

# CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA UN CIRCUITO DE DISPARO DE TIRISTORES EN UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO TOTALMENTE CONTROLADO

ENMANUEL VANEGAS GARCÍA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMAS DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA, MARZO 2017



CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA UN  
CIRCUITO DE DISPARO DE TIRISTORES EN UN  
RECTIFICADOR TRIFÁSICO TOTALMENTE  
CONTROLADO

**ENMANUEL VANEGAS G.**

Trabajo de grado presentado como requisito

Parcial para optar por el título de

**Ingeniero Electricista**

Director

M.Sc: JESSER JAMES MARULANDA DURANGO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA, MARZO 2017



CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA UN CIRCUITO DE DISPARO DE  
TIRISTORES EN UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO TOTALMENTE CONTROLADO

©Enmanuel Vanegas Garcias

Co-Director: Alfonso Álzate Gómez

Director: Jesser James Marulanda Durango

Pereira, marzo de 2017

Programa de Ingeniería Eléctrica

Universidad Tecnológica de Pereira

La Julita. Pereira (Colombia)

TEL: (+57) (6)3137122

[www.utp.edu.co](http://www.utp.edu.co)

Versión web disponible en: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de estudiar en la Universidad Tecnológica de Pereira, con unos excelentes académicos y buenos compañeros.

A mis padres por su apoyo incondicional, familiares amigos y todas aquellas personas que siempre han estado a mi lado apoyándome.

Al Ingeniero Jesser James Marulanda Durango quien me dio la oportunidad de realizar este proyecto.

Al ingeniero Alfonso Álzate Gómez por su apoyo y buena orientación.

## Resumen

Este documento presenta las etapas para la construcción de un módulo de seis pulsos, para el control del ángulo de disparo. En este proyecto se buscó realizar un circuito de pulsos, para poder controlar circuitos rectificadores, tanto monofásicos, como trifásicos, y partir de su diseño obtener conceptos importantes para la construcción del dispositivo, dejando plasmado las consideraciones como base para futuras investigaciones, y aportando una herramienta útil para el laboratorio de electrónica de potencia. Para el desarrollo inicialmente se realizaron pruebas de simulación en el programa *Proteus 8*, para el diseño realizado, se utilizó tecnología CMOS ("Semiconductor Complementario de Óxido Metálico") es la tecnología con la que se realizan los micro controladores, este tipo de tecnología digital programable, simplificó algunas partes utilizando la respectiva programación, ejecutada mediante el programador, *PIC C Compiler* compilador C. Este ayudó a ejecutar los códigos, y poderlos ingresar a los PIC. Teniendo el módulo implementado se efectúan las respectivas pruebas, utilizando circuitos de potencia, tanto monofásico como trifásicos, se verificó el correcto funcionamiento del módulo, logrando obtener los resultados deseados.

# TABLA DE CONTENIDO

1.1	Introducción .....	5
1.2	Planteamiento del problema.....	4
1.2.1	Definición del problema.....	4
1.2.2	Justificación.....	4
1.3	Objetivos .....	4
1.3.1	Objetivo general.....	4
1.3.2	Objetivos específicos .....	4
1.4	Trabajos anteriores .....	5
1.5	Alcances .....	7
1.6	Contribuciones .....	7
1.7	Estructura de trabajo .....	7
2.1	Metodología .....	7
2.2	Fases del proyecto.....	8
2.2.1	Etapa 1 Estudio estado del arte .....	8
2.2.2	Etapas 2 Diseño circuito de seis pulsos.....	8
2.2.3	Etapa 3 Programación $\mu$ C .....	8
2.2.4	Etapa 4 Implementación circuito de pulsos .....	9
2.2.5	Etapa 5 Pruebas y resultados.....	9
3.1	Fundamentos teóricos .....	10
3.1.1	Rectificadores.....	10
3.1.2	Factor de potencia .....	10
3.1.3	PWM .....	10
3.1.4	DSP .....	10
3.1.5	CMOS .....	10
3.2	Clasificación de rectificadores .....	11
3.2.2	Rectificador trifásico de onda completa.....	11
3.2.3	Rectificador trifásico controlado.....	11
3.2.4	Características ángulo de conducción .....	13

3.3 Circuito de disparo de Tiristores .....	13
3.3.1 Circuito de sincronizador .....	14
3.3.2 Entrada señal de control .....	15
3.3.3 Circuito base de tiempo.....	15
3.3.4 Generación pulsos de disparo .....	15
3.3.5 Circuito de aislamiento convertidor .....	15
3.3.6 Protección compuerta.....	15
3.4 Microcontroladores .....	15
3.4.1 Descripción de pines PIC 16f877.....	18
3.4.2 Resumen características principales PIC 16f788 .....	19
3.4.3 Características importantes PIC 16f788.....	19
3.4.3.1 Oscilador interno de 4MHz.....	20
3.4.4 Descripción de pines PIC 16f628.....	22
3.5 Descripción PWM.....	22
3.5.1 Modulación por ancho de pulso PWM .....	22
3.5.2 Características de disparo de tiristores utilizando PWM .....	23
3.5.3 Control ángulo de extinción.....	25
3.6 Etapa de diseño .....	26
3.6.1 Software PIC C Compiler .....	26
3.6.2 Programación Micro controlador utilizando PIC Compiler.....	26
3.6.3 Detección cruce por cero .....	27
3.6.3.1 Comparador analógico .....	29
3.6.4 Fuente interna de voltaje de referencia .....	30
3.6.5 Adecuación canales Entrada/Salida Micro controlador .....	30
3.6.6 Características de programación PWM .....	31
3.6.7.1 Generación de un PWM .....	33
3.6.8 Programación canal UART .....	34
3.6.9 Programación circuito de seis pulsos .....	34
3.7 Consideraciones principales de diseño .....	42
4.1 Pruebas y análisis de resultado obtenidos .....	45
4.2 Modelo de circuito generador de seis pulsos .....	45

4.3 Circuito de potencia para rectificador totalmente controlado .....	51
4.4 Circuito de potencia para rectificador trifásico semicontrolado.....	55
4.5 Circuito de potencia para rectificador trifásico totalmente controlado.....	60
5.1 Conclusiones, aportes y recomendaciones.....	66
Bibliografía.....	68



## Índice de figuras

<b>3.1:</b> Topología rectificador controlado puente trifásico[2].....	12
<b>3.2:</b> Secuencia para la semionda rectificadora [14].....	13
<b>3.3</b> Diagrama de bloques convertidor [AUTOR].....	14
<b>3.4:</b> Distribución de pines PIC16F877 [11].....	16
<b>3.5:</b> Distribución de los puertos PIC16F877 [14].....	17
<b>3.6:</b> Conexión cristal oscilador de alta frecuencia [11].....	19
<b>3.7:</b> PIC 16F627A/628A/648 <sup>a</sup> [14].....	21
<b>3.8</b> Ciclo de trabajo al 25% [14].....	23
<b>3.9:</b> Ciclo de trabajo al 50% [14].....	23
<b>3.10:</b> Graficas modulación ancho de pulso trifásico desfase a $\alpha = 90$ [2].....	24
<b>3.11:</b> Control ángulo de extinción $0 \leq \alpha \leq 180$ =ángulo de extinción $\alpha = 180$ - [2].....	25
<b>3.12:</b> Control por ángulo de extinción [2].....	25
<b>3.13:</b> PIC C Compiler [14].....	26
<b>3.14:</b> Diagrama de bloques programación Microcontrolador [11].....	27
<b>3.15:</b> Proceso de conversión análogo - digital [AUTOR].....	28
<b>3.16:</b> Voltajes de referencia máx.- min [12].....	29
<b>3.17</b> Comparador analógico de señal [12].....	30
<b>3.18</b> Red de resistencias comparadores [12].....	31
<b>3.19:</b> Diagrama de bloques funciones ejecutadas PIC16f877 [AUTOR].....	38
<b>3.20:</b> Pruebas de funcionamiento Display LCD [AUTOR].....	39
<b>3.21:</b> Programador PIC [AUTOR].....	42
<b>3.22</b> Pin entrada de señal de referencia [12].....	43
<b>3.23:</b> Divisor de tensión resistivo [11].....	44
<b>4.1:</b> Circuito de pulsos pruebas protoboard [AUTOR].....	46
<b>4.2:</b> Módulo circuito de seis pulsos [AUTOR].....	47

<b>4.3:</b> Señal de control de disparo (PWM) [AUTOR].....	47
<b>4.4:</b> Señal de control de disparo simulación (PWM) Proteus 8[AUTOR].....	48
<b>4.5:</b> Circuito rectificador monofásico [AUTOR].....	49
<b>4.6:</b> Pruebas de funcionamiento circuito rectificador monofásico [AUTOR].....	49
<b>4.7:</b> Simulación Proteus rectificador monofásico [AUTOR].....	50
<b>4.8:</b> Señal de control $\alpha=60^\circ$ semiciclo positivo .....	50
<b>4.9</b> Diagrama protoboard [AUTOR].....	52
<b>4.10:</b> Simulación rectificador monofásica totalmente controlado con SCR's [AUTOR].....	53
<b>4.11:</b> Pruebas circuito rectificador monofásica totalmente controlado [AUTOR].....	53
<b>4.12:</b> Señal rectificada para un $\alpha=120$ [AUTOR].....	54
<b>4.13:</b> Señal rectificada para un $\alpha=90$ [AUTOR].....	54
<b>4.14:</b> Señal rectificada para un $\alpha=60$ [AUTOR].....	55
<b>4.15:</b> Pruebas de secuencia [AUTOR].....	56
<b>4.16</b> Conexión Y -Y [AUTOR].....	56
<b>4.17:</b> Rectificador trifásico semicontrolado [AUTOR].....	57
<b>4.18:</b> Señal en la carga rectificador trifásico semicontrolado simulación Proteus 8 $\alpha=30^\circ$ [AUTOR].....	58
<b>4.19;</b> Señal carga R rectificador semi controlado $\alpha=45^\circ$ [AUTOR].....	58
<b>4.20:</b> Señal carga R rectificador semi controlado $\alpha=70^\circ$ [AUTOR].....	59
<b>4.21:</b> Señal carga R rectificador semi controlado $\alpha=130^\circ$ [AUTOR].....	59
<b>4.22:</b> Señal carga R rectificador semi controlado $\alpha=170^\circ$ [AUTOR].....	60
<b>4.23:</b> Puente rectificador trifásico totalmente controlado [AUTOR].....	61
<b>4.24:</b> Montaje puente rectificador trifásico totalmente controlado laboratorio [AUTOR]....	62
<b>4.25</b> señal rectificada para un ángulo de disparo $\alpha=0^\circ$ [AUTOR].....	63
<b>4.26:</b> Señal rectificada para un ángulo de disparo $\alpha=60^\circ$ [AUTOR].....	63
<b>4.28:</b> Señal rectificada para un ángulo de disparo $\alpha=45^\circ$ con Carga RL [AUTOR].....	64

<b>4.28:</b> Señal rectificada para un ángulo de disparo $\alpha=90^\circ$ con carga RL [AUTOR].....	64
<b>4.29:</b> Señal rectificada para un ángulo de disparo $\alpha=90^\circ$ con carga RL [AUTOR].....	64
<b>4.30:</b> Señal rectificada para un ángulo de disparo $\alpha=45^\circ$ con carga RL [AUTOR].....	64
<b>4.31:</b> Señal de corriente puente rectificador trifásico [5].....	65



# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

Los rectificadores controlados son circuitos realizados con tiristores, llamados así porque son capaces de cambiar la forma de onda de la señal que recibe en su entrada, y controlar su voltaje por medio del ángulo de disparo o retraso  $\alpha$ , de los rectificadores controlados de Silicio SCR's.

Se utilizan principalmente en aplicaciones industriales, especialmente en propulsores de velocidad variable, cargadores de baterías y una clase de drives de motores AC y DC como en otros procesos. Estos convertidores de fase se clasifican en monofásicos y trifásicos, dependiendo de la fuente de alimentación, y se pueden subdividir en:

- Semiconvertidor (un cuadrante, proporciona voltaje y corriente de salida positivos).
- Convertidor completo (dos cuadrantes, la polaridad de su voltaje de salida puede ser positiva o negativa, sin embargo, la corriente de salida solo tiene una polaridad y es positiva).
- Convertidor dual (cuatro cuadrantes, tanto su voltaje como su corriente de salida pueden ser positivos o negativos).

Para controlar algunos parámetros de funcionamiento se debe de modificar el tiempo de activación de los tiristores, por eso la construcción de un circuito de pulsos, como fuente de investigación, en el que se podrá considerar algunos parámetros de diseño, con los cuales se alcance el correcto funcionamiento de estos dispositivos de control (tiristores), Es importante para el estudio de la electrónica de potencia.

## 1.2 Planteamiento del problema

### 1.2.1 Definición del problema

El laboratorio de electrónica de potencia del programa de ingeniería eléctrica no cuenta actualmente entre sus prácticas con un rectificador trifásico totalmente controlado.

Como un primer paso, es muy importante poder implementar un circuito de pulsos, siendo esta una parte importante del rectificador.

Lo que llevara a suplir una necesidad que hay en el laboratorio de electrónica de potencia, y lograr plasmar los pasos que se deben de seguir, y los criterios para poder construir un circuito de disparo.

## **1.2.2 Justificación**

Los rectificadores de corriente son empleados extensamente a nivel industrial, lo que lleva a que sea un área importante en el estudio de la electrónica de potencia y crea la necesidad de comprender el funcionamiento del mismo, y la forma de implementar uno de ellos. Dentro de este dispositivo podemos observar que hay varias etapas siendo una parte esencial el circuito de pulsos. Con este trabajo se pretende mostrar los criterios que se requieren para poder diseñar y construir uno de ellos, esto busca dejar una herramienta para el mejoramiento de la enseñanza del curso de electrónica de potencia, Poniendo en práctica esos conocimientos adquiridos teóricamente, y de esta forma ampliar el desarrollo de los nuevos profesionales.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

El objetivo principal es proporcionar los criterios de diseño para un circuito de seis pulsos de para un rectificador trifásico de tiristores,

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Hacer una revisión del estado del arte de estos circuitos (análogos, digitales).
- Seleccionar un circuito de pulsos para su implementación.
- Plasmear los criterios de diseño para el circuito de pulsos de un rectificador trifásico.
- Montaje en Proteus para verificar en simulación el comportamiento del circuito.
- Realizar la implementación y pruebas de su funcionamiento

## **1.4 Trabajos anteriores**

Para el estudio e implementación de un convertidor de energía totalmente controlada, se ha realizado una investigación de algunos documentos previos referente a la temática, para entender los elementos que caracterizan el correcto funcionamiento de los dispositivos de conversión de energía, su funcionamiento adecuado en régimen permanente, la ejecución de maniobras, conexión y desconexión de cargas, entre otros.

La introducción a la temática se abre estudiando una tesis desarrollada e implementada por el estudiante de pregrado OCHOA BYRON, PALMA EDGAR, VÁSQUEZ MARCELO [1] en la cual se desarrolló el módulo rectificador con el fin de aportar a la facultad de su universidad. Se instaló tiristores de modelo MCC44-08IOb de marca IXYS. Su voltaje máximo de trabajo es a 800V, y con rango de corriente de hasta 80 Amperios. Este proyecto se implementa utilizando una tarjeta de disparo con las siguientes características:

- ✚ Se encarga de dar el pulso a los puertas de los tiristores para variar el ángulo de disparo.
- ✚ El rango del ángulo de disparo  $0^\circ - 180^\circ$
- ✚ Display LCD de visualización de ángulo alfa controlado manualmente.
- ✚ Arranque tomando en cuenta el ángulo de cada fase.
- ✚ Controlador lógico programable PLC 16C74-20 (Programmable Logic Controller) para sincronizar el disparo de cada tiristor.

El funcionamiento del controlador lógico programable es, el encargado salvo el proceso inicial que sigue a un Reset, de tipo secuencial y cíclico, es decir, las operaciones tienen lugar una tras otra, y se van repitiendo continuamente mientras el autómata esté bajo tensión. El acoplador óptico es un dispositivo que ofrece a los diseñadores electrónicos una mayor libertad para diseñar circuitos y sistemas. La operación está basada en la detección de luz emitida. La entrada del acoplador está conectada a un emisor de luz y la salida es una foto detectora. Los dos elementos están separados por un aislante transparente y dentro de un empaque que lo aísla de la luz exterior. Hay muchos tipos de acopladores ópticos, todos ellos tienen una fuente de luz infrarroja (LED), pero el detector puede ser fotodiodo.

En el trabajo de DIEGO FERNANDO DEBÍA NARVÁEZ, de la Universidad Nacional de Colombia en 2011[2], titulado MODELO DE UN CONVERTIDOR CA/CC TRIFÁSICO PARA EL ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA. En éste trabajo se presenta un diseño, simulación e implementación del rectificador trifásico controlado, realizando un análisis de la distorsión armónica generada de este bajo una carga resistiva. Se muestra la influencia en la calidad de la energía eléctrica, al implementar una referencia para alimentar el circuito de control (PWM), que genera ruido en modo común. El puente rectificador presentado en este trabajo fue diseñado e implementado para trabajar en un banco de aplicaciones didácticas, de tal forma que se pueden conectar cargas como: motores e iluminación.

El Circuito de control (PWM) tiene una configuración de tal manera que genera los 6 pulsos de activación de los tiristores mediante el circuito integrado TCA 785. Éste integrado se desempeña controlando un ángulo de disparo de tiristores en rectificación controlada. El circuito tiene una estructura interna monolítica, siendo parte analógica y parte digital. Se entiende como un CI de control de fase, produciendo en sus salidas de pulsos que son

sincronizados con puente rectificador. Pueden estos pulsos ser desfasados desde 0° hasta 180°.

Otro trabajo lo desarrolló FREDY ALBERTO ROJAS ESPINOZA & CARLOS ALBERTO NIETO PIERUCCIN de la Universidad Industrial de Santander en el año 2007 [3], en el cual diseñaron e implementaron un rectificador trifásico totalmente controlado con factor de potencia mejorado basado en tecnología cmos y dsp. El modelo final del sistema está dividido en dos etapas generales: Circuito de mando y el circuito de potencia. Dentro del circuito de mando se encuentran la detección de cruce por cero que se encarga de establecer un punto de referencia de donde parte el proceso del control, y el circuito generador y controlador de las señales de disparo conformado por la tarjeta de desarrollo 56F800 de Motorola que integra el DSP 56F801 encargada de generar los pulsos PWM; y por último, un circuito de acondicionamiento de señal o circuito de disparo cuya función es procesar la señal de control generada por el DSP para enviarla a el circuito de potencia. El circuito de potencia está conformado principalmente por el puente rectificador trifásico que integra seis MOSFET funcionando como interruptores además de protecciones y disipadores de calor.

En [4] se presenta un desarrollo de un módulo de generación de pulsos de activación de los tiristores del convertidor AC/DCm, el cual se basa en un circuito de lazo con sincronismo de fase, PLL (Phase Locked Loop).

## **1.5 Alcance**

El circuito de 6 pulsos se desarrolla como el fin de aportar con la implementación, de una parte importante en el desarrollo de un rectificador trifásico totalmente controlado, esto con el fin contribuir con una herramienta que ayude, como base para nuevas investigaciones, y que los estudiantes de ingeniería eléctrica puedan interactuar con el dispositivo y comparar lo aprendido teóricamente, en un entorno real.

## **1.6 Contribuciones**

La contribución de este trabajo al estado del arte que se obtiene es un circuito de pulsos para un rectificador trifásico totalmente controlado de seis pulsos, mostrando unos criterios mínimos de diseño en la construcción del mismo.

## **1.7 Estructura del trabajo de grado**

Este documento cuenta con la siguiente estructura: Inicialmente en el capítulo 1, se muestra la introducción al tema, un resumen de las principales bibliografías consultadas para el desarrollo del proyecto, los alcances y contribuciones. En el capítulo 2 abarca la metodología que se utilizó para realizar la implementación y sus respectivas etapas. El capítulo 3 trata los fundamentos teóricos referente al tema y las especificaciones necesarias de los elementos utilizados para realizar el proyecto. El capítulo 4 presenta lo respectivo a los criterios de



diseño, pruebas realizadas al prototipo y resultados obtenidos. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

# Capítulo 2

## 2.1 Metodología

Este proyecto es desarrollado inicialmente haciendo un estudio del estado del arte, esto lleva a encontrar algunas alternativas con las cuales se puede implementar este tipo de dispositivos (rectificador trifásico totalmente controlado), entre ellas las tecnologías analógicas y digitales las cuales brindan alternativas útiles para su implementación.

En esta ocasión se busca construir un módulo de dimensiones prácticas (es decir, fácil de transportar), utilizando dispositivos de alta tecnología como son los microcontroladores. Éste es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria, lo que para el propósito principal del proyecto es la mejor alternativa, ya que cumple con los objetivos esperados. Al utilizar los microcontroladores debemos contar con un programa especial para ingresar las ordenes deseadas al dispositivo programable, para este caso se utiliza, PIC C Compiler es una poderosa herramienta que contienen operadores estándar del lenguaje C y funciones incorporados en bibliotecas que son específicas a los registros de PIC, proporcionando a los desarrolladores fácil acceso al hardware y las funciones del dispositivo desde el nivel de lenguaje C.

Lo que nos lleva a que el desarrollo de este dispositivo se enfoque en la programación de los microcontroladores. Otra herramienta que se utiliza para el diseño y pruebas y el cual es compatible con la programación desarrollada con PIC C Compiler es, Proteus 8 es un entorno integrado diseñado para la realización completa de proyectos de construcción de equipos electrónicos en todas sus etapas: diseño, simulación, depuración y construcción.

Esto lleva a que se pueda ingresar las órdenes deseadas dentro de los microcontroladores en su entorno simulado del programa Proteus 8 para realizar las diferentes pruebas y de esta forma tener la certeza de su correcto funcionamiento y proseguir a su implementación y pruebas de laboratorio.

## 2.2 Fases del Proyecto

### 2.2.1 Etapa 1: Estudio estado del arte circuitos de pulsos de un rectificador trifásico totalmente controlado.

Inicialmente se investiga diversas bibliografías, principalmente las cuales enfocan su investigación a mejorar la eficiencia del dispositivo, y que tipo de tecnología fueron utilizadas. Se busca como alternativa principal enfocar la investigación en desarrollar una alternativa novedosa que logre la activación de los tiristores (puente rectificador) mejorando su eficiencia al momento del trabajo en carga.

### **2.2.2 Etapa 2: Diseño del circuito de pulsos y simulación**

En esta fase del proyecto teniendo en cuenta lo estudios anteriores, se procede a desarrollar el diseño adecuado para los objetivos deseados, para este propósito se utiliza el entorno de programación Proteus 8 el cual brinda las herramientas necesarias para el diseño del circuito de pulsos y las pruebas pertinentes de este. Para este proyecto se utilizan Microcontroladores este tipo de dispositivos programables, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Lo cual hace muy útil para los objetivos deseados.

### **2.2.3 Etapa 3: Programaciones de los Microcontroladores**

Para la programación de los microcontrolador se utiliza el compilador de programación PIC C Compiler, con el cual se puede ingresar las ordenes deseadas al micro, este tipo de dispositivos pueden cumplir diversas funciones lo que lleva, a facilitar la implementación de diversos desarrollos tecnológicos, en este caso redujo la implementación de algunas etapas como el circuito de pulsos las cuales puede ser suplidas mediante la adecuada programación del dispositivos.

### **2.2.4 Etapa 4: Implementación circuito de pulsos**

Después de verificar el diseño en el programa Proteus 8 se prosigue a montar el circuito, el cual cuenta con los siguiente elementos: El Microcontrolador PIC16F877 el cual llamaremos indicador este se encarga recibir la variación del ángulo de desfase la cual es realizada por un potenciómetro, también a partir de su enlace con un LCD se puede observar la variación del punto de trabajo para los pulsos de disparo, otra función que tiene este, se realiza mediante su puerto serial asíncrono (UART) por el cual podemos enviar información a los micros que llamaremos controladores, los cuales son 3 microcontrolador PIC16F628, uno para cada fase del sistema trifásico (R,S,T), este microcontrolador es el encargado de hacer la detección de cruce por cero y mediante la información recibida generar las señales para el disparo de los tiristores, una para el semi-ciclo positivo y otra para el negativa de la señal sinusoidal.

### **2.2.5 Etapa 5: Pruebas y resultados**

En esta etapa se realizó las pruebas correspondientes al correcto funcionamiento del dispositivo y análisis de resultados.

# Capítulo 3

## 3.1 Fundamentos teóricos

En este capítulo se exponen los conceptos básicos y terminologías más relevantes utilizadas para el desarrollo e implementación del circuito de pulsos.

### 3.1.1 Rectificador

Un rectificador es un circuito que convierte una señal de corriente alterna en una señal unidireccional o continua. Por tal razón se le considera como un procesador de potencia que debe proporcionar una salida de DC con una cantidad mínima de contenido armónico. Al mismo tiempo deberá mantener la corriente de entrada tan sinusoidal como sea posible y en fase con el voltaje de entrada, de tal forma que el factor de potencia esté cercano a la unidad [2].

### 3.1.2 Factor de potencia

El factor de potencia representa la eficiencia de la utilización de la red eléctrica. Es la relación existente entre la potencia activa consumida por un sistema, y la potencia aparente consumida por el mismo [10].

### 3.1.3 PWM

“Modulación por Ancho de Pulsos”. PWM es una técnica de modulación en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (por ejemplo sinusoidal o cuadrada) para portar información. El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación al período [10].

### 3.1.4 DSP

“Procesador Digital de Señal”. Un DSP es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un juego de instrucciones un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real: En un sistema que trabaje de esta forma (tiempo real) se reciben muestras normalmente provenientes de un conversor analógico/digital (ADC). Se ha dicho que puede trabajar con señales analógicas, pero es un sistema digital, por lo tanto necesitará un conversor analógico/digital a su entrada y digital/analógico en la salida. Como todo sistema basado en procesador programable necesita de una memoria donde almacenar tanto los datos con los que trabajará como el programa que está ejecutando. Si se tiene en cuenta que un DSP puede

trabajar con varios datos en paralelo y un diseño e instrucciones específicas para el procesado digital, se puede dar una idea de su enorme potencial para este tipo de aplicaciones. Estas características constituyen la principal diferencia de un DSP y otros tipos de procesadores [2].



### **3.1.5. CMOS**

"Semiconductor Complementario de Óxido Metálico". CMOS es una tecnología utilizada para crear circuitos integrados. Estos son dispositivos semiconductores formados por dos transistores de efecto de campo de óxido metálico (MOSFET), uno del tipo n (NMOS) y otro del tipo p (PMOS), integrados en un único chip de silicio. Utilizados por lo general para fabricar memoria RAM y aplicaciones de conmutación, estos dispositivos se caracterizan por una alta velocidad de acceso y un bajo consumo de electricidad. Pueden resultar dañados fácilmente por la electricidad estática [2].



### **3.2.1 Clasificación de rectificadores**

Los circuitos rectificadores pueden clasificarse según:

#### **Señal de alimentación**

-  Rectificador monofásico
-  Rectificador trifásico

#### **Tipo de rectificación**

-  Media onda
-  Onda completa

### **3.2.2 Rectificador trifásico de onda completa**

Un rectificador trifásico o convertidor trifásico es un dispositivo electrónico capaz de convertir una corriente alterna de entrada en una corriente continua de salida, mediante dispositivos semiconductores capaces de manejar grandes potencias como diodos, tiristores, válvulas de mercurio (usados hace más de 100 años), entre otros. El rectificador trifásico cumple con la misma función que un rectificador monofásico, con la diferencia que estos rectificadores son alimentados por fuentes trifásicas, por lo que son más eficientes y pueden manejar grandes potencias, ya que en su salida presentan menor rizado de la señal. Son utilizados principalmente en la industria para producir voltajes y corrientes continuos que generalmente impulsan cargas de gran potencia, como motores DC. A pesar que estos rectificadores presentan menos rizo que un rectificador convencional, en muchas aplicaciones el factor de potencia y la distorsión armónica total de la línea se ven afectados, es por ello que se requiere el uso de filtros de armónicos. Una de las aplicaciones en donde

se presenta este fenómeno, es en los enlaces de transmisión de alto voltaje (HVDC), en donde las estaciones de conversión cuentan con filtros de armónicos que reducen la distorsión en la señal que producen los convertidores, para que sea transmitida con calidad y no se introduzcan perturbaciones a la red eléctrica.

### 3.2.3 Rectificador trifásico controlado.

Este tipo de rectificador permite variar el voltaje promedio de salida, empleando para su funcionamiento tiristores de potencia con los cuales se puede variar el ángulo de disparo y por ende la potencia entregada a la carga. Los tiristores se disparan a un intervalo de  $\pi/3$ . La frecuencia del rizo de voltaje en la salida es seis veces la frecuencia de la fuente de entrada ( $6f_s$ ), y el filtrado resulta menos complejo en comparación con el de los convertidores de media onda ya que este presenta menos rizo en el voltaje de salida.

Cuando  $\omega t = (\pi/6 + \alpha)$ , el tiristor T6 ya está conduciendo, y el tiristor T1 se activa. Durante el intervalo  $(\pi/6 + \alpha) < \omega t < (\pi/2 + \alpha)$ , los tiristores T1 y T6 conducen y aparece el voltaje de línea a línea  $V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$  a través de la carga. Cuando  $\omega t = (\pi/2 + \alpha)$ , se dispara el tiristor T2 y de inmediato el tiristor T6 se polariza en sentido inverso. T6 se desactiva por conmutación natural. Durante el intervalo  $(\pi/2 + \alpha) < \omega t < (5\pi/6 + \alpha)$  conducen los tiristores T1 y T2 y aparece el voltaje de línea a línea  $V_{ac}$  a través de la carga. Si se numeran los tiristores como se indica en la (figura 3.2) del circuito rectificador trifásico controlado, la secuencia de disparo es  $T1-T5, T1-T6, T2-T4, T2-T6, T3-T4, T3-T5$ .

La secuencia de disparo es la siguiente: Generar un pulso de señal en el cruce del voltaje de fase  $V_{an}$  con cero. Retardar el pulso en el ángulo deseado  $(\alpha + \pi/6)$  y aplicarlo a las terminales de compuerta y cátodo de T1 a través de un circuito excitador de compuerta.

Generar cinco pulsos más, cada uno retardado  $\pi/6$  respecto al anterior, para disparar T2, T3,..., T6, respectivamente, mediante circuitos excitadores de compuerta

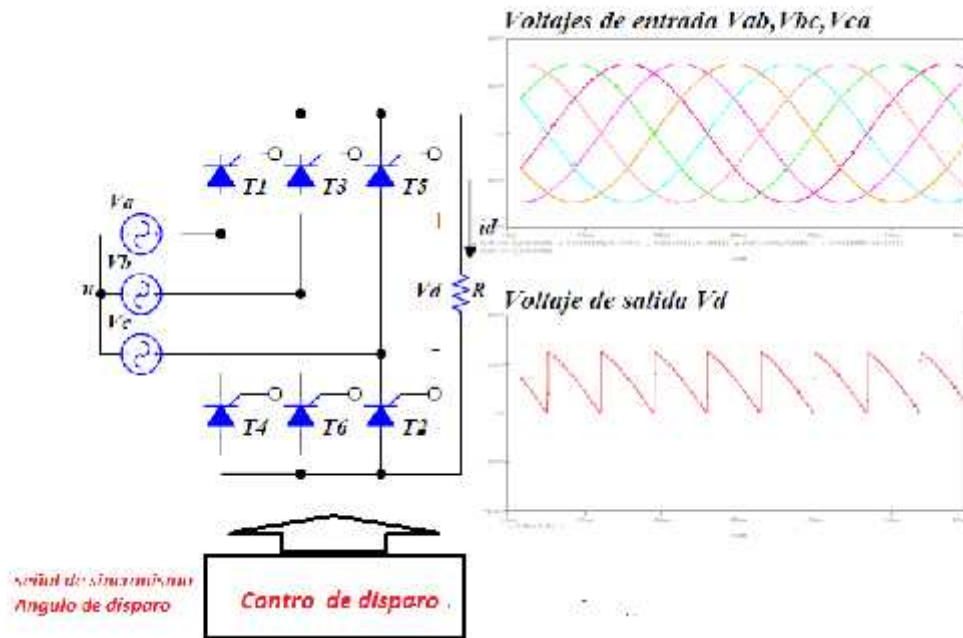


Figura 3.1: Topología rectificador controlado puente trifásico [2].

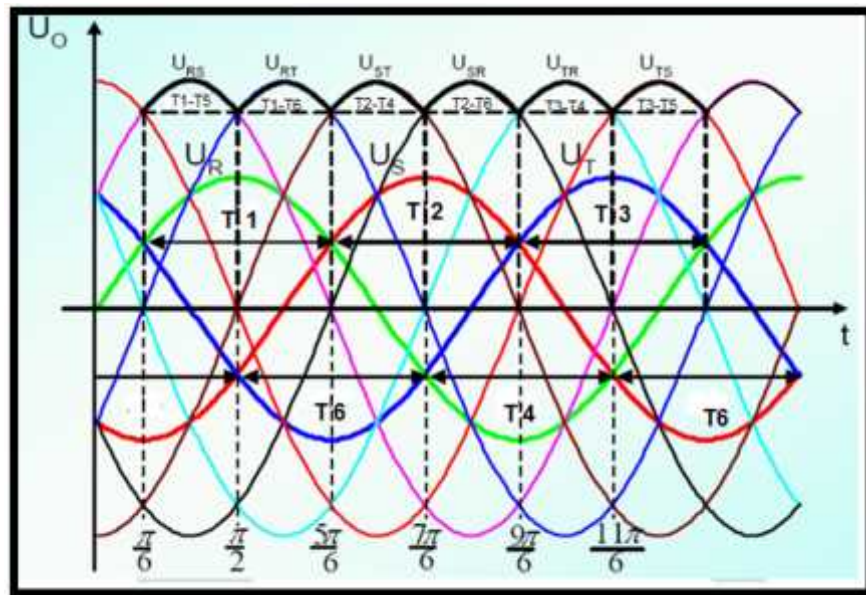


Figura 3. 2: Secuencia para la semionda rectificadora [13]

### 3.2.4 Características ángulos de conducción

- 🚩 La corriente y tensión media de un SCR dependen del ángulo de conducción.
- 🚩 A mayor ángulo de conducción, se obtiene a la salida mayor potencia.
- 🚩 Un mayor ángulo de bloqueo o disparo significa un menor ángulo de conducción:
- 🚩  $\text{Ángulo de conducción} = 180^\circ - \text{ángulo de disparo}$
- 🚩 Conociendo la variación de la potencia disipada en función de los diferentes ángulos de conducción se pueden calcular las protecciones necesarias.

### **3.3 Circuito de disparo de tiristores rectificadores controlados**

El circuito de disparo o excitación de compuerta de los tiristores, es una parte integral del convertidor de potencia. La salida de un convertidor, que depende de la forma en que el circuito de disparo excita a los dispositivos de conmutación (tiristores), es una función directa del proceso de cómo se desarrolla la conmutación. Podemos decir entonces que los circuitos de disparo, son elementos claves para obtener la salida deseada y cumplir con los objetivos del “sistema de control”, de cualquier convertidor de energía eléctrica. El diseño de un circuito excitador, requiere el conocimiento de las características eléctricas de compuerta del tiristor específico, que se va a utilizar en el circuito principal de conmutación. Para convertidores, donde los requisitos del control no son exigentes, puede resultar conveniente diseñarlo con circuitos discretos. En aquellos convertidores donde se necesita la activación de compuerta con control de avance, alta velocidad, alta eficiencia y que además sean compactos, los circuitos integrados para activación de compuerta que se disponen comercialmente, son más conveniente. Las partes componentes de un circuito de disparo para tiristores usados en los rectificadores controlados por fase, a frecuencia industrial, son los siguientes: El circuito sincronizador, el circuito base de tiempo para retrasar el disparo, el circuito conformador del pulso, el circuito amplificador del pulso (opcional), el circuito aislador y finalmente el circuito de protección de la compuerta del tiristor. El diagrama en bloques siguiente, nos da una idea integral, de la Inter relación de estos componentes para este caso tenemos subrayadas las partes correspondientes al circuito de pulsos [9].



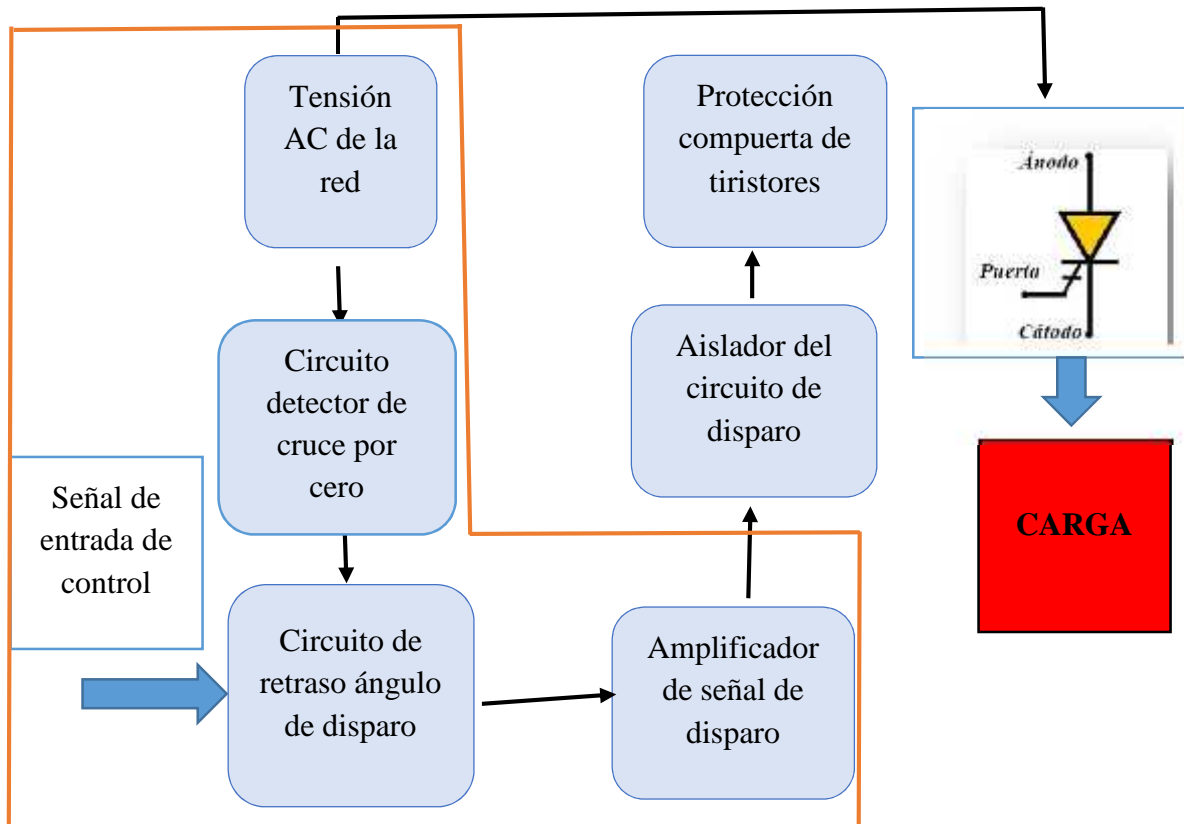


Figura 3.3: Diagrama de bloques convertidor [AUTOR]

### 3.3.1 Circuito sincronizador:

Este circuito, se encarga de iniciar la base de tiempo en sincronismo con la frecuencia de red, de manera tal de retrasar el mismo ángulo (respecto al cruce por cero de la tensión de red), el pulso de disparo, en todos los semiciclo.

### 3.3.2 Entrada señal de control:

Esta señal es la que determina el retraso del ángulo de disparo, señal generada en forma manual o a través de un sistema realimentado. Para este último caso, la señal se genera por la interacción de la señal de referencia, la señal realimentada y el algoritmo de control (proporcional, proporcional + integrador, etc.).

### **3.3.3 Circuito base de tiempo:**

En los circuitos analógicos, la base de tiempo se genera promedio de un circuito tipo RC, o sea a través de la carga de un condensador, con una constante de tiempo  $=CR$ ., hasta una tensión que genera un pulso de disparo. En los sistemas programables, la base de tiempo se genera por programación o por medio de un temporizador interno que se carga también por programación.

### **3.3.4 Generación de los pulsos de disparo:**

Para la generación de los pulsos, se disponen de muchas variantes de circuitos, con aplicación de transistores bipolares o mediante semiconductores específicos, que generan, cortos pulsos de disparo.

### **3.3.5 Circuito de aislamiento convertidor:**

Fundamentalmente se utilizan dos técnicas. Una es la de utilizar un transformador aislador de pulsos y la otra un dispositivo semiconductor foto controlado de silicio, también llamado opto acoplador. Otra técnica utilizada es a través de las fibras ópticas con emisor en el circuito de disparo y receptor en el circuito de compuerta.

### **3.3.6 Protección de la compuerta**

Se utilizan circuitos de protección contra disparos por tensiones espurias. Más adelante, desarrollaremos con más amplitud, estos elementos que componen el circuito de disparo.

## **3.4 Microcontroladores**

Un microcontrolador (abreviado  $\mu C$ , UC o MCU) es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida [10].

Para la implementación de este proyecto fueron utilizados los siguientes micros inicialmente El PIC16F877 el cual llamaremos indicador las especificaciones de este dispositivo son las siguientes; es un micro con memoria de programa tipo FLASH, lo que representa gran facilidad en el desarrollo de prototipos y en su aprendizaje ya que no se requiere borrarlo con luz ultravioleta como otras versiones, sino que permite reprogramarlo nuevamente sin ser borrado con anterioridad. El PIC16F877 es un microcontrolador de Microchip Tecnología, fabricado en tecnología CMOS, su consumo de potencia es muy bajo y además es completamente estático, esto quiere decir que el reloj puede detenerse y los datos de la memoria no se pierden. El encapsulado más común para este microcontrolador es el DPI (Dual In-line Pin) de 40 pines, propio para usarlo en experimentación.



*Figura 3.4: Distribución de pines PIC16F877 [14]*

Los pines de entrada/salida de este microcontrolador están organizados en cinco puertos, el puerto A con 6 líneas, el puerto B con 8 líneas, el puerto C con 8 líneas, el puerto D con 8 líneas y el puerto E con 3 líneas. Cada pin de esos puertos se puede configurar como entrada o como salida independiente programando un par de registros diseñados para tal fin. En ese registro un bit en "0" configura el pin del puerto correspondiente como salida y un bit en "1" lo configura como entrada. Dichos pines del microcontrolador también pueden cumplir otras funciones especiales, siempre y cuando se configuren para ello, según se verá más adelante.

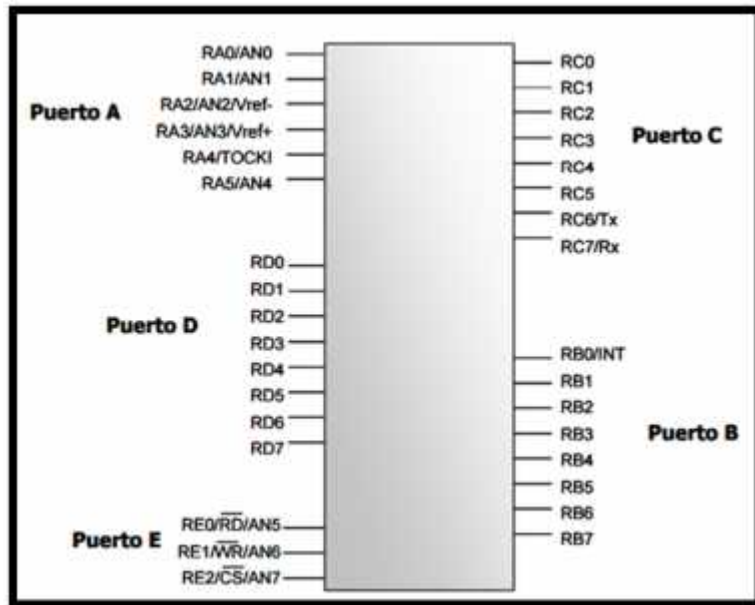


Figura 3.5: Distribución de los puertos PIC16F877 [14]

Los pines del puerto A y del puerto E pueden trabajar como entradas para el convertidor Análogo a Digital interno, es decir, allí se podría conectar una señal proveniente de un sensor o de un circuito analógico para que el microcontrolador la convierta en su equivalente digital y pueda realizar algún proceso de control o de instrumentación digital. El pin RB0/INTI se puede configurar por software para que funcione como interrupción externa, para configurarlo se utilizan unos bits de los registros que controlan las interrupciones. El pin RA4/TOCKI del puerto A puede ser configurado como un pin de entrada/salida o como entrada del temporizador/contador. Cuando este pin se programa como entrada digital, funciona como un disparador de Schmitt (Schmitt trigger), puede reconocer señales un poco distorsionadas y llevarlas a niveles lógicos (cero y cinco voltios). Cuando se usa como salida digital se comporta como colector abierto (open collector), por lo tanto, se debe poner una resistencia de pull-up (resistencia externa conectada a un nivel de cinco voltios). Como salida, la lógica es inversa: un "0" escrito al pin del puerto entrega en el pin un "1" lógico. Además, como salida no puede manejar cargas como fuente, sólo en el modo sumidero. El puerto E puede controlar la conexión en modo microprocesador con otros dispositivos utilizando las líneas RD (read), WR (write) y CS (chip select). En este modo el puerto D funciona como un bus de datos de 8 bits (pines PSP). La máxima capacidad de corriente de cada uno de los pines de los puertos en modo sumidero (sink) o en modo fuente (source) es de 25 mA La máxima capacidad de corriente total de los puertos es [14]:

### 3.4.1 Descripción de pines pic16f877

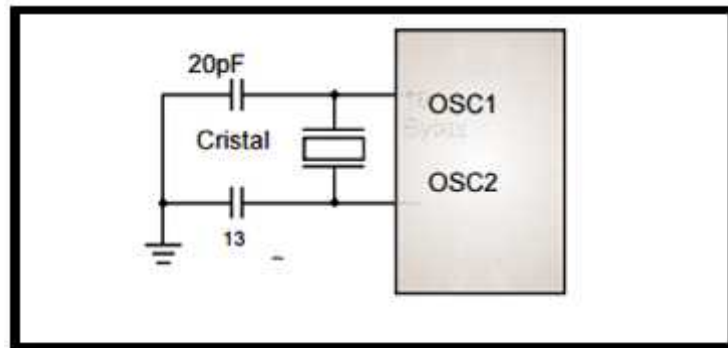
Nombre pin	Pin	Descripción
RA0/AN0	2	E/S Digital o Entrada analoga 0.
RA1/AN1	3	E/S Digital o Entrada analoga 1.
RA2/AN2 $V_{ref-}$	4	E/S Digital o Entrada analoga 2.
RA3/AN3/ $V_{ref+}$	5	E/S Digital o Entrada analoga 3.
RA4/T0CKI	6	Bit 4 del puerto A (E/S bidireccional). También se usa como entrada de reloj al temporizador/contador TMR0, Salida de colector abierto.
RA5/SS/AN4	7	E/S Digital o Entrada analoga 4. También lo usa el puerto serial sincrónico.
RB0/INT	33	Bit 0 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL/ST. También se usa como entrada de interrupción externa (INT).
RB1	34	Bit 1 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL
RB2	35	Bit 2 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL
RB3/PGM	36	Bit 3 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL (Programación en bajo voltaje)
RB4	37	Bit 4 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL. Interrupción por cambio del pin.
RB5	38	Bit 5 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL. Interrupción por cambio del pin.
RB6/PGC	39	Bit 6 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL/ST. Interrupción por cambio del pin. Entrada de reloj para programación serial.
RB7/PGD	40	Bit 7 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL/ST. Interrupción por cambio del pin. Entrada de datos para programación serial.
RC0/T1OSO/T1CKI	15	E/S Digital. Salida del oscilador Timer 1 o entrada de reloj Timer 1.
RC1/T1OSI/CCP2	16	E/S Digital. Entrada del oscilador Timer 1. Entrada Captura 2; Salida Compara 2; Salida PWM 2
RC2/CCP1	17	E/S Digital. Entrada Captura 1; Salida Compara 1; Salida PWM 1
RC3/SCK/SCL	18	E/S Digital. Línea de reloj serial asincrónico en el modo SPI y el modo I <sup>2</sup> C
RC4/SDI/SDA	23	E/S Digital. Línea de datos en el modo SPI o en el modo I <sup>2</sup> C
RC5/SDO	24	E/S Digital.
RC6/TX/CK	25	E/S Digital. Transmisión asincrónica (USART) o reloj sincrónico (SSP).
RC7/RX/DT	26	E/S Digital. Recepción asincrónica (USART) o línea de datos (SSP).
$V_{DD}$	11,32	Voltaje de alimentación DC (+)
$V_{SS}$	12,31	Referencia de voltaje (GND).
MCLR	1	Entrada de RESET al microcontrolador. Voltaje de entrada durante la programación. En nivel bajo resetea el microcontrolador.
OSC1/CLKIN	13	Entrada oscilador cristal oscilador / Entrada fuente de reloj externa.
OSC2/CLKOUT	14	Salida oscilador cristal. Oscilador RC: Salida con un 1/4 frecuencia OSC1
RD0/PSP0	19	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD1/PSP1	20	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD2/PSP2	21	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD3/PSP3	22	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD4/PSP4	27	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD5/PSP5	28	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD6/PSP6	29	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD7/PSP7	30	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RE0/RD/AN5	8	E/S Digital. Puede ser pin de lectura ( <i>read</i> ) en modo microprocesador.
RE1/WR/AN6	9	E/S Digital. Puede ser pin de escritura ( <i>write</i> ) en modo microprocesador.
RE2/CS/AN7	10	E/S Digital. Puede ser pin de selección de chip ( <i>chip select</i> ) en modo microprocesador.

El oscilador externo Todo microcontrolador requiere un circuito externo que le indique la velocidad a la que debe trabajar. Este circuito, que se conoce como oscilador o reloj, es muy simple pero de vital importancia para el buen funcionamiento del sistema. El PIC16F877 puede utilizar cuatro tipos de oscilador diferentes. Estos tipos son:

- RC. Oscilador con resistencia y condensador.
- XT. Cristal (por ejemplo de 1 a 4 MHz).
- HS. Cristal de alta frecuencia (por ejemplo 10 a 20 MHz).
- LP. Cristal para baja frecuencia y bajo consumo de potencia.

En el momento de programar o “quemar” el microcontrolador se debe especificar qué tipo de oscilador se usa. Esto se hace a través de unos fusibles llamados “fusibles de

configuración”. El tipo de oscilador que se sugiere para las prácticas es el XT con un cristal de 4 MHz, porque garantiza precisión y es muy comercial. Internamente esta frecuencia es dividida por cuatro, lo que hace que la frecuencia efectiva de trabajo sea de 1 MHz en este caso, por lo que cada instrucción se ejecuta en un microsegundo. El cristal debe ir acompañado de dos condensadores y se conecta como se muestra en la figura 3.6.



*Figura 3.6: Conexión cristal oscilador de alta frecuencia [14]*

#### 3.4.2 Resumen de Características principales del PIC16F877:

- Memoria de programa: FLASH, 8 K de instrucciones de 14 bits c/u.
- Memoria de datos: 368 bytes RAM, 256 bytes EEPROM.
- Pila (Stack): 8 niveles (14 bits).
- Fuentes de interrupción: 13
- Instrucciones: 35
- Encapsulado: DPI de 40 pines.
- Frecuencia oscilador: 20 MHz (máxima)
- Temporizadores/Contadores: 1 de 8 bits (Timer 0); 1 de 16 bits (Timer 1); 1 de 8 Bits (Timer 2) con pre y post escalador. Un perro guardián (WDT)
- Líneas de E/S : 6 del puerto A, 8 del puerto B, 8 del puerto C, 8 del puerto D y 3 del puerto E, además de 8 entradas análogas.
- Dos módulos de Captura, Comparación y PWM:
  - Captura: 16 bits. Resolución máx. = 12.5 nseg.
  - Comparación: 16 bits. Resolución máx. = 200 nseg.
  - PWM: Resolución máx. = 10 bits.
- Convertidor Análogo/Digital de 10 bits multicanal (8 canales de entrada).
- Puerto serial síncrono (SSP) con bus PSI (modo maestro) y bus I<sup>2</sup>C (Maestro/esclavo).

- 🚩 USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) con dirección de detección de 9 bits.
- 🚩 Corriente máxima absorbida/suministrada (sink/source) por línea (pin): 25 mA
- 🚩 Oscilador: Soporta 4 configuraciones diferentes: XT, RC, HS, LP.
- 🚩 Tecnología de Fabricación: CMOS
- 🚩 Voltaje de alimentación: 3.0 a 5.5 V DC
- 🚩 Puede operar en modo microprocesador

### 3.4.3 Características importantes PIC 16f628

EL PIC 16f628 incorpora tres características importantes que son:

- 🚩 Procesador tipo RISC (Procesador con un Conjunto Reducido de Instrucciones)
- 🚩 Procesador segmentado
- 🚩 Arquitectura HARVARD

Con estos recursos el PIC es capaz de ejecutar instrucciones solamente en un ciclo de instrucción. Con la estructura segmentada se pueden realizar simultáneamente las dos fases en que se descompone cada instrucción, ejecución de la instrucción y búsqueda de la siguiente. La separación de los dos tipos de memoria son los pilares de la arquitectura Harvard, esto permite acceder en forma simultánea e independiente a la memoria de datos y a la de instrucciones. El tener memorias separadas permite que cada una tenga el ancho y tamaño más adecuado. Así en el PIC 16F628 el ancho de los datos es de un byte, mientras que la de las instrucciones es de 14 bit

- 🚩 Conjunto reducido de instrucciones.
- 🚩 Solamente 35 instrucciones que aprender a utilizar

#### 3.4.3.1 Oscilador interno de 4MH

Las instrucciones se ejecutan en un sólo ciclo de máquina excepto los saltos (gotocall), que requieren 2 ciclos. Aquí hay que especificar que un ciclo de máquina se lleva 4 ciclos de reloj, si se utiliza el reloj interno de 4MHz, los ciclos de máquina se realizarán con una frecuencia de 1MHz, es decir que cada instrucción se ejecutará en 1µs (microsegundo).

- 🚩 Opera con una frecuencia de reloj de hasta 20 MHz (ciclo de máquina de 200 ns)
- 🚩 Memoria de programa: 2048 locaciones de 14 bits
- 🚩 Memoria de datos: Memoria RAM de 224 bytes (8 bits por registro)
- 🚩 Memoria EEPROM: 128 bytes (8 bits por registro)
- 🚩 Stack de 8 niveles
- 🚩 16 Terminales de I/O que soportan corrientes de hasta 25 mA
- 🚩 Temporizadores

🌈 Módulos de comunicación serie, comparadores, PWM

Otra característica de los PIC, es el manejo de los bancos de registros. En línea general, los registros se clasifican como de uso general y de uso específico o de funciones especiales.

Los registros de uso general pueden ser usados directamente por el usuario, sin existir restricciones. Pueden servir para almacenar resultados que se reciben desde el registro W (acumulador), datos que provienen de las puertas de entradas, etc.

Los registros de uso específicos no pueden ser usados directamente por el usuario. Estos registros controlan prácticamente todo el funcionamiento del microcontrolador, pues toda la configuración necesaria para funcionamiento del microcontrolador es hecho a través de algún tipo de SFR.

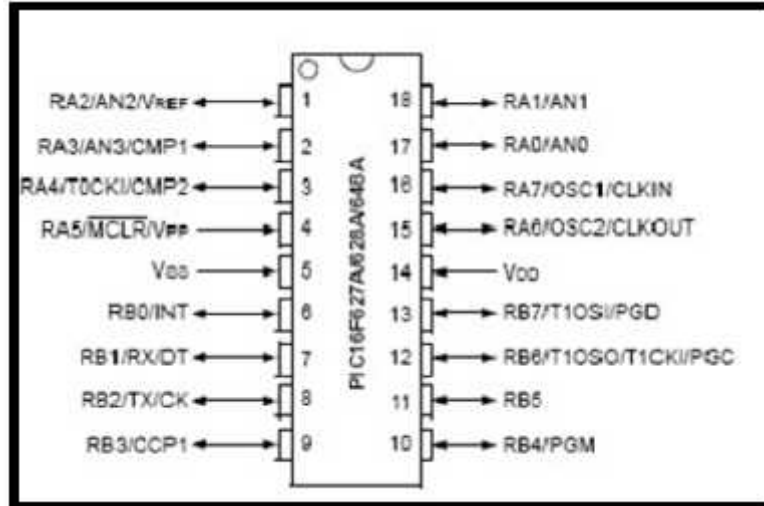


Figura 3.7: PIC 16F627A/628A/648<sup>a</sup> [14]



### 3.4.4 Descripción de pines PIC16f628A

Pin	Nombre	Tipo	Funciones
1	RA2/AN2/Vref		RA2 ENTRADA/SALIDA PUERTO A AN2 ENTRADA ANALOGICA 2 Vref SALIDA VOLTAJE DE REFERENCIA PARA COMPARADOR
2	RA3/AN3/CMP1		RA3 ENTRADA/SALIDA PUERTO A AN3 ENTRADA ANALOGICA 3 CMP1 SALIDA DEL COMPARADOR ANALOGICO1
3	RA4/T0CLK1/CMP2		RA4 ENTRADA/SALIDA PUERTO A. SALIDA ES OPEN DRAIN. T0CLK1 ENTRADA DE RELOJ PARA TIMER 0 CMP2 SALIDA DEL COMPARADOR ANALOGICO2
4	MCLR/RA5/Vpp		MCLR RESET GENERAL AL CONTROLADOR RA5 ENTRADA PUERTO A Vpp VOLTAJE DE PROGRAMACION (ver estándar ISCP)
5	VSS		TIERRA
6	RB0/INT		RB0 ENTRADA/SALIDA PUERTO B INT INTERRUPCION EXTERNA
7	RB1/RX		RB1 ENTRADA/SALIDA PUERTO B RX PIN DE RECEPCION DE PUERTO SERIAL ASINCRONO
8	RB2/TX		RB2 ENTRADA/SALIDA PUERTO B TX PIN DE TRASMISION DE PUERTO SERIAL ASINCRONO
9	RB3/CCP1		RB3 ENTRADA/SALIDA PUERTO B CCP1 FUNCION CAPTURA/COMPARA/PWM
10	RB4/PGM		RB4 ENTRADA/SALIDA PUERTO B PGM SEÑAL DE PROGRAMACION DE BAJO VOLTAJE
11	RB5		RB5 ENTRADA/SALIDA PUERTO B
12	RB6/T1OSC0/T1CLK1/PGC		RB6 ENTRADA/SALIDA PUERTO B T1OSC0 SALIDA DE OSCILADOR DE TIMER 1 PGC ENTRADA DE PROGRAMACION CLOCK ICSP
13	RB7/T1OSC1/PGD		RB7 ENTRADA/SALIDA PUERTO B T1OSC1 ENTRADA OSCILADOR TIMER 1 PGD ENTRADA DE DATOS DE PROGRAMACION ICSP
14	VDD		VOLTAJE 5 VOLTS
15	OSC2/CLKOUT/RA6		OSC2 ENTRADA OSCILADOR CRISTAL 4 MHZ CLKOUT SI HAY OSCILADOR RC EXTERNO, SALIDA 1/2 DE FRECUENCIA RA6 ENTRADA/SALIDA BIDIRECCIONAL
16	OSC1/CLKIN/RA7		OSC2 ENTRADA OSCILADOR CRISTAL 4 MHZ CLKIN ENTRADA OSCILADOR EXTERNO RC RA7 ENTRADA/SALIDA PUERTO A
17	RA0/AN0		RA0 ENTRADA/SALIDA PUERTO A AN0 ENTRADA ANALOGICA 0
18	RA1/AN1		RA1 ENTRADA/SALIDA PUERTO A AN1 ENTRADA ANALOGICA 1

## 3.5 Descripción PWM

### 3.5.1 Modulación por ancho de pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, siglas en inglés de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea

para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente [10]

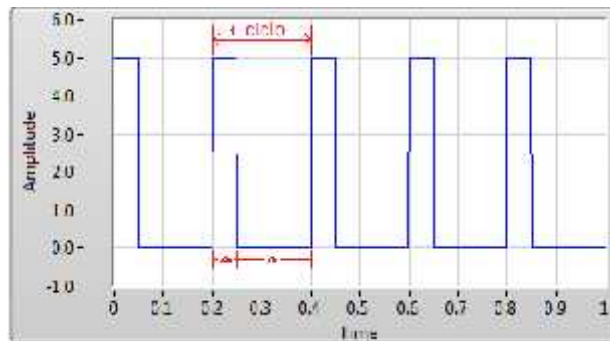
$$D = \frac{\mathcal{E}}{T} \quad (3.1)$$

$D$  es el ciclo de trabajo

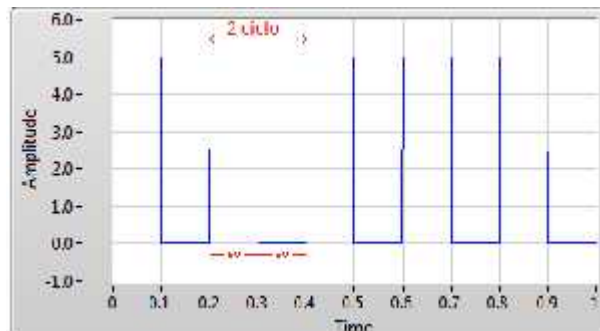
$\mathcal{E}$  es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)

$T$  es el período de la función

A continuación se muestran algunos gráficos demostrando señales PWM con diferentes ciclos de trabajo  $D$



*Figura 3.8 ciclo de trabajo al 25% [14]*



*Figura 3.8: ciclo de trabajo al 50% [14]*

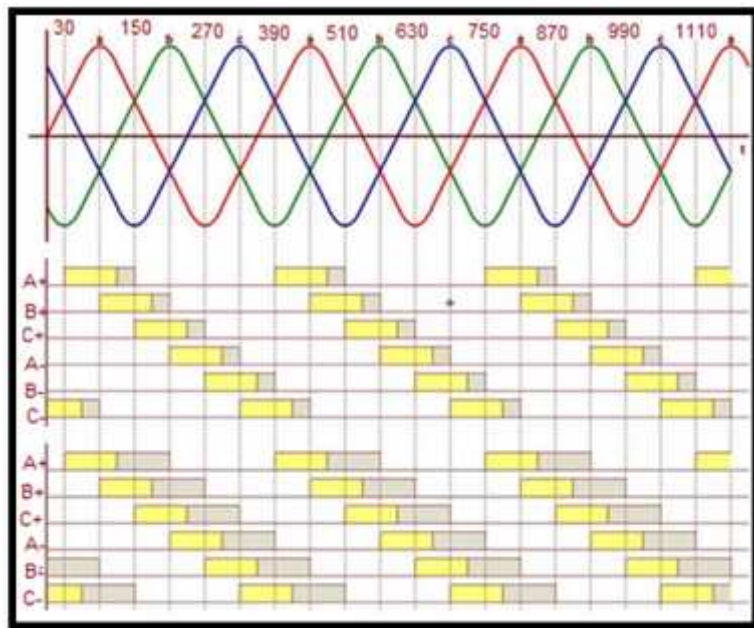
### 3.5.2 Características de disparo de tiristores utilizando (PWM)

El (PWM) es el corazón del circuito ya que se encargó generar pulsos de voltaje de ancho variable a partir de los cuales se crean las señales de disparo de los tiristores. Esto se hace

utilizando su amplificador de error como comparador entre un voltaje de referencia y un voltaje entregado por el circuito de control.

Se debe recordar que estas señales no se pueden enviar directamente a los tiristores, sino que deben ser acopladas por medio de opto acopladores u otro dispositivo. Se debe tener mucho cuidado en que la señal no salga invertida del dispositivo que acople.

La razón para que las señales de control tengan un rango de hasta 180 grados, pero solo manejen un alfa hasta 120 grados, es que se debe cumplir la condición de que deben haber al menos dos tiristores conduciendo. A continuación se realizara una comparación entre señales de control que tengan un rango de 120 grados y las señales que generan el circuito anterior que tienen un rango de 180 grados. Se realizara un análisis para un valor de alfa de 90 grados.



**FIGURA 3.10:** Graficas modulación ancho de pulso trifásico desfase  $\alpha = 90$  [2]

En este grafico el amarillo más el gris indican el rango de valor de alfa que puede ser alcanzado, en las primeras señales de control se observa que es de 120 grados, en las segundas señales de control se observa que es de 180 grados. El alfa en el grafico tiene un valor de 90 grados, se observa en la división entre el amarillo y el gris. En las señales de control de 120 grados se observa que la parte gris de las señales (que indica el pulso) nunca se solapa con otra, y la norma dicta que deben haber por lo menos dos tiristores (uno superior y uno inferior) con señal de control en uno para que haya algún voltaje en la salida, esto muestra que las primeras señales de control solo sirven para un control de alfa limitado a 60 grados, de 60

grados a 120 grados no funciona. En cambio en las señales de control de 180 grados se observa un solapamiento entre las zonas grises de control, lo cual indica un funcionamiento, que va desde un valor de alfa de 0 grados a 120 grados. Al realizar un análisis minucioso de la gráfica se observara que la señal de salida tendrá la forma correcta también.

Lo anterior explica porque se necesitan señales de control con un rango de la fa de hasta 180 grados, pero con un alfa limitado a 120 grados, además si por alguna razón se intenta llevar a un alfa mayor a 120 grados, no funcionaria, ya que no habría solapamiento entre señales de control.

### 3.5.3 Control ángulo de extinción

Para este caso el ángulo de control es el ángulo de extinción cuya particularidad es que se toma a partir de  $180^\circ$  hacia la izquierda. La componente fundamental de la corriente esta adelantada respecto al voltaje de entrada, y el factor de desplazamiento (así como el factor de potencia) está en adelanto. A continuación se muestra las señales de control correspondientes a esta técnica de control [2]:

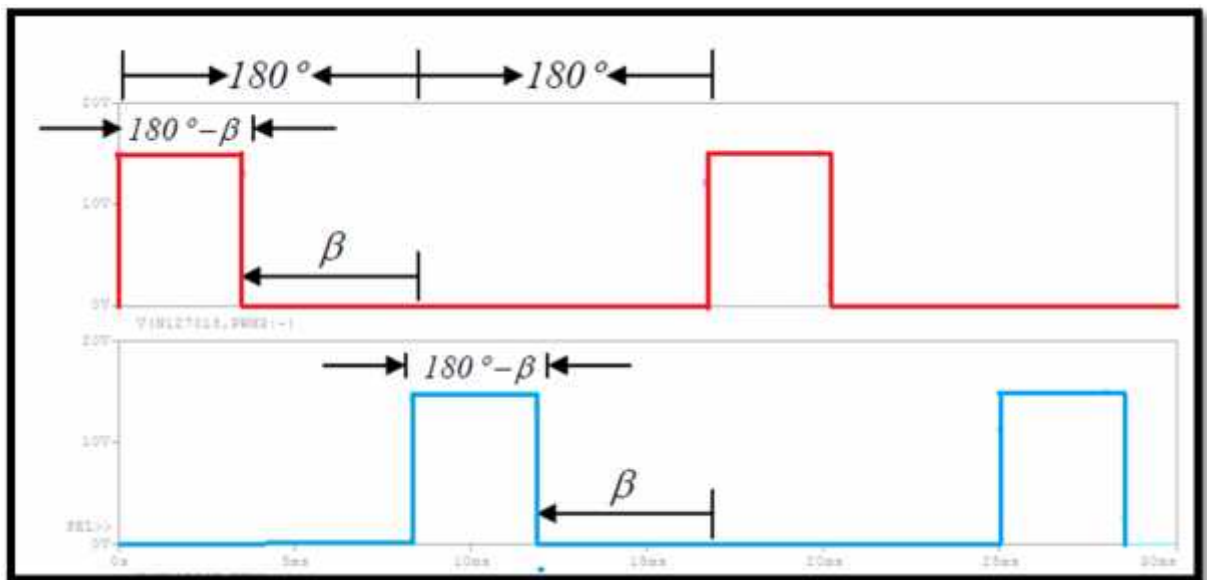


Figura 3.11: Control Angulo de extinción  $0 \quad 180 = \text{Angulo de extinción} = 180 - [2]$

Este tipo de control tiene prácticamente el mismo comportamiento del control por ángulo de disparo o ángulo de retraso, la diferencia radica en la forma de onda del voltaje de salida que se observa, presenta un recorte en la envolvente de la señal de entrada a la derecha y no a la izquierda como se observa en el control por ángulo de retraso.

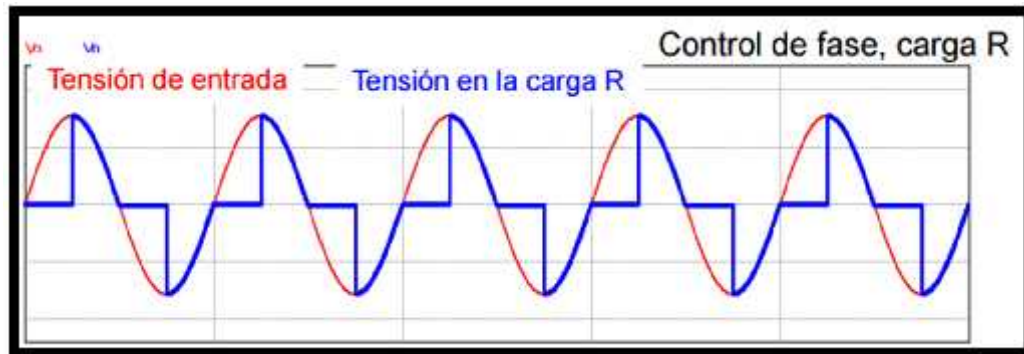


Figura 3.12: Control por ángulo de extinción [2]

### 3.6 Entorno de diseño y programación

#### 3.6.1 Software PIC C Compiler

PIC C Compiler es un inteligente y muy optimizado compilador C que contienen operadores estándar del lenguaje C y funciones incorporados en bibliotecas que son específicas a los registros de PIC, proporcionando a los desarrolladores una herramienta poderosa para el acceso al hardware las funciones del dispositivo desde el nivel de lenguaje C.

El compilador contiene más de 307 funciones integradas que simplifiquen el acceso al hardware, mientras que la producción eficiente y altamente optimizado código. Se incluyen funciones de hardware del dispositivo de características tales como:

- 🔧 Temporizadores y módulos PWM
- 🔧 Convertidores A / D
- 🔧 de datos on-chip EEPROM
- 🔧 LCD controladores
- 🔧 Memoria externa buses
- 🔧 Entre otras...



Figura 3.13: PIC C Compiler [11]

### 3.6.2 Programación Micro controlador utilizando PIC C Compiler

En general, una aplicación de lenguaje c pasa por seis etapas antes de ejecutarse, y cuando se trabaja con Microcontroladores, no es la excepción, estas etapas son: edición, preproceso, compilación, enlace, carga y ejecución. En la *figura 3.15* se muestra el desarrollo de las etapas de programa para un Microcontrolador.

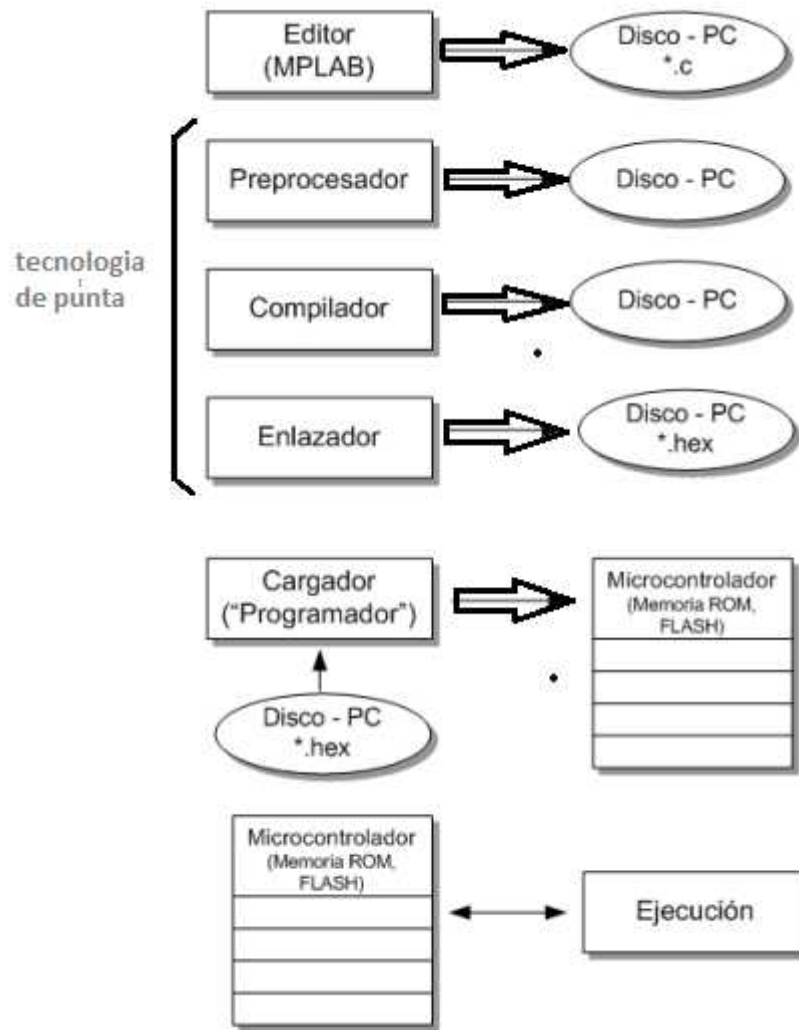


Figura 3.14: Diagrama de bloques programación Microcontrolador [11]

### 3.6.3 Detección de cruce por cero

A continuación se configuran las distintas partes para el diseño del circuito de pulsos, inicialmente se tiene que contar con una señal de entrada, detección de cruce por cero (DCC) la cual se utiliza como referencia para realizar el desfase y el disparo del circuito de potencia. El  $\mu C$  realiza inicialmente la conversión Análogo- Digital este proceso consiste en transformar una señal de voltaje analógico en un código o número digital, también llamado cuenta, este proceso tiene varias etapas. De acuerdo a la Fig.3.17, inicialmente se debe contar con la señal eléctrica que se ha de convertir, posteriormente viene el proceso de muestreo, que transforma la señal continua  $S(t)$  en una señal discreta  $S(k)$ , después el mecanismo llamado ADC (Analog to Digital Converter) realiza la transformación del voltaje analógico asignándole al voltaje de entrada un código binario. Este código puede ser de 8bit, 10bit, 12bit o 16bit. La salida del número binario se puede visualizar en los terminales de salida

digital del *Convertor Analógica Digital*, de acuerdo al tipo de convertor, éste poseerá por ejemplo 8 terminales de salida si es de 8bits



Figura. 3.15: Proceso de Conversión Análogo- Digital [AUTOR]

Internamente el *Convertor Analógica Digital* posee distintos mecanismos de conversión, los más comunes son los llamados de aproximación sucesiva, que pueden tener salida paralela o salida serial. El proceso de conversión requiere un tiempo, el que está dado por el  $t_c$  (tiempo de conversión) del sistema en conjunto con otros elementos que aportan retardos. De esta forma el tiempo de muestreo  $t_s$  (Sample Time) que establece cada cuanto tiempo es posible efectuar la digitalización, dependerá de la frecuencia de la señal a digitalizar, el tiempo que se demora el mecanismo en realizar la conversión [11].

Para la construcción de un circuito de disparo, se necesita una referencia para poder realizar el desfase este se obtiene con circuito detector de cruce por cero. Este circuito se encarga de establecer un punto de referencia entre el control que se realizará y la señal o señales de entrada, en éste caso dicha señal de entrada es una de las fases del sistema trifásico, sin este circuito el control que se realice no tendría un punto de partida y no se sabría con certeza a partir de qué punto de la señal de fase se aplicaría la señal de disparo para controlar la salida del rectificador, a continuación explicara como los PIC obtienen la señal de referencia AC de la red para poder realizar el desfase correcto.

Para llevar a cabo una conversión Analógica/Digital sin problemas así como para evitar los resultados inesperados, es necesario considerar lo siguiente:

- El convertidor Analógica/Digital no hace diferencia entre señales digitales y analógicas. Para evitar errores en medición o dañar el chip, los pines se deben configurar como entradas analógicas antes de que empiece el proceso de conversión. Los bits utiliza dos para este propósito se almacenan en los registros TRIS y ANSEL (ANSELH);
- Al leer el estado de puerto con las entradas analógicas, el estado de los bits correspondientes se leerá como cero lógico (0), sin reparar en el valor del voltaje real en el pin; y
- Hablando en términos generales, la medición de voltaje en el convertidor está basado en comparar voltaje de entrada con una escala interna que tiene 1023 grados ( $2^{10} - 1 = 1023$ ). El grado más bajo de esta escala representa el voltaje  $V_{ref-}$ , mientras que el grado más alto se refiere al voltaje  $V_{ref+}$ . La siguiente figura muestra los voltajes de referencia seleccionables así como sus valores máximos y mínimos



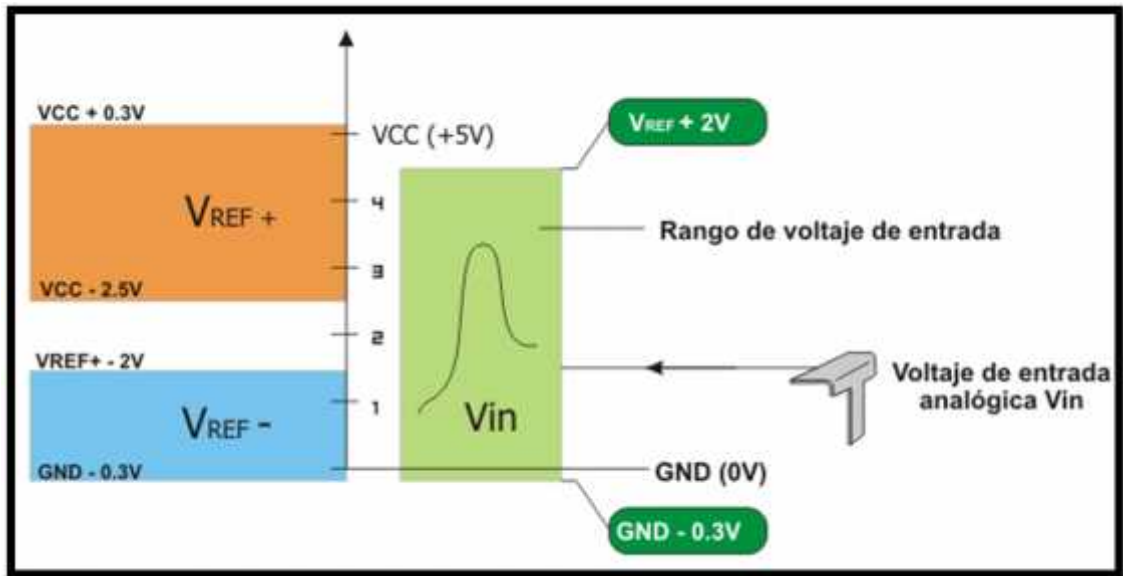
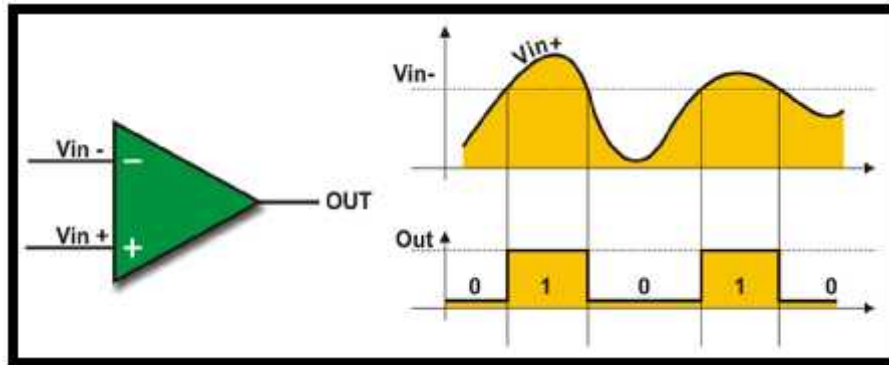


Figura 3.16: Voltajes de referencia máx.- min [12]

### 3.6.3.1 Comparador analógico digital

Aparte del convertidor Analógica/Digital, hay otro módulo, que hasta hace poco ha sido incorporado sólo en los circuitos integrados que pertenecen a los llamados “componentes analógicos”. Debido al hecho de que casi no hay ningún dispositivo automático complejo que en cierto modo no utilice estos circuitos, dos comparadores de alta calidad, junto con los componentes adicionales están integrados en el microcontrolador y conectados a sus pines.

¿Cómo funciona un comparador? Básicamente, el comparador analógico es un amplificador que compara la magnitud de voltajes en dos entradas. Dispone de dos entradas y una salida. Dependiendo de cuál voltaje de entrada es más alto (valor analógico), un cero lógico (0) o un uno lógico (1) (valores digitales) será la salida [12].



*Figura 3.17: comparador analógico de señal [12]*

- ✚ Cuando el voltaje analógico en  $V_{in-}$  es más alto que el voltaje análogo en  $V_{in+}$ , la salida del comparador estará a un nivel digital bajo.
- ✚ Cuando el voltaje analógico en  $V_{in+}$  es más alto que el voltaje análogo en  $V_{in-}$ , la salida del comparador estará a un nivel digital alto.

El microcontrolador PIC16Fxxx dispone de dos de estos comparadores de voltaje cuyas entradas están conectadas a los pines de E/S RA0-RA3, mientras que las salidas están conectadas a los pines RA4 y RA5. Además, hay una fuente de voltaje de referencia interna en el chip mismo.

### 3.6.4 Fuente interna de voltaje de referencia

Uno de dos voltajes analógicos proporcionados en las entradas del comparador es por lo general estable e inalterable. Es denominado 'voltaje de referencia' ( $V_{ref}$ ). Para generarlo, se pueden utilizar tanto una fuente de voltaje externa como una fuente de voltaje interna especial. El voltaje de referencia  $V_{ref}$  se deriva después de seleccionar una fuente, por medio de una red en escalera que consiste en 16 resistencias, formando un divisor de voltaje esto para medir los niveles de voltaje y poder seleccionarlos.

Además, la fracción de voltaje proporcionada por la red de resistencias es seleccionable por los bits VR0-VR3 y utilizada como voltaje de referencia. Vea la siguiente figura 3.20 [12]:

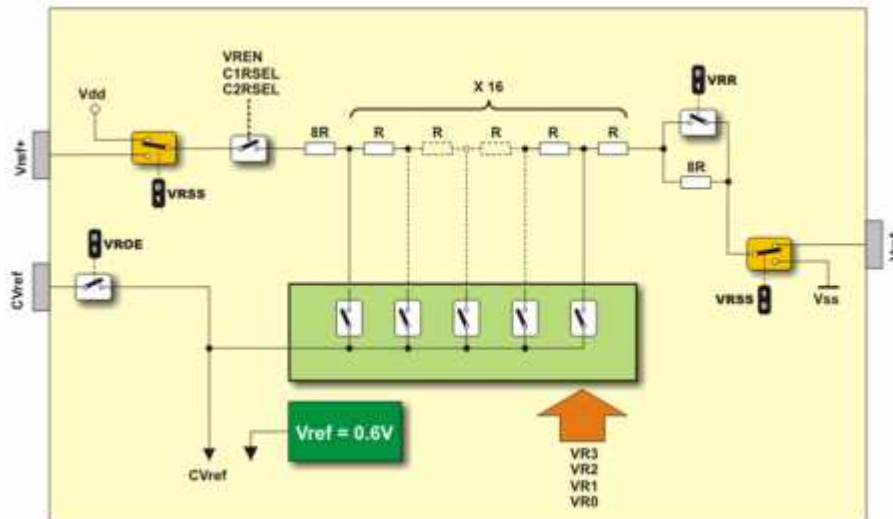


Figura 3.18 Red de resistencias comparadores [12]

De esta forma el *micro controlador* toma de la evaluación de los comparadores la referencia en el paso por cero de la señal analógica para poder realizar el desfase y el control del ángulo de disparo del dispositivo rectificador.

### 3.6.5 Adecuación canales Entrada/Salida Micro Controlador

Los canales analógicos se encuentran en el PORTA, mediante el TRISA se definen dichos bits como entrada. Mediante el ADCON0 y ADCON1, los cuales definen cuáles serán las entradas analógicas del PORTA en conjunto con la velocidad y el formato de la data (justificación a la derecha o la izquierda). La data resultante de la conversión se almacena en dos registros de 8 bits, ADRESH y ADRESL, de los cuales solo se usan 10 bits.

Mediante un simple potenciómetro se puede verificar el ingreso de una señal analógica la cual se verá en los terminales de salida a través de su equivalente digital. La programación está dada de acuerdo a la configuración de los siguientes registros:

Se define que canales analógicos a utilizar, los que están asignados al PORTA, para ello se configura el registro ADCON0.

- ) Se programa la frecuencia de operación del módulo, se usan los bits
- ) Se especifica la justificación de la data
- ) Se habilita el conversor ADON=1
- ) Se da inicio a la conversión GO=1
- ) Se espera que la conversión ha terminado. Se encuesta el bit GO, el cual pasa a 0 cuando la conversión está lista.
- ) Se leen los datos de los registros ADRESH: ADRESL y se almacenan en la variable que se ha definido para ello.

La siguiente función permite testear el canal cero del conversor, la cual es llamada desde el programa principal. La conversión es realizada por la función test\_adc (), la cual devuelve el valor convertido en la variable dato, dicha variable es visualizada en los terminales del PORTB y parte del PORTC. Esto dado que se requieren 10 bits. Este proceso de repite continuamente [12].

```
//Programación Conversor Análogo Digital
uns16 test_adc ()
{
uns16 d;
ADON=1;
GO=1; // inicio conversion
While (GO==1) {
} // Espera el DONE
d.high8=ADRESH;
d.low8=ADRESL;
Return (d);
}
Void main ()
{
uns16 dato;
TRISB=0x00;
TRISC.7=0;
TRISC.6=0;
TRISA=0xff;
ADCON0=0b10000000; // Configurando el ADC
ADCON1=0b10000000;
While (1)
{
Dato=test_adc ();
PORTB=dato.low8;
PORTC.7=dato.9;
PORTC.6=dato.8;
}
}
```

El programa test c verifica el funcionamiento del módulo ADC. Se debe considerar que no existe una temporización respecto del cada cuanto tiempo se produce el proceso de conversión.

### 3.6.6 Manejo de interrupciones

El manejo de las interrupciones en un  $\mu\text{C}$  puede resultar complejo, sin embargo, su implementación se ve simplificada dado que el fabricante del compilador usado provee un esquema basado en una función RSI (*Rutina de Servicio de Interrupción*) genérica la cual puede ser fácilmente modificada de acuerdo a los requerimientos del usuario. Cuando alguna de la fuentes de interrupción se activa, el programa en ejecución salta a la dirección 0x0004 (vector de interrupción), en esa dirección debe encontrarse la RSI. Dado que como pueden ser distintas las fuentes de interrupción y solo una función para atenderla, se debe recurrir al uso de los Interruptor Flag (banderas de interrupción), los cuales están asociados a las distintas fuentes de interrupción. Cada interrupción para su adecuado funcionamiento, requiere una habilitación y un proceso de configuración en algunos casos. Para ello se usan los registros OPTION\_REG (en CC5x es el OPTION), INTCON, PIE1 y PIR1. Adicionalmente PIE2 y PIR2 para otros periféricos.

Se debe incluir una biblioteca especial `int16XXX.h`, la cual permite el manejo de las interrupciones. Dado que existen 3 fuentes de interrupciones se deben configurar los bits de dichas fuentes como entrada. La programación se basa en lo siguiente, primero se configura en el módulo principal la fuente de interrupción a utilizar. Una vez finalizado este proceso se habilitan las interrupciones a través de los *flags* correspondientes. El  $\mu\text{C}$  procederá entonces a realizar las tareas habituales que no requieren de interrupción, habitualmente se usa un *Loop* infinito mediante un ciclo *while (1)*. Cuando ocurre la interrupción, se resetea la banda correspondiente a la fuente de origen y el programa salta a la dirección `0x0004`. En dicha dirección se encuentra la RSI, dentro de dicha función se debe inicialmente salvar los registros actuales, debe encuestarse el flag correspondiente a la fuente de interrupción, dado que está en 1, mediante un *if* es sencillo, sin embargo, después de terminada la atención debe hacer un Reset al flag, para permitir una nueva interrupción. Al terminar de ejecutar la RSI, esta restaura los registros y vuelve al programa principal.

```
// Manejo de interrupciones
#include "int16CXX.H"
#pragma origin 4 // instala la RSI en la dirección 0x0004
Interrupts rsi (void)
{
int_save_registers // W, STATUS (and PCLATH)
// En esta zona se debe preguntar por
// El flag de interrupción correspondiente
int_restore_registers // W, STATUS (and PCLATH)
}
Void main ()
{
// Configurar la fuente de interrupción
// Habilitar las interrupciones
While (1)
{
// Otras tareas
}
}
```

### 3.6.7 Características Programación PWM

El PWM (*Pulse Width Modulation*) es una señal muy utilizada principalmente para el control de motores de CC. El PWM consiste en una señal cuadrada que forma un tren de pulsos, cuyo ancho puede ser variado por el usuario manteniendo el periodo original. El concepto radica en que el ancho de pulso permite variar el valor medio de la señal generada (también llamado valor de corriente continua). Este tipo de señales puede ser generado usando los temporizadores en conjunto con las interrupciones disponibles del micro controlador o usando el módulo compilador PWM. Este módulo funciona en conjunto con el timer2, el proceso de interrupción involucrado es transparente para el usuario [11].

#### 3.6.7.1 Generación de un PWM

El concepto es el siguiente, se requiere una variable que almacene la duración del periodo, una variable que almacene el ciclo de trabajo y un terminal de salida que permite visualizar

la señal. Esto en conjunto con un contador que cuenta ciclos de reloj producido por un temporizador.

De esta forma, se pone el terminal de salida en 1, la base de tiempo generada por cada canto de reloj interrumpe, cada interrupción incrementa en uno el contador, si la cuenta es menor al ciclo de trabajo, el terminal de salida se mantiene en 1, sino baja a 0. El contador se sigue incrementando por cada interrupción, pero ahora se pregunta si la cuenta es menor o igual al largo del periodo, es decir, si la cuenta es menor que el largo del periodo, se mantiene el bit de salida en el estado actual, sino, significa que se cumplió el periodo y por lo tanto el contador se hace cero, el bit de salida se hace 1 y se repite el proceso. El ancho del pulso se maneja cambiando el valor de la variable correspondiente. Lo mismo para el periodo.

Dependiendo de la frecuencia y la resolución que se requiera del PWM, puede usar algunos de los temporizadores disponibles, ya sea el Timer 0 o el Timer 1[11].

### **3.6.7.2 Programación canal UART**

Se debe programar el módulo. Los terminales de transmisión y recepción están ubicados en el PORTC y corresponden al PORTC.6, para la PIN TX y PORTC.7 para la RX. Se deben configurar los bits como entrada y salida respectivamente mediante el registro TRISC. Como cualquier módulo, requiere de la programación de un conjunto de registros. Los métodos de TX y RX pueden ser combinados con mecanismos de interrupciones con el fin de mejorar el funcionamiento del proceso de transferencia de datos.

Los registros de configuración básicos involucrados son TRISC, SPBRG, TXSTA, RCSTA. Para la transmisión y recepción de datos se usan los registros TXREG, RCREG y los flags de interrupción para determinar cuándo ha sido transmitido o recibido un dato TXIF y RCIF [11].

### **3.6.8 Programación circuitos de seis pulsos**

Se han expuesto algunas generalidades de la programación de los *micro controladores*, y que de esta forma, poder deducir las expresiones para las diferentes rutinas utilizadas en la programación del circuito de pulsos, dentro del diseño contamos con dos referencias diferentes de micros, para el propósito deseado, para ello tenemos el PIC16f788 el cual llamaremos *indicador*, y el PIC16f628 el cual llamaremos *controlador*, estos diferentes nombres solo con el objetivo de diferenciar la programación de cada uno.

Inicialmente se observara los códigos referentes a la programación del micro llamado *generador*. Para este se utiliza en principio la declaraciones necesarias de donde se va a conectar cada pin del LCD al PIC este dispositivo es el encargado de mostrar la variación que se produce en el ángulo de disparo, y esta forma saber en qué punto de trabajo estamos realizando el pulso. El PIC generador contiene el código para recibir el voltaje del potenciómetro, acondicionarlo de 0 a 180, enviar dicho dato por el puerto serial hacia el PIC de *controlador* y mostrar los datos en el LCD. El código se mostrará posteriormente.

Creo que en esta etapa no hay mucho que explicar, se detallará mejor cuando se explique el código de cada PIC.

#### **Habilitación de pines del LCD**

```
Sbit LCD_RS at RB0_bit; (pin 33)
Sbit LCD_EN at RB1_bit;
Sbit LCD_D4 at RB2_bit;
Sbit LCD_D5 at RB3_bit;
Sbit LCD_D6 at RB4_bit;
Sbit LCD_D7 at RB5_bit; (pin 38)
Sbit LCD_RS_Direction at TRISB0_bit;
Sbit LCD_EN_Direction at TRISB1_bit;
Sbit LCD_D4_Direction at TRISB2_bit;
Sbit LCD_D5_Direction at TRISB3_bit;
Sbit LCD_D6_Direction at TRISB4_bit;
Sbit LCD_D7_Direction at TRISB5_bit;
```

A continuación se mostrara las distintos códigos de programación, con su respectivo objetivo esto para tener un observación más clara sobre la programación realiza para lograr el desempeño deseado del dispositivo.

#### **ALIAS DEL PIN DONDE ESTÁ CONECTADO EL BOTÓN DE ENCENDIDO**

```
Sbit boton at RCO_bit; (pin 15) / conmutar el boton
```

#### **DEFINIR UNA FUNCIÓN PARA EL ANTI REBOTE DEL BOTÓN**

```
Void antirrebote (); // permite que solo se detecte un solo pulso no varios
```

#### **DEFINIR UNA FUNCIÓN PARA OBTENER EL ÁNGULO DEL CONVERTOR ADC**

```
Unsigned short angulo (); //variable global
```

```
Void main () {
```

#### **INICIAR LA VARIABLE EN CERO definición de variables**

```
Unsigned short ang=0;
```

#### **CADENA DE CARACTERES PARA MOSTRAR ÁNGULO Y PORCENTAJE EN EL LCD**

```
Char tx t [7], txt1 [7]; // declaración de texto de que se va a mostrar 8bit
```

#### **INDICAR EL LCD EL ADC Y LA COMUNICACIÓN**

```
lcd_init (); // Inicialización del visualizador LCD
```

```
adc_init (); // Inicialización de la conversión
```

```
uart1_init (9600); // inicializacion interface cada número de unidades de señal por segundo
```

```
Delay_ms (100);
```

#### **APAGAR EL CURSOR (QUE NO SEA VISIBLE)**

```
Lcd_Cmd (_LCD_CURSOR_OFF); Comando LCD (apagar el cursor)
```

#### **LIMPIAR EL LCD Y MOSTRAR LA PRESENTACIÓN POR 2 SEGUNDOS**

```
Lcd_Cmd (_LCD_CLEAR); Comando LCD (borrar el LCD)
```

```
lcd_out (1,2,"-- Enmanuel --"); // Definir el primer mensaje
```

```
lcd_out (2,2," -- U-T-P --"); // Definir el segundo mensaje
```

```
Delay_ms 2000); //tiempo de cambio del mensaje de inicio
```

```
While (1) { // lazo infinito
```

#### **APAGAR EL CONTROLADOR ENVIANDO 180**

Inicio:

```
UART1_write (180); // enviarlo atrás
```

```
If (boton==0) {contador
```

```
    Antirrebote ();
```

```
    Goto fase; instrucción de salto incondicional
```

```
}
```

```
//mostrar el ángulo y el texto
```

```
IntToStr (angulo (), txt);
```

```
Lcd_Cmd (_LCD_CLEAR); Comando LCD (borrar el LCD)
```

```
lcd_out (1,1,"Esperando inicio:"); Definir el primer mensaje
```

```
lcd_out (2, 1, txt);
```

```
lcd_out (2,9,"grados");
```

```
Delay_ms (200);
```

#### **REGRESAR A INICIO, PARA ESTAR ENCERRADO EN ESTA RUTINA**

```
Goto inicio;
```

Fase:

#### **SI SE PRESIONA EL BOTÓN IR A INICIO**

```
If (boton==0) {
```

```
    Antirrebote ();
```

```
    Ang=0;
```

```
    Goto inicio;
```



```
}
```

#### **OBTENER EL ÁNGULO MEDIANTE LA FUNCIÓN**

```
Ang=angulo ();
```

#### **ENVIAR EL ANGULO POR EL MÓDULO UART**

```
UART1_write (ang);
```

#### **CONVERTIR EL NÚMERO A TEXTO PARA MOSTRAR EN EL LCD**

```
IntToStr (ang, txt); conversión de datos en palabras
```

#### **ACONDICIONAR A PORCENTAJE Y CONVERTIR A TEXTO**

```
IntToStr (100-ang*0.56, txt1);
```

#### **LIMPIAR EL LCD Y MOSTRAR LAS VARIABLES Y EL TEXTO**

```
Lcd_Cmd (_LCD_CLEAR);
```

```
lcd_out (1, 10, txt);
```

```
lcd_out (1,1,"Angulo:");
```

```
lcd_out (2, 10, txt1);
```

```
lcd_out (2,1,"Porcentaje:");
```

#### **SON LOS SÍMBOLOS DE ° Y DE %**

```
lcd_chr (1, 16,223); //habilitar la comunicación
```

```
lcd_chr (2, 16,37);
```

```
Delay_ms (100);
```

#### **ENCERRAR EN EL CICLO FASE**

```
Goto fase;
```

```
}
```

```
}
```

#### **//FUNCIÓN PARA EL ANTIRREBOTE DEL BOTÓN**

```
Void antirrebote () {
```

```
While (boton==0);
```

```
Delay_ms (100);
```

```
}
```

#### **//OBTENER LA LECTURA DEL ADC (0-1023) Y ACONDICIONAR A (0-180)**

```
Unsigned short angulo () {
```

```
Unsigned short ang;
```

```
Ang=adc_read (0)*0.177; //Resultado de la conversión A/D es copiado al angulo
```

```
Return ang;
```

```
}
```

Los propósitos de esta programación con los siguientes que observamos en la figura 3.21

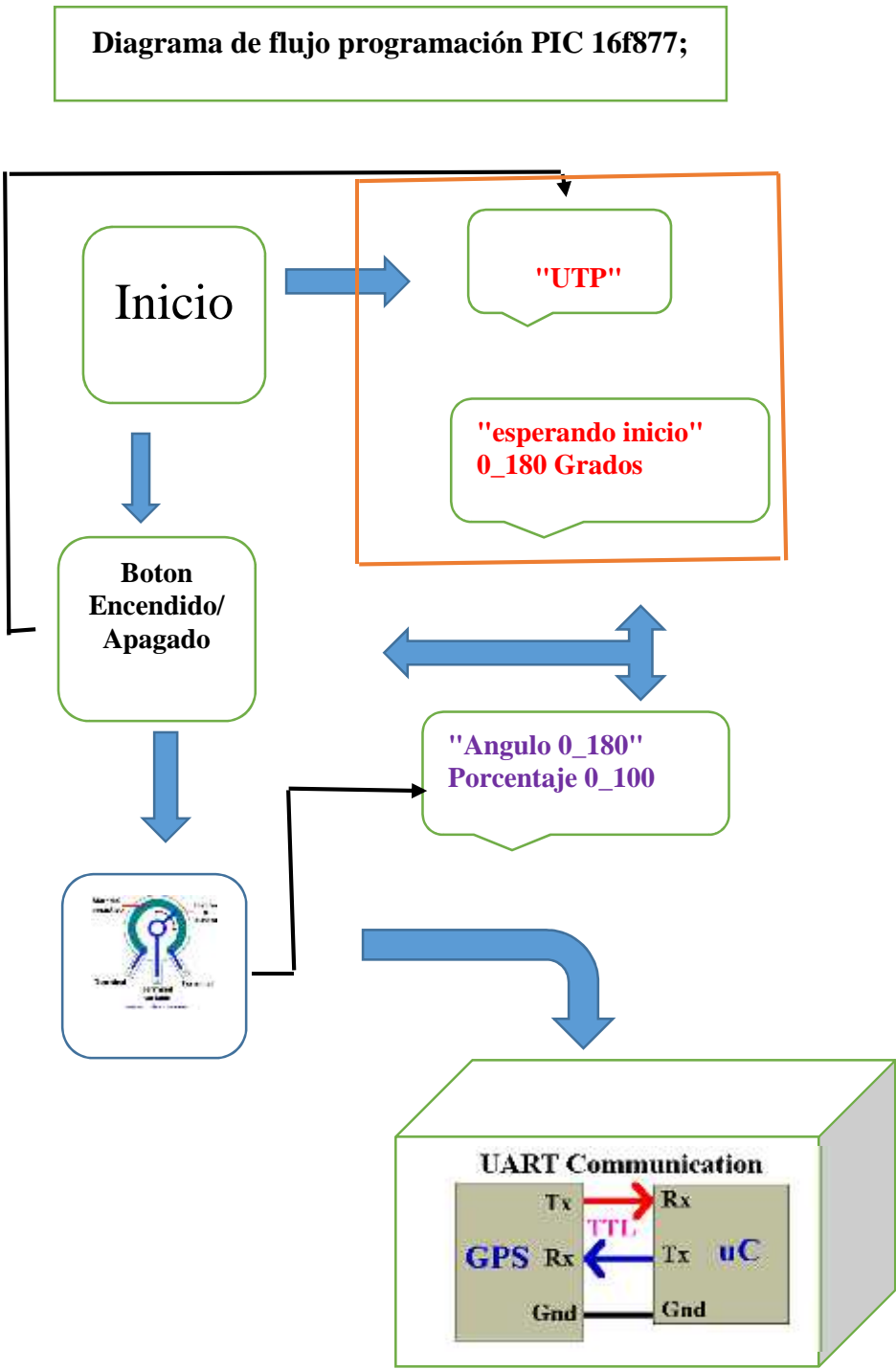


Figura 3.19: Diagrama de bloques funciones ejecutadas PIC16f877 [AUTOR]

Este diagrama cuenta con las partes principales de la programación, entre ellas esta inicialmente la activación de los pines para la implementación de las ordenes, tenemos el inicio en el cual el dispositivo es energizado con una tensión de trabajo DC en un rango 5v a 12v, al entrar en punto de trabajo, se puede visualizar en el LCD la palabra "UTP" y seguido de esto da paso a otro mensaje ("*esperando inicio*"; *0\_180 Grados*) el cual se mantiene hasta pulsar el boton de inicio este seguido al control del angulo de disparo el que se puede observar el LCD de esta forma ("*Angulo 0\_180*";*Porcentaje 0\_100*) en la figura 3.22 se muestra LCD en funcionamiento con un  $\theta = 69^\circ$  y un punto de trabajo del 61%.



*Figura 3.20: Pruebas de funcionamiento Display LCD [AUTOR]*

Esto se desarrolla para esta etapa del diseño la otra etapa del diseño la cual fue implementada con el  $\mu\text{C}$  **PCI 16f628** que llamaremos *FUENTE* tenemos inicialmente la fase de acople que se realiza por medio de los puertos de comunicación. USART PIC, viene de receptor transmisor síncrono asíncrono universal, es una forma de comunicación entre dispositivos que tengan esta capacidad, donde los datos son enviados en grupos de 8 bits o de 9 bits pero bit por bit[11], esto es en serie, por eso se dice que esta es una comunicación serial, en esta sección se comentará sobre este tipo de comunicación utilizando el módulo USART del microcontrolador PIC, con el módulo USART PIC el microcontrolador puede comunicarse e intercambiar datos con el ordenador, con otros Microcontroladores, etc.

En resumen se explicara en qué consiste esta etapa: fuente Es donde se habilita la programación de control del ángulo de disparo . recibe por el PIN RB0 la señal de alterna, para generar una interrupción en la detección de cruce por cero. El pin está conectado a la entrada por un divisor de tensión para reducir el voltaje y aislarlo de la red. El pin RB1, que es el pin de recepción del módulo UART del PIC es por donde recibe el dato del ángulo deseado, a este pin se conectará cualquier equipo con el que se desee manejarlo, por ejemplo: la pc, etc., en este caso otro PIC. Se está usando el módulo propio para la comunicación, por lo que la información es gestionada por el hardware del PIC y no desde el software.

Para ello tenemos los siguientes códigos con su respetiva identificación en cuanto a sus funciones;

```
Sbit scr1 at portb.b3; (pin 9)
```

```
Sbit scr2 at portb.b4; (pin 10)
```

#### **DECLARACIÓN DE LA FUNCIÓN DONDE SE EJECUTARÁ LA INTERRUPCIÓN**

```
Void Interrupts (void);
```

#### **VARIABLES PARA EL ANGULO,**

#### **CONTADOR PARA EL TIEMPO DE ESPERA, DATO QUE RECIBE SERIAL**

```
Unsigned short ang=180, i=0, dato=180;
```

```
Void main () {
```

#### **INICIAR EL MÓDULO UART1 A 9600 BAUDIOS número de unidades de señal por segundo**

```
uart1_init (9600); Inicializar el módulo USART
```

```
scr1=0;
```

```
scr2=0;
```

```
Delay_ms (100);
```

#### **DECLARACIÓN PARA LA INTERRUPCIÓN**

```
//INTCON=0b00010000; 16 estado lógico //EMPIEZA SIN INTERRUPCIÓN
```

**La asignación puede ser hecha en decimal, hexadecimal, binario o carácter (si es que se conoce). La Tabla 2, indica el formato binario para el compilador CC5X**

```
OPTION_REG=0b11000000; Ajustar el temporizador
```

```
trisb=0b11100011; los 227 bits (estado lógico habilita pines de salida y entrada
```

```
scr1=0;
```

```
scr2=0;
```

#### **//EJECUTAR INFINITAMENTE**

```
While (1) {bucle infinito
```

#### **//PREGUNTA SI SE RECIBIÓ ALGÚN DATO POR EL MÓDULO UART (SERIAL)**

```
If (UART1_Data_Ready () == 1) {si se ha recibido un dato
```

#### **// GUARDAR EL DATO RECIBIDO EN LA VARIABLE DATO**

```
Dato = UART1_Read (); leerlo y guardarlo
```

#### **SI EL ÁNGULO ES 180, APAGAR LOS SCR'S Y DESACTIVAR LA INTERRUPCIÓN**

```
If (dato==180) {
```

```
scr1=0;
```

```
scr2=0;
```

```
INTCON=0b00010000; 16 bits // Habilitada interrupción
```

```
}
```

**VALIDAR EL RANGO ACEPTABLE ENTRE 0-180 Y ASIGNAR EL DATO A LA VARIABLE ANGULO  
ADEMÁS ACTIVAR LA INTERRUPCIÓN VALIDACIÓN ADICIONAL**

**DETECTOR DE FLANCO**

```
If (dato>=0 & dato<180) {  
    Ang=dato;  
    INTCON=0b10010000; Habilitada interrupción  
}  
}  
}  
}
```

**CUANDO SE GENERE LA INTERRUPCIÓN (CRUCE POR CERO)**

```
Void Interrupts () {
```

**APAGAR LOS SCR'S**

```
scr1=0; scr2=0;
```

**BORRAR LA BANDERA DE INTERRUPCIÓN Y ACTIVAR LA INTERRUPCIÓN**

```
INTCON=0b10010000; Habilitada interrupción
```

**PARA SABER SI LA INTERRUPCIÓN FUE POR FLANCO POSITIVO O NEGATIVO**

```
If (OPTION_REG.INTEDG==1) {
```

**REALIZAR UN RETARDO DE ACUERDO AL NÚMERO DE GRADOS**

**CADA RETARDO TIENE 46 US, LO QUE CORRESPONDE A 1 GRADO**

```
For (i=0; i<ang++) {  
    Delay_ms (40); proporciona un tiempo de retardo  
}
```

**DESPUÉS DEL RETARDO ACTIVAR EL SCR1 (SEMICICLO POSITIVO)**

```
scr1=1;
```

**SI SE DETECTÓ EN EL FLANCO POSITIVO, CAMBIAR EL BIT PARA DETECTAR EL FLANCO NEGATIVO**

**ASÍ DETECTAMOS EL SEMICICLO POSITIVO Y NEGATIVO**

```
OPTION_REG.INTEDG=0;
```

```
}
```

**LO MISMO PARA EL FLANCO NEGATIVO (SEMICICLO NEGATIVO), CON EL SCR2**

```
Else {  
    For (i=0; i<ang; i++) {  
        Delay_ms (44); proporciona un tiempo de retardo  
    }  
}
```

```
scr2=1;
```

```
OPTION_REG.INTEDG=1; habilita configuración de interrupción
```

Para ingresar la programación los PIC's utilizamos un programador k150 para poder ingresar los códigos anteriormente mencionados a los  $\mu$ C el cual se muestra en la *figura 3.23*.



:

*Figura 3.21: Programador k150 PIC [AUTOR]*

## 3.7 Consideraciones principales de diseño

### 3.7.1 Etapas para el control de fases

Este es el circuito de un conversor AC/AC, el cual se basa en manipular la potencia entregada al circuito mediante el control del ángulo de disparo de los SCR's o TRIAC's para variar la señal que se entrega a la carga.

Se basa en utilizar el RMS de la señal de alterna, al modificar la forma de onda de la señal de alterna, se varía el RMS que es el valor eficaz de voltaje entregado a la carga, de ahí que ocurre la variación de la potencia en la carga, al variar el ángulo de disparo del SCR.

Para este control como se puede observar, se debe esperar un tiempo desde el "inicio" de la señal hasta cuando decidimos activar los tiristores, y esto dependerá del ángulo, que se requiera establecer.

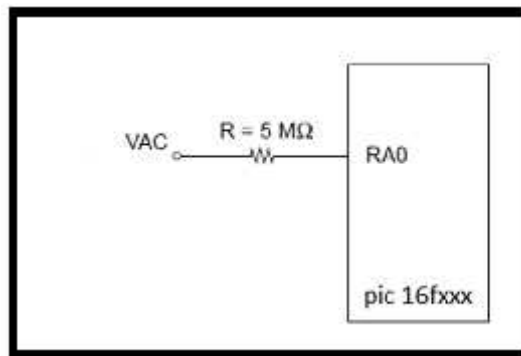
Etapas de ***cruce por cero*** encontramos el inicio de la onda, como puede verse, el ángulo de disparo se cuenta desde que la señal está en cero voltios. A esto citamos como detección de cruce por cero, es decir, encontrar el momento en que la señal de alterna se encuentra en cero voltios, para empezar a contar el tiempo de acuerdo al ángulo fijado, de esta forma podemos obtener la señal de referencia de varias maneras, por ejemplo:

Reducir el voltaje mediante resistencias o transformadores y aplicarle a un Optocoplador, cuando el led se apague el voltaje es cero y la salida del transistor será positiva. (Asumiendo fototransistor como inversor).

Reducir el voltaje y rectificar para aplicar la señal directamente a un conversor *ADC* o comparador del PIC y detectar mediante la programación utilizando detección de flancos. Circuitos de comparación con amplificadores operaciones, el cual fue utilizado para este diseño.

El funcionamiento básico es que el PIC al tener protecciones en las entradas, para sobretensión, posee diodos recortadores, por lo que al entrar un voltaje mayor a  $V_{cc}$ , lo recorta a una tensión constante de la fuente.

Eso sí, debemos colocar una resistencia en serie para limitar la corriente, pues el pin podría quemarse por exceso de corriente. No debe superarse los 25 mA que soportan los pines.



*Figura 3.22: Pin entrada de señal de referencia [12]*

Entonces al poder aplicar la señal de alterna directamente, y como se recortará la señal a partir de un divisor de tensión obteniendo 12 voltios, para lograr apartar de la *ADC* una señal que tiende a ser cuadrada, y podemos usar una interrupción para detectar el flanco positivo (semiciclo positivo) o el flanco negativo (semiciclo negativo), que será cuando la señal vaya a cero voltios, y de este modo hemos detectado el cruce por cero mediante una interrupción.

Me parece el mejor método, pues se requiere exactitud al momento de detectar el cruce, y mediante la interrupción se detectara inmediatamente, asegurando exactitud en los tiempos de espera para el disparo.

Para calcular el *divisor de tensión* para la reducción de la magnitud de la tensión en la referencia cruce por cero utilizamos la siguiente expresión.

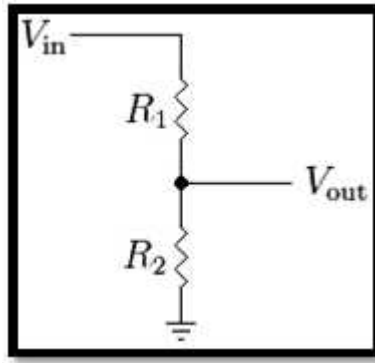


Figura 3.23: Divisor de tensión resistivo [11]

$$V = \frac{R_2 V_{in}}{R_1 + R_2} \quad (4.1)$$

Ángulo de disparo Para iniciar el disparo de los SCR's, debemos esperar un tiempo de acuerdo al ángulo  $\alpha$ , recordando que la onda sinusoidal completa tiene 360 grados, por lo que el semiciclo positivo tendrá 180 grados y el negativo los 180 restantes. En mi caso la señal de alterna es de 110 Vrms a 60 Hz. Mediante regla de 3 podemos obtener el tiempo que se requiere esperar por grado.

Calculamos el período de la onda:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 16.66 \text{ ms} \quad (4.2)$$

Como vamos a trabajar en cada semiciclo, dividimos el período en los 2 semiciclo.

$$T = \frac{T}{2} = 8.33 \text{ ms} \quad (4.3)$$

Con estos datos, mediante regla de tres podemos determinar el tiempo que requiere cada grado. Ese será el tiempo que debemos esperar según el ángulo deseado.

$$180 \text{-----} 8.33 \text{ms} \quad X = \frac{8.3}{1} \text{ ms} = 0,04629 \text{ ms} = 46.29 \mu\text{s} \quad (4.4)$$

1°----- X

Entonces cada grado equivale a 46.29  $\mu\text{s}$ , es decir que si queremos un ángulo de disparo de 90 grados, debemos esperar 4.16 ms (46.29  $\mu\text{s}$  \* 90).

Para el *acoplamiento a la etapa de potencia*, por motivos de seguridad, debemos mantener aisladas galvánicamente la parte de control de la parte de potencia. Es decir, ninguna parte



del control debe tener contacto eléctrico con la señal de alterna (parte de potencia), por eso para realizar este aislamiento, se usará opto acopladores, en este caso, optotriac's, así aislaremos eléctricamente ambas etapas.









## Capítulo 4

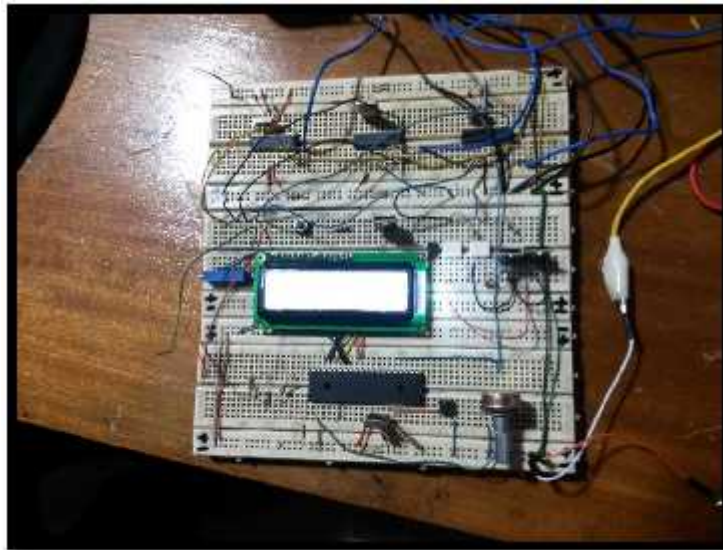
### 4.1 Pruebas y análisis de resultados obtenidos

A continuación se muestran los resultados obtenidos de cada una de las pruebas realizados, para verificar el correcto desempeño del dispositivo. Se muestran los circuitos de potencia tanto monofásicos como trifásicos, que se desarrollaron para las diferentes pruebas, obteniendo las formas de ondas rectificadas requeridas, para estas pruebas de funcionamiento y compararlas con las señales obtenidas mediante las simulaciones en *Proteus 8*

### 4.2 Modelo de circuito generador de seis pulsos

En la *figura 4.1* podemos observar los distintos componentes que se utilizaron para la construcción del circuito de pulsos entre ellos tenemos;

-  (1) Micro controlador PIC 16f877A
-  (3) Micro controladores PIC 16f877
-  (1) LCD
-  (1) Potenciómetro 2k ohm
-  (1) Potenciómetro Trimpot 20 Vueltas Horizontal Rectangular
-  (4) Cristales osciladores
-  (1) Pulsador
-  Resistencias



*Figura 4.1: Circuito de pulsos pruebas protoboard [AUTOR]*

El dispositivo cuenta inicialmente con tres etapas de control, una para cada fase del sistema trifásico (R, S, T), para cada fase contamos con un *micro controlador* PIC 16f628, este dispositivo electrónico es el encargado de recibir la señal de referencia derivada de la red, cuenta con un divisor de tensión resistivo para llevar la referencia a un valor de voltaje, que pueda ser soportado por los *micro controladores*, se debe utilizar en cada uno un oscilador externo. Todo microcontrolador requiere un circuito externo que le indique la frecuencia que debe trabajar. Para realizar la variación del ángulo de disparo contamos con el PIC16f877 este realiza la comunicación entre el potenciómetro y los PIC 16f628. Este recibe la orden de cambio y procede a la conversión de la señal tanto para el semiciclo positivo como el negativo, como se observa en la *figura 3.13* esto se realiza para cada fase del sistema trifásico, resumiendo de esta forma se logra la variación del ángulo de disparo .

*Figura 4.3* se observa Módulo de seis pulsos en su implementación final el cual cuenta con las siguientes partes;

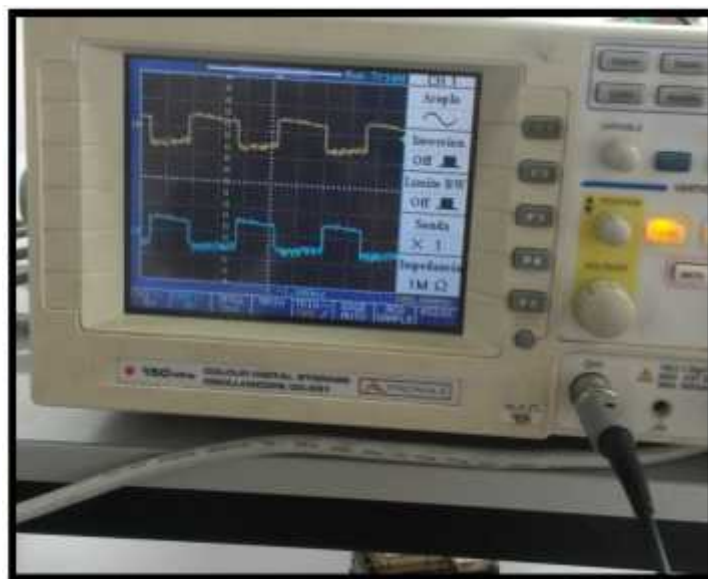
1. Entrada de alimentación DC (5V-12V)
2. Entrada señal de referencia cruce por cero R, S, T
3. Display LCD
4. Botón de inicio
5. Salida de señal de desfase semiciclo positivo y negativo +R,-R;+S,-S;+T,-T.
6. Potenciómetro (control angulo de disparo)



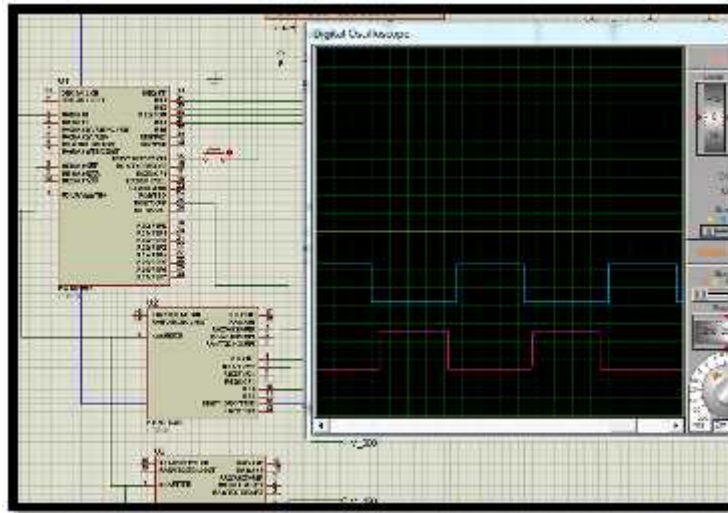
*Figura 4.2: Módulo circuito de seis pulsos [AUTOR]*

La Figura 4.3 se puede observar en el osciloscopio las señales de disparo PWM +R,-R con un desfase de  $=80^\circ$ .

En la Figura: 4.4 se puede apreciar los resultados para la señal respetiva a la simulación, obteniendo resultados similares a los alcanzados en el osciloscopio.



*Figura 4.3: Señal de control de disparo (PWM) [AUTOR]*



*Figura 4.4: Señal de control de disparo simulación (PWM) Proteus 8[AUTOR]*

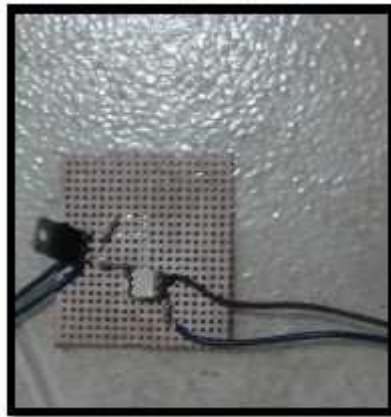
En la *Figura 4.5*; Se tiene el circuito rectificador semi controlado se realizaron las Pruebas de funcionamiento de circuito de potencia monofásica con carga resistiva para hacer esta prueba contamos con los siguientes componentes:

- ✚ Optocoplador MOC 3021(Aislador circuito de potencia)
- ✚ Triac BTA 12-6008
- ✚ Resistencia 220
- ✚ Resistencia 470
- ✚ Módulo de disparo de seis pulsos.

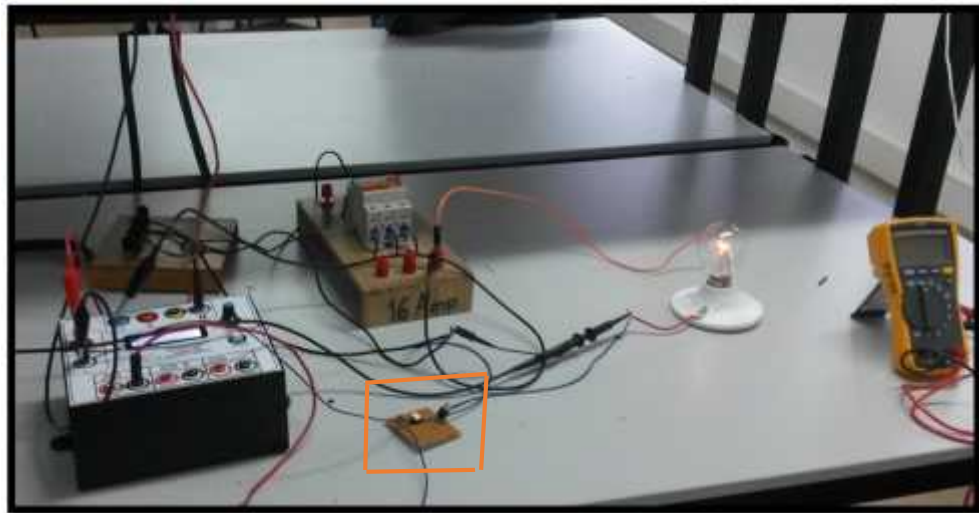
Para esta prueba se utiliza una placa electrónica perforada, para soldar los elementos anteriormente mencionados. A continuación se muestran las señales obtenidas en las pruebas. Se debe tener cuidado para cada una de las pruebas aislado eléctricamente la alimentación de la red, de la Etapa de potencia, para esto se utilizan transformadores monofásicos con una relación 120/24/12 para estas pruebas.

Para realizar el aislamiento necesaria entre la Etapa de potencia y el módulo de seis pulsos se deben utilizar *Optocoplador MOC 3021*, es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor activado mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente opto electrónico, normalmente en forma de fototransistor o foto triaca. De este modo se combinan en un solo dispositivo semiconductor, foto emisor y foto receptor cuya conexión entre ambos es óptica [10].

*Figura 4.5: circuito rectificador Monofásico de potencia semi controlado con Triac.*



*Figura 4.5: Circuito rectificador monofásico [AUTOR]*



*Figura 4.6: pruebas de funcionamiento circuito rectificador monofásico [AUTOR]*

Figura 4,7: Muestra las señales resultantes de disparo de la Simulación Proteus 8, para este circuito monofásico con Triac utilizamos un Bombillo como carga resistiva.

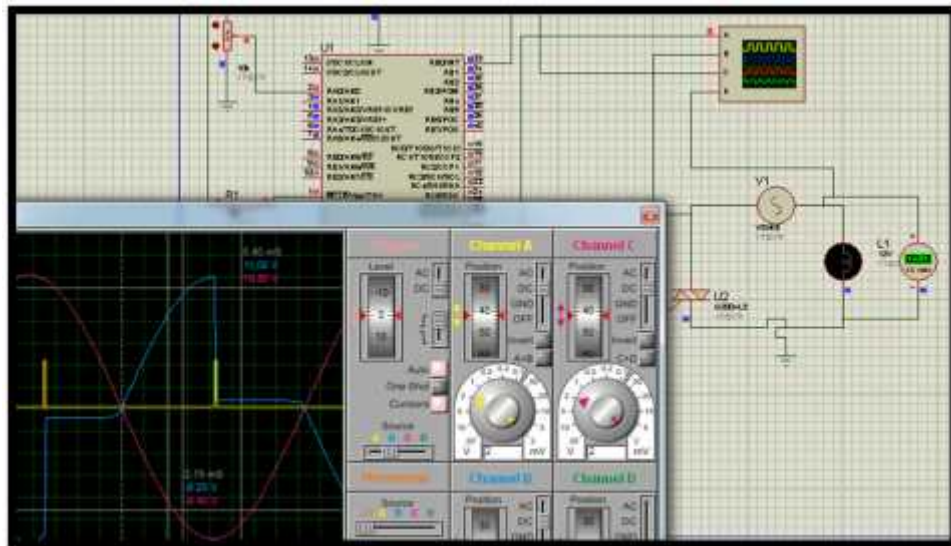


Figura 4.7: Simulación Proteus rectificador monofásico [AUTOR]

En la Figura 4.9: Podemos observar la similitud que existe entre la señal simulada en Proteus 8, y la obtenida mediante las prueba realizadas en el laboratorio, para un valor  $\alpha = 60^\circ$

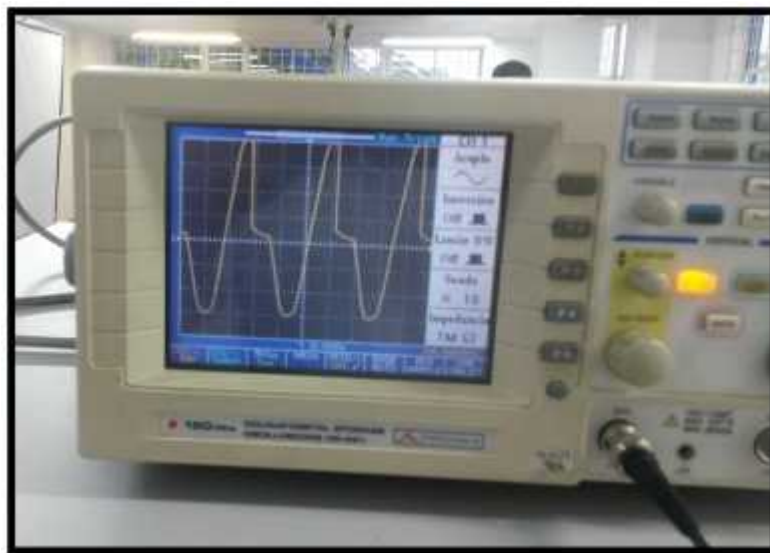


Figura 4.8: señal de control  $\alpha = 60^\circ$  semiciclo positivo

Descripción variación ángulo vs % voltaje







Angulo de disparo	Voltaje
0	120

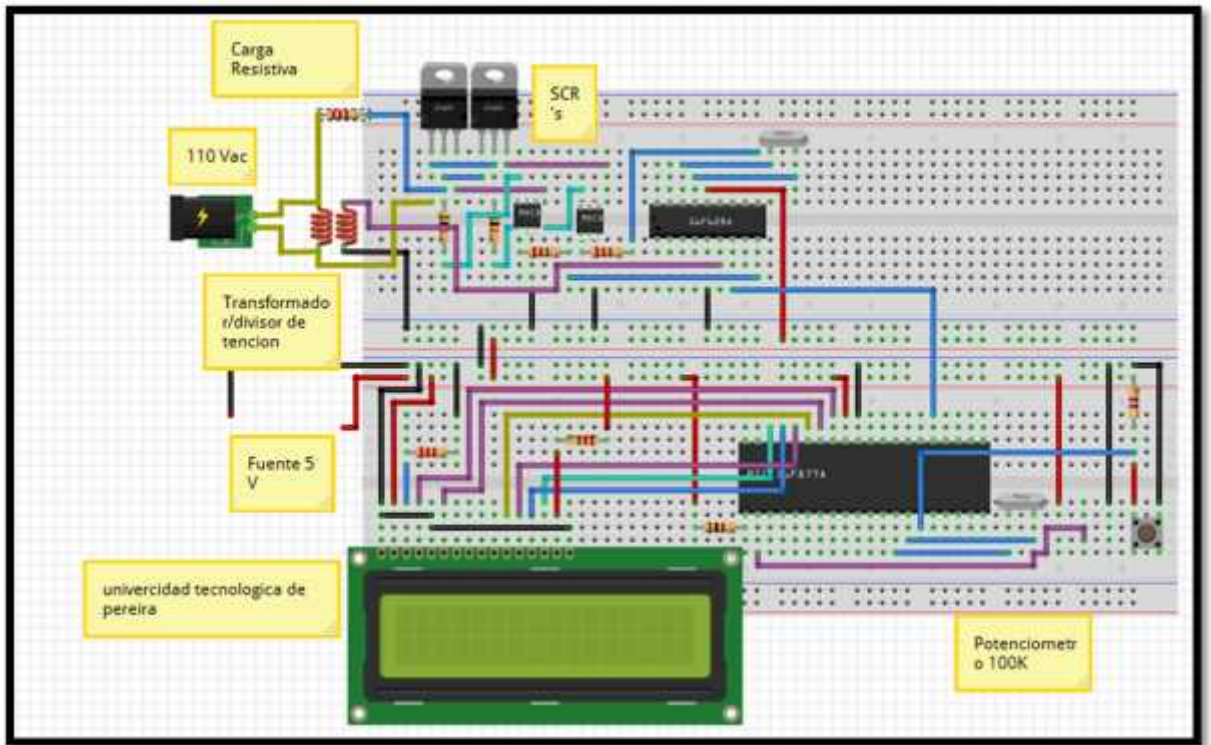
30	100
60	70
90	63
120	32
180	100m

### 4.3 Circuito de potencia para rectificador monofásico totalmente controlado

Como se dijo, se debe controlar cada semiciclo de la señal de alterna, por lo que cada salida se encarga de controlar cada uno de los SCR's para su respectivo semiciclo, como vemos cada SCR es disparado por un optro-triac, para aislar la señal de alterna de las salidas del PIC, pues por seguridad ambas etapas (potencia y control) no deben tener ninguna conexión física. El resto es el circuito de potencia donde R es la carga que se quiera poner (bombillo, motor etc.). Con esto ya tenemos listo la parte monofásica de módulo en la *figura 4.9* se observa un diagrama que representa el circuito rectificador monofásico tanto en su parte de control como de potencia que fue realizado en el programa Fritzing.

Para realizar estas pruebas contamos principalmente con los siguientes componentes para la etapa de potencia:

-  (2)Optocoplador MOC 3021(Aislador circuito de potencia)
-  (2)SCR's C106
-  (2)Resistencias 220 , 10k
-  (2)Oscilador de frecuencia
-  (1)Transformador
-  (1)Display LCD



*Figura 4.9 diagrama protoboard Fritzing [AUTOR]*

Continuando con las pruebas podemos observar los resultados obtenidos con un circuito rectificador monofásica totalmente controlado inicialmente en la *figura 4.10* tenemos las pruebas de simulación en Proteus 8 y la *figura 4.11* podemos observar las conexiones realizadas en laboratorio para esta prueba, para las *figura 4.12* ,*4.12* ,*4.13*, se muestran las señales resultantes para diferentes valores de .



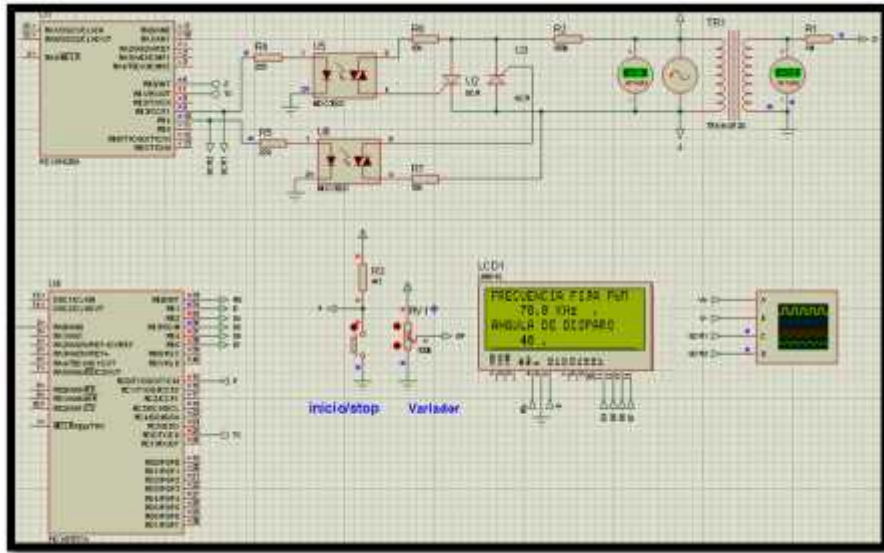


Figura 4.10: Simulación rectificador monofásica totalmente controlado con SCR's [AUTOR]

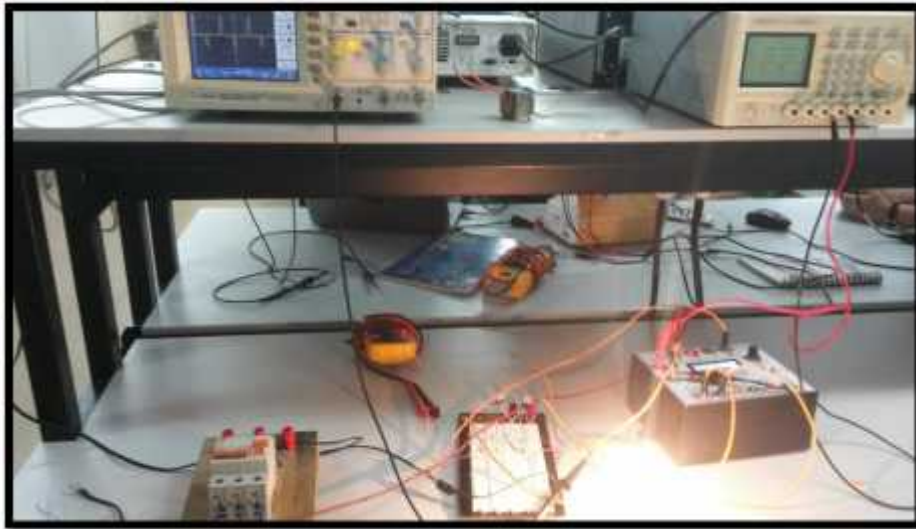
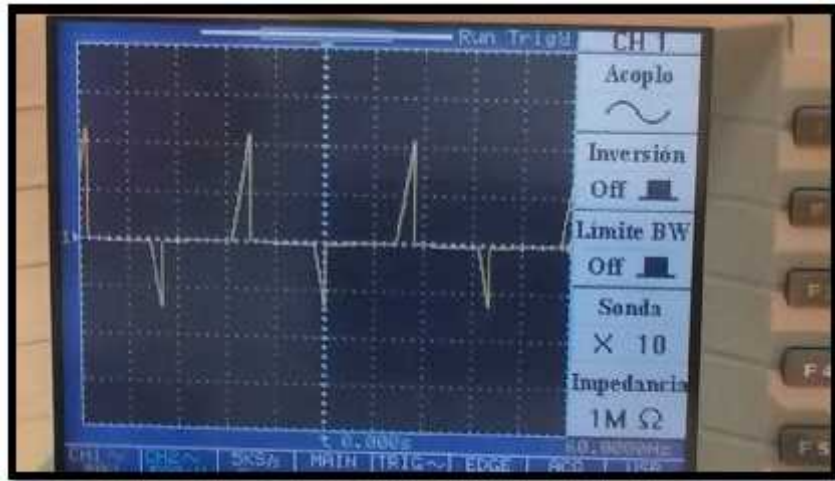
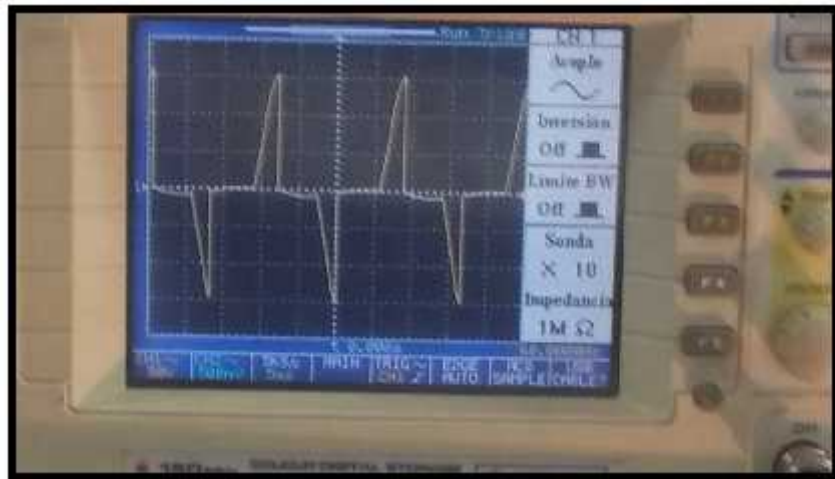


Figura 4.11: Pruebas circuito rectificador monofásica totalmente controlado [AUTOR]

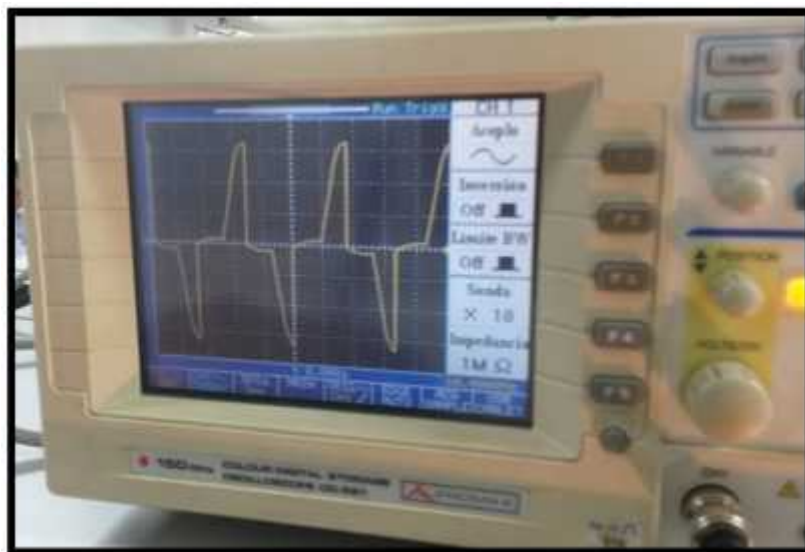
En las siguientes figuras se observan en osciloscopio diferentes señales para los valores de  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 60^\circ$ .



*Figura 4.12: Señal rectificada para un = 120[AUTOR]*



*Figura 4.13: Señal rectificada para un = 90 [AUTOR]*



*Figura 4.14: Señal rectificada para un  $\alpha = 60$  [AUTOR]*

#### 4.4 Circuito de potencia para rectificador trifásico semicontrolado

Continuando con las pruebas se realiza los ensayos referentes a los circuitos de potencia trifásico, primero se aran pruebas en un circuito rectificador trifásico semi controlado. Para esta prueba se tiene que tener algunas precauciones ya que se trata de un montaje que conlleva un punto de riesgo si no se tienen precauciones. Para realizar esta prueba inicialmente contamos con los siguientes elementos;

- ✚ Clavija trifásica
- ✚ Secuencimetro
- ✚ Protección trifásica 2A

La clavija es la que proporciona las salidas de las fases **R**, **S**, **T**, y **N** para obtener la salida adecuada, que se necesitan para esta prueba, en la *figura 4.15* se muestra las pruebas de secuencia que se deben realizar para la respetiva conexión. Para la etapa de acople en *figura 4.16* se muestra la conexión para los trasformadores monofásicos es necesaria para acoplar la parte de potencia a la alimentación trifásica.

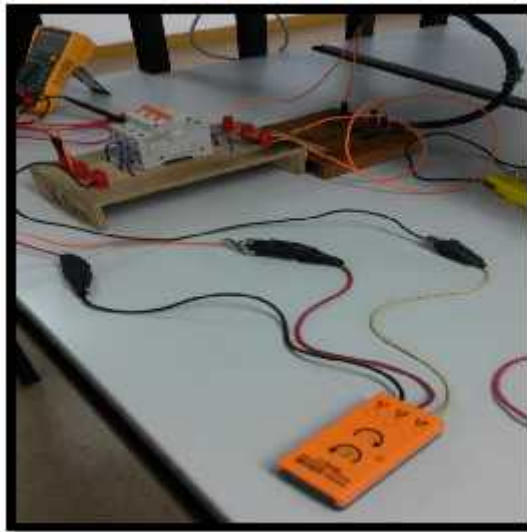


Figura 4.15.: Pruebas de secuencia [AUTOR]

Esta conexión nos brinda las salidas necesarias para el correcto desempeño del circuito de potencia, y aislar la Etapa de Potencia de la alimentación trifásica de la red.

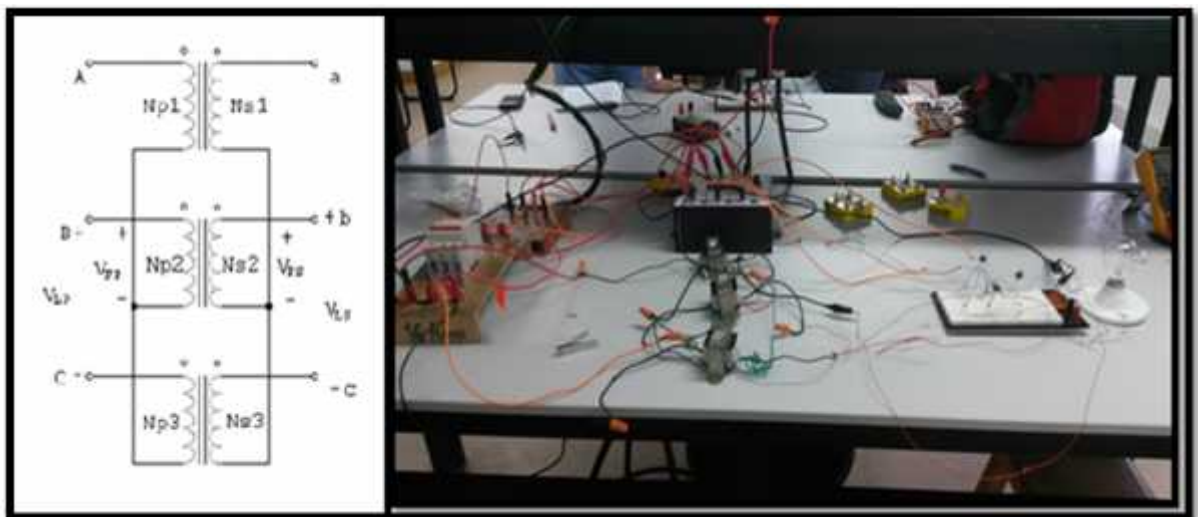





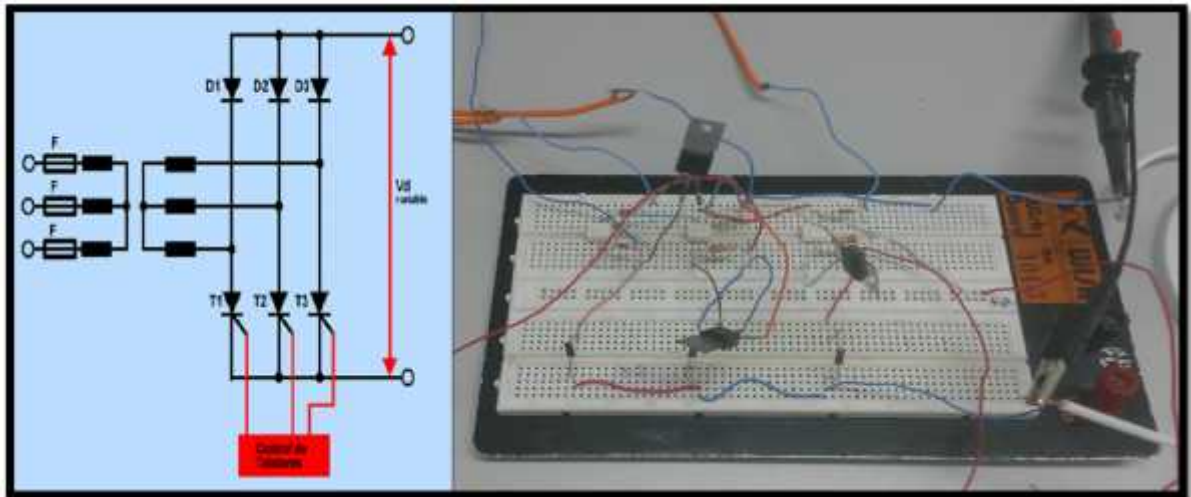
Figura 4.16 Conexión Y-Y [AUTOR]

En esta prueba se necesitaron algunos elementos para implementar la etapa de potencia entre ellos se utilizaron;

- 🔌 (3) Tiristores c 106
- 🔌 (3) Optocoplador MOC 3021(Aislador circuito de potencia)
- 🔌 (3) Diodos
- 🔌 (3) Resistencias 220

-  (3) Resistencias 1K
-  Carga resistiva bombillo 120v
-  Protoboard

Estos elementos se utilizaron para realizar el circuito rectificador semicontrolado que se observa en la *figura 4.1*.



*Figura 4.17: Rectificador trifásico semicontrolado [AUTOR]*

Realizando pruebas de simulación en Proteus 8, se observa el comportamiento de las señales cuando se realiza la variación del ángulo de disparo, teniendo en la *figura 4.18* la señal referente a la carga variando el ángulo  $\alpha$ . La cual podemos comparar con las pruebas realizadas en laboratorio que se muestran tanto en la *figura 4.19* como en la *figura 4.20*, para un mayor análisis de las señales resultantes en las pruebas.

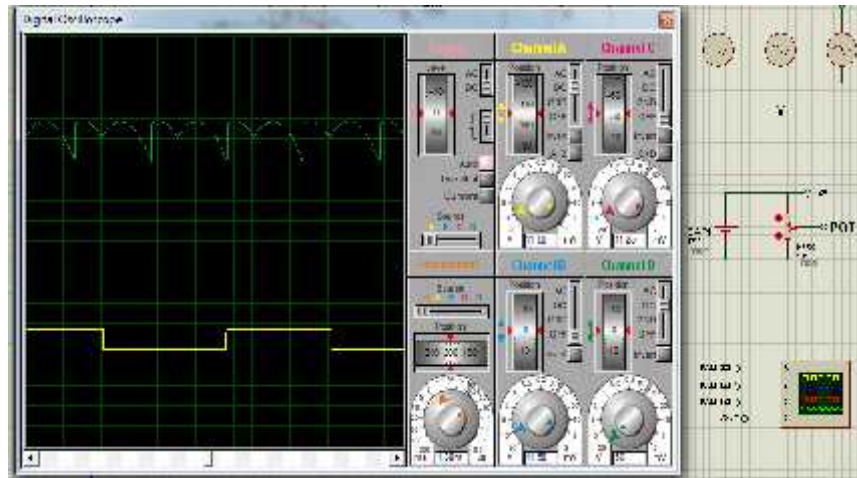


Figura 4.18: Señal en carga R rectificador trifásico semicontrolado simulación Proteus 8  $\alpha = 30^\circ$  [AUTOR]

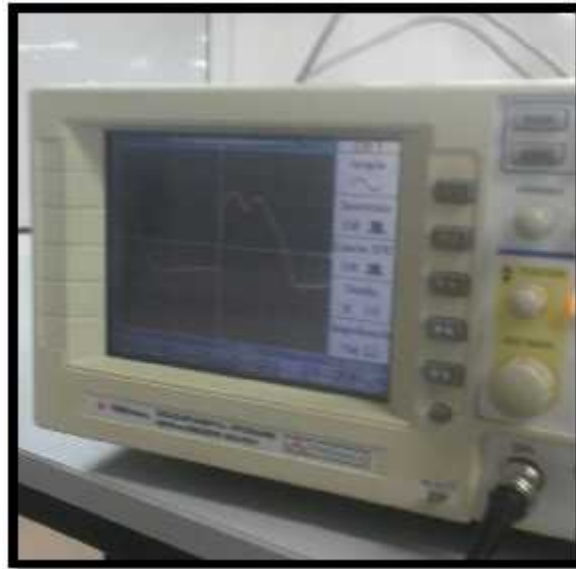
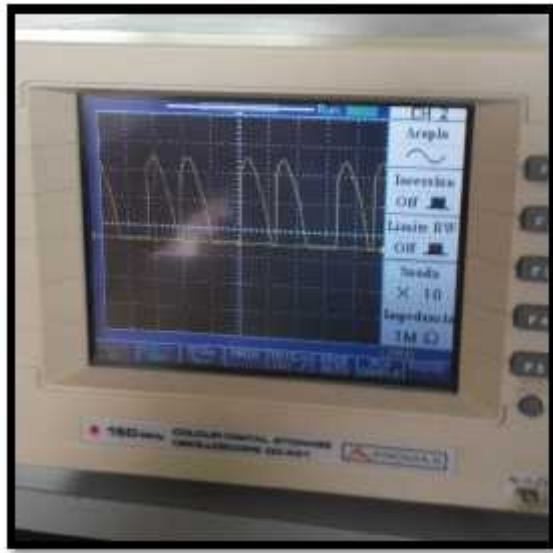
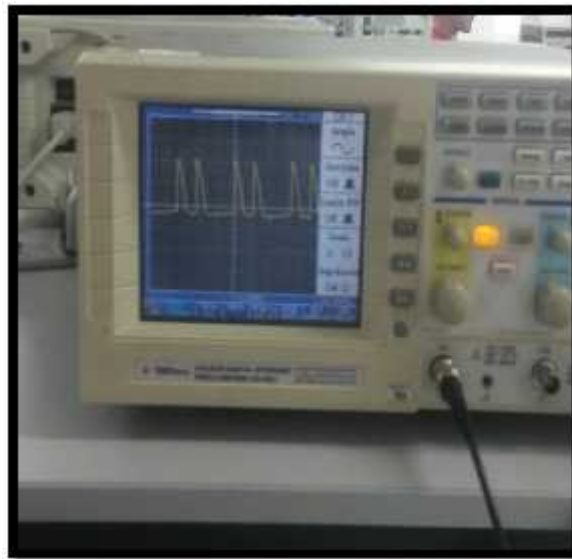


Figura 4.19 señal carga R rectificador semi controlado  $\alpha = 45^\circ$  [AUTOR]



*Figura 4.20: Señal carga R rectificador semi controlado  $\alpha = 70^\circ$  [AUTOR]*



*Figura 4.21: Señal de carga R rectificador semi controlado  $\alpha = 130^\circ$  [AUTOR]*



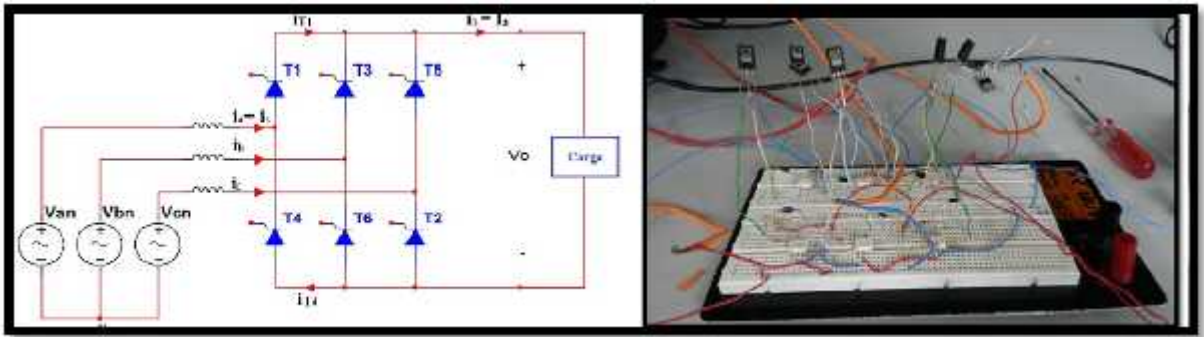
*Figura 4.22: Señal carga R rectificador semi controlado  $\alpha = 170^\circ$  [AUTOR]*

#### **4.5 Circuito de potencia para rectificador trifásico totalmente controlado**

Para la implementación de estas pruebas podemos observar en la figura 4.23 el diseño del circuito de potencia, para un puente rectificador totalmente controlado de 6 pulsos. Para realizar este montaje utilizamos los siguientes elementos;

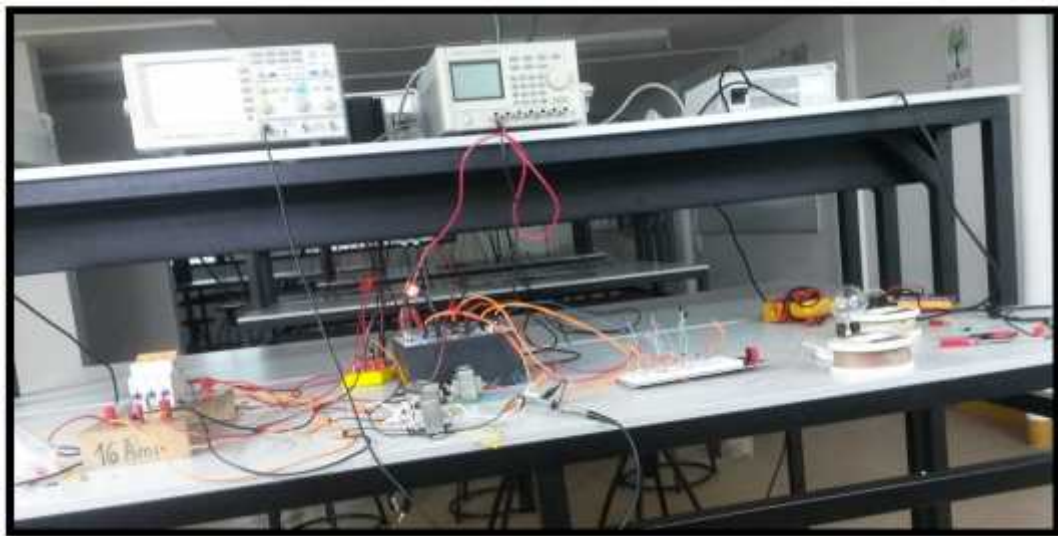
- ✚ (6) Tiristores c 106
- ✚ (6) Optocoplador MOC 3021(Aislador circuito de potencia)
- ✚ (6) Diodos
- ✚ (6) Resistencias 220
- ✚ (6) Resistencias 1K
- ✚ Carga resistiva bombillo 120v
- ✚ Carga inductiva 50mH
- ✚ Protoboard
- ✚ Transformadores monofásicos 120/24/12
- ✚ Módulo de disparo de seis pulsos
- ✚ Bombillo 120V/60W





**Figura 4.23:** Puente rectificador trifásico totalmente controlado [AUTOR]

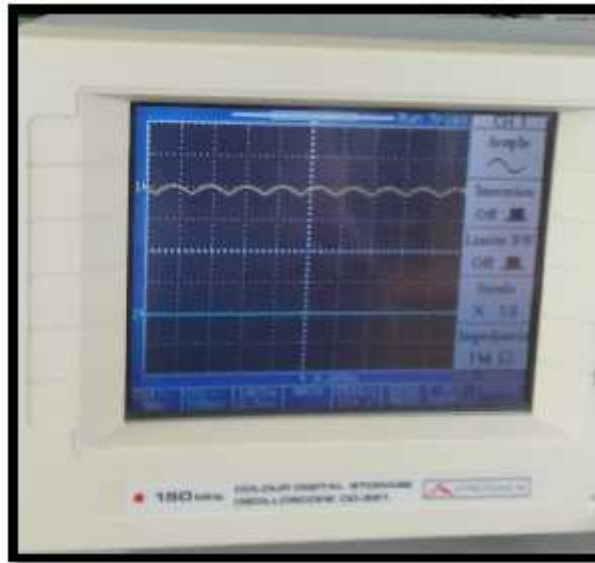
Se procede a realizar las pruebas respectivas para el puente rectificador totalmente controlado, para realizar la prueba se deben realizar las mismas conexiones que, se utilizaron para el circuito semicontrolado. Tanto para verificar la secuencia, como para aislar la etapa de potencia de alimentación de la red, se debe tener mucho cuidado con los puntos de conexión se debe aislar para evitar un accidente o daños en los equipos de laboratorio en la *figura 4.24*, se observan los elementos utilizados y como están conectados.



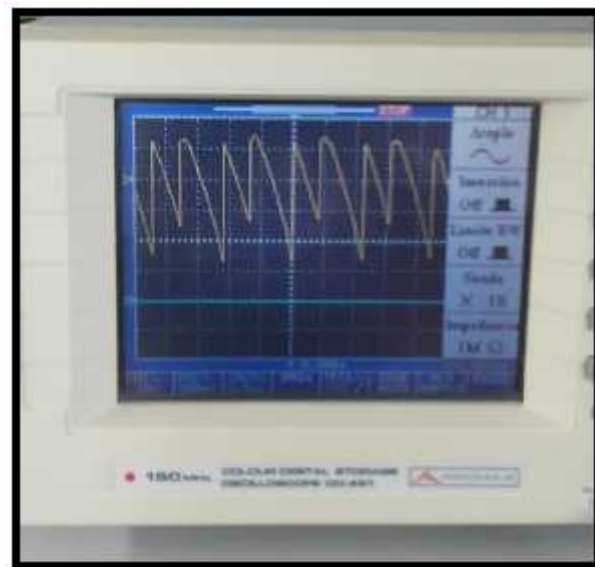
**Figura 4.24:** Montaje puente rectificador trifásico totalmente controlado laboratorio [AUTOR]

En la *figura 4.24* se observan en la parte superior un fuente DC este dispositivo es el encargado de alimentar el Módulo de seis pulsos, el cual es alimentado con 7.3 V y 2 A esta alimentación permite que el dispositivo funcione correctamente.

Inicialmente utilizamos una carga resistiva que podemos observar en la figura anterior, representada por un bombillo de 120V/60w para esta prueba contamos con las siguientes figuras para diferentes ángulos de disparo.



*Figura 4.25* señal rectificada para un ángulo de disparo  $=0^\circ$  [AUTOR]



*Figura 4.26:* señal rectificada para un ángulo de disparo  $=60^\circ$  [AUTOR]

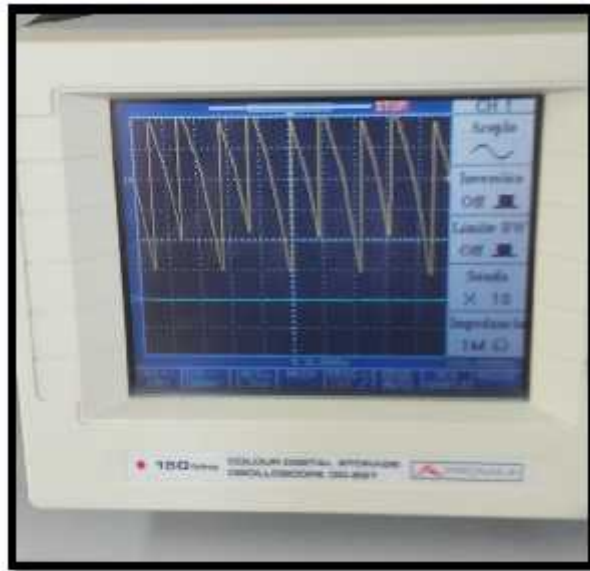


Figura 4.27: señal rectificada para un ángulo de disparo  $=90^\circ$  [AUTOR]

Para tener otra perspectiva de las señales resultantes para un puente rectificador totalmente controlado, se realiza el acople a la carga de una inductancia de 50mH, en este caso se desarrolla la prueba con una carga **RL** para estas pruebas puedes observar los resultados en las siguientes figuras;

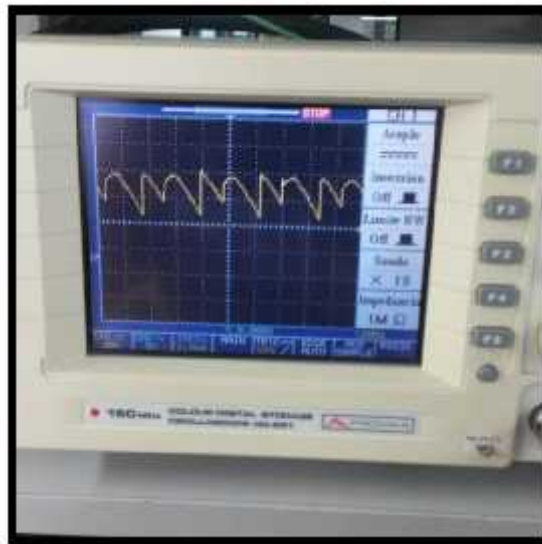
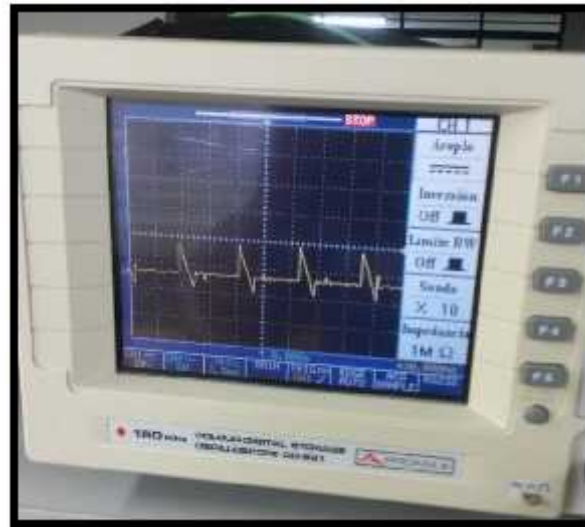


Figura 4.28: Señal rectificada para un ángulo de disparo  $=45^\circ$  con Carga RL [AUTOR]

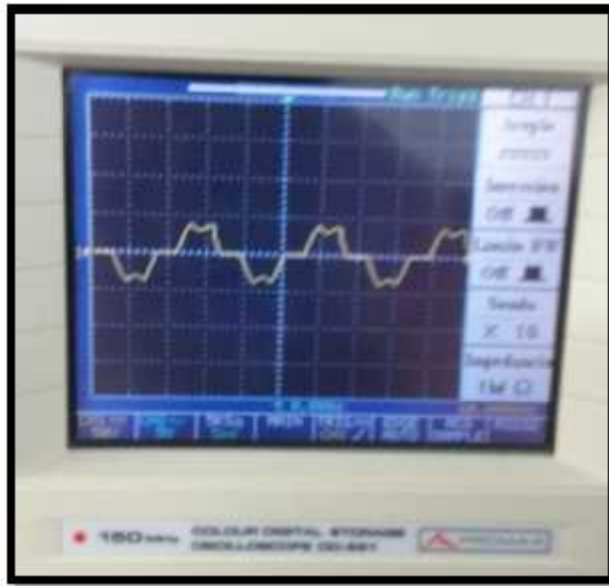


**Figura 4.29:** Señal rectificada para un ángulo de disparo  $=90^\circ$  con Carga RL [AUTOR]



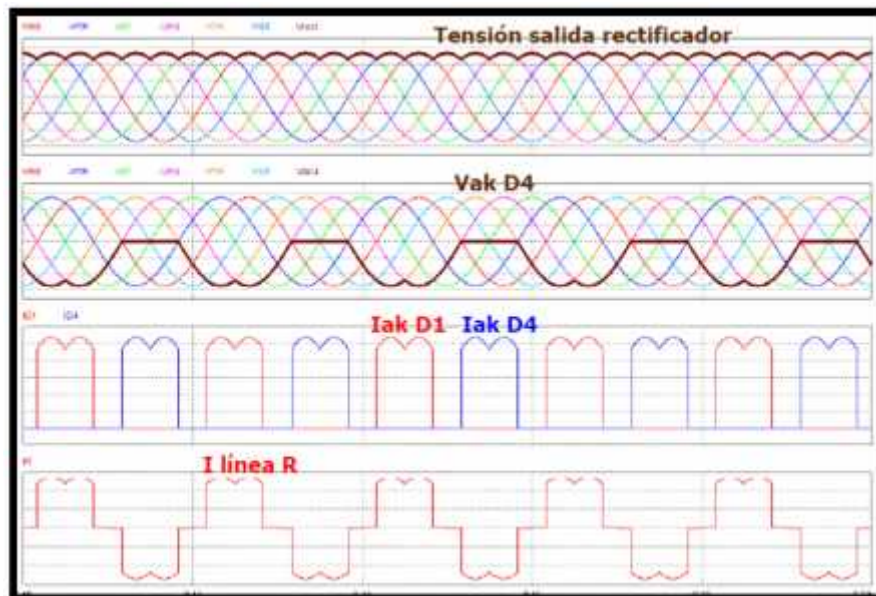
**Figura 4.30:** Señal rectificada para un ángulo de disparo  $=45^\circ$  con Carga RL [AUTOR]

Para la señal generada por la corriente se utiliza una resistencia de potencia 220  $\Omega$  /5W, que se conecta en serie con una de las fases el resultado de esta señal la podemos observar en la figura 4.31;



**Figura 4.31:** Señal de corriente puente rectificador trifásico [AUTOR]

En la figura 4.32 se observan las principales señales resultantes de un rectificar trifásico totalmente controlado, de esta forma se pueden compararla con la señales resultantes. En la figura 4.31 se tiene una señal referente a la corriente de alimentación y al compararla como la señal de referencia estas tienen mucha similitud concluyendo que la prueba fue favorables.



**Figura 4.32:** Señales de salida rectificadora trifásica carga R [5]

# Capítulo 5

## 5.1 Conclusiones Aportes y Recomendaciones

- Concluyendo el proyecto se deja en constancia, que el módulo de seis pulsos servirá para estudios posteriores de la electrónica de potencia, quedando la opción para que consecutivamente poder complementar el rectificador.
- Este proyecto será de mucha ayuda para el laboratorio de electrónica de potencia porque, servirá para realizar pruebas de control tanto en circuitos rectificadores monofásicos como trifásicos.
- Para el desarrollo se hizo un estudio riguroso del estado del arte buscando la mejor opción para su implementación teniendo en cuenta parámetros como, mejoramiento tecnológico, eficiencia al utilizar microcontroladores en lugar de circuitos analógicos y simplicidad.
- Al realizar el módulo con microcontroladores se obtiene una alta eficiencia del dispositivo por las características de desempeño que ofrecen estos.
- Se realizaron las pruebas de funcionamiento obteniendo resultados muy cercanos a las pruebas de simulación en Proteus 8.
- Se deben tomar precauciones antes realizar el manejo del dispositivo, utilizar las respectivas protecciones, y acatar las recomendaciones del docente para evitar daños en el equipo y lesiones personales.
- Es necesario un aislamiento entre el circuito de potencia y el circuito electrónico. La utilización de opto Triac para este aislamiento es sencillo y muy efectivo.
- Al momento de alimentar el dispositivo con la fuente DC realizarlo a 7.3 V ya que a esa tensión su funcionamiento es óptimo.
- Si se realiza conexión trifásica utilizar las respectivas protecciones y utilizar un secuencímetro para verificar la correcta conexión de las fases ya que sin la secuencia correcta el dispositivo no funcionara bien.

- Al utilizar el módulo de seis pulsos se recomienda alimentar con una tensión de 7.3V a 2A.
- Para futuras mejoras se recomienda añadir un filtro para mejorar la señal resultantes

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] OCHOA BYRON, PALMA EDGAR, VÁSQUEZ MARCELO “*Diseño De Un Rectificador Trifásico Totalmente Controlado De Onda Completa Con Tiristores de Potencia* “, universidad Laica de manta ecuador ,2009.
- [2] FREDY ALBERTO ROJAS ESPINOZA, CARLOS ALBERTO NIETO PIERUCCINI “diseño e implementación de un rectificador trifásico totalmente controlado con factor de potencia mejorado basado en tecnología CMOS y DSP” Universidad industrial de Santander, facultad de ingenierías físico-mecánicas, escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, Bucaramanga 2007.
- [3] DIEGO FERNANDO DEBÍA NARVÁEZ” Modelado de un convertidor CA/CC trifásico para el análisis de la distorsión armónica” Universidad Nacional de Colombia Facultad de ingeniería, Departamento de eléctrica, electrónica y computación Manizales, Colombia 2011.
- [4] FERNÁNDEZ, HERMAN FRANCO, ZULAY EGILDA ”USANDO EL ESPICHE ORIENTADO AL ANÁLISIS DE LOS CIRCUITOS DEL CONTROLADOR BOOSTER INSTALADO EN C.V. VEN ALUM “artículo Universidad Ciencia y Tecnología, Volumen 13, N° 51, junio 2009. Pg. 85-96
- [5] DISEÑO DIDÁCTICO DE UN RECTIFICADOR CONTROLADO TRIFÁSICO Víctor H. Campeón J., Claudio A. Lara R., Gregorio Moctezuma J., Gabriel G. Luna M. y Daniel U. Campos D. Facultad de Ciencias (SAÚL), Av. Salvador Nava s/n, Zona Universitaria, C.P. 78290, San Luis Potosí, S.L.P., México.
- [6] FREDY ALBERTO ROJAS ESPINOZA, CARLOS ALBERTO NIETO” Diseño e implementación de un rectificador trifásico totalmente controlado con factor de potencia mejorado basado en tecnología cmos y dsp “Universidad industrial de Santander, facultad de ingenierías físico-mecánicas, escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, Bucaramanga 2007.
- [7] LUIS CARLOS GARCÍA ALFARO” Diseño y construcción de un convertidor controlado CA-CD monofásico” Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica, Diciembre del 2005
- [8] DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE RECTIFICACIÓN CONTROLADO APLICADO A UN MOTOR DC, Revista Tecnológica. Vol. 15, No. 1, Diciembre 2002.
- [9] [www.academia.edu/7728470/CIRCUITOS\\_DE\\_DISPARO\\_DE\\_TIRISTORES\\_PARA\\_RECTIFICADORES\\_CONTROLADOS](http://www.academia.edu/7728470/CIRCUITOS_DE_DISPARO_DE_TIRISTORES_PARA_RECTIFICADORES_CONTROLADOS)



[10] <https://es.wikipedia.org/>

[11] <http://quidel.inele.ufro.cl/~jhuircan/CCOMPILER/Lenguaje%20C%20orientado%20a%20microcontroladores%20rev%201.pdf>

[12] <https://learn.mikroe.com/ebooks/microcontroladorespic/chapter/módulos-analogicos/>

[13] Quintero, Jorge. Módulo de electrónica industrial. (2008).Bogotá. Universidad Nacional.

[14] Gerardo Ramos Vásquez, Juan Francisco Hernández Medina, Carlos Ignacio García Sánchez INTRODUCCIÓN A MICROCONTROLADORES PIC CON C UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA.