

Desarrollo De Un Módulo Configurable De Convertidores De Potencia Con Tiristores
Para Prácticas De Laboratorio De Electrónica De Potencia

Andersson Fabian Reyes Muñoz

Jeifer Iván Bernal Téllez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico

Director

María Alejandra Mantilla Villalobos, Ph.D.

Codirector

Fausto Osorio Silva, Ph.D .

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

Te agradezco a ti, mamita. Te agradezco, Gloria Rubiela Muñoz Roa, porque gracias a ti esto pasó, gracias a ti seré tu ingeniero, te doy gracias por ser esa mujer valiente, esa mujer pujante y echada pa' delante, te agradezco, mamá, esto es más tuyo que mío, te agradezco por no dejarme rendir nunca, gracias por estar en cada lágrima que pasé, en cada día que sentía que no podía, te agradezco por enseñarme que las cosas se trabajan, que no hay sueños demasiado grandes, te mando un abrazo gigante al cielo, espero estés orgullosa de mí.

Andersson Fabian Reyes Muñoz

Agradezco profundamente a mi madre, por su amor incondicional, por ser siempre una voz de aliento en los momentos difíciles y por impulsarme a seguir adelante incluso cuando las cosas parecían complicarse. Este logro también le pertenece a ella, por todo el esfuerzo y apoyo que me brindó durante esta etapa de mi vida. A mis hermanas, por acompañarme y apoyarme en cada una de las decisiones que he tomado, siempre deseándome lo mejor y ayudándome a crecer tanto personal como profesionalmente. A mis amigos y a cada una de las personas que directa o indirectamente hicieron parte de este camino, porque gracias a ellos este camino fue mucho más llevadero. Por creer en mí en momentos en los que ni yo mismo lo hacía, por no dejarme caer en los momentos difíciles de la carrera y por compartir tantos momentos, experiencias y risas que hicieron de esta etapa algo inolvidable. A nuestra directora y codirector de trabajo de grado, por su acompañamiento, disposición y orientación durante el desarrollo de este proyecto, así como por compartir sus conocimientos y experiencia a lo largo de este proceso académico. Finalmente, agradezco a nosotros mismos, por el esfuerzo, la dedicación y la perseverancia invertidos en este trabajo, y por mantener la visión y el compromiso necesarios para culminar este proyecto y alcanzar una meta tan importante en nuestras vidas. **Jeifer Iván Bernal Téllez**

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	15
2.1 Electrónica de potencia y valor práctico del montaje experimental	15
2.2 SCR y control por ángulo de disparo.....	16
2.3 Configuraciones y tipo de cargas analizadas	17
2.4 Detección de cruce por cero y generación de pulsos	20
2.5 Aislamiento óptico, protección contra transitorios y consideraciones térmicas	22
2.6 Seguridad e integración física del módulo.....	23
3. Desarrollo de la solución	24
3.1 Requisitos técnicos y prácticos	24
3.2 Arquitectura general.....	25
3.3 Materiales y componentes principales	29
3.4 Configuración del módulo y lógica de operación.....	31
3.4.1 Interruptores de configuración del modo de operación	31
3.4.2 Interruptores de configuración de potencia.....	32
3.4.3 Configuración del módulo para cada topología.....	33

3.5 Etapas metodológicas del proyecto.....	34
3.6 Simulación del sistema	34
3.7 Implementación en protoboard	35
3.8 Diseño, fabricación y ensamblaje del PCB.....	36
3.9. Configuraciones experimentales implementadas.....	38
3.10. Documentación complementaria y anexos	39
3.11. Resultados experimentales.....	39
3.11.1. Verificación del sistema de control por ángulo de disparo.....	39
3.11.2 Rectificador controlado de media onda	41
3.11.3. Rectificador controlado de onda completa	42
3.11.4. Controlador AC/AC.....	44
3.12. Aportes prácticos, de seguridad y de pertinencia.....	46
4. Conclusiones.....	46
5. Recomendaciones	47
Referencias Bibliográficas	49

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Requisitos de diseño del módulo y criterios de implementación</i>	24
Tabla 2	<i>Materiales y componentes principales empleados en el módulo.</i>	30
Tabla 3	<i>Configuración funcional del módulo para las topologías implementadas.</i>	33
Tabla 4	<i>Configuraciones experimentales implementadas en el módulo.</i>	38
Tabla 5	<i>Configuración requerida del módulo para la práctica de media onda.</i>	50
Tabla 6	<i>Registro de datos guía 1</i>	54
Tabla 7	<i>Configuración requerida del módulo para la práctica de onda completa.</i>	55
Tabla 8	<i>Registro de datos guía 2.</i>	57
Tabla 9	<i>Configuración requerida del módulo para la práctica AC/AC.</i>	58
Tabla 10	<i>Registro de datos guía 3.</i>	60
Tabla 11	<i>Configuración requerida del módulo para la práctica con carga inductiva y DLP. ..</i>	62
Tabla 12	<i>Registro de datos guía 4.</i>	63

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Topologías de convertidores implementadas en el módulo configurable.</i>	18
Figura 2	<i>Referencia de cruce por cero usando un LM358.</i>	21
Figura 3	<i>Etapa de retardo y generación de pulsos de disparo empleando la plataforma Arduino Uno.</i>	21
Figura 4	<i>Aislamiento con optoacopladores MOC3021.</i>	23
Figura 5	<i>Esquemático general del módulo configurable de convertidores de potencia.</i>	26
Figura 6	<i>Detalle de la etapa de detección y control del módulo.</i>	27
Figura 7	<i>Aislamiento de control y potencia con MOC3021.</i>	28
Figura 8	<i>Esquema de potencia con tiristores, configuración y carga.</i>	29
Figura 9	<i>Fases de desarrollo: Módulo de convertidores de potencia.</i>	34
Figura 10	<i>Implementación y simulación de las etapas de control, aislamiento y potencia.</i>	35
Figura 11	<i>Implementación en protoboard del módulo de potencia.</i>	36
Figura 12	<i>Diseño de la tarjeta de circuito impreso empleado para la fabricación del módulo.</i>	37
Figura 13	<i>Salida del transformador (sinusoidal) y del detector de cruce por cero (LM358).</i>	40
Figura 14	<i>Variación del ángulo de disparo y su desplazamiento respecto a la red sinusoidal.</i>	40
Figura 15	<i>Forma de onda: Rectificador controlado de media onda (experimental).</i>	41
Figura 16	<i>Efecto del aumento del ángulo de disparo en la onda de salida.</i>	42
Figura 17	<i>Forma de onda: Rectificador controlado de onda completa (experimental).</i>	43
Figura 18	<i>Efecto del aumento del ángulo de disparo en la onda de salida.</i>	43

Figura 19 <i>Forma de onda de salida del convertidor AC/AC con control por ángulo de disparo.</i>	44
Figura 20 <i>Onda de salida del convertidor AC/AC para un ángulo de disparo intermedio.</i>	45
Figura 21 <i>Onda de salida del convertidor AC/AC para un ángulo de disparo mayor.</i>	45
Figura 22 <i>Topología a usar para esta práctica.</i>	53
Figura 23 <i>Topología a usar para esta práctica.</i>	56
Figura 24 <i>Topología a usar para esta práctica.</i>	59
Figura 25 <i>Topología a usar para esta práctica.</i>	61
Figura 26 <i>Esquemático general del sistema simulado en Proteus.</i>	65
Figura 27 <i>Librería de dispositivos empleada durante la simulación.</i>	65
Figura 28 <i>Vista funcional por etapas del modelo utilizado durante la validación.</i>	66
Figura 29 <i>Validación de pulsos para meda onda y onda completa.</i>	66
Figura 30 <i>Validación de pulsos para el modo de control AC/AC.</i>	67
Figura 31 <i>Banco experimental utilizado durante la validación en protoboard.</i>	68
Figura 32 <i>Verificación instrumental de señales auxiliares en el montaje en protoboard.</i>	68
Figura 33 <i>Registros de salida para el rectificador controlado de media onda.</i>	69
Figura 34 <i>Registros de salida para la topología de onda completa.</i>	69
Figura 35 <i>Registro experimental del modo AC/AC con control por ángulo de disparo.</i>	70
Figura 36 <i>Esquemático consolidado del módulo empleado como base para el diseño del PCB.</i>	71
Figura 37 <i>Vista del ruteo y distribución general de la tarjeta.</i>	72
Figura 38 <i>Renderizado 3D preliminar del ensamble.</i>	72
Figura 39 <i>Tarjeta fabricada con los componentes listos para el proceso de ensamble.</i>	73
Figura 40 <i>Documentación fotográfica del módulo luego del ensamble.</i>	73

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Guía de rectificador controlado de media onda.....	50
Apéndice B. Guía de rectificador controlado de onda completa	54
Apéndice C. Guía de controlador AC/AC	58
Apéndice D. Guía de rectificador de onda completa con carga inductiva y diodo de libre paso	60
Apéndice E. Simulación y validación del sistema en Proteus	63
Apéndice F. Montaje experimental en protoboard	67
Apéndice G. Diseño, fabricación y ensamble del módulo en pcb	70
Apéndice H. Código de arduino para la generación de pulsos	74

Resumen

Título: Desarrollo De Un Módulo Configurable De Convertidores De Potencia Con Tiristores Para Prácticas De Laboratorio De Electrónica De Potencia*

Autor: Andersson Fabian Reyes Muñoz Y Jeifer Ivan Bernal Tellez**

Palabras Clave: Electrónica de potencia, tiristores, rectificador controlado de silicio, convertidores de potencia, módulo de laboratorio

Descripción:

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo de un módulo configurable para el estudio de convertidores de potencia basados en tiristores. El sistema permite implementar y analizar diferentes topologías de convertidores a base de dispositivos SCR (siglas en inglés de Silicon Controlled Rectifier), incluyendo: rectificadores monofásicos controlados de media onda y onda completa, y controladores AC/AC monofásicos. El módulo integra una etapa de control digital para la generación de los pulsos de conmutación de los dispositivos SCR, mediante el uso de técnicas de control por ángulo de disparo. La sincronización de los pulsos de disparo con la señal de tensión de entrada de los convertidores se realiza utilizando un sistema de detección de cruce por cero. Asimismo, el módulo cuenta con un sistema de aislamiento óptico y acondicionamiento de señales eléctricas, que garantiza la protección y el desacoplamiento entre las etapas de control y potencia. Para verificar el funcionamiento del módulo se realizaron simulaciones en el software Proteus, seguido de una fase de pruebas experimentales del sistema implementado en laboratorio, lo cual corroboró el correcto desempeño de las diferentes configuraciones establecidas. Finalmente, se desarrollaron cuatro guías de laboratorio para la asignatura de Electrónica de Potencia del programa de Ingeniería Eléctrica. El propósito de estos documentos es orientar al estudiante en la experimentación con las cuatro topologías de convertidores que pueden ser configuradas en el módulo implementado. Como resultado, se obtiene una plataforma versátil orientada al aprendizaje práctico de la electrónica de potencia, que facilita la comprensión de los principios de operación de los convertidores y su comportamiento bajo diferentes condiciones de control.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora: Maria Alejandra Mantilla Villalobos Ph.D. en Ingeniería.

Abstract

Title: Development Of A Configurable Module Of Power Converters With Thyristors For Power Electronics Laboratory Practices*

Author: Andersson Fabian Reyes Muñoz Y Jeifer Ivan Bernal Tellez**

Key Words: Power electronics, thyristors, silicon controlled rectifier, power converters, laboratory module.

Description:

This work presents the design and development of a configurable module for the study of power converters based on thyristors. The system allows the implementation and analysis of different converter topologies based on SCR devices (acronym in English for Silicon Controlled Rectifier), including: single-phase controlled half-wave and full-wave rectifiers, and single-phase AC/AC controllers. The module integrates a digital control stage for the generation of the switching pulses of the SCR devices, through the use of firing angle control techniques. The synchronization of the firing pulses with the input voltage signal of the converters is carried out using a zero-crossing detection system. Likewise, the module has an optical isolation and electrical signal conditioning system, which guarantees the protection and decoupling between the control and power stages. To verify the operation of the module, simulations were carried out in the Proteus software, followed by a phase of experimental tests of the system implemented in the laboratory, which corroborated the correct performance of the different established configurations. Finally, four laboratory guides were developed for the Power Electronics course of the Electrical Engineering program. The purpose of these documents is to guide the student in the experimentation with the four converter topologies that can be configured in the implemented module. As a result, a versatile platform oriented toward the practical learning of power electronics is obtained, which facilitates the understanding of the operating principles of the converters and their behavior under different control conditions.

* Thesis

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Directora: María Alejandra Mantilla Villalobos, Ph.D. in Engineering.

Introducción

La electrónica de potencia constituye un área fundamental en la formación de ingenieros electricistas y electrónicos, debido a su papel en la conversión, control y acondicionamiento de la energía eléctrica en aplicaciones industriales, energéticas y de automatización. Dentro de este campo, los convertidores de potencia, y en particular, aquellos implementados usando rectificadores controlados de silicio o SCR (por sus siglas en inglés), han tenido una importancia destacada por su capacidad de manejar niveles significativos de potencia y por su aplicación en rectificación controlada, regulación de potencia y control de cargas en corriente alterna (Ned Mohan, 2003) (Rashid, 2014). Por esta razón, su comprensión no debe limitarse únicamente al plano teórico, sino que debe complementarse con experiencias experimentales que permitan al estudiante relacionar directamente el comportamiento de las señales eléctricas con la operación real de los dispositivos de potencia. En el contexto universitario, la formación en electrónica de potencia exige recursos de laboratorio que no solo sean funcionales, sino también seguros y acordes con las condiciones reales del entorno en el que se emplean. En la Universidad Industrial de Santander, esta necesidad se hace más evidente al considerar que, aunque en el laboratorio se dispone del módulo comercial SEMITEACH Thyristors, sus prácticas monofásicas presentan limitaciones de compatibilidad con la frecuencia local de 60Hz, debido a que la tarjeta de control del sistema monofásico fue concebida para operar a 50Hz (Semikron, 2022). En consecuencia, su uso se ha concentrado principalmente en configuraciones trifásicas, reduciendo las posibilidades de experimentación práctica con convertidores monofásicos basados en tiristores. Esta situación restringe la posibilidad de que los estudiantes implementen, comparen y analicen distintas topologías en un entorno controlado y seguro, limitando el fortalecimiento de competencias prácticas que resultan esenciales en su formación.

A partir de esta necesidad, el presente trabajo propone el desarrollo de un módulo configurable de convertidores de potencia monofásicos con tiristores para prácticas de laboratorio de electrónica de potencia. La motivación inicial del proyecto contempló el uso de encapsulados comerciales integrados, específicamente dispositivos de la familia Crydom, por su carácter industrial, su compacidad y sus características de protección. Sin embargo, durante la fase de diseño se identificó que su arquitectura interna fija restringía la flexibilidad requerida para un sistema configurable. Por esta razón, se adoptó una solución basada en dispositivos SCR discretos, lo que permitió diseñar una arquitectura más adaptable y coherente con los objetivos del proyecto, al facilitar la implementación de distintas configuraciones dentro de un mismo módulo físico.

El módulo desarrollado permite el estudio experimental de configuraciones monofásicas representativas de la electrónica de potencia, entre ellas el rectificador controlado de media onda, el rectificador controlado de onda completa y el controlador AC/AC bidireccional de onda completa. Adicionalmente, el sistema permite analizar variantes asociadas al comportamiento de la carga, como el caso de cargas inductivas, y asimismo efectos del uso del diodo de libre paso en rectificadores de onda completa.

Para su operación, el módulo incorpora una etapa de detección de cruce por cero que establece una referencia temporal precisa respecto a la red eléctrica de alterna empleada como fuente de alimentación de los convertidores, una etapa de generación de pulsos de disparo implementada en una plataforma Arduino Uno, y una etapa de aislamiento eléctrico mediante optoacopladores con el fin de proteger el circuito de control frente a perturbaciones eléctricas y altos niveles de tensión (Ned Mohan, 2003)(Rashid, 2014) (Habetler, 1998) (A. J. Pritchard, 2009). En la etapa de potencia, el diseño se implementó con dispositivos equivalentes en

simulación y en montaje físico, de modo que fuera posible mantener coherencia entre ambas fases de validación.

Desde el punto de vista metodológico, el desarrollo del proyecto se apoyó inicialmente en herramientas de simulación para validar el comportamiento funcional del sistema antes de su construcción física. Posteriormente, se realizaron pruebas experimentales en protoboard en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de verificar la sincronización de la etapa de control, la correcta transferencia de los pulsos de disparo hacia la etapa de potencia y la respuesta del sistema bajo diferentes modos de operación para cada una de las configuraciones establecidas. Finalmente, se diseñó e implementó una tarjeta de circuito impreso, buscando un montaje más robusto, organizado y adecuado para prácticas de laboratorio de pregrado. Esta secuencia de simulación, validación e implementación física permitió consolidar una solución experimental alineada con el propósito del proyecto y con las condiciones del laboratorio institucional.

Además del componente técnico, el trabajo responde a una necesidad formativa concreta. Diversos antecedentes han señalado que la incorporación de plataformas experimentales en cursos de electrónica de potencia fortalece la comprensión de los estudiantes, mejora la apropiación de conceptos abstractos y favorece la transferencia de conocimiento hacia contextos reales de ingeniería (Habetler, 1998) (A. J. Pritchard, 2009). En este sentido, el módulo propuesto constituye una solución al problema de disponibilidad experimental identificada en el laboratorio, y se presenta como una herramienta de apoyo para una formación más práctica, analítica y cercana al comportamiento real de los convertidores de potencia.

En consecuencia, este trabajo no se limita al diseño e implementación de un sistema electrónico de potencia, sino que aporta una plataforma experimental configurable orientada a fortalecer la enseñanza de la electrónica de potencia en la UIS.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un módulo configurable para la enseñanza de Electrónica de Potencia, que permita la experimentación con diferentes configuraciones de convertidores de potencia basados en tiristores.

1.2 Objetivos Específicos

Analizar los requisitos técnicos, pedagógicos y normativos necesarios para el diseño del módulo.

Diseñar un módulo configurable que permita implementar al menos cuatro topologías distintas de convertidores de potencia.

Implementar físicamente un modelo funcional del módulo, garantizando su compatibilidad con el laboratorio de la UIS.

Validar el funcionamiento del módulo mediante prácticas experimentales controladas y análisis de su desempeño.

2. Marco Teórico

2.1 Electrónica de potencia y valor práctico del montaje experimental

La electrónica de potencia es la disciplina encargada de convertir, controlar y acondicionar la energía eléctrica mediante dispositivos semiconductores. En un sistema experimental como el desarrollado en este trabajo, esa definición se traduce en la posibilidad de observar cómo cambian tensión, corriente y potencia entregada a una carga cuando se modifica el instante de disparo de los dispositivos (Ned Mohan, 2003)(Maksimovic, 2001).

Desde el punto de vista del trabajo práctico en laboratorio, el hardware experimental cumple una función distinta a la simulación. La simulación permite explorar el comportamiento ideal o controlado del sistema, mientras que el montaje real obliga a considerar cableado, acoplamientos, disparos no deseados, disipación térmica y restricciones de instrumentación. Por ello, la literatura sobre enseñanza de electrónica de potencia reporta que la disponibilidad de plataformas físicas mejora la comprensión de los estudiantes y fortalece la conexión entre teoría y práctica (Habetler, 1998) (A. J. Pritchard, 2009). Este trabajo se apoya precisamente en esa idea: no se busca solamente mostrar una topología, sino facilitar la comparación entre varias configuraciones dentro de un mismo entorno experimental.

2.2 SCR y control por ángulo de disparo

Los SCR son dispositivos semiconductores de cuatro capas y tres terminales que permiten controlar el instante de conducción de una corriente cuando reciben un pulso adecuado en compuerta (Rashid, 2014). Una vez activado, el dispositivo permanece en conducción mientras la corriente que lo atraviesa se mantenga por encima de la corriente de mantenimiento, característica que lo hace especialmente útil en convertidores conectados a la red.

Su aplicación en convertidores monofásicos permite regular la energía transferida a una carga mediante el control del ángulo de disparo α respecto al cruce por cero de la señal de entrada (Ned Mohan, 2003). En términos físicos, el control por fase modifica el intervalo de conducción de los dispositivos de potencia dentro de cada semiciclo, lo cual altera la forma de onda aplicada a la carga y, por tanto, la potencia entregada.

Más allá de la formulación matemática, lo importante para este trabajo es que el control por ángulo de disparo convierte al SCR en el elemento central para relacionar teoría y práctica, ya que el desplazamiento del pulso de compuerta puede observarse experimentalmente tanto en

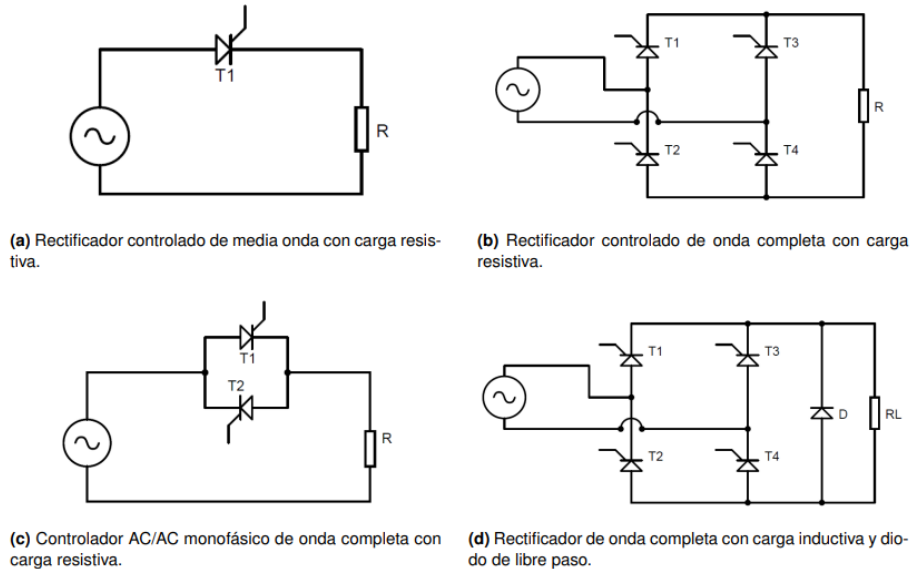
el osciloscopio como en la respuesta de la carga. Las principales configuraciones implementadas en el módulo y sus expresiones de salida asociadas se presentan en la Sección 2.4.

2.3 Configuraciones y tipo de cargas analizadas

El módulo fue concebido para trabajar con cuatro configuraciones experimentales, mostradas en la Figura 1. Las tres primeras corresponden a topologías clásicas ampliamente estudiadas en electrónica de potencia: rectificador monofásico controlado de media onda, rectificador monofásico controlado de onda completa y controlador AC/AC monofásico de onda completa. La cuarta corresponde a la variante del rectificador controlado de onda completa con carga inductiva y diodo de libre paso, orientada al análisis de continuidad de corriente y del efecto del diodo sobre la forma de onda de salida.

Figura 1

Topologías de convertidores implementadas en el módulo configurable.



En la configuración de la Figura 1.a, un SCR controla la conducción únicamente durante el semiciclo positivo de la señal de entrada. Para una carga resistiva, el voltaje promedio de salida puede expresarse como:

$$V_{avg} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde V_m es la amplitud de la fuente de alimentación del convertidor. Esta expresión muestra que, a medida que aumenta el ángulo de disparo, disminuye el intervalo de conducción y, en consecuencia, el valor promedio de la tensión entregada a la carga.

En la topología de la Figura 1.b, el aprovechamiento de ambos semiciclos incrementa el valor promedio de salida respecto al caso de media onda. Para carga resistiva, se tiene:

$$V_{avg} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad \text{Ecuación 2}$$

Esta configuración ofrece una señal de salida más continua y con menor rizado que la obtenida en media onda, lo cual la hace especialmente útil para comparar el efecto del disparo coordinado de dos SCR.

En el controlador AC/AC de la Figura 1.c, la señal de salida conserva su naturaleza alterna, pero se regula el valor eficaz mediante el recorte simétrico de ambos semiciclos. Para carga resistiva, el valor eficaz de salida puede aproximarse por:

$$V_{o,RMS} = V_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right]} \quad \text{Ecuación 3}$$

A diferencia de los rectificadores, en esta topología no se busca obtener una componente continua, sino controlar la energía transferida a una carga de corriente alterna variando el instante de conducción.

Finalmente, la configuración de la Figura 1.d incorpora una carga con componente inductiva y un diodo de libre paso. En este caso, el interés principal no se centra únicamente en el valor promedio de salida, sino en la continuidad de corriente después del cruce por cero y en el papel del diodo como trayectoria alternativa para la corriente almacenada en la inductancia. Esta topología permite observar experimentalmente cómo la presencia de la inductancia modifica el intervalo de conducción de los tiristores, y cómo el diodo de libre paso altera la forma de onda aplicada a la carga.

La incorporación de estas cuatro configuraciones dentro de una misma plataforma responde al propósito de comparar comportamientos con una arquitectura de control común, reduciendo el tiempo de montaje y facilitando el uso del módulo en prácticas guiadas. En el caso de las pruebas con cargas resistivas, se empleó una lámpara incandescente de 120V y 100W como carga visible, ya que su variación de luminosidad ofrece una referencia cualitativa inmediata del cambio de potencia entregada. Para el estudio de la carga inductiva se considera,

además, la necesidad de analizar la circulación de corriente después del cruce por cero de la tensión y el papel del diodo de libre paso.

2.4 Detección de cruce por cero y generación de pulsos

La detección de cruce por cero establece la referencia temporal para el control por fase. Una vez identificado el instante en que la tensión de entrada cambia de signo, el sistema de control introduce un retardo equivalente al ángulo de disparo deseado antes de emitir el pulso de compuerta. Si la red opera a 60Hz, el retardo temporal puede relacionarse con el ángulo eléctrico mediante:

$$t_{\alpha} = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{\alpha}{2\pi f} \quad \text{Ecuación 4}$$

La generación estable de estos pulsos exige sincronización, inmunidad al ruido y amplitud suficiente para superar la corriente de disparo del tiristor (Ned Mohan, 2003)(Microchip Technology, 2018). En este proyecto, la referencia de cruce por cero se acondiciona mediante el circuito presentado en la Figura 2 el cual emplea un transformador reductor (relación 120Vrms/16Vrms) y como componente principal un LM358. Por otro lado, el cálculo del retardo angular y la generación de los pulsos de disparo se implementan en una tarjeta Arduino Uno, tal como se muestra en la Figura 3. En esta etapa, un potenciómetro fija el valor de entrada asociado al ángulo de disparo, y las señales de selección de modo (señales provenientes de los interruptores de configuración del modo de operación) permiten definir la secuencia de conmutación correspondiente a cada topología experimental. Esta solución es conveniente para laboratorio porque facilita el ajuste manual, la repetibilidad del ensayo y la futura incorporación de rutinas de control más avanzadas.

Figura 2

Referencia de cruce por cero usando un LM358.

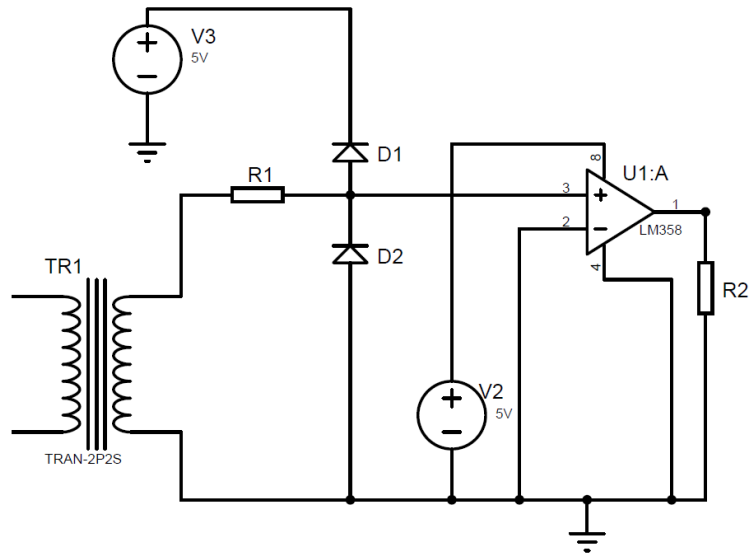
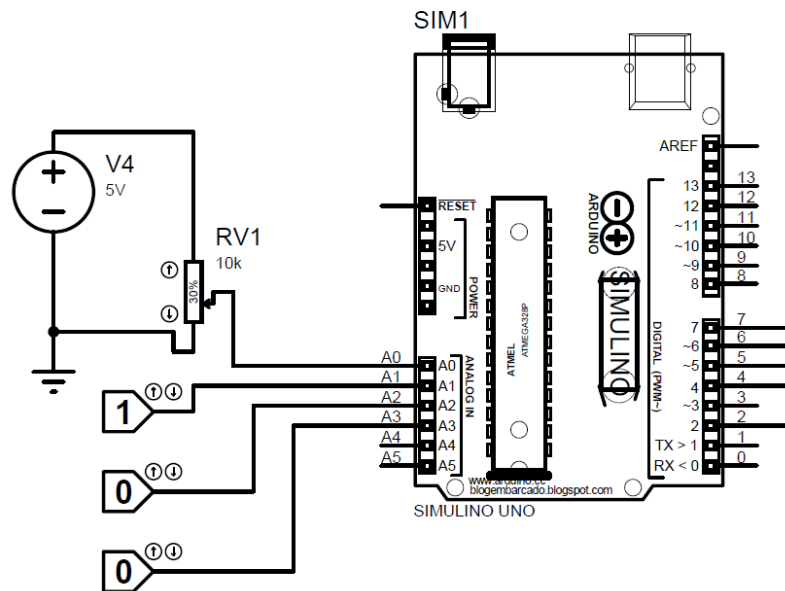


Figura 3

Etapa de retardo y generación de pulsos de disparo empleando la plataforma Arduino

Uno.



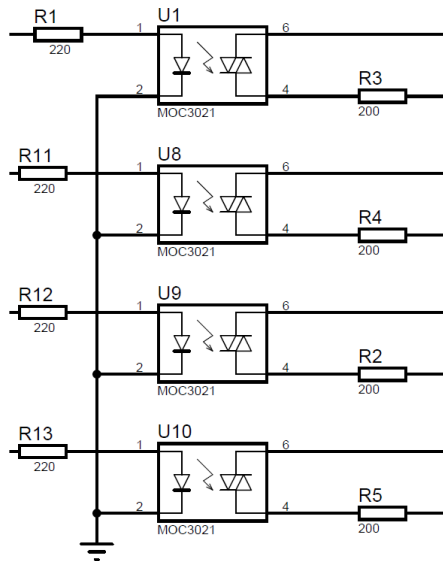
La etapa implementada con Arduino Uno procesa la referencia de cruce por cero y genera los pulsos de disparo sincronizados para los tiristores. Como se muestra en la Figura 3, el microcontrolador recibe el valor del ángulo de disparo mediante un potenciómetro conectado a una entrada analógica y las señales de selección del modo de operación a través de entradas digitales. A partir de la detección del cruce por cero, calcula el retardo temporal equivalente al ángulo seleccionado y, una vez transcurrido este intervalo, emite los pulsos de activación que luego son transferidos de forma segura a la etapa de potencia mediante opto-aislamiento. Esta solución resulta adecuada para el propósito didáctico del módulo, ya que facilita el ajuste del ángulo de disparo, la repetibilidad de los ensayos y la adaptación de la secuencia de conmutación según la topología seleccionada.

2.5 Aislamiento óptico, protección contra transitorios y consideraciones térmicas

En sistemas que trabajan con tensión de red, el aislamiento eléctrico entre la electrónica de control y la etapa de potencia no es opcional. El uso de optoacopladores con salida tipo triac reduce el riesgo de acoplamiento directo y protege el microcontrolador frente a transitorios provenientes de la red Figura 4 (ON Semiconductor, 2020) (Rashid, 2014).

Figura 4

Aislamiento con optoacopladores MOC3021.



La selección de estos elementos debe balancear protección, pérdidas y facilidad de implementación en el entorno de laboratorio (Ned Mohan, 2003)(Rashid, 2014). A esto se suma una consideración térmica importante: al trabajar con dispositivos de potencia y cargas conectadas a la red, la disipación no puede tratarse como un detalle secundario. Por eso el módulo se plantea junto con un disipador que sirva de base térmica para la PCB y con una carcasa que ayude a separar la zona energizada de la interacción del usuario.

2.6 Seguridad e integración física del módulo

El desarrollo de un módulo de laboratorio para electrónica de potencia exige considerar simultáneamente el desempeño eléctrico y la seguridad del usuario. En este proyecto, estas consideraciones se tradujeron en la separación galvánica entre las etapas de control y potencia, el empleo de tensiones reducidas en la etapa de sensado y la definición de una reconfiguración mediante interruptores, con el fin de reducir errores de conexión durante las prácticas. Además, el diseño final del módulo contempla una integración física dentro de una carcasa con disipador

térmico, de modo que el usuario solo tenga expuestos el control de ajuste, los interruptores de configuración y la conexión de la carga. Esta decisión mejora la seguridad de operación, aporta orden mecánico, protege la PCB y favorece el manejo térmico de los dispositivos de potencia.

3. Desarrollo de la solución

3.1 Requisitos técnicos y prácticos

El diseño del módulo se guió por cinco criterios principales: compatibilidad con la red y la infraestructura del laboratorio, capacidad de reconfiguración, seguridad eléctrica, utilidad práctica y posibilidad de integración mecánica segura. La Tabla 1 resume la traducción de estos criterios en decisiones de diseño concretas.

Tabla 1

Requisitos de diseño del módulo y criterios de implementación

Requisito	Justificación	Implementación en el prototipo
Compatibilidad con el laboratorio	El módulo debía operar con las condiciones de la red local y con la instrumentación disponible en la UIS.	Uso de alimentación monofásica de 120Vrms en potencia y transformador reductor a 16Vrms para la detección de cruce por cero.
Reconfiguración topológica	Una sola plataforma debía permitir varias configuraciones experimentales sin rehacer el sistema de control.	SCR discretos, interruptores de configuración, y arquitectura común de control y potencia.
Seguridad eléctrica	El módulo debía proteger al usuario y a la etapa de control frente a la red y a fallas de conexión.	Optoacopladores, separación entre etapas, uso de tensiones reducidas para sensado y zonas de acceso controlado.
Utilidad práctica	El prototipo debía facilitar la	Ajuste del ángulo de disparo con

**Integración
mecánica
y térmica**

observación de formas de onda y la comparación entre convertidores.

El sistema debía reducir la exposición del usuario a partes energizadas y manejar adecuadamente la disipación de calor.

potenciómetro, carga resistiva visible, y guías de laboratorio asociadas.

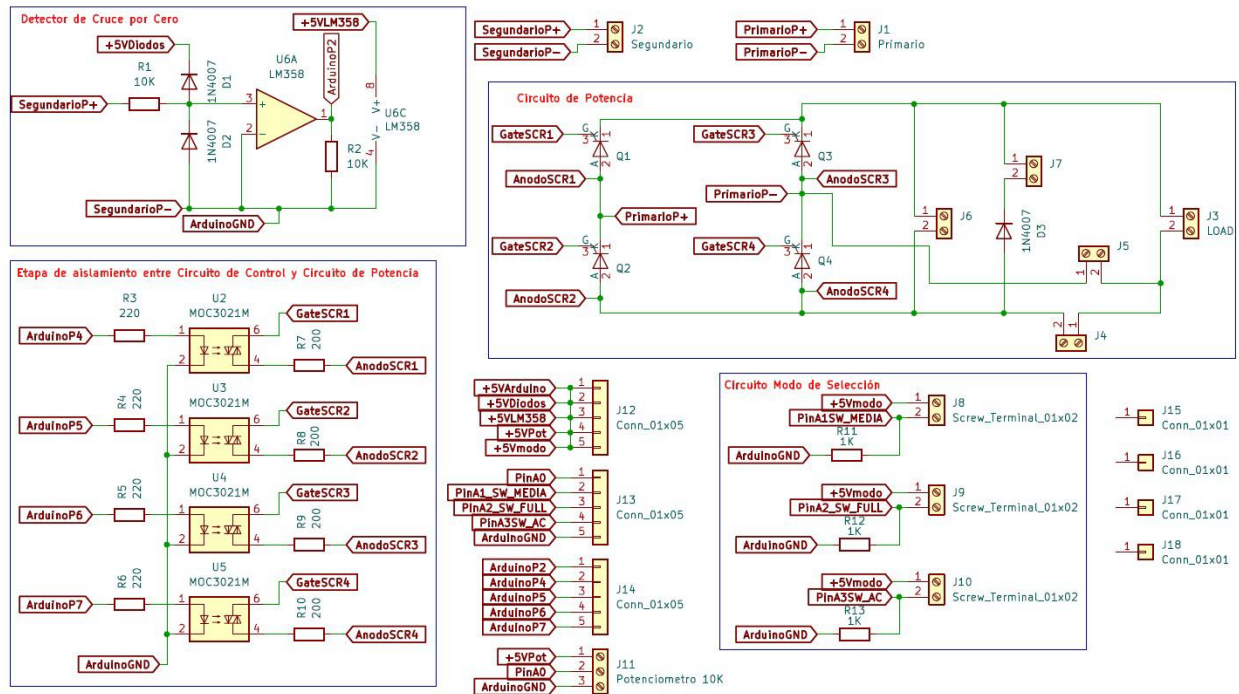
PCB como base de montaje, disipador para la etapa de potencia y carcasa que deje accesibles el potenciómetro, los interruptores de configuración y la conexión de carga.

3.2 Arquitectura general

El módulo configurable desarrollado está conformado por tres bloques funcionales principales: detección y control, aislamiento y potencia. Esta organización permite separar física y funcionalmente las tareas de referencia temporal, selección del modo de operación, desacoplamiento eléctrico y conmutación de potencia, favoreciendo tanto la seguridad como la claridad operativa del sistema. La Figura 5 presenta el esquemático general del módulo implementado. En ella se observa la integración de las tres etapas principales y su interconexión dentro de una misma plataforma reconfigurable.

Figura 5

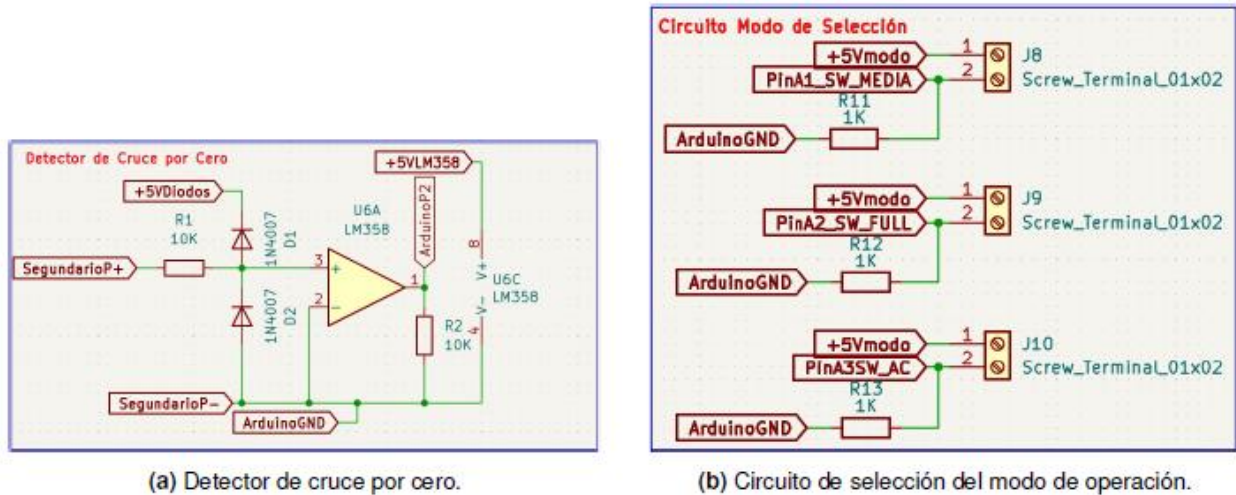
Esquemático general del módulo configurable de convertidores de potencia.



La etapa de detección y control se encarga de establecer la referencia temporal del sistema a partir del cruce por cero de la señal de entrada y de determinar el instante de disparo correspondiente para cada tiristor. Para ello, considera tanto el ángulo de operación ajustado manualmente mediante el potenciómetro, como el modo de funcionamiento seleccionado por el usuario a través de los interruptores de configuración del modo de operación (J8, J9 y J10). A partir de esta información, el sistema genera los pulsos de disparo sincronizados con la red, aplicando el retardo necesario según la topología que se desee implementar. La Figura 6 muestra el detalle de este bloque funcional.

Figura 6

Detalle de la etapa de detección y control del módulo.



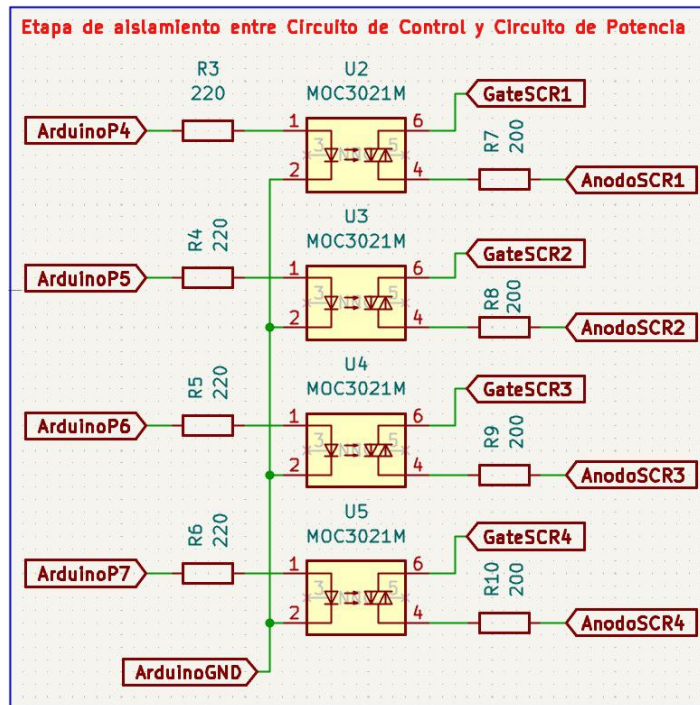
(a) Detector de cruce por cero.

(b) Circuito de selección del modo de operación.

La etapa de aislamiento tiene como función transferir las señales de disparo desde el circuito de control hacia la etapa de potencia sin establecer una conexión galvánica directa entre ambas. Esta separación eléctrica protege al sistema de control frente a perturbaciones provenientes de la red o de la conmutación de potencia, y constituye un elemento esencial para la operación segura del módulo en un entorno de laboratorio. Este desacoplamiento se implementó mediante optoacopladores MOC3021, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

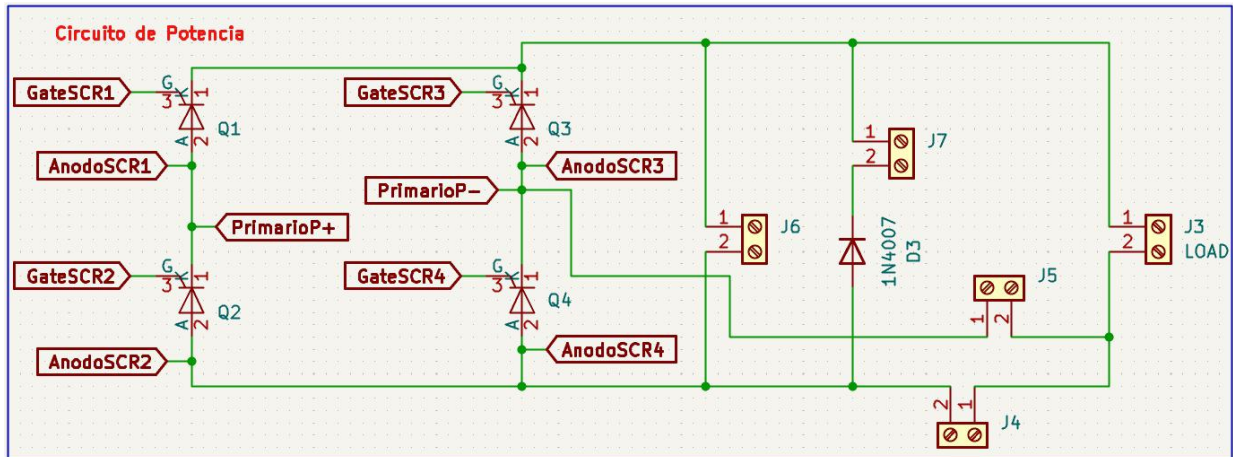
Aislamiento de control y potencia con MOC3021.



Finalmente, la etapa de potencia materializa eléctricamente la topología bajo estudio mediante la disposición de los tiristores, el diodo de libre paso y los puntos de conexión de carga. Su configuración depende de la selección realizada por el usuario a través de los interruptores de configuración de potencia (J4, J5, J6 y J7), los cuales permiten reconfigurar las trayectorias de conducción del convertidor según la práctica experimental que se desee ejecutar. En esta misma etapa se conecta la carga bajo estudio (conector J3), sobre la cual se observa el efecto del ángulo de disparo y del modo de operación seleccionado. La Figura 8 presenta el detalle de esta etapa.

Figura 8

Esquema de potencia con tiristores, configuración y carga.



La separación del sistema en estos tres bloques no solo facilita la comprensión del funcionamiento general del módulo, sino que también permitió validar cada etapa de manera independiente durante el proceso de simulación, prototipado y montaje final. De este modo, la arquitectura propuesta aporta orden funcional al diseño y refuerza el carácter didáctico y seguro de la plataforma desarrollada. Asimismo, constituye la base para la reconfiguración experimental del equipo, la cual se explica en la sección siguiente.

3.3 Materiales y componentes principales

Además del criterio topológico, el desarrollo del módulo exigió seleccionar materiales y componentes coherentes con el nivel de tensión, la disipación esperada, la disponibilidad local y la integración física del sistema. La Tabla 2 resume los elementos principales utilizados en el proyecto y su función dentro del sistema.

Tabla 2

Materiales y componentes principales empleados en el módulo.

Bloque	Elemento principal	Función Dentro del Módulo
Control	Arduino Uno y potenciómetro.	Generación del retardo de disparo y ajuste manual del ángulo de disparo.
Sensado	Transformador 120/16V y LM358.	Obtención de una referencia segura de cruce por cero y acondicionamiento de señal.
Aislamiento	Optoacopladores MOC3021.	Separación galvánica entre el microcontrolador y los SCR de la etapa de potencia.
Potencia	Tiristores BT151-500R y elementos pasivos de disparo/protección.	Implementación de las configuraciones del convertidor y conmutación de la energía entregada a la carga.
Carga de prueba	Lámpara incandescente de 120V, 100W como carga visible y conexiones de carga.	Validación cualitativa y observación visible del cambio de potencia.
Integración física	PCB, interruptores de configuración, disipador y carcasa.	Organización del sistema, reconfiguración eléctrica, soporte térmico y mejora de la seguridad de uso.

La selección anterior responde tanto a criterios técnicos como de uso en laboratorio. Por un lado, se eligieron elementos compatibles con el rango de trabajo del laboratorio. Por otro, se priorizaron componentes que permiten identificar con claridad qué ocurre en cada bloque del sistema y cómo se integran entre sí dentro del módulo. Además de los componentes electrónicos, fue necesario considerar elementos mecánicos como el disipador, la carcasa y los sistemas de

fijación, ya que el prototipo se concibe como un equipo de laboratorio y no solo como un circuito aislado.

3.4 Configuración del módulo y lógica de operación

La reconfiguración del módulo se planteó en dos niveles complementarios: un primer nivel asociado a la lógica de control y un segundo nivel asociado a la trayectoria de potencia. En consecuencia, el usuario no modifica directamente el algoritmo de disparo ni reconstruye manualmente el convertidor para cada práctica, sino que selecciona el modo de operación desde la etapa de control y, posteriormente, habilita la configuración eléctrica correspondiente en la etapa de potencia. Esta organización permite que una misma base de hardware implemente distintas topologías con una secuencia de uso clara, repetible y adecuada para el entorno de laboratorio.

3.4.1 Interruptores de configuración del modo de operación

Los interruptores de configuración del modo de operación (J8, J9 y J10) pertenecen a la etapa de control y determinan la estrategia de disparo que debe ejecutar el sistema. Como se muestra en la Figura 6, estos interruptores se implementaron mediante las entradas asociadas a las señales PinA1_SW_MEDIA, PinA2_SW_FULL y PinA3SW_AC, cada una de ellas conectada a una referencia de 5V y a una resistencia de polarización hacia tierra. De esta forma, cuando el interruptor correspondiente se activa, la entrada digital es llevada a nivel lógico alto y el sistema reconoce el modo de operación solicitado.

En esta arquitectura, cada modo de operación define la lógica temporal de los pulsos de compuerta. En el modo de media onda, el sistema genera el disparo únicamente para la trayectoria correspondiente al semiciclo positivo. En el modo de onda completa, la lógica de control coordina los disparos requeridos para aprovechar ambos semiciclos de la señal de

entrada. En el modo AC/AC, la estrategia de disparo conserva la naturaleza alterna de la señal de salida y regula el valor eficaz mediante el recorte simétrico de ambos semiciclos.

Desde el punto de vista operativo, estos interruptores no definen por sí solos la topología final del convertidor, sino la familia de comportamiento de disparo que debe seguir el módulo. Por esta razón, la selección del modo de operación debe complementarse con la configuración correspondiente de la etapa de potencia. Para evitar ambigüedades durante la práctica, se estableció como criterio de uso que solo un modo de operación debe estar activo a la vez.

3.4.2 Interruptores de configuración de potencia

Los interruptores de configuración de potencia (J4, J5, J6 y J7) pertenecen a la etapa mostrada en la Figura 8 y se encargan de habilitar la trayectoria de conducción que materializa eléctricamente la topología seleccionada. Mientras que los interruptores de modo de operación actúan sobre la lógica de disparo, los interruptores de potencia determinan qué dispositivos participan en la conversión, cómo queda conectada la carga y, cuando aplica, si se incorpora o no el diodo de libre paso.

Esta separación entre selección lógica y selección de trayectoria eléctrica fue una decisión de diseño importante, ya que permite reutilizar la misma base de control para varias prácticas experimentales sin modificar la arquitectura fundamental del módulo. En otras palabras, el control determina cuándo deben dispararse los tiristores, mientras que la configuración de potencia determina qué trayectoria de energía queda habilitada dentro del convertidor.

En la práctica, la configuración de potencia se realiza habilitando únicamente los caminos de conducción necesarios para cada topología. Para el rectificador de media onda, se habilita una sola trayectoria controlada hacia la carga resistiva. Para el rectificador de onda completa, se

habilitan las trayectorias complementarias que permiten aprovechar ambos semiciclos. Para el controlador AC/AC, se configura la trayectoria bidireccional que conserva la naturaleza alterna de la señal de salida. Finalmente, para la variante con carga inductiva, se mantiene la configuración base de onda completa y se habilita adicionalmente la rama del diodo de libre paso junto con la carga autorizada para este ensayo.

3.4.3 Configuración del módulo para cada topología

La Tabla 3 resume la relación entre los interruptores de modo de operación, la configuración de potencia y el propósito experimental asociado a cada topología implementada. Esta tabla constituye la referencia operativa mínima para el uso del módulo y sirve además como puente entre la arquitectura general del sistema y las guías de laboratorio presentadas en los anexos.

Tabla 3

Configuración funcional del módulo para las topologías implementadas.

Topología	Modo de operación activo	Interruptores de configuración de potencia
Rectificador controlado de media onda	Activar (PinA1_SW_MEDIA). Mantener inactivos los demás modos.	J8 J5 activado. J4, J6, J7 desactivados.
Rectificador controlado de onda completa	Activar (PinA2_SW_FULL). Mantener inactivos los demás modos.	J9 J4 activado. J5, J6 y J7 desactivados.
Controlador AC/AC	Activar J10 (PinA3SW_AC). Mantener inactivos los demás modos.	J5, J6 activados. J4, J7 desactivados.

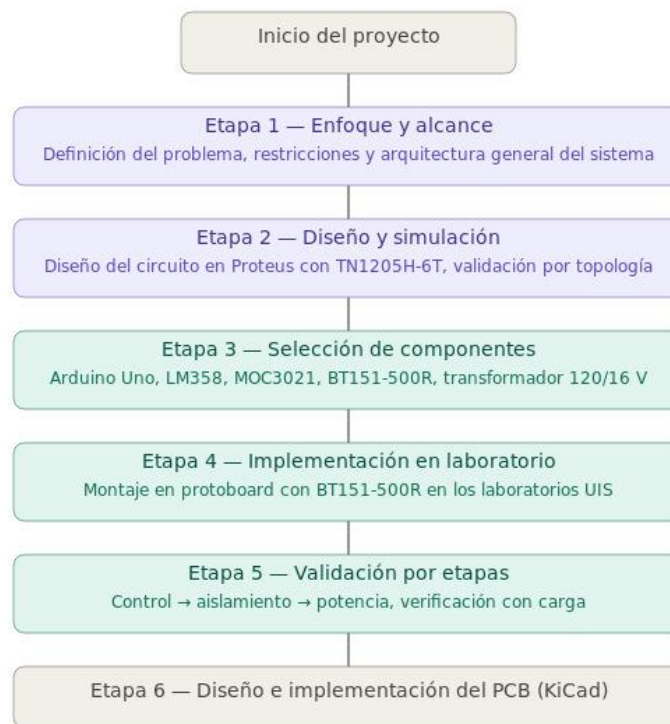
Rectificador de onda completa con carga inductiva y diodo de libre paso	Activar (PinA2_SW_FULL). Mantener inactivos los demás modos.	J9 J4, J7 J5, J6	activados. desactivados.
--	--	------------------	--------------------------

3.5 Etapas metodológicas del proyecto

La Figura 9 resume las etapas metodológicas del proyecto, desde la definición del problema hasta el diseño final e implementación del PCB.

Figura 9

Fases de desarrollo: Módulo de convertidores de potencia.



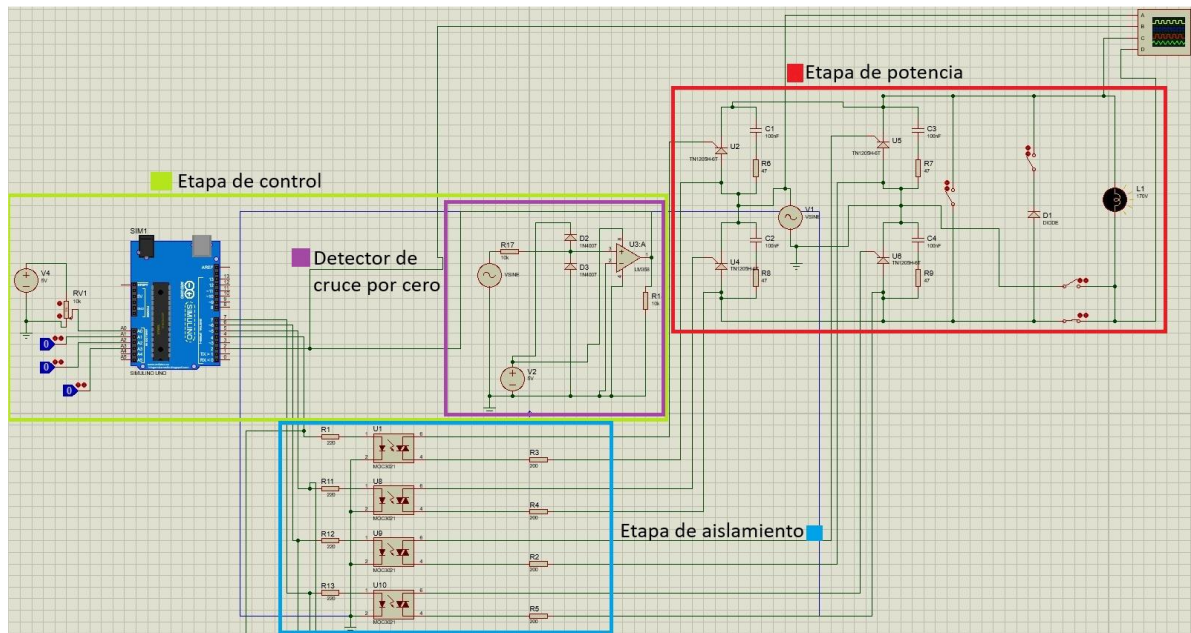
3.6 Simulación del sistema

La validación comenzó con una fase de diseño conceptual y simulación en Proteus. La simulación permitió verificar la secuencia de disparo, la sincronización con el cruce por cero y el comportamiento esperado de las configuraciones implementadas antes de construir el montaje

físico. Como se aprecia en la Figura 10, el esquema se organizó en las mismas tres etapas que luego se mantuvieron en la realización experimental: control, aislamiento y potencia.

Figura 10

Implementación y simulación de las etapas de control, aislamiento y potencia.



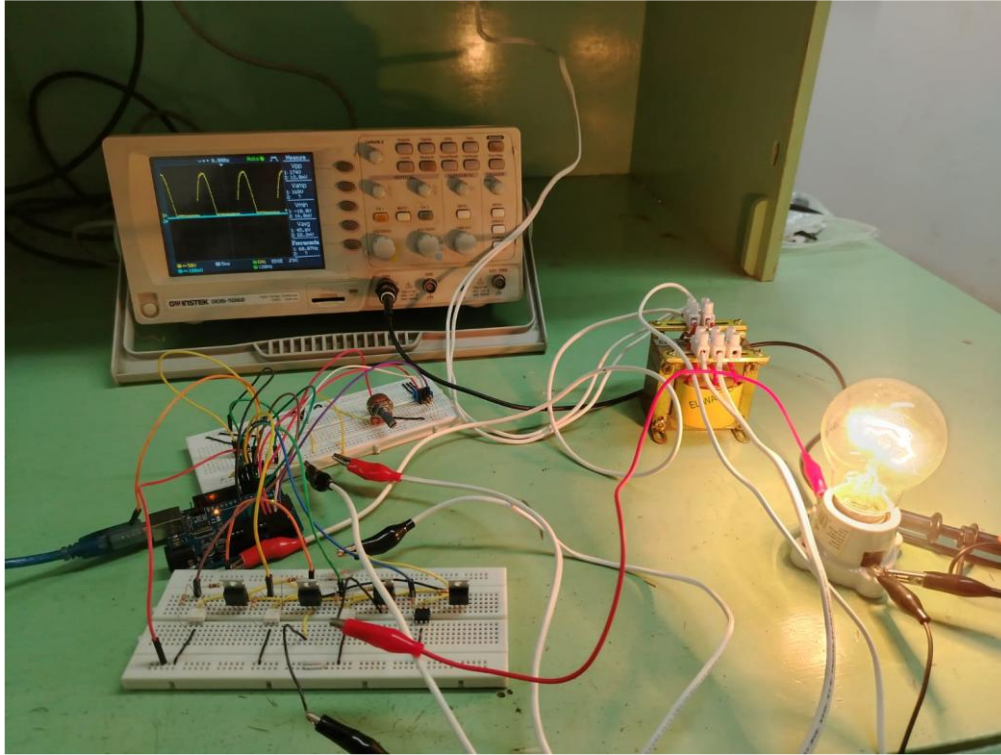
Esta fase resultó especialmente útil para anticipar errores de conexión, validar la secuencia de disparo de los pulsos de los tiristores, y contrastar la respuesta esperada de cada configuración antes de trabajar con tensiones reales. Los archivos correspondientes a esta etapa se incluyen dentro del paquete de anexos técnicos del proyecto (Apéndice E).

3.7 Implementación en protoboard

Una vez validado el comportamiento funcional del sistema en simulación, se realizó la implementación experimental en protoboard en los laboratorios de la UIS. Esta etapa permitió depurar el circuito de disparo, verificar la interacción entre las etapas y comprobar la respuesta del sistema con una carga resistiva real. La Figura 11 muestra el montaje experimental utilizado en esta fase.

Figura 11

Implementación en protoboard del módulo de potencia.



Esta fue la etapa de mayor ajuste, porque allí se evidenciaron aspectos como ruido en el sensado, verificación de niveles de disparo, orden de cableado y facilidad de reconfiguración. Además, permitió obtener registros audiovisuales del funcionamiento del sistema en diferentes modos de operación, soportes que hacen parte del material anexo adjunto al proyecto (Apéndice F).

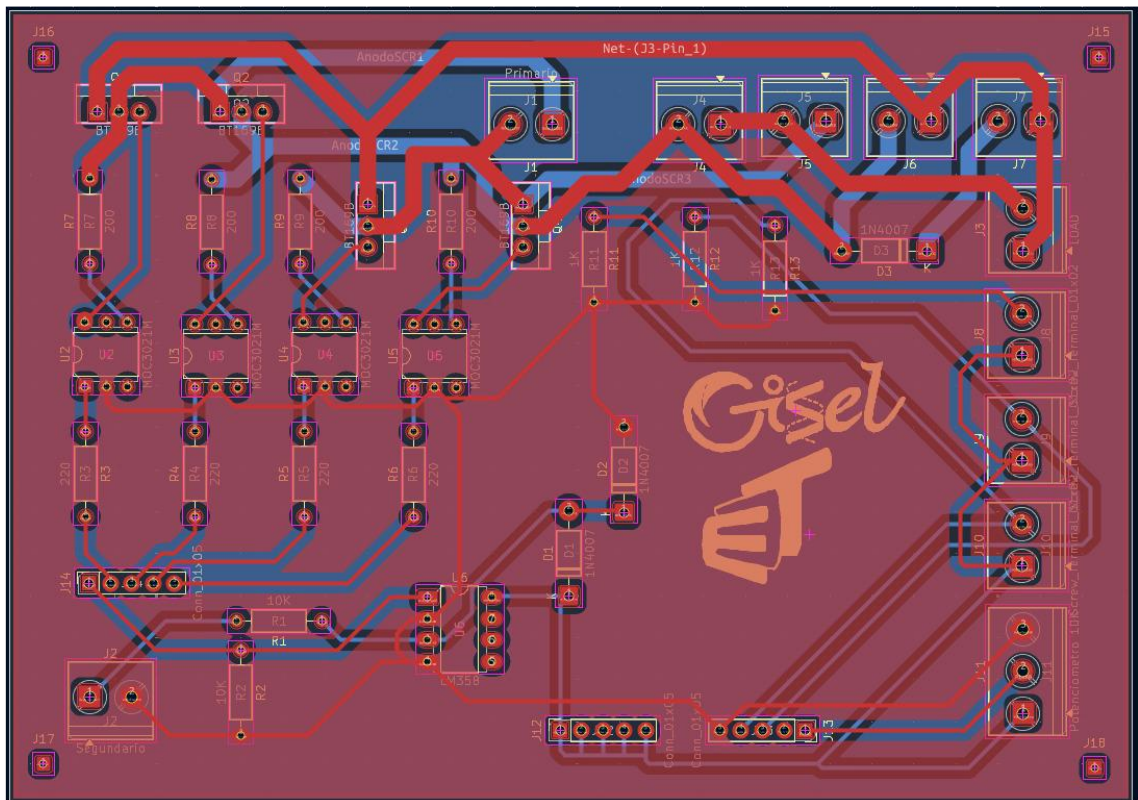
3.8 Diseño, fabricación y ensamblaje del PCB

Con base en las pruebas preliminares se diseñó, fabricó y ensambló una tarjeta de circuito impreso. La tarjeta se diseñó de tal manera que permite la integración de los interruptores de configuración y el potenciómetro a ubicar en la carcasa del módulo, al igual que la tarjeta de control y la interfaz con la carga, lo cual condujo a un montaje más robusto y apropiado para

futuras prácticas de laboratorio. La Figura 12 presenta el diseño de PCB empleado como base para la tarjeta fabricada.

Figura 12

Diseño de la tarjeta de circuito impreso empleado para la fabricación del módulo.



La implementación en PCB no solo redujo el desorden del cableado respecto al protoboard, sino que también mejoró la estabilidad mecánica del prototipo y sentó la base para una integración más segura del sistema. Como paso de consolidación, el módulo se plantea montado sobre un disipador de calor y alojado en una carcasa, dejando expuestos únicamente los elementos necesarios para la práctica: el potenciómetro de ajuste, los interruptores de configuración y la conexión de la carga. De esta manera, la integración física deja de ser un detalle accesorio y se convierte en una decisión de seguridad y usabilidad.

La documentación de diseño, fabricación y ensamble de esta etapa también se incluye dentro del material complementario del proyecto, junto con la información de ruteo, disposición de los interruptores y montaje físico del módulo.

3.9. Configuraciones experimentales implementadas

El sistema se organizó para soportar cuatro configuraciones experimentales con una misma base de control y potencia reconfigurable. La Tabla 4 resume el alcance práctico de cada una y su relación con las guías de laboratorio elaboradas como material complementario del trabajo.

Tabla 4

Configuraciones experimentales implementadas en el módulo.

Configuración	Propósito práctico	Guía asociada
Rectificador controlado de media onda.	Analizar la conducción parcial del semiciclo positivo y la relación entre α y el voltaje promedio de salida.	Anexo A
Rectificador controlado de onda completa.	Comparar el aprovechamiento de ambos semiciclos frente al caso de media onda y observar la reducción de rizado.	Anexo B
Controlador AC/AC.	Estudiar el control del valor eficaz de la tensión manteniendo la naturaleza alterna de la señal de salida.	Anexo C
Rectificador de onda completa con carga inductiva y diodo de libre paso.	Analizar la continuidad de corriente y el efecto del diodo de libre paso sobre la forma de onda en una carga RL.	Anexo D

3.10. Documentación complementaria y anexos

Con el fin de que el módulo pueda ser replicado y utilizado más allá del informe principal, el proyecto se acompaña de una estructura de anexos que organiza la información de soporte en cuatro grupos. El primero corresponde a las guías de laboratorio para las configuraciones implementadas (Apéndice A, Apéndice B, Apéndice C, Apéndice D). El segundo reúne los archivos de simulación y esquemáticos del sistema en Proteus (Apéndice E). El tercero recopila videos y registros de la implementación en protoboard para los distintos modos de operación (Apéndice F). El cuarto compila el diseño de la PCB, su proceso de ensamblaje y la información de integración física del módulo (Apéndice G).

Esta organización es importante porque permite mantener el hilo del informe principal y, al mismo tiempo, conservar los soportes técnicos y audiovisuales que respaldan el trabajo realizado.

3.11. Resultados experimentales

La validación experimental del módulo se realizó principalmente mediante observación de formas de onda en osciloscopio, verificación de los pulsos de disparo respecto al cruce por cero y respuesta de una carga resistiva (lámpara incandescente). El énfasis se concentró en demostrar la operación correcta de cada configuración, la coherencia entre simulación y montaje físico, y la facilidad de reconfiguración del sistema.

3.11.1. Verificación del sistema de control por ángulo de disparo

La primera verificación consistió en comprobar que el circuito de detección de cruce por cero generara una referencia temporal estable y que el sistema de disparo permitiera desplazar los pulsos dentro del semiciclo según el valor del potenciómetro. La Figura 13 muestra la señal

sinusoidal medida en el secundario del transformador y la señal de detección de cruce por cero, mientras que la Figura 14 evidencia el cambio de posición de los pulsos de disparo al modificar el ángulo de disparo.

Figura 13

Salida del transformador (sinusoidal) y del detector de cruce por cero (LM358).

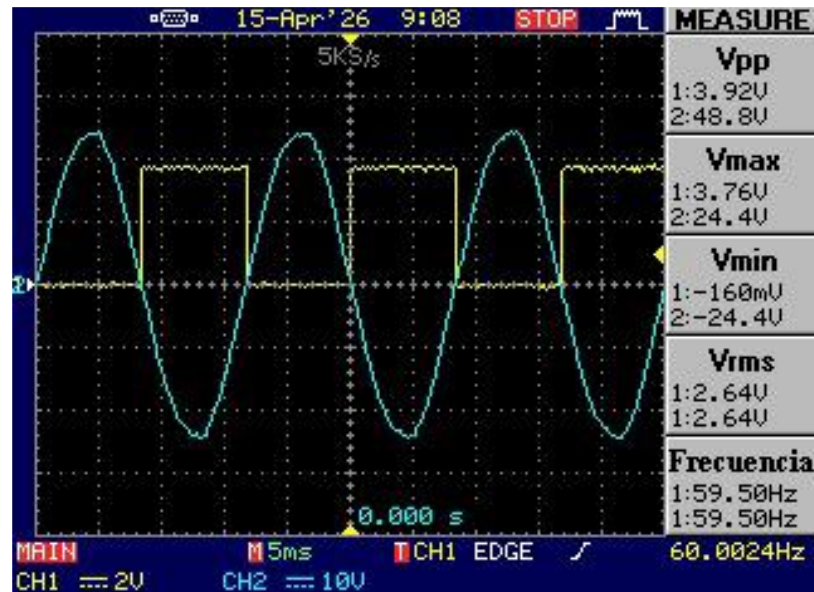
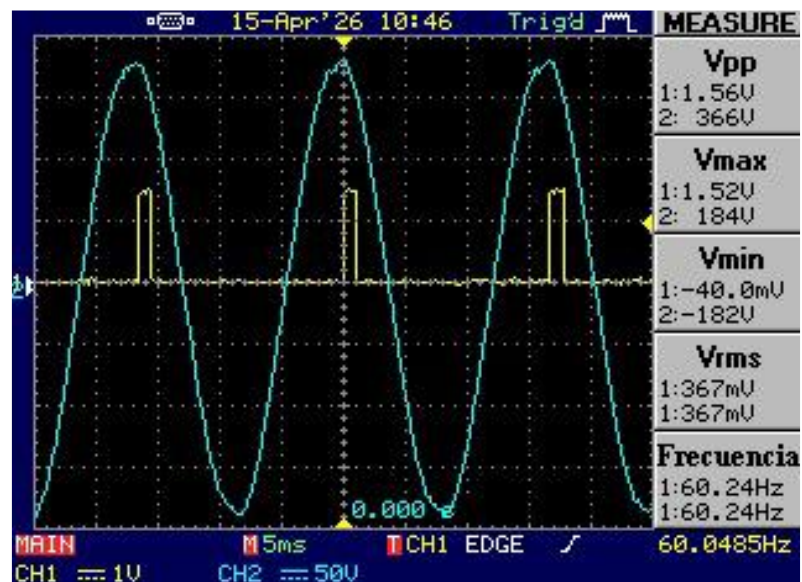


Figura 14

Variación del ángulo de disparo y su desplazamiento respecto a la red sinusoidal.



Estos registros confirman que el sistema establece una referencia temporal correcta sobre la red y que el retardo de disparo puede variarse de forma controlada, condición indispensable para la operación de las configuraciones implementadas.

3.11.2 Rectificador controlado de media onda

En la configuración de media onda se observó la conducción exclusiva del semiciclo positivo, con bloqueo durante el semiciclo negativo. La Figura 15 muestra la forma de onda obtenida para un caso de disparo cercano al inicio del semiciclo, mientras que la Figura 16 ilustra el retraso del instante de conducción al aumentar α .

Figura 15

Forma de onda: Rectificador controlado de media onda (experimental).

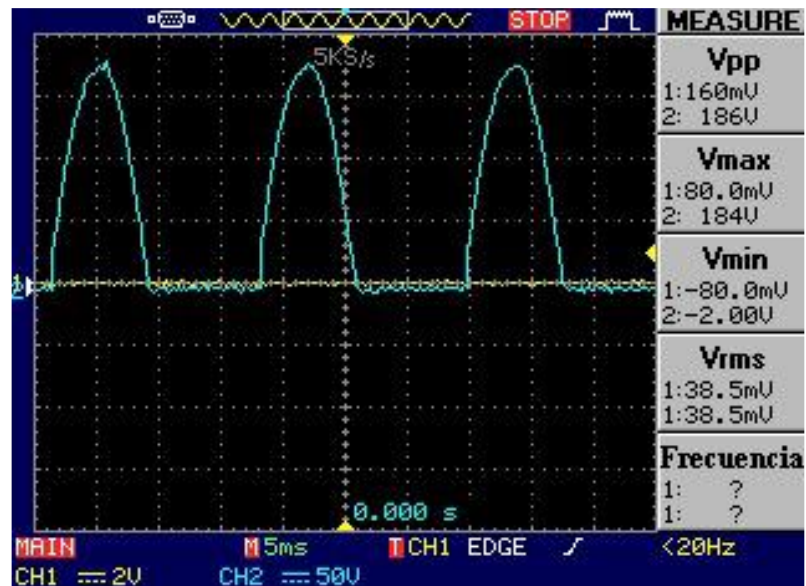
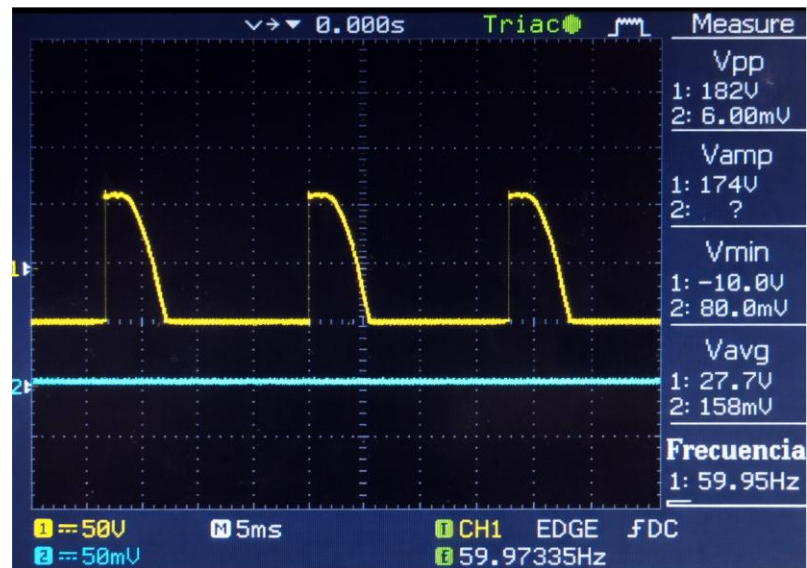


Figura 16

Efecto del aumento del ángulo de disparo en la onda de salida.



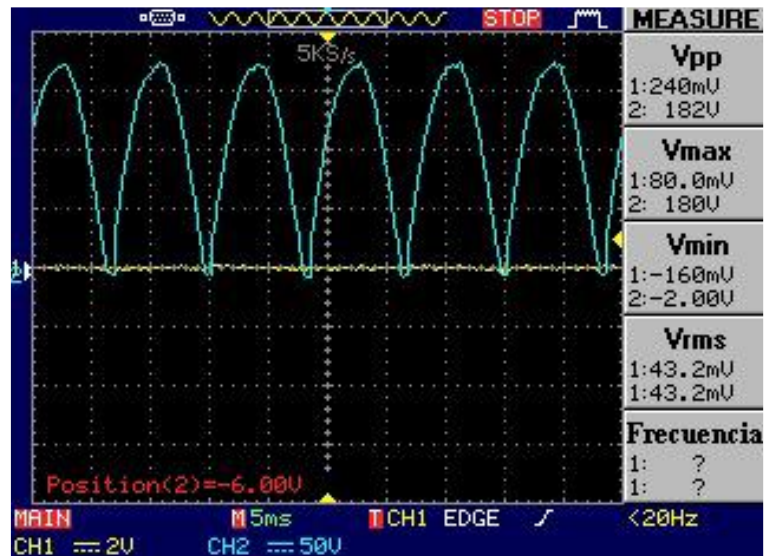
Los resultados muestran la relación esperada entre el aumento del ángulo de disparo y la reducción del intervalo de conducción, lo que se traduce en una menor energía transferida a la carga. Esta configuración también fue útil como primera validación visible del sistema, porque el cambio en la luminosidad de la lámpara permitió relacionar el oscilograma con un efecto físico fácilmente perceptible durante la práctica.

3.11.3. Rectificador controlado de onda completa

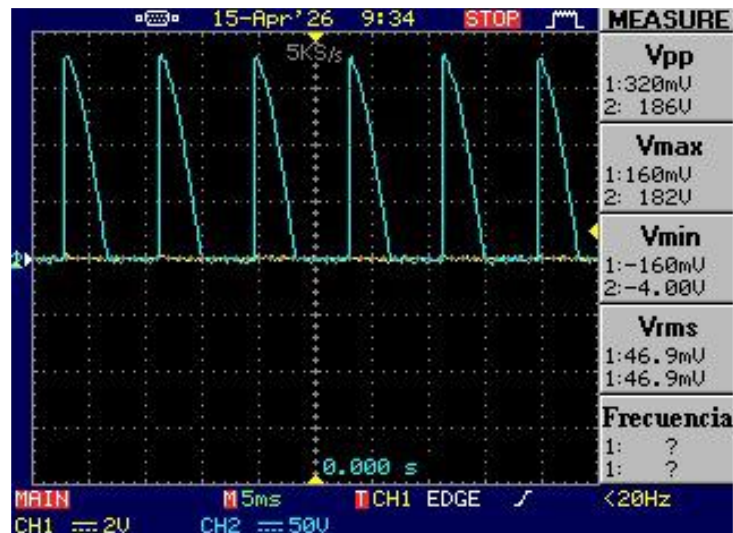
En la configuración de onda completa se verificó el aprovechamiento de ambos semiciclos de la señal de entrada mediante el disparo coordinado de dos SCR. La Figura 17 presenta la forma de onda obtenida experimentalmente, y la Figura 18 muestra cómo la variación de α desplaza el inicio de la conducción en cada semiciclo.

Figura 17

Forma de onda: Rectificador controlado de onda completa (experimental).

**Figura 18**

Efecto del aumento del ángulo de disparo en la onda de salida.



En comparación con el rectificador de media onda, esta configuración aprovecha con mayor eficiencia la señal de entrada, coherentemente con la teoría presentada en el capítulo anterior. Dentro de este mismo bloque de análisis se consideró además la variante con carga inductiva y diodo de libre paso. Aunque esa práctica no se documenta aquí con oscilogramas

adicionales, sí forma parte del alcance del módulo y del material anexo, donde se orienta el estudio de continuidad de corriente y del efecto del diodo sobre la respuesta del rectificador de onda completa (Apéndice D).

3.11.4. Controlador AC/AC

La configuración AC/AC mantuvo la naturaleza alterna de la señal de entrada en la salida y permitió controlar su valor eficaz mediante el recorte de ambos semiciclos. Las figuras 19, 20 y 21 evidencian que la conducción se retrasa de acuerdo con el ángulo de disparo establecido y que la fracción de señal transferida a la carga disminuye a medida que α aumenta.

Figura 19

Forma de onda de salida del convertidor AC/AC con control por ángulo de disparo.

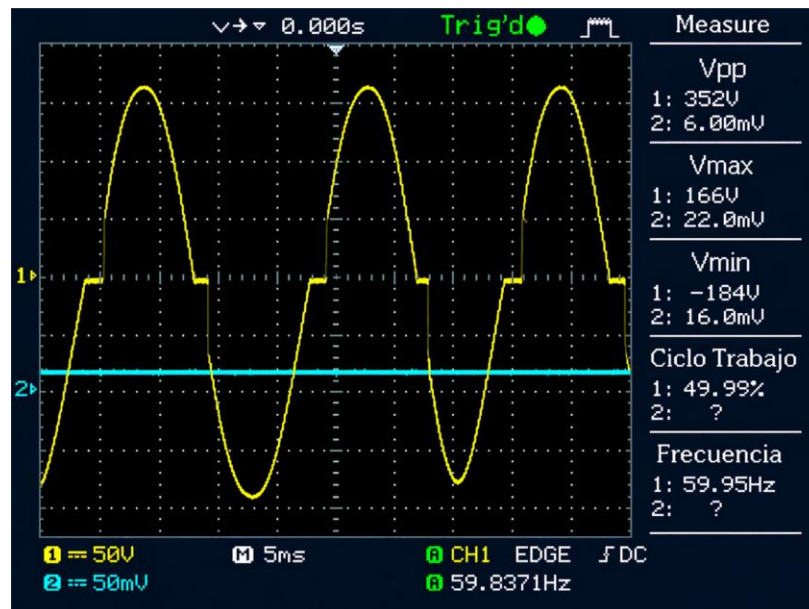
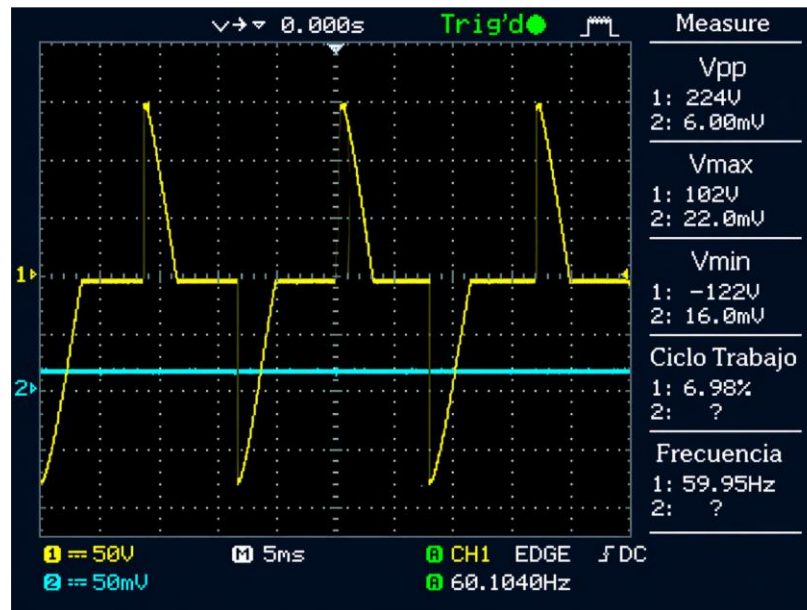
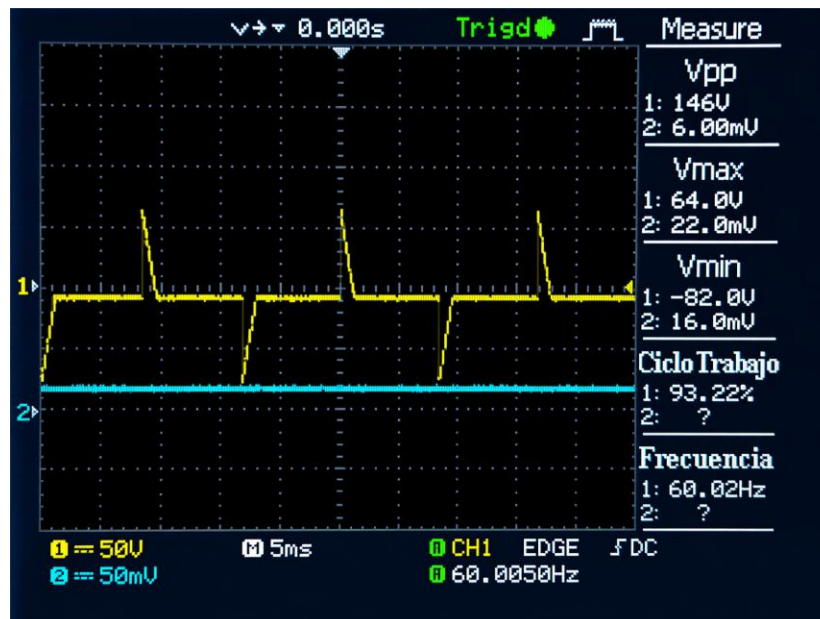


Figura 20

Onda de salida del convertidor AC/AC para un ángulo de disparo intermedio.

**Figura 21**

Onda de salida del convertidor AC/AC para un ángulo de disparo mayor.



Esta respuesta confirma que el módulo no solo permite rectificación controlada, sino también regulación de tensión alterna con la misma base de control y potencia.

3.12. Aportes prácticos, de seguridad y de pertinencia

El proyecto aporta una plataforma que acerca al estudiante al comportamiento real de convertidores monofásicos basados en tiristores, con la ventaja de que las configuraciones pueden compararse dentro de un mismo entorno experimental. La existencia de guías asociadas y de anexos técnicos facilita la integración del módulo en asignaturas de Electrónica de Potencia y fortalece el componente práctico del curso, en línea con los beneficios reportados por la literatura especializada sobre hardware experimental (Habetler, 1998) (A. J. Pritchard, 2009).

Desde el punto de vista de seguridad, el sistema adopta aislamiento óptico, transformador reductor para sensado y una separación clara entre la etapa de control y la de potencia. A esto se suma la decisión de integrar el conjunto en una carcasa con disipador, dejando accesibles únicamente las variables que deben intervenir durante la práctica. Desde el punto de vista institucional, el módulo resulta pertinente porque responde a la necesidad local de disponer de un equipo reconfigurable, documentado y adaptado a la infraestructura de laboratorio y a la frecuencia de red utilizada en el contexto colombiano.

4. Conclusiones

Se diseñó, implementó y validó un módulo configurable para el estudio de convertidores monofásicos basados en tiristores, alineado con las necesidades del laboratorio de Electrónica de Potencia de la UIS y con el objetivo de fortalecer la formación experimental de los estudiantes.

La migración desde una idea inicial basada en encapsulados comerciales hacia una arquitectura con SCR discretos fue una decisión de diseño acertada, porque incrementó la flexibilidad del sistema y permitió implementar varias configuraciones experimentales con una misma base de control y potencia reconfigurables.

La validación por etapas en simulación, protoboard y PCB demostró coherencia entre el planteamiento teórico y el comportamiento experimental del sistema. En particular, se comprobó la correcta sincronización del disparo con el cruce por cero y el efecto del ángulo de disparo sobre la forma de onda de salida en las configuraciones evaluadas.

El módulo quedó habilitado para cuatro configuraciones experimentales: media onda, onda completa, AC/AC y onda completa con carga inductiva y diodo de libre paso. Esto amplía el potencial práctico de la plataforma y facilita el diseño de prácticas comparativas dentro de una misma asignatura.

El trabajo entrega una solución con valor académico e institucional: académico, porque favorece el aprendizaje activo mediante el análisis de hardware real; e institucional, porque ofrece una base propia y adaptable para futuras prácticas de laboratorio. Además, la integración propuesta con carcasa y disipador refuerza la orientación del módulo hacia un uso seguro y repetible en entorno docente.

5. Recomendaciones

En esta sección se plantean algunas recomendaciones orientadas a la mejora y ampliación del módulo desarrollado, así como posibles líneas de trabajo futuro que permitan fortalecer su aplicación en el ámbito de la electrónica de potencia.

Se recomienda, como línea de trabajo futuro, la incorporación de instrumentación integrada dentro del módulo que permita la medición directa de variables como tensión y corriente, facilitando el análisis del comportamiento de los convertidores sin depender exclusivamente de equipos externos.

Asimismo, se sugiere la implementación de una interfaz de control digital que permita ajustar el ángulo de disparo de manera más precisa y reproducible, ampliando las posibilidades de experimentación y mejorando la interacción del usuario con el sistema.

Considerando las características del módulo desarrollado y su enfoque orientado al aprendizaje práctico, se recomienda su implementación a mayor escala en laboratorios académicos, con el fin de facilitar el acceso de un mayor número de estudiantes a herramientas experimentales en el área de electrónica de potencia.

Referencias Bibliográficas

A. J. Pritchard, R. W. (2009). Effectiveness of hardwarebased. *52(1)*, 34–41.

Habetler, T. G. (1998). Teaching power electronics with laboratory experience. *41(2)*, 143–147.

Maksimovic, R. W. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. Kluwer Academic.

Microchip Technology. (2018). Obtenido de Zero-Cross Detection Techniques:

<https://www.microchip.com>

Ned Mohan, T. M. (2003). *ower Electronics: Converters, Applications*,. John Wiley & Sons, 3 edition.

ON Semiconductor. (2020). *MOC3021 Optoisolator Triac Driver Output Datasheet*. Obtenido de ON Semiconductor: <https://onsemi.com>

Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*. Pearson, 4 edition.

Semikron. (2022). *Semikron Danfoss* . Obtenido de SEMITEACH Thyristors - Training Equipment for Power Electronics: <https://www.semikron-danfoss.com>

Apéndices

Nota de configuración del módulo: En todas las prácticas, la selección del modo de operación debe realizarse activando un único interruptor de configuración de modo de operación a la vez. Asimismo, en la etapa de potencia solo deben cerrarse los interruptores correspondientes a la topología bajo estudio, manteniendo abiertos los demás para evitar trayectorias de conducción no deseadas.

Apéndice A. Guía de rectificador controlado de media onda

Propósito y alcance

Esta guía tiene como propósito analizar el comportamiento del rectificador controlado de media onda implementado en el módulo, relacionando el ángulo de disparo α con el intervalo de conducción, la forma de onda de salida y la potencia transferida a una carga resistiva. La práctica sirve además como introducción operativa al uso del sistema, porque permite verificar la correspondencia entre el ajuste del potenciómetro, la generación del pulso de compuerta y la respuesta visible de la carga.

Configuración del módulo

Para ejecutar esta práctica debe activarse el modo de operación de media onda mediante el interruptor J8 en la etapa de control. En la etapa de potencia debe cerrarse el interruptor J5, correspondiente a la trayectoria de conducción de esta topología. Los demás interruptores de control y de potencia deben permanecer abiertos.

Tabla 5

Configuración requerida del módulo para la práctica de media onda.

Elemento	Configuración
Interruptores de modo de operación	Cerrar J8. Mantener abiertos J9 y J10.

Interruptores de potencia

Cerrar J5. Mantener abiertos J4, J6 y J7.

Propósito experimental

Analizar la conducción parcial del semiciclo positivo y relacionar el ángulo de disparo con el valor promedio de la tensión de salida.

Consideraciones generales de seguridad

1. Las consideraciones de esta sección aplican también a las prácticas de los Apéndices B, C y D.
2. Realice cualquier cambio de topología o de conexión de carga con el módulo desenergizado.
3. Verifique que únicamente esté activo el modo de operación requerido mediante los interruptores de configuración del módulo.
4. Mantenga accesibles solo el potenciómetro, los interruptores de configuración y los puntos de conexión de la carga.
5. Emplee sondas y escalas de osciloscopio adecuadas para la tensión medida y siga la conexión autorizada por el docente.
6. No modifique simultáneamente la configuración del módulo y el valor del ángulo de disparo mientras el sistema esté energizado.

Resultados de aprendizaje esperados

1. Identificar el instante de disparo del SCR dentro del semiciclo positivo de la señal de entrada.
2. Explicar por qué la salida permanece en cero durante el semiciclo negativo.

3. Comparar el comportamiento teórico y experimental del valor medio y del valor eficaz de la tensión de salida.
4. Relacionar el aumento del ángulo de disparo con la disminución de la potencia entregada a la carga.

Fundamento mínimo

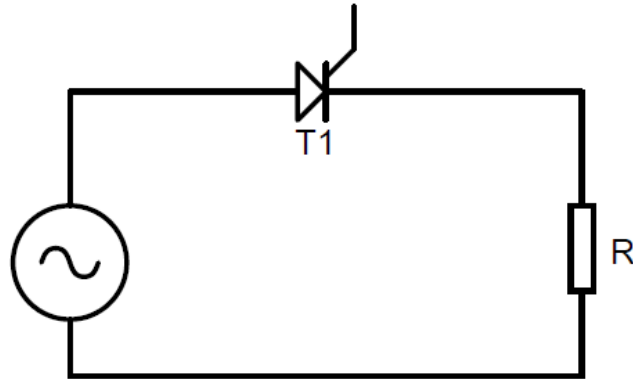
En esta configuración (figura 22) un SCR controla la conducción solamente durante el semiciclo positivo de la señal de entrada. El dispositivo permanece bloqueado hasta que recibe un pulso de compuerta en el ángulo α siempre y cuando éste se encuentre polarizado directamente; a partir de ese instante, conduce hasta que la corriente cae por debajo del valor de corriente de mantenimiento. Para una carga resistiva, el valor medio de la tensión de salida puede estimarse con:

$$V_{DC} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad \text{Ecuación 5}$$

Y el valor eficaz depende del intervalo de conducción útil dentro del semiciclo positivo. El análisis experimental se concentra en comparar esa tendencia teórica con las mediciones reales del laboratorio.

Figura 22

Topología a usar para esta práctica.

**Recursos requeridos y configuración del módulo**

1. Módulo configurable de convertidores con tiristores y sistema de control activo.
2. Carga resistiva autorizada para la práctica.
3. Osciloscopio de dos canales, multímetro y puntas de prueba.
4. Selección del modo media onda mediante los interruptores de configuración del módulo.

Procedimiento sugerido

1. Configure el módulo en media onda con el sistema des energizado y conecte la carga resistiva.
2. Energice el sistema y verifique primero la sincronización entre la señal de referencia y los pulsos de disparo.
3. Ajuste el potenciómetro para obtener al menos tres valores representativos de ángulo de disparo, por ejemplo 30°, 60° y 90°.
4. Para cada caso, registre la forma de onda de salida y mida o estime VRMS y VDC según la instrumentación disponible.

- Observe el comportamiento visible de la carga y compare la respuesta para conducción temprana y conducción retardada.

Formato sugerido para el registro de datos

Tabla 6

Registro de datos guía 1

α (°)	α (rad)	VRMS teórico.	VRMS exp.	VDC teórico.	VDC exp.	Observaciones
30						
60						
90						

Preguntas de análisis y entregable sugerido

- ¿Qué relación observa entre el valor de α y la porción del semiciclo positivo que alcanza a conducir el SCR?
- Compare los valores teóricos y experimentales e identifique posibles fuentes de diferencia.
- Explique por qué la carga no recibe energía durante el semiciclo negativo.
- Como entregable, presente el oscilograma principal, la tabla diligenciada y una breve discusión del efecto del ángulo de disparo sobre la potencia entregada.

Apéndice B. Guía de rectificador controlado de onda completa

Topología implementada

La presente práctica se realiza sobre un rectificador monofásico controlado de onda completa con carga resistiva (figura B.1). En esta configuración, cada par de tiristores controla la conducción durante un semiciclo de la señal de entrada.

Propósito y alcance

Esta guía busca analizar la operación del rectificador controlado de onda completa, evidenciando el aprovechamiento de ambos semiciclos de la señal de entrada y su diferencia respecto al caso de media onda.

Configuración del módulo

Para esta práctica debe seleccionarse el modo de operación de onda completa activando el interruptor J9 en la etapa de control. En la etapa de potencia debe cerrarse el interruptor J4, que habilita la trayectoria correspondiente al rectificador controlado de onda completa. Los demás interruptores deben permanecer abiertos.

Tabla 7

Configuración requerida del módulo para la práctica de onda completa.

Elemento	Configuración
Interruptor de modo de operación	Cerrar J9. Mantener abiertos J9 y J10
Interruptores de potencia	Cerrar J4. Mantener abiertos J5, J6 y J7
Propósito experimental	Comparar el aprovechamiento de ambos semiciclos frente al caso de media onda y observar la variación de la tensión de salida con el ángulo de disparo.

Resultados de aprendizaje esperados

- Reconocer la secuencia de disparo alternada entre semiciclos positivos y negativos.
- Comparar los resultados de la señal rectificadora frente al caso de media onda.

- Relacionar el desplazamiento del instante de disparo con el valor medio de la tensión de salida.

Fundamento mínimo

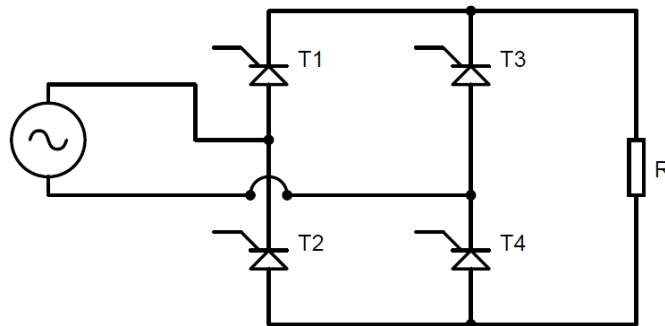
En esta configuración (figura 23), un par de SCR conduce durante el semiciclo positivo y el otro durante el negativo. El valor medio de la tensión de salida, para carga resistiva, se aproxima mediante

$$V_{DC} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) . \quad \text{Ecuación 6}$$

En comparación con el rectificador de media onda, la salida aprovecha ambos semiciclos y presenta un rizado menor para un mismo valor de α .

Figura 23

Topología a usar para esta práctica.



Recursos requeridos y procedimiento

1. Módulo en configuración de onda completa, con carga resistiva autorizada.
2. Osciloscopio y multímetro para registro de la salida.
3. Seleccione el modo de onda completa y verifique la correcta conexión de la carga.

4. Compruebe la existencia de pulsos desfasados 180° en los canales de disparo correspondientes.
5. Registre la forma de onda de salida para diferentes valores de α y compare la forma de onda de la tensión con respecto a la obtenida en la práctica anterior.
6. Documente al menos un caso de conducción cercana al cruce por cero y otro con disparo retrasado.

Formato sugerido para el registro de datos

Tabla 8

Registro de datos guía 2.

α ($^\circ$)	α (rad)	VRMS teórico.	VRMS exp.	VDC teórico.	VDC exp.	Observaciones
30						
60						
90						

Preguntas de análisis y entregable sugerido

1. Compare la forma de onda de salida con la obtenida en media onda. ¿Qué cambia y por qué?
2. Explique el papel del desfase de 180° entre pulsos en la operación de esta topología.
3. Discuta el efecto de α sobre el valor medio y el rizado de la salida.
4. Como entregable, presente la tabla diligenciada y una comparación breve entre los resultados de media onda y de onda completa.

Apéndice C. Guía de controlador AC/AC

Topología implementada

La presente práctica se realiza sobre un convertidor AC/AC (figura 24). En esta configuración, cada tiristor controla la conducción durante un semiciclo de la señal de entrada.

Propósito y alcance

Esta guía se orienta a estudiar el control de potencia en corriente alterna conservando la naturaleza alterna de la salida. El interés principal es relacionar el ángulo de disparo con el valor eficaz de la tensión aplicada a la carga.

Configuración del módulo

Para implementar esta práctica debe activarse el modo AC/AC mediante el interruptor J10 en la etapa de control. En la etapa de potencia deben cerrarse los interruptores J5 y J6, correspondientes a la trayectoria bidireccional de conducción requerida para esta topología. Los demás interruptores deben permanecer abiertos.

Tabla 9

Configuración requerida del módulo para la práctica AC/AC.

Elemento	Configuración
Interruptor de modo de operación	Cerrar J10. Mantener abiertos J8 y J9
Interruptores de potencia	Cerrar J5 y J6. Mantener abiertos J4 y J7
Propósito experimental	Estudiar el control del valor eficaz de la tensión aplicada a una carga de corriente alterna, observando el recorte simétrico de ambos semiciclos.

Fundamento mínimo

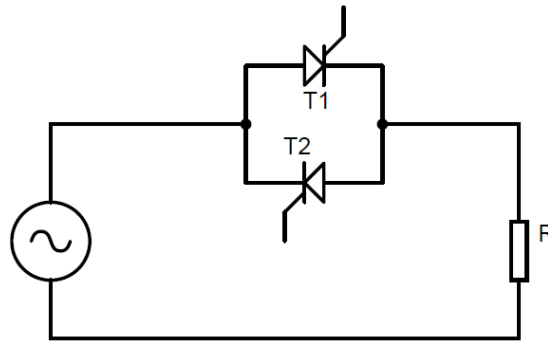
En el controlador AC/AC (figura 24) los dispositivos de potencia se activan en ambos semiciclos de la señal, pero el inicio de la conducción se retrasa de acuerdo con el ángulo α . Para carga resistiva, el valor eficaz de la salida disminuye conforme se reduce la porción conducida de cada semiciclo. De manera aproximada,

$$V_{o,RMS} = V_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right]}. \quad \text{Ecuación 7}$$

El objetivo de la práctica es verificar experimentalmente esta tendencia y observar el recorte simétrico de la señal de alterna.

Figura 24

Topología a usar para esta práctica.



Recursos requeridos y procedimiento

1. Módulo configurado en modo AC/AC.
2. Carga resistiva, osciloscopio y multímetro.
3. Configure el módulo en AC/AC y verifique que solo ese modo esté activo.
4. Ajuste varios valores de α mediante el potenciómetro y registre el cambio en la señal de salida.

5. Compare el recorte de la onda para conducción temprana y conducción tardía.
6. Mida el valor eficaz de salida y relacione el resultado con la energía transferida a la carga.

Formato sugerido para el registro de datos

Tabla 10

Registro de datos guía 3.

α (°)	α (rad)	VRMS teórico.	VRMS exp.	Observaciones
30				
60				
90				

Preguntas de análisis y entregable sugerido

1. ¿Qué diferencia conceptual existe entre regular una salida AC/AC y rectificar una señal?
2. ¿Cómo cambia el valor eficaz de la salida al aumentar α ?
3. ¿Qué aplicaciones reales podrían modelarse con este tipo de control por fase?
4. Como entregable, presente la forma de onda registrada para al menos dos valores de α y una discusión breve sobre la regulación de potencia observada.

Apéndice D. Guía de rectificador de onda completa con carga inductiva y diodo de libre paso

Propósito y alcance

Esta guía extiende la práctica de rectificación de onda completa para analizar el efecto de una carga inductiva y del diodo de libre paso sobre la continuidad de corriente y la forma de

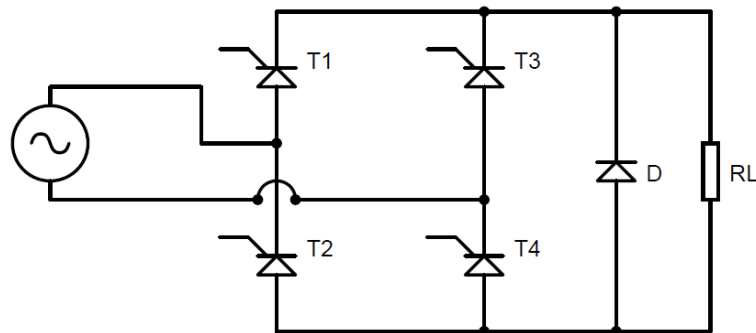
onda de la tensión de salida. Aunque en el informe principal esta variante no se documenta con oscilogramas adicionales, sí forma parte del alcance funcional del módulo.

Fundamento mínimo

Cuando la carga presenta componente inductiva (figura 25), la corriente no cambia instantáneamente y tiende a mantenerse después del cruce por cero. El diodo de libre paso proporciona una trayectoria alternativa para esa corriente cuando los SCR dejan de conducir, modificando la forma de onda observada en la carga. El análisis de esta práctica es principalmente cualitativo y compara los casos con y sin diodo de libre paso activado.

Figura 25

Topología a usar para esta práctica.



Configuración del módulo

Para esta práctica debe mantenerse el modo de operación de onda completa activando el interruptor J9 en la etapa de control. En la etapa de potencia deben cerrarse los interruptores J4 y J7, de forma que se conserve la configuración base de onda completa y se habilite adicionalmente la rama del diodo de libre paso. Los demás interruptores deben permanecer abiertos.

Tabla 11

Configuración requerida del módulo para la práctica con carga inductiva y DLP.

Elemento	Configuración
Interruptor de modo de operación	Cerrar J9. Mantener abiertos J8 y J10
Interruptores de potencia	Cerrar J4 y J7. Mantener abiertos J5 y J6
Propósito experimental	Analizar la continuidad de corriente, el efecto de la inductancia sobre la extinción de la conducción y la influencia del diodo de libre paso sobre la forma de onda de salida

Recursos requeridos y procedimiento

1. Módulo configurado en rectificador de onda completa con la carga definida por el laboratorio.
2. Elemento inductivo autorizado y activación del diodo de libre paso en la configuración prevista.
3. Osciloscopio y multímetro para observación de la respuesta de la carga.
4. Registre un caso de referencia con la configuración de onda completa y carga resistiva.
5. Cambie a la condición de carga inductiva y documente el comportamiento de la señal sin utilizar el diodo de libre paso.
6. Active el diodo de libre paso y compare nuevamente la respuesta del sistema.
7. Discuta la continuidad de corriente, el posible desplazamiento del instante de extinción y el efecto cualitativo del diodo sobre la tensión de salida.

Formato sugerido para el registro de datos**Tabla 12***Registro de datos guía 4.*

α (°)	α (rad)	VRMS	VDC	Observaciones con y sin diodo de libre paso.
30				
60				
90				

Preguntas de análisis y entregable sugerido

1. ¿Qué cambios observa en la forma de onda al introducir una componente inductiva en la carga?
2. ¿Cómo influye el diodo de libre paso sobre la continuidad de corriente y sobre la tensión aplicada a la carga?
3. Como entregable, presente una comparación cualitativa de los casos con y sin diodo de libre paso y relacione la observación con el comportamiento esperado en cargas RL.

Apéndice E. Simulación y validación del sistema en Proteus**Propósito del anexo**

Este anexo documenta la etapa de simulación utilizada para verificar la arquitectura general del módulo antes del montaje físico. El modelo permitió revisar la interacción entre la etapa de control basada en Arduino, el detector de cruce por cero, la etapa de aislamiento óptico y el circuito de potencia con tiristores, además de validar la lógica de disparo para los modos de media onda, onda completa y control AC/AC.

Recursos digitales asociados

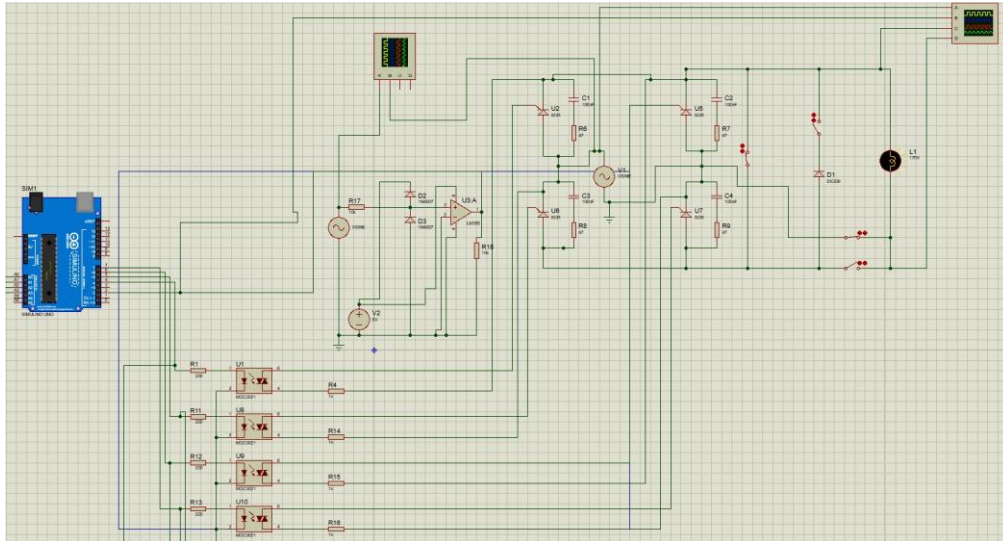
Soporte	Contenido principal	Aporte dentro del anexo
Esquemático general	Vista completa del circuito simulado.	Permite mostrar la integración entre control, aislamiento, potencia, carga y diodo de libre paso
Librería de dispositivos	Lista de elementos cargados en el entorno de simulación.	Deja trazabilidad de los modelos usados en el montaje virtual
Pulsos para media onda	Señales generadas para el modo rectificador de media onda.	Evidencia la temporización base del sistema.
Pulsos para onda completa	Señales generadas para operar en ambos semiciclos.	Muestra la estrategia de disparo con señales complementarias.
Pulsos para AC/AC	Señales generadas para el modo de control AC/AC.	Verifica la lógica cuando se requiere conservar una salida alterna regulada.

Arquitectura general del modelo

La Figura 26 resume el modelo de simulación organizado por etapas. Esta vista resulta útil porque separa con claridad los bloques que luego también aparecen en la implementación física: control, cruce por cero, aislamiento y potencia.

Figura 26

Esquemático general del sistema simulado en Proteus.

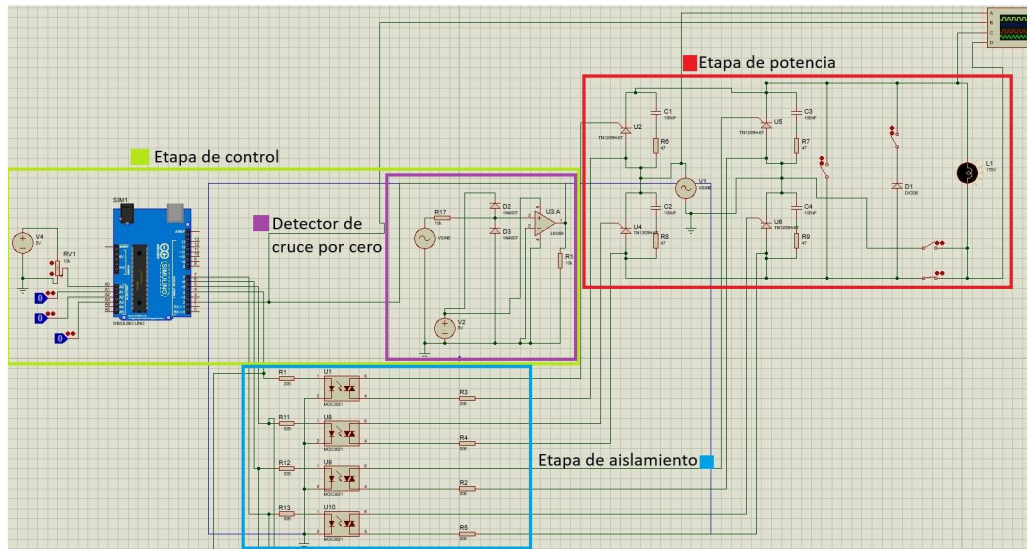
**Figura 27**

Librería de dispositivos empleada durante la simulación.

P	L	DEVICES
		2N2222
		4N25
		ARDUINO UNO
		ATMEGA328P
		BRIDGE
		BUFFER
		CAP
		DIODE
		LAMP
		LM393
		LOGICSTATE
		MOC3021
		POT-HG
		RESISTOR
		SCR
		SIMULINO UNO
		SWITCH
		T810-600B
		TRAN-2P2S
		TRIAC
		VSINE
		VSOURCE

Figura 28

Vista funcional por etapas del modelo utilizado durante la validación.

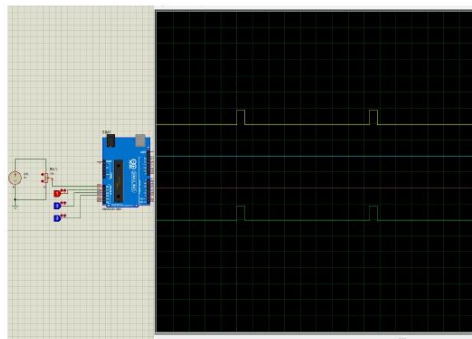


Verificación de la lógica de disparo

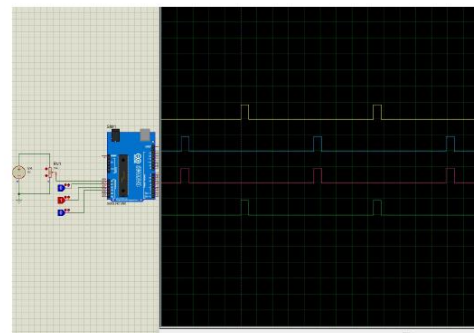
Una parte importante del modelo consistió en confirmar que el programa de control generara pulsos coherentes con cada configuración prevista. En esta etapa se verificó que el modo de media onda produjera un pulso asociado al semiciclo requerido, que el modo de onda completa generara pulsos desfasados 180° para controlar ambos semiciclos y que el modo AC/AC preservara una salida alterna regulando el instante de activación de los SCR.

Figura 29

Validación de pulsos para meda onda y onda completa.



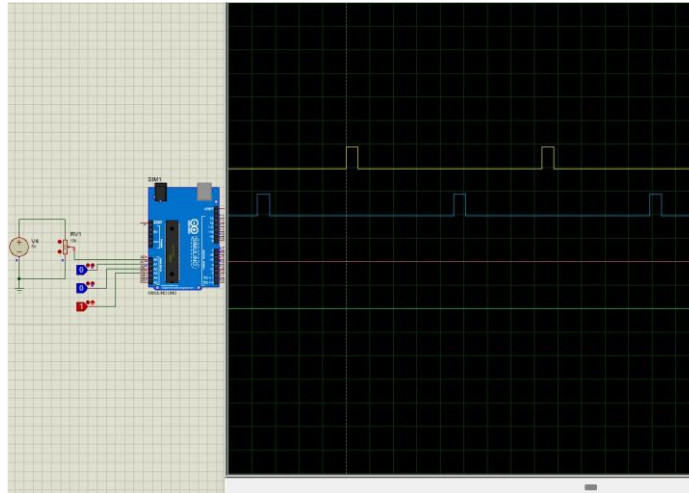
(a) Validación de pulsos para rectificador controlado de media onda.



(b) Validación de pulsos para rectificador controlado de onda completa.

Figura 30

Validación de pulsos para el modo de control AC/AC.



La simulación permitió depurar la lógica de control antes de energizar el montaje real y sirvió como referencia para la conexión posterior en protoboard. Con ello, este anexo funciona como evidencia de la validación previa al montaje en laboratorio.

Apéndice F. Montaje experimental en protoboard**Propósito del anexo**

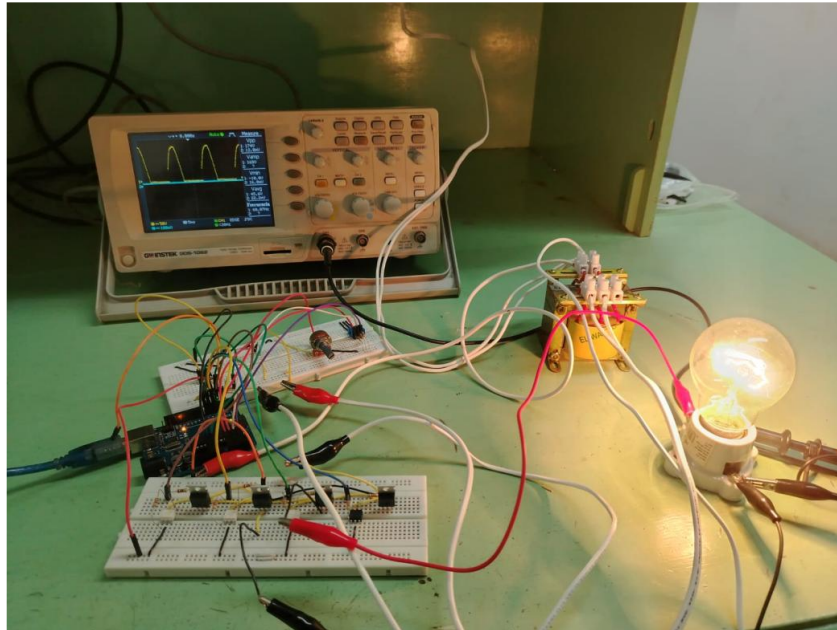
Este anexo reúne la evidencia del montaje físico preliminar realizado en protoboard. Su función es mostrar cómo la arquitectura verificada en simulación se trasladó a un banco experimental real, permitiendo comprobar el funcionamiento por etapas y registrar el comportamiento del módulo en condiciones de laboratorio.

Vista general del banco de pruebas

La Figura 31 muestra el montaje experimental utilizado en los laboratorios de la UIS. En esta vista se reconocen la etapa de control, el armado en protoboard, el transformador de referencia para el cruce por cero, la carga resistiva y el osciloscopio empleado para registrar las señales.

Figura 31

Banco experimental utilizado durante la validación en protoboard.

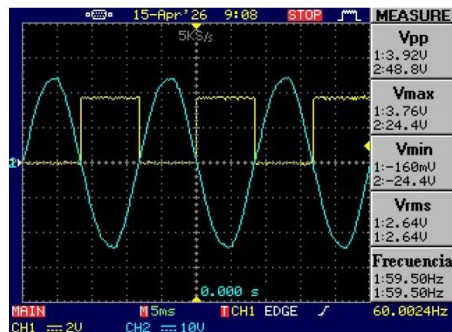


Verificación por etapas del sistema de control

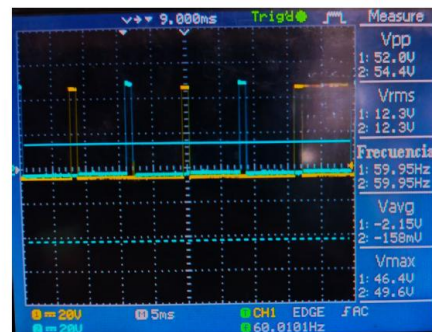
Antes de analizar las topologías de potencia, se comprobó el funcionamiento de las señales auxiliares del sistema. La Figura 32 resume dos verificaciones importantes: la sincronización del sistema con la señal senoidal de entrada y la presencia de dos pulsos desfasados 180° para la operación del rectificador controlado de onda completa.

Figura 32

Verificación instrumental de señales auxiliares en el montaje en protoboard.



(a) Referencia senoidal y pulso sincronizado con el cruce por cero.



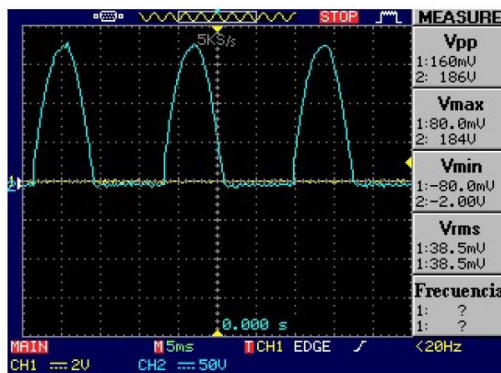
(b) Pulsos de disparo desfasados 180° para onda completa.

Registros experimentales por modo de operación

Las figuras siguientes documentan el comportamiento del módulo para los modos principales evaluados experimentalmente. Se optó por presentar únicamente la pantalla útil del osciloscopio para mejorar la legibilidad de las escalas y de los valores reportados por el instrumento.

Figura 33

Registros de salida para el rectificador controlado de media onda.



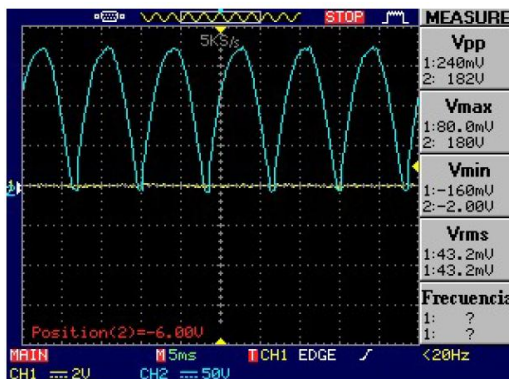
(a) Media onda con conducción cercana al inicio del semiciclo.



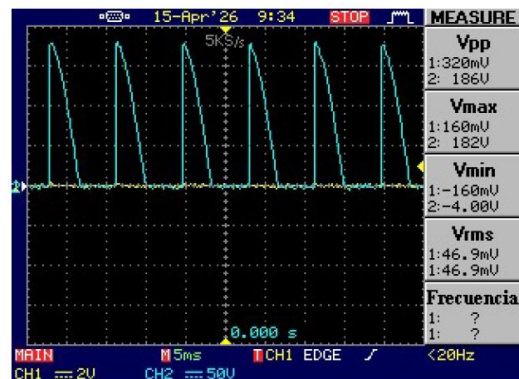
(b) Media onda con disparo retardado.

Figura 34

Registros de salida para la topología de onda completa.



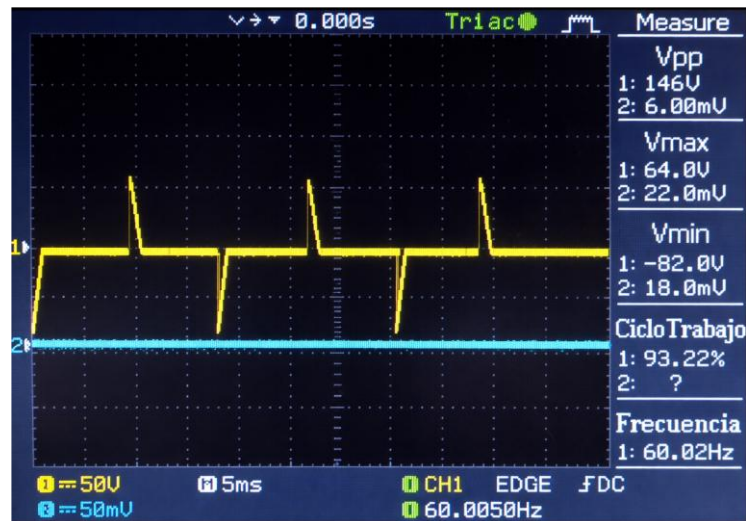
(a) Rectificador controlado de onda completa.



(b) Onda completa con variación del ángulo de disparo.

Figura 35

Registro experimental del modo AC/AC con control por ángulo de disparo.



Observaciones técnicas del montaje en protoboard

El protoboard permitió depurar orden de cableado, verificar la robustez del circuito de cruce por cero y validar la lógica de interbloqueo entre modos antes de llevar el sistema a PCB. En esta etapa se confirmó que el ajuste del potenciómetro se reflejaba en el desplazamiento de los pulsos y que las tres configuraciones principales podían activarse con una misma arquitectura de control. Los videos incluidos en el paquete digital complementan esta evidencia mostrando el funcionamiento del sistema en operación real.

Apéndice G. Diseño, fabricación y ensamble del módulo en pcb

Propósito del anexo

Este anexo consolida la documentación del diseño, la fabricación y el ensamble de la tarjeta de circuito impreso utilizada para robustecer el prototipo. También reúne la información de ruteo, renderizado y montaje físico que sirve de soporte para futuras iteraciones del módulo.

Secuencia de desarrollo del PCB

El desarrollo del PCB siguió una secuencia progresiva: captura esquemática, definición de conectores y puntos de configuración, ruteo de pistas, validación visual del montaje en 3D, fabricación de la tarjeta y ensamble de los componentes. Esta secuencia permitió trasladar de forma ordenada la arquitectura verificada en protoboard a una tarjeta más compacta y apropiada para sesiones repetidas de laboratorio.

Figura 36

Esquemático consolidado del módulo empleado como base para el diseño del PCB.

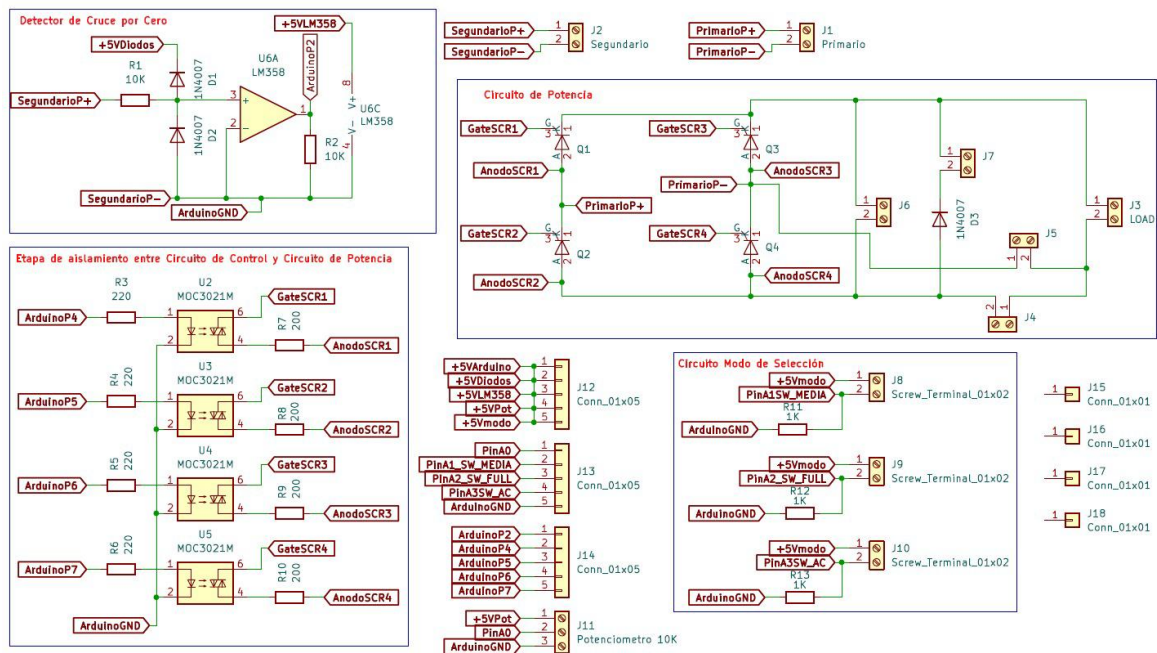
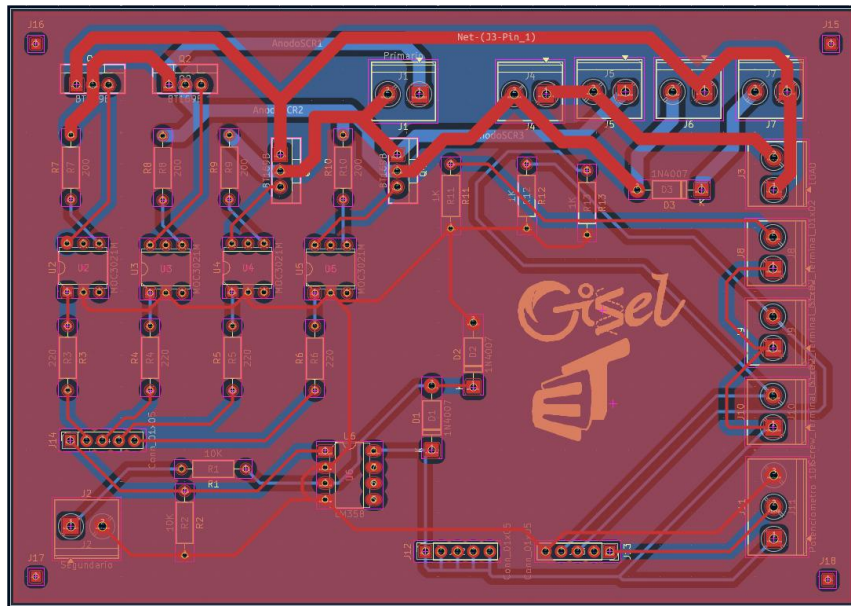
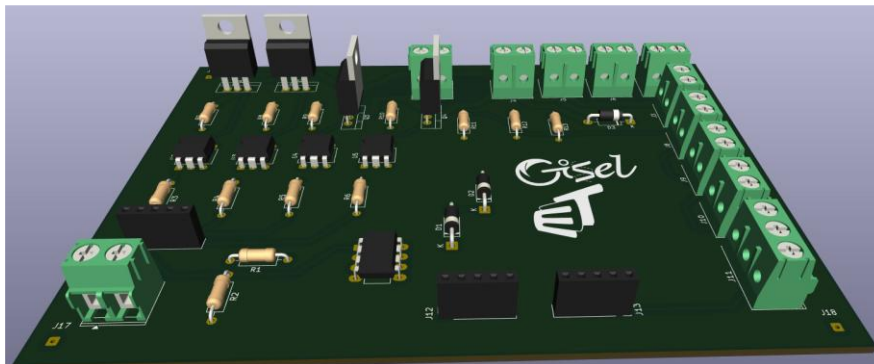


Figura 37

Vista del ruteo y distribución general de la tarjeta.

**Figura 38**

Renderizado 3D preliminar del ensamblaje.

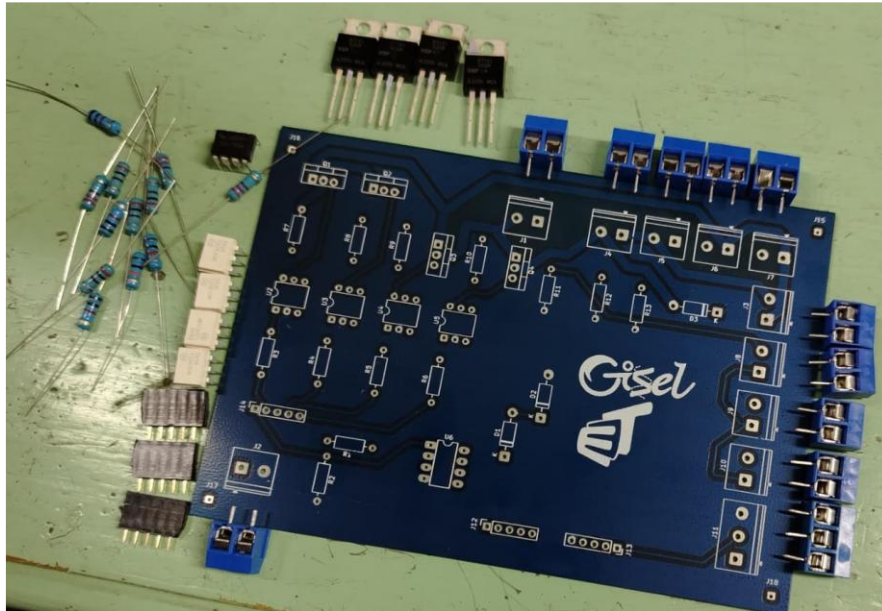


Fabricación y ensamble

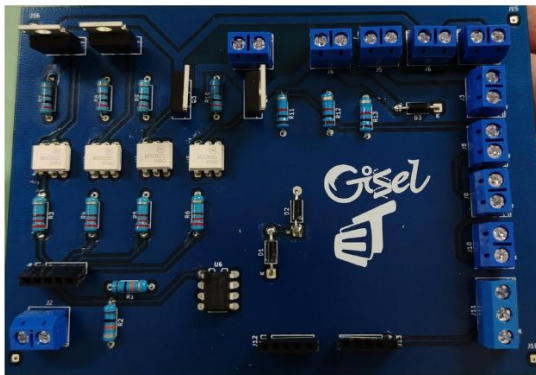
Las siguientes figuras muestran la tarjeta antes del proceso de soldadura y el resultado del ensamble final por ambas caras. Estas evidencias permiten verificar la correspondencia entre el diseño y la tarjeta fabricada, así como la disposición real de conectores, resistencias, optoacopladores, diodos, circuito de detección y dispositivos de potencia.

Figura 39

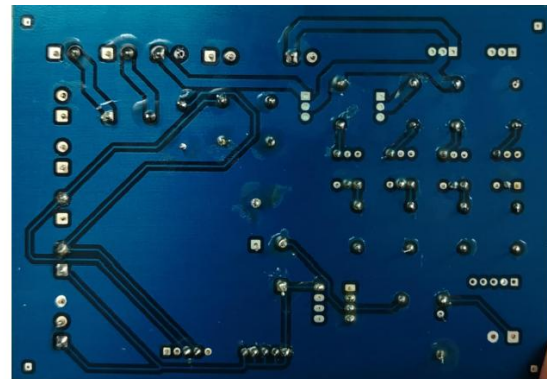
Tarjeta fabricada con los componentes listos para el proceso de ensamblado.

**Figura 40**

Documentación fotográfica del módulo luego del ensamblado.



(a) Vista frontal del PCB ensamblado.



(b) Vista posterior del PCB ensamblado.

Integración mecánica prevista

Como parte del cierre del proyecto, el módulo se plantea montado sobre un disipador de calor y alojado en una carcasa que limite el acceso a las variables necesarias durante la práctica.

Esta decisión responde a criterios de seguridad y orden del laboratorio.

Apéndice H. Código de arduino para la generación de pulsos

Propósito del anexo

El presente anexo incorpora el código de Arduino utilizado para generar los pulsos de disparo del módulo. El archivo fue suministrado por los autores y documenta la lógica de selección de modos, la lectura del potenciómetro, la detección de cruce por cero y el uso de interrupciones para temporizar los pulsos de compuerta. El archivo fuente incluido en el paquete digital se denomina `codigo_arduino_pulsos.ino` (lo pueden encontrar en el siguiente link <https://drive.google.com/drive/folders/14rzLY6dftIxzSxO9JYAv5tlztzmArTpn?usp=sharing>)

Aspectos funcionales más relevantes del programa

Del código se destacan los siguientes elementos de diseño:

- La selección de modo se realiza con lógica positiva sobre las entradas A1, A2 y A3, correspondientes a media onda, onda completa y AC/AC.
- Se implementa un interbloqueo tipo one-hot: el sistema solo habilita disparos cuando exactamente un modo se encuentra activo. Cualquier otra combinación fuerza el estado de seguridad `PATTERN_OFF`.
- La detección de cruce por cero se atiende mediante la interrupción externa `INT0` y la temporización de disparo se realiza con `Timer1`.
- Los pulsos de compuerta se generan con una anchura fija aproximada de 1ms, adecuada para asegurar el disparo del SCR en las configuraciones implementadas.