

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE CONTROL DE
DISPARO PARA EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA
DE LA UPS**

**AUTOR:
DANIEL PATRICIO ZAPATA JARAMILLO**

**TUTOR:
EDUARDO RODRIGO TORRES SANTOS**

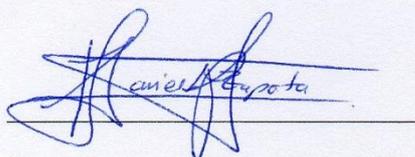
Quito, febrero del 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Daniel Patricio Zapata Jaramillo, con documento de identificación N° 172364113-8, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE CONTROL DE DISPARO PARA EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA DE LA UPS”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado por la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, febrero del 2018



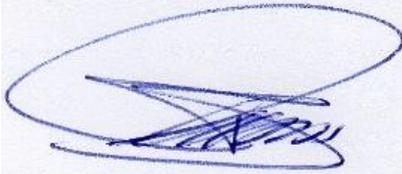
Daniel Patricio Zapata Jaramillo

C.I. 1723641138

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE CONTROL DE DISPARO PARA EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA DE LA UPS”, realizado por Daniel Patricio Zapata Jaramillo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero del 2018



Eduardo Rodrigo Torres Santos

C.I. 1713654604

DEDICATORIA

A mis padres y a mis hermanas que han sido el soporte incondicional de mi crecimiento en todos los aspectos de mi vida.

A mi familia que me han apoyado de la mejor manera posible para la consecución de mis metas, objetivos y logros a lo largo de mi camino universitario.

A mis abuelitos que han sido parte de este objetivo cumplido y a mi sobrina Isabel, una tierna semilla, en mi crecimiento personal.

A Nicole Reinoso, quien siempre creyó en mí.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Politécnica Salesiana y a sus docentes por guiar y formar mis conocimientos previos a la consecución de mi formación profesional.

Al Ingeniero Eduardo Torres que ha sabido guiarme de la mejor manera, brindándome su apoyo y su ayuda de la mejor manera posible para lograr este objetivo final.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Cesión de derechos de autor.....	ii
Declaratoria de coautoría del docente tutor.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Indice de contenido.....	vi
Indice de figuras.....	ix
Indice de tablas.....	x
Indice de ecuaciones.....	x
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
Introducción.....	1
Antecedentes.....	3
a. Planteamiento del problema.....	3
b. Justificación del proyecto.....	3
c. Objetivo General.....	4
d. Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO 1.....	5
MARCO CONCEPTUAL.....	5
1.1 Conceptos generales.....	5
1.2 Sistemas de alimentación.....	8
1.2.1 Sistema monofásico.....	8
1.2.2 Sistema trifásico.....	8
1.3 Resistores.....	9
1.3.1 Resistor lineal.....	9
1.3.2 Resistor no lineal.....	9
1.4 Inductores.....	10
1.5 Motor Monofásico DC de imanes permanentes.....	11
1.6 Electrónica de Potencia.....	11
1.7 Tiristor.....	12
1.8 Formas de onda de los SCR.....	14
1.9 Convertidores electrónicos de potencia.....	15
1.10 Tipos de convertidores.....	15

1.10.1 Convertidores CA/CC	15
1.10.2 Convertidores CC/CC.....	15
1.10.3 Convertidores CC/CA	15
1.10.4 Rectificador Trifásico Controlado.....	16
1.11 Etapa de cruce por cero	16
1.12 Microcontroladores.....	16
1.13 Tipos de micro controladores	17
CAPÍTULO 2.....	19
DISEÑO	19
2.1 Optoacoplador	19
2.2 Diodo	20
2.3 Capacitor.....	20
2.4 Pantalla de cristal líquido (LCD).....	21
2.5 Fuente de alimentación.....	21
2.6 Regulador de tensión	22
2.7 Microcontrolador ATMEGA 164P.....	22
2.8 Microcontrolador ATMEGA 328P.....	23
2.9 Diagramas de bloques del sistema de control.....	24
2.10 Dimensionamiento del circuito detector de cruce por cero	24
2.11 Pulsos de disparo	26
2.12 Sistema de disparo de los tiristores	26
2.13 Dimensionamiento del sistema de disparo de tiristores.	27
2.14 Generación de pulsos para el control.....	28
2.15 Diagramas de flujo del control de ángulo de disparo trifásico.....	31
CAPÍTULO 3.....	33
IMPLEMENTACIÓN	33
3.1 Circuito de cruce por cero	33
3.2 Circuito de control.....	33
3.3 Circuito de Potencia	34
3.4 Circuito de disparo para el tiristor.	35
3.5 Circuito de visualización, interfaz y regulador de tensión	35
3.6 Diagrama esquemático completo	36
CAPÍTULO 4.....	39
ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	39
4.1 Costos de equipos.....	39

4.2	Cruces por cero.....	41
4.3	Pulsos de disparos hacia los tiristores	42
4.4	Análisis de los resultados de la etapa de control para el rectificador trifásico totalmente controlado.	43
4.5	Pruebas del rectificador trifásico totalmente controlado	43
4.6	Muestra de Errores	43
4.6.1	Error Relativo	43
4.6.2	Error relativo entre los módulos y el diseño en protoboard con carga R	44
4.6.3	Error relativo entre los módulos y el diseño en protoboard con carga R-L ..	45
4.6.4	Error relativo entre los módulos y el diseño en protoboard con motor DC ..	46
4.7	Análisis de errores	47
4.8	Conclusiones y Recomendaciones	48
4.8.1	Conclusiones.....	48
4.8.2	Recomendaciones	50
	REFERENCIAS	51
	ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Comportamiento de la corriente alterna	6
Figura 1.2. Potencia eléctrica en los circuitos.....	8
Figura 1.3. Onda senoidal trifásica.	9
Figura 1.4. Unidad de carga resistiva PE-5310-3C.....	10
Figura 1.5. Unidad de carga inductiva PE-5310-3E	10
Figura 1.6. Motor dc de imanes permanentes EM-3330-1A.....	11
Figura 1.7. Diagrama de bloques de un sistema de potencia	12
Figura 1.8. Estructura interna del SCR.	13
Figura 1.9. Ángulos de retardo de encendido de los SCR.	14
Figura 1.10. Estructura básica de un convertidor electrónico de energía.	15
Figura 1.11. Partes de un microcontrolador	17
Figura 2.1. Elementos de un Optoacoplador	19
Figura 2.2. Terminales del diodo.	20
Figura 2.3. Comportamiento de un diodo en un circuito.	20
Figura 2.4. Características del capacitor	21
Figura 2.5. Pantalla de cristal líquido.....	21
Figura 2.6. Características del transformador.	22
Figura 2.7. Encapsulado y esquema de reguladores de tensión integrados	22
Figura 2.8. Distribución de pines ATMEGA 164P.....	23
Figura 2.9. Distribución de pines ATMEGA 328P.....	24
Figura 2.10. Diagrama de bloques del circuito de control.....	24
Figura 2.11. Esquema general cruce por cero	25
Figura 2.12. Cruce por cero, simulado.....	26
Figura 2.13. Diagrama de bloques del sistema de disparo de tiristores.	27
Figura 2.14. Circuito de disparo para los tiristores.	27
Figura 2.15. Diagrama rectificador trifásico controlado.....	28
Figura 2.16. Conducción de corriente en la rectificación del sistema	29
Figura 2.17. Pulsos de disparo para los tiristores a utilizar.....	30
Figura 2.18. Ángulos de disparo a 30° y 90°	30
Figura 2.19. Funcionamiento de la subrutina principal y configuración	31
Figura 2.20. Configuración de las interrupciones del proyecto.	32
Figura 3.1. Diagrama de cruce por cero utilizado.....	33

Figura 3.2. Elementos utilizados en el circuito de control.....	33
Figura 3.3. Elementos utilizados en el circuito de potencia.....	34
Figura 3.4. Elementos que conforman el circuito de disparo.....	35
Figura 3.5. Elementos que conforman la visualización del circuito.	35
Figura 3.6. Diagrama esquemático de visualización y alimentación.	36
Figura 3.7. Circuito de cruce por cero en ambos semiciclos R, S, T.	37
Figura 3.8. Diagrama esquemático del circuito de disparos hacia los tiristores	38
Figura 3.9. Diagrama esquemático del circuito de potencia	38
Figura 4.1 Cruce por cero del semiciclo positivo y negativo de la fase R.	41
Figura 4.2. Cruce por cero del semiciclo positivo y negativo de la fase S.	41
Figura 4.3 Cruce por cero del semiciclo positivo y negativo de la fase T.	42
Figura 4.4. Pulsos de disparo hacia los tiristores.	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Costos y Material en protoboard.....	39
Tabla 4.2: Costos de elementos y material del módulo.	40
Tabla 4.3: Error Relativo (R)	44
Tabla 4.4: Error Relativo (R-L)	45
Tabla 4.5: Error Relativo (Motor DC).....	45

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1.1)	6
Ecuación (1.2).	7
Ecuación (1.3).	8
Ecuación (1.4)	8
Ecuación (1.5)	8
Ecuación (2.6).	25
Ecuación (2.7).	25
Ecuación (2.8)	25
Ecuación (4.1)	43

RESUMEN

El estudio de la electrónica de potencia se realiza de manera teórica y aplicaciones en la simulación de los diferentes circuitos. Sin embargo, un componente fundamental en el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería electrónica es la experimentación e implementación de circuitos básicos de control con aplicación de la teoría y de la simulación.

Este proyecto reúne estos componentes con tecnología que se puede encontrar en el mercado local e implementar como una práctica de laboratorio.

En la parte inicial del proyecto se realizó la caracterización y la identificación de los diversos elementos que conforman el módulo de experimentación PE-5310-2D para conocer su funcionamiento, se revisaran los daños que comúnmente afectan al módulo y se plantean las mejoras necesarias para su funcionamiento las cuales son la base fundamental del desarrollo de un nuevo módulo implementando tecnología local.

El diseño y construcción del módulo de control de fase 3ϕ fue dividida en las etapas de: detección de cruce por cero, de las fases, el control del ángulo de disparo, en la cual se utilizó los microcontroladores ATMEGA 328P, 164P y la etapa de potencia utilizando los tiristores BT152 – 800R con la implementación de optoacopladores, y finalmente la visualización se la definió con un LCD 16*2.

Se realizaron las pruebas de funcionamiento del módulo y se pone a consideración el desarrollo de una práctica de laboratorio y el manual técnico que permitirá a los estudiantes la implementación con las cargas resistivas e inductivas, así como el uso con el motor DC.

ABSTRACT

The study of power electronics is carried out in a theoretical way and applications in the simulation of the different circuits. However, a fundamental component in the learning of electronic engineering students is the implementation and implementation of basic control circuits with application of theory and simulation.

This project contains these components with technology that can be found in the local market and implement a laboratory practice.

In the initial part of the project, the identification and identification of the elements that make up the PE-5310-2D experimentation module were made to know its operation, the damages affecting the module are reviewed and the necessary improvements for its operation are proposed. which are the fundamental basis of the development of a new module implementing local technology.

The design and construction of the phase control module 3 were the steps of: detection of zero crossing, of the phases, control of the firing angle, in which the microcontrollers ATMEGA 328P, 164P and the power stage using the thyristors BT152 - 800R with the implementation of optocouplers, and finally the definition display with LCD 16 * 2.

The functional tests of the module were carried out and the development of a laboratory practice and the technical manual that allowed the students to implement with the resistive and inductive loads, as well as the use with the DC motor, were put into consideration.

INTRODUCCIÓN

La tecnología a nivel nacional ha ido en constante crecimiento tanto en el desarrollo de software como de hardware, lo que se observa en el mercado electrónico que ha ido desarrollándose de una manera plausible a través de los últimos años logrando mejorar el nivel de capacitación de desarrollo y de servicio en el área de la electrónica.

A lo largo de los años la electrónica de potencia ha contribuido al desarrollo de nuevas tecnologías en conversión y transmisión de energía eléctrica como por ejemplo las fuentes de generación y transmisión de energía eléctrica continua, los bancos de baterías, accionamientos de máquinas eléctricas y en los sistemas eléctricos la transmisión de energía en corriente continua. Todo esto se realiza con dispositivos semiconductores desde los diodos y escalando hacia elementos de mejor funcionamiento como los tiristores y los transistores. En la actualidad la electrónica de potencia está presente en los rectificadores, los choppers, los inversores, entre otros.

En el área académica, los módulos de experimentación como el sistema de entrenamiento de electrónica de potencia PE-5000 de la UPS permiten el aprendizaje y experimentación estudiantil, al adentrar en el funcionamiento y conceptos fundamentales de la Electrónica de Potencia.

El presente proyecto tiene como finalidad realizar, diseñar y construir un módulo didáctico de control de disparo de un rectificador trifásico totalmente controlado, basado en un microprocesador, diseñado para poder ser implementado en un protoboard por los estudiantes.

El módulo actual presenta un deterioro paulatino en las funciones que presta, y no se cuenta con manuales de funcionamiento ni mantenimiento; además la tecnología con la que fueron desarrollados no garantizan su funcionamiento por lo cual los estudiantes no pueden realizar sus prácticas y reducen su conocimiento. Se requiere diseñar, construir módulos mejorados y con tecnología actual para prácticas que permitan a los estudiantes reforzar su conocimiento en el tema.

Al culminar este proyecto se espera que los estudiantes de la UPS que cursan la asignatura de Electrónica de Potencia armen personalmente en un protoboard los

módulos de disparo y rectificador, contruidos y diseñados con componentes que puedan ser adquiridos en el mercado electrónico local, y así desarrollar las prácticas de laboratorio.

ANTECEDENTES

a. Planteamiento del problema

Los módulos del laboratorio de potencia no cuentan con manuales de mantenimiento ni de funcionamiento, la tecnología no es la apropiada y requiere de muchos elementos inaccesible en el medio local para poder realizar servicio técnico o de mantenimiento por lo que no se puede garantizar su funcionamiento óptimo. Se busca verificar si existe alguna alternativa para generar el mismo resultado con elementos accesibles en el medio local.

Los estudiantes de la materia de Electrónica de Potencia tienen un conocimiento superficial sobre el funcionamiento y arquitectura de los módulos del laboratorio, por lo que se trata de reforzar la habilidad y el aprendizaje de los estudiantes en dichas prácticas.

b. Justificación del proyecto

El laboratorio de Electrónica de Potencia requiere diseñar las diferentes prácticas, razón por lo cual, se requiere de módulos mejorados.

Al realizar las prácticas de los rectificadores trifásicos totalmente controlados, es necesario que los estudiantes armen personalmente los módulos de disparo y rectificador por lo cual deben estar construidos con componentes que puedan ser adquiridos en el mercado electrónico local, y así permitir que los estudiantes lo armen en un protoboard y así desarrollar las prácticas de laboratorio de Electrónica de Potencia.

Por lo tanto, este proyecto sirve como una guía para fomentar, incentivar y reforzar los conocimientos teóricos de la materia de Electrónica de Potencia.

c. Objetivo General

Diseñar y construir un módulo didáctico de control de disparo de un rectificador trifásico totalmente controlado, basado en un microprocesador, diseñado para poder ser armado en protoboard.

d. Objetivos Específicos

- Caracterizar la operación de los módulos de control de disparo trifásico existentes en el laboratorio de Electrónica de Potencia para estudiar su funcionamiento.
- Diseñar e implementar un circuito de disparo con elementos semiconductores de potencia para las cargas existentes en el laboratorio, y seleccionar la opción más viable.
- Realizar las pruebas de los circuitos de disparo con cargas resistivas (R), carga inductiva y resistiva (R+L) y con el motor DC de imanes permanentes del laboratorio.
- Diseñar y construir el Modulo Didáctico montable en la estación de trabajo
- Validar el diseño del módulo de disparo armando en protoboard para la implementación en las prácticas del laboratorio de Electrónica de Potencia.
- Generar un manual técnico que permita el uso y utilización del módulo.
- Generar la práctica de laboratorio de un rectificador totalmente controlado para los estudiantes de la materia de Electrónica de Potencia.

CAPÍTULO 1

MARCO CONCEPTUAL

1.1 Conceptos generales

- **Voltaje:** Es la cantidad de energía o trabajo que se realiza entre dos puntos A y B para llevar la carga positiva desde un terminal de menor potencial (B) hasta el terminal de una mayor potencial (A). Unidades – voltio (V), representación: V. (López, 2013).

- **Corriente:** Es la cantidad de carga eléctrica que atraviesa y se mueve por una sección transversal generadora de corriente eléctrica por unidad de tiempo. Unidades – amperios (A), representación: I. (López, 2013).

- **Valor eficaz:** Es la raíz cuadrada de aquellos valores instantáneos de tensión o corriente durante un periodo completo, también se denomina como una medida estadística de una magnitud eléctrica variable utilizada para el estudio de las formas de ondas periódicas, denominado también como RMS (root mean square), en valores de corriente y de voltaje produce el mismo efecto de disipación del calor que genera una corriente continua o tensión continúa de la misma magnitud. (Barrales & Rodríguez, 2014).

- **Voltaje pico:** Es el valor máximo de la tensión generada sobre 0. (Barrales & Rodríguez, 2014).

- **Frecuencia:** Es la magnitud que mide la cantidad de repeticiones en el que se desenvuelve un fenómeno o un suceso de forma periódica. Unidades – hercios (Hz), representación: f. (Barrales & Rodríguez, 2014).

- **Amplitud:** Es la variación máxima de desplazamiento u otra magnitud física que varía periódicamente a través del tiempo desde el punto más alejado de la onda hasta el punto de equilibrio de la misma. (Barrales & Rodríguez, 2014).

- **Período:** Es el tiempo transcurrido entre dos puntos equivalentes a través de una onda periódica. Unidades - tiempo (t), representación: T. (Barrales & Rodríguez, 2014).

- **Ángulo de fase y de desfase:** El ángulo de fase es el ángulo de inicio de la onda senoidal. Dadas dos ondas sinodales periódicas que están a una misma frecuencia, se puede comparar el ciclo de una de ellas con respecto al ciclo de la otra, de acuerdo a tales condiciones se puede determinar el desfase de ángulo, de la primera onda con respecto a la segunda, modifica la posición horizontal de la onda senoidal hacia la izquierda o derecha. (Barrales & Rodríguez, 2014).

- **Corriente alterna (CA):** Es la corriente eléctrica en la que su sentido y su magnitud varía cíclicamente. La forma de oscilación que se presenta en la corriente alterna es de carácter senoidal. (Ver Figura 1.1) (Ruiz, Arbelaitz, Ibarra, 2010)

La expresión matemática de una señal sinusoidal, $a(t)$, en base a sus parámetros característicos, tensión $v(t)$, corriente $i(t)$, se puede representar como una función del tiempo en base a la siguiente ecuación:

$$a(t) = A_0 * \sin(\omega t + \beta) \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Donde

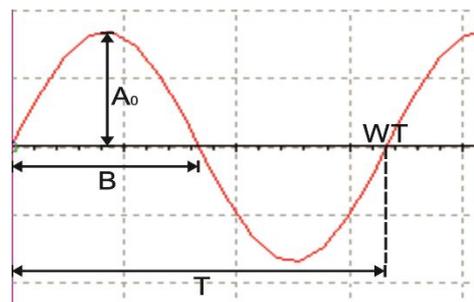
A_0 : Es la amplitud ya sea en amperios o voltios, también denominado voltaje pico.

ω : La pulsación de radianes/segundos.

t : Tiempo en segundos.

β : Ángulo de fase inicial en radianes.

Figura 1.1. Comportamiento de la corriente alterna



Onda senoidal, Elaborado por: Daniel Zapata

- **Corriente continua (CC):** Es la corriente eléctrica que pasa a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial. (Barrales & Rodríguez, 2014)

- **Potencia:** Indica la variación de la energía entregada o recibida por un elemento a lo largo del tiempo determinado. (Ruiz, Arbelaitz, Ibarra, 2010)

- **Potencia en corriente continua:** Es el producto entre la diferencia de potencial entre dos terminales y la cantidad de carga eléctrica que circula a través del elemento (Ruiz, Arbelaitz, Ibarra, 2010):

$$P = V \cdot I \qquad \text{Ec. (1.2)}$$

- **Potencia en corriente alterna:** cuando hay una onda sinusoidal, el promedio de una potencia eléctrica generada entre dos terminales está dada en base a la función de valores eficaces entre la diferencia de potencial y la cantidad de carga eléctrica que se genera a través del elemento. Las cargas al moverse, pueden recibir o perder energía hay dos maneras de calcular la potencia eléctrica que va a depender del sentido en el que fluya la corriente y del signo de la diferencia de potencial. (Ver Figura 1.2). (Ruiz, Arbelaitz, Ibarra, 2010)

- **Potencia entregada:** El elemento por el cual pasan las cargas eléctricas entrega energía a estas convirtiendo otro tipo de energía ya sea mecánica, química etc. en energía eléctrica. (Ruiz, Arbelaitz, Ibarra, 2010)

- **Potencia absorbida:** Es lo contrario al principio de la potencia entregada, el elemento por el cual pasan las cargas eléctricas absorbe energía a estas. (Ruiz, Arbelaitz, Ibarra, 2010).

Figura 1.2. Potencia eléctrica en los circuitos

Potencia entregada		Potencia absorbida	
$V > 0$ e $I > 0$	$V > 0$ e $I < 0$	$V > 0$ e $I > 0$	$V > 0$ e $I < 0$
o	o	o	o
$V < 0$ e $I < 0$	$V < 0$ e $I > 0$	$V < 0$ e $I < 0$	$V < 0$ e $I > 0$
↓	↓	↓	↓
$P_e = V \cdot I > 0$	$P_e = V \cdot I < 0$	$P_e = V \cdot I > 0$	$P_e = V \cdot I < 0$
↓	↓	↓	↓
Elemento Activo	Elemento Pasivo	Elemento Pasivo	Elemento Activo

Potencias, Elaborado por: Daniel Zapata

1.2 Sistemas de alimentación

1.2.1 Sistema monofásico

Un sistema monofásico es la producción, distribución y consumo de energía que está formado por una fase o corriente eléctrica alterna en el cual su voltaje varía de la misma manera. (Carpio, Míguez , Guirado, 2013).

1.2.2 Sistema trifásico

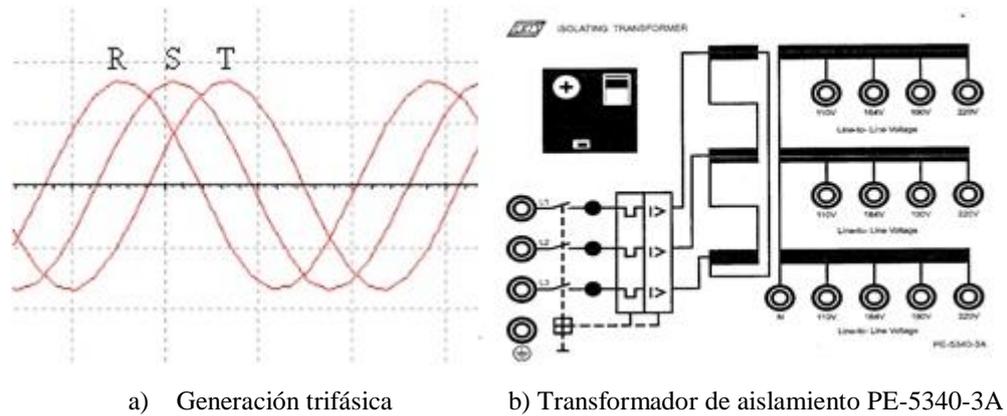
Un sistema trifásico es la producción, distribución y consumo de energía que está formado por tres fases alternas monofásicas que tienen igual amplitud y frecuencia, cada una de sus fases presenta una diferencia entre ellas de 120° y están dadas en un orden establecido. En la Figura 1.3 (a) se observa las tres fases que componen un sistema trifásico y en la Figura 1.3 (b) la fuente trifásica utilizada en el laboratorio de Electrónica de Potencia, a la primera fase se denomina R, la segunda S, y la tercera T, la segunda fase S tiene un desfase de 120° con respecto a R y la tercera fase T tiene un desfase de 120° con respecto a S y 240° con respecto a R. (Carpio, Míguez , Guirado, 2013).

$$\text{Fase 1 (R): } a(t) = A_0 * \sin(\omega t + \beta) \tag{Ec. (1.3)}$$

$$\text{Fase 2 (S): } a(t) = A_0 * \sin(\omega t + 120) \tag{Ec. (1.4)}$$

$$\text{Fase 3 (T): } a(t) = A_0 * \sin(\omega t + 240) \tag{Ec. (1.5)}$$

Figura 1.3. Onda senoidal trifásica.



Generación Trifásica, Elaborado por: Daniel Zapata

1.3 Resistores

El resistor produce una oposición a la circulación de corriente eléctrica, convirtiéndola en calor, la resistencia de un cable depende del material del que este hecho, así como también del espesor y de la longitud del cable, también genera una caída de tensión que es proporcional a la corriente que atraviesa. Unidades–Ohmios (Ω), representación: R. (Ver Figura 1.4). (Menéndez, 2012).

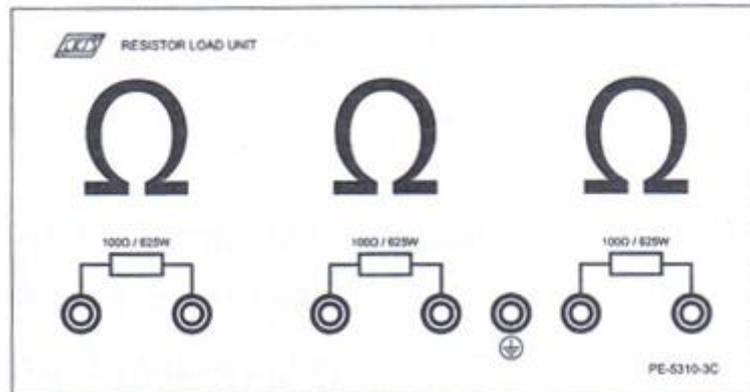
1.3.1 Resistor lineal

Son resistores de respuesta lineal, que, aplicándose tensión o corriente de manera proporcional, gráficamente determinarían una línea recta. (Menéndez, 2012).

1.3.2 Resistor no lineal

Son resistores que aplicándose una tensión o corriente eléctrica no generan una respuesta lineal. (Menéndez, 2012).

Figura 1.4. Unidad de carga resistiva PE-5310-3C, compuesto de tres resistencias de carga individuales, cada una de $100\Omega/625W$.

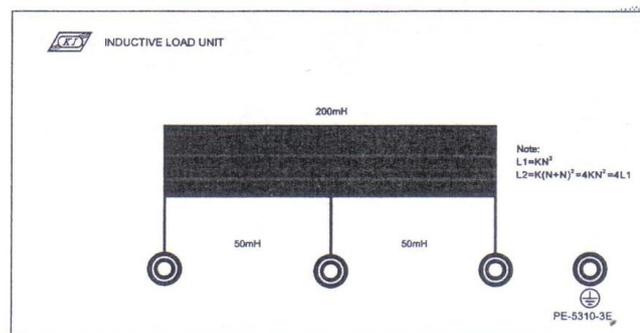


Unidad de carga resistiva PE-5310-3C, Fuente: K&H MFG CO., LTD

1.4 Inductores

Es un componente pasivo que almacena energía en forma de campo magnético por el fenómeno de la autoinducción, está constituido por una bobina de conductor que generalmente es hilo de cobre esmaltado, algunos inductores están compuestos por material ferroso en el núcleo como el acero magnético para elevar su capacidad de magnetismo. El campo magnético generado en la bobina es directamente proporcional a la intensidad de la corriente que atraviesa a la bobina. Unidades: henrio (henry), representación: H. (García, Huerta, Sánchez de la Lama, 2017).

Figura 1.5. Unidad de carga inductiva PE-5310-3E de $50mH*2$ o $200mH$, 5A



Unidad de carga inductiva PE-5310-3E, Fuente: K&H MFG CO., LTD

1.5 Motor Monofásico DC de imanes permanentes

Maquina magnética que transforma la energía eléctrica en energía motriz, las características que conforman el motor es: armadura o rotor, imanes de campo, eje, conmutador, escobillas, y una fuente de energía continua de algún tipo.

El funcionamiento de un motor dc se da por la acción que ejercen los campos magnéticos al estar en sentido opuesto que hacen girar el rotor en dirección contrario al estator que sujetado con el eje de salida lo hará girar. (Gogdell, 2002)

Los rangos de funcionamiento del motor dc de imanes permanentes que se encuentra en el laboratorio de Electrónica de Potencia son los siguientes. (K&H MFG CO, LTD)

- Para el funcionamiento del motor
- Tensión nominal / corriente: 180 V DC / 2.7 A
- Velocidad nominal: 2500 rpm
- Potencia nominal: 0.4 KW

Figura 1.6. Motor dc de imanes permanentes EM-3330-1A a usar, 180v, 2.7A



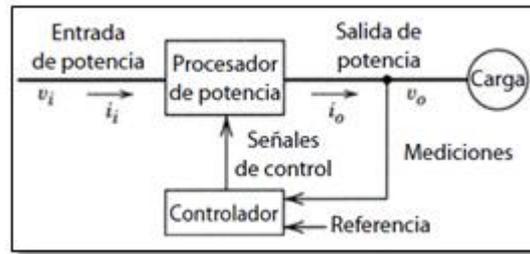
Motor DC de imanes permanentes. Fuente: K&H MFG CO., LTD

1.6 Electrónica de Potencia

Todo proceso electrónico requiere un aporte suficiente o elevado de energía, y para poder controlar ese proceso de manera adecuada, es necesario controlar aquella energía, en el diagrama de bloques representados en la Figura 1.7, el sistema de

potencial está representado por la forma de energía que nos brinda la red eléctrica ya sea monofásico o trifásico, con una frecuencia de línea de 60 Hz en Ecuador, el ángulo de fase que tenemos entre la corriente y el voltaje de entrada dependen del control del procesador de potencia y la salida procesada como número de fases voltaje o corriente es como lo demandan las cargas que se va a utilizar. (Ballester, Piqué, 2012).

Figura 1.7. Diagrama de bloques de un sistema de potencia



Sistema de Potencia, Fuente: Ned Mohan, 2009

El diagrama de bloques puede estar constituido por circuitos lineales integrados y/o procesadores digitales de señales. Los avances tecnológicos han permitido una mejora en el manejo de corriente y voltaje. (Ballester, Piqué, 2012)

Entre las diversas aplicaciones que encontramos en el medio tenemos:

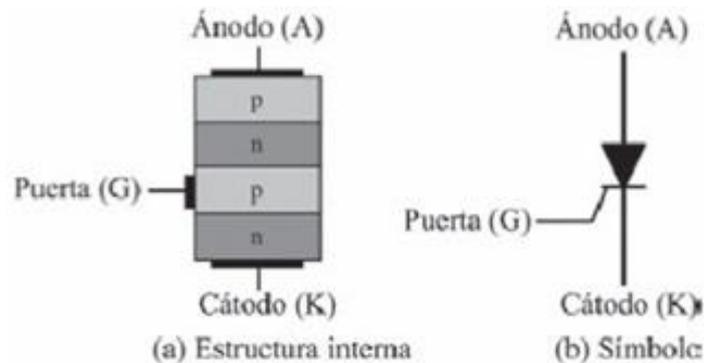
- Fuentes de alimentación conmutadas (CC) y sistemas de alimentación ininterrumpidas.
- Conservación de la energía.
- Control de procesos y automatización de fábricas.
- Transporte y aplicaciones de electrotecnia.

1.7 Tiristor

El tiristor o SCR (Rectificador controlado de silicio) es un dispositivo de tres terminales, para controlar corrientes grandes dirigidas a una carga. Los SCR's actúan como un interruptor, cuando este se enciende genera una resistencia relativamente baja para el flujo de corriente desde el ánodo hasta el cátodo, después de este proceso actúa como un interruptor en cerrado. Está conformado por material semiconductor de cuatro capas de estructura pnpn las cuales forman 3 uniones pn's distintas, las terminales del

SCR tienen el nombre de ánodo, cátodo y puerta. (Ver Figura 1.8). (García, Huerta, Sánchez de la Lama, 2017).

Figura 1.8. Estructura interna del SCR.



SCR, Fuente: García. M, Huerta. P, y Sánchez de la Lama. C, 2017

Al apagarse el SCR, el flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo no puede fluir y este actúa como un interruptor abierto. Cuando la fuente de alimentación para el SCR es CA, utiliza una parte del tiempo del ciclo (60Hz) en estado encendido y el resto del tiempo del ciclo en estado apagado, el tiempo del ciclo es de 16.67 [ms] el cual se divide entre el tiempo que el SCR permanece encendido y apagado y la compuerta es la encargada de controlar el tiempo que transcurre en cada estado. (García, Huerta, Sánchez de la Lama, 2017)

Si transcurre un periodo de tiempo pequeño en estado encendido, la corriente que es transferida a la carga pues será pequeña ya que la corriente generada por la fuente y que pasa por el SCR es relativamente corta por el periodo de tiempo en que permaneció en encendido, del mismo modo cuando hay una señal de activación de la compuerta con un tiempo relativamente largo, el paso de corriente hacia la carga también será mayor, de esta manera la corriente que va dirigida hacia la carga puede modificarse en base el tiempo de cada ciclo en el que el SCR esta encendido. (García, Huerta, Sánchez de la Lama, 2017).

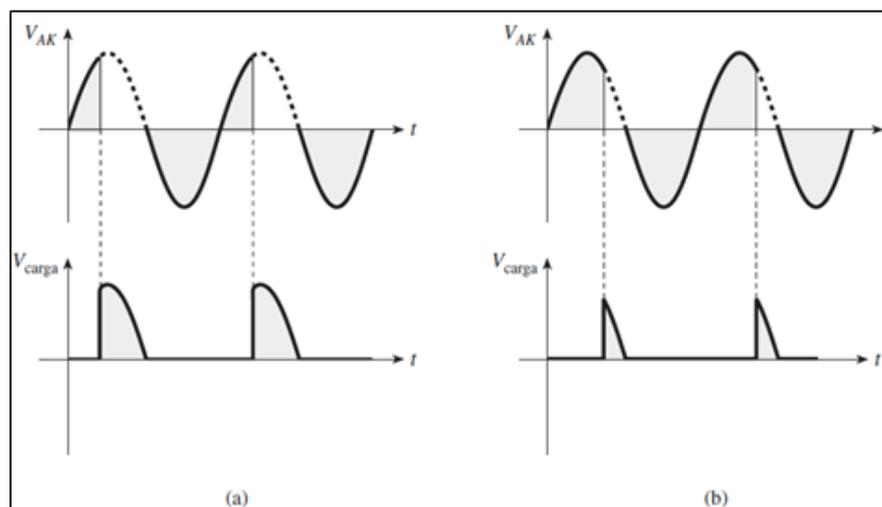
El SCR en pocas palabras es un rectificador en el cual conduce corriente durante los semiciclos positivos de la alimentación en CA, cuando está en el semiciclo positivo el ánodo del SCR es más positivo que el cátodo, por lo cual es SCR no se va a encender

por más de la mitad del tiempo, la otra mitad del tiempo tendremos un semiciclo negativo el cual provoca que el SCR cambie a polaridad inversa impidiendo el flujo de corriente ya que el SCR no se enciende en ese medio ciclo negativo de suministro. (García, Huerta, Sánchez de la Lama, 2017).

1.8 Formas de onda de los SCR

El comportamiento de un SCR por medio de los ángulos de conducción, son los grados en donde el SCR esta encendido y el ángulo de retardo de encendido son los grados que transcurren antes de que el SCR pueda encenderse. Como vemos en la Figura 1.9 nos indica los ángulos de retardo de encendido del SCR. (Maloney, 2006). El SCR se dispara mediante una pequeña cantidad de corriente (i_G) aplicada en la terminal de compuerta y que circula desde la compuerta hasta el cátodo y sale del SCR a partir del cátodo. La corriente necesaria para poder disparar un SCR se simboliza como I_{GT} , generalmente oscila entre los valores de 0.1 y 50 mA para poder dispararse, y una vez que se ha disparado no se necesita otra vez de aquel flujo de corriente, pero cuando la corriente entre el ánodo y el cátodo (i_{AK}) disminuye por debajo del mínimo llamado corriente de retención (I_{HO}) el SCR se apagara, esto ocurre cuando se generan semiciclos negativos en la alimentación CA. El valor de I_{HO} para la mayoría de SCR es de 10 mA. (Maloney, 2006).

Figura 1.9. Ángulos de retardo de encendido de los SCR a un ángulo de 60° (a) y 135° (b).

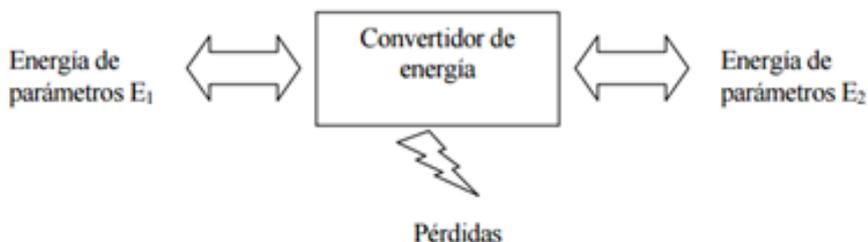


Ángulo de retardo de encendido, Fuente: Maloney. T, 2006

1.9 Convertidores electrónicos de potencia

El convertidor de energía es un sistema o equipo electrónico en el que se transforma la energía eléctrica a un formato diferente. Por ejemplo, el transformar la corriente alterna en corriente continua. (Ver Figura 1.10)

Figura 1.10. Estructura básica de un convertidor electrónico de energía



Convertidor electrónico de potencia, Fuente: Canteli. M, 2012.

1.10 Tipos de convertidores

1.10.1 Convertidores CA/CC

Transforman la corriente de entrada de tipo alterna que puede ser monofásica o trifásica, en corriente continua, entre los más utilizados tenemos, rectificadores monofásicos de media onda y de onda completa. (Canteli, 2012).

1.10.2 Convertidores CC/CC

En estos convertidores se transforma una corriente continua de un determinado valor en otra corriente continua de distinto valor, desde el punto de vista de su aplicación en el campo es el mismo que en los convertidores CA-CC, con la diferencia que la fuente de energía es alterna no continua. La utilización de estos sistemas se da en donde la utilización de los procesos requiere corriente continua. (Canteli, 2012).

1.10.3 Convertidores CC/CA

Estos convertidores también reciben el nombre de inversores, estos convertidores realizan la función de transformar la corriente continua en corriente alterna, con la posibilidad de poder controlar el valor eficaz de la tensión como la frecuencia y la

energía generada a la salida. La utilización de estos sistemas se puede dar para acoplar a un sistema eléctrico la energía generada por generadores eólicos. (Canteli, 2012).

1.10.4 Rectificador Trifásico Controlado

Los rectificadores trifásicos controlados utilizan elementos electrónicos de potencia como SCR's, GTO's, MOSFET's, IGBT's etc.

Se clasifican en dos tipos de topologías, del cual dependen del nivel de tensión a la salida del rectificador.

El rectificador trifásico controlado permite un flujo de potencia bidireccional, en este caso utilizando implementando un circuito de control y un circuito de potencia, los cuales generan corrientes de entrada de forma sinusoidal, la cantidad de potencia aplicada a la carga puede ser controlada a voluntad del diseñador. (García, 2010).

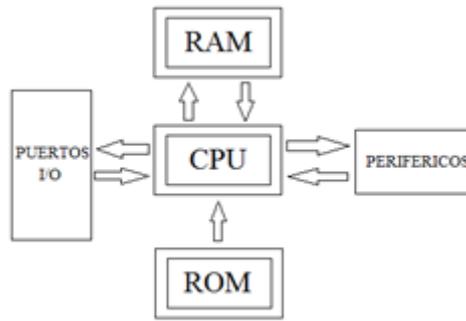
1.11 Etapa de cruce por cero

Monitorea las señales de entradas (trifásico) y detecta el cruce de cada señal alterna con la línea de referencia que es cero, sincronizando de esta manera la etapa de control y la señal trifásica de alimentación. (García, 2010).

1.12 Microcontroladores

Es un circuito integrado que consta de un núcleo (CPU), unidades de memoria (RAM, ROM), periféricos, entradas y salidas, estos forman parte y están interconectadas dentro de un microcontrolador, dedicado a diversas tareas y aplicaciones, en su memoria está el programa que vamos a utilizar para controlar la aplicación que elegimos, todos los recursos que obtenemos del microcontrolador lo podemos utilizar como las entradas y salidas para la conexión de sensores y actuadores a controlar, una vez configurado y programado el microcontrolador está listo para la tarea deseada. (Ver Figura 1.11). (Novas, 2008).

Figura 1.11. Partes de un microcontrolador



Esquema Microcontrolador, Elaborado por: Daniel Zapata

El microcontrolador adopta dos clases de arquitectura la von Neumann y la Harvard, la von Neumann se caracteriza por tener una sola memoria principal en donde se almacenan las instrucciones y la programación de una manera distinta, en cambio la arquitectura Harvard consta de dos clases de memorias en donde se almacenan las instrucciones y en la otra los datos, actualmente uno de los más utilizados. (Novas, 2008).

1.13 Tipos de micro controladores

- **Gama baja o básica: PIC16C5X con instrucciones de 12 bits**
Contiene una serie de pics con características limitadas, de 18 a 28 pines y se alimentan desde 2.5 V, tiene una gama de 33 instrucciones la cual consta de 12 bits y no admite ningún tipo de interrupción. (Novas, 2008)
- **Gama media: PIC16CXXX con instrucciones de 14 bits**
Más complejo y variado en la familia de los PICS, contiene entre 18 hasta 68 pines en el cual se integran algunos periféricos, tiene una gama de 35 instrucciones y funciona a 14 bits y permite el anidamiento de subrutinas. (Novas, 2008)
- **Gama alta: PIC17CXXX con instrucciones de 16 bits**
Esta clase de Microcontroladores contienen una lista de 58 instrucciones a 16 bits y el sistema que utilizan dispone de una gestión de interruptores vectorizados muy potentes, al igual que el control de periféricos, comunicación serial y paralela con ciertos elementos externos y un multiplicador de hardware

a gran velocidad, una de las características que más sobresalen de estos microcontroladores es su arquitectura abierta que consiste en la posibilidad de ampliar el microcontrolador con elementos externos. (Novas, 2008).

- **Gama mejorada: PIC18C(F)XXX con instrucciones de 16 bits**
Estos modelos se diferencian por su versatilidad en aplicaciones como automoción, ofimática y control industrial, en estos modelos la velocidad destaca (40 MHz), además consideran un espacio de direccionamiento para la memoria del programa que permite alcanzar los 2MB y 4KB para la memoria de datos, la inclusión de memoria flash, un juego de 77 instrucciones de 16 bits cada uno, orientación a la programación de lenguaje C y compiladores eficientes y finalmente mejores herramientas de emulación. (Novas, 2008).

CAPÍTULO 2

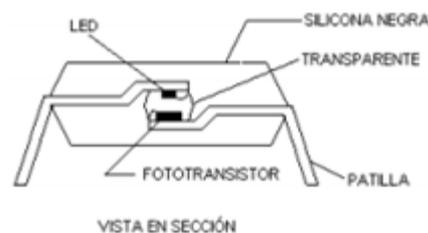
DISEÑO

En este capítulo se describe el diseño realizado para el control de ángulo de disparo trifásico, tanto en hardware como software. Se especifican las características relevantes de los elementos que se utilizan en el diseño.

2.1 Optoacoplador

Es un dispositivo que utiliza un haz de radiación para transmitir señales eléctricas sin estar conectados entre sí, se utiliza un elemento semiconductor como emisor junto a un foto sensor. (Ver figura 2.1).

Figura 2.1. Elementos de un Optoacoplador



Optoacoplador, Fuente: Vicioli. R, 2014

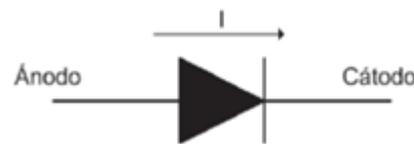
Tiene una alta tensión de aislamiento al igual que su resistencia, no tiene partes mecánicas ni contactos móviles y tiene una buena maniobrabilidad, no genera interferencia electromagnética. Existen dos modos de operabilidad, el modo lineal y el modo lógico digital. (Vicioli, 2014).

- En el modo lineal la salida de un optoacoplador produce una señal que es similar a la señal de entrada, la amplitud resulta del producto entre la señal de entrada y radio de transferencia de corriente (CTR). (Vicioli, 2014).
- En el modo lógico digital la salida toma un valor lógico alto o un nivel bajo (tierra). (Vicioli, 2014).

2.2 Diodo

Es un elemento electrónico semiconductor en el cual la corriente circula por un sentido, pero es bloqueada, por el contrario. Consta de dos terminales ánodo y cátodo donde la corriente circula desde el primero al segundo. (Ver Figura 2.2). (García, Huerta, Sánchez de la Lama, 2017).

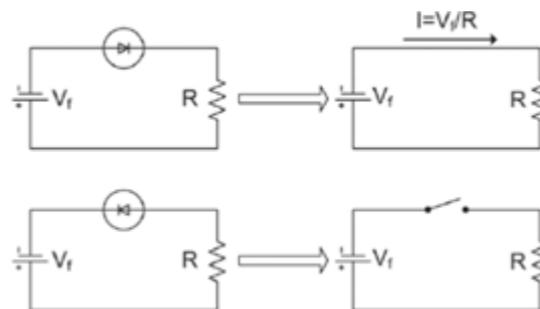
Figura 2.2. Terminales del diodo



Diodo, Fuente: García, Huerta, Sánchez de la Lama, 2017.

Se aplica este comportamiento en un circuito una resistencia y una fuente y según la orientación del diodo el circuito puede convertirse en un circuito abierto o un circuito cerrado. (García, Huerta, y Sánchez de la Lama, 2017)

Figura 2.3. Comportamiento de un diodo en un circuito.

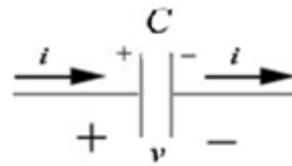


Comportamiento de un Diodo, Fuente: García, Huerta, Sánchez de la Lama, 2017.

2.3 Capacitor

Son elementos que almacenan energía de los campos eléctricos que se producen entre sus placas, también se les llama elementos biterminales, y se consideran elementos pasivos cuando almacenan absorben y cargan energía, de igual manera se consideran elementos activos ya que descargan energía anteriormente almacenada. (Ver Figura 2.4). (Ruiz, Arbelaitz, Ibarra, 2010)

Figura 2.4. Características del capacitor

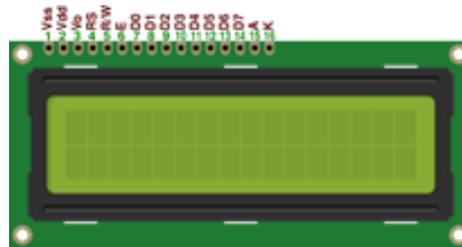


Capacitor, Fuente: Ruiz, Arbelaitz, Ibarra, 2010

2.4 Pantalla de cristal líquido (LCD)

Es un circuito barato y fiable a la hora de mostrar los datos de un proceso de control o de monitoreo (Ver Figura 2.5). Las pantallas LCD tiene la capacidad de mostrar cualquier carácter alfanumérico, esto gracias a un generador de caracteres ubicado en la memoria ROM que genera los patrones de la matriz de puntos de caracteres que se visualizan en la pantalla. Con la memoria RAM interna se puede guardar los caracteres ya programados y los exhibe cada vez que se encienda la pantalla LCD. EL consumo de corriente del módulo es el mínimo y su lógica de control ya viene instalada. En el proyecto explicado, se utiliza un LCD para mostrar el valor de los ángulos de disparo de los tiristores. (Casa & Regalado, 2007).

Figura 2.5. Pantalla de cristal líquido



LCD, Fuente: <https://hetpro-store.com>

2.5 Fuente de alimentación

El proyecto requiere de un voltaje de 5 Vdc para poder controlar los microcontroladores ATMEGA 164P y ATMEGA 328P, por lo tanto, se utiliza un adaptador de alimentación con las siguientes características (Ver Figura 2.6):

- Entrada: AC 100-240V 50/60Hz 0.2A
- Salida: DC +5V, 700 mA

Figura 2.6. Características del transformador.

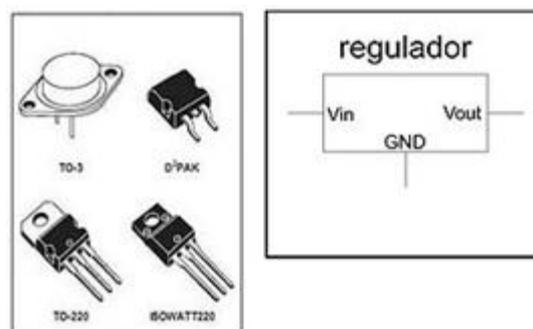


Fuente de alimentación, Elaborado por: Daniel Zapata

2.6 Regulador de tensión

Es un elemento que mantiene un nivel de tensión constante, su forma externa se asemeja al de los transistores de potencia y sus terminales constan de entrada salida y tierra. Su funcionamiento se caracteriza por conectar la etapa del filtrado a la entrada, la terminal de salida un nivel de tensión constante y definido y su terminal de tierra a la misma. (Ver Anexo 5) Por lo que son componentes en donde se maneja valores de potencia altos se usa frecuentemente disipadores de calor para evitar un recalentamiento que los dañen. (Ver Figura 2.7).

Figura 2.7. Encapsulado y esquema de reguladores de tensión integrados



Regulador de tensión, Fuente:

[http://wiki.erikcrane.net/index.php/Fuente_Alimentaci%C3%B3n#/media/File:](http://wiki.erikcrane.net/index.php/Fuente_Alimentaci%C3%B3n#/media/File:Reguladores.jpg)

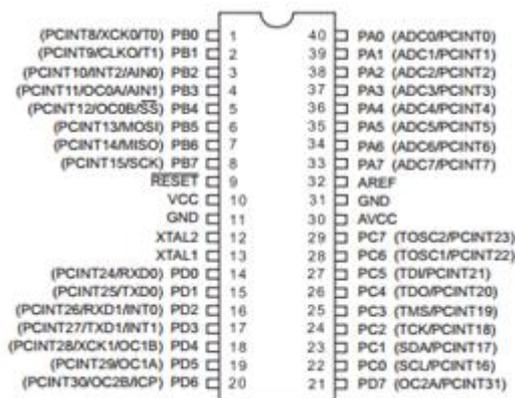
Reguladores.jpg

2.7 Microcontrolador ATMEGA 164P

El ATMEGA 164P es un microcontrolador de bajo consumo y de alto rendimiento de 8 bits, con una arquitectura avanzada en la cual se pueden leer 131 instrucciones de las cuales se ejecutan en un ciclo de máquina, tiene un funcionamiento estático total, un

multiplicador por hardware de 2 ciclos, 32 registros de trabajo para propósito general de 8 bits y una calidad de procesamiento de unos 20 MIPS (millones de instrucciones por segundo) a 20 MHz. La transferencia de información en este microcontrolador es de 1 MPS por MHz, por lo cual se puede optimizar el consumo de energía contra la rapidez de procesamiento según el diseñador. La memoria Flash auto programable para el sistema es de 16 kbytes, con 512 bytes de memoria EEPROM, además cuenta con un bloqueo programable para la seguridad del software. Entre las características de los periféricos hay dos timers/contadores de 8 bits con modo comparación y pre escalamiento separado, un timer/contador de 16 bits con modo comparación, pre escalamiento separado y modo captura, contador de tiempo real con oscilador separado, 6 canales para PWM, ADC de 10 bits y 8 canales, dos puertos seriales programables, interfaz serial maestro-esclavo, y un comparador analógico dentro del mismo chip. (Galarza, 2016). (Ver la Figura 2.8)

Figura 2.8. Distribución de pines ATMEGA 164P

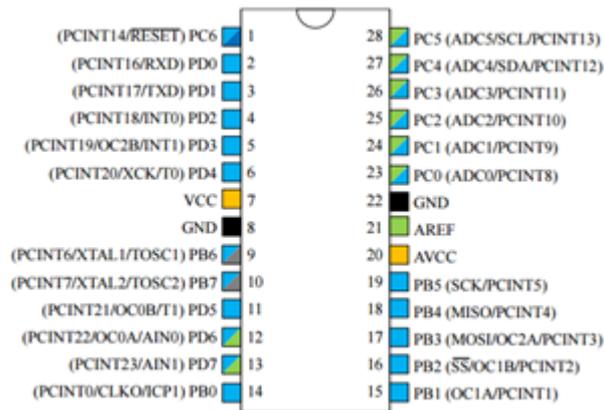


ATMEGA 164P, Fuente: Galarza J. 2016.

2.8 Microcontrolador ATMEGA 328P

El ATMEGA 328P es un microcontrolador de similares características al ATMEGA 164P, pero con una memoria Flash auto programable para el sistema es de 32 kbytes, con 1 kbytes de memoria EEPROM. (Atmel,2016). (Ver la Figura 2.9).

Figura 2.9. Distribución de pines ATMEGA 328P.



ATMEGA 328P, Fuente: ATMEL, 2016

2.9 Diagramas de bloques del sistema de control

En el diagrama de bloques que se observa en la Figura 2.10, representa la etapa de control de disparo del circuito correspondiente a placa de control.

Figura 2.10. Diagrama de bloques del circuito de control

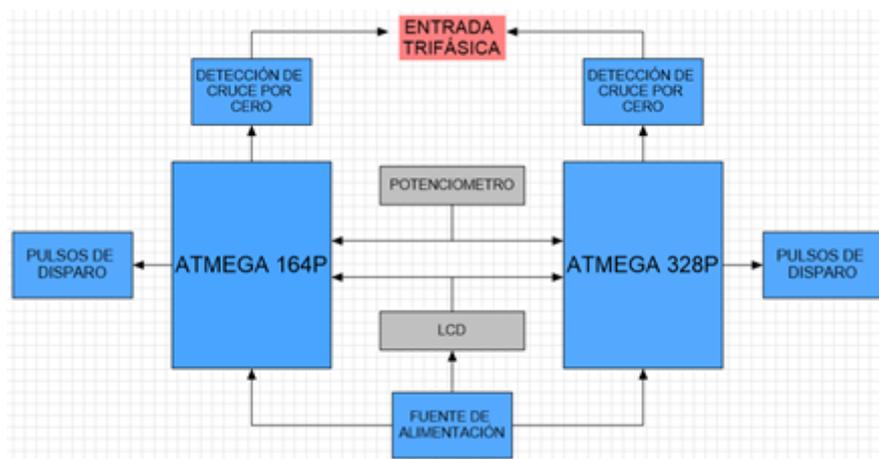


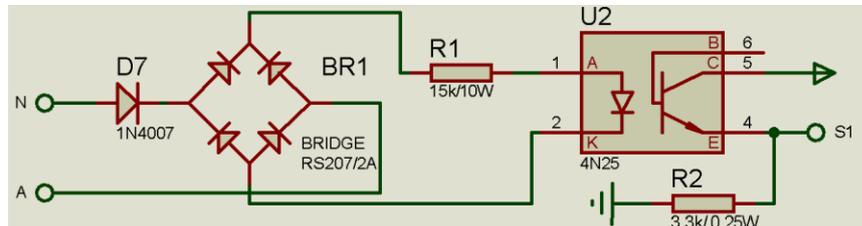
Diagrama de control, Elaborado por: Daniel Zapata

2.10 Dimensionamiento del circuito detector de cruce por cero

Los cruces por cero se producen cuando la tensión de la red alterna cambia de polaridad, del ciclo positivo al ciclo negativo o a la inversa. Para detectar el circuito de cruce por cero en la línea de tensión (110Vac – 60Hz) se utiliza un optoacoplador 4N25 cuyas características se las puede observar en el Anexo 1. Se va a utilizar tres fases por lo tanto se implementa un total de 6 optoacopladores para los 6 detectores de

cruce por cero, Tres detectores de cruce por cero para la rectificación de los semiciclos positivos y tres detectores de cruce por cero para la rectificación de los semiciclos negativos (Ver Figura 2.11)

Figura 2.11. Esquema general cruce por cero



Conexión cruce por cero, Elaborado por: Daniel Zapata

El colector del transistor va conectado a 5V, la resistencia R1 se dimensiona considerando las peores condiciones que puedan darse.

$$V_{R1} = \sqrt{2} V_f - V_{LED} \quad \text{Ec.(2.6)}$$

$$I_{R1} = I_{LED} \leq 20mA \quad \text{Ec.(2.7)}$$

$$R_1 = \frac{\sqrt{2} V_f - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{120 \sqrt{2} - 1.5V}{20mA} = 8.410 \text{ k}\Omega$$

Se selecciona una resistencia de valor comercial disponible:

$$R_1 = 15k\Omega$$

Se calcula la potencia disipada de la resistencia:

$$P_{R1} = I_{R1}^2 \cdot R_1 \quad \text{Ec. (2.8)}$$

$$P_{R1} = (20mA)^2 \cdot 10k\Omega = 4 \text{ W}$$

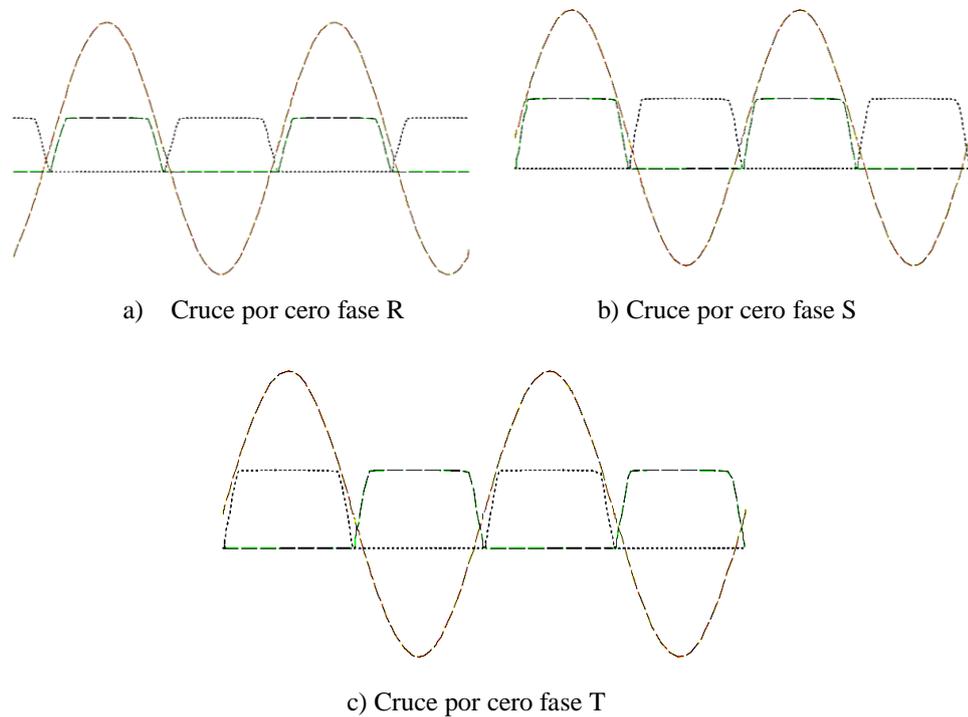
La resistencia cerámica estandarizada sería:

$$R_1 = 10k\Omega \text{ a } 10W$$

La resistencia R2, se coloca para limitar la corriente requerida del microcontrolador. Se utilizan diodos para los circuitos de cruce por cero se usan como una proteccion del diodo led del optoacoplador. En la Figura 2.12 se muestra las formas de onda de los

circuitos diseñados para los cruces por cero trifásicos implementados para cada fase (R, S, T), simulado.

Figura 2.12. Cruce por cero del semiciclo + y - de la fase R, S, T, simulado.



Cruce por cero, Elaborado por: Daniel Zapata

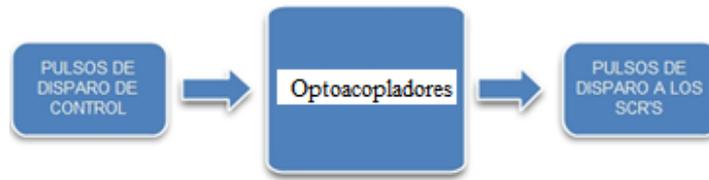
2.11 Pulsos de disparo

El microcontrolador genera los pulsos de disparo que componen el comportamiento de los elementos de potencia de manera individual. Los pulsos que se generan están de manera sincronizada con cada una de las fases de la red eléctrica y mediante un circuito simple se logra modificar el ángulo de disparo de acuerdo a la fase.

2.12 Sistema de disparo de los tiristores

En la Figura 2.13 se representa el diagrama de bloques del acoplamiento de la etapa de control con la etapa de potencia. Se utiliza optoacopladores porque ofrecen algunas ventajas como son: el aislamiento eléctrico y el manejo de cambios de estado a altas frecuencias, para estos casos se separa la parte de control de la parte de potencia para evitar daños por sobrecarga o voltaje inverso.

Figura 2.13. Diagrama de bloques del sistema de disparo de tiristores



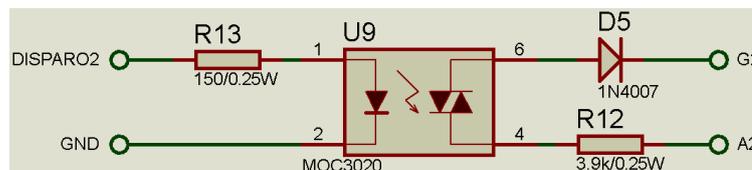
Sistema de disparo de tiristores, Elaborado por: Daniel Zapata

El bloque de los pulsos de disparo de control son generados en los microcontroladores de manera digital y activa el haz de luz en los optoacoplador para generar los pulsos de disparo a los SCR's.

2.13 Dimensionamiento del sistema de disparo de tiristores.

Se dimensionan los valores de las resistencias R3 y R4, para el control de las tres fases cada microcontrolador implementa 3 optoacopladores para los pulsos de disparo, el primero genera los pulsos de disparo para los tres primeros tiristores, y para los tiristores restantes los otros tres pulsos de disparos provenientes del otro microcontrolador.

Figura 2.14. Circuito de disparo para los tiristores.



Circuito de disparo, Elaborado por: Daniel Zapata

Los pulsos de disparo van desde el microcontrolador ATMEGA 164P conectados a la resistencias de 150 ohmios, desde los pines 37, 38, 39, hasta el pin 1 de cada optoacoplador MOC3020 para los tres primeros tiristores y a su vez los pulsos de disparo del ATMEGA 328P van conectados a la resistencias de 150 ohmios, desde los pines 15, 16, 17 conectados al pin 1 de cada optoacoplador MOC3020 para los tres tiristores que faltan, y las resistencias que puedan darse. Teniendo en cuenta la Ec.(2.6) obtenemos:

$$R_3 = \frac{\sqrt{2} V_f - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{120 \sqrt{2} - 3V}{40mA} = 3.364 k\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_o - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 - 3V}{15mA} = 133.3 \Omega$$

Seleccionando una resistencia estandarizada disponible:

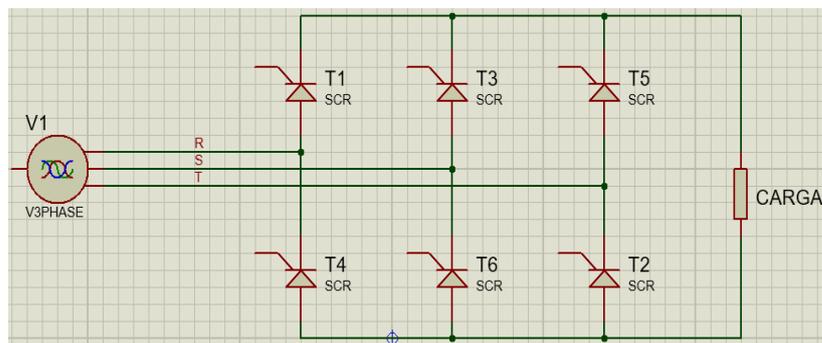
$$R_3 = 3.9k\Omega; R_2 = 150\Omega$$

Se utilizan diodos en la implementacion de los optoacopladores para una protección del diodo led de estos.

2.14 Generación de pulsos para el control.

Se genera los pulsos de disparo de los tiristores mediante programación en microcontroladores, el cual está directamente aplicado a un rectificador trifásico de 6 pulsos el cual consiste en un sistema de tres ramales que consta de interruptores semiconductores de potencia, en este caso SCR's, En la Figura 2.15 se muestra el diagrama de un rectificador trifásico compuesto por 6 tiristores de potencia.

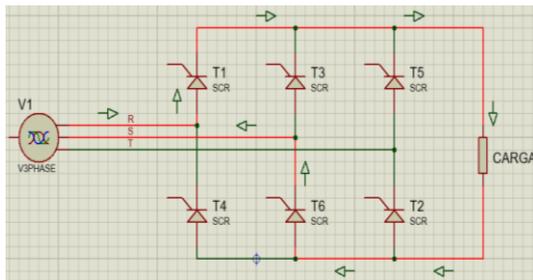
Figura 2.15. Diagrama rectificador trifásico controlado.



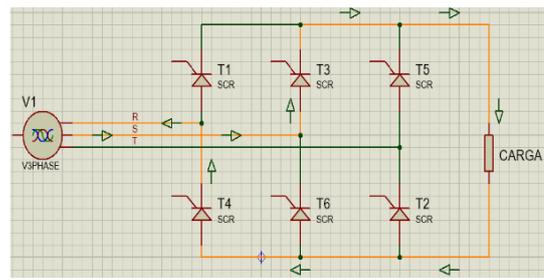
Rectificador trifásico controlado, Elaborado por: Daniel Zapata

El tiristor 1 y el tiristor 4 rectifican la fase R, el tiristor 3 y 6 rectifican la fase S, y el rectificador 5 y 2 rectifican la fase T. El punto de cruce por cero ocurre cuando el voltaje entre fases es igual, a partir de este se cuenta el ángulo de disparo, los voltajes compuestos entre las fases se lo representan como formas de onda de voltaje rectificado, teniendo en cuenta esto se obtiene seis etapas de conmutación de los SCR's para completar un ciclo completo de la red. (Ver Figura 2.16).

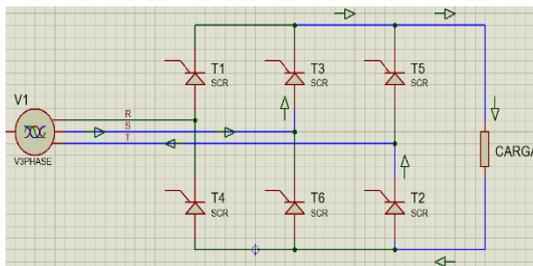
Figura 2.16. Conducción de corriente en la rectificación del sistema



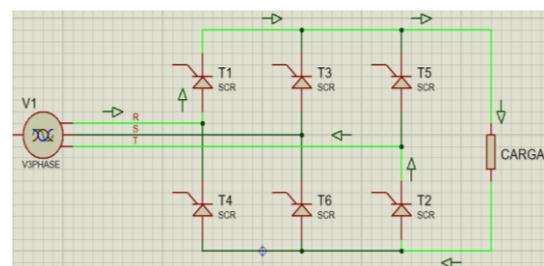
a) Conducción de corriente en la rectificación de RS



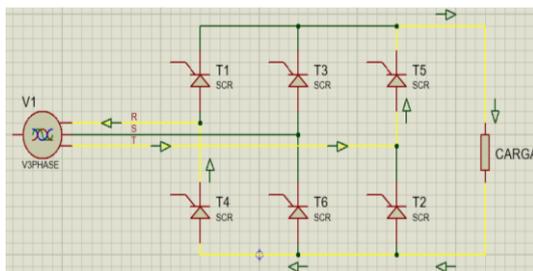
d) Conducción de corriente en la rectificación de RT



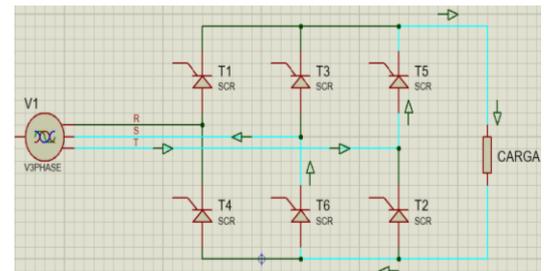
b) Conducción de corriente en la rectificación de ST



e) Conducción de corriente en la rectificación de SR



c) Conducción de corriente en la rectificación de TR



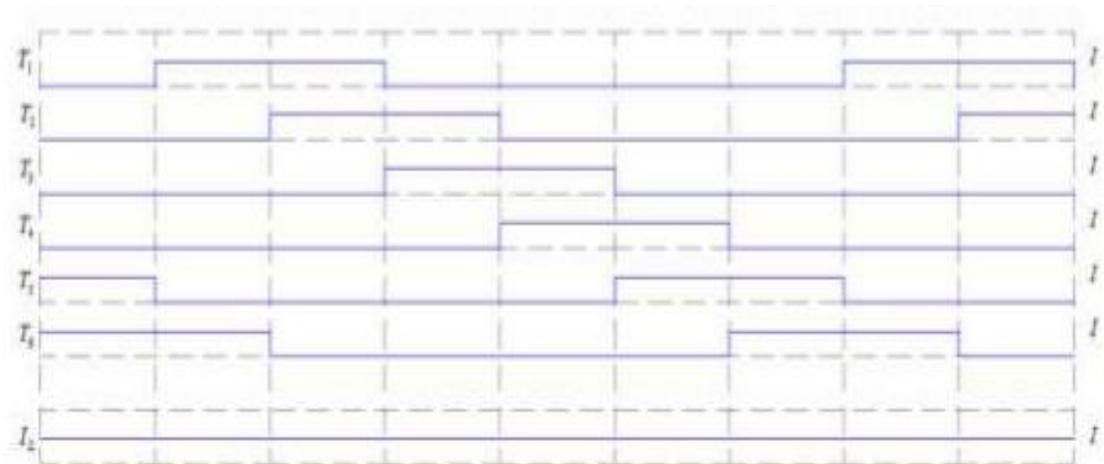
f) Conducción de corriente en la rectificación de TS

Corriente en la rectificación, Elaborado por: Daniel Zapata

T1 – T4, T3 – T6, T2 – T5, no conducen corriente al mismo tiempo porque solo se puede conducir la corriente de un tiristor a la vez en la parte superior del puente y un solo tiristor en la parte inferior diferente al que completa la conexión con cada una de sus fases. Existen en total 6 combinaciones de tensión de línea como se observa en la Figura 2.16 (RS, RT, SR, ST, TR, TS), considerando los 360° como el periodo completo del generador, la transición de línea de tensión mayor se produce cada 60° , por esto son 6 pulsos los necesarios para las 6 transiciones de tensión que se produce

en cada periodo completo del generador. Con este análisis se obtiene los 6 pulsos de disparo para los tiristores. Este proceso se programa los microcontroladores ATMEGA 164P y ATMEGA 328P, los pulsos de disparo quedan determinados mediante la siguiente gráfica (Ver Figura 2.17).

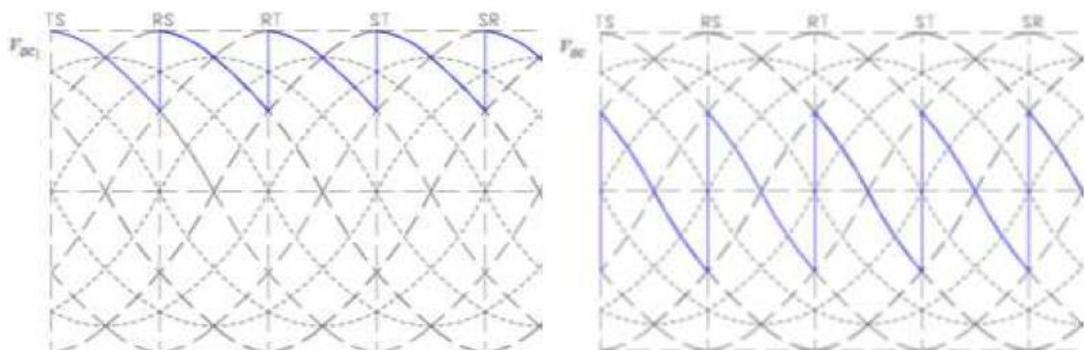
Figura 2.17. Pulsos de disparo para los tiristores a utilizar



Pulsos de disparo a los tiristores, Fuente: Pavón, 2012.

De acuerdo al análisis de los pulsos de disparo y el generador trifásico, si se desea variar el ángulo de disparo ante una carga resistiva o resistiva – inductiva se utiliza un potenciómetro para modificar el ángulo de disparo. A continuación, se muestran en la Figura 2.18 las formas de onda de voltaje en la carga y la corriente para los distintos ángulos de disparos que se requieren.

Figura 2.18. Ángulos de disparo a 30° y 90°



Ángulo de disparo Fuente: Pavón. C, 2012.

2.15 Diagramas de flujo del control de ángulo de disparo trifásico

El funcionamiento de la subrutina principal del proceso de software y la configuración de los registros, los temporizadores, los comparadores, los puertos de entrada y salida se visualiza en la Figura 2.19.

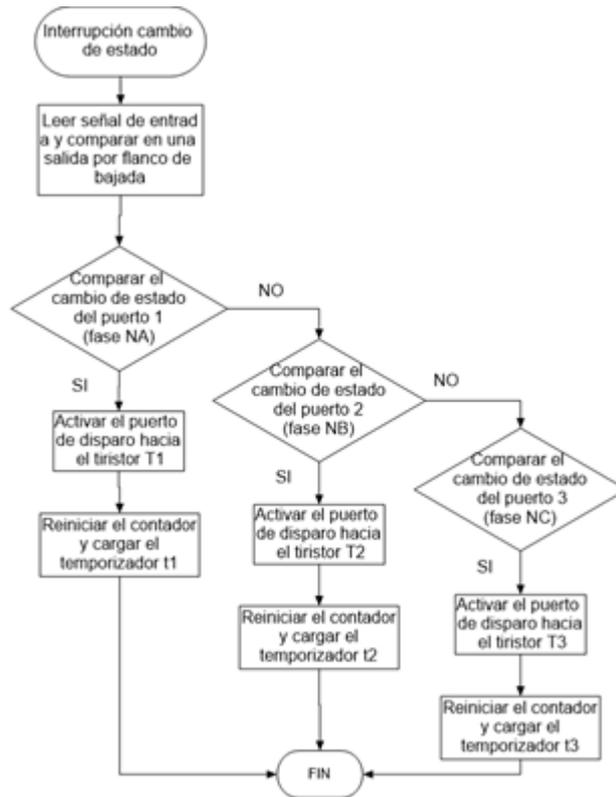
Figura 2.19. Funcionamiento de la subrutina principal y configuración



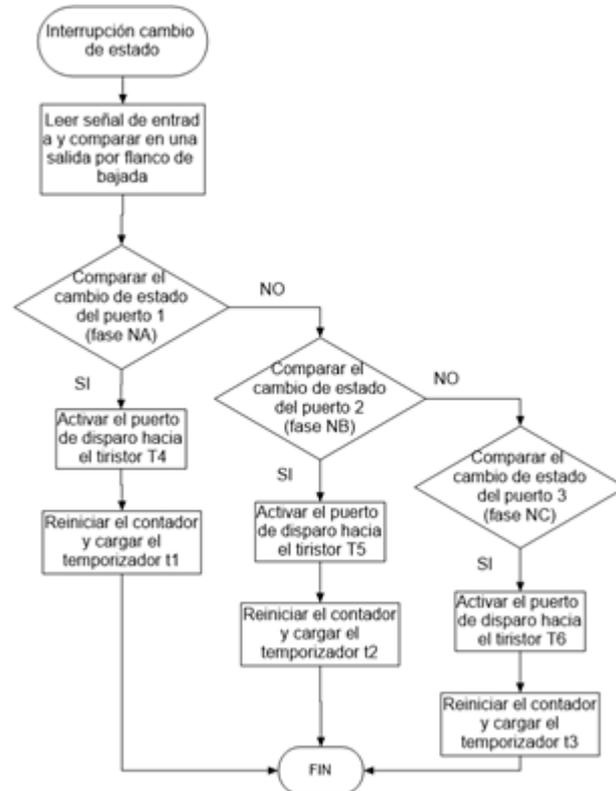
Diagrama de flujo de la subrutina principal y configuración, Elaborador por: Daniel Zapata

El funcionamiento de las interrupciones realizadas en el primer microcontrolador ATMEGA 164P se visualiza en la Figura 2.20 (a) y el funcionamiento de las interrupciones realizadas en el segundo microcontrolador ATMEGA 328P se visualiza en la Figura 2.19 (b).

Figura 2.20 (a), (b). Configuración de las interrupciones del proyecto.



a) Configuración de interrupciones en el ATMEGA 164P.



b) Configuración de las interrupciones en ATMEGA 328P.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN

A continuación, se detalla todo el procedimiento realizado para la implementación del control de ángulo de disparo trifásico.

3.1 Circuito de cruce por cero

Se establece el siguiente circuito para el cruce por cero por cada línea de tensión que se utiliza, tanto para el semiciclo positivo como para el semiciclo negativo, con los valores de resistencias, diodos 1N4007 (Ver Anexo 2), puentes de diodos (Ver Anexo 4) y se muestra el optoacoplador 4N25, el circuito se muestra en la Figura 3.1.

Figura 3.1. Diagrama de cruce por cero utilizado.

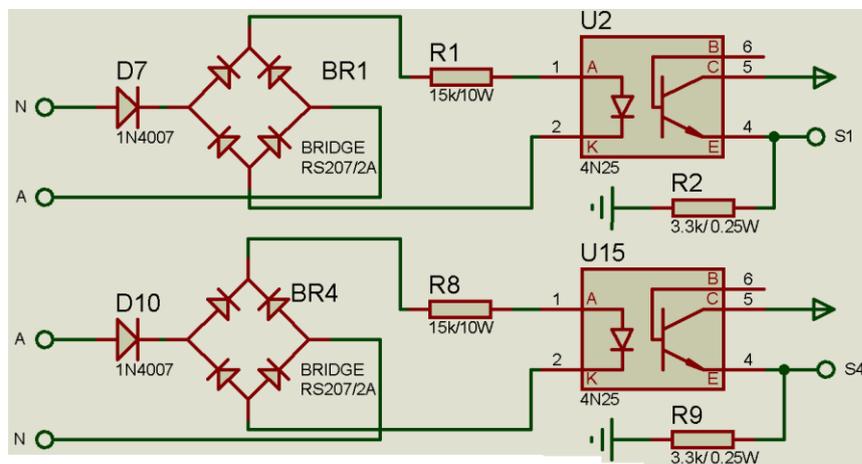


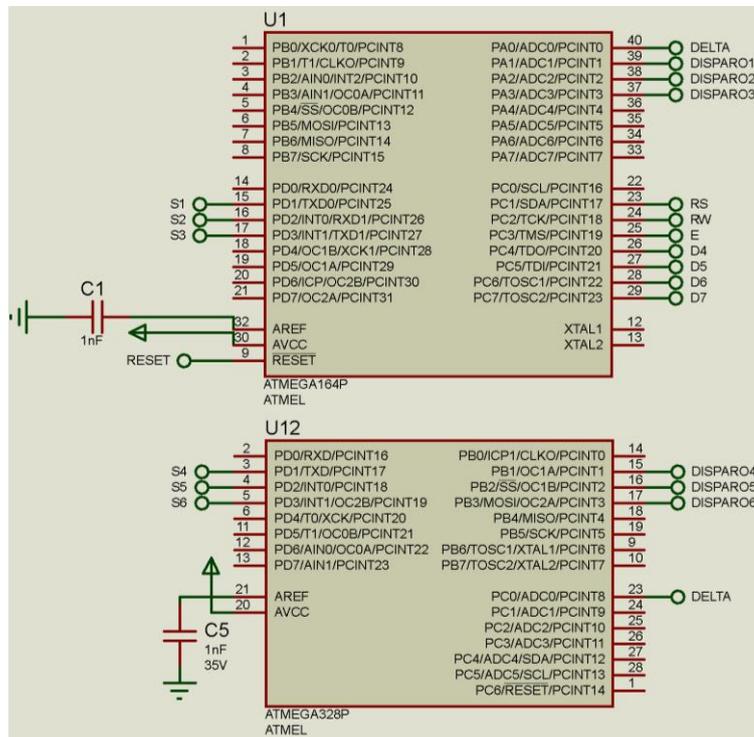
Diagrama del circuito de cruce por cero, Elaborado por: Daniel Zapata

3.2 Circuito de control

Se establece como el dispositivo de control a los microcontroladores ATMEGA 164P y ATMEGA 328P (Ver Figura 2.8 y 2.9). Las señales de disparo que se obtienen del circuito de cruce por cero del microcontrolador ATMEGA 164P están conectados a los pines PD1 (15), PD2 (16), PD3 (17) (semiciclos positivos de las tres fases respectivas) y las señales de disparo restantes del microcontrolador ATMEGA 238P están conectados a los pines PD1 (3), PD2 (4), PD3 (5) (semiciclos negativos de las tres fases respectivas), los pines 23 hasta el 29 del ATMEGA 164P se utiliza para la conexión del LCD y la señal de control de ángulo de disparo comparten ambos

microcontroladores en el pin PA0 (40) ATMEGA 164P y en el pin PC0 (23). (Ver Figura 3.2).

Figura 3.2. Elementos utilizados en el circuito de control.

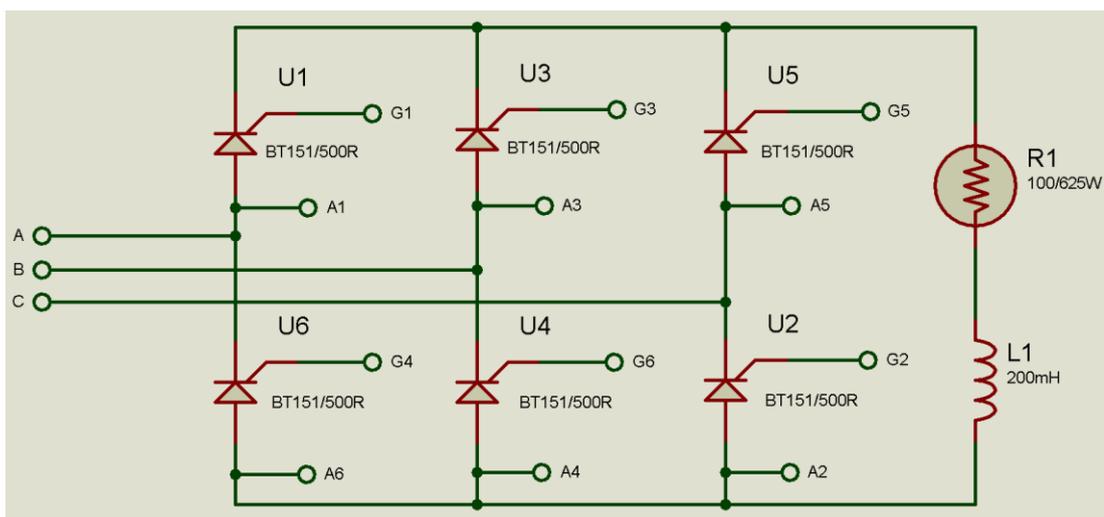


Circuito de control, Elaborado por: Daniel Zapata

3.3 Circuito de Potencia

El circuito de potencia consta principalmente de 6 SCR's, serie BT151/500R (Ver Anexo 6) Y que están conectados con optoacopladores MOC3020 (Ver Anexo 3). El circuito de la Figura 3.3 se muestra el diagrama de conexión de los SCR's U1, U3, U5, U6, U4, U2.

Figura 3.3. Elementos utilizados en el circuito de potencia

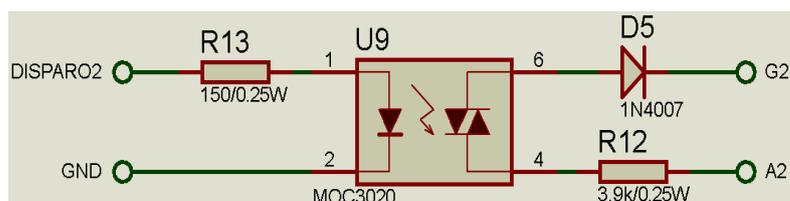


Circuito de Potencia, Elaborado por: Daniel Zapata

3.4 Circuito de disparo para el tiristor.

El circuito diseñado para asignar los pulsos de disparo a los distintos SCR's se puede visualizar en la Figura 3.4.

Figura 3.4. Elementos que conforman circuito de disparo

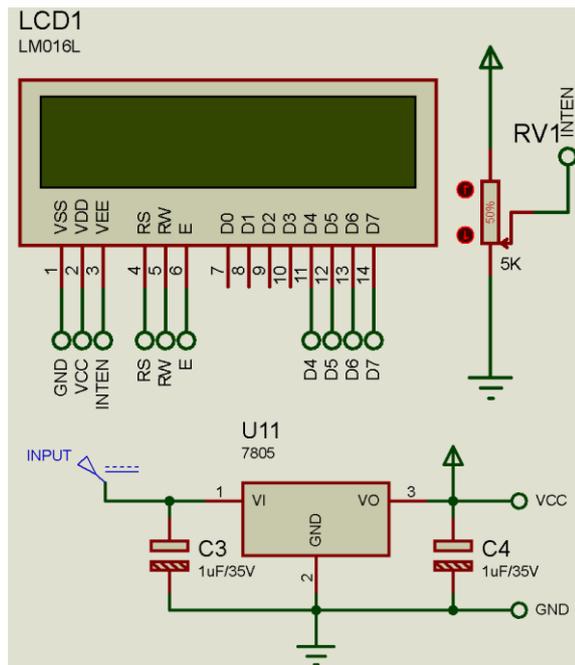


Circuito de disparo para los tiristores, Elaborado por: Daniel Zapata

3.5 Circuito de visualización, interfaz y regulador de tensión

El elemento de visualización que se utiliza es un LCD 16*2 conectado al microcontrolador ATMEGA 164P con se observa en la Figura 3.5. Adicionalmente un circuito regulador de tensión para limitar el voltaje de entrada de 5V.

Figura 3.5. Elementos que conforman la visualización del circuito.



Circuito de visualización y regulador de tensión, Elaborado por: Daniel Zapata

3.6 Diagrama esquemático completo

El diagrama esquemático completo se puede visualizar en la Figura 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 a continuación.

Figura 3.6. Diagrama esquemático de visualización y alimentación.

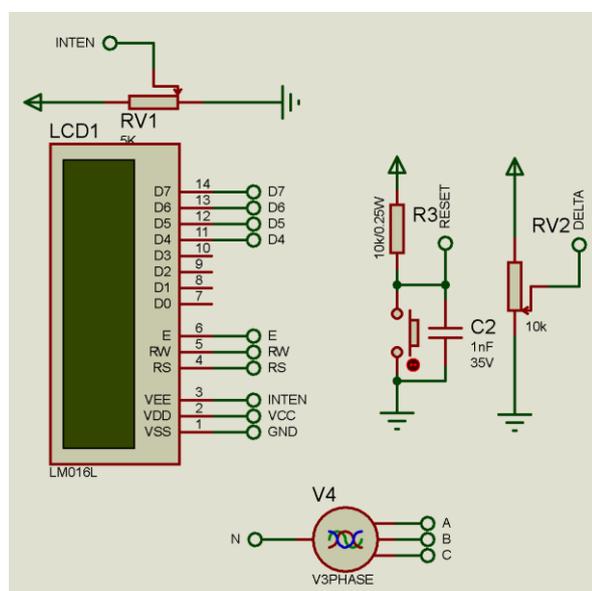


Diagrama esquemático 1, Elaborado por: Daniel Zapata

Figura 3.7. Circuito de cruce por cero en ambos semiciclos R, S, T

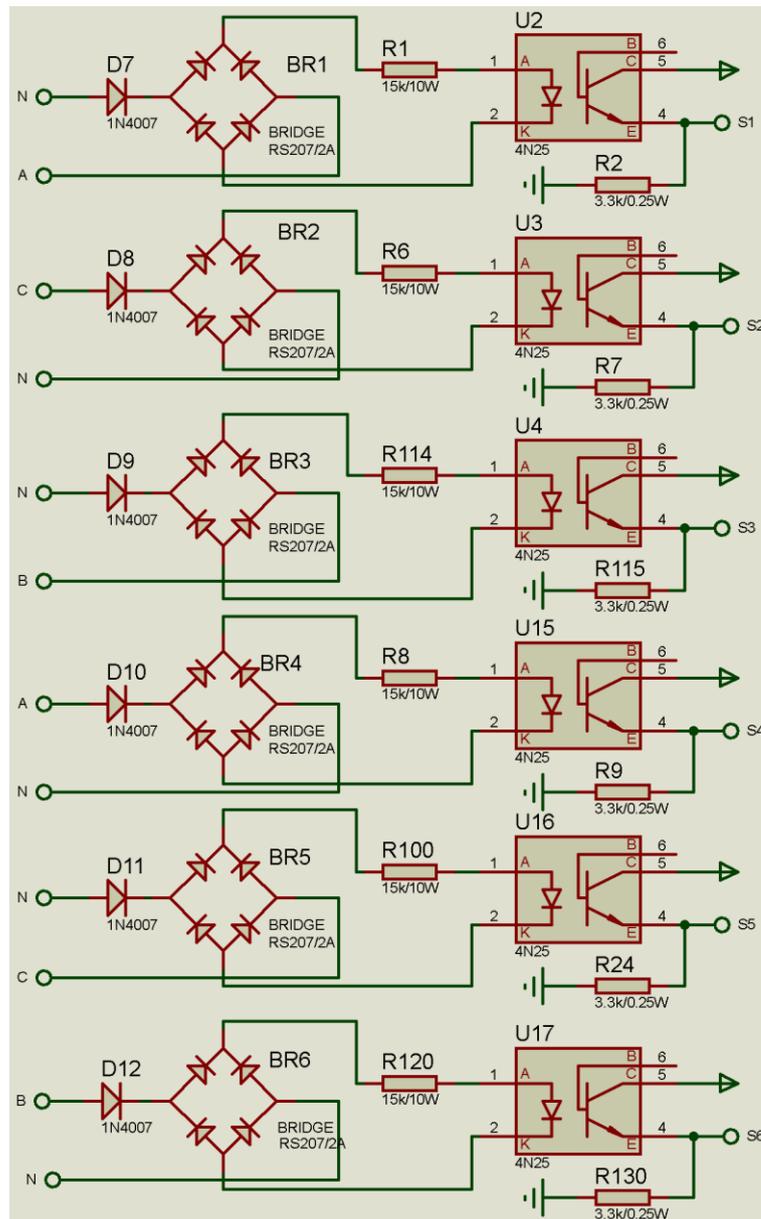


Diagrama esquemático 2, Elaborado por: Daniel Zapata

Figura 3.8. Diagrama esquemático del circuito de disparos hacia los tiristores

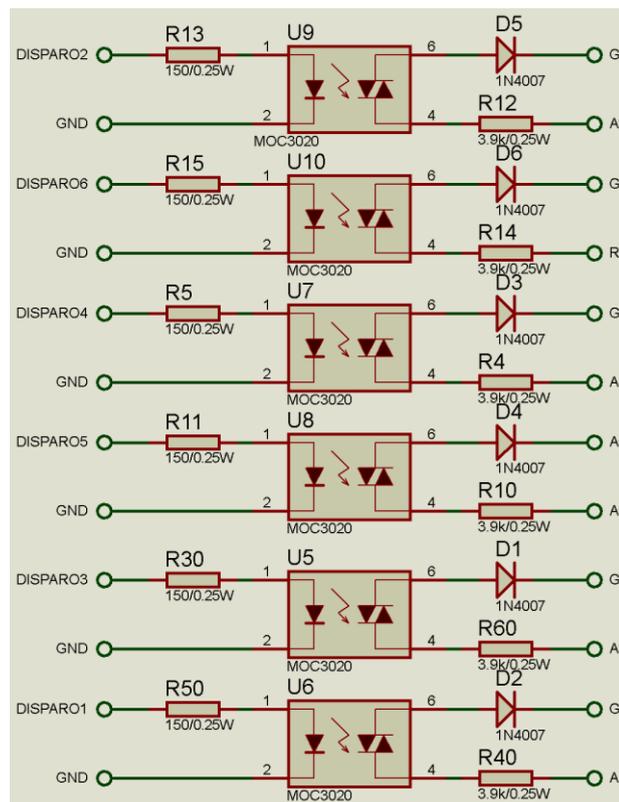


Diagrama esquemático 3, Elaborador por: Daniel Zapata

Figura 3.9. Diagrama esquemático del circuito de potencia

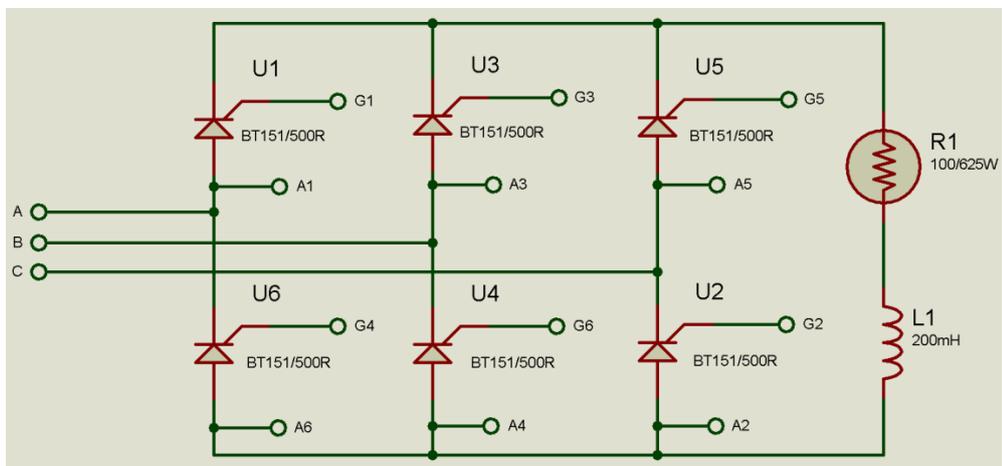


Diagrama esquemático 4, Elaborado por: Daniel Zapata

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación, se analizan los parámetros de funcionamiento del módulo. Se realiza una comparativa entre el módulo anterior, el modulo actualizado y el armado en el protoboard, obteniendo los datos necesarios para su análisis.

4.1 Costos de equipos

Para el control de ángulo de disparo trifásico se aprobó dos presupuestos, el primero con un presupuesto máximo de 400 dólares incluidos la construcción del módulo didáctico y un presupuesto máximo de 90 dólares para el diseño armado en un protoboard. En la Tabla 4.1 y 4.2 se detallan los costos de los elementos y material utilizado:

Tabla 4.1: Costos y Material en protoboard.

Dispositivos	Cantidad	USD
Diodos 1N4007	12	1,20
Puentes de Diodos 3A	6	4,50
Switch on/off	1	1,00
Condensadores 220 uF/35V	3	0,30
Condensadores 0.1 uF/50V	2	0,20
Resistencias variadas	19	0,95
Potenciometros 5 y 10 k	2	0,90
LCD 16*2	1	6,00
Optoacopladores MOC3020	6	4,20
LM7805	1	0,65
Optoacopladores 4N25	6	4,55
Cargador Amigo 5V/1A	1	6,00
Resistencias cerámicas 5K-10W	6	2,70
Tiristores BT151 500R	6	6,00
Microcontrolador ATMEGA164P	1	7,50
Microcontrolador ATMEGA328P	1	5,50
Proteoboard	1	30
Cable de timbre 3m	1	2,40
TOTAL		\$ 84,15

Nota: Costos de los elementos y materiales para el diseño en protoboard. 14/11/2017

Elaborado por: Daniel Zapata

Tabla 4.2: Costos de elementos y material del módulo

Dispositivos	Cantidad	USD
Fusibles 0.5A 20mm	4	0,40
Diodos 1N4007	12	1,20
Puentes de Diodos 3A	6	4,50
Switch on/off	1	1,00
Condensadores 220 uF/35V	2	0,30
Condensadores 0.1 uF/50V	2	0,20
Resistencias variadas	19	0,95
Potenciómetros 5 y 10 k	2	0,90
LCD 16*2	1	6,00
Optoacopladores MOC3020	1	4,20
LM7805	1	0,65
Optoacopladores 4N25	6	4,55
Cargador Amigo 5V/1A	1	6,00
Resistencias cerámicas 10W	6	2,70
Tiristores BT151 500R	6	6,00
Microcontrolador ATMEGA164P	1	7,50
Microcontrolador ATMEGA328P	1	5,50
Plugs Banana Didácticos	66	29,70
Jacks Banana	66	13,20
Caja de madera	1	20,00
Placas PBC	1	200,00
Tapa Acrílico	1	60,00
Borneras 2 contactos azul 250V/16A	30	5,00
Borneras 3 contactos verde 250V/16A	1	0,28
Borneras des. 3 contacto 250V/16A	6	2,40
Porta fusibles	4	0,60
Zócalos	3	0,50
TOTAL		\$ 383,95

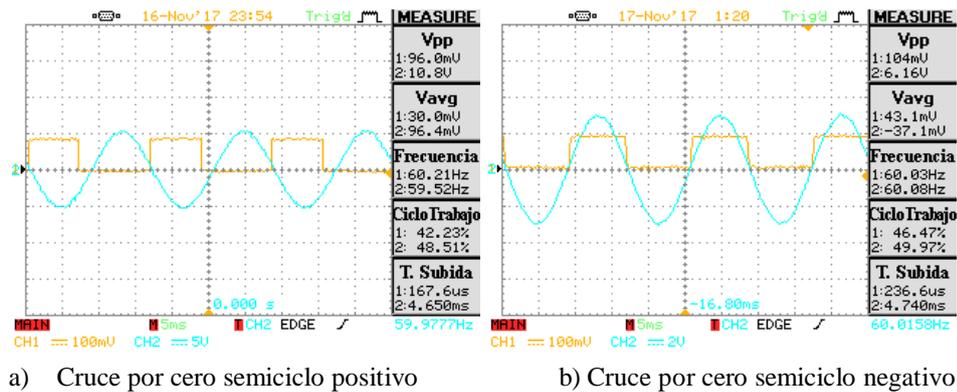
Tabla de costos de elementos y materiales utilizados para la construcción del módulo. 14/11/2017.

Elaborado por: Daniel Zapata

4.2 Cruces por cero

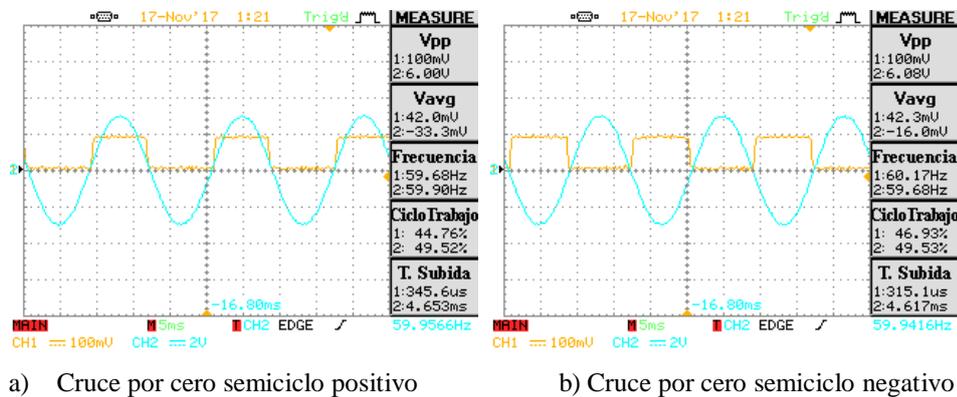
Detección del cruce por cero tanto en los semiciclos positivos y negativos con detección de flanco negativo por cada fase. En la Figura 4.1 (a) se observa el cruce por cero tanto en el semiciclo positivo en la fase R y en la Figura 4.2 (b) se observa el cruce por cero tanto en el semiciclo negativo en la fase R, y así seguidamente con las demás fases existentes. (Ver Figura 4.3 y Figura 4.4).

Figura 4.1 Cruce por cero del semiciclo positivo y negativo de la fase R.



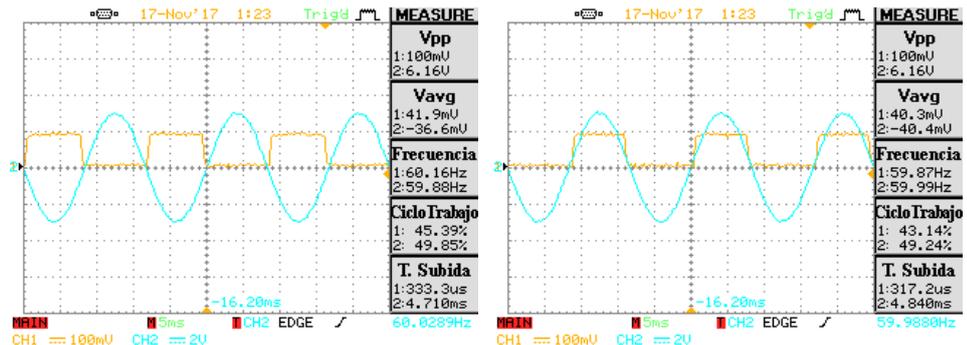
Cruce por cero fase R, Elaborado por: Daniel Zapata.

Figura 4.2. Cruce por cero del semiciclo positivo y negativo de la fase S.



Cruce por cero fase S, Elaborado por: Daniel Zapata.

Figura 4.3 Cruce por cero del semiciclo positivo y negativo de la fase T.



a) Cruce por cero semiciclo positivo

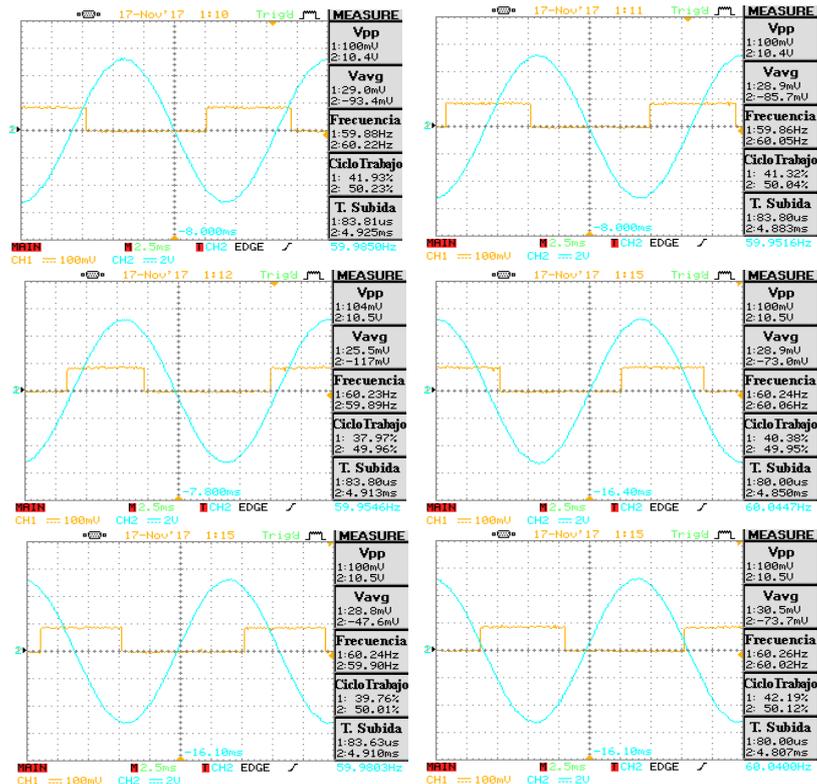
b) Cruce por cero semiciclo negativo

Cruce por cero fase T, Elaborado por: Daniel Zapata.

4.3 Pulsos de disparos hacia los tiristores

Detección del voltaje trifásico de la red y sincronización de los seis disparos de control hacia los tiristores en etapa de potencia, contrastada a la forma senoidal de una de las fases. (Ver Figura 4.4).

Figura 4.4. Pulsos de disparo hacia los tiristores.



Pulsos de disparo, Elaborado por: Daniel Zapata.

4.4 Análisis de los resultados de la etapa de control para el rectificador trifásico totalmente controlado.

En las Figuras 4.1,4.2 y 4.3 se observa el cruce por cero de ambos semiciclos tanto en el positivo y en el negativo deben coincidir con la frecuencia y el periodo de la onda sinusoidal, ambos valores se reflejan en las gráficas previamente mostradas, las formas de onda obtenidas coinciden a las formas de onda esperadas en las Figuras 2.12, 2.13, 2.14. En la figura 4.4 se observa los pulsos de disparos que van hacia los circuitos de potencia, que envía los microcontroladores ATMEGA 164p y ATMEGA 328P. Cada uno de los disparos tienen un periodo de 16.66 ms que es de la misma amplitud que la forma de onda sinusoidal. Los pulsos de disparo formados coinciden con los pulsos de disparo que esperamos y que coinciden con los disparos mostrados en la Figura 2.16, lo cual indica un correcto funcionamiento del encendido de los tiristores de potencia.

4.5 Pruebas del rectificador trifásico totalmente controlado

El rectificador trifásico totalmente controlado de 6 pulsos, fue construido como un módulo didáctico y diseñado para armarse también en un protoboard. Se realizaron pruebas tanto en el módulo didáctico construido, como en el protoboard y utilizando los módulos del laboratorio (K&H, PE-5000) de Electrónica de Potencia para comparar los resultados de ambos diseños. Las cargas con las que se realizaron dichas pruebas son de tipo, resistiva, resistiva– inductiva y un motor DC (Ver Anexo 22), que están disponibles en el laboratorio.

4.6 Muestra de Errores

4.6.1 Error Relativo

El error relativo es el cociente entre el error absoluto y el valor que se da como verdadero el cual se representa en porcentajes, está dada por la siguiente ecuación:

$$e = \frac{|V_{real}-V_{aprox}|}{V_{real}} * 100 \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Se utiliza la ecuación 4.1 para representar el error relativo porcentual obtenido entre los valores medidos del rectificador trifásico totalmente controlado en, el módulo

didáctico, el armado en protoboard y el módulo K&H, PE -5000 para los ángulos previamente establecidos.

4.6.2 Error relativo entre los módulos y el diseño en protoboard con carga R

Se muestra en la Tabla 4.3 el error relativo de los valores medidos entre el módulo didáctico, el módulo PE-5000 y el diseño armado en protoboard, en 30°, 45°, 60°, 90°, 105° ya que son los únicos grados en los cuales se hace una comparación entre ambos diseños, tanto en el módulo didáctico, en el diseño armado en protoboard y en el módulo K&H PE-5000.

El resultado está basado en la obtención de datos con carga resistiva.

Tabla 4.3: Error Relativo (R)

		Error relativo entre el Módulo Didáctico y el Módulo PE-5000		
Módulo Didáctico	Módulo PE-5000	Vpp	Vrms	Vr
Ángulo 0°	Ángulo 30°	4.34 %	0 %	5.76 %
Ángulo 30°	Ángulo 60°	2.17 %	4.10 %	2.85 %
Ángulo 60°	Ángulo 90°	0.53 %	5.76 %	1.96 %
Ángulo 90°	Ángulo 120°	2.05 %	25 %	3.26 %
		Error relativo entre el Diseño armado en protoboard y el Módulo PE-5000		
Módulo Didáctico	Módulo PE-5000	Vpp	Vrms	Vr
Ángulo 0°	Ángulo 30°	8.69 %	0.85 %	10.57 %
Ángulo 30°	Ángulo 60°	3.24 %	7.17 %	7.85 %
Ángulo 60°	Ángulo 90°	2.97 %	13.46 %	1 %
Ángulo 90°	Ángulo 120°	2.53 %	40 %	0.81 %
		Error relativo entre el Modulo Didáctico y el Diseño armado en protoboard		
Módulo Didáctico	Módulo PE-5000	Vpp	Vrms	Vr
Ángulo 0°	Ángulo 30°	4.54 %	0.85 %	5.10 %
Ángulo 30°	Ángulo 60°	1.1 %	3.20 %	4.86 %
Ángulo 60°	Ángulo 90°	2.43 %	7.27 %	1.75 %
Ángulo 90°	Ángulo 120°	0.52 %	20%	2.63 %

Nota: Error relativo entre el diseño de protoboard, el módulo PE-5000 y el módulo didáctico con carga R

Elaborado por: Daniel Zapata

4.6.3 Error relativo entre los módulos y el diseño en protoboard con carga R-L

Se muestra en la Tabla 4.4 el error relativo de los valores medidos entre el diseño armado en protoboard, el módulo PE-5000 y el módulo didáctico, en los 30°, 45°, 60°, 90°, 105° ya que son los únicos grados en los cuales se hace una comparación.

Tabla 4.4: Error Relativo (R-L)

		Error relativo entre el Módulo Didáctico y el Módulo PE-5000		
Módulo Didáctico	Módulo PE-5000	Vpp	Vrms	Vr
Ángulo 0°	Ángulo 30°	7.69 %	0,42 %	2.58 %
Ángulo 30°	Ángulo 60°	1.73 %	3.09 %	3.75 %
Ángulo 60°	Ángulo 90°	2.30 %	3.54 %	3.12 %
Ángulo 90°	Ángulo 120°	1.20 %	27.27 %	3.44 %

		Error relativo entre el Diseño armado en protoboard y el Módulo PE-5000		
Módulo Didáctico	Módulo PE-5000	Vpp	Vrms	Vr
Ángulo 0°	Ángulo 30°	17.30 %	0,85 %	9.05 %
Ángulo 30°	Ángulo 60°	1.08 %	7.73 %	1.87 %
Ángulo 60°	Ángulo 90°	1.53 %	2.12 %	2.16 %
Ángulo 90°	Ángulo 120°	2.41 %	9.09 %	5.17 %

		Error relativo entre el Modulo Didáctico y el Diseño armado en protoboard		
Módulo Didáctico	Módulo PE-5000	Vpp	Vrms	Vr
Ángulo 0°	Ángulo 30°	8.92 %	1.27 %	6.63 %
Ángulo 30°	Ángulo 60°	2.85 %	4.78 %	1.80 %
Ángulo 60°	Ángulo 90°	0.75 %	5.47 %	0.99 %
Ángulo 90°	Ángulo 120°	1.22 %	33.3%	1.6 %

Nota: Error relativo entre el diseño de protoboard, el módulo PE-5000 y el módulo didáctico con carga R-L

Elaborado por: Daniel Zapata

4.6.4 Error relativo entre los módulos y el diseño en protoboard con motor DC

Se muestra en la Tabla 4.5 el error relativo de los valores medidos entre el diseño armado en protoboard, el módulo PE-5000 y el módulo didáctico con un motor DC. Se utilizan solo tres ángulos ya que ya que son los únicos grados en los cuales se hace una comparación.

Tabla 4.5: Error Relativo (Motor DC)

		Error relativo entre el Módulo Didáctico y el Módulo PE-5000		
Módulo Didáctico	Módulo PE-5000	V _{pp}	V _{rms}	V _r
Ángulo 50°	Ángulo 80°	16.57 %	0 %	3.04 %
Ángulo 60°	Ángulo 90°	1.78 %	4 %	2.88 %
Ángulo 90°	Ángulo 120°	3.41 %	10 %	3.22 %
		Error relativo entre el Diseño armado en protoboard y el Módulo PE-5000		
Módulo Didáctico	Módulo PE-5000	V _{pp}	V _{rms}	V _r
Ángulo 50°	Ángulo 80°	12.70 %	0 %	4.05 %
Ángulo 60°	Ángulo 90°	5.35 %	1.3 %	5.28 %
Ángulo 90°	Ángulo 120°	0.37 %	6 %	5.64 %
		Error relativo entre el Modulo Didáctico y el Diseño armado en protoboard		
Módulo Didáctico	Módulo PE-5000	V _{pp}	V _{rms}	V _r
Ángulo 50°	Ángulo 80°	4.63 %	0 %	3.13 %
Ángulo 60°	Ángulo 90°	3.64 %	3.48 %	2.47 %
Ángulo 90°	Ángulo 120°	3.52 %	4.4 %	2.34 %

Nota: Error relativo de V_R entre el diseño en protoboard, módulo didáctico y módulo PE-5000 con motor DC.

Elaborado por: Daniel Zapata

4.7 Análisis de errores

Calculado el error relativo para cada valor de voltaje entre los módulos K&H PE-5000 y el módulo didáctico, con carga resistiva se obtienen errores mínimos de hasta 0 % en voltaje rms a un ángulo de 0° (30°, módulo K&H).

En la comparación entre el diseño armado en protoboard y el módulo PE-5000 hay un error relativo mínimo de 0.85 % en el voltaje rms en un ángulo de 0° (30°, módulo K&H).

El error relativo mínimo en la comparación entre el diseño armado en protoboard y el módulo didáctico es de 0.52 % en voltaje pico pico a un ángulo de 90° (120°, módulo K&H).

El error relativo obtenido, con una carga resistiva-inductiva entre el módulo didáctico y el módulo PE-5000 es 0.42 % de error mínimo en voltaje rms a un ángulo de 0° (30°, módulo K&H).

Entre el diseño armado en protoboard y el módulo PE-5000 hay un error mínimo de 0.85 % en voltaje rms a un ángulo de 0° (30°, módulo K&H), y entre el diseño armado en protoboard y el módulo didáctico hay un error mínimo de 0.75 % en voltaje pico pico a un ángulo de 60° (90°, módulo K&H).

Por último, el error relativo mínimo obtenido, en las pruebas con el motor dc arroja los siguientes resultados, entre el módulo didáctico y el módulo PE-5000 el error mínimo de 0% en voltaje rms, a un ángulo de 50° (80°, módulo K&H).

Entre el diseño armado en protoboard y el módulo PE-5000 hay un error relativo mínimo 0 % en voltaje rms a un ángulo de 50° (80°, módulo K&H).

Entre el diseño armado en protoboard y el módulo didáctico, hay un error mínimo de 0 % en voltaje rms a un ángulo de 50° (80°, módulo K&H).

Debido al rango de trabajo con los cuales trabajan los dos módulos, el módulo PE-5000 rectifica, desde los 30 hasta los 135 grados (0V-232V), R, R+L y el motor dc desde los 80 hasta 135 grados (0V-180V) y el módulo didáctico rectifica desde un ángulo de 0 hasta los 105 grados (0V-232V), R,R+L y el motor dc desde los 50 hasta 105 grados (0V-180V), hay una fluctuación pequeña en los porcentajes de errores por lo que se puede analizar de manera adecuada la comparación entre los dos diseños anteriormente mencionados, de igual manera influye en el funcionamiento de los dos diseños y el módulo K&H su operatividad en hardware y la sincronización de ambos.

4.8 Conclusiones y Recomendaciones

4.8.1 Conclusiones

Se genera la caracterización de acuerdo al módulo de control de ángulo de disparo trifásico (PE-53140-2D), a los juegos de tiristores (PE-5310-5C) y a las prácticas correspondientes de “Medición del impulso de disparo” y “Rectificador trifásico de onda completa totalmente controlado” que se encuentran en el laboratorio de Electrónica de Potencia, y se verifica la operatividad de los módulos para las cargas, resistiva, resistiva – inductiva, y el motor DC en los rangos predeterminados en el análisis de resultados.

Se determina el circuito de disparo con optoacopladores 4n25, diodos 1N4007, puentes de diodos RS207, resistencias de 15k/15W y de 3.3k ohmios, circuito el cual rectifica tanto los semiciclos positivos, como los semiciclos negativos de las tres fases R,S,T, programando su lógica de funcionamiento tomando en cuenta el flanco de bajada de cada cruce por cero que obtenemos del circuito, ubicando los parámetros básicos necesarios para generar los disparos hacia los tiristores.

De acuerdo a las pruebas realizadas de operación con carga resistiva, resistiva-inductiva y motor dc, los errores obtenidos son mínimos y muy cercanos a los valores ideales (módulo K&H) con los que se comparó, aquel porcentaje de error se debe al ambiente, a la configuración del hardware y al sincronismo de los disparos.

En comparación con el módulo PE-5000, tienen un rango de funcionamiento diferente, para cargas resistivas y resistivas-inductivas, el rango de funcionamiento en el módulo

didáctico y en el diseño armado en protoboard funciona desde 0 hasta 105 grados con un voltaje de salida hacia la carga desde 0 hasta 232 V, en cargas R y R+L, y desde 50 hasta 105 grados con un voltaje de salida hacia la carga desde 0V-180V, valores que son diferentes a los del módulo PE-5000 que funciona con un rango desde 30 hasta 135 grados con un voltaje de salida hacia la carga desde 0V hasta 232, en cargas R y R+L, y desde 80 hasta 135° con un voltaje de salida hacia la carga de 0V-180V por lo que hay un desfase de 30 grados entre el funcionamiento del presente diseño y el módulo PE-5000. El análisis de las formas de onda no se encuentra dentro de los objetivos de este proyecto.

En pruebas realizadas con el módulo didáctico aplicado las cargas R, R-L y motor DC, del laboratorio de Electrónica de Potencia, se comprueba que, controlando el ángulo de disparo trifásico, se puede controlar el voltaje DC sobre la carga, esto se puede corroborar con las tablas de datos obtenidas al hacer las pruebas previamente mostradas en el presente proyecto como parte de los resultados.

Realizadas las pruebas del diseño armado en protoboard con cargas R, R+L, motor DC, y haciendo un análisis del error obtenido comparando la arquitectura de los módulos, se valida la construcción de dicho diseño en protoboard y en el módulo didáctico ya que los resultados obtenidos en la etapa de pruebas son similares a los valores obtenidos con el módulo del laboratorio K&H.

Las practica de laboratorio está diseñada para poder ser replicada en un protoboard, utilizando elementos que fácilmente se encuentran en el medio a costos accesibles para los estudiantes, reduciendo de manera drástica el uso de elementos electrónicos, y diseñado para que los estudiantes puedan armarlo de manera rápida, útil y didáctica , de igual manera hay un manual instructivo sobre su funcionamiento, mantenimiento, software y programa utilizados y una práctica de laboratorio en donde se explica de forma detallada la parte teórica, la conformación del hardware, disposición de elementos, el montaje correcto y el funcionamiento del módulo.

4.8.2 Recomendaciones

Para obtener un funcionamiento correcto del rectificador trifásico totalmente controlado se debe aislar de manera correcta la etapa de control de la etapa de potencia, tomando en cuenta el diseño del módulo didáctico como el diseño armado en protoboard y considerando que en el proceso de armado, montaje, aprendizaje y realización de las practicas se pueden producir fallas o malas conexiones, se recomienda utilizar el módulo bajo los rangos de funcionamiento con carga resistiva, resistiva e inductiva, 0° - 105° para una operatividad correcta, en caso de operar con un motor Dc ajustarse al rango correspondiente, 50° - 105° , en caso se llegase a quemar un elemento consultar el manual de funcionamiento, para el reemplazo de los elementos.

En cuanto a la calidad de sincronización de los disparos que se programaron en los microcontroladores ATMEGA 164P y 328P hacia los tiristores, se los puede mejorar ingresando al código fuente de los microcontroladores y aumentando o disminuyendo el tiempo de disparo hacia cada tiristor.

El diseño y construcción del módulo didáctico se lo hace montable a la mesa, con la compatibilidad de las cargas del laboratorio, módulos secundarios y elementos que están a disposición, se deja además a disposición los diagramas de montaje del módulo didáctico y los diagramas para que se pueda replicar el diseño en protoboard.

Se recomienda leer el manual de funcionamiento antes de realizar algún cambio o alguna modificación sobre el módulo diseñado, esto con la finalidad de mantener el funcionamiento, confiabilidad y durabilidad del mismo.

De igual forma no se recomienda conectar carga adicional a las cargas que están indicadas en la práctica del laboratorio.

REFERENCIAS

- Ruiz.T, Arbelaitz. O, Etxeberria. I, Ibarra. A. (2010). Análisis básico de circuitos eléctricos y electrónicos. Madrid: Pearson Educación.
- López. R. (2013). Teoría de Circuitos y Electrónica. Madrid: Universidad Nacional de educación a distancia.
- Barrales. G, & Rodríguez. R. (2014). Circuitos eléctricos. Distrito Federal: Larousse - Grupo Editorial Patria.
- Carpio Ibáñez, J. (2013). Alimentación de cargas críticas y calidad de la energía eléctrica. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Menéndez. A. (2012). Fundamentos de tecnología electrónica. Volumen I (1st ed.). Sevilla: Tébar Flores.
- García. M, Huerta. P, y Sánchez de la Lama. C. (2014). Electrónica (1st ed.). Madrid: RA-MA Editorial.
- Gogdell. J. (2002). Fundamentos de Máquina Eléctricas. México: Prentice Hall.
- Ballester. E, Piqué R. (2011). Electrónica de potencia. Barcelona: Marcombo.
- Maloney. T. (2006). Electrónica industrial moderna (5a. ed.). Distrito Federal: Pearson Educación.
- Cantelli, M. (2012). Regulación, Control y Protección de Máquinas Eléctricas (1st ed.). Santander: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Obtenido de: <http://ocw.unican.es>
- Novas. D. (2008). Microcontroladores. Honolulu: Atlantic International University. Obtenido de: <https://www.aiu.edu>
- Vicioli. R. (2014). Relevadores y opto acopladores. Sarmiento: Universidad Tecnológica Nacional. Obtenido de: <https://es.scribd.com/document/254248387/relevadores-optoacopladores>.
- Casa. D, Regalado. A. (2007). Módulo didáctico para el control electrónico de potencia del triac. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de: <http://bibdigital.epn.edu.ec>
- Galarza. J. (2016). Atmega164p español. Quito: A.T.R Advantage Technology Risc Obtenido de: <https://es.scribd.com>

Vernavá. A. (2002). Conversion CA/CC. Rosario: Universidad Nacional del Rosario. Obtenido de: [https:// http://potencia.eie.fceia.unr.edu.ar](https://http://potencia.eie.fceia.unr.edu.ar).

García. A. (2010). Analisis y diseño de un rectificador trifásico elevador. Madrid: Universidad Carlos III. Obtenido de: <https://e-archivo.uc3m.es>.

Micolta E. (2015). Parámetros de cruce por cero para circuitos de potencia. Cauca: Corporación Universitaria Autónoma del Cauca: <https://es.scribd.com>.

Torres Santos, E. R., & Bucheli Naranjo, J. L. (2017). Construcción y modelación de un módulo didáctico de muro Trombe mediante CFD para fomentar los estudios de la calefacción solar pasiva (Master's thesis, Quito, 2017.).

ANEXOS

Anexo 1. Optoacoplador 4n25

MOTOROLA SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by 4N25/D



6-Pin DIP Optoisolators Transistor Output

The 4N25/A, 4N26, 4N27 and 4N28 devices consist of a gallium arsenide infrared emitting diode optically coupled to a monolithic silicon phototransistor detector.

- Most Economical Optoisolator Choice for Medium Speed, Switching Applications
- Meets or Exceeds All JEDEC Registered Specifications
- **To order devices that are tested and marked per VDE 0884 requirements, the suffix "V" must be included at end of part number. VDE 0884 is a test option.**

Applications

- General Purpose Switching Circuits
- Interfacing and coupling systems of different potentials and impedances
- I/O Interfacing
- Solid State Relays

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
--------	--------	-------	------

INPUT LED

Reverse Voltage	V_R	3	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
LED Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ with Negligible Power in Output Detector Derate above 25°C	P_D	120	mW
		1.41	$\text{mW}/^\circ\text{C}$

OUTPUT TRANSISTOR

Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	30	Volts
Emitter–Collector Voltage	V_{ECO}	7	Volts
Collector–Base Voltage	V_{CBO}	70	Volts
Collector Current — Continuous	I_C	150	mA
Detector Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ with Negligible Power in Input LED Derate above 25°C	P_D	150	mW
		1.76	$\text{mW}/^\circ\text{C}$

TOTAL DEVICE

Isolation Surge Voltage ⁽¹⁾ (Peak ac Voltage, 60 Hz, 1 sec Duration)	V_{ISO}	7500	Vac(pk)
Total Device Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	250	mW
		2.94	$\text{mW}/^\circ\text{C}$
Ambient Operating Temperature Range ⁽²⁾	T_A	-55 to +100	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range ⁽²⁾	T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
Soldering Temperature (10 sec, 1/16" from case)	T_L	260	$^\circ\text{C}$

1. Isolation surge voltage is an internal device dielectric breakdown rating. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.
2. Refer to Quality and Reliability Section in Opto Data Book for information on test conditions.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value. GlobalOptoisolator is a trademark of Motorola, Inc.

REV 5

© Motorola, Inc. 1995

4N25*

4N25A*

4N26*

[CTR = 20% Min]

4N27

4N28

[CTR = 10% Min]

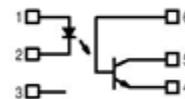
*Motorola Preferred Devices

STYLE 1 PLASTIC



STANDARD THRU HOLE
CASE 730A-04

SCHEMATIC



PIN 1. LED ANODE
2. LED CATHODE
3. N.C.
4. EMITTER
5. COLLECTOR
6. BASE



Rectifiers

1N4001G to 1N4007G

FEATURES

- Glass passivated
- High maximum operating temperature
- Low leakage current
- Excellent stability
- Available in ammo-pack.

DESCRIPTION

Rugged glass package, using a high temperature alloyed construction.

This package is hermetically sealed and fatigue free as coefficients of expansion of all used parts are matched.

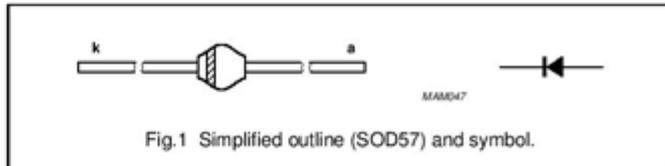


Fig.1 Simplified outline (SOD57) and symbol.

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V _{RRM}	repetitive peak reverse voltage				
	1N4001G		–	50	V
	1N4002G		–	100	V
	1N4003G		–	200	V
	1N4004G		–	400	V
	1N4005G		–	600	V
	1N4006G 1N4007G		–	800 1000	V V
V _R	continuous reverse voltage				
	1N4001G		–	50	V
	1N4002G		–	100	V
	1N4003G		–	200	V
	1N4004G		–	400	V
	1N4005G		–	600	V
	1N4006G 1N4007G		–	800 1000	V V
I _{F(AV)}	average forward current	averaged over any 20 ms period; T _{amb} = 75 °C; see Fig.2	–	1.00	A
		averaged over any 20 ms period; T _{amb} = 100 °C; see Fig.2	–	0.75	A
I _F	continuous forward current	T _{amb} = 75 °C; see Fig.2	–	1.00	A
I _{FRM}	repetitive peak forward current		–	10	A
I _{FSM}	non-repetitive peak forward current	half sinewave; 60 Hz	–	30	A
T _{stg}	storage temperature		–65	+175	°C
T _j	junction temperature		–65	+175	°C

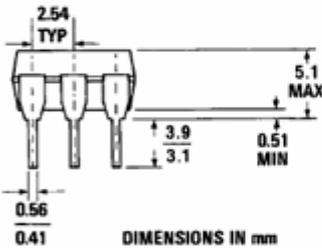
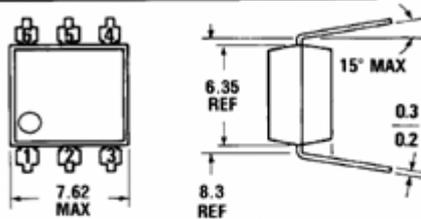
Anexo 3. Optoacoplador MOC3020



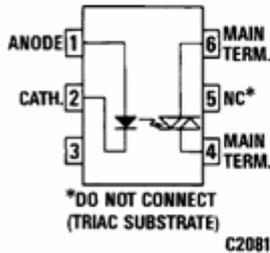
NON-ZERO-CROSSING TRIACS

MOC3020 MOC3021 MOC3022 MOC3023

PACKAGE DIMENSIONS



ST1603



Equivalent Circuit

DESCRIPTION

The MOC3020, MOC3021, MOC3022 and MOC3023 are optically isolated triac driver devices. These devices contain a GaAs infrared emitting diode and a light activated silicon bilateral switch, which functions like a triac. This is designed for interfacing between electronic controls and power triacs to control resistive and inductive loads for 240 VAC operations.

FEATURES

- Excellent I_T stability—IR emitting diode has low degradation
- High isolation voltage—minimum 7500 VAC peak
- Underwriters Laboratory (UL) recognized—File #E90700

APPLICATIONS

- European applications for 240 VAC
- Triac driver
- Industrial controls
- Traffic lights
- Vending machines
- Motor control
- Solid state relay

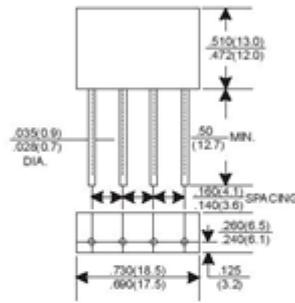
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

TOTAL PACKAGE	
Storage temperature	-55°C to 150°C
Operating temperature	-40°C to 100°C
Lead temperature (soldering, 10 sec)	260°C

INPUT DIODE	
Forward DC current	50 mA
Reverse voltage	3 V
Peak forward current (1 μ s pulse, 300 pps)	3.0 A
Power dissipation (25°C ambient)	100 mW
Derate linearly (above 25°C ambient)	1.33 mW/°C

OUTPUT DRIVER	
Off-state output terminal voltage	400 Volts
On-state RMS current (Full cycle, 50 to 60 Hz)	$T_A=25^\circ\text{C}$ 100 mA $T_A=70^\circ\text{C}$ 50 mA
Peak nonrepetitive surge current (PW=10 ms, DC=10%)	1.2 A
Total power dissipation (25°C ambient)	300 mW
Derate above 25°C	4.0 mW/°C

Anexo 4. Puente de diodos RS207

<h1 style="margin: 0;">RS201 THRU RS207</h1>																																																																																																																					
SINGLE PHASE 2.0 AMP BRIDGE RECTIFIERS																																																																																																																					
<div style="text-align: center; margin-bottom: 10px;">  </div> <p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Ideal for printed circuit board * Low forward voltage * Low leakage current * Polarity: marked on body * Mounting position: Any * Weight: 2.74 grams 	<p style="text-align: center;">VOLTAGE RANGE 50 to 1000 Volts</p> <p style="text-align: center;">CURRENT 2.0 Amperes</p>	<p style="text-align: center;">RS-2</p>  <p style="text-align: center; font-size: small;">Dimensions in inches and (millimeters)</p>																																																																																																																			
<h3>MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS</h3> <p style="font-size: x-small;">Rating 25°C ambient temperature unless otherwise specified. Single phase half wave, 60Hz, resistive or inductive load. For capacitive load, derate current by 20%.</p>																																																																																																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">TYPE NUMBER</th> <th>RS201</th> <th>RS202</th> <th>RS203</th> <th>RS204</th> <th>RS205</th> <th>RS206</th> <th>RS207</th> <th>UNITS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage</td> <td>50</td> <td>100</td> <td>200</td> <td>400</td> <td>600</td> <td>800</td> <td>1000</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>Maximum RMS Voltage</td> <td>35</td> <td>70</td> <td>140</td> <td>280</td> <td>420</td> <td>560</td> <td>700</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>Maximum DC Blocking Voltage</td> <td>50</td> <td>100</td> <td>200</td> <td>400</td> <td>600</td> <td>800</td> <td>1000</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>Maximum Average Forward Rectified Current</td> <td colspan="7"></td> <td></td> </tr> <tr> <td>.375"(9.5mm) Lead Length at Ta=50°C</td> <td colspan="7"></td> <td>2.0</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>Peak Forward Surge Current, 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)</td> <td colspan="7"></td> <td>50</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>Maximum Forward Voltage Drop per Bridge Element at 1.0A D.C.</td> <td colspan="7"></td> <td>1.0</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>Maximum DC Reverse Current Ta=25°C</td> <td colspan="7"></td> <td>10</td> <td>µA</td> </tr> <tr> <td>at Rated DC Blocking Voltage Ta=100°C</td> <td colspan="7"></td> <td>500</td> <td>µA</td> </tr> <tr> <td>Operating Temperature Range, Tj</td> <td colspan="7"></td> <td>-65 — +125</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Storage Temperature Range, Tstg</td> <td colspan="7"></td> <td>-65 — +150</td> <td>°C</td> </tr> </tbody> </table>	TYPE NUMBER	RS201	RS202	RS203	RS204	RS205	RS206	RS207	UNITS	Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V	Maximum RMS Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V	Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V	Maximum Average Forward Rectified Current									.375"(9.5mm) Lead Length at Ta=50°C								2.0	A	Peak Forward Surge Current, 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)								50	A	Maximum Forward Voltage Drop per Bridge Element at 1.0A D.C.								1.0	V	Maximum DC Reverse Current Ta=25°C								10	µA	at Rated DC Blocking Voltage Ta=100°C								500	µA	Operating Temperature Range, Tj								-65 — +125	°C	Storage Temperature Range, Tstg								-65 — +150	°C		
TYPE NUMBER	RS201	RS202	RS203	RS204	RS205	RS206	RS207	UNITS																																																																																																													
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V																																																																																																													
Maximum RMS Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V																																																																																																													
Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V																																																																																																													
Maximum Average Forward Rectified Current																																																																																																																					
.375"(9.5mm) Lead Length at Ta=50°C								2.0	A																																																																																																												
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)								50	A																																																																																																												
Maximum Forward Voltage Drop per Bridge Element at 1.0A D.C.								1.0	V																																																																																																												
Maximum DC Reverse Current Ta=25°C								10	µA																																																																																																												
at Rated DC Blocking Voltage Ta=100°C								500	µA																																																																																																												
Operating Temperature Range, Tj								-65 — +125	°C																																																																																																												
Storage Temperature Range, Tstg								-65 — +150	°C																																																																																																												

(PW=10 ms, DC=10%)
 Total power dissipation (25°C ambient) 300 mW
 Derate above 25°C 4.0 mW/°C

Anexo 5. Regulador de tensión lm7805



1.5A Positive Voltage Regulator

LM78XX

Description

The Bay Linear LM78XX is integrated linear positive regulator with three terminals. The LM78XX offer several fixed output voltages making them useful in wide range of applications. When used as a zener diode/resistor combination replacement, the LM78XX usually results in an effective output impedance improvement of two orders of magnitude, lower quiescent current.

The LM78XX is available in the TO-252, TO-220 & TO-263 packages.

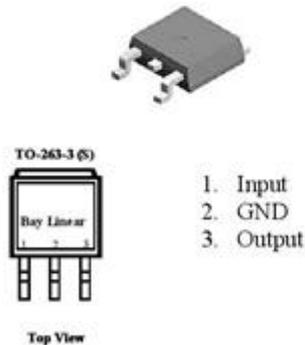
Features

- Output Current of 1.5A
- Output Voltage Tolerance of 5%
- Internal thermal overload protection
- Internal Short-Circuit Limited
- No External Component
- Output Voltage 5.0V, 6V, 8V, 9V, 10V, 12V, 15V, 18V, 24V
- Offer in plastic TO-252, TO-220 & TO-263
- Direct Replacement for LM78XX

Applications

- Post regulator for switching DC/DC converter
- Bias supply for analog circuits

Packaging Information



Ordering Information

Device	Operating Voltage	Temp.
LM7805	7 to 20	0 to 125 °C
LM7806	8 to 20	0 to 125 °C
LM7808	10.5 to 23	0 to 125 °C
LM7809	11.5 to 24	0 to 125 °C
LM7810	12.5 to 25	0 to 125 °C
LM7812	14.5 to 27	0 to 125 °C
LM7815	17.5 to 30	0 to 125 °C
LM7818	20.5 to 33	0 to 125 °C
LM7824	26.5 to 39	0 to 125 °C

TO-220 (T)
TO-263 (S)
TO-252 (D)

Thyristors

BT151 series

GENERAL DESCRIPTION

Glass passivated thyristors in a plastic envelope, intended for use in applications requiring high bidirectional blocking voltage capability and high thermal cycling performance. Typical applications include motor control, industrial and domestic lighting, heating and static switching.

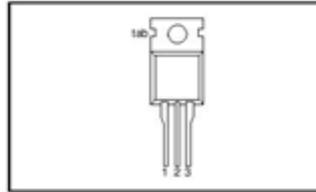
QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	MAX.	MAX.	MAX.	UNIT
		500R	650R	800R	
V_{DRM}	Repetitive peak off-state voltages	500	650	800	V
V_{RRM}	Average on-state current	7.5	7.5	7.5	A
$I_{T(AV)}$	RMS on-state current	12	12	12	A
$I_{T(RMS)}$	Non-repetitive peak on-state current	100	100	100	A
I_{TSM}					

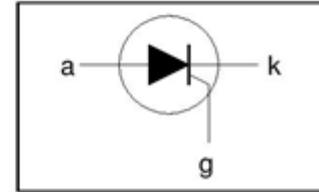
PINNING - TO220AB

PIN	DESCRIPTION
1	cathode
2	anode
3	gate
tab	anode

PIN CONFIGURATION



SYMBOL



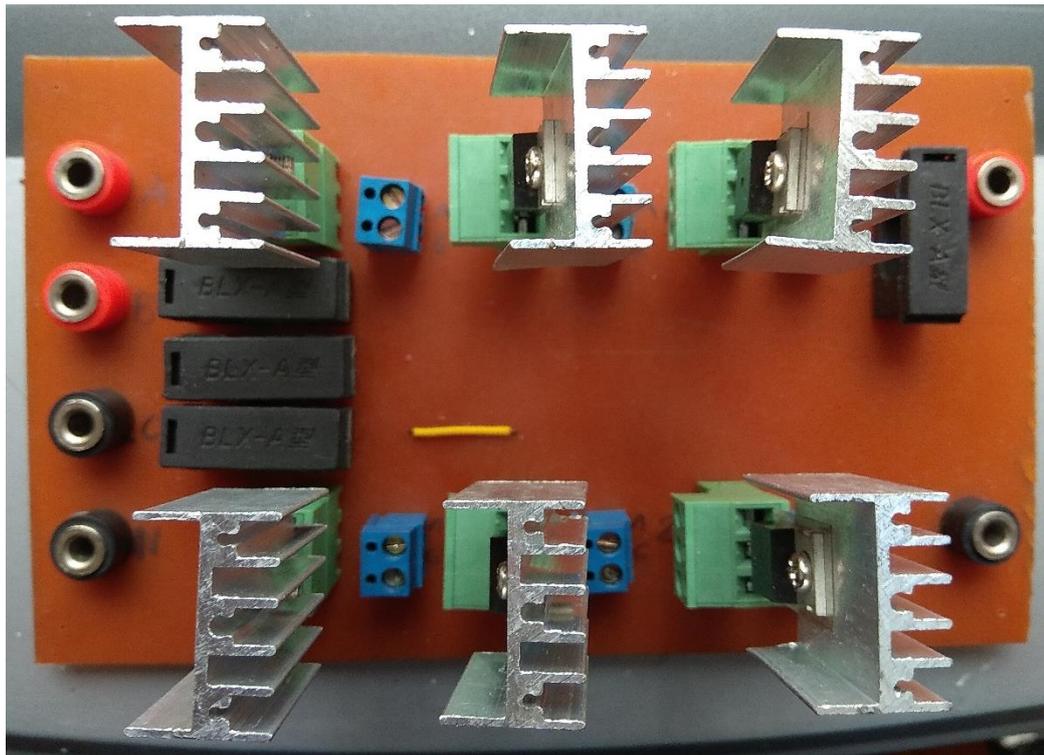
LIMITING VALUES

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134).

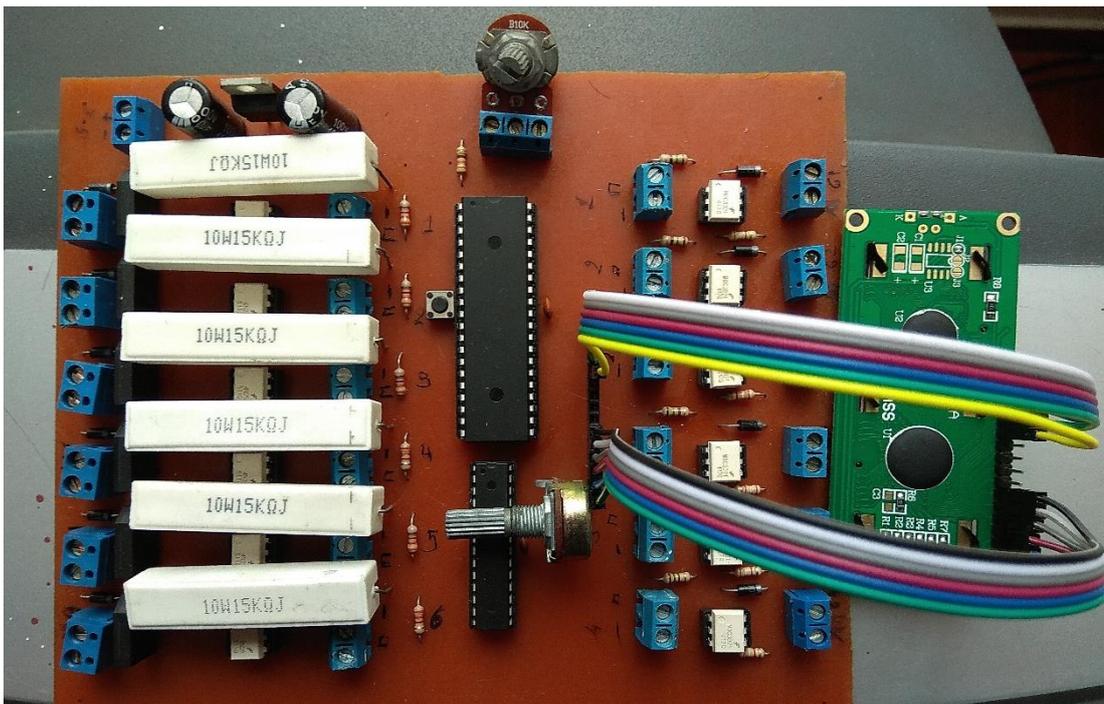
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.			UNIT
				-500R 500 ¹	-650R 650 ¹	-800R 800	
V_{DRM} , V_{RRM}	Repetitive peak off-state voltages		-				V
$I_{T(AV)}$	Average on-state current	half sine wave; $T_{stb} \leq 109^\circ\text{C}$	-	7.5			A
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current	all conduction angles	-	12			A
I_{TSM}	Non-repetitive peak on-state current	half sine wave; $T_j = 25^\circ\text{C}$ prior to surge	-	100			A
		$t = 10\text{ ms}$	-	110			A
i^2t	i^2t for fusing	$t = 8.3\text{ ms}$	-	50			A ² s
di_T/dt	Repetitive rate of rise of on-state current after triggering	$t = 10\text{ ms}$	-	50			A/ μs
		$I_{TM} = 20\text{ A}$; $I_G = 50\text{ mA}$; $dI_G/dt = 50\text{ mA}/\mu\text{s}$	-	50			
I_{GM}	Peak gate current		-	2			A
V_{GM}	Peak gate voltage		-	5			V
V_{RGM}	Peak reverse gate voltage		-	5			V
P_{GM}	Peak gate power		-	5			W
$P_{G(AV)}$	Average gate power	over any 20 ms period	-	0.5			W
T_{stg}	Storage temperature		-40	150			$^\circ\text{C}$
T_j	Operating junction temperature		-	125			$^\circ\text{C}$

¹ Although not recommended, off-state voltages up to 800V may be applied without damage, but the thyristor may switch to the on-state. The rate of rise of current should not exceed 15 A/ μs .

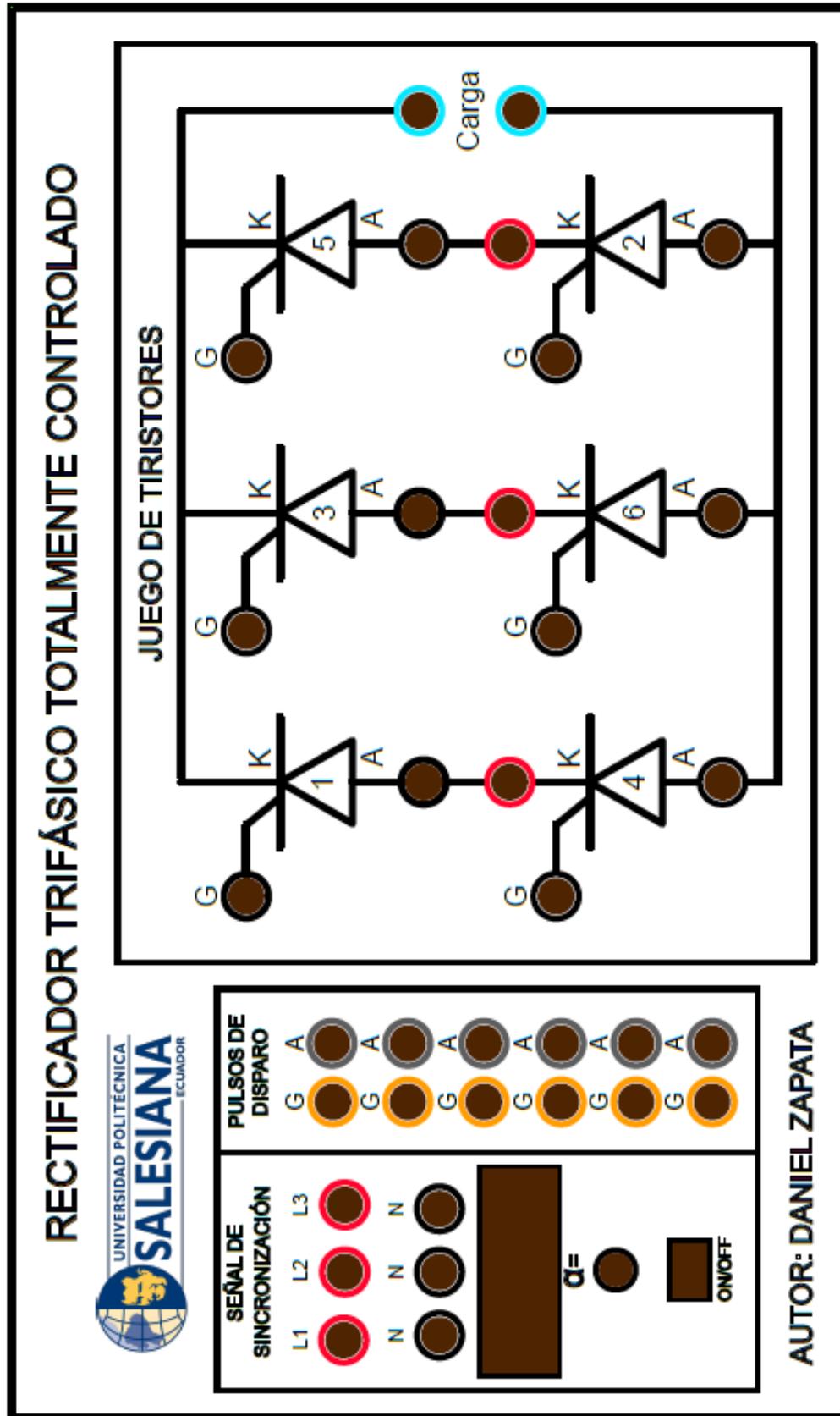
Anexo 7. Placas terminadas – Modulo didáctico

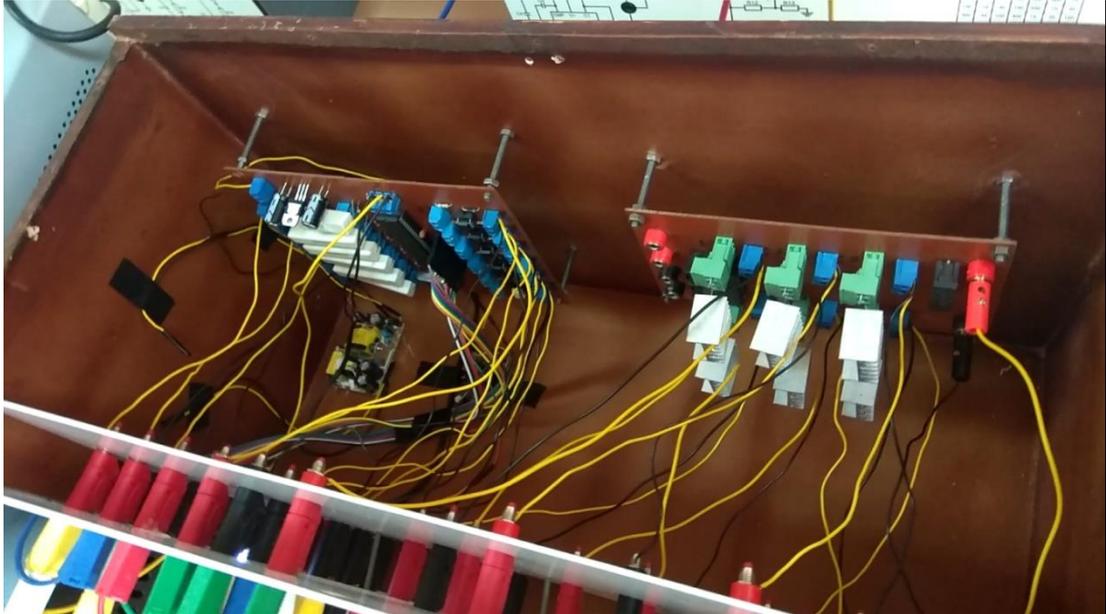


Elaborado por: Daniel Zapata



Elaborado por: Daniel Zapata.



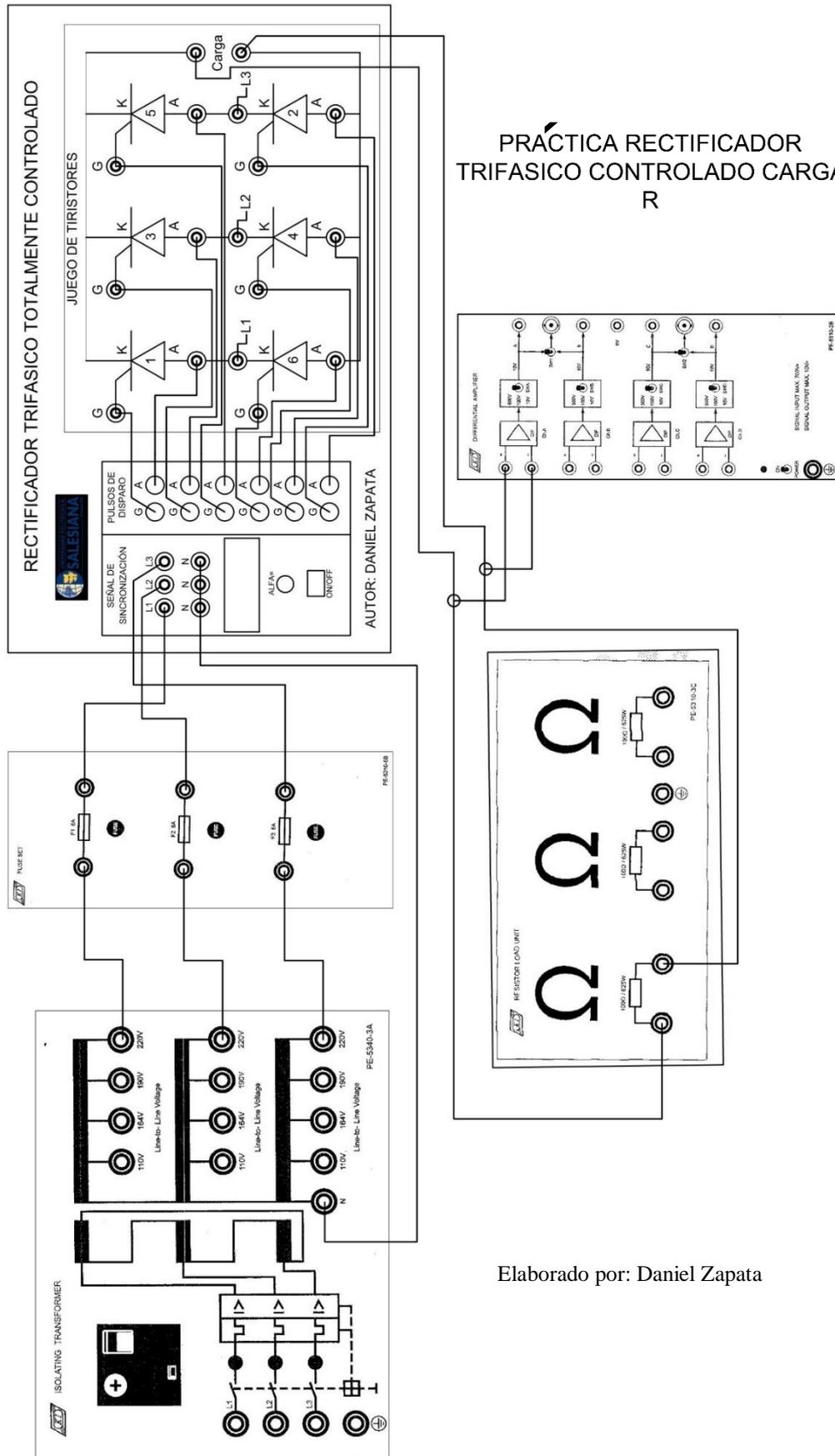


Elaborado por: Daniel Zapata



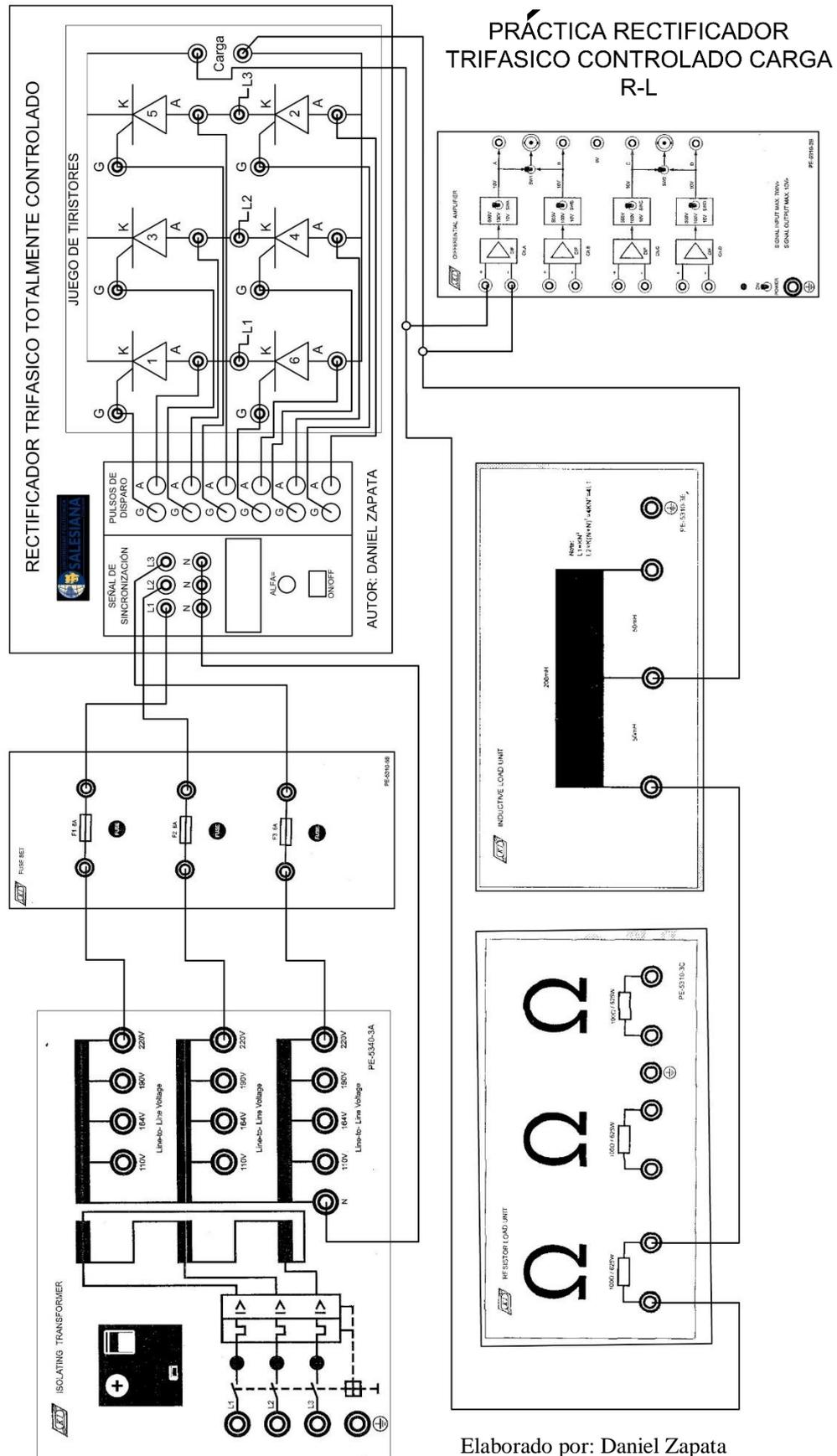
Elaborado por: Daniel Zapata

Anexo 9. Guía de montaje - Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R
(Modulo Didáctico)



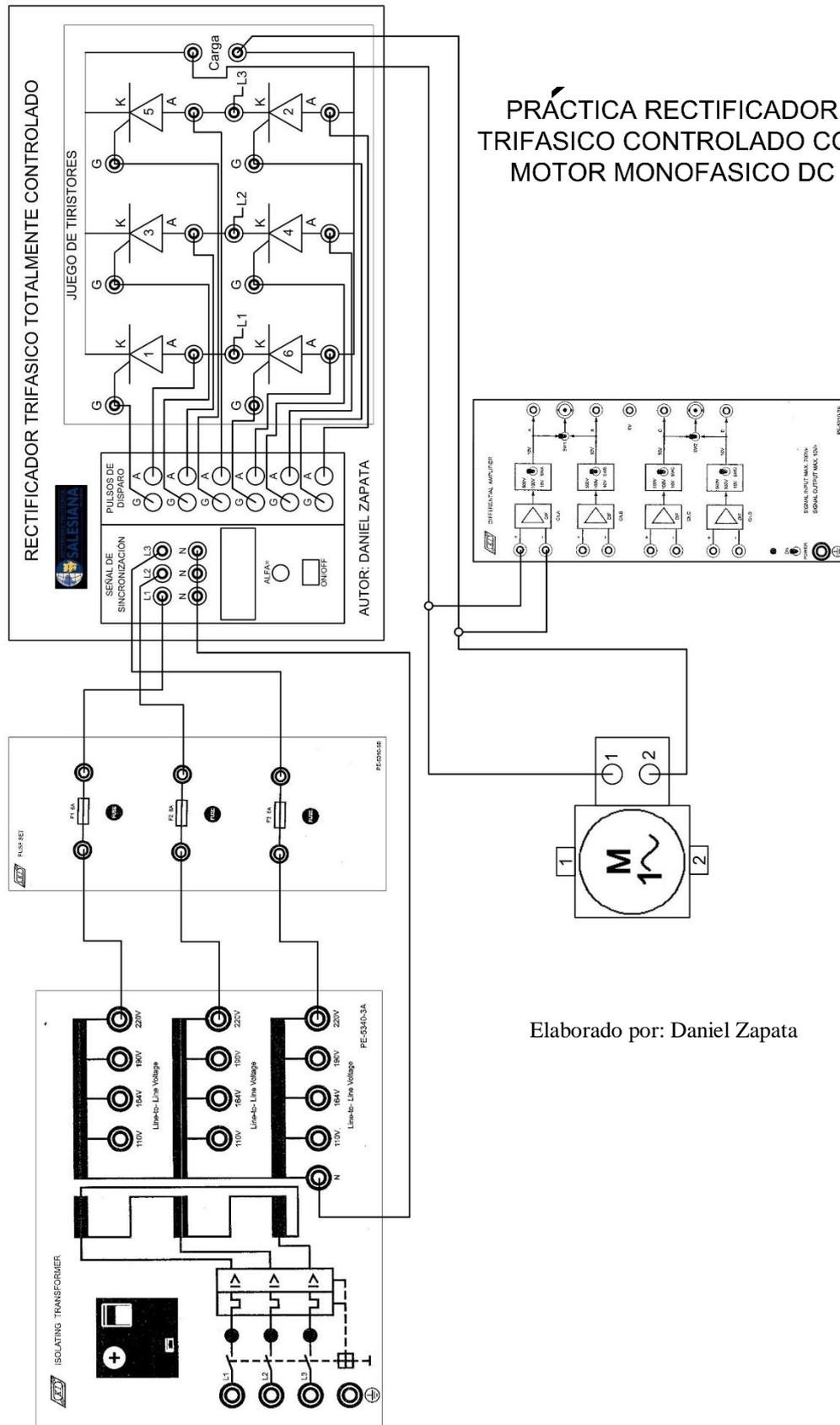
Elaborado por: Daniel Zapata

Anexo 10. Guía de montaje - Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R-L (Modulo Didáctico)



Elaborado por: Daniel Zapata

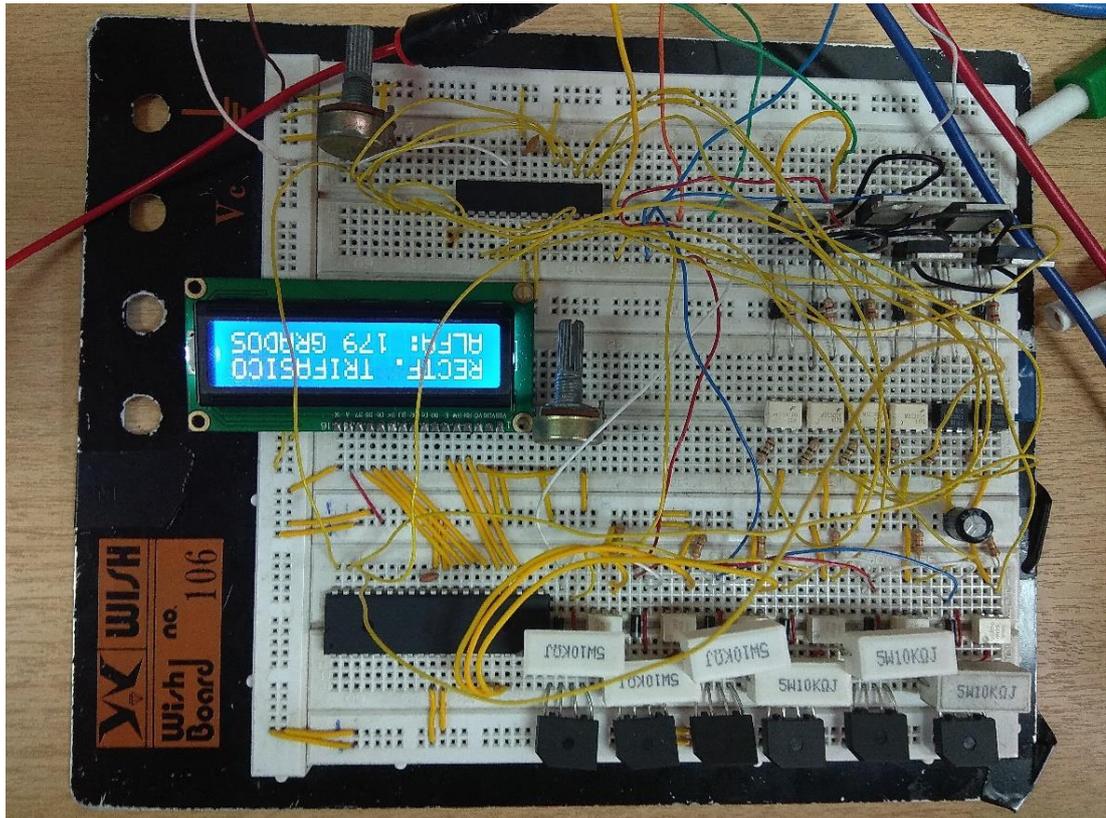
Anexo 11. Guía de montaje - Rectificador trifásico totalmente controlado con motor DC (Modulo Didáctico)



PRÁCTICA RECTIFICADOR TRIFASICO CONTROLADO CON MOTOR MONOFASICO DC

Elaborado por: Daniel Zapata

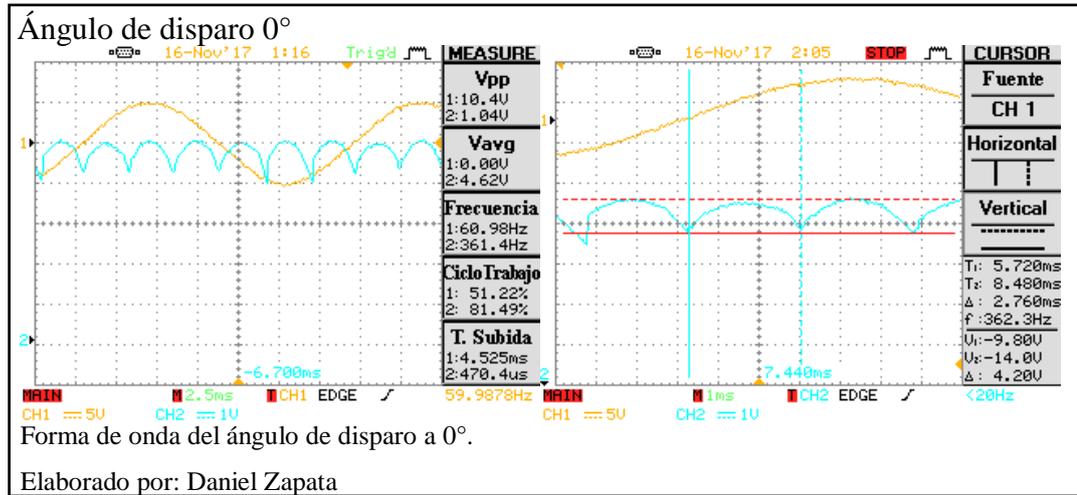
Anexo 12. Rectificador trifásico totalmente controlado armado en Protoboard y Rectificador trifásico totalmente controlado en el Modulo Didáctico



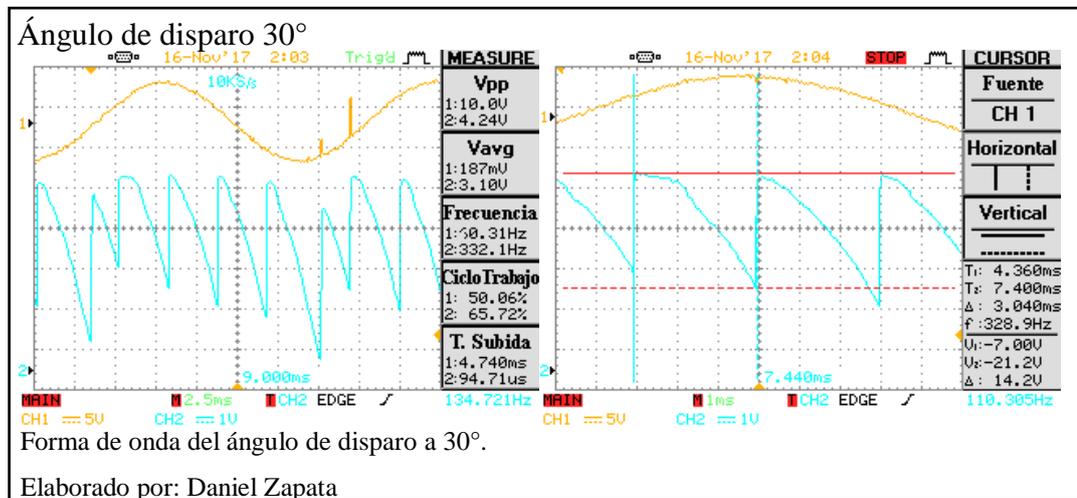
Elaborado por: Daniel Zapata

Anexo 13. Formas de onda del Rectificador trifásico totalmente controlado con carga resistiva (Módulo Didáctico)

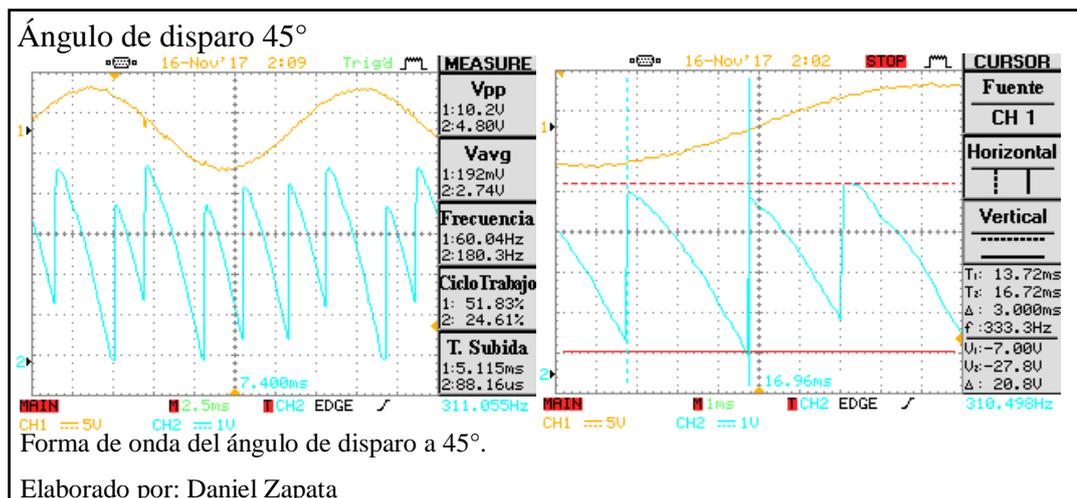
Ángulo de disparo a 0 grados.



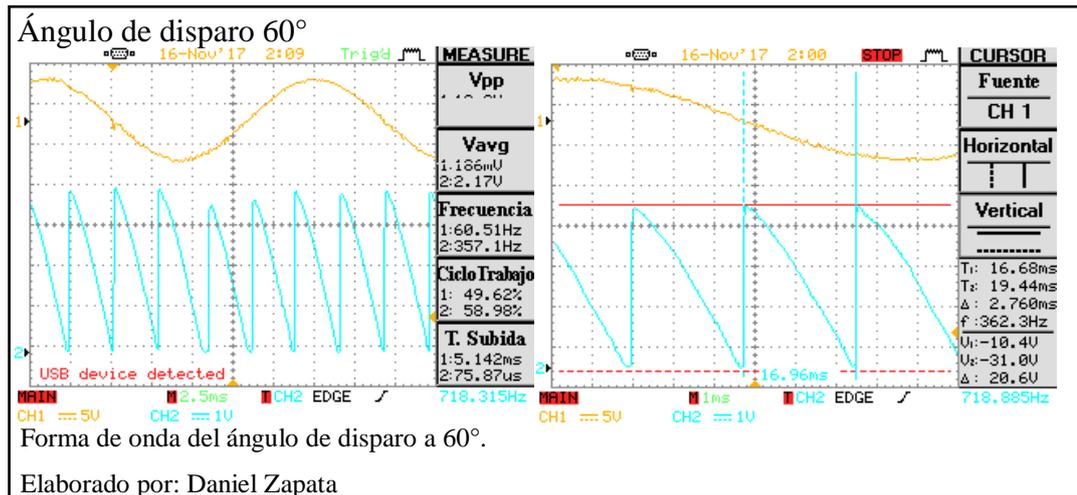
Ángulo de disparo a 30 grados.



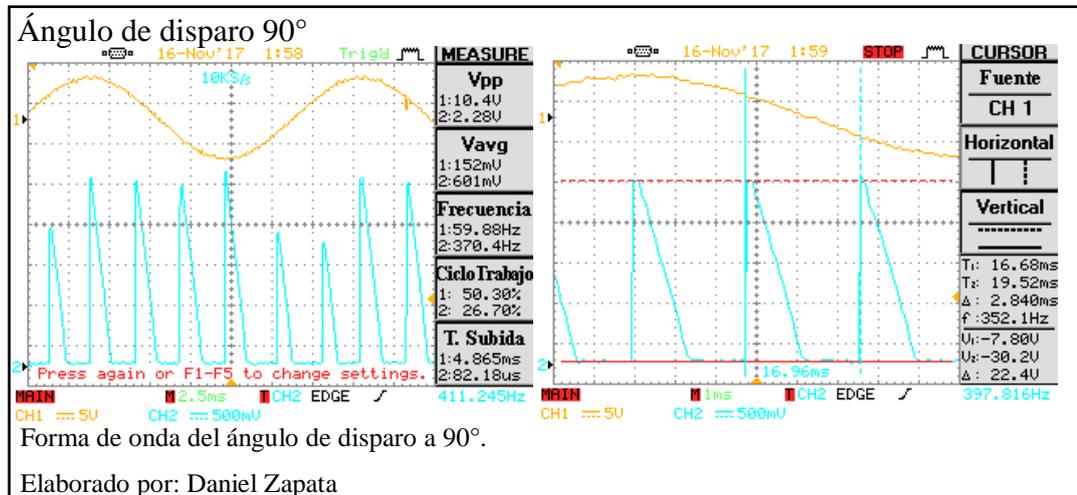
Ángulo de disparo a 45 grados.



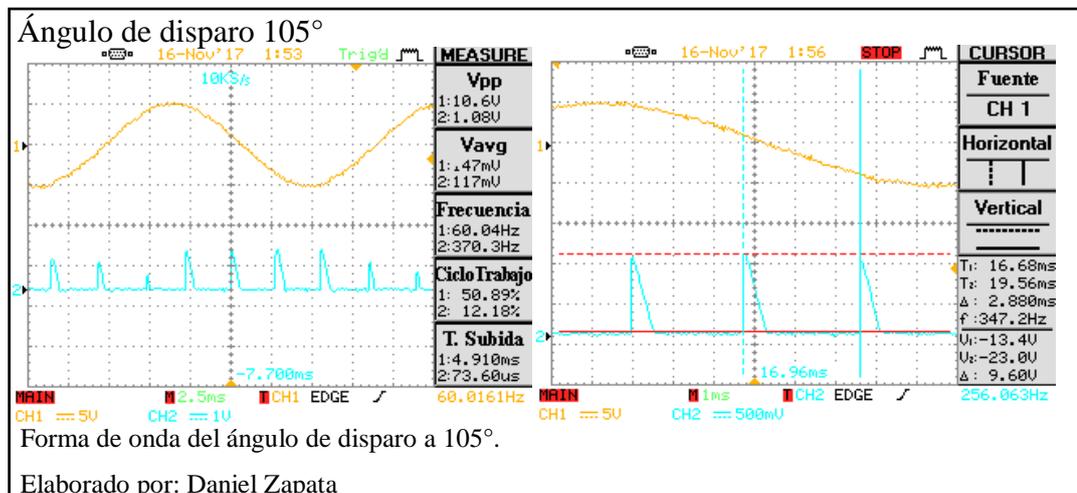
Ángulo de disparo a 60 grados.



Ángulo de disparo a 90 grados.

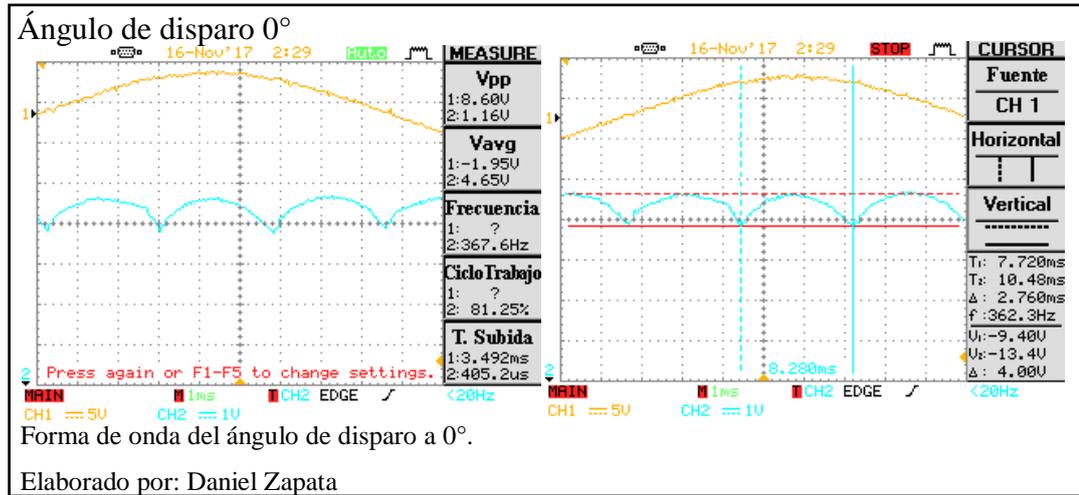


Ángulo de disparo a 105 grados.

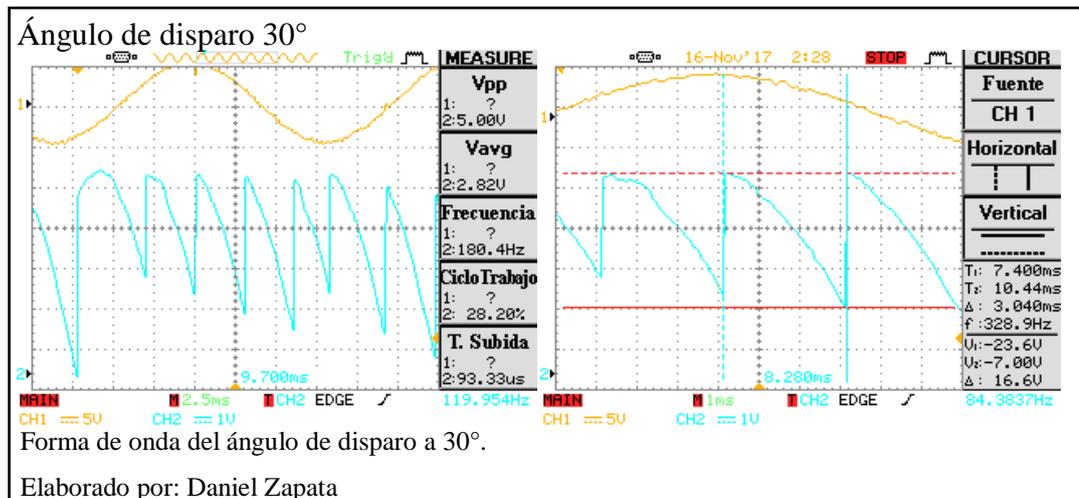


Anexo 14. Formas de onda del Rectificador trifásico totalmente controlado con carga resistiva – inductiva (Módulo Didáctico)

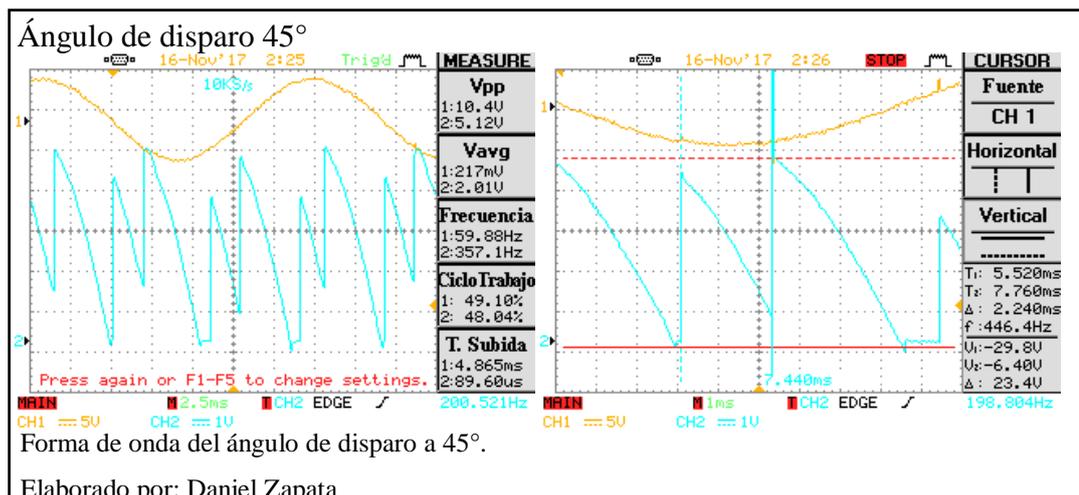
Angulo de disparo a 0 grados.



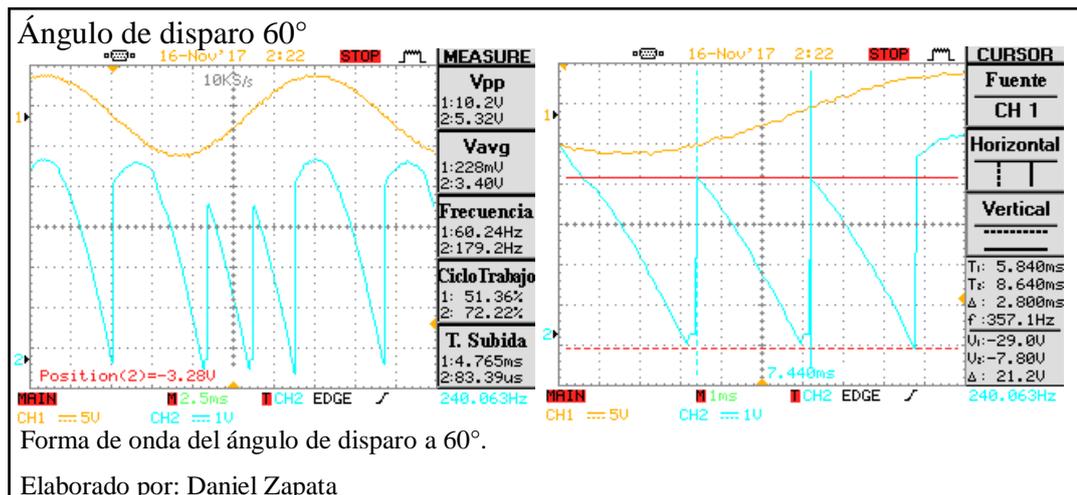
Ángulo de disparo a 30 grados.



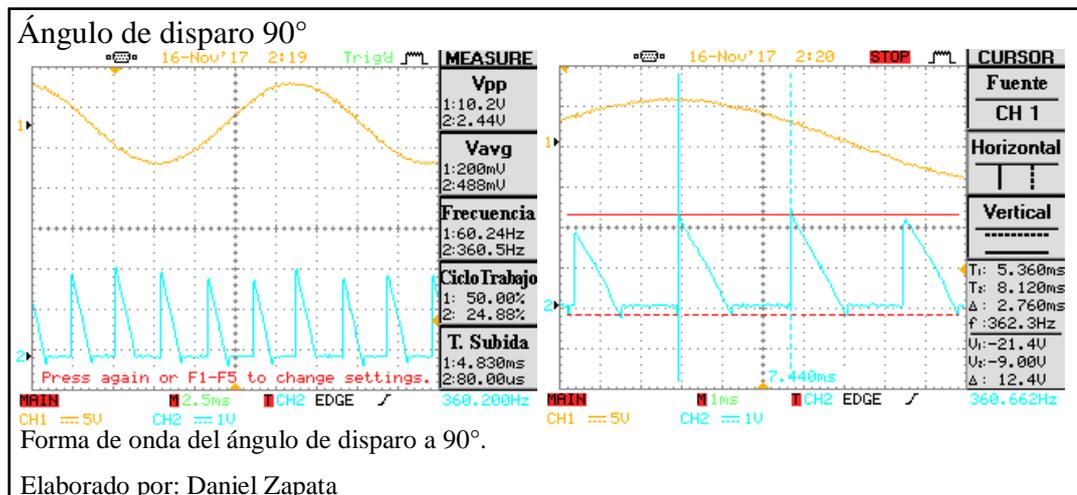
Angulo de disparo a 45 grados.



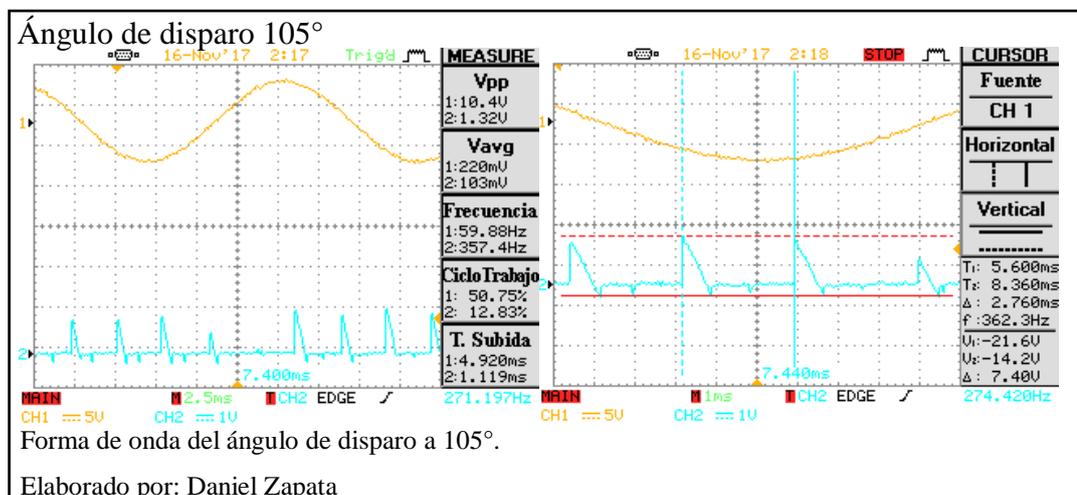
Ángulo de disparo a 60 grados.



Ángulo de disparo a 90 grados.

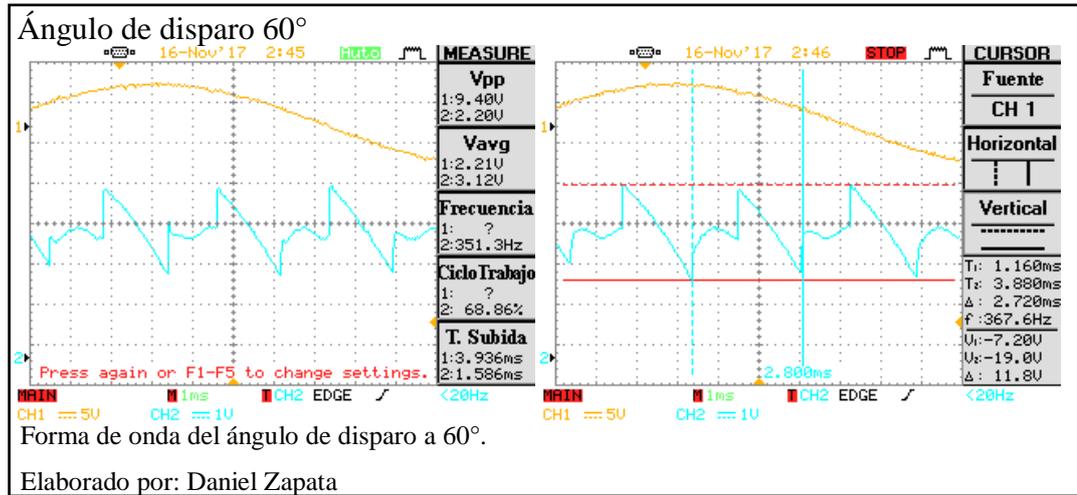


Ángulo de disparo a 105 grados.

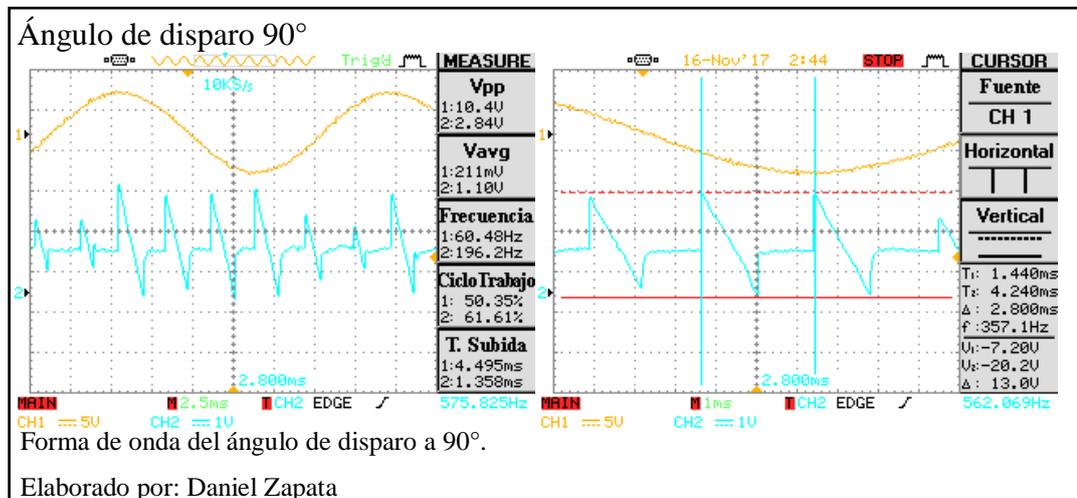


Anexo 15. Formas de onda del Rectificador trifásico totalmente controlado con motor DC (Módulo Didáctico)

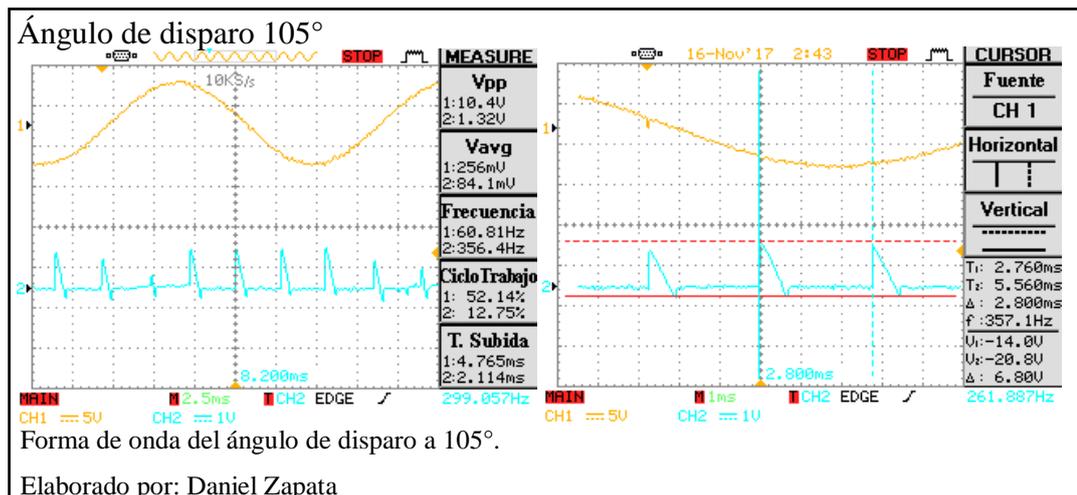
Ángulo de disparo a 60 grados.



Ángulo de disparo a 90 grados.

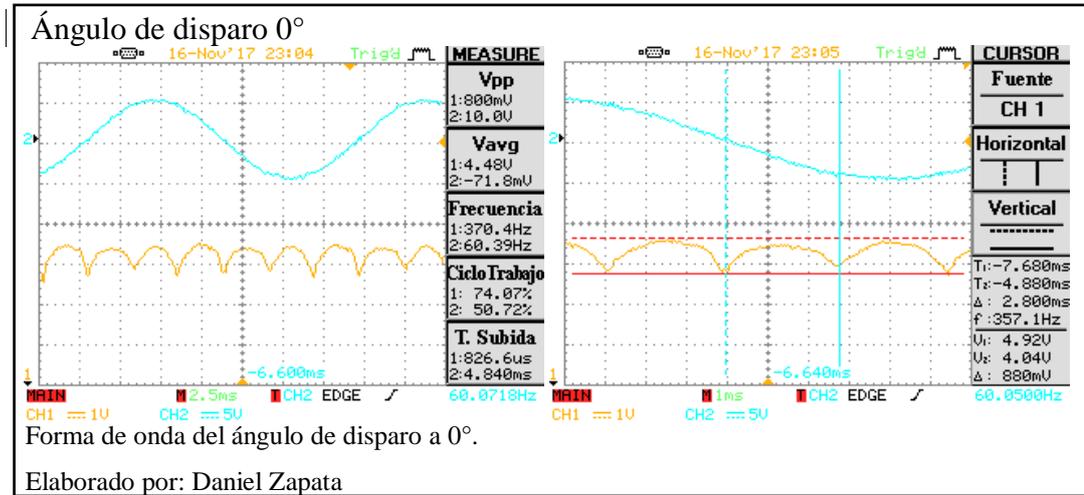


Ángulo de disparo a 105 grados.

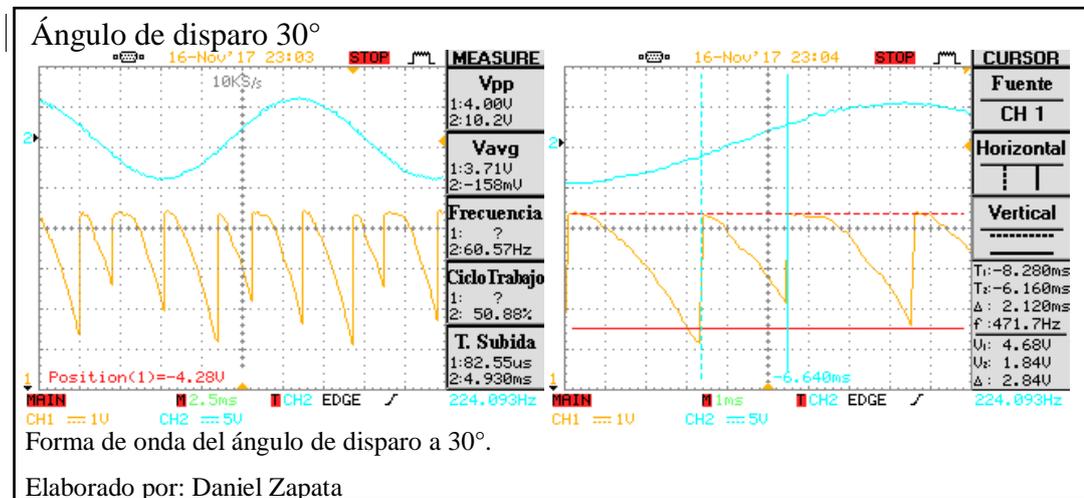


Anexo 16. Formas de onda del Rectificador trifásico totalmente controlado con carga resistiva (Protoboard)

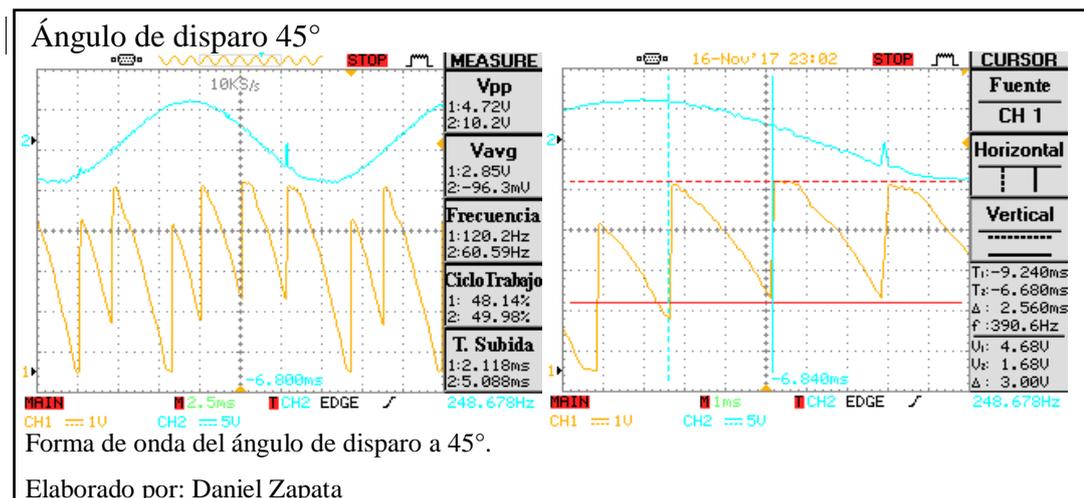
Ángulo de disparo a 0 grados.



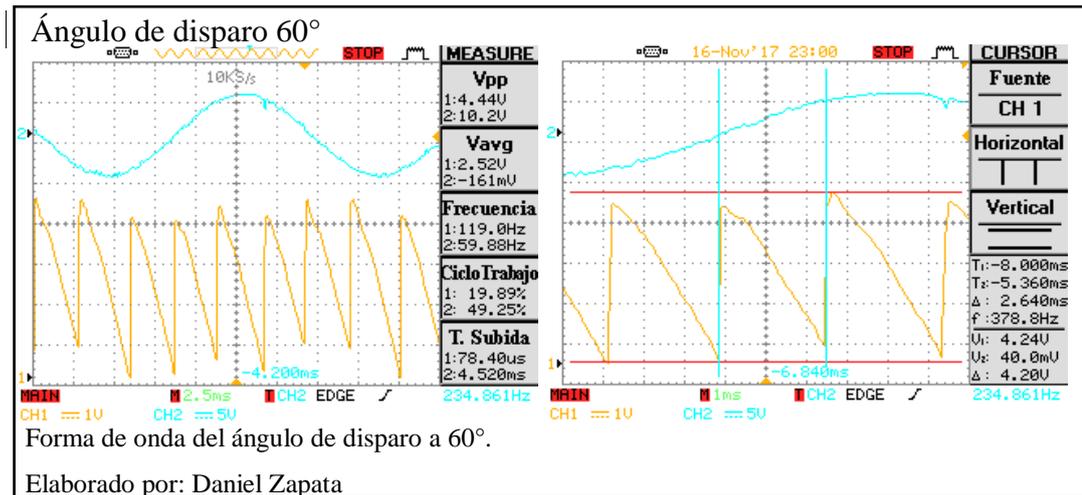
Ángulo disparo a 30 grados.



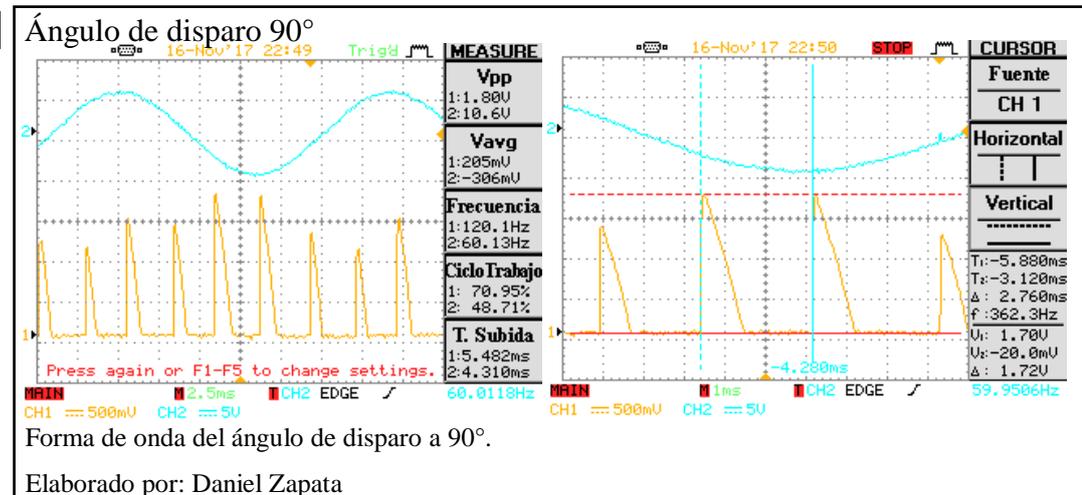
Ángulo de disparo a 45 grados.



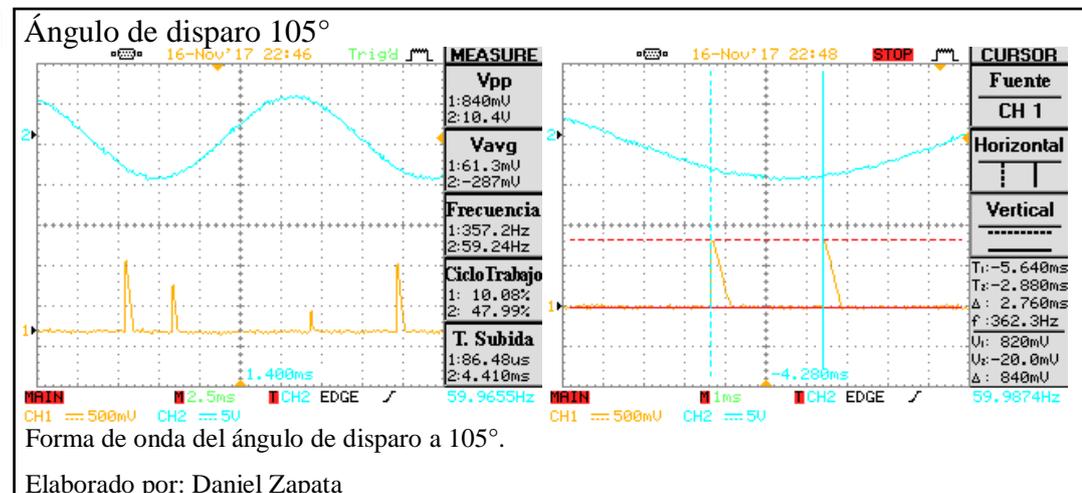
Ángulo de disparo a 60 grados.



Ángulo de disparo a 90 grados.

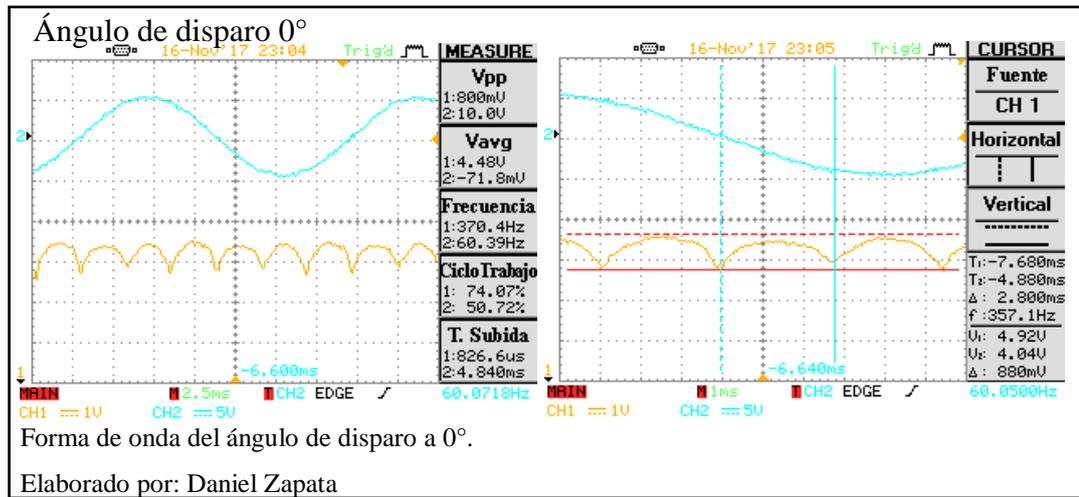


Ángulo de disparo a 105 grados.

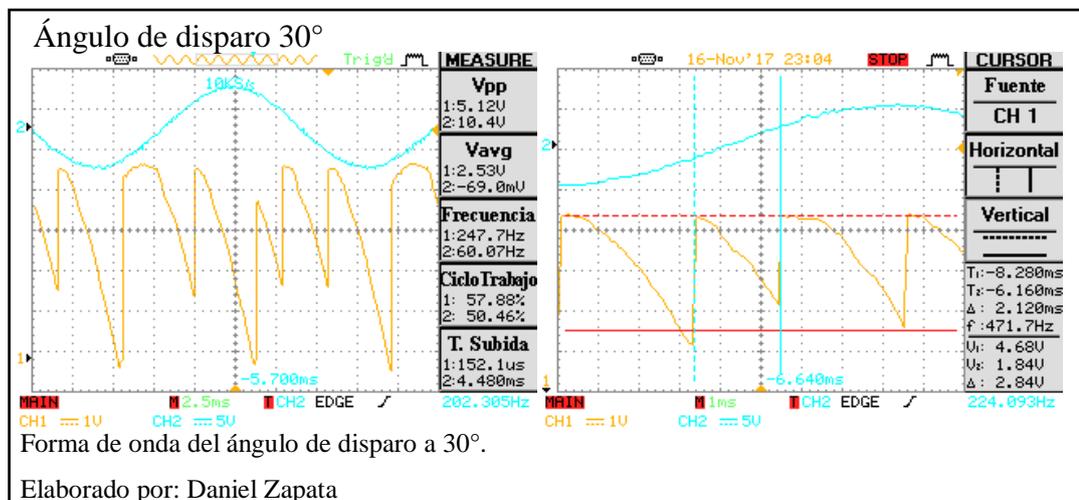


Anexo 17. Formas de onda del Rectificador trifásico totalmente controlado con carga resistiva-inductiva (Protoboard)

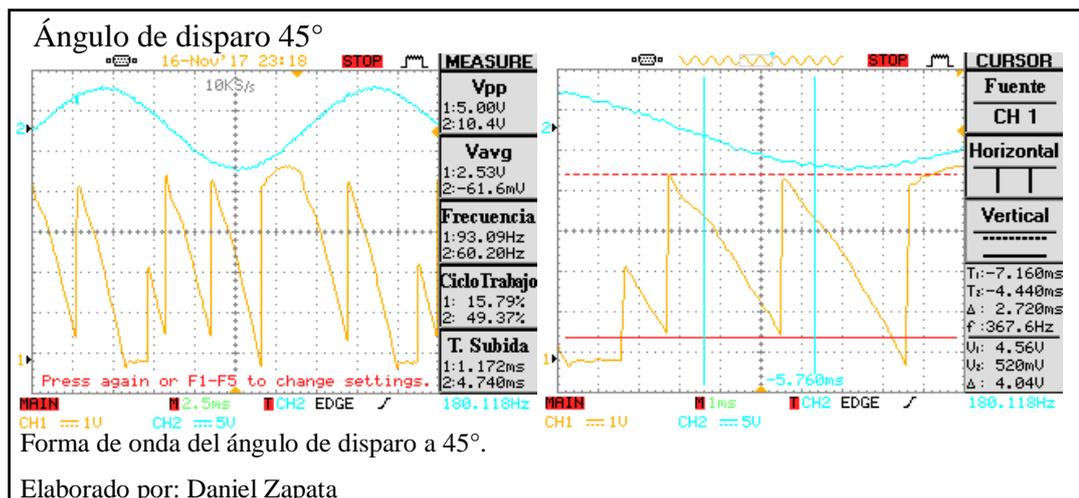
Ángulo de disparo a 0 grados.



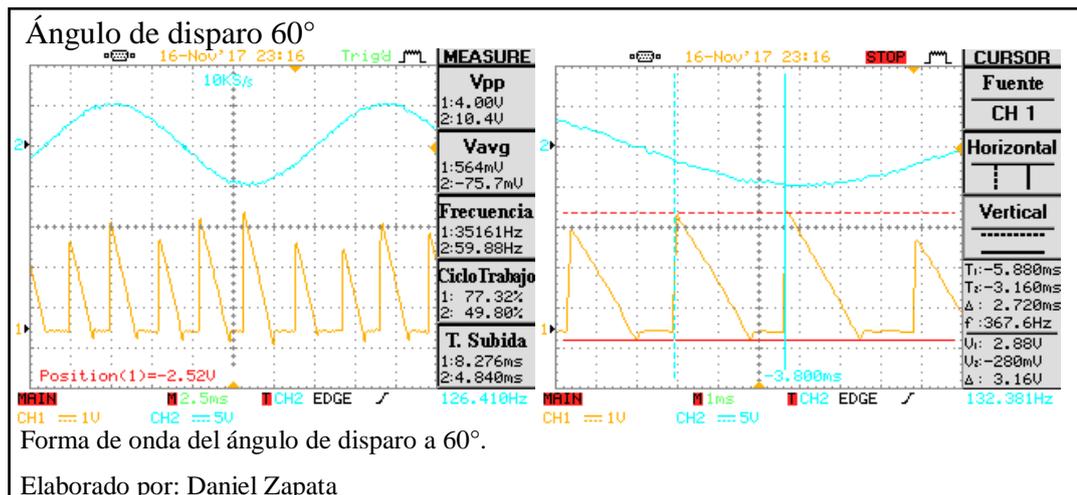
Ángulo de disparo a 30 grados.



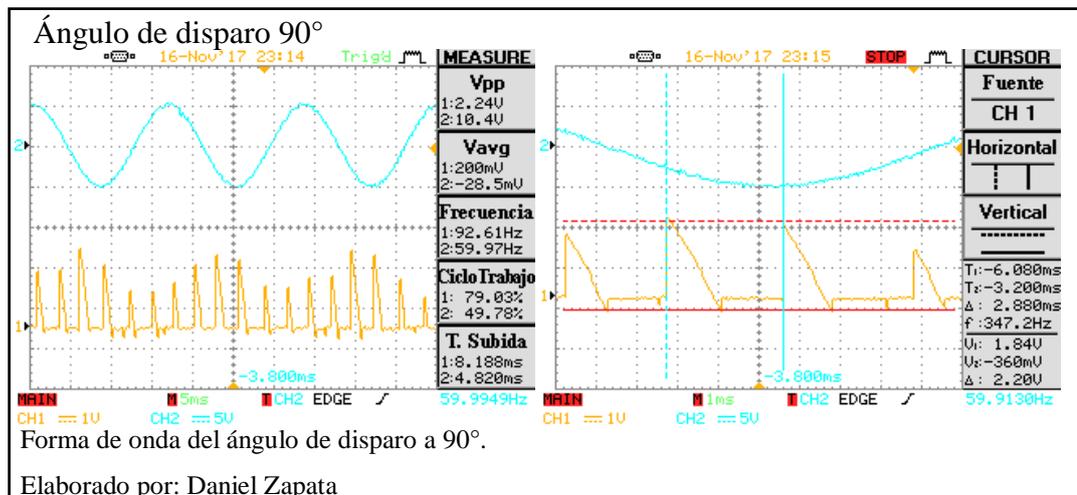
Ángulo de disparo a 45 grados.



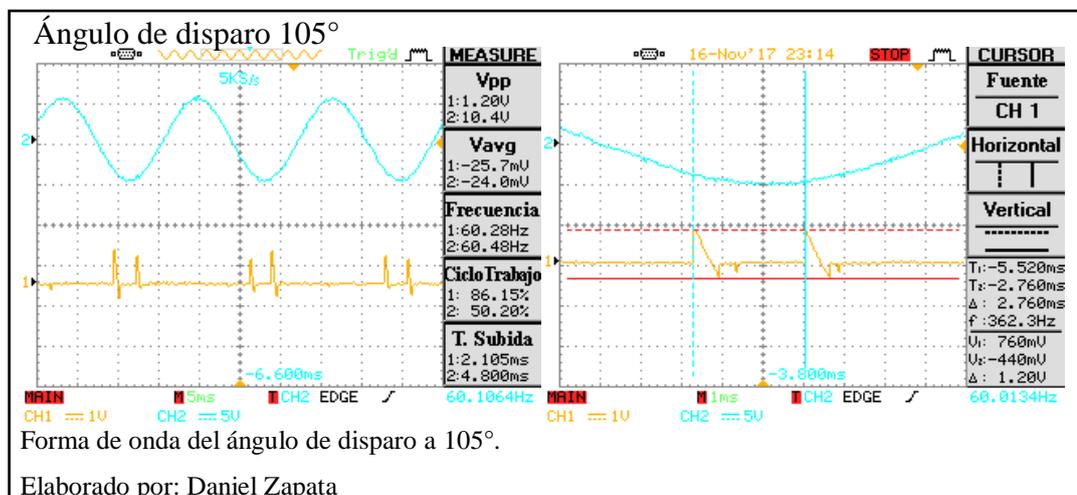
Ángulo de disparo a 60 grados.



Ángulo de disparo a 90 grados.

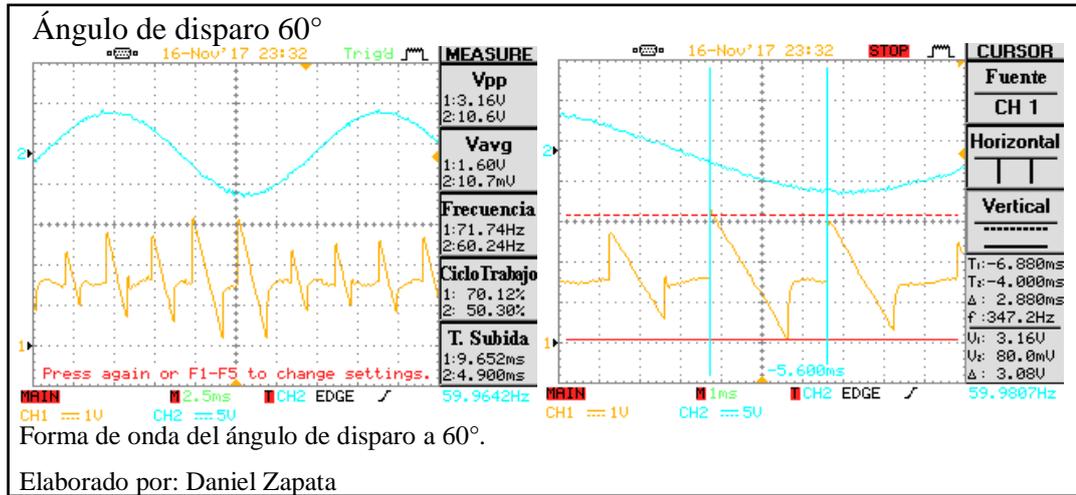


Ángulo de disparo a 105 grados.

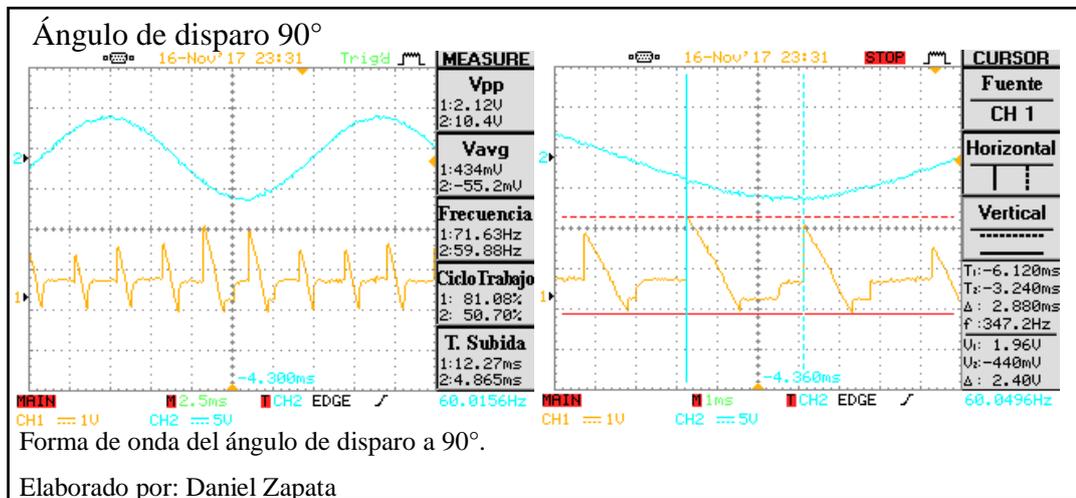


Anexo 18. Formas de onda del Rectificador trifásico totalmente controlado con motor DC (Protoboard)

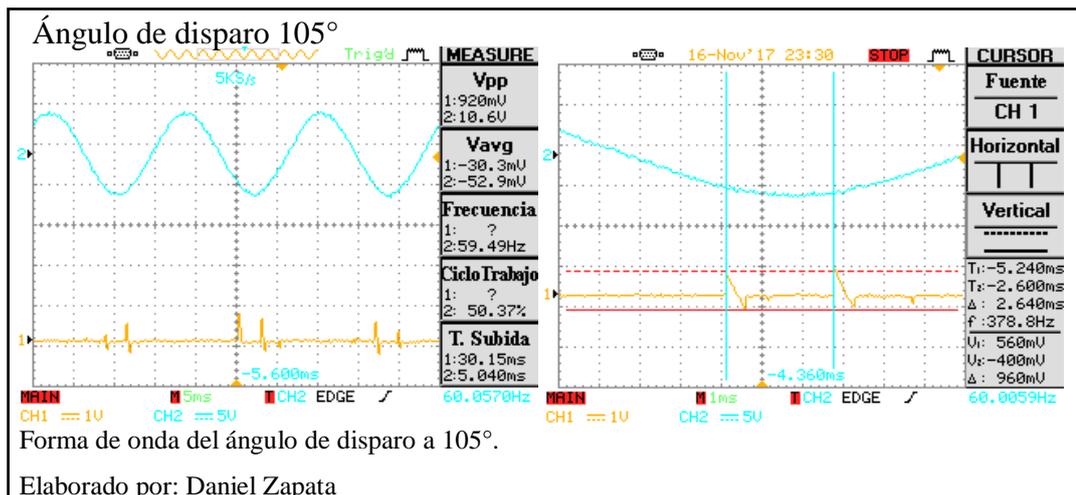
El ángulo de disparo a 60 grados se puede ver la Figura 4.52.



El ángulo de disparo a 90 grados se puede ver la Figura 4.53.

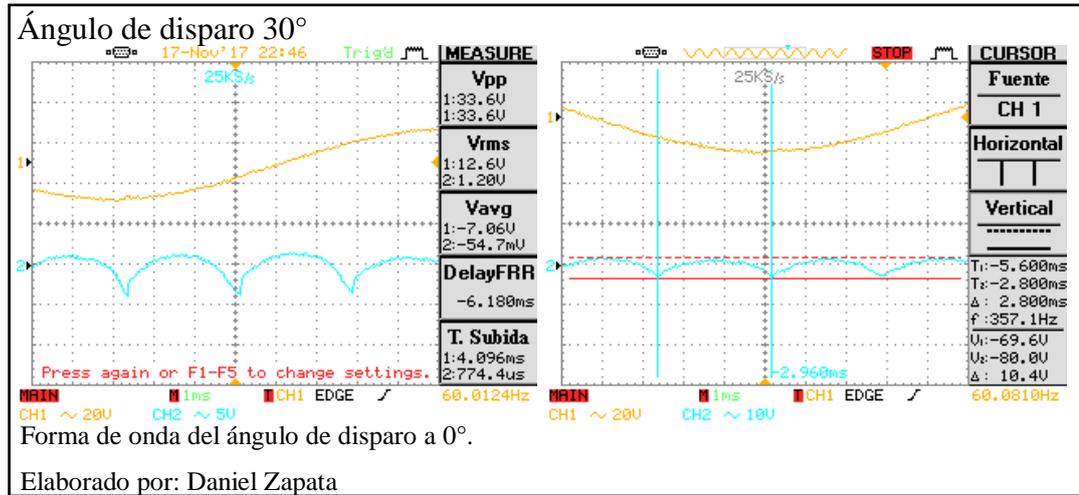


El ángulo de disparo a 105 grados se puede ver la Figura 4.54.

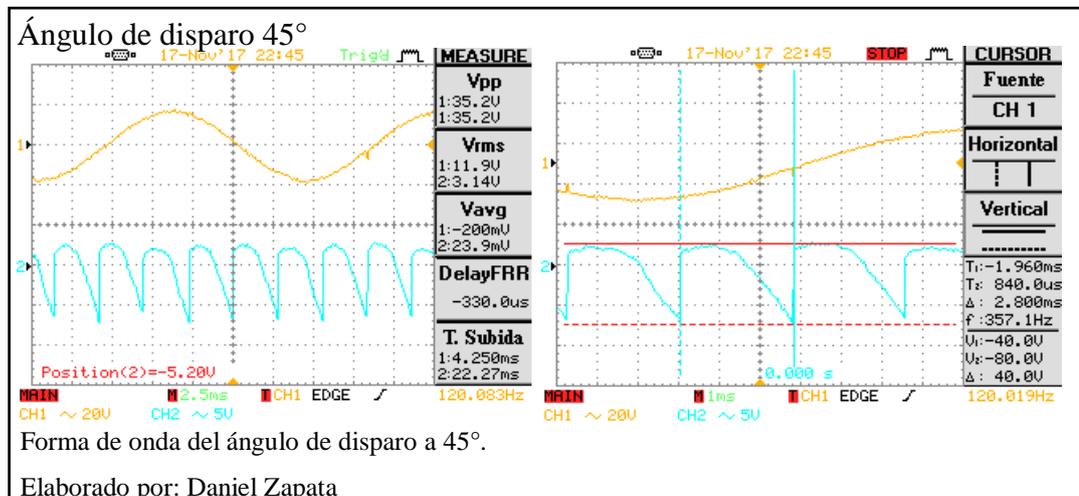


Anexo 19. Formas de onda del Rectificador trifásico totalmente controlado con carga resistiva (Módulo K&H PE-5000)

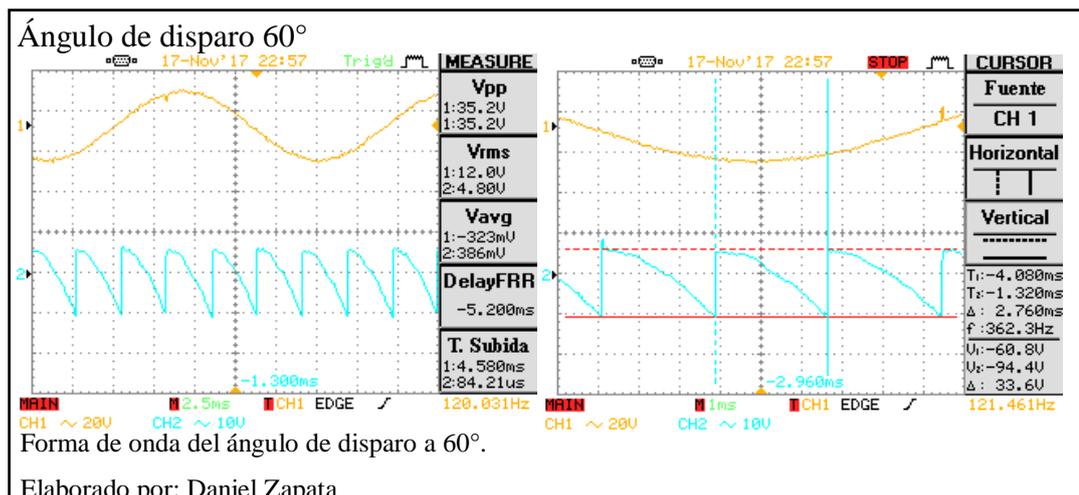
Ángulo de disparo a 30 grados.



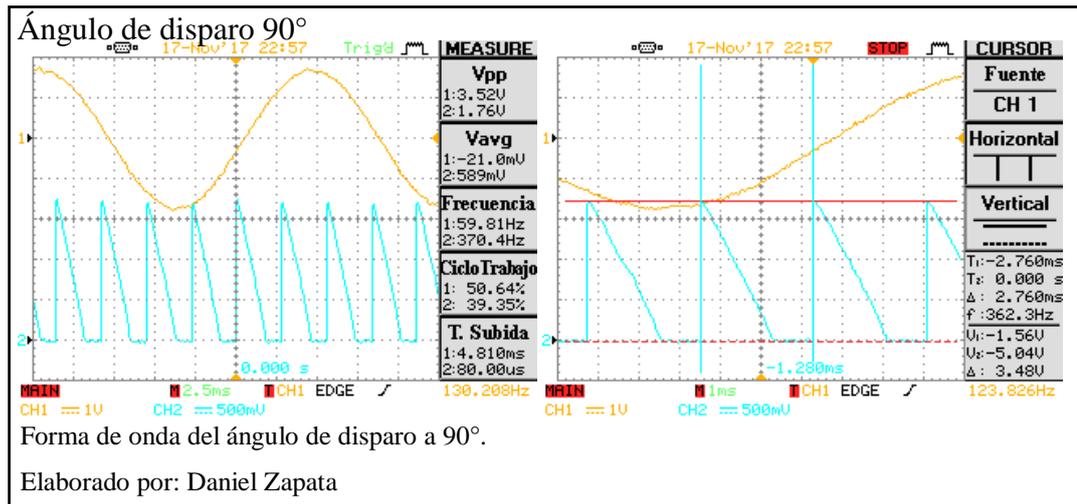
Ángulo de disparo a 45 grados.



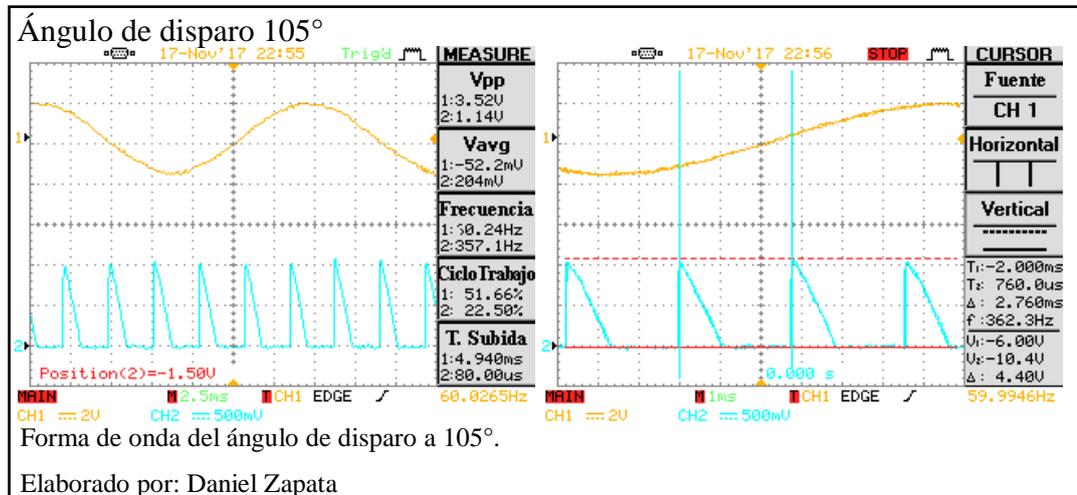
Ángulo de disparo a 60 grados.



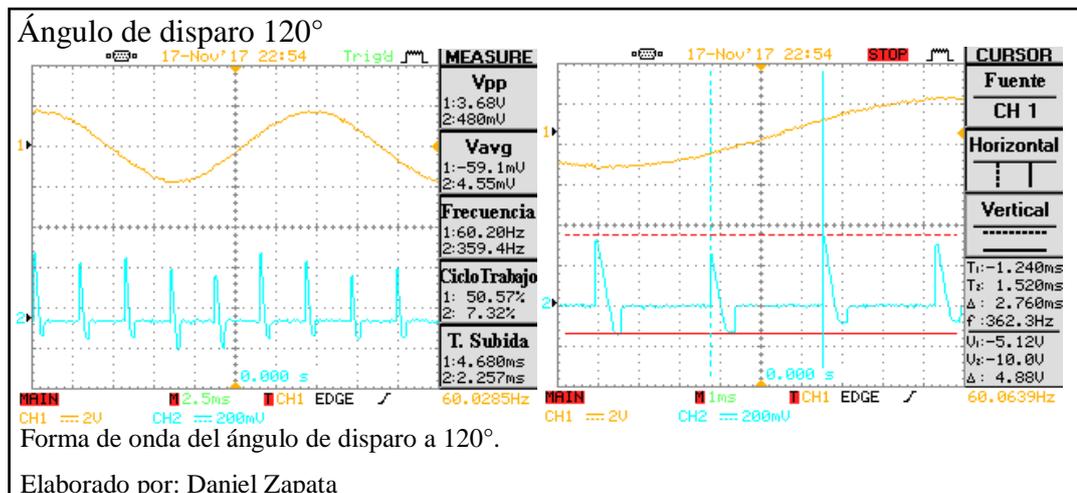
Ángulo de disparo a 90 grados.



Ángulo de disparo a 105 grados.

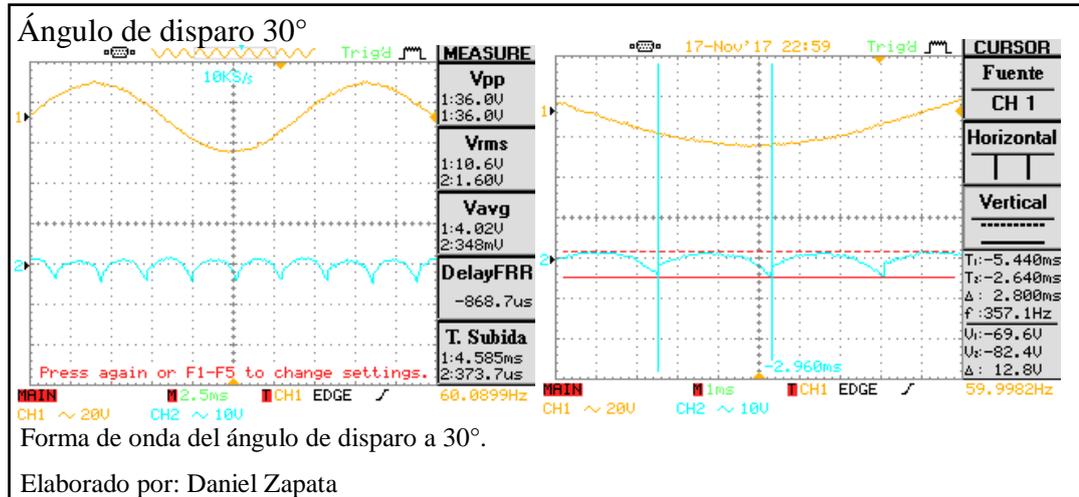


Ángulo de disparo a 120 grados.

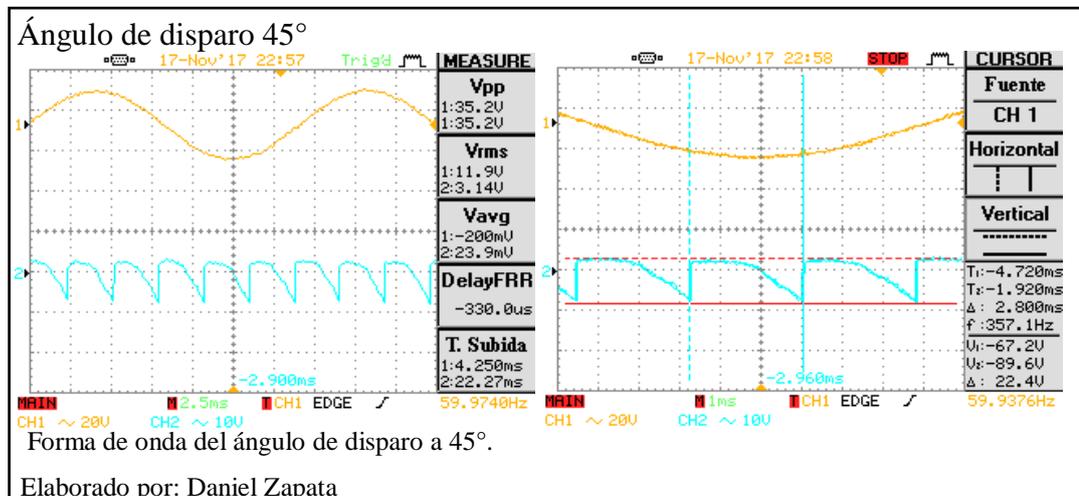


Anexo 20. Formas de onda del Rectificador trifásico totalmente controlado con carga resistiva - inductiva (Módulo K&H PE-5000)

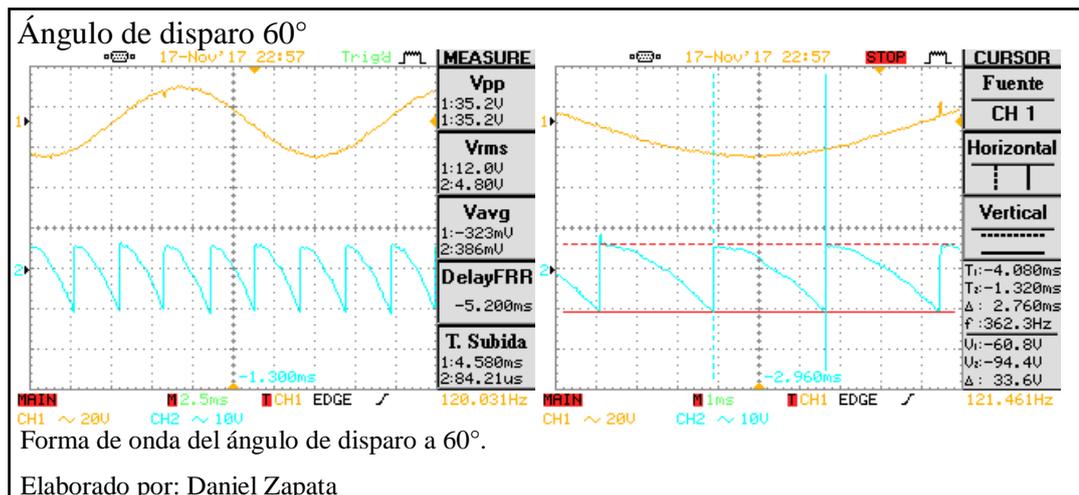
Ángulo de disparo a 30 grados.



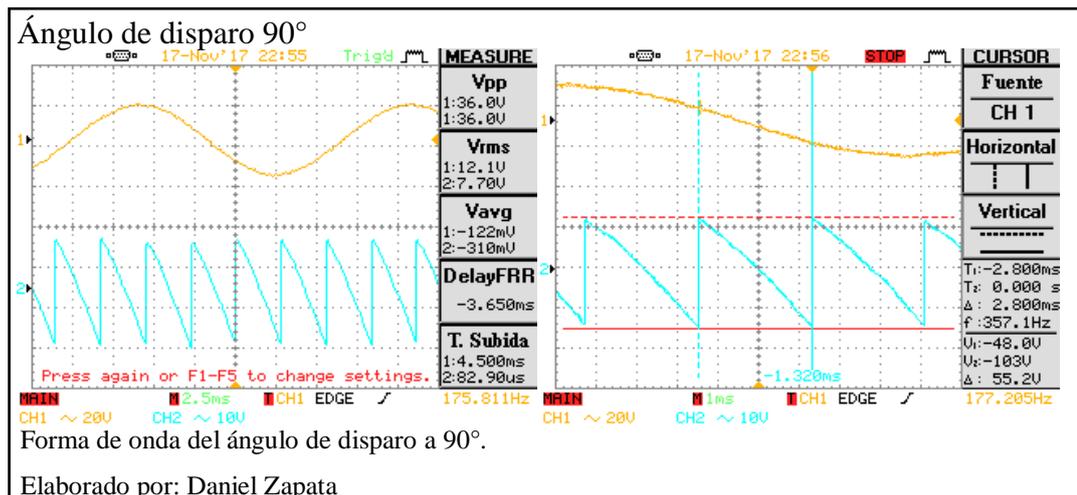
Ángulo de disparo a 45 grados.



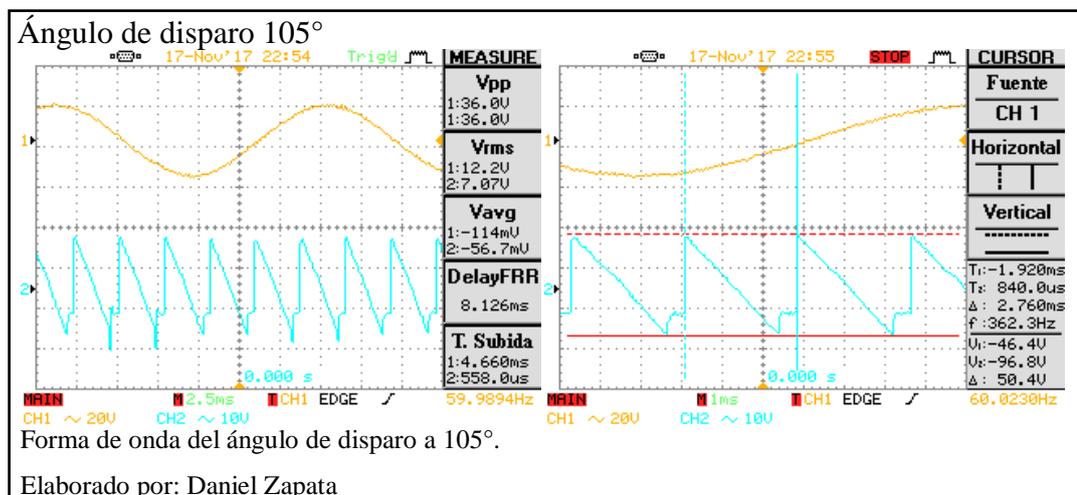
Ángulo de disparo a 60 grados.



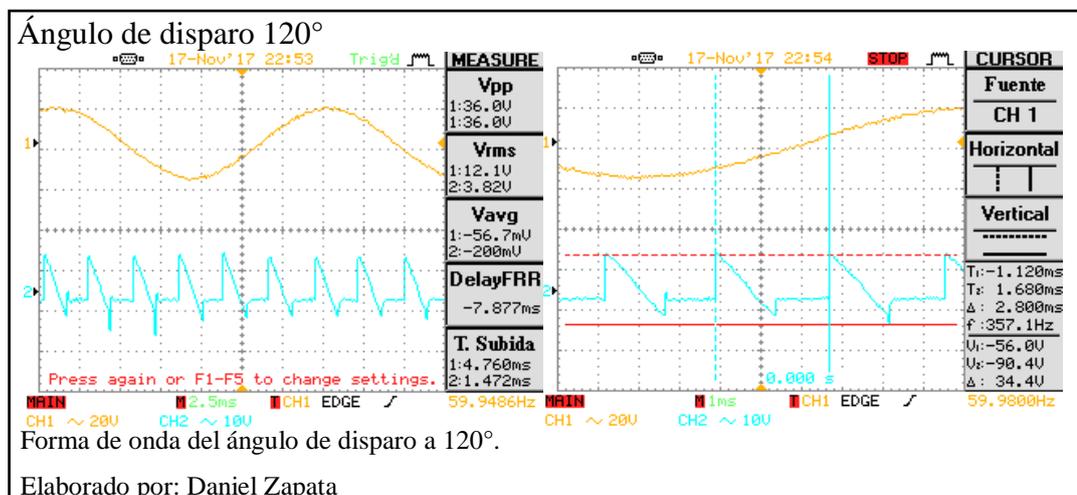
Ángulo de disparo a 90 grados.



Ángulo de disparo a 105 grados.

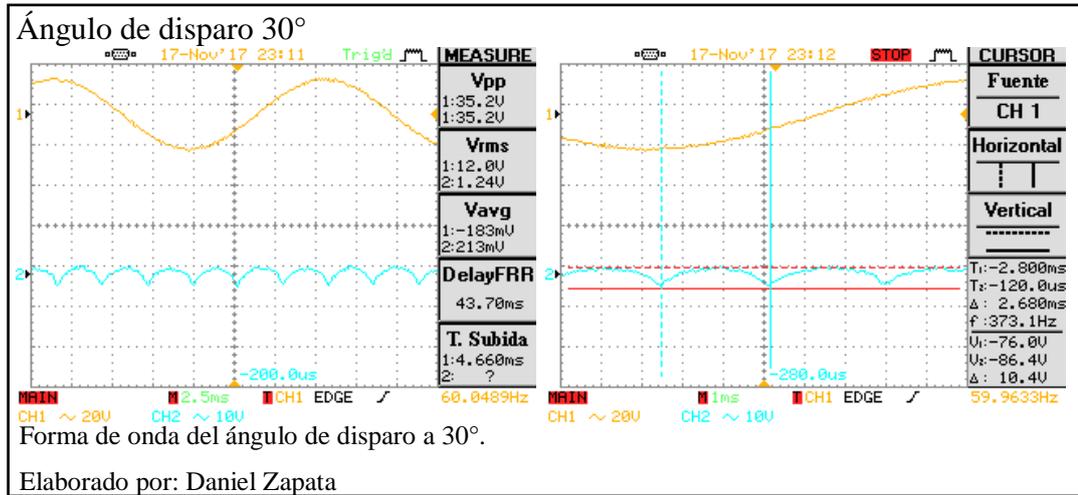


Ángulo de disparo a 120 grados.

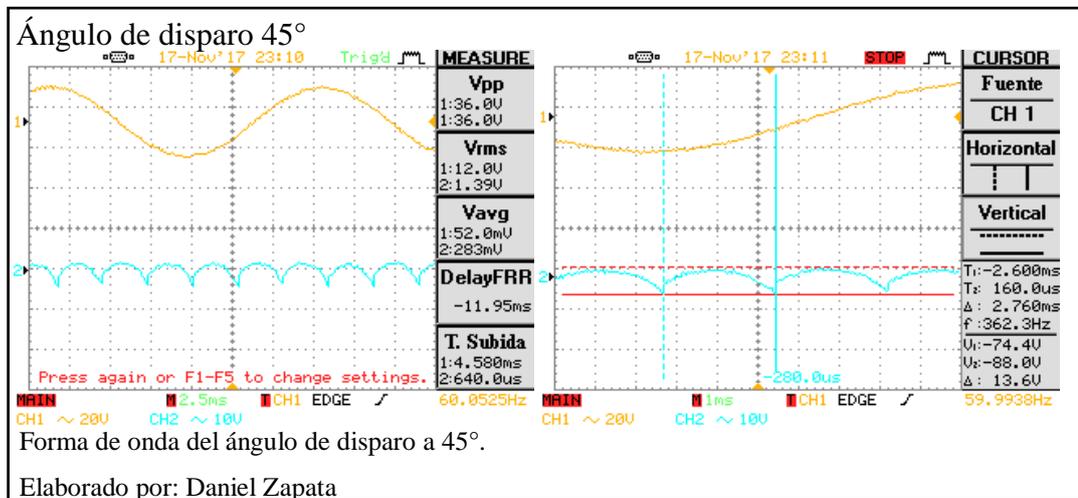


Anexo 21. Formas de onda del Rectificador trifásico totalmente controlado con carga resistiva - inductiva (Módulo K&H PE-5000)

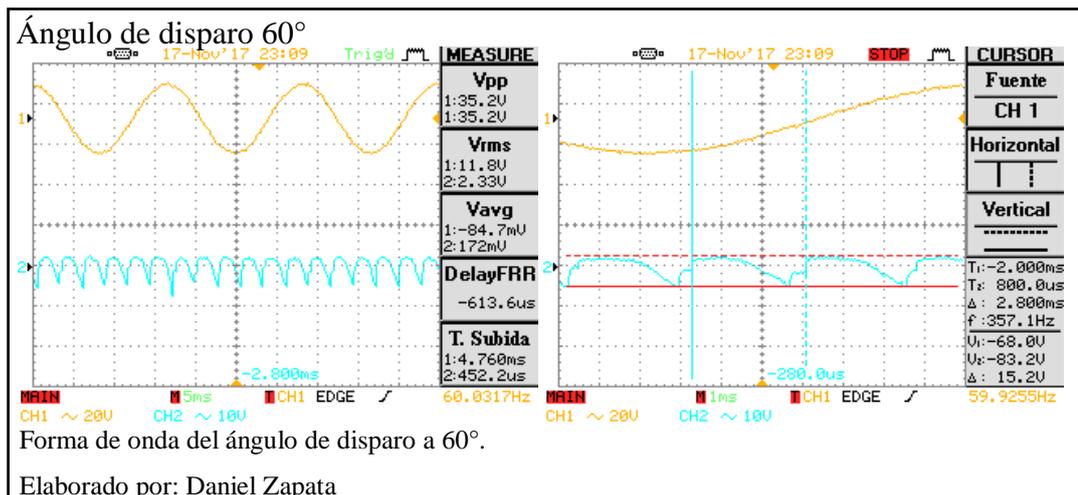
Ángulo de disparo a 30 grados.



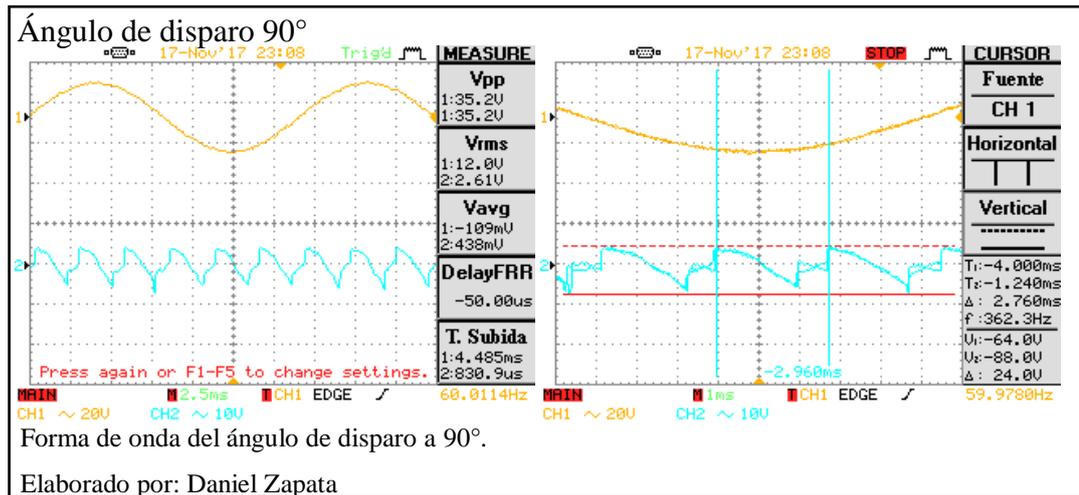
Ángulo de disparo a 45 grados.



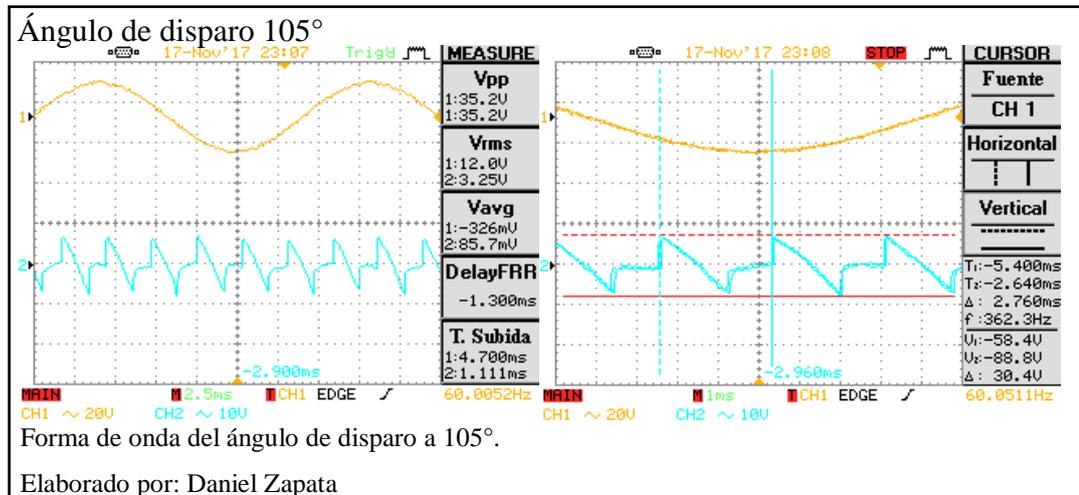
Ángulo de disparo a 60 grados.



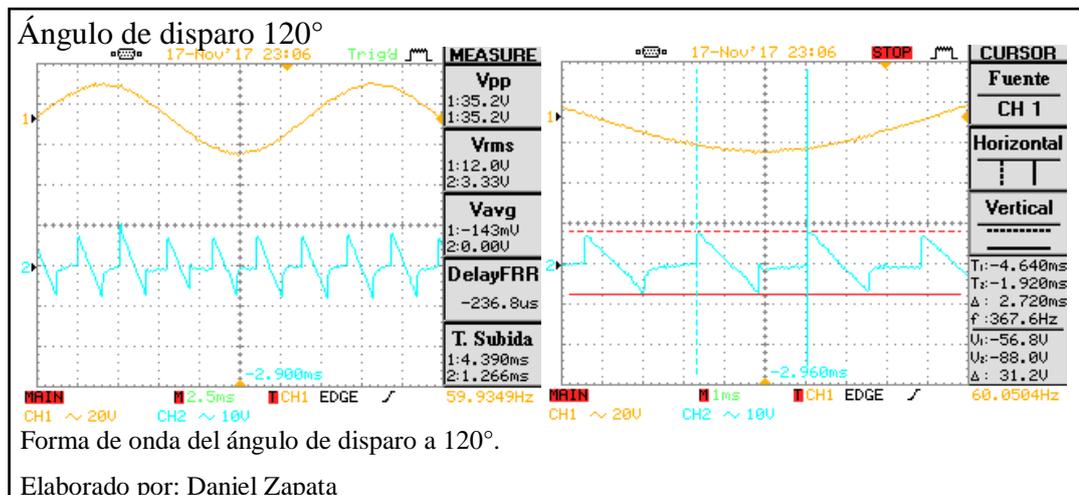
Ángulo de disparo a 90 grados.



Ángulo de disparo a 105 grados.



Ángulo de disparo a 120 grados.



Anexo.22 Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R, R+L y motor DC

Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R (Módulo Didáctico)

Los módulos utilizados para la conformación del rectificador trifásico totalmente controlado son, para la generación de la onda trifásica son el transformador de aislamiento PE-5340-3A, el juego de fusibles PE-5310-5B, el módulo del amplificador diferencial PE-5310-2B, y el módulo didáctico Rectificador Trifásico Totalmente controlado. Las formas de onda mostradas a continuación se visualizan en un osciloscopio GW INSTEK GDS-2102 tanto para el canal 1 como para el canal 2, se toma los siguientes ángulos de referencia: 0°, 30°, 60°, 90°.

A continuación, se muestra en la tabla siguiente, los valores de V_{rms} (Voltaje de valor eficaz), V_{pp} (Voltaje pico a pico) y V_r (Voltaje de rizado).

Tabla de datos del módulo didáctico (R).

	Ángulo de disparo (R+L)			
	0°	30°	60°	90°
V_{pp}	1.12 V	4.68 V	5.32 V	2.45 V
V_{rms}	235 V	188 V	146 V	8 V
V_r	2.26 V	3.32 V	4.03 V	2.40 V

Nota: Valores obtenidos de los voltajes del módulo didáctico (R).

Elaborado por: Daniel Zapata

Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R-L (Modulo Didáctico)

En el montaje del Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R-L, las formas de onda del diseño armado en el módulo didáctico se toman en base a los siguientes ángulos de referencia: 0°, 30°, 60°, 90°. A continuación, se muestra en la tabla siguiente de los valores de los voltajes y amplitud previamente requeridos.

Tabla de datos del módulo didáctico (R-L).

	Ángulo de disparo (R+L)			
	0°	30°	60°	90°
V_{pp}	1.12 V	4.68 V	5.32 V	2.45 V
V_{rms}	235 V	188 V	146 V	8 V
V_r	1.96 V	3.32 V	4 V	5.71 V

Nota: Valores obtenidos de los voltajes del módulo didáctico (R-L).

Elaborado por: Daniel Zapata

Rectificador trifásico totalmente controlado con motor DC (Módulo Didáctico)

Las formas de onda del diseño armado en el módulo didáctico con el motor DC, se toman en base los siguientes ángulos de referencia: 50°, 60°, 90°, cuyos valores se muestran en la siguiente tabla, ya que el voltaje soportado por el motor es de 180 V máximo, y en un ángulo de 50° obtenemos 180 V.

Tabla de datos del módulo didáctico (Motor DC).

	Ángulo de disparo (Motor)		
	50°	60°	90°
V_{pp}	3.02 V	2.20 V	2.55 V
V_{rms}	180V	156 V	90 V
V_r	2.87	4.04 V	2.56 V

Nota: Valores obtenidos de los voltajes del módulo didáctico (Motor DC).

Elaborado por: Daniel Zapata

Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R (Protoboard)

Los módulos utilizados para la conformación del rectificador trifásico totalmente controlado son para la generación de la onda trifásica, el transformador de aislamiento PE-5340-3A, el juego de fusibles PE-5310-5B, el módulo del amplificador diferencial PE-5310-2B y el protoboard cuyo armado se puede ver en el Anexo 9.

Se toma los siguientes ángulos de referencia: 0°, 30°, 60°, 90°. A continuación, se muestra en la siguiente tabla los valores previamente requeridos.

Tabla de datos del armado en protoboard (R).

	Ángulo de disparo (R)			
	0°	30°	60°	90°
V_{pp}	1.26 V	2.67 V	3.60	1.90 V
V_{rms}	232 V	181 V	118 V	12 V
V_r	1.86 V	3.02 V	4,07 V	3.71 V

Nota: Valores obtenidos de los voltajes del armado en protoboard (R-L).

Elaborado por: Daniel Zapata

Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R-L (Protoboard)

Tomando los siguientes ángulos de referencia: 0°, 30°, 60°, 90°. A continuación, se muestra en la siguiente tabla los valores previamente requeridos.

Tabla de datos del armado en protoboard (R-L).

	Ángulo de disparo (R+L)			
	0°	30°	60°	90°
V_{pp}	1.22 V	4.55 V	5.28 V	2.42 V
V_{rms}	232 V	179 V	138V	12 V
V_r	2.11 V	3.26 V	4.07 V	2.44 V

Nota: Valores obtenidos de los voltajes del armado en protoboard (R-L).

Elaborado por: Daniel Zapata

Rectificador trifásico totalmente controlado con motor DC (Protoboard)

Tomando los siguientes ángulos de referencia: 60°, 90°, 105°. A continuación, se muestra en la siguiente tabla de los valores previamente requeridos.

Tabla de datos del diseño en protoboard (Motor DC).

	Ángulo de disparo (Motor)		
	50°	60°	90°
V_{pp}	3.16 V	2.12 V	2.63 V
V_{rms}	180 V	148 V	94 V
V_r	3.08 V	3.94 V	2.62 V

Nota: Valores obtenidos de los voltajes del diseño en protoboard (Motor DC).

Elaborado por: Daniel Zapata

Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R (Modulo K&H PE-5000)

Los módulos utilizados para la conformación del rectificador trifásico totalmente controlado son para la generación de la onda trifásica son el transformador de aislamiento PE-5340-3A, el juego de fusibles PE-5310-5B, el módulo del amplificador diferencial PE-5310-2B y el módulo de control de ángulo trifásico PE-5310-2D, cuyo montaje se puede ver en las prácticas de laboratorio. Se toma los siguientes ángulos de referencia: 30°, 60°, 90°, 120°, valores que se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla de datos del módulo PE-5000 (R).

	Ángulo de disparo (R)			
	30°	60°	90°	120°
V_{pp}	1.38 V	2.76 V	3.71 V	1.95 V
V_{rms}	234 V	195 V	104 V	20 V
V_r	2.08 V	2.80 V	4.08 V	3.68 V

Nota: Valores obtenidos de los voltajes del módulo PE-5000 (R).

Elaborado por: Daniel Zapata

Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R-L (K&H PE-5000)

El montaje del Rectificador trifásico totalmente controlado con carga R-L se puede ver en las guías de prácticas de laboratorio, las formas de onda del diseño armado en el módulo didáctico, se toman en base a los siguientes ángulos de referencia: 30°, 60°, 90°, 120°, cuyos valores se muestra en la siguiente tabla.

Tabla de datos del módulo PE-5000 (R-L).

	Ángulo de disparo (R+L)			
	30°	60°	90°	120°
V_{pp}	1.04 V	4.60 V	5.20 V	2.48 V
V_{rms}	234 V	194 V	141 V	11 V
V_r	2.32 V	3.20 V	4.16 V	2.32 V

Nota: Valores obtenidos de los voltajes del módulo PE-5000 (R-L).

Elaborado por: Daniel Zapata.

Rectificador trifásico totalmente controlado con motor DC (K&H PE-5000)

Los datos medidos del diseño armado en el módulo didáctico con el motor DC (montaje en las practicas del laboratorio), se pueden ver a continuación, se toma los siguientes ángulos de referencia: 80, 90°, 105°, cuyos valores se muestra en la siguiente tabla.

Tabla de datos del módulo PE-5000 (Motor DC).

	Ángulo de disparo (Motor)		
	80°	90°	120°
V_{pp}	3.62 V	2.24 V	2.64 V
V_{rms}	180 V	150 V	100 V
V_r	2.96 V	4.16 V	2.48 V

Nota: Valores obtenidos de los voltajes del módulo PE-5000 (Motor DC).

Elaborado por: Daniel Zapata

Anexo 23. Práctica del laboratorio “Rectificador trifásico de onda completa totalmente controlado”

Rectificador trifásico de onda completa totalmente controlado

Objetivo Principal:

El objetivo principal es conocer de cerca el funcionamiento de un rectificador trifásico totalmente controlado y su implementación en un protoboard de manera didáctica, simplificando materiales, costos y estructura electrónica.

Objetivos específicos:

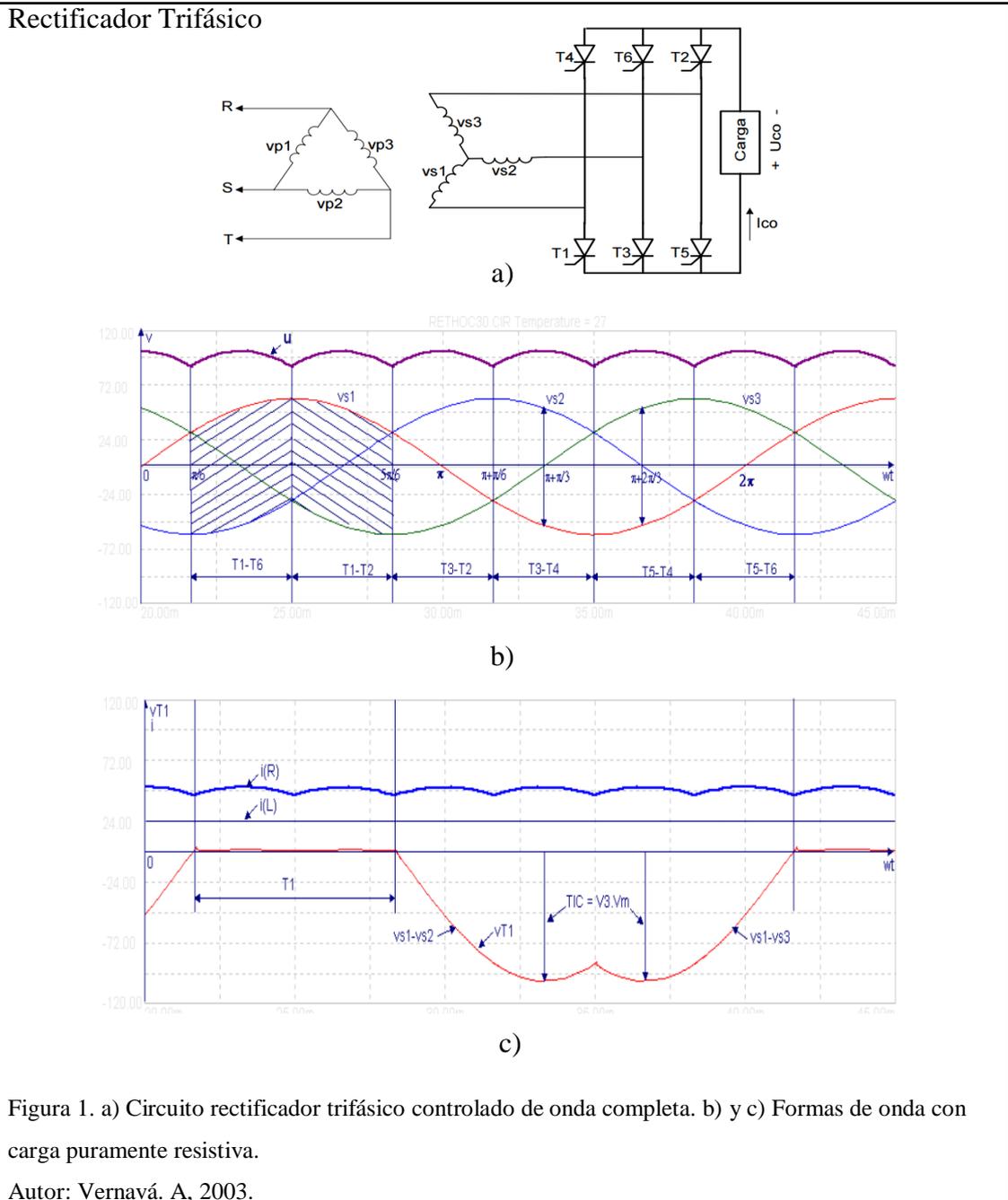
- a) Analizar el funcionamiento, características y principio de funcionamiento de un rectificador trifásico completamente controlado.
- b) Caracterizar del módulo de Rectificación Trifásica Controlada
- c) Medir los valores de voltaje y de corriente de un rectificador trifásico de onda completa totalmente controlado de acuerdo al ángulo de disparo indicado.
- d) Visualizar las formas de onda respectivas para carga RL, resistiva pura y con un motor DC.

Discusión:

La distribución de corriente eléctrica esencialmente es de forma alterna, debido a su facilidad de adaptación a los transformadores, sin embargo, muchas aplicaciones requieren de energía continua para su funcionamiento. Un rectificador es un sistema de conversión de energía eléctrica alterna a energía eléctrica continua, estos se dividen de acuerdo al número de fases que utilizamos y también al tipo de conexión de los elementos (media onda y de onda completa). (Rojas. C, Garcia. M, Rivero. W, 2012)

La construcción de un circuito rectificador trifásico de onda completa totalmente controlado (RTC) es similar a la de un rectificador trifásico de diodo de onda completa con la única diferencia que, en vez de utilizar 6 diodos para su rectificación, utilizamos tiristores de potencia. Al cambiar el ángulo de disparo en los tiristores, el voltaje de salida promedio puede variar. Al comparar el rectificador trifásico controlado de onda completa con un rectificador monofásico controlador de onda completa, el primero puede generar un voltaje dc más uniforme y generar una potencia más alta a la carga. (K&H,2009)

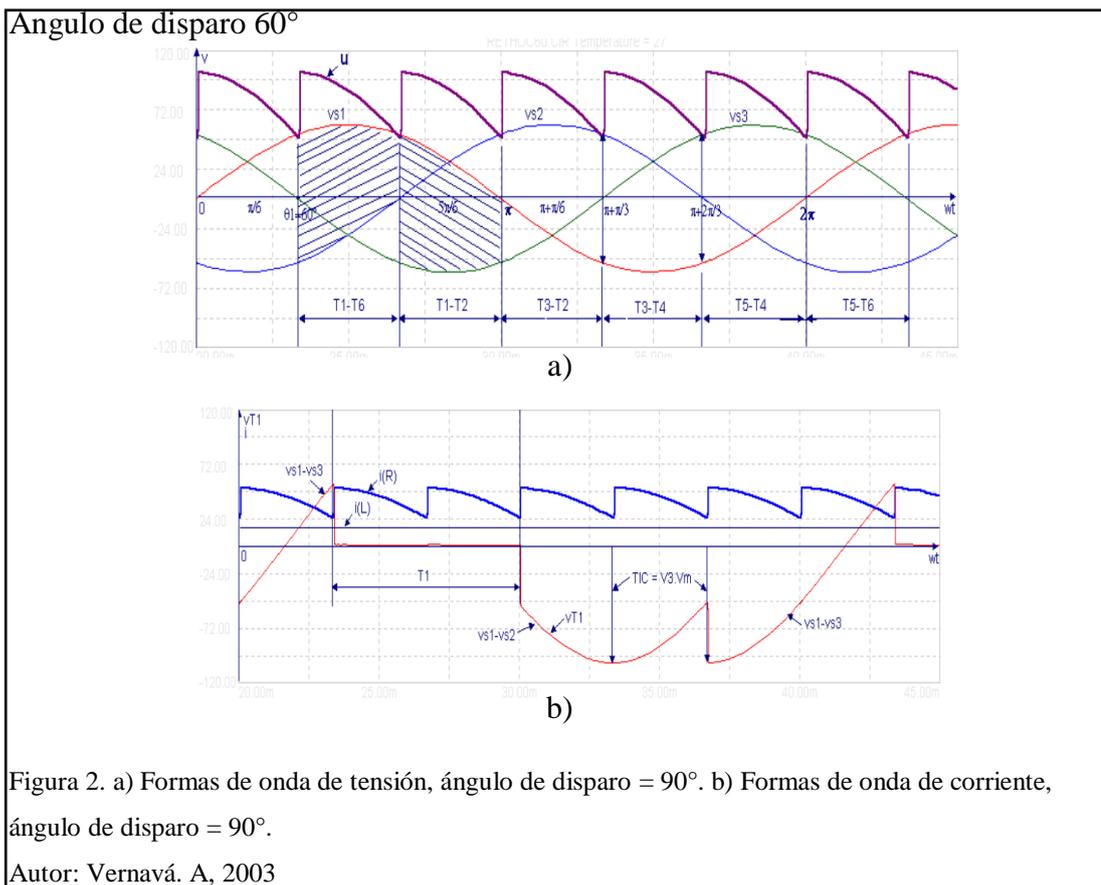
La figura 1.a, muestra el circuito de un rectificador trifásico de onda completa totalmente controlado y en la figura 1.b, las formas de onda, con carga puramente resistiva, también se muestran los voltajes de cada una de las fases (fuente trifásica) en secuencia, en consecuencia, tenemos un desfase de 120° entre V_{s2} y V_{s1} , y V_{s3} se desfasa en 120° con respecto al V_{s1} . (Vernavá. A, 2003).



La fuente trifásica provee las tensiones secundarias de cada fase, pero la tensión rectificadora que se genera en la carga está compuesta por dos fases en consecuencia para que exista corriente a través de la carga, dos tiristores de distintas fases conduzcan al mismo tiempo, la señal de disparo del RTC debe ser de pulso continuo, cuando el

ángulo de disparo α es menor o igual que 30° , este circuito se comporta como un rectificador de diodo trifásico de onda completa ya que no puede variarse el voltaje de salida, caso contrario el disparo del ángulo entre 30° y 180° es el comportamiento normal de un rectificador trifásico de onda completa totalmente, cada uno de los tiristores comienzan a conducir en $\alpha=30^\circ$ respecto a su tensión de fase y semiciclo de conducción entonces la señal de disparo de cada tiristor debe extenderse a 60° contrariamente, cualquier tiristor podría dispararse y conducir en cualquier instante y sin generar ninguna corriente de carga alguna. Los tiristores T1; T3 y T5 conducen con los semiciclos positivos de las respectivas tensiones v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} mientras que los tiristores T2; T6 y T4 lo hacen con los semiciclos negativos de dichas tensiones. (Vernavá. A, 2003).

En la figura 2 se muestran las ondas correspondientes para el ángulo de disparo de $\theta=60^\circ$, se puede observar el cambio que se efectuó en la tensión de salida rectificada (u) y el desplazamiento del periodo de conducción de los tiristores. El periodo sigue siendo de 120° para cada tiristor y en caso de carga resistiva pura, la corriente no llega a cero en ningún punto. (Vernavá. A, 2003).



De acuerdo a las definiciones de los símbolos de los experimentos anteriores el valor promedio y de rms del voltaje de salida se expresan como:

$$V_{0(av)} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} \sqrt{3V_{P(max)} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})} d(\omega t) \quad \text{Ec.1}$$

$$V_{0(rms)} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} \sqrt{[3V_{P(max)} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})]^2} d(\omega t) \quad \text{Ec.2}$$

En las ecuaciones 1 y 2, el voltaje V_{S1} esta retrasado en $\pi/6$ (30°) con respecto a V_{S1S2} . El voltaje $V_{0(av)}$ es igual al voltaje del rectificador de diodo trifásico de onda completa cuando $\alpha = 30^\circ$. (K&H, 2009).

EQUIPOS Y ELEMENTOS REQUERIDOS.

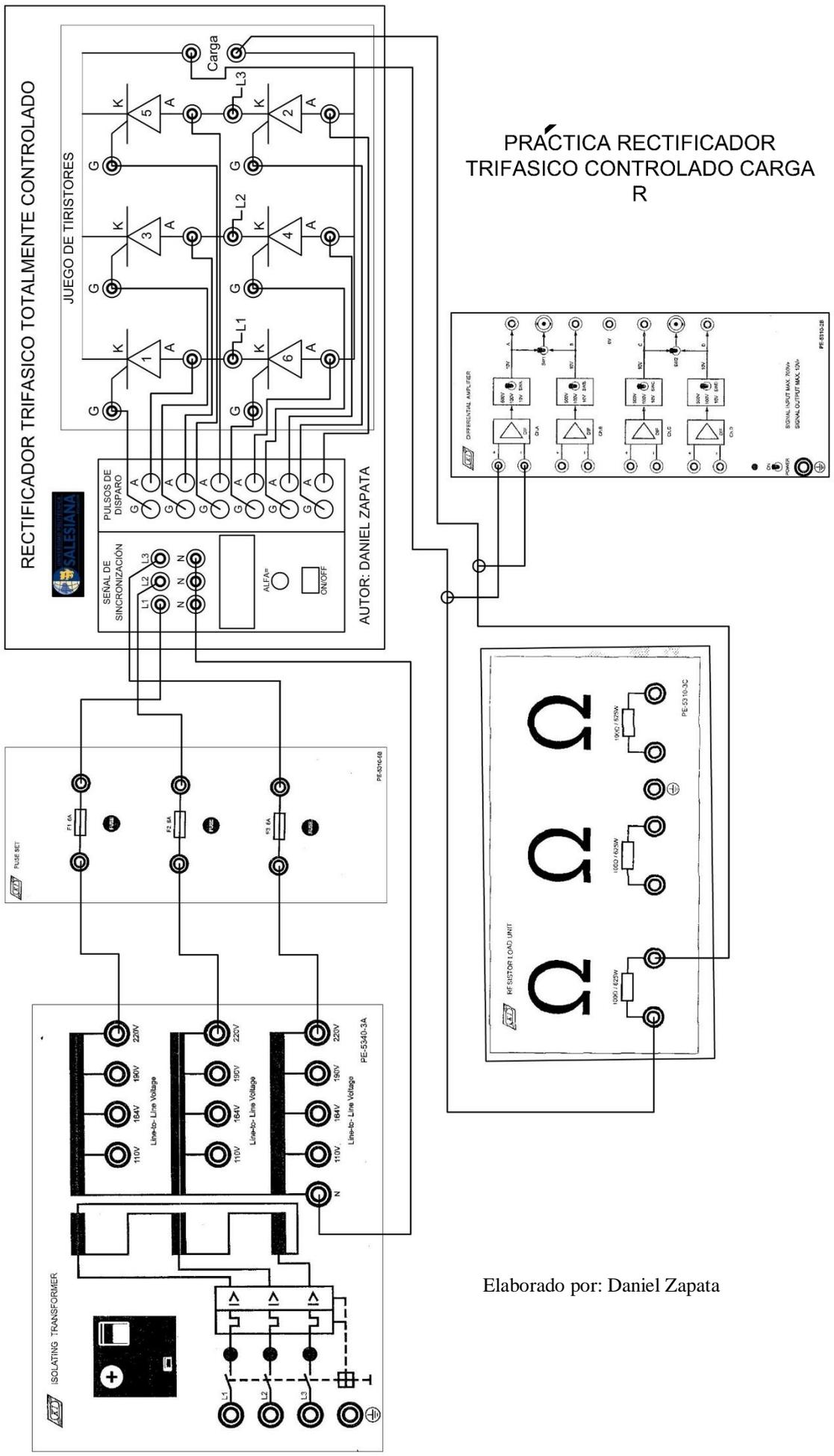
- Transformador de aislamiento x 1 (PE-5340-3A)
- Juego de Fusibles x 1 (PE-5310-5B)
- Amplificador Diferencial x 1 (PE-5310-2B)
- Unidad de carga resistiva x 1 (PE-5310-3C)
- Unidad de carga inductiva x 1 (PE-5310-3E)
- Motor DC de maquina permanente (EM-3330-1A)
- Módulo de control de ángulo de disparo trifásico y tiristores x 1
- Osciloscopio x 1
- Cables de conexión y enchufes
- Multímetro

PROCEDIMIENTO

- a. Coloque los módulos de: Rectificador Trifásico totalmente controlado, PE-5310-3E, y osciloscopio sobre la mesa de trabajo, y los módulos PE-5310-5B, PE-5310-2B en el marco del módulo experimental. Complete las conexiones refiriéndose al diagrama de cableado mostrado en la figura siguiente, usando los cables de conexión.
- b. El rectificador que vamos a armar funciona desde un 220V trifásico de cuatro cables (voltaje de fase = 127V), el circuito de cargas es una resistencia de $100\Omega/625W$. Luego de las conexiones del diagrama, encender primero el

módulo didáctico Rectificador Trifásico Totalmente Controlado, seguido del breaker en el transformador de aislamiento PE-5340-3A, entonces con la perilla de control de ángulo variar el ángulo de disparo desde 180° a 0° . Con el multímetro medir el voltaje rms aplicado a la carga.

PRÁCTICA RECTIFICADOR TRIFASICO CONTROLADO CARGA R



Elaborado por: Daniel Zapata

- c. Completar las tablas y las formas de onda que se presentan a continuación con los datos que se pueden obtener para los ángulos 30° , 60° , 90° , 120° . En el presente experimento. Incluya magnitudes y escalas correspondientes en los gráficos.

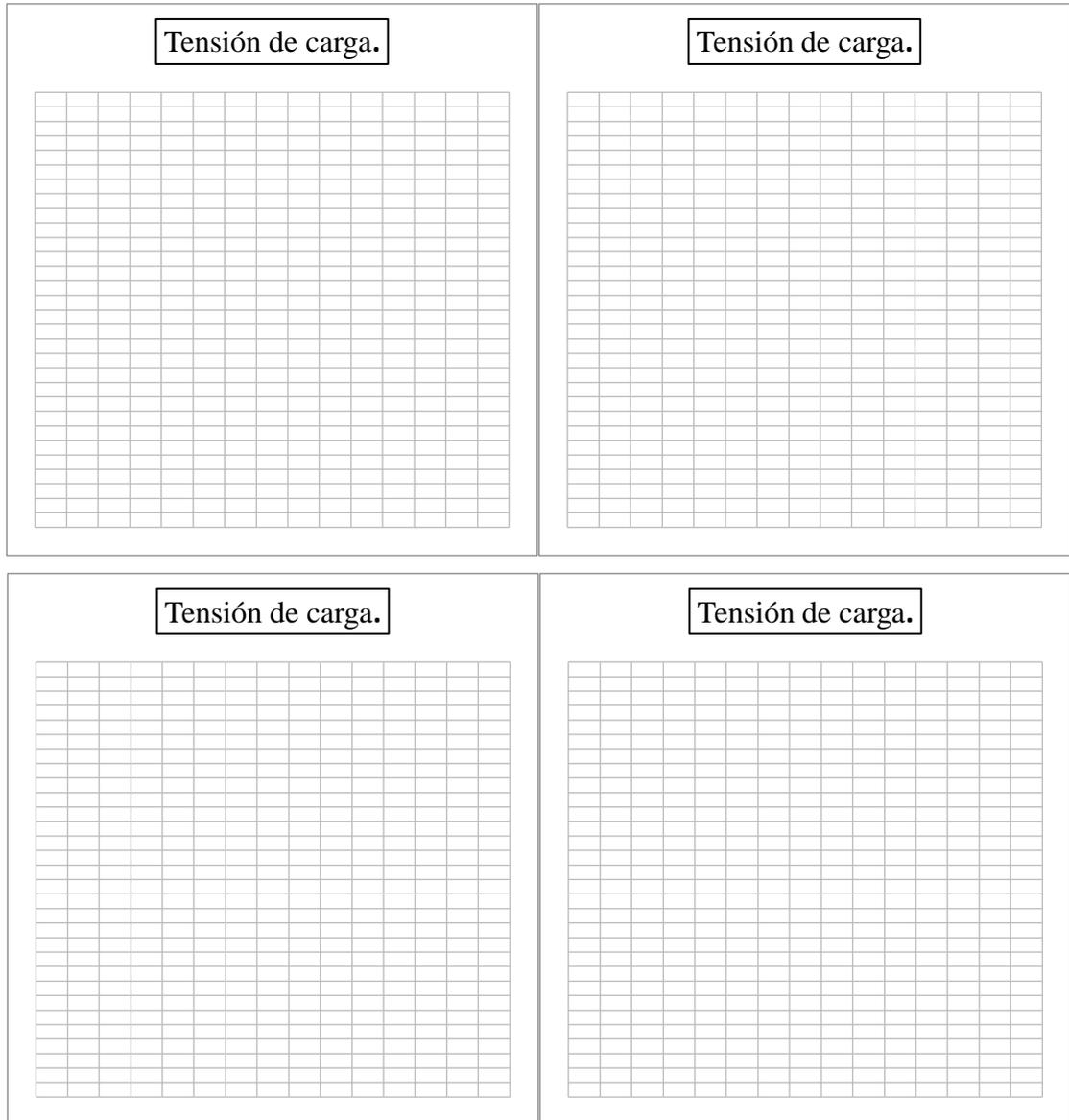
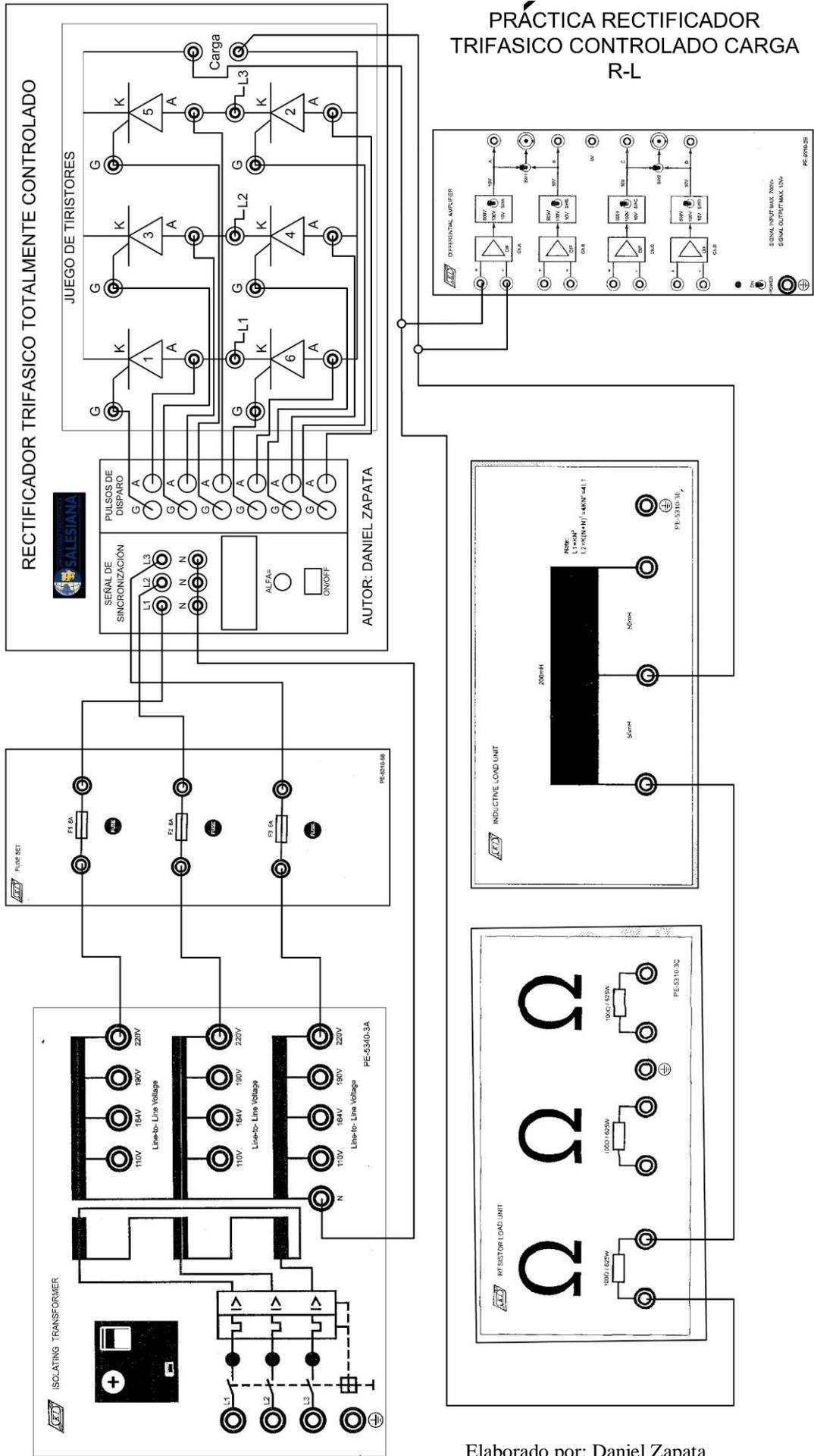


Gráfico 1: Voltaje de salida aplicada a la carga.

	Ángulos de disparo (R)			
	30°	60°	90°	120°
V_{PP}				
V_{RMS}				
V_R				

- d. Repetimos el mismo procedimiento de 1 y 2, añadiendo el módulo PE-5310-3E. Complete las conexiones refiriéndose al diagrama de cableado mostrado en la figura siguiente, usando los cables de conexión.
- e. El rectificador que vamos a armar funciona desde un 220V trifásico de cuatro cables (voltaje de fase = 127V), el circuito de cargas es una resistencia de $100\Omega/625W$ conectadas en serie con un inductor de 200mH. Luego de las conexiones del diagrama, encender primero el módulo didáctico Rectificador Trifásico Totalmente Controlado, seguido del transformador de aislamiento PE-5340-3A, entonces con la perilla de control de ángulo variar el ángulo de disparo desde 180° a 0° .

PRÁCTICA RECTIFICADOR TRIFASICO CONTROLADO CARGA R-L



Elaborado por: Daniel Zapata

- f. Completar las tablas y las formas de onda que se presentan a continuación con los datos que se pueden obtener para los ángulos 30° , 60° , 90° , 120° . En el presente experimento. Incluya magnitudes y escalas correspondientes en los gráficos.

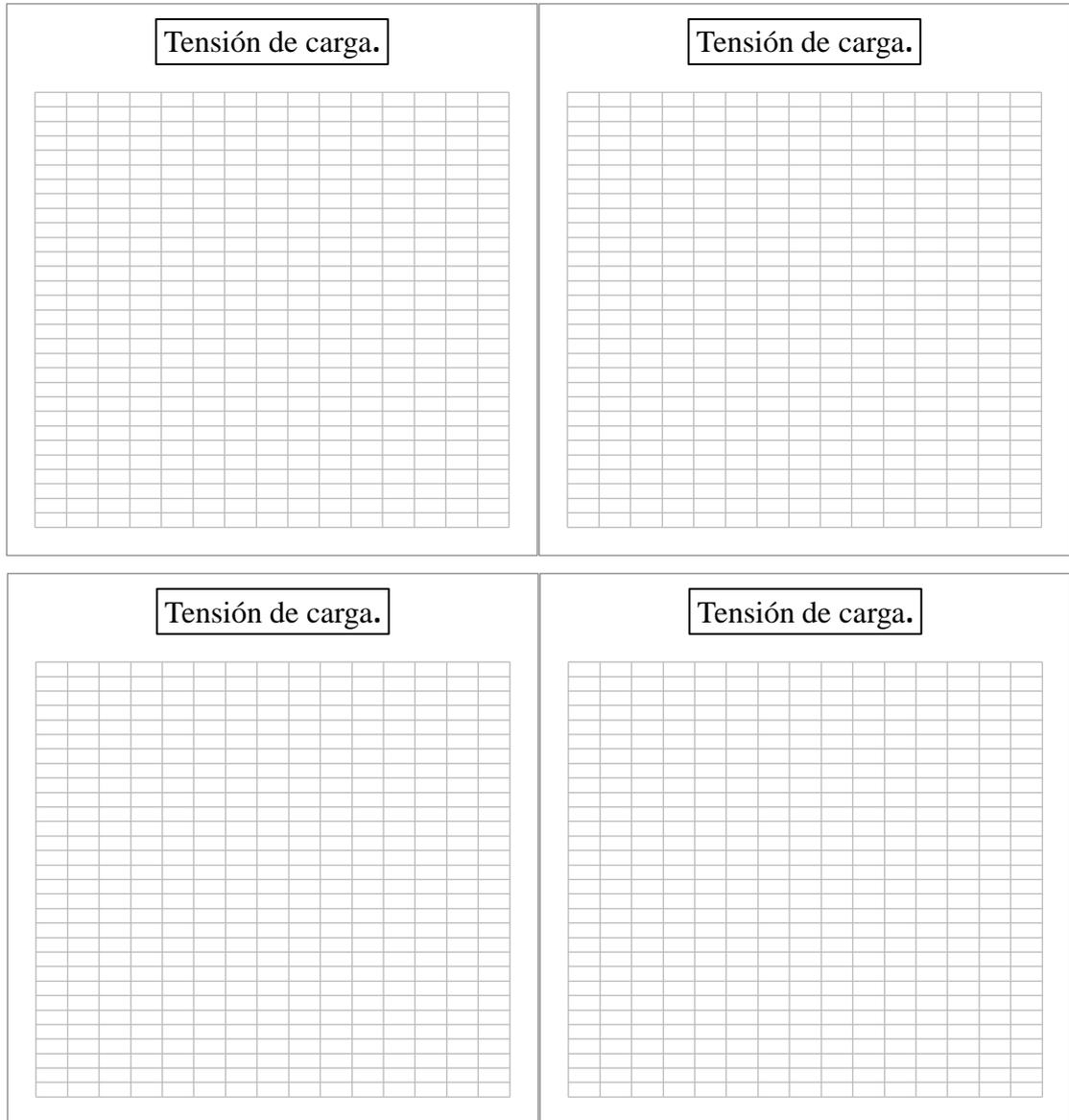


Gráfico 2: Voltaje de salida aplicada a la carga.

	Ángulos de disparo (R-L)			
	30°	60°	90°	120°
V_{PP}				
V_{RMS}				
V_R				

- g. Repetimos el mismo procedimiento de 1 y 2, reemplazando los módulos PE-5310-3C y PE-5310-3E por el motor DC EM-3330-1A. Complete las conexiones refiriéndose al diagrama de cableado mostrado en la figura siguiente, usando los cables de conexión.
- h. El rectificador que vamos a armar funciona desde un 220V trifásico de cuatro cables (voltaje de fase = 127V), el circuito de cargas es un motor DC de 180 Vdc, 2.7 A. Luego de las conexiones del diagrama, encender primero el módulo didáctico Rectificador Trifásico Totalmente Controlado, seguido del transformador de aislamiento PE-5340-3A, entonces con la perilla de control de ángulo variar el ángulo de disparo desde 180° a 50° .

- i. Completar las tablas y las formas de onda que se presentan a continuación con los datos que se pueden obtener para los ángulos 60° , 90° , 105° . En el presente experimento. Incluya magnitudes y escalas correspondientes en los gráficos.

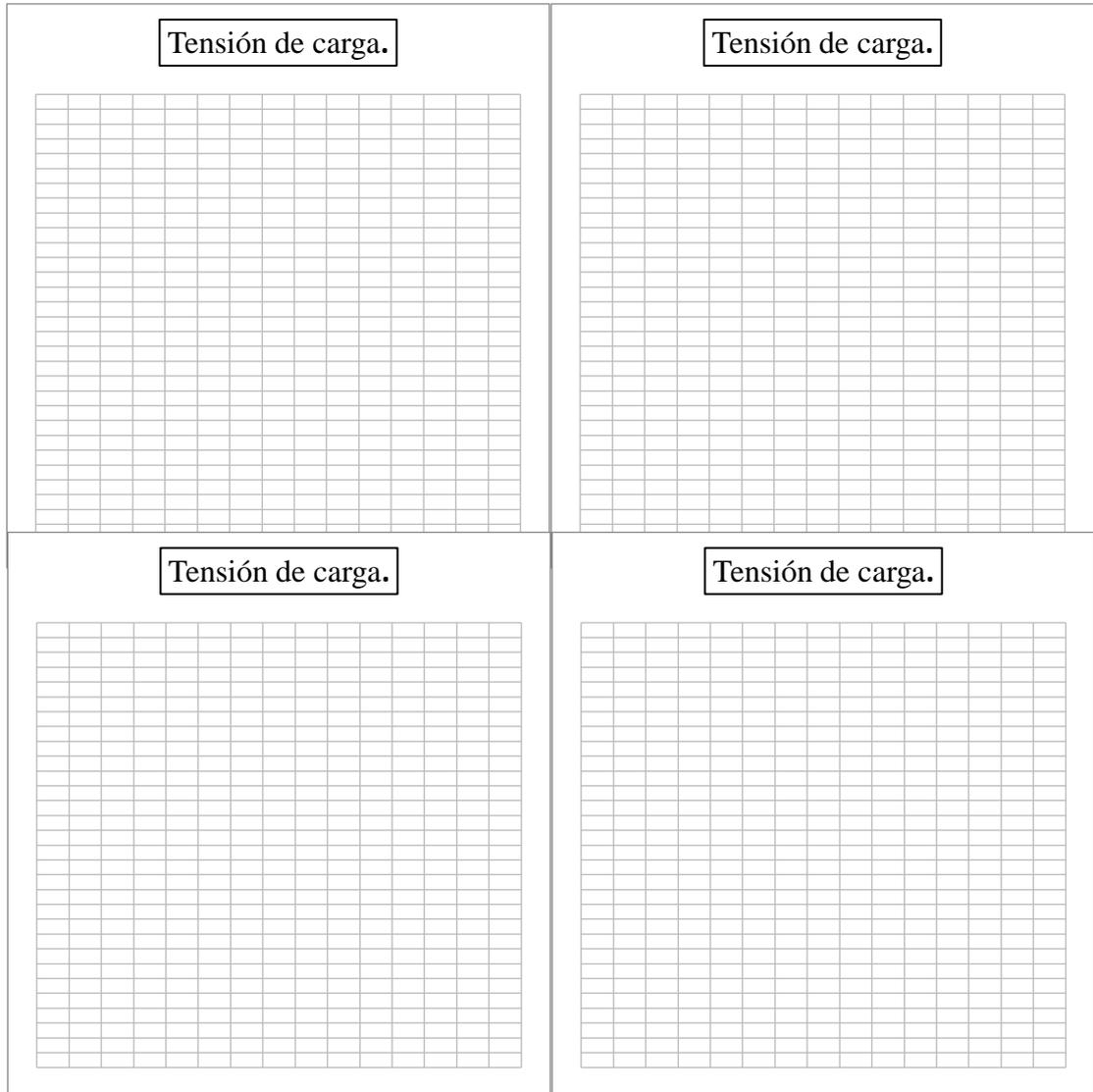


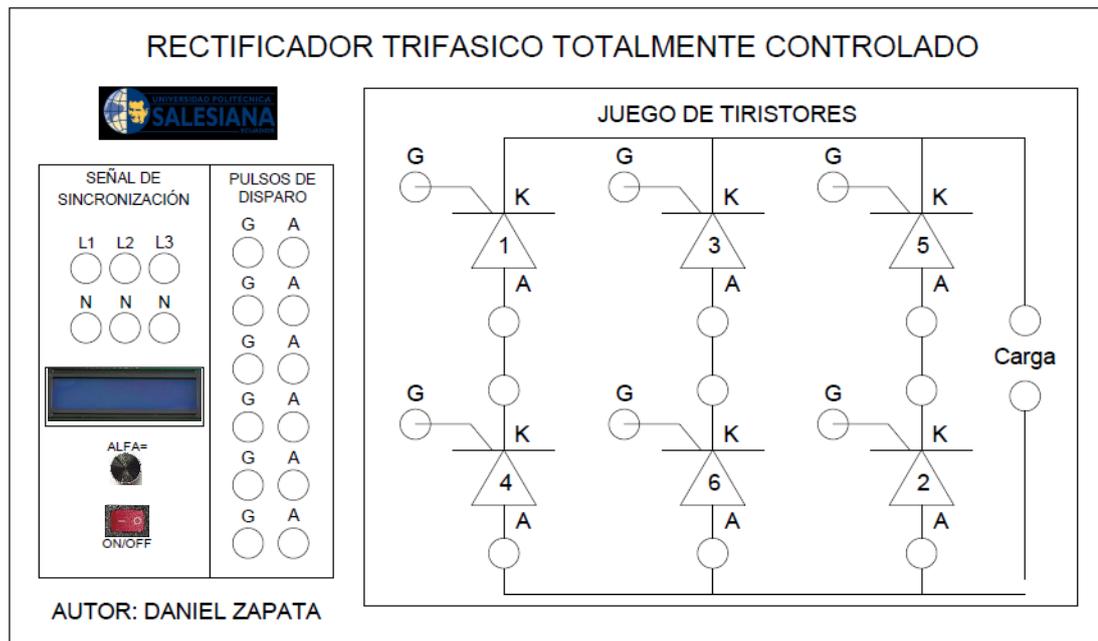
Gráfico 3: Voltaje de salida aplicada a la carga.

	Ángulos de disparo (Motor DC)		
	60°	90°	105°
V_{PP}			
V_{RMS}			
V_R			

Análisis de resultados.

- ¿Por qué los disparos hacia los tiristores deben estar con un desfase de 30 grados por cada disparo?
- ¿En la gráfica dibujada en un ángulo de 60° , la frecuencia de ondulación es igual a la frecuencia de los 6 disparos hacia los tiristores mostrados en la graficas? ¿Porque?
- ¿A qué se debe que las gráficas en distintos ángulos generan disparos a destiempo?
- ¿Porque en las pruebas con el motor DC de imanes permanentes, se debe limitar a un ángulo determinado su incremento? ¿Cuál es el ángulo?
- ¿Cuáles son las desventajas de realizar un circuito de potencia en un protoboard?
- Ponga cuatro conclusiones y cuatro recomendaciones.

Anexo 24. Manual de funcionamiento del Módulo didáctico: Rectificador Trifásico totalmente controlado



INTRODUCCIÓN

El Módulo didáctico: Rectificador Trifásico Totalmente Controlado es una guía para que el estudiante del laboratorio de Electrónica de Potencia pueda afianzar sus conocimientos en la materia de Electrónica de Potencia y pueda trabajar en ella, demostrando los resultados que se obtienen probando el módulo físico, y también la realización del mismo a través de un protoboard.

Basado en microcontroladores ATMEGA y diseñado para poder armarse en un protoboard, con un rango de funcionamiento que va desde los 0V hasta los 232V aplicados a la carga y con un control de ángulo de disparo desde los 0 grados hasta los 180 grados, en cargas resistivas y cargas resistivas-inductivas, para el funcionamiento con el motor DC tiene un rango de funcionamiento de 0V hasta los 180V aplicados a la carga y con un control de ángulo de disparo desde los 50 grados hasta los 105 grados.

Utilizando elementos que fácilmente se encuentran en el medio a costos accesibles para los estudiantes, reduciendo de manera drástica el uso de elementos electrónicos, y diseñado para que los estudiantes puedan armarlo en un protoboard de una manera rápida, útil y didáctica, en este manual se detalla de que está compuesto el módulo didáctico, así como las recomendaciones, el uso y el mantenimiento que se lo deba dar para mantener la operatividad apropiada. El módulo funciona a 110v.

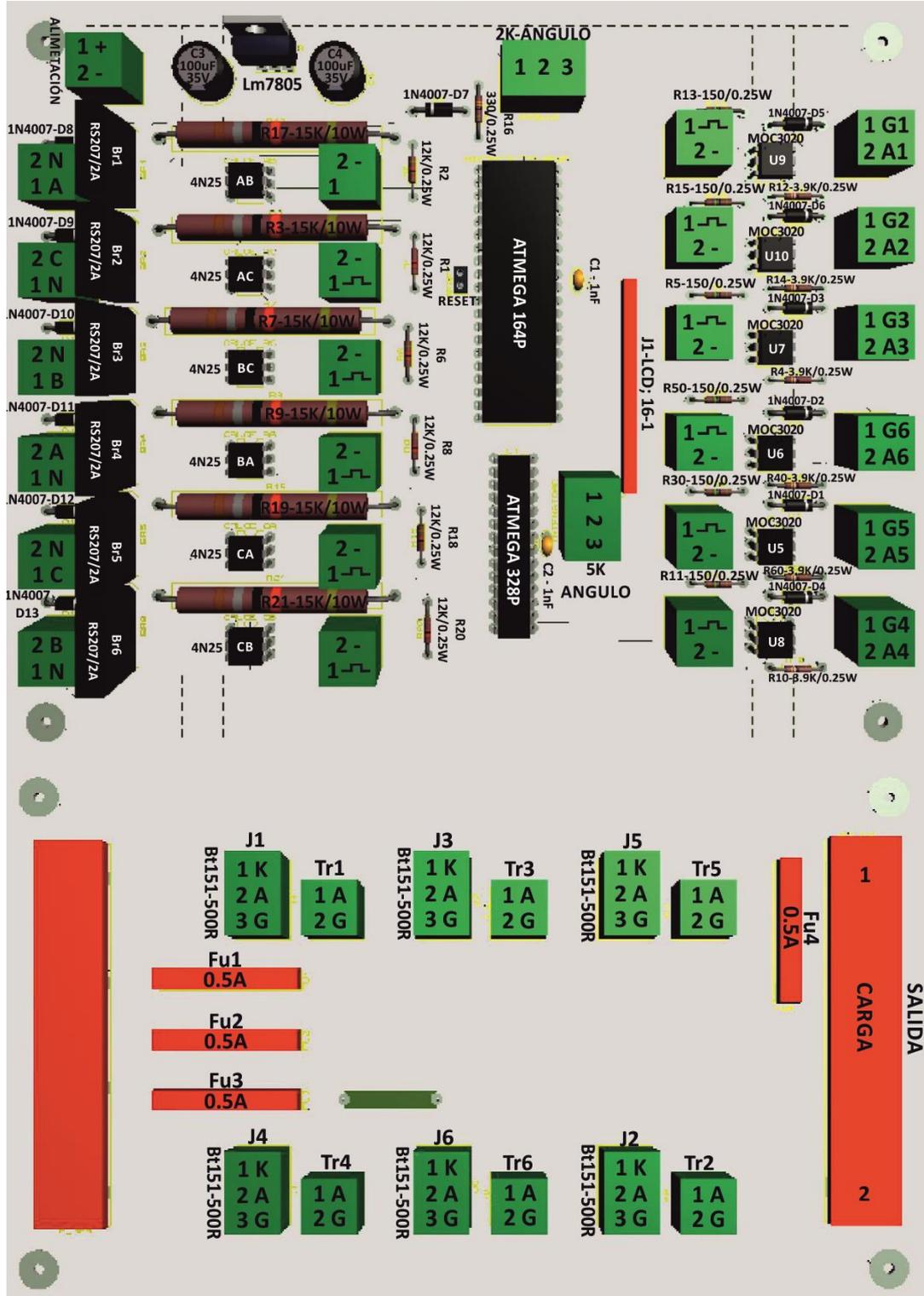
Elementos del Módulo Didáctico

Los elementos electrónicos que se utilizaron para la conformación del módulo de didáctico son los siguientes:

Fusibles 0.5A	Fu1,Fu2,Fu3,Fu4
Diodos 1N4007/35V	D1 – D13
Puentes de Diodos 3A	Br1 – Br6
Switch on/off	
Condensadores 100 uF/35V	C3,C4
Condensadores 1nF/50V	C1, C2
Resistencias variadas	R1, R2, R4, R5, R6, R8, R10, R11, R12, R13 R14, R15, R16, R18, R20, R30, R40, R50, R60
Potenciómetros 5 y 10 k	Ángulo, Intensidad
LCD 16*2	J1
Optoacopladores MOC3020	U5 – U10
LM7805	Regulador
Optoacopladores 4N25	AB, AC, BC, BA, CA, CB
Fuente de 110-5V	
Resistencias cerámicas 15W	R17, R3, R7, R9, R19, R21
Tiristores BT151 500R	J1, J3, J5, J4, J6, J2
Microcontrolador ATMEGA164P	Microcontrolador
Microcontrolador ATMEGA328P	U1

ESQUEMA INTERNO DE LA PLACA DE CONTROL Y POTENCIA

En la siguiente imagen se puede observar los elementos que conforman la placa y la distribución en la misma, este esquema está diseñado como una herramienta de utilidad en caso de alguna avería o reemplazo de elementos.



Elaborado por: Daniel Zapata

Anexo 25. Código de programación. ATMEL-STUDIO 7

ATMEGA 164P

Lcd.c.

```
/*
 * lcd.c
 *
 * Created: 11/03/2015 22:01:11
 * Author:JIP
 */

#include "lcd.h"

/**
***
// Ejecuta la inicialización software completa del LCD. La configuración es
// de: interface de 4 bits, despliegue de 2 líneas y caracteres de 5x7 puntos.
//*****
***

void lcd_init(void)
{
    /* Configurar las direcciones de los pines de interface del LCD */
    lcd_DATAAddr |= 0xF0;
    lcd_CTRLddr |= (1<<lcd_E)|(1<<lcd_RW)|(1<<lcd_RS);

    /* Secuencia de inicialización del LCD en modo de 4 bits*/
    lcd_CTRLout &= ~((1<<lcd_E)|(1<<lcd_RW)|(1<<lcd_RS));
    ldelay_ms(45);    // > 40 ms
    lcd_nibble(0x30); // Function Set: 8-bit
    ldelay_ms(5);    // > 4.1 ms
    lcd_nibble(0x30); // Function Set: 8-bit
    ldelay_ms(1);    // > 100 µs
    lcd_nibble(0x30); // Function Set: 8-bit
    ldelay_ms(1);    // > 40 µs
    lcd_nibble(0x20); // Function Set: 4-bit
    ldelay_ms(1);    // > 40 µs
    lcd_nibble(0x20); // Function Set: 4-bit, 2lines, 4x7font
    lcd_nibble(0x80); //

```

```

    lcd_write(0x0C, 0); // Display ON/OFF Control: Display on, Cursor off, Blink off
    lcd_write(0x01, 0); // Clear Display
    lcd_write(0x06, 0); // Entry Mode Set
}

/**
***

// Escribe una instrucción en el LCD:
// Si RS = 0 la instrucción es de comando (Function Set, Entry Mode set, etc).
// Si RS = 1 la instrucción es de dato y va a la DDRAM o CGRAM.
/**
***

void lcd_write(char inst, char RS)
{
    while(lcd_read(0)&0x80); // Esperar mientras LCD esté ocupado
    if(RS)
        lcd_CTRLout |= (1<<lcd_RS); // Para escribir en DDRAM o CGRAM
    else
        lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_RS); // Para escribir en Registro de Comandos
    delay_us(5); // Permite actualizar el Puntero de RAM
    lcd_nibble(inst); // Enviar nibble alto
    lcd_nibble(inst<<4); // Enviar nibble bajo
}

/**
***

// Envía el nibble alto de 'nibble' al LCD.
/**
***

void lcd_nibble(char nibble)
{
    lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_RW); // Establecer Modo de escritura
    lcd_DATAAddr |= 0xF0; // Hacer nibble alto de bus de datos salida
    lcd_DATAout = (nibble&0xF0)|(lcd_DATAout&0x0F); // Colocar dato
    delay_us(2); // tAS, set-up time > 140 ns
    lcd_CTRLout |= (1<<lcd_E); // Pulso de Enable
    delay_us(2); // Enable pulse width > 450 ns
    lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_E); //
    lcd_DATAAddr &= 0x0F; // Hacer nibble alto entrada
}

```

```

}

//*****
***

// Lee un byte de dato del LCD.
// Si RS = 1 se lee la locación de DDRAM o CGRAM direccionada actualmente.
// Si RS = 0 se lee el 'bit de Busy Flag' + el 'Puntero de RAM'.
//*****
***

char lcd_read(char RS)
{
    char high, low;
    if(RS)
        lcd_CTRLout |= (1<<lcd_RS); // Para leer de DDRAM o CGRAM
    else
        lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_RS); // Para leer Busy Flag + Puntero de RAM
    lcd_CTRLout |= (1<<lcd_RW); // Establecer Modo Lectura
    lcd_DATAAddr &= 0x0F; // Hacer nibble alto entrada
    delay_us(2); // tAS, set-up time > 140 ns
    lcd_CTRLout |= (1<<lcd_E); // Habilitar LCD
    delay_us(2); // Data Delay Time > 1320 ns
    high = lcd_DATAin; // Leer nibble alto
    lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_E); // Para que el LCD prepare el nibble bajo
    delay_us(2); // Enable cycle time > 1200 ns
    lcd_CTRLout |= (1<<lcd_E); // Habilitar LCD
    delay_us(2); // Data Delay Time > 1320 ns
    low = lcd_DATAin; // Leer nibble bajo
    lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_E); //
    return (high&0xF0)|(low>>4); // Juntar nibbles leídos
}

//*****
***

// Envían cadenas RAM terminadas en nulo al LCD.
//*****
***

void lcd_puts(char * s)
{
    unsigned char c, i=0;

```

```

while(c = s[i++])
    lcd_write(c, 1);    // Instrucción 'Write Data to DDRAM/CGRAM'
}

//*****
***

// Envían cadenas desde la flash al LCD.
//*****
***

void lcd_puts_pgm(char *s)
{
    unsigned char c,i=0;
    while ((c=pgm_read_byte(&s[i++])))
    {
        lcd_write(c,1);
    }
}

//*****
***

// Ubica el cursor del LCD en la columna c de la línea r.
//*****
***

void lcd_gotoxc(char r, char c)
{
    if(r==1) r = LCD_LINE1;
    else    r = LCD_LINE2;
    lcd_write(r+c-1, 0);    // Instrucción 'Set DDRAM Address'
}

//*****
***

// Limpia la pantalla del LCD y regresa el cursor a la primera posición
// de la línea 1.
//*****
***

void lcd_clear(void)
{
    lcd_write(LCD_CLEAR, 0); // Instrucción 'Clear Display'
}

```

```

}

//*****
***

// Envían instrucciones de comando y de datos al LCD.
//*****
***

void lcd_cmd(char com)
{
    lcd_write(com, 0);    // Cualquier instrucción de comando
}

void lcd_data(char dat)
{
    lcd_write(dat, 1);    // Instrucción 'Write Data to DDRAM/CGRAM'
}

//*****
***

// Genera un delay de n milisegundos
//*****
***

void ldelay_ms(unsigned char n)
{
    while(n--)
        delay_us(1000);
}

```

Lcd.c

```

/*
 * lcd.c
 *
 * Created: 11/03/2015 22:01:11
 * Author: JIP
 */

#include "lcd.h"

```

```

//*****
***

// Ejecuta la inicialización software completa del LCD. La configuración es
// de: interface de 4 bits, despliegue de 2 líneas y caracteres de 5x7 puntos.
//*****
***

void lcd_init(void)
{
    /* Configurar las direcciones de los pines de interface del LCD */
    lcd_DATAAddr |= 0xF0;
    lcd_CTRLddr |= (1<<lcd_E)|(1<<lcd_RW)|(1<<lcd_RS);

    /* Secuencia de inicialización del LCD en modo de 4 bits*/
    lcd_CTRLout &= ~((1<<lcd_E)|(1<<lcd_RW)|(1<<lcd_RS));
    ldelay_ms(45);    // > 40 ms
    lcd_nibble(0x30); // Function Set: 8-bit
    ldelay_ms(5);    // > 4.1 ms
    lcd_nibble(0x30); // Function Set: 8-bit
    ldelay_ms(1);    // > 100 µs
    lcd_nibble(0x30); // Function Set: 8-bit
    ldelay_ms(1);    // > 40 µs
    lcd_nibble(0x20); // Function Set: 4-bit
    ldelay_ms(1);    // > 40 µs
    lcd_nibble(0x20); // Function Set: 4-bit, 2lines, 4x7font
    lcd_nibble(0x80); //
    lcd_write(0x0C, 0); // Display ON/OFF Control: Display on, Cursor off, Blink off
    lcd_write(0x01, 0); // Clear Display
    lcd_write(0x06, 0); // Entry Mode Set
}

//*****
***

// Escribe una instrucción en el LCD:
// Si RS = 0 la instrucción es de comando (Function Set, Entry Mode set, etc).
// Si RS = 1 la instrucción es de dato y va a la DDRAM o CGRAM.

```

```
/**
***
```

```
void lcd_write(char inst, char RS)
```

```
{
    while(lcd_read(0)&0x80);    // Esperar mientras LCD esté ocupado
    if(RS)
        lcd_CTRLout |= (1<<lcd_RS); // Para escribir en DDRAM o CGRAM
    else
        lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_RS); // Para escribir en Registro de Comandos
    delay_us(5);              // Permite actualizar el Puntero de RAM
    lcd_nibble(inst);        // Enviar nibble alto
    lcd_nibble(inst<<4);     // Enviar nibble bajo
}
```

```
/**
***
```

```
// Envía el nibble alto de 'nibble' al LCD.
```

```
/**
***
```

```
void lcd_nibble(char nibble)
```

```
{
    lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_RW); // Establecer Modo de escritura
    lcd_DATAAddr |= 0xF0;        // Hacer nibble alto de bus de datos salida
    lcd_DATAout = (nibble&0xF0)|(lcd_DATAout&0x0F); // Colocar dato
    delay_us(2);                // tAS, set-up time > 140 ns
    lcd_CTRLout |= (1<<lcd_E);   // Pulso de Enable
    delay_us(2);                // Enable pulse width > 450 ns
    lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_E); //
    lcd_DATAAddr &= 0x0F;        // Hacer nibble alto entrada
}
```

```
/**
***
```

```
// Lee un byte de dato del LCD.
```

```
// Si RS = 1 se lee la locación de DDRAM o CGRAM direccionada actualmente.
```

```

// Si RS = 0 se lee el 'bit de Busy Flag' + el 'Puntero de RAM'.

//*****
***

char lcd_read(char RS)
{
    char high, low;
    if(RS)
        lcd_CTRLout |= (1<<lcd_RS); // Para leer de DDRAM o CGRAM
    else
        lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_RS); // Para leer Busy Flag + Puntero de RAM
    lcd_CTRLout |= (1<<lcd_RW); // Establecer Modo Lectura
    lcd_DATAin &= 0x0F; // Hacer nibble alto entrada
    delay_us(2); // tAS, set-up time > 140 ns
    lcd_CTRLout |= (1<<lcd_E); // Habilitar LCD
    delay_us(2); // Data Delay Time > 1320 ns
    high = lcd_DATAin; // Leer nibble alto
    lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_E); // Para que el LCD prepare el nibble bajo
    delay_us(2); // Enable cycle time > 1200 ns
    lcd_CTRLout |= (1<<lcd_E); // Habilitar LCD
    delay_us(2); // Data Delay Time > 1320 ns
    low = lcd_DATAin; // Leer nibble bajo
    lcd_CTRLout &= ~(1<<lcd_E); //
    return (high<&0xF0)|(low<>>4); // Juntar nibbles leídos
}

//*****
***

// Envían cadenas RAM terminadas en nulo al LCD.

//*****
***

void lcd_puts(char * s)
{
    unsigned char c, i=0;
    while(c = s[i++])
        lcd_write(c, 1); // Instrucción 'Write Data to DDRAM/CGRAM'
}

```

```

}

//*****
***

// Envían cadenas desde la flash al LCD.

//*****
***

void lcd_puts_pgm(char *s)
{
    unsigned char c,i=0;
    while ((c=pgm_read_byte(&s[i++])))
    {
        lcd_write(c,1);
    }
}

//*****
***

// Ubica el cursor del LCD en la columna c de la línea r.

//*****
***

void lcd_gotoxc(char r, char c)
{
    if(r==1) r = LCD_LINE1;
    else    r = LCD_LINE2;
    lcd_write(r+c-1, 0);    // Instrucción 'Set DDRAM Address'
}

//*****
***

// Limpia la pantalla del LCD y regresa el cursor a la primera posición
// de la línea 1.

//*****
***

void lcd_clear(void)
{

```

```

    lcd_write(LCD_CLEAR, 0); // Instrucción 'Clear Display'
}

//*****
***

// Envían instrucciones de comando y de datos al LCD.

//*****
***

void lcd_cmd(char com)
{
    lcd_write(com, 0); // Cualquier instrucción de comando
}

void lcd_data(char dat)
{
    lcd_write(dat, 1); // Instrucción 'Write Data to DDRAM/CGRAM'
}

//*****
***

// Genera un delay de n milisegundos

//*****
***

void ldelay_ms(unsigned char n)
{
    while(n--)
        delay_us(1000);
}

Main.c

/*

* RECTIFICADOR_6PULSOS.c

*

* Created: 27/10/2017 10:33:46

* Author : Daniel

```

```

*/

#include <avr/io.h>

#include <avr/interrupt.h>

#define F_CPU 8000000UL

#include <util/delay.h>

#include <compat/deprecated.h>

#include "lcd_lib/lcd.h"

double valor1,dato,t1,t2,t3;

uint8_t ante,actual;

int porcentaje,alfa;

char msm[16];

int main(void)

{

    DDRA=0B11111110;PORTA=0B00000000;

    DDRB=0;PORTB=255;

    DDRC=255;PORTC=0;

    DDRD=0;PORTD=255;

    lcd_init();

    lcd_gotoxc(1,1);lcd_puts("  UPS  ");

    lcd_gotoxc(2,1);lcd_puts("P DE TITULACION ");

    _delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);

    //_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);

    lcd_gotoxc(1,1);lcd_puts("RECTIF. 6 PULSOS");

    lcd_gotoxc(2,1);lcd_puts("SIST. DE CONTROL");

    _delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);

```

```

//_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);

lcd_clear();

lcd_gotoxc(1,1);lcd_puts("RECTF. TRIFASICO");

DIDR0=0B00000001;ADMUX=0B01000000;ADCSRB=0;

//EICRA=0b00101010;EIMSK=0b00000111;

TCCR0A=0;TCCR0B=0b00000101;TIMSK0=0b00000010;

TCCR1A=0;TCCR1B=0b00000101;TIMSK1=0b00000010;

TCCR2A=0;TCCR2B=0b00000111;TIMSK2=0b00000010;

PCICR=0B00001000;PCMSK3=0B00001110;

ante=PIND & 0b00001110;

sei();

while(1)

{

    sprintf(msm,"ALFA: %d GRADOS",porcentaje);

    lcd_gotoxc(2,1);lcd_puts(msm);

    ADCSRA=0b11000111;while(ADCSRA&(1<<ADSC));valor1=ADC*0.1759530;po
rcentaje=valor1;

    dato=valor1*0.361689814+10.8506;

    t1=dato+1.4265;if(t1>=255){t1=255;}

    t2=dato+4.0484;if(t2>=255){t2=255;}

    t3=dato+3.7358;if(t3>=255){t3=255;}

}

}

ISR(PCINT3_vect)

```

```

{

    actual=PIND & 0B00001110;

    actual=actual & ante; //deteccion de flanco de bajada yt

    actual=actual^ante;

    ante=PIND & 0B00001110; // 65.10 es 180grados

    switch (actual)

        {

```

ATMEGA 328P

Main.c

```

/*
 * solopulsos.c
 *
 * Created: 31/10/2017 14:16:26
 * Author : Daniel
 */

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#define F_CPU 8000000UL
#include <util/delay.h>
#include <compat/deprecated.h>
double valor1,dato,t1,t2,t3;
uint8_t ante,actual;
int porcentaje,alfa;
int main(void)
{

    DDRB=255;PORTB=0;

    DDRC=0;PORTC=0;

    DDRD=0;PORTD=255;

    DIDR0=0B00000001;ADMUX=0B01000000;ADCSRB=0;

    _delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);

```

```

_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);
//_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);
//_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);_delay_ms(250);
//EICRA=0b00101010;EIMSK=0b00000111;
TCCR0A=0;TCCR0B=0b00000101;TIMSK0=0b0000010;
TCCR1A=0;TCCR1B=0b00000101;TIMSK1=0b0000010;
TCCR2A=0;TCCR2B=0b00000111;TIMSK2=0b0000010;
PCICR=0B00000100;PCMSK2=0B00001110;
ante=PIND & 0b00001110;
sei();
while(1)
{
    ADCSRA=0b11000111;while(ADCSRA&(1<<ADSC));valor1=ADC*0.1759530;
    dato=valor1*0.361689814+10.8506;
    t1=dato+8.1;if(t1>=255){t1=255;}
    t2=dato+4.3;if(t2>=255){t2=255;}
    t3=dato+8;if(t3>=255){t3=255;}
}
}

```

```
ISR(PCINT2_vect)
```

```

{
    actual=PIND & 0B00001110;
    actual=actual & ante; //deteccion de flanco de bajada
    actual=actual^ante;
    ante=PIND & 0B00001110; // 65.10 es 180 grados
    switch (actual)
    {
        case 2: //S1 //T4
        {
            cbi(PORTB,1);OCR0A=t1;TCNT0=0; // para 0 60 grados
            break;
        }
    }
}

```

```

    }
    case 4: //S2 //T5
    {
        cbi(PORTB,2);OCR1A=t2;TCNT1=0; // para 0 60 grados
        break;
    }
    case 8: //S3 //T6
    {
        cbi(PORTB,3);OCR2A=t3;TCNT2=0; // para 0 60 grados
        break;
    }
}

ISR(TIMER0_COMPA_vect) //T4
{
    sbi(PORTB,1);
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect) //T5
{
    sbi(PORTB,2);
}

ISR(TIMER2_COMPA_vect) //T6
{
    sbi(PORTB,3);
}

```