

PROTOTIPO DE EQUIPO DE LABORATORIO PARA PRÁCTICAS DE RECTIFICADORES EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA

FERNEY ALONSO SOLER SANCHEZ

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
TUNJA
2015**

**PROTOTIPO DE EQUIPO DE LABORATORIO PARA PRÁCTICAS DE
RECTIFICADORES EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA**

FERNEY ALONSO SOLER SANCHEZ

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Director del Proyecto
ING. MSc. OSCAR MAURICIO HERNÁNDEZ GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
TUNJA
2015**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 15 de Mayo de 2015

El contenido de este trabajo no incluye las especificidades del proyecto ni resultados, teniendo en cuenta que se inició un proceso de registro de modelo de utilidad para el equipo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ing. Oscar Mauricio Hernández Gómez por compartir su conocimiento, tiempo y paciencia en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos que me acompañaron en el desarrollo de este proyecto, y en especial a Edgar Camilo Camacho Poveda y Carolina Higuera Arias, por su colaboración incondicional en el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por prestarme sus instalaciones para el desarrollo de este proyecto. A todos los ingenieros que hicieron parte de la formación, y en especial a la Escuela de Ingeniería Electrónica por brindarme los conocimientos como Ingeniero.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	12
1. INGENIERÍA BÁSICA DE DISEÑO	13
1.1. RESISTENCIA DE CARGA MINIMA.	13
1.2. TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA	13
1.2.1. Rectificador monofásico tipo puente.	13
1.2.2. Rectificador trifásico tipo puente.	15
1.3. SELECCIÓN DE SEMICODUCTORES	17
1.3.1. Diodos.	17
1.3.2. SCRs.	18
1.3.2. Disipadores de calor.	19
2. RESULTADOS	22
2.1. PRUEBAS REALIZADAS	22
2.1.1. Simulación rectificador trifásico tipo puente.	22
2.1.2. Implementación rectificador Trifásico tipo puente.	23
2.1.3. Simulación rectificador trifásico tipo puente semicontrolado.	24
2.1.4. Implementación rectificador trifásico tipo puente semicontrolado.	26
2.1.5. Simulación rectificador trifásico tipo puente controlado.	26
2.1.6. Implementación rectificador trifásico tipo puente controlado.	27
4.3 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.	28
3. CONCLUSIONES	29
4. TRABAJOS FUTUROS	30
BIBLIOGRAFÍA	31

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características eléctricas del transformador trifásico.	13
Tabla 2. Parámetros de selección de los semiconductores.	17
Tabla 3. Lista de diodos consultados.	17
Tabla 4. Características eléctricas y térmicas diodo VS-25FR80.	18
Tabla 5. Lista de SCRs consultados.	18
Tabla 6. Características eléctricas y térmicas del SCR IR-10RIA60.	19
Tabla 7. Especificaciones térmicas de los semiconductores.	20
Tabla 8. Características de del disipador ATS1216-ND.	21
Tabla 22. Parámetros para la simulación del rectificador Trifásico de media onda con carga R.	22
Tabla 23.valores obtenidos de la simulación del rectificador trifásico de onda completa con carga R.	23
Tabla 24. Datos obtenidos para el rectificador trifásico de onda completa con carga R tanto en simulación como de forma experimental.	24
Tabla 25.Valores obtenidos de la simulación del rectificador trifásico de onda completa con carga R.	26
Tabla 26. Datos obtenidos para el rectificador trifásico tipo puente semicontrolado con carga R tanto en simulación como de forma experimental.	26
Tabla 27.Valores obtenidos de la simulación del rectificador trifásico de onda completa con carga R.	27
Tabla 28. Datos obtenidos para el rectificador trifásico tipo puente controlado.	27
Tabla 29. Error máximo en las mediciones de corriente y tensión.	28

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Rectificador monofásico de onda completa.	14
Figura 2. Formas de onda de tensión y corriente del rectificador monofásico de onda completa.	14
Figura 3. Rectificador trifásico de onda completa tipo puente.	15
Figura 4. Formas de onda de corriente y tensión de puente rectificador trifásico.	16
Figura 5. Circuito eléctrico equivalente de la transferencia del calor.	19
Figura 6. Diagrama esquemático puente rectificador Trifásico.	22
Figura 7. Formas de onda rectificador Trifásico de onda completa	23
Figura 8. Forma de onda de voltaje en la carga del rectificador medida con el osciloscopio Tektronix® TDS2004C.	24
Figura 9. Diagrama esquemático puente rectificador trifásico semicontrolado.	25
Figura 10. Formas de onda rectificador trifásico de onda completa semicontrolado.	25
Figura 11. Diagrama esquemático del puente rectificador trifásico controlado.	26
Figura 12. Formas de onda rectificador trifásico controlado.	27

LISTA DE ANEXOS

pág.

ANEXO A. HOJAS DE ESPECIFICACIONES DIODO 25F80. **¡Error! Marcador no definido.**

ANEXO B. HOJAS DE ESPECIFICACIONES SCR IR 10RIA60. **¡Error! Marcador no definido.**

ANEXO C. TABLA DE DISIPADORES. **¡Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

Este trabajo de grado describe el proceso de diseño e implementación de un prototipo, para el desarrollo de prácticas de laboratorio de rectificadores en asignaturas relacionadas con Electrónica de Potencia. El documento contiene el diseño e implementación de hardware, software y firmware, así como las pruebas del funcionamiento del prototipo.

En la fase inicial del proyecto se realizó el diseño e implementación de los circuitos para la sincronización con la red eléctrica y la generación de las señales de control para los SCRs, los circuitos para el acondicionamiento de las señales de los sensores de corriente y tensión, y el circuito del sistema de adquisición de datos que establece la comunicación con la interfaz de usuario del prototipo, haciendo uso de un microcontrolador de la familia PIC32 de Microchip®. Luego de las pruebas iniciales a los circuitos, se realizó el diseño y construcción de la parte física del mismo, lo que permitió iniciar las pruebas de funcionamiento.

El microcontrolador realiza la generación de las señales de control de disparo de los SCRs y son manipuladas a través de una interfaz gráfica de usuario, desarrollada en lenguaje C#, e implementada a través del software Visual Studio Express, permitiendo al usuario visualizar las formas de ondas de las señales de tensión y corriente de los rectificadores implementados en el prototipo.

Finalmente para validar el funcionamiento, se realizaron pruebas con rectificadores monofásicos y trifásicos, semicontrolados y controlados, comparando los datos experimentales con datos de simulación.

INTRODUCCIÓN

En electrónica de potencia, unas de las pruebas de laboratorio más comunes son los rectificadores, monofásicos y trifásicos no controlados, semicontrolados y controlados. Se evidenció que en la escuela de Ingeniería Electrónica extensión Tunja, no existen los equipos de laboratorio adecuados para que los estudiantes realicen este tipo de prácticas de una forma fácil y eficiente, y que le permitan afianzar los conceptos teóricos en el área.

El propósito de este proyecto es diseñar e implementar un prototipo para el desarrollo de prácticas de laboratorio de rectificadores en Electrónica de Potencia. El primer capítulo contiene los parámetros iniciales de diseño, que permitieron la selección de los semiconductores (Diodos y SCRs), y el diseño de los componentes físicos y mecánicos del prototipo.

El segundo capítulo muestra los resultados obtenidos, así como las pruebas realizadas para validar el funcionamiento del prototipo. Finalmente se presentan las conclusiones y las recomendaciones para futuros trabajos en esta área.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es implementar un prototipo de equipo de laboratorio para el desarrollo de prácticas de electrónica de potencia, en rectificadores trifásicos no controlados, semicontrolados y controlados.

Para cumplir con el objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos específicos

- Realizar la ingeniería básica de diseño para la selección de semiconductores de potencia que se utilizaran en el equipo, con base en las características de tensión, corriente y tipo de carga.
- Diseñar e implementar un circuito de disparo para los SCRs del prototipo, así como los circuitos de sensado de corriente y tensión para la medición de dichas formas de onda, en la entrada, en los semiconductores y en la carga.
- Diseñar e implementar una interfaz gráfica para el usuario con el fin identificar las diferentes formas de onda de los rectificadores implementables en el equipo.

1. INGENIERÍA BÁSICA DE DISEÑO

Para la selección de los semiconductores de potencia es necesario establecer los parámetros máximos de corriente y tensión de entrada y salida de operación del prototipo. La corriente y la tensión de entrada para los rectificadores implementables, es suministrada por los transformadores trifásicos del laboratorio de electrónica de potencia de la escuela de ingeniería electrónica extensión Tunja, los cuales se basan en tres transformadores conectados en estrella y cuyas características se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características eléctricas del transformador trifásico.

Parámetro	Valor
Potencia nominal	1 KVA
Tensión de fase (rms)	46 V
Tensión de línea(rms)	76 V
Corriente máxima de salida (rms)	7.5 A

Fuente: Autor.

1.1. RESISTENCIA DE CARGA MINIMA.

La resistencia mínima de carga para el transformador se determina a partir de los rectificadores a implementar y de las condiciones nominales de potencia del transformador. La Ecuación 1 muestra el cálculo de la resistencia mínima de carga en función, de la tensión máxima de fase y la corriente de salida del transformador con un margen de seguridad del 30%, lo que corresponde al cálculo para el peor de los casos, como se muestra en la Ecuación 2 .

$$R_{Lmin} = \frac{46 \cdot \sqrt{2} V}{5 A} = 13\Omega. \quad \text{Ecuación 1}$$

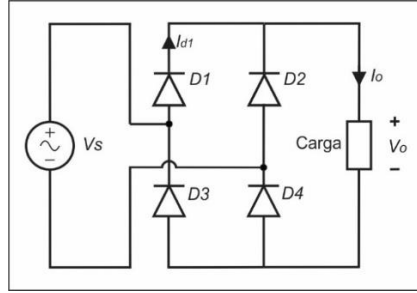
$$I_{Lrms} = 7.5A - 7.5 \cdot 0.3 A \approx 5A \quad \text{Ecuación 2}$$

1.2. TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA

Para establecer los parámetros de corriente y tensión de operación de los semiconductores, se realiza un análisis de puentes rectificadores monofásicos y trifásicos implementables en el prototipo.

1.2.1. Rectificador monofásico tipo puente. La Figura 1 muestra el diagrama esquemático de un rectificador tipo puente de onda completa y la tensión de salida RMS se describe en la Ecuación 3.

Figura 1. Rectificador monofásico de onda completa.

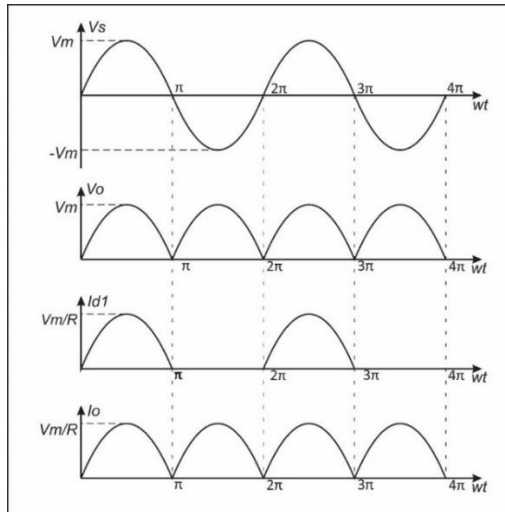


Fuente: Autor.

$$V_O = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \text{sen}(wt) d(wt) \right]^{1/2} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \text{Ecuación 3}$$

La corriente promedio de salida para el rectificador de onda completa monofásico para cargas netamente resistivas es la tensión de salida V_O dividida entre la resistencia de carga. La Figura 2 muestra las formas de onda de corriente y tensión de salida, para una carga resistiva.

Figura 2. Formas de onda de tensión y corriente del rectificador monofásico de onda completa.



Fuente: Autor.

Con la tensión de fase entregada por el transformador trifásico y la resistencia de carga mínima de la Ecuación 1, se calcula la corriente y tensión RMS de salida para un puente rectificador de onda completa monofásico.

$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 46V \quad \text{Ecuación 4}$$

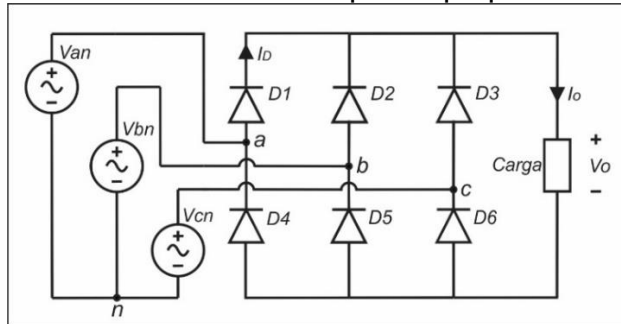
$$I_{RMS} = \frac{V_m}{R * \sqrt{2}} = 3.6A \quad \text{Ecuación 5}$$

Los diodos rectificadores en un puente rectificador monofásico de onda completa, sólo conducen la mitad del periodo de la señal de tensión de entrada, por lo que la corriente promedio a través del diodo es:

$$I_{DRMS} = \frac{I_{RMS}}{2} = 1.8 A \quad \text{Ecuación 6}$$

1.2.2. Rectificador trifásico tipo puente. En la Figura 3 se muestra un rectificador trifásico tipo puente de onda completa, la tensión de salida promedio está dada por la Ecuación 7.

Figura 3. Rectificador trifásico de onda completa tipo puente.

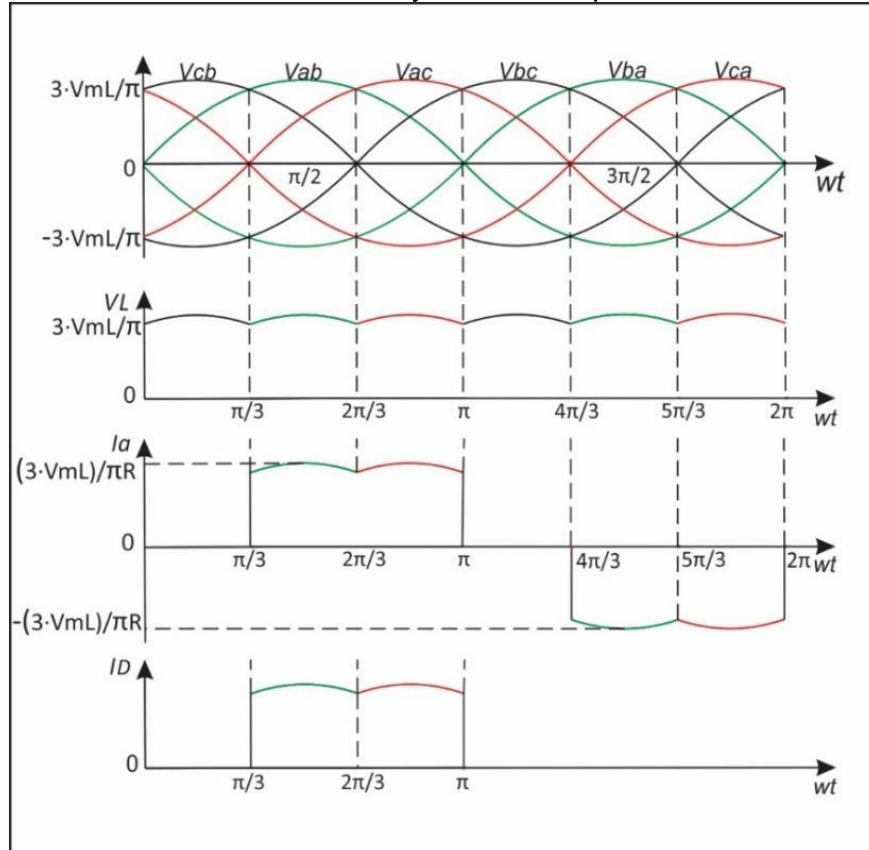


Fuente: Autor.

$$V_O = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{mL} \text{sen}(wt) d(wt) = \frac{3V_{mL}}{\pi} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde V_{mL} es la tensión máxima de línea, para transformadores con conexión en estrella la tensión de línea V_{mL} , es $\sqrt{3}$ veces la tensión de fase. Las formas de onda de la corriente y la tensión para una carga resistiva se muestran en la Figura 4.

Figura 4. Formas de onda de corriente y tensión de puente rectificador trifásico.



Fuente: Autor.

La tensión y corriente DC de salida del puente rectificador trifásico de onda completa se muestran en las Ecuación 8 y Ecuación 9 respectivamente, los cálculos se realizaron con los parámetros de tensión de línea de la Tabla 1 y con la resistencia máxima de carga de la Ecuación 1.

$$V_o = \frac{3V_{mL}}{\pi} = 102.92V \quad \text{Ecuación 8}$$

$$I_o = \frac{102.92}{12\Omega} = 8.57A \quad \text{Ecuación 9}$$

Cada diodo conduce durante un tercio del periodo de la señal de tensión de entrada, la Ecuación 10 muestra la corriente que circula a través del diodo.

$$I_D = \frac{I_o}{3} = 2.85A \quad \text{Ecuación 10}$$

1.3. SELECCIÓN DE SEMICODUCTORES

La selección de semiconductores, se realizó con base en las características de corriente y tensión máxima de operación de los diodos y SCRs en los rectificadores implementables en el prototipo. La tabla 2 muestra los parámetros seleccionados.

Tabla 2. Parámetros de selección de los semiconductores.

Parámetro	Valor
V_{RRM}	117.5 V
$I_{T(AV)}$	2.85 A

Donde: V_{RRM} (Maximum reverse peak voltage). Voltaje pico máximo en inverso.

$I_{F(AV)}$ (Maximum average forward current). Corriente máxima promedio en directo.

Para la corriente máxima en directo, se toma la corriente en el diodo para un puente rectificador trifásico de onda completa, que es la corriente máxima en los rectificadores implementables. El máximo pico de tensión en inverso será el valor de tensión máxima de línea suministrada por el transformador trifásico (Tabla 1). Además de los parámetros anteriormente expuestos se tiene en cuenta el tipo de encapsulado. Para diodos y SCRs se seleccionaron los encapsulados TO-208 y DO-203AA, ya que al ser de tipo tornillo facilita la instalación del dispositivo, y en este caso facilita el diseño físico del mismo.

1.3.1. Diodos. Para la selección de los diodos de potencia utilizados en el prototipo, se realizó una búsqueda de estos con los fabricantes de los semiconductores. La Tabla 3 reúne los diodos consultados que mejor se ajustan a las especificaciones descritas en la Tabla 2.

Tabla 3. Lista de diodos consultados.

Referencia	Fabricante	V_{RRM} Volteje máximo en inverso	$I_{F(AV)}$ corriente promedio	Encapsulado
IR-1N3881-ND	International rectifier	200 V	3 A	DO-203AA
VS-1N3881R	Vishay Semiconductor	200 V	6 A	DO-203AA
GI1403-E3/45	Vishay Semiconductor	150 V	6 A	TO-220AA
IR-6FLR20S	International rectifier	200 V	6 A	DO-203AA
VS-25FR40	Vishay Semiconductor	400V	25 A	DO-203AA

Fuente: Autor:

Todos los diodos seleccionados en la Tabla 3 cumplen con los requerimientos del prototipo, las referencias IR-1N3881-ND y VS-1N3881R solo se comercializan en paquetes de 100 unidades, por el elevado costo se descarta para la aplicación. Se eligió el diodo VS-25FR80 de Vishay semiconductor por su alta disponibilidad y bajo costo en el mercado nacional. En la Tabla 4 se encuentran las principales características del diodo seleccionado para el prototipo. Además en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentran las hojas de especificaciones para información más detallada.

Tabla 4. Características eléctricas y térmicas diodo VS-25FR80.

Parámetros	VS-25FR80
$I_{F(AV)}$ Corriente máxima promedio en directo	25 A
V_{RRM} Voltaje pico máximo en inverso.	800 V
Máximo I^2t para fusibles	410 A^2s
R_{thJC} Resistencia térmica de la juntura a la carcasa	1.5 °C/W
R_{thCS} Resistencia térmica de la carcasa	0.5 °C/W

Fuente: Autor

1.3.2. SCRs. Para la selección de los SCRs utilizados en la implementación de rectificadores controlados y semicontrolados, se utilizan los parámetros de la Tabla 2. La Tabla 5 muestra los SCRs consultados en tiendas online nacionales e internacionales especializadas en venta de componentes electrónicos que más se ajustan a los requerimientos.

Tabla 5. Lista de SCRs consultados.

Referencia	Fabricante	V_{RRM} Volteje máximo en inverso	$I_{F(AV)}$ corriente promedio	Encapsulado
IR-10RIA60	International rectifier	600 V	10 A	TO-208AA
2N5204-ND	Vishay Semiconductor	600 V	10 A	TO-208AA
22RIA20-ND	Vishay Semiconductor	200 V	22 A	TO-208AA
IR-2N684	International rectifier	150 V	15 A	TO-208AA
CS23-08IO2	IXYS	800 V	32 A	TO-208AA

Fuente: Autor

Con las cotizaciones realizadas, se descartaron las referencias 22RIA20-ND y 2N5204-ND debido a que el fabricante solo comercializa paquetes de 50 unidades, otras referencias como IR-2N684 y CS23-08IO2 se descartaron por su poca disponibilidad en el mercado. Finalmente se eligió el SCR IR-10RIA60 debido a que

se ajusta a los requerimientos y tiene un bajo costo. Las principales características se describen en la Tabla 6. Para información más detallada en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentran las hojas de especificaciones.

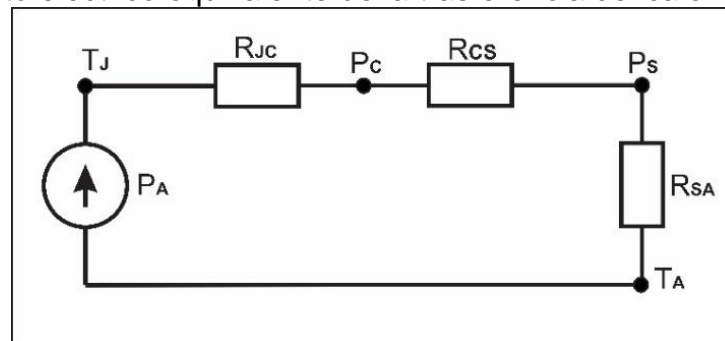
Tabla 6. Características eléctricas y térmicas del SCR IR-10RIA60.

Parámetros	VS-25FR80
$I_{F(AV)}$ Corriente máxima promedio en directo	10 A
$I_{F(RMS)}$ Corriente máxima RMS en directo	25 A
V_{RRM} Voltaje pico máximo en inverso.	600 V
Máximo I^2t para fusibles	$233 A^2s$
R_{thJC} Resistencia térmica de la juntura a la carcasa	$1.85 ^\circ C/W$
R_{thCS} Resistencia térmica de la carcasa	$0.35 ^\circ C/W$
$44I_H$ Corriente de sostenimiento	200 mA

Fuente: Autor

1.3.2. Disipadores de calor. Los disipadores ayudan a transferir al ambiente de manera más eficiente el calor, que se produce por pérdidas de potencia en los semiconductores asociadas a la operación y la conmutación, manteniendo la temperatura del dispositivo dentro de un rango especificado. La selección del disipador se realizó con base en la resistencia térmica del disipador al ambiente (R_{SA}), este parámetro se calcula con el circuito eléctrico equivalente para la trasmisión del calor,¹ que se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Circuito eléctrico equivalente de la trasferencia del calor.



Fuente: Autor

Donde: P_D Potencia disipada por el dispositivo sin disipador.
 R_{JC} Resistencia térmica de la unión a la carcasa $^\circ C/W$.
 R_{CS} Resistencia térmica de la carcasa al disipador $^\circ C/W$.
 R_{SA} Resistencia térmica del disipador al ambiente $^\circ C/W$.
 T_A Temperatura ambiente $^\circ C$.
 T_J Temperatura de la juntura $^\circ C$.

¹ M. H. Rashid. Op. cit., p. 592

Aplicando las leyes de voltaje de Kirchhoff para circuitos eléctricos se obtiene la Ecuación 11.

$$T_J = P_D(R_{JC} + R_{CS} + R_{SA}) \quad \text{Ecuación 11}$$

La potencia máxima disipada por el dispositivo está definida por la Ecuación 12.

$$P_D = \frac{T_J - T_A}{R_{JA}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Reemplazando la Ecuación 11 en la Ecuación 12, y despejando R_{SA} , se obtiene la Ecuación 13, la cual define la resistencia térmica del disipador al ambiente.

$$R_{SA} = \frac{T_J - T_A}{P_D} - (R_{JC} + R_{CS}) \quad \text{Ecuación 13}$$

La Tabla 7 muestra las especificaciones térmicas de los semiconductores seleccionados. Con estos datos se realizó el cálculo de la resistencia térmica requerida para el dispositivo, los cuáles se describen en La Ecuación 14 y Ecuación 15 para los SCR's y los diodos respectivamente.

Tabla 7. Especificaciones térmicas de los semiconductores.

SCRs		Diodos	
R_{CS}	0.35 °C/W	R_{CS}	1.5 °C/W
R_{JC}	1.85 °C/W	R_{JC}	0.5 °C/W
R_{JA}	60 °C/W	R_{JA}	60 °C/W
T_J	125 °C	T_J	175 °C


Fuente: Autor

$$R_{SA_SCRs} = \frac{125^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}}{13.5 \text{ W}} - (1.85^\circ\text{C/W} + 0.35^\circ\text{C/W}) = 4.46 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$R_{SA_DIODO} = \frac{175^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}}{12.7 \text{ W}} - (1.5^\circ\text{C/W} + 0,5^\circ\text{C/W}) = 9.02 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad \text{Ecuación 15}$$

Se selecciona un disipador con una resistencia térmica igual o menor al cálculo realizado. El **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** contiene una lista de disipadores con las formas más comunes y su respectiva resistencia térmica al ambiente, de esta lista se selecciona el disipador que mejor se ajusta a los requerimientos, en este caso es el disipador 7-340-2PP-BA, cuyas características se describen en la Tabla 8.

Tabla 8. Características de del disipador ATS1216-ND.

Imagen	Descripción	Forma	Longitud	Ancho	Volumen	Resistencia térmica	Acabado de material
	HEATSINK PWR DUAL BLACK 7-340-2PP- BA	Rectangular, aletas	0.906" (38.01 mm)	0.906" (29.01 mm)	18.92 cm ²	3.1° C/W	Aluminio Negro anodizado

Fuente: Autor

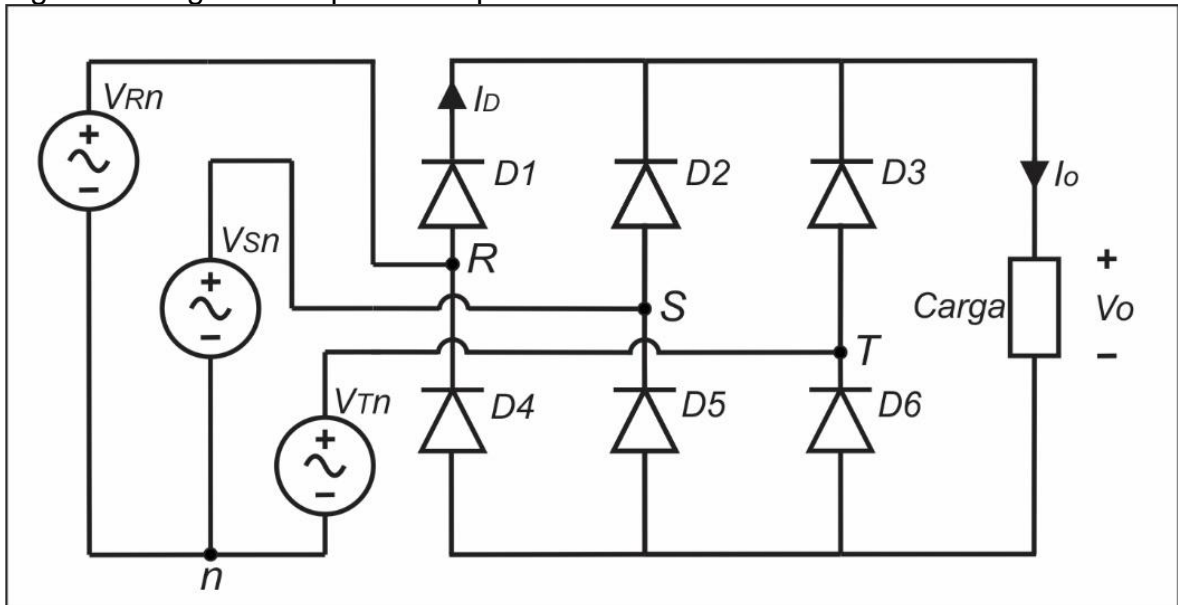
2. RESULTADOS

2.1. PRUEBAS REALIZADAS

Para la verificación del correcto funcionamiento del prototipo, se realizó la implementación de rectificadores trifásicos no controlados semicontrolados y controlados, Comparando los resultados obtenidos con datos de simulación y medidas de las formas de onda registradas con osciloscopio.

2.1.1. Simulación rectificador trifásico tipo puente. Se utilizó la herramienta Simulink® de MATLAB para realizar la simulación del rectificador, La cual se realizó con los parámetros de la Tabla 9. En la Figura 6 se muestra el diagrama esquemático del rectificador.

Figura 6. Diagrama esquemático puente rectificador Trifásico.



Fuente: Autor

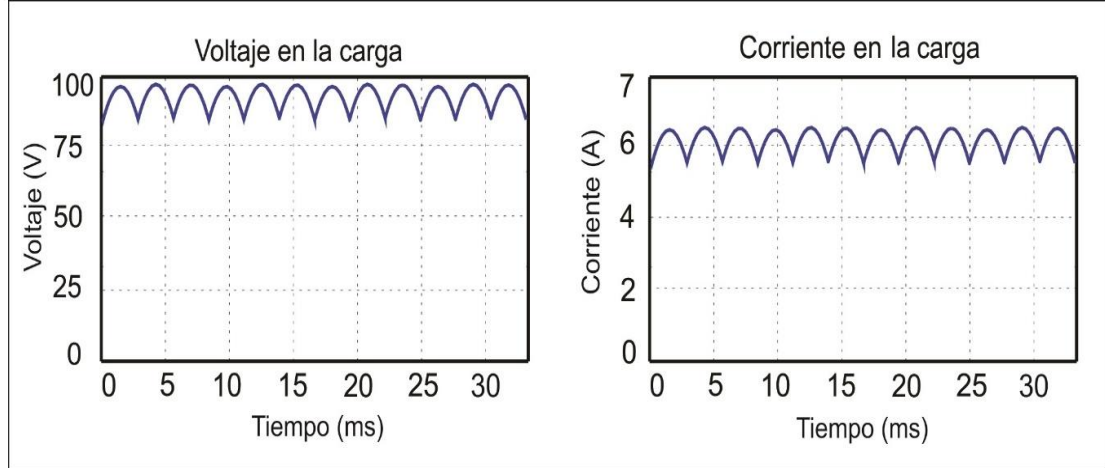
Tabla 9. Parámetros para la simulación del rectificador Trifásico de media onda con carga R.

	Parámetro	Valor	Unidades
VL	Tensión de línea de entrada al rectificador	75.51	V_{rms}
RL	Resistencia de carga	15.6	Ω

Fuente: Autor

La Figura 7 muestra las formas de onda, resultado de la simulación del rectificador Trifásico de onda completa no controlado, además la Tabla 10 contiene los valores de los parámetros del rectificador obtenidos de la simulación.

Figura 7. Formas de onda rectificador Trifásico de onda completa



Fuente: Autor

Tabla 10. valores obtenidos de la simulación del rectificador trifásico de onda completa con carga R.

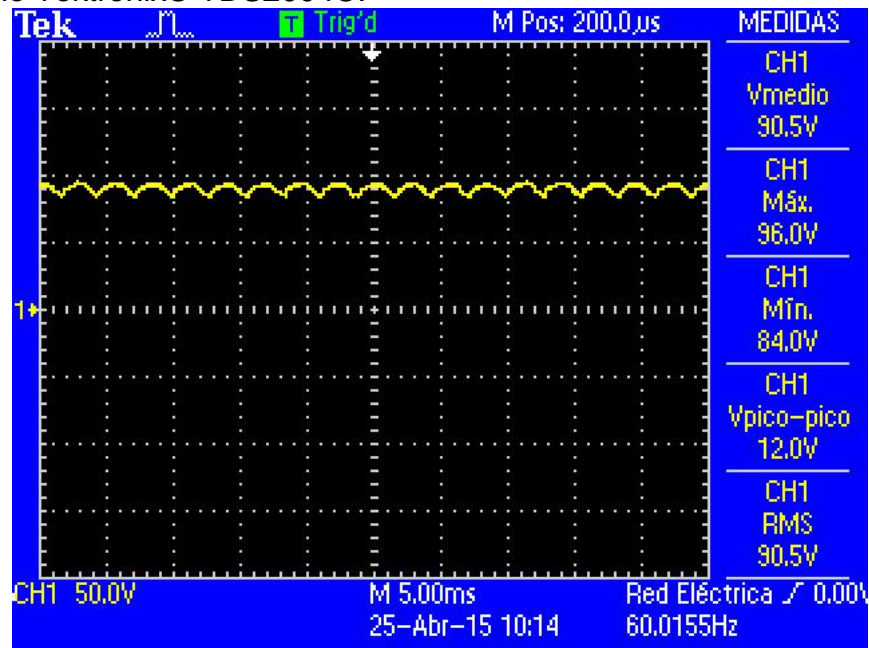
	Parámetro	Valor	
		RMS	DC
V_s	Tensión de línea entrada al rectificador	RMS	75.59 V
		DC	0 V
V_o	Voltaje de salida	RMS	94.14 V
		DC	94.06 V
I_L	Corriente en la Carga	RMS	6.035 A
		DC	6.029 A

Fuente: Autor

2.1.2. Implementación rectificador Trifásico tipo puente. La implementación del rectificador trifásico de onda completa, se realizó sobre el prototipo utilizando seis módulos de diodos y una resistencia de carga de 15.3Ω .

Con el fin de verificar las formas de onda de voltaje obtenidas con el prototipo, se realizó la medición de tensión en la carga con un osciloscopio un Tektronix® TDS2004C, como se muestra en la Figura 8. Finalmente en la Tabla 11 se realiza la comparación los datos obtenidos experimentalmente con los datos de la simulación.

Figura 8. Forma de onda de voltaje en la carga del rectificador medida con el osciloscopio Tektronix® TDS2004C.



Fuente: Autor.

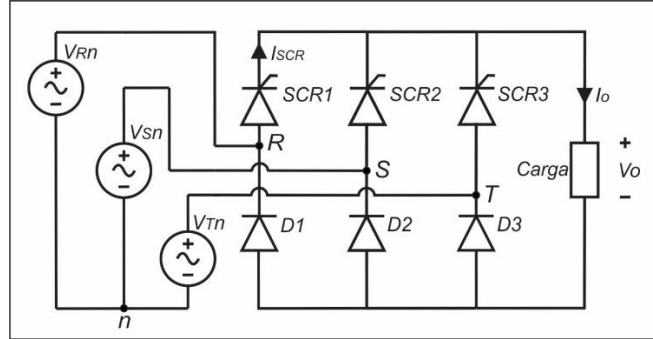
Tabla 11. Datos obtenidos para el rectificador trifásico de onda completa con carga R tanto en simulación como de forma experimental.

Parámetro		Valor		
		Osciloscopio	simulación	Prototipo
V_s	RMS	75.51 V	75.51 V	75.51 V
	DC	0.10 V	0 V	0.03 V
V_o	RMS	90.50 V	94.14V	88.19 V
	DC	90.50 V	94.06 V	87.74V
I_o	RMS	5.91 A	6.02 A	6.20 A
	DC	5.83 A	6.03 A	5.88 A

Fuente: Autor

2.1.3. Simulación rectificador trifásico tipo puente semicontrolado. La Figura 9 muestra el diagrama esquemático del rectificador trifásico de onda completa semicontrolado simulado en Simulink® de MATLAB.

Figura 9. Diagrama esquemático puente rectificador trifásico semicontrolado.

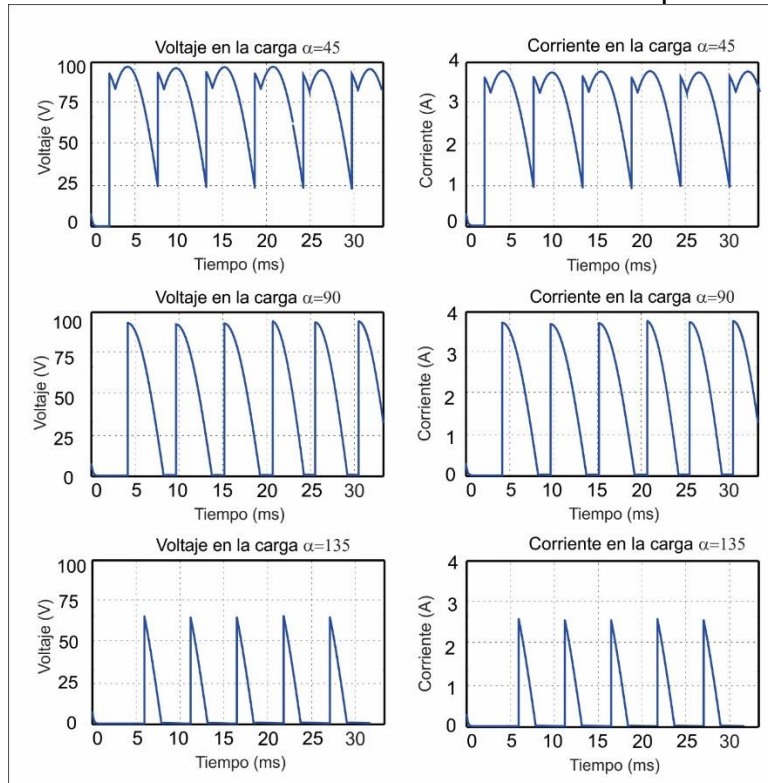


Fuente: Autor

La simulación se realizó con una tensión de entrada de $V_L = 75.5 V_{rms}$, que corresponden a la tensión de línea de salida del transformador utilizado en el prototipo, y una resistencia de carga de 28Ω .

La Figura 38 muestra las formas de onda, resultado de la simulación del rectificador trifásico de onda completa semicontrolado, los datos se tomaron para Ángulos disparo $\alpha=45^\circ, 90^\circ$ y 135° . La Tabla 25 contiene los datos obtenidos.

Figura 10. Formas de onda rectificador trifásico de onda completa semicontrolado.



Fuente: Autor

Tabla 12. Valores obtenidos de la simulación del rectificador trifásico de onda completa con carga R.

Parámetro			Valor		
			$\alpha = 45$	$\alpha = 90$	$\alpha = 135$
V_o	Voltaje de salida	RMS	80.06 V	60.1 V	25.3 V
		DC	82.68 V	46.7 V	13.53 V
I_L	Corriente en la Carga	RMS	3.62 A	2.23 A	0.936 A
		DC	2.96 A	1.73 A	0.501 A

Fuente: Autor

2.1.4. Implementación rectificador trifásico tipo puente semicontrolado. Con el fin de verificar los datos obtenidos, se realiza una comparación de los datos experimentales con los datos de simulación, como se muestra en la Tabla 13.

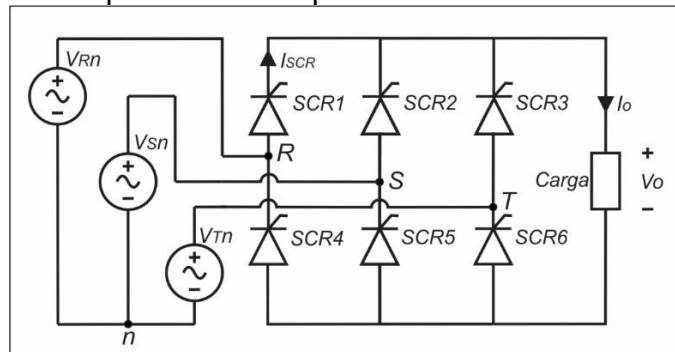
Tabla 13. Datos obtenidos para el rectificador trifásico tipo puente semicontrolado con carga R tanto en simulación como de forma experimental.

Ítem	Valor									
		Simulación			Prototipo			Osciloscopio		
		$\alpha = 45$	$\alpha = 90$	$\alpha = 135$	$\alpha = 45$	$\alpha = 90$	$\alpha = 135$	$\alpha = 45$	$\alpha = 90$	$\alpha = 135$
V_o	RMS	80.06 V	60.1 V	25.3 V	82 V	57.44 V	24.83 V	82.4 V	61.1 V	26.3 V
	DC	82.68 V	46.7 V	13.53 V	78.98 V	53.54 V	13.01 V	79.6 V	46.6 V	14.3 V
I_L	RMS	3.62 A	2.23 A	0.936 A	3.04 A	2.29 A	1.12 A	3.05 A	2.26 V	0.97 V
	DC	2.96 A	1.73 A	0.501 A	2.38 A	1.6 A	0.1 A	2.95 A	1.73 V	0.53 V

Fuente: Autor

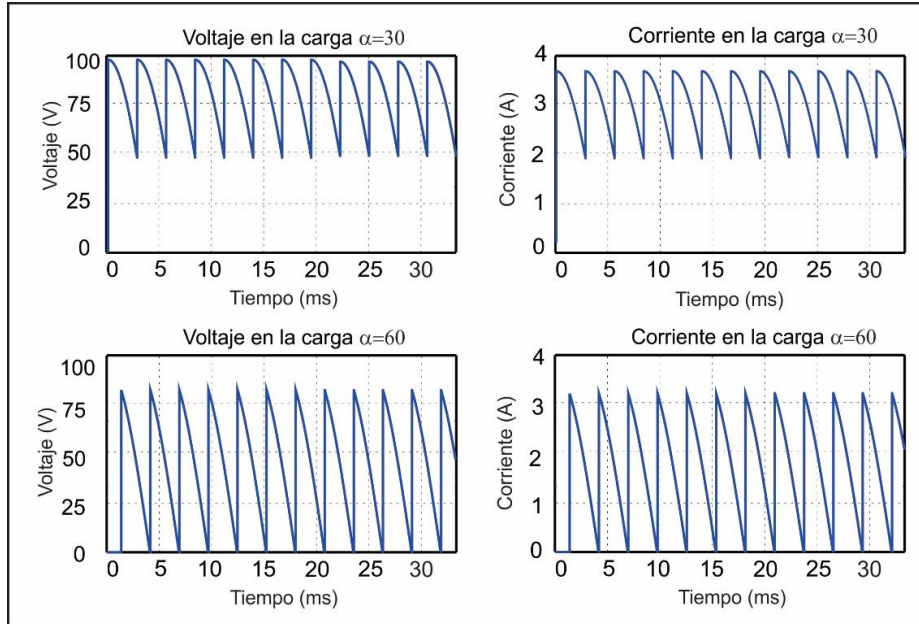
2.1.5. Simulación rectificador trifásico tipo puente controlado. La simulación del rectificador trifásico tipo puente se realizó en el software Simulink® de MATLAB, el diagrama esquemático se muestra en la Figura 11. La Figura 12 muestra las formas de onda de resultado de la simulación la cual se realizó con una resistencia de carga de 27.3Ω , y una tensión de entrada de línea de $75.5 V_{rms}$, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 14.

Figura 11. Diagrama esquemático del puente rectificador trifásico controlado.



Fuente: Autor

Figura 12. Formas de onda rectificador trifásico controlado.



Fuente: Autor

Tabla 14. Valores obtenidos de la simulación del rectificador trifásico de onda completa con carga R.

Parámetro			Valor	
			$\alpha = 30$	$\alpha = 60$
V_o	Voltaje de salida	RMS	86.4 V	55.26 V
		DC	84.94 V	48.38 V
I_L	Corriente en la Carga	RMS	3.21 A	2.02 A
		DC	3.11 A	1.77 A

Fuente: Autor

2.1.6. Implementación rectificador trifásico tipo puente controlado. En la implementación del rectificador tipo puente totalmente controlado se utilizaron seis módulos de SCRs, y una resistencia de carga de 27.3Ω .

Tabla 15. Datos obtenidos para el rectificador trifásico tipo puente controlado.

Ítem		Valor					
		Simulación		Prototipo		Osciloscopio	
		$\alpha = 30$	$\alpha = 60$	$\alpha = 30$	$\alpha = 60$	$\alpha = 30$	$\alpha = 60$
V_o	RMS	86.4 V	53.26 V	83.29 V	52.76 V	85.9 V	54.2 V
	DC	84.94 V	48.38 V	81.71 V	45.8 V	84.7 V	47.5 V
I_L	RMS	3.21 A	2.02 A	3.34 A	2.29 A	3.18 A	2.1 A
	DC	3.11 A	1.77 A	3.21 A	1.89 A	3.13 A	1.85 A

Fuente: Autor

4.3 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.

Con el fin de analizar el desempeño del prototipo en las pruebas realizadas con los rectificadores trifásicos, en la Tabla 16 se resume el porcentaje de error relativo máximo de los cálculos de corriente y tensión en las mediciones realizadas, tomando como patrón los datos obtenidos con el osciloscopio Tektronix® TDS2004C, como se describe en la Ecuación 16.

$$Error_Relativo = \frac{Medición_Prototipo - Medición_Osciloscopio}{Medición_Osciloscopio} \quad \text{Ecuación 16}$$

Tabla 16. Error máximo en las mediciones de corriente y tensión.

Rectificador	Sensor de Tensión	Sensor de Corriente
No Controlado	3.0%	4.9%
Semicontrolado	6.0%	4.0%
Controlado	3.6%	6.5%

Con las pruebas realizadas en la implementación de rectificadores trifásicos se validó el correcto funcionamiento del prototipo y de la interfaz gráfica, presentando un error máximo en los cálculos de tensión de 6.0% y de 6.5% para los de corriente.

3. CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño e implementación de un prototipo para el desarrollo de prácticas de laboratorio en Electrónica de potencia sobre rectificadores, en el cual se verificó el funcionamiento de cada uno de los circuitos diseñados mediante la implementación de rectificadores trifásicos no controlados semicontrolados y controlados, obteniendo resultados satisfactorios en el desempeño del prototipo, por cuanto se validó la interfaz gráfica respecto a la correcta visualización de las formas de onda de corriente y voltaje, y la configuración de las señales de disparo de los SCRs necesarias para cada rectificador.
- El diseño de los circuitos para el sensado de corriente y voltaje fue realizado para permitir la medición de dichas señales en cualquier elemento, nodo, entrada o salida del circuito que se desee implementar, lo que permite al estudiante tener la facilidad de familiarizarse con las formas de onda de los rectificadores implementables, adicionalmente de suministrarle los valores RMS, DC, pico a pico, máximo y mínimo, sin necesidad de un osciloscopio conectado al prototipo.
- El algoritmo para sincronización y generación de los pulsos de disparo se desarrolló en lenguaje de alto nivel obteniendo resultados satisfactorios, sin embargo se evidenció la necesidad de usar un lenguaje de bajo nivel con el fin de obtener mayor precisión en las señales de disparo de los SCRs.
- El algoritmo de sincronización no realiza el ordenamiento de las señales de fase de entrada, por lo que es necesario hacer la conexión en el orden correcto para evitar fallas en la generación de las señales de disparo de los SCRs. En próximas mejoras al prototipo se tiene planteado la implementación de un algoritmo que realice la correcta sincronización independientemente del orden en la conexión.
- Durante todas las pruebas realizadas, el prototipo presentó alta confiabilidad con respecto al funcionamiento de los circuitos de sincronización y disparo de los SCRs, y a la comunicación con la interfaz gráfica.

4. TRABAJOS FUTUROS

- Para futuros desarrollos y modificaciones del prototipo se puede plantear el uso de un transceptor inalámbrico que permita realizar la comunicación entre el dispositivo y el computador de manera remota.
- Modificar la interfaz gráfica para la implementación de algoritmos para la detección de armónicos en señales de tensión, que permitan realizar monitoreo y corrección del factor de potencia de la red eléctrica.
- Realizar el desarrollo de interfaces graficas que se ajusten a nuevas aplicaciones como el control de velocidad de motores y de potencia en diferentes cargas.
- Imprimir algoritmos para el control en lazo cerrado de los rectificadores implementables.

BIBLIOGRAFÍA

Baker, B. «Anti-Aliasing: Analog Filters for Data Acquisition Systems.» *Application Note AN699 Microchip®*, 1999.

Boylestad, Robert L. *Electronica y teoría de circuitos*. México: Pearson Educación, Sexta Edición, 2004.

Groussard, T. *fundamentos del lenguaje C#*. México: ENI Ediciones , Tercera Edición , 2013.

JIMÉNEZ LÓPEZ, Fabián. «Diseño e implementación de filtros Antialiasing para la adquisición de armónicos de corriente y tensión en un FAP.» *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada 2*, nº 18 (2011).

MOHAN, N. *ELECTRONICA DE POTENCIA: Convertidores, aplicaciones y diseño*. México: Mc Graw Hill, Tercera Edición, 2004.

Rashid, M. H. *Electronica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. Mexico: Pearson Educación, Tercera Edición, 2004.

TEXAS INSTRUMENTS®. «Serial analog-to-digital converter TLC4545.» s.f. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc4545.pdf>.

M. m. Canteli, «Apuntes de la asignatura: Regulación, Control y Protección de Máquinas Eléctricas.,» de Convertidores Electrónicos de Potencia, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria. Santander, 2008.

Rafael M. Lamaison Urioste, "Apuntes de Electrónica de Potencia.cap. 3 convertidores ca-cc. rectificadores.," Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2012.

A. a. G. E. F. A. José Manuel Benavent García, *Electrónica de Potencia Teoría y Aplicaciones*, Mexico: Alfaomega, 2000.

J. A. Gélvez Figueredo, J. E. Mier Martínez, "Prototipo para la enseñanza de los convertidores estáticos de potencia," *Rev.UIS Ingenierías*, vol. 3, pp. 2, 2004.

R. L. J. M. Compeán J.V.H., "Diseño didáctico de un rectificador controlado trifásico," Facultad de Ciencias (UASLP), san Luis Potosí, Mexico, 2000.

G. G. Garrido., *Diseño de un convertidor CA/CD para el control de velocidad de un motor DC*, San Luis Potosí, mexico: Tesis Profesional, facultad de Ciencias, UASLP, Septiembre 2002.

Federico Gastón Rosales, Guillermo Luciano Magaldi, federico Martín Serra, "Implementación de un rectificador controlado con fines didácticos," en XXII Congreso Argentino de control Automático, Buenos Aires, 2010.

José Luis Bossa, Cristian Ariel Falco, "- Interfaz Gráfica para un Banco Didáctico Dedicado a la Electrónica de Potencia.," en XXI Congreso Argentino de Control Automático, Buenos Aires, 2008.

Umar Farooq, K. M. Hasam, Muhammad Usman Asad, Asim Iqbal, M. Khalil Akhtar, "Módulo de capacitación para laboratorio de electrónica de potencia, sobre Rectificadores Controlados basados en microcontroladores de bajo costo.," en Conferencia internacional sobre adquisición y procesamiento de señal, Lahore, 2011.

Losic, N.A., "Modeling, analysis and simulation of controlled rectifiers with thyristors," Power Electronics and Drive Systems, 1995., Proceedings of 1995 International Conference on , vol., no., pp.162,167 vol.1, 21-24 Feb 2005.

Shue Li, Feng Lv, "MATLAB-based Three-Phase Full-Controlled Bridge Rectifier Circuit Simulation," 2013 Fourth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, pp. 345-347, 2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2012

Xu Sheng-Hui, "Stability analysis of controlled rectifiers," Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2012 2nd International Conference on , vol., no., pp.1306,1309, 21-23 April 2012

