower y Eaton, muy usados en computadoras personales, laboratorios, servidores, etc. Estos estabilizadores de voltaje electrónicos utilizan circuitos electrónicos con base en Triacs o IGBTs para regular rápidamente el voltaje, como la marca Furman Voltage Regulator, utilizado en audio profesional y estudios de grabación, los cuales utilizan transformadores con cambio automático de derivación (“*tap changers*”) [Cárdenas, 2021].

2. Métodos

El sistema acondicionador de línea que se presenta en este trabajo consiste en utilizar un transformador de $V_{prim} = 120\text{ V}$ en el primario y $V_{sec} = 33\text{ V}$ con derivación central en el secundario con relación de transformación 3.6:1. El transformador puede modificar el voltaje en la carga R_L al sumar o restar su propio voltaje a la tensión presente en la línea. Como se observa en la Figura 1, la terminal homóloga en cada devanado del transformador indica si el voltaje de salida está en fase con el voltaje de entrada, o si está en contrafase, dicho de otra forma, indica si hay un desfase de 180° .

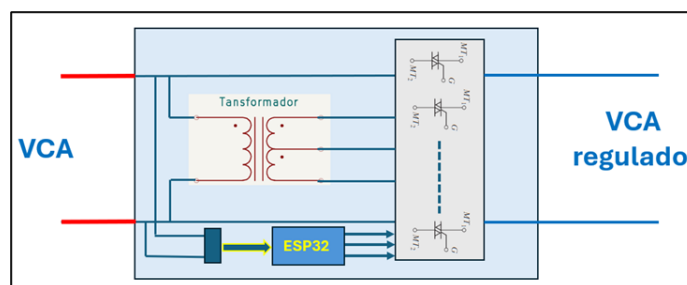


Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Forma de sumar o restar voltaje a la línea de CA mediante transformador.

En la Figura 1a, se puede observar que, al conectar el primario del transformador en fase con el secundario, el voltaje total aplicado a la carga es el voltaje de la línea menos el voltaje del secundario. Mientras que en la Figura 1b, se puede observar que, al conectar el primario del transformador en contrafase con el secundario, el voltaje neto aplicado a la carga es el voltaje de la línea sumado al voltaje del secundario.

Aplicando este principio, el sistema diseñado está conformado por el transformador que tiene derivación central, un arreglo de ocho Alternistores, los cuales se encienden con base en rangos establecidos de voltaje de línea. Para encender los interruptores de estado sólido correspondientes se utilizan optoacopladores, y como elemento de control digital un sistema basado en una tarjeta de desarrollo ESP32 (Figura 2). Se decidió emplear Alternistores Triac debido a que estos componentes están diseñados específicamente para aplicaciones que requieren la conmutación de cargas altamente inductivas. En aplicaciones de mediana y baja potencia, como es el caso del prototipo diseñado, estos tiristores bidireccionales ofrecen rendimiento similar a un arreglo de dos tiristores (SCR) conectados en antiparalelo.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Diagrama a bloques del sistema desarrollado.

Diseño del transformador para regulación

Para la construcción del sistema, el transformador reductor es el componente principal y fundamental [Rodríguez, 2018]. Este transformador alimenta la carga regulada en conjunto con el voltaje de línea y aunque hoy en día se cuenta con métodos de diseño más precisos y realistas [McLyman, 2004], se decidió que el diseño se realizaría con el método propuesto por Reider [1985], el cual requiere entre otros, de los siguientes parámetros:

- Frecuencia de trabajo: Se estableció de $f = 60 \text{ Hz}$, la cual es la frecuencia nominal de la red eléctrica en México.
- Potencia: Se propuso una potencia máxima en la carga de $S_L = 500 \text{ VA}$. Este valor es suficiente para los fines experimentales requeridos.
- Número de derivaciones centrales en el secundario: Se utiliza una única derivación central. Esta configuración es adecuada para cumplir con la regulación propuesta para un rango de variación del voltaje de línea de $V_{Lin} = 90 \text{ V}$ a $V_{Lin} = 165 \text{ V}$.
- Voltaje de entrada: Se usa un voltaje $V_{Lin} = V_{prim} = 120 \text{ V}$. Aunque es inferior al límite superior de regulación, está lo suficientemente cerca para manejar el voltaje máximo de $V_{Lin} = 165 \text{ V}$. Esta elección también reduce el tamaño y el costo del transformador.
- Voltaje de derivación central en el secundario: El valor $V_{sec} = 33 \text{ V}$ se selecciona para contrarrestar las caídas de tensión. Al ser un valor relativamente grande, permite que el transformador funcione de manera eficiente incluso bajo su máxima carga. De esta forma, se mantiene la corriente en el secundario por debajo del límite máximo de $I_{sec} = 4 \text{ A}$.

Otros parámetros de diseño utilizados son:

- Factor de potencia de la carga propuesto: $fP = 0.9$.
- Ángulo de fase de la carga: $\varphi_L = 25.84^\circ$.
- Densidad de flujo magnético del núcleo: 1 Tesla .
- Densidad de corriente en los alambres: $J = 3.947 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$.
- Área de los alambres: $a = \frac{1}{J} = 500 \frac{\text{mil cir}}{\text{A}}$.
- Voltaje de aislamiento: $V_A = 2000 \text{ V}$.

Cálculo de la laminación y del área de hierro necesaria

Lo primero que se determinó fue la Potencia (S_{Lx}) que proporcionará el transformador. Esta se calculó en función del voltaje y la corriente que debe entregar el secundario. Cabe aclarar que las Ecuaciones 1 a 13, son algunas de las

ecuaciones para diseñar transformadores [Reider 1985] y que por restricción de espacio no se incluyen todas. A partir de la Ecuación 1, se calculó la potencia aparente de salida, obteniéndose una potencia aparente $S_{Lx} = 132VA$. Con la Ecuación 2 se determinó el área mínima admisible de cobre del núcleo $A_{fe\ min} = 13.35\ cm^2$. Considerando que, en la mayoría de las laminaciones de tipo $E - I$, los valores de las longitudes W y H son iguales [Reider 1985], se llega a la conclusión que la longitud mínima admisible de W_{min} se obtiene a partir de la Ecuación 3.

$$S_{Lx} = V_2 \times I_2 \quad (1)$$

$$A_{fe\ min} = 9 \times \sqrt{\frac{S_L}{f}} \quad (2)$$

$$W_{min} = \sqrt{A_{fe\ min}} \quad (3)$$

En este caso, la longitud mínima de W_{min} debe ser de $36.53\ mm$. Con base en este criterio, se seleccionó un laminado del No. 137 con $W = 34.92\ mm$. Despejando la Ecuación 3, se obtiene el área de hierro nominal del núcleo del transformador y será de $A_{fe} = 12.19\ cm^2$; tomando en cuenta un coeficiente de llenado del 90% del núcleo, el área efectiva A'_{fe} resulta ser de $10.97\ cm^2$.

Cálculo de la relación de transformación n

Los componentes de la carga se determinaron mediante las Ecuaciones 4, 5 y 6. Linealizando las pérdidas en el cobre se determinó que, para un transformador de esta capacidad, estas pueden ser estimadas mediante la Ecuación 7. Por lo cual el valor de las pérdidas P_K se estimó con un valor de $23.36\ W$.

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2} = 8.25\ \Omega \quad (4)$$

$$R_L = Z_L \cos(\varphi_L) = 7.42\ \Omega \quad (5)$$

$$X_L = Z_L \sin(\varphi_L) = 3.59\ \Omega \quad (6)$$

$$P_K = 17.7\% \text{ de } S_{Lx} \quad (7)$$

Para determinar la resistencia de los devanados R_K se empleó la Ecuación 8, obteniéndose un valor de $1.46\ \Omega$. A partir de la Ecuación 9 y considerando un ángulo

$\varphi_K = 1.89^\circ$, se calculó la reactancia de dispersión X_K igual a $48 \text{ m}\Omega$. Con estos resultados, y empleando la Ecuación 10, se determinó el valor del voltaje que se debe inducir en el secundario E_2 . Realizando los cálculos se obtuvo el valor de $E_2 = 38.41 \text{ V}$ con un desfaseamiento de 48.14° . Con este valor y haciendo uso de la Ecuación 11 fue posible calcular la relación de transformación $n = 3.12$.

$$R_K = \frac{P_K}{I^2} \quad (8)$$

$$X_K = R_K \tan(\varphi_K) \quad (9)$$

$$E_2 = [(R_L + R_K) + j(X_L + X_K)](I_2 \angle \varphi_L) \text{ V} \quad (10)$$

$$n = \frac{V_{prim}}{E_2} \quad (11)$$

Cálculo del número de vueltas de cada uno de los embobinados

Utilizando la Ecuación 12 se determinó que el primario del transformador estaría compuesto por 415 *vueltas*, mientras que mediante la Ecuación 13 se determinó que el secundario del transformador estaría formado por 132 *vueltas*.

$$N_1 = \frac{V_{prim}}{4.44 \times B \times A'_{fe} \times f} \quad (12)$$

$$N_2 = \frac{N_1}{n} \quad (13)$$

Una vez que las características del transformador fueron establecidas, se procedió a seleccionar los interruptores de estado sólido (Alternistores Triacs) adecuados para la conmutación de polaridad, para este proceso, se tomaron en cuenta las características del acondicionador de línea y los parámetros de trabajo del transformador.

Cálculo de los parámetros de trabajo (voltaje y corriente) de los Alternistores

Debido a las características de diseño se sabe que el valor de voltaje eficaz máximo de trabajo de la regulación y por lo tanto de la conmutación es $V_{eficaz_m\acute{a}x} = 165 \text{ V}$. También por diseño se propone que la potencia máxima de trabajo sea de $S_L = 500 \text{ VA}$. Utilizando la Ecuación 14 y sin considerar las componentes transitorias que suelen manifestarse durante las acciones de conmutación o en la

magnetización inicial del núcleo del transformador [Conolly,1972], se obtuvo una corriente máxima de trabajo. La mayor cantidad de corriente se produce cuando el voltaje es inferior al 10% del valor nominal dando como resultado: $I_{eficaz_m\acute{a}x} = 4.62\text{ A}$.

$$I_{eficaz_m\acute{a}x} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Voltaje regulado de salida}} \quad (14)$$

Factor de seguridad

Para asegurar la fiabilidad y prolongar la vida útil de los componentes, es fundamental aplicar un factor de seguridad, esto significa seleccionar semiconductores cuyas características nominales sean superiores a las condiciones máximas de trabajo a las que serán sometidos.

Este enfoque protege la integridad de los componentes, Kumar [1990] recomienda usar un factor de seguridad FS en un rango entre 2 y 3, por lo cual, se propuso usar un factor de seguridad de 3 *unidades*, por lo tanto, el valor del voltaje eficaz máximo $V_{eficaz_m\acute{a}x}$ soportado por el Alternistor es de 495 V y la corriente eficaz máxima $I_{eficaz_m\acute{a}x}$ soportada por el Alternistor es de 13.86 A.

Con los datos anteriores, se propone el uso del tiristor modelo Q8015L6, conocido como "Alternistor Triac", el cual ofrece las mismas especificaciones de voltaje y corriente que un Triac. La principal ventaja de un Alternistor es que genera un ahorro significativo de espacio en la tarjeta de circuito impreso, ya que, de acuerdo con su hoja de datos, no requiere de una red de amortiguamiento (Snubber), la cual es un circuito de protección que limita la razón de crecimiento de voltaje con respecto al tiempo dv/dt [Teccor Thyristors AN1007, 2014].

Circuito de disparo

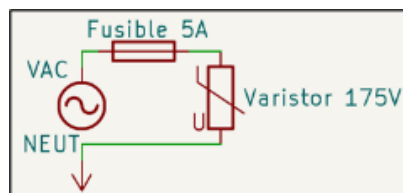
Para activar los Alternistores con un microcontrolador, se utilizaron optoacopladores debido a que estos componentes aíslan los altos voltajes de corriente alterna de los bajos voltajes de corriente directa del microcontrolador. Además, se determinó que era indispensable que el optoacoplador [Teccor AN1007, 2014] fuera con cruce por cero ya que, si la activación ocurriera en un flanco de alta

tensión, la corriente inicial que podría circular por la carga sería muy elevada, generando corrientes reactivas y, en el caso de cargas no resistivas, dañar el Alternistor Triac. Por lo tanto, el uso de optoacopladores de cruce por cero es fundamental para garantizar la seguridad y la fiabilidad del circuito.

Cálculo de los parámetros de trabajo de los fusibles y demás protecciones

El fusible debe tener un valor entre el 25% y 30% mayor a la corriente de trabajo, por lo que se determinó el uso de fusibles europeos de fusión rápida con una capacidad de 250 V y 5 A. Estos fusibles protegen cada uno de los Alternistores. A pesar de que el transformador demostró poder soportar corrientes superiores a las especificadas, es crucial no exceder el consumo para evitar el sobrecalentamiento y prolongar la vida útil del circuito.

Además de los ocho fusibles individuales para cada Alternistor, se incorpora un fusible principal adicional con las mismas características conectado en serie con un varistor de 175 V_{eficaz} el cual lo protege contra voltajes de entrada superiores (Figura 3). La Figura 4 detalla el diseño de la conmutación del transformador para la regulación de voltaje a la carga, se detalla la ubicación, numeración y conexión de los 8 Triacs con respecto a los devanados y a la tensión de línea.



Fuente: elaboración propia.

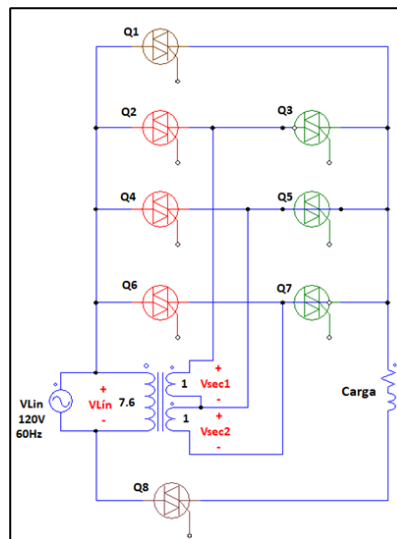
Figura 3 Protección principal del sistema completo.

Conmutación para Regulación de Voltaje

A continuación, se describe la lógica de conmutación de los Alternistores para regular el voltaje en la carga, basándose en el esquema de la Figura 4:

- **Voltaje muy alto:** Se activan los Alternistores Q_2 , Q_7 y Q_8 . Los Alternistores Q_2 y Q_7 producen una polaridad sustractiva, lo que permite regular un voltaje muy alto. El Alternistor Q_8 mantiene el neutro conectado a la carga.

- **Voltaje medianamente alto:** Se activan los Alternistores $Q2$, $Q5$ y $Q8$. Los Alternistores $Q2$ y $Q5$ aplican una polaridad sustractiva, logrando una regulación adecuada para este nivel de voltaje, mientras que el Alternistor $Q8$ mantiene la conexión del neutro.
- **Voltaje normal:** Se activan los Alternistores $Q1$ y $Q8$. El Alternistor $Q1$ conecta la fase del suministro eléctrico directamente a la carga, mientras que el Alternistor $Q8$ conecta el neutro.
- **Voltaje medianamente bajo:** Se activan los Alternistores $Q5$, $Q6$ y $Q8$. Los Alternistores $Q5$ y $Q6$ se utilizan para generar una polaridad aditiva, asegurando que la carga reciba un voltaje regulado. El Alternistor $Q8$ mantiene el neutro conectado.
- **Voltaje muy bajo:** En este caso se activan los Triacs $Q3$, $Q6$ y $Q8$. Los Triacs $Q3$ y $Q6$ aplican una polaridad aditiva, garantizando que la carga funcione dentro del rango de voltaje aceptable, incluso si el voltaje inicial es muy bajo. El Triac $Q8$ mantiene el neutro.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Diagrama de conexión, del transformador, Alternistores y carga.

Con base en lo anterior y sabiendo que el proceso de regulación se realiza sumando o restando el voltaje disponible en los dos devanados secundarios del transformador principal cuya relación de transformación de cada uno con respecto al primario es

de 3.6: 1, esa tensión se agrega o se resta del voltaje que en ese momento esté presente en la línea, para ello los dos embobinados secundarios del transformador pueden ser conectados de manera individual o simultáneamente en serie, por lo cual los rangos de regulación se reducen a siete posibles estados los cuales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 Secuencias de regulación.

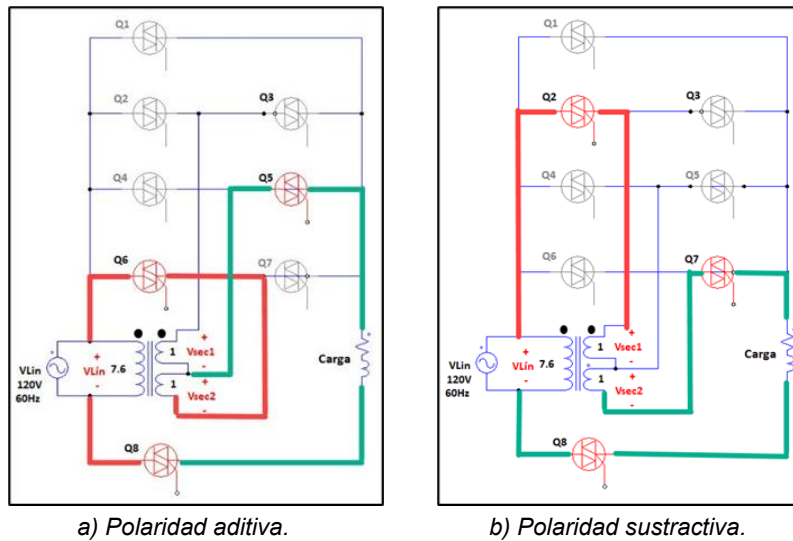
Número de secuencia de regulación	V_{Lin} Rango de voltaje presente en la línea [V]	V_{Sec1} Rango de voltaje en el secundario # 1 [V]	V_{Sec2} Rango de voltaje en el secundario # 2 [V]	Voltajes involucrados en la regulación [V]	Rango de voltaje aplicado a la carga (V_{ZL}) [V]
Secuencia 1	$V_{Lin} < 88$	$V_{Sec1} \leq 11.6$	$V_{Sec2} \leq 11.6$	No se aplica voltaje	Se desconecta la carga
Secuencia 2	$88 \leq V_{Lin} \leq 100$	$11.6 \leq V_{Sec1} \leq 13.2$	$11.6 \leq V_{Sec2} \leq 13.2$	$V_{Lin} + V_{Sec1} + V_{Sec2} - V_{TM}$	$109.4 < V_{ZL} \leq 124.6$
Secuencia 3	$100 < V_{Lin} \leq 112$	$13.2 < V_{Sec1} \leq 14.7$	$13.2 < V_{Sec2} \leq 14.7$	$V_{Lin} + V_{Sec2} - V_{TM}$	$111.4 < V_{ZL} \leq 124.9$
Secuencia 4	$112 < V_{Lin} \leq 132$	$14.7 < V_{Sec1} \leq 17.4$	$14.7 < V_{Sec2} \leq 17.4$	$V_{Lin} - V_{TM}$	$110.2 < V_{ZL} \leq 130.2$
Secuencia 5	$132 < V_{Lin} \leq 150$	$17.4 < V_{Sec1} \leq 19.7$	$17.4 < V_{Sec2} \leq 19.7$	$V_{Lin} - V_{Sec1} - V_{TM}$	$112.8 < V_{ZL} \leq 128.5$
Secuencia 6	$150 < V_{Lin} \leq 166$	$19.7 < V_{Sec1} \leq 21.8$	$19.7 < V_{Sec2} \leq 21.8$	$V_{Lin} - V_{Sec1} - V_{Sec2} - V_{TM}$	$108.8 < V_{ZL} \leq 120.6$
Secuencia 7	$166 < V_{Lin}$	$21.8 \leq V_{Sec1}$	$21.8 \leq V_{Sec2}$	No se aplica voltaje	Se desconecta la carga

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5a, presenta los Alternistores que se mantienen activos cuando el voltaje de línea está en un nivel bajo dentro del rango de 100 V, hasta 112 V en ese caso se ejecuta la secuencia 3, la cual activa los Alternistores Q5, Q6 y Q8, para enviar a la carga la suma del voltaje de línea con la mitad del voltaje generado en devanado secundario del transformador. La Figura 5b, muestra los Alternistores que se mantienen activos cuando el voltaje de línea está en un nivel muy alto, dentro del rango de 150 V hasta 166 V, en ese caso se ejecuta la secuencia 6, la cual activa los Alternistores Q2, Q7 y Q8, para enviar a la carga el resultado de la suma del voltaje de línea con el voltaje completo generado en el devanado secundario del transformado.

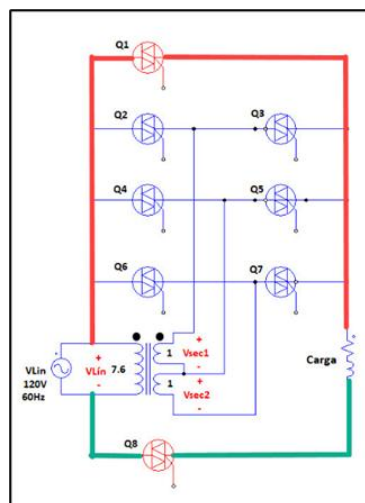
La Figura 6, muestra los dos Alternistores que se mantienen activos cuando el voltaje de línea está en un nivel normal en el rango de 112 V hasta 132 V, en ese

caso se ejecuta la secuencia 4 la cual activa los Alternistores $Q1$ y $Q8$, para enviar a la carga el voltaje directo de la línea. Cabe aclarar que sin importar la secuencia que se ejecute, se debe considerar restar al voltaje de salida V_{out} , el voltaje de activación de los Alternistores Triac.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Activación de dos secuencias diferentes dependiendo del voltaje de entrada.



Fuente: elaboración propia

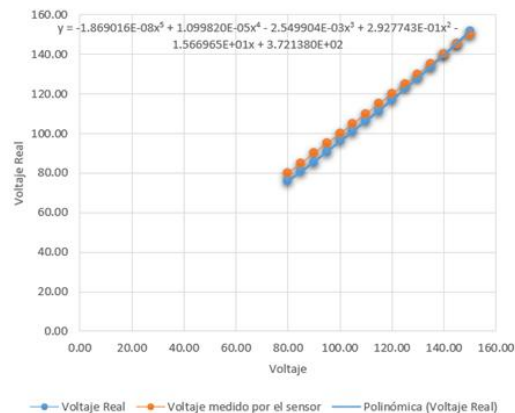
Figura 6 Activación de Alternistores cuando el voltaje de línea está entre 112 V y 132 V.

Monitoreo del voltaje de línea

Se utilizó un circuito de monitoreo de voltaje para que el proyecto funcionara de forma autónoma, con la capacidad de medir de manera rápida y precisa el voltaje

de línea. Este circuito es compatible con el microcontrolador ESP32, para ello se utilizó el sensor de voltaje alterno ZMPT101B de 2 mA. Sus características, son adecuadas para medir el voltaje de corriente alterna. El sensor ZMPT101B proporciona una señal de corriente alterna de 2 V_{pp}, montada en otra señal de corriente continua de 2.5 V para poder monitorear la línea, la salida del sensor se conecta al ESP32 y mediante un método numérico se obtiene el valor de la magnitud del voltaje eficaz de la línea.

La Figura 7 presenta la caracterización del sensor contrastando valores medidos con un multímetro patrón contra los valores obtenidos con el sensor, se observa que, para ajustar los valores del sensor a los valores reales, fue necesario programar en el ESP32 una ecuación de grado 5, esta ecuación corrigió y linealizó las mediciones del sensor.

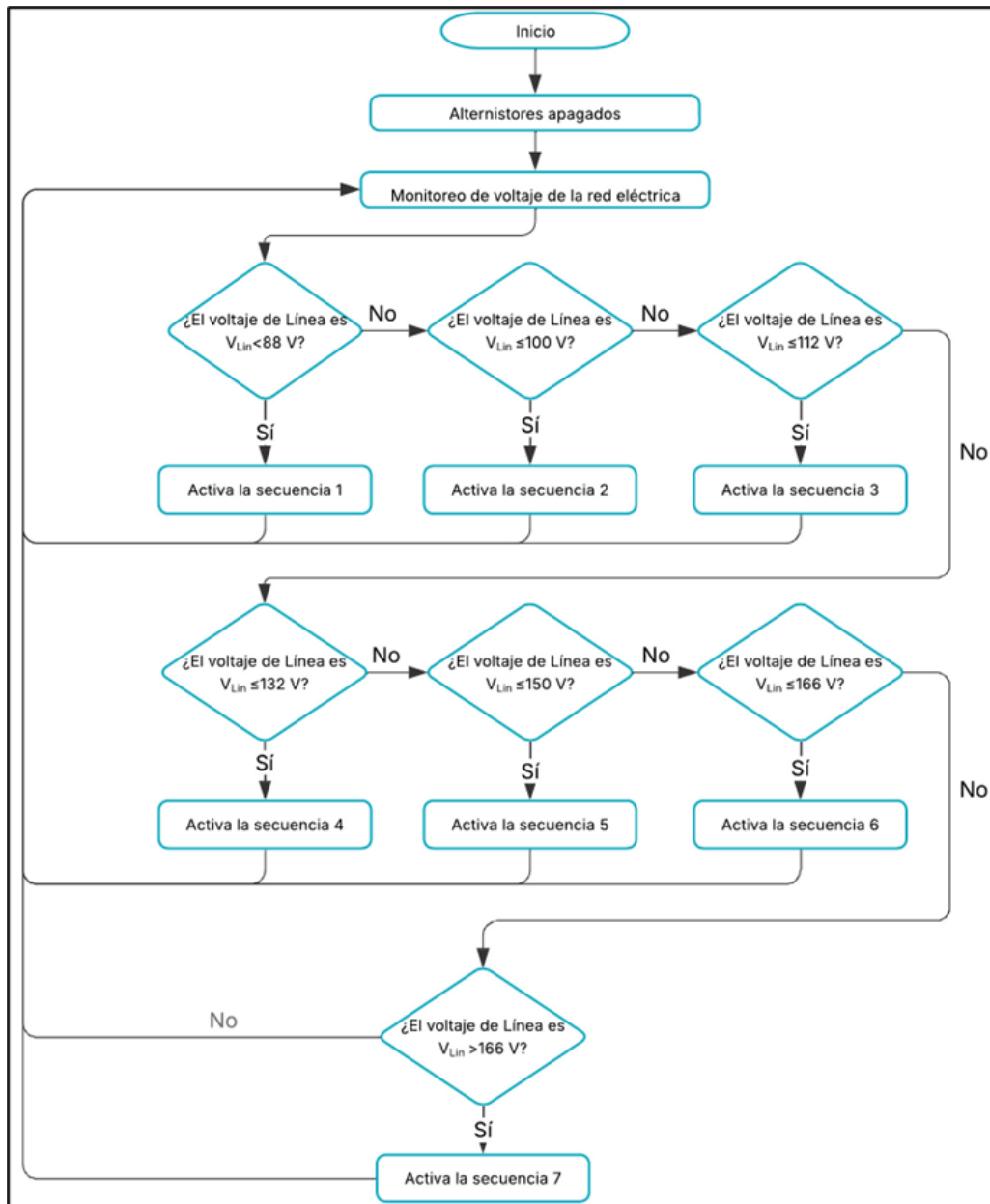


Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Voltaje real de la línea vs voltaje medido por el sensor de línea.

Código de Programación

Para la programación del ESP32, se utiliza la aplicación Arduino IDE. El microcontrolador ESP32 fue seleccionado por su doble núcleo. El primer núcleo se encargó de realizar las mediciones de todas las magnitudes y, en función del valor de voltaje leído, se activan o desactivan los Alternistores. En la Figura 8 se presenta un diagrama que representa cómo se determina la secuencia de Alternistores que se encenderán dependiendo del voltaje de línea monitoreado el cual se realiza con el segundo núcleo del microcontrolador.



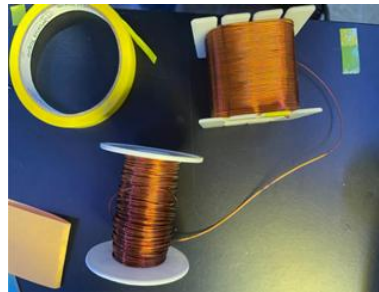
Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Diagrama de la activación de secuencias mediante el microcontrolador.

3. Resultados

Con base en cálculos de corriente y voltaje se determinó que el calibre más apropiado para el devanado primario fue el calibre 21 *AWG*, con 415 *vuelatas* de alambre distribuidas en 9 *capas*, y para el devanado secundario se utilizó calibre 17 *AWG*, constituido por 132 *vuelatas* distribuidas en 4 *capas*. Con base en los cálculos obtenidos, se procedió a la construcción del transformador lo cual se

muestra en las Figuras 9 y 10. En la Figura 11 se muestra una prueba en dónde se observa el voltaje en el primario y el voltaje en el secundario del transformador.



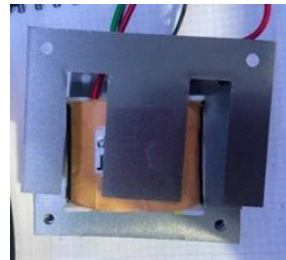
a) Embobinado primario.



b) Embobinado secundario.

Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Embobinados del transformador.



a) Ensamble de laminación.



b) Transformador terminado.

Fuente: elaboración propia.

Figura 10 Ensamble final del transformador.



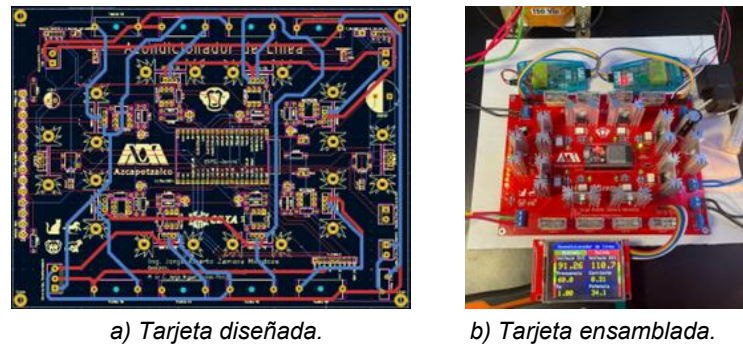
Fuente: elaboración propia.

Figura 11 Prueba de funcionamiento del transformador principal.

Diseño de la tarjeta PCB

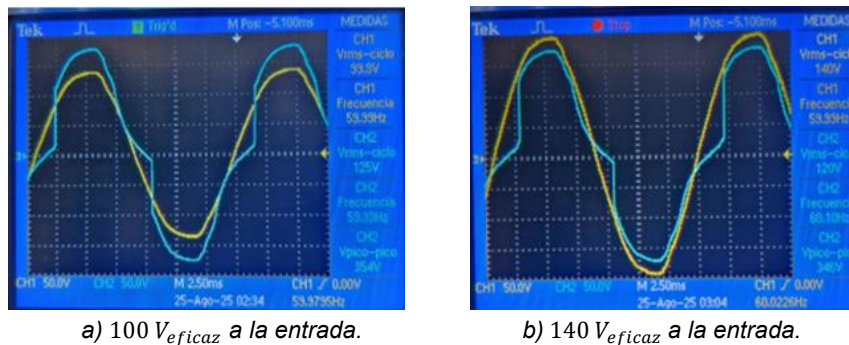
Para el diseño de la placa, se empleó un software llamado KiCad y se utilizó una placa de circuito impreso (PCB Printed Circuit Board) con doble cara de cobre, ya que el número de conexiones y componentes hizo inviable el uso de una sola capa, lo cual se observa en la Figura 12.

La regulación comienza a los $100 V_{eficaz}$. En el oscilograma de la Figura 13, se observan dos señales, en amarillo se aprecia el voltaje de línea, mientras que, en azul se observa el voltaje de salida del acondicionador de línea medido en la carga. En la Figura 14 se muestran los resultados obtenidos de una prueba realizada con una carga puramente resistiva con distintos voltajes de entrada, mientras que en la figura 15 se presenta el sistema ensamblado en un gabinete de acrílico.



Fuente: elaboración propia.

Figura 12 Diseño de conexiones del PCB.



Fuente: elaboración propia.

Figura 13 Voltaje de línea igual a $100 V_{eficaz}$ y $140 V_{eficaz}$.



Fuente: elaboración propia.

Figura 14 Regulación de voltaje de salida con diferentes valores a la entrada.



Fuente: elaboración propia

Figura 15 Vista del sistema ensamblado en gabinete de acrílico.

4. Discusión

Como se logra observar en la Figura 14, al realizar pruebas con una carga puramente resistiva, se logró mantener un voltaje de salida regulado $V_{out} = 120\text{ V} \pm 10\%$ a pesar de tener variaciones del voltaje de línea en el rango de 88 V hasta 166 V . Por lo tanto, se pudo corroborar que el transformador, el arreglo de los Alternistores junto con todas las protecciones y el control realizado por el microcontrolador funcionaron de manera adecuada. Sin embargo, para optimizar la regulación, se propone diseñar un transformador con más devanados secundarios ya que esta adición permitiría una conmutación entre diferentes valores de voltaje, resultando en una regulación más fina y un intervalo de salida más estrecho. Es decir, una mejora en el diseño del transformador podría permitir una regulación del voltaje de salida $V_{out} = 120 \pm 5\% \text{ V}$. Esta reducción en el margen de error constituye una mejora significativa en la precisión de la regulación.

Trabajar a la mayor velocidad posible es crucial para la seguridad, especialmente al conmutar corriente alterna para alimentar electrodomésticos por lo que un sensor más rápido podría proteger el sistema de picos o caídas de voltaje instantáneos, ofreciendo mayor seguridad y un control más inmediato en la regulación. Por esta razón, la búsqueda de un sensor de voltaje que opere a una velocidad superior se considera una mejora significativa para el proyecto. Otra mejora significativa podría ser la optimización del código reduciendo su longitud mediante el uso de funciones.

5. Conclusiones

Se puede concluir que se logró diseñar, construir e implementar un primer prototipo de un acondicionador de línea controlado digitalmente, el cual integra de manera efectiva electrónica de potencia, control digital y diferentes sistemas de protección ofreciendo una solución funcional para la regulación automática de voltaje. Las pruebas experimentales realizadas con cargas resistivas mostraron que el sistema es capaz de mantener el voltaje de salida dentro de un rango aceptable, aun cuando el voltaje de línea presenta fluctuaciones considerables.

El uso de conmutación por cruce por cero, junto con una estrategia de regulación basada en la suma y resta de voltaje mediante un transformador con derivación central, permitió conservar una forma de onda de salida prácticamente sinusoidal. Como consecuencia, no se introduce distorsión armónica apreciable, lo que implica que el factor de potencia del sistema no se vea modificado y permanece determinado únicamente por la naturaleza de la carga, esto se observa en la Figura 14. En dicha figura, en el inciso b, se aprecia que cuando el suministro eléctrico se encuentra en su valor nominal, la única variación observable en la salida corresponde a la caída de voltaje propia de los Alternistores Triac que conducen directamente el suministro, aproximadamente 2 V , lo cual corrobora el correcto funcionamiento del sistema en condiciones normales de operación. Esto confirma que la estrategia de regulación propuesta cumple con el objetivo principal del trabajo el cual es proteger equipos eléctricos y electrónicos sensibles frente a variaciones del suministro eléctrico en instalaciones residenciales y comerciales.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Almanza, M., Gracia, R., Jurado, F. Regulación de voltaje trifásico para compensación de disturbios eléctricos tipo SAG, *Revista Ingeniantes*, Vol. 3, No. 2, 2018.
- [2] Cárdenas, D., Chávez, C., Layedra, N. Estabilidad de Voltaje en Redes de Distribución Eléctrica Monofásicas de Medio Voltaje, Aplicando Reguladores Quick Drive Tap en Estado Estable. *Revista INGENIO* Vol. 4 No. 1, 2021.

- [3] Castellanos, R. Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Vol. 15, No. 2, abril-junio 2014.
- [4] Conolly, A. P., Fox, R. W., Golden, F. B., Gorss D. R., Korn S. R., Loncher R. E., Wu S. J., SCR Manual. pp. 469-472, Nueva York, Estados Unidos – Ginebra, Suiza, 1972.
- [5] Eremia M., Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control. Hoboken, NJ, USA. Wiley-IEEE Press, 2013.
- [6] Kumar, R., Kumar, K., Tiristores: Conceptos y aplicaciones. pp. 34-35, Limusa, México, 1990.
- [7] McLyman, W. T. Transformer and Inductor Desing Handbook. Monticello, NY, Estados Unidos, 2004.
- [8] Reider, J. El transformador (apuntes no publicados desarrollados para el curso de “Electrónica V”). U.A.M. – Azcapotzalco, México, 1985.
- [9] Rodríguez, M. Á. Máquinas Eléctricas II, Tema 1. Transformadores. Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, España, 2018.
- [10] Secretaría de Economía, NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones eléctricas (utilización), 2012.
- [11] Teccor Thyristors, AN1007: Thyristors Used as AC Static Switches and Relays, 2014.